



UNIVERSITE ABDEL HAMID IBN BADIS MOSTAGANEM
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT D'AGRONOMIE

THÈSE

Présentée par

GORINE MOHAMED

en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en sciences Agronomiques

Spécialité : Science du Sol et Environnement

***Etude et modélisation des processus hydrogéochimiques
de salinisation et de sodisation des sols. Cas des sols du
périmètre irrigué de la MINA (Relizane)***

Soutenue publiquement le 25 / 07 / 2021

Devant le jury compose de

Président	LARID	Mohamed	Pr	Université de Mostaganem
Directeur de thèse	BENKHELIFA	Mohammed	Pr	Université de Mostaganem
Examineur	HAMDI AISSA	Baelhadj	Pr	Université d'Ouargla
Examineur	HADDAD	Ahmed	Pr	C.U. El-Bayadh
Examineur	MORSLI	Boutkhil	MCA	I.N.R.F. Tlemcen
Examineur	BOUALEM	Abdelkader	MCA	Université de Mostaganem

Année universitaire : 2020-2021

Remerciements

*En premier lieu je tiens à remercier le **BON DIEU** qui m'a donné le courage pour accomplir ce modeste travail.*

*Je voudrais remercier tout particulièrement mon directeur de mémoire, Mr **M.BENKHELIFA**, Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem de m'avoir confié ce travail, pour son soutien et l'aide qu'il m'a apportée au cours de ce mémoire sans son appui je n'aurai pu mener à bien ce travail.*

*J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur **LARID** Mohamed professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem qui m'a fait l'honneur de juger ce travail et de présider le jury.*

Je tiens également à adresser mes vifs remerciements à Messieurs,

<i>HAMDI AISSA Baelhadj</i>	<i>Pr. Université d'Ouargla,</i>
<i>HADDAD Ahmed</i>	<i>Pr. Université d'El Bayadh,</i>
<i>MORSLI Boutkhal</i>	<i>M.C.A INRF Tlemcen et</i>
<i>BOUALEM Abdelkader</i>	<i>M.C.A Université de Mostaganem,</i>

pour m'avoir honoré de leur présence en acceptant de juger ce travail.

*J'adresse aussi mes remerciements à Monsieur **BOUDEROUA Kaddour**, directeur de l'Ecole Supérieur d'Agronomie de Mostaganem pour son aide morale et soutien, sans oublier mes collègues du laboratoire Ouest de l'INSID El Matmar Relizane pour leur aide et soutien, ce qui a permis la réalisation de ce modeste travail.*

*Je ne pourrai terminer ces remerciements sans y associer ma famille, mes amis Messieurs **KHATEM R., ZAIDI H., KRADIA L., GACEM F.** et beaucoup d'autres dont je ne cite pas le nom de peur d'en oublier certains, qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour leur aide et leur appui lors de la réalisation de ce travail.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A la mémoire de ma défunte mère Fatma,
qu'Allah le tout puissant l'accueille dans son vaste
paradis.*

*A mon père Bendhiba, pour ses encouragements, sa
patience et sa gentillesse. Il a quitté ce monde juste
avant la soutenance de cette thèse, je prie Allah le
tout puissant de l'accueillir dans son vaste paradis.*

A ma grande famille et mes enfants.

ملخص

يعتبر السهل المروي لمينا (غليزان) من أكثر المناطق تأثراً بظاهرة التملح الثانوي والصودية في الجزائر. في الواقع، فإن الجمع بين العوائق للبيئة (التربة المالحة والمناخ شبه الجاف) والإدارة المائية الزراعية (إدارة الري والصرف) هي العوامل التي نشأت عن عمليات التملح والصودية. وهذا يؤدي إلى تدهور سريع في الخصائص الفيزيائية للتربة وقدرتها الإنتاجية.

يركز العمل الحالي على تشخيص الظواهر الهيدروجيوكيميائية التي تحدث أثناء دورات السقي والجفاف وتفاعلاتها من أجل فهم تطورها وتأثيرها على خصائص التربة المرتبطة بجودة مياه الري. بالإضافة إلى فهم عمليات التملح والصودية، من المهم إيجاد نموذج لهذه الظواهر لتكون قادرة على التنبؤ بآثارها على التربة والموارد المائية وبالتالي تكون قادرة على تحسين إدارة التربة المائية والزراعية في المناطق المروية.

تظهر النتائج الرئيسية لهذا العمل أن التربة المدروسة مالحة إلى شديدة الملوحة مع أخطار عالية للقلونة. كلوريد الصوديوم هو المسيطر و مترجم في بعض آفاق خفض منسوب المياه الجوفية. في ظل هذه الظروف، يرتبط الصوديوم بالسطوح الكيميائية لنوع كلوريد الصوديوم وكبريتات الصوديوم في جميع عينات التربة المدروسة.

الكلمات المفتاحية: سهل مينا المروي، تملح، الصودية، نموذج، عمليات هيدروجيوكيميائية

Summary

The irrigated plain of the Mina (Relizane) is one of the most affected by the phenomenon of secondary salinisation and sodisation in Algeria. Indeed, the combination of the natural constraints of the environment (saline soils and semi-arid climate) and hydro-agricultural management (irrigation-drainage management) are the factors at the origin of the salinization and sodisation processus. This leads to a rapid degradation of the physical properties of the soils and their productive capacity.

The present work focuses on the diagnosis of hydrogeochemical phenomena that occur during the humidification-desiccation cycles and their interactions in order to understand their evolution and their effects on soil properties linked to irrigation water quality. In addition to understanding the processes of salinization and sodisation, it is important to model these phenomena in order to be able to predict their effects on soil and water resources and thus be able to optimize hydro-agricultural soil management in irrigated perimeters.

The main results of this work show that the soils studied are salty to very salty with a high risk of alkalization. Sodium chloride is dominant and is localized in some water table lowering horizons. Under these conditions, the sodicity is allied to chemical facies of the sodium chloride and sodium sulphate type in all the samples of the soils studied.

Key words: Mina irrigated plain, salinization, sodisation, modelling, hydrogeochemical processes.

Résumé

La plaine irriguée de la Mina (Relizane) est l'une des plus touchées par le phénomène de salinisation secondaire et de sodisation en Algérie. En effet, la combinaison des contraintes naturelles du milieu (sols salsodiques et climat semi-aride) et la gestion hydro-agricole (conduite de l'irrigation-drainage) constituent les facteurs à l'origine des processus de salinisation et de sodisation. Il s'ensuit une dégradation rapide des propriétés physiques des sols et leur capacité de production.

Le présent travail porte sur le diagnostic des phénomènes hydrogéochimiques qui se produisent au cours des cycles d'humectation-dessiccation et leurs interactions en vue de comprendre leurs évolutions et leurs effets sur les propriétés des sols en rapport avec la qualité de l'eau d'irrigation. Outre, la compréhension des processus de salinisation et de sodisation, il importe de modéliser ces phénomènes pour pouvoir prédire leurs effets sur les ressources en sols et en eaux et donc pouvoir optimiser la gestion hydro-agricole des sols dans les périmètres irrigués.

Les Principaux résultats montrent que les sols étudiés sont salés à très salés avec un risque d'alcalinisation élevé. Le chlorure de sodium est dominant et se localise dans certains horizons de rabattement de la nappe. Dans ces conditions, la sodicité s'apparente à un faciès chimique de type chloruré sodique et sulfaté sodique dans tous les échantillons des sols étudiés.

Mots clés: Plaine irriguée de la Mina, salinisation, sodisation, modélisation, processus hydrogéochimiques.

Liste des abbréviations

ANRH : Agence nationale des ressources hydrauliques

CEemax : CEeps du sol qui entrainerait une chute totale du rendement

CEeps : Concuctivité électrique de l'extrait de pâte saturée

CEepsm : Conductivité électrique moyenne de la pate saturée

CEi : Conductivité électrique de l'eau d'irrigation

CEM : Conductivité electromagnétique

CPCS : Commission de Pédologie et des Cartographie des Sols

DL : Dose de lessivage

ETM : Evapotranspiration maximale

FAO : Food and Agriculture organisation

HCC : Humidité à la capacité au champs

LR : lavage requis

MH : Conductivité électromagnétique moyenne horizontale

MH : Conductivité électromagnétique moyenne horizontale

WRP : World Référence Base

Liste des tableaux

Tableau 1 : Données pluviométriques de la station ANRH Relizane (1988-2013).....	20
Tableau 2 : Températures mensuelles des minis et maxis en °C (ANRH Relizane, 1988-2013).....	21
Tableau 3. Salinité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda-Relizane (ANRH, 2003).....	28
Tableau 4 - Qualité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda – Relizane (insid, 2008).....	28
Tableau 5. Répartition des superficies irriguées entre les différentes spéculations pratiquées (INSID, 2008)	30
Tableau 6. Répartition de l'occupation du sol, dans le périmètre de la Mina (INSID, 2008)	30
Tableau 7 : Echelle de salure en fonction de la CE de l'extrait aqueux 1/5 (U.S. S. L. Staff. 1954)	41
Tableau 8 : Echelle de salure de la CEps (US Salinity Laboratory) (U.S. S. L. Staff. 1954).....	41
Tableau 9: Correspondances entre les classifications CPCs et WRB des sols salsodiques (Legros, 2004)	46
Tableau 10 : Classification des eaux d'irrigation (Daoud et al., 1984 in Slama 2004)	47
Tableau 11 : Classes des eaux dans la plaine de la Mina.....	50
Tableau 12 : Valeurs limites pour la mesure du qi (Ayers et Westcot, 1999)	55
Tableau 13 : Poids des paramètres de l'IWQI	56
Tableau 14 : Caractéristiques des classes de l'indice de la qualité de l'eau	56
Tableau 15. Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de la plaine de la Mina	57
Tableau 16 : Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil B	72
Tableau 17: Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil A	74
Tableau 18: Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil C	76
Tableau 19. Classes d'intensité du coefficient de variabilité (Nolin et al, 1997).	80
Tableau 20 : Résultats de l'analyse granulométrique	83
Tableau 21: Valeurs de la densité apparente.....	83
Tableau 22 : Résultats statistique de l'humidité et de déficit hydrique pendant la première campagne	84
Tableau 23 : Résultats statistique de l'humidité et de déficit hydrique pendant la deuxième campagne	84
Tableau 24 : Paramètres statistiques des humidités de l'horizon H1 de la campagne 1 et 2.....	85
Tableau 25 : Paramètres statistiques des humidités de l'horizon H2 pour les deux campagnes 1 et 2 ..	86
Tableau 26: Paramètres statistiques des humidités de l'horizon H3 de la campagne 1 et 2.....	86
Tableau 27 : Salinité totale (CEps) des horizons durant la 1ère campagne en dS.m-1	89

Tableau 28 : Salinité totale (CEeps) des horizons durant la 2 ^{ème} campagne en dS.m ⁻¹	92
Tableau 29: Paramètres du modèle de variogramme de l'horizon pendant la campagne 1.....	94
Tableau 30: Paramètres du modèle de variogramme de l'horizon durant la seconde campagne	96
Tableau 31 : Propriétés du sol de la parcelle d'étude	115
Tableau 32: Paramètres hydrauliques du sol obtenus sur Hydrus-1D (modèle d'écoulement à porosité unique.....	116

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.....	19
Figure 2: Histogramme de la pluviométrie, station ANRH Relizane (1988- 2013)	20
Figure 3 : Histogramme des températures (ANRH Relizane, 1988-2013)	21
Figure 4 : Diagramme ombrothermique, (ANRH Relizane, 1988-2013)	22
Figure 5. Climagramme pluviométrique d'Emberger, station ANRH Relizane (1988-2013)	23
Figure 6: Carte des sols de la zone d'étude (extrait de la carte des sols d'Algérie, Boulaine, 1955)	29
Figure.7 : Répartition végétatif du périmètre de la Mina.....	31
Figure 8. Superficies des sols affectées par la salinisation dans certaines régions du monde en milliers de km ² (FAO, 2006)	34
Figure 9 : Processus de la salinisation et ses impacts sur la dégradation des sols et des cultures.	36
(Tabet, 1999).....	36
Figure 10 : Evolution des concentrations selon la loi T (Valles et al., 1989).....	45
Figure 11 : Evolution schématique des concentrations des ions de la solution du sol en fonction du facteur de concentration	45
Figure 12 : Diagramme de Riverside des eaux d'irrigation	49
Figure 13 : Carte thématique de l'aptitude des eaux souterraines de la zone d'étude	51
Figure 14 : Classes d'aptitude des eaux souterraines.....	52
Figure 15 : Carte de l'IWQI des eaux souterraines de la zone d'étude	53
Figure 16 : Répartition spatial des classes de salinité des eaux souterraines	58
Figure 17 : Superficie de sol pour chaque classe de SAR.....	58
Figure 18 : Répartition spatial des classes de SAR des eaux souterraines	59
Figure 19: Chronogramme méthodologique de l'approche adoptée	64
Figure 20: Localisation du site d'étude	65
Figure 21: Plan d'échantillonnage sur le site d'étude.....	66
Figure 22: Appareil utilisé pour les mesures de la conductivité électromagnétique (EM-38).....	66
Figure 23: Principe de la mesure de CEM (d'après McNeill, 1980)	67
Figure 24: EM38 en mode vertical et en mode horizontal	68
Figure 25: Dispositif de Muntz à double anneau pour la mesure de l'infiltration	68
Figure 26 : Evolution de l'infiltration en fonction du temps.....	69

Figure 27: Schéma du principe de fonctionnement du réseau d'irrigation goutte à goutte	69
Figure 28 : Zones d'implantation des profils pédologiques.....	70
Figure 29: Image schématique du profil B	71
Figure 30: Accumulations des sels	71
Figure 31: Répartition moyenne des cations et des anions dans la solution du sol du profil B.....	72
Figure 32: Image schématique du profil A.....	74
Figure 33: Répartition moyenne des cations et des anions dans la solution du sol du profil A.....	75
Figure 34: Image schématique du profil C	76
Figure 35: Répartition moyenne des cations et des anions dans la solution du sol du profil C.....	77
Figure 36: Déficit hydrique 1er campagne	85
Figure 37: Déficit hydrique 2ème campagne.....	85
Figure 38 : Variation d'humidité de l'horizon H3 des campagnes 1 et 2	87
Figure 39 : Droite de corrélation entre CEMH et CEpsm 1er campagne avant irrigation.....	88
Figure 40 : Droite de corrélation entre CEMH et CEpsm 1er campagne 1ère irrigation.....	88
Figure 41: Droite de corrélation entre CEMH et CEpsm 1er campagne 2ème irrigation.....	89
Figure 42 : Droite de corrélation entre CEMH et CEpsm 2ème campagne avant irrigation	89
Figure 43: Droite de corrélation entre la CEMH et CEpsm 2 ^{ème} campagne 1er irrigation	89
Figure 44: Droite de corrélation entre la CEMH et CEpsm 2 ^{ème} campagne 2ème irrigation.....	89
Figure 45 – Evolution des valeurs maxi et mini de la CEps durant la première campagne à la suite des irrigations et pour les trois horizons H1, H2 et H3 du profil du sol	90
Figure 46 – Evolution des valeurs moyennes de la CEps durant la première campagne à la suite des irrigations et pour les trois horizons H1, H2 et H3 du profil du sol	91
Figure 47 – Evolution des valeurs maxi et mini de la CEps durant la première campagne à la suite des irrigations et pour les trois horizons H1, H2 et H3 du profil du sol	93
Figure 48 – Evolution des valeurs moyennes de la CEps des 16 échantillons pour les horizons H1, H2 et H3 du profil du sol durant la deuxième campagne à la suite des irrigations successives.....	93
Figure 49 : Modèle du variogramme de l'horizon avant l'irrigation.....	95
Figure 50 : Modèle du variogramme de l'horizon après la 1ere l'irrigation.....	95
Figure 51 : Modèle du variogramme de l'horizon après la 2ème irrigation.....	96
Figure 52 : Modèle du variogramme de l'horizon avant l'irrigation.....	97
Figure 53 : Modèle du variogramme de l'horizon après la 1ere l'irrigation.....	98

Figure 54 : Modèle du variogramme de l'horizon après la 2ème irrigation.....	98
Figure 55 : Carte de salinité avant l'irrigation.....	101
Figure 56: Carte de salinité après la 1ère irrigation	101
Figure 57: Carte de salinité après la 2ème irrigation.....	102
Figure 58: Carte de salinité avant l'irrigation.....	103
Figure 59: Carte de salinité après la 1ère irrigation	104
Figure 60 : Carte de salinité après la 2ème irrigation.....	105
Figure 61: Distribution des superficies en salinité pendant la 2ème campagne.....	106
Figure 62: Modèle conceptuel d'équilibre physique pour l'écoulement de l'eau et le transport de soluté dans un système à porosité unique (Simunek et al., 2005).....	111
Figure 63: Paramètres de choix pour activer le processus de simulation de l'écoulement dans le programme HYDRUS-1D 2009	116
Figure 64: Paramètres de choix des données temporelles dans le programme HYDRUS-1D 2009.....	117
Figure 65: Fenêtre de dialogue des paramètres de débit d'eau (Hydrus - 1D 2009, manuel de l'irrigation)	118
Figure 66: Paramètres d'équilibre du modèle de transport des solutés dans HYDRUS 1D 2009.	119
Figure 67: Paramètres de choix des données de transport des solutés dans HYDRUS 1D 2009.	120
Figure 68: Variation la hauteur de pression en fonction de la profondeur.....	122
Figure 69: Variation de la teneur en eau volumique du profil de sol.....	122
Figure 70: Variation de la conductivité hydraulique saturée du profil de sol	123
Figure 71: Profile d'information sur la concentration du sol.....	124

Sommaire

<i>Remerciements</i>	2
<i>Dédicace</i>	3
<i>ملخص</i>	4
<i>Summary</i>	5
<i>Résumé</i>	6
<i>Liste des tableaux</i>	8
<i>Liste des figures</i>	10
<i>Sommaire</i>	13
PREMIERE PARTIE ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	16
<i>Introduction</i>	17
CHAPITRE I - PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	18
<i>Situation géographique</i>	19
<i>Conditions climatiques</i>	20
Pluviométrie.....	20
Température.....	21
Diagramme ombrothermique de Gaussen.....	21
Humidité relative.....	22
Vent.....	22
Gelée.....	22
Sirocco.....	22
Climagramme d'Emberger.....	23
CHAPITRE II - CARACTERISATION DU MILIEU	25
<i>Géologie</i>	26
<i>Géomorphologie</i>	26
<i>Hydrogéologie</i>	27
<i>Pédologie</i>	28
<i>Topographie</i>	30
<i>Occupation du sol</i>	30
CHAPITRE III - PHENOMENES DE SALINISATION ET DE SODISATION DES SOLS DANS LES PERIMETRES IRRIGUES	32
<i>Salinité et sodicité des sols</i>	33
Répartition des sols salsodiques dans le monde.....	33
Sols salsodiques en Algérie.....	34
Processus de salinisation et de sodisation des sols.....	35
Salinisation et dégradation des sols.....	36
Contraintes d'évaluation de la salinité et de la sodicité des sols.....	37
Méthodes de mesure in situ.....	37
Echantillonnage.....	38
Extrait dilué.....	38
Extrait de la pâte saturée.....	38
Méthodes géophysiques in situ.....	39
Conductivité électrique apparente du sol CEa.....	39
Résistivité électrique.....	39
Diagnostic de la salinité et de la sodicité des sols dans les périmètres irrigués.....	40
Indicateurs physico-chimiques.....	40
Conductivité électrique (CE).....	41
Sodicité (SAR).....	41
Pourcentage de sodium échangeable (ESP) et alcalinisation.....	42
Relation entre le SAR et l'ESP.....	43

Précipitation et dissolution des minéraux	44
Classification des sols salsodiques	45
Classification C.P.C.S (1967)	45
Classification WRB (World Référence Base)	46
Classification de l'US Department of Agriculture (USDA)	46
Contraintes de la qualité des eaux en agriculture irriguée.....	47
Concentration saline totale	47
Estimation de la qualité des eaux d'irrigation	48
Méthode de Riverside	49
Alcalinité résiduelle des eaux d'irrigation.....	50
Carte d'aptitude des eaux d'irrigations par la méthode d'intersection entre la carte de la CE et la carte du SAR	50
Carbonate de Sodium Résiduel (RSC)	53
Indice de la qualité de l'eau d'irrigation (IQWI).....	54
Classification des eaux d'irrigation	57
Statistiques descriptives	57
Approche énergétique de la salinité des sols	59
Conclusion	60
DEUXIEME PARTIE – ETUDE EXPERIMENTALE	62
CHAPITRE IV – MATERIEL ET METHODES	63
<i>Méthodologie de travail</i>	64
<i>Matériels</i>	66
Conductivimètre électromagnétique (EM 38)	66
Double cylindre de Siegrist (mesure de la CHs)	68
Global Positionning system (GPS).....	69
Système d'irrigation.....	69
<i>Méthodes</i>	70
Localisations des profils pédologiques	70
Description du profil B.....	70
Données générales.....	70
Description morphologique	71
Description du profil A	73
Données générales.....	73
Description morphologique	73
Description du profil C.....	75
Données générales.....	75
Description morphologique	75
Méthodes d'analyses.....	77
Analyse granulométrique	77
Densité apparente.....	77
Humidités pondérale et volumique.....	77
Dose pratique d'irrigation	78
CE de l'extrait de la pâte saturée	79
Etude de la variabilité spatiale de la salinité	79
Coefficient de variation.....	80
Régression linéaire et corrélation	80
CHAPITRE V - RESULTATS ET DISCUSSIONS	82
<i>Paramètres physico-chimiques du sol</i>	83
Analyse granulométrique	83
Densité apparente	83
Humidité	83
Variation de l'humidité H pour les deux campagnes.....	85
Variation de H dans le premier horizon	85
Variation de H dans le deuxième horizon	85

Variation de H dans le troisième horizon	86
Salinité totale du sol	87
Conductivité électromagnétique et conductivité électrique	88
Distribution de la salinité dans les horizons	89
Première campagne	89
Deuxième campagne.....	91
<i>Cartographie de la salinité</i>	93
Analyse variographique des résultats de la première campagne	94
Structure du semi-variogramme de la salinité moyenne avant l'irrigation	94
Structure du semi-variogramme de la salinité moyenne après la 1 ^{ère} irrigation	94
Structure du semi-variogramme de la salinité moyenne après la 2 ^{ème} irrigation	95
Analyse variographique des résultats de la 2 ^{ème} campagne	96
Structure du semi-variogramme de la salinité avant irrigation	96
Structure du semi-variogramme de la salinité moyenne après la 1 ^{ère} irrigation	96
Structure du semi-variogramme de la salinité moyenne après la 2 ^{ème} irrigation	97
<i>Etablissement des cartes de la salinité</i>	100
Spatialisation des cartes de la première campagne	100
Distribution de la salinité avant l'irrigation	100
Distribution de la salinité après la première irrigation	100
Distribution de la salinité après la deuxième irrigation.....	102
Spatialisation des Cartes de la deuxième campagne	102
Distribution de la salinité avant l'irrigation	102
Distribution de la salinité après la première irrigation	103
Distribution de la salinité après la deuxième irrigation	104
<i>Modélisation hydrodynamique des solutés dans les sols salsodiques</i>	108
Présentation des modèles	108
Composante du modèle.....	109
Débit d'eau dans la zone non saturée	109
Écoulement dans un système à porosité unique.....	111
Propriétés du sol et débit d'eau non saturée	111
Caractéristiques de l'humidité du sol	113
Conductivité hydraulique	114
Développement du modèle HYDRUS-1D	115
Données d'entrée.....	115
Propriétés hydrauliques du sol.....	115
Contaminants en sels	115
Informations sur la géométrie.....	117
Modèle des propriétés hydrauliques du sol.....	118
Transport des Solutés.....	119
Informations générales	119
Paramètres de transport des solutés.....	119
Données de sorties	120
Post-traitement	120
Limitations du modèle.....	120
Analyse des données.....	121
Hauteur de pression.....	121
Teneur en eau volumique du sol.....	122
Conductivité hydraulique saturée.....	122
Concentration du sol.....	123
<i>Conclusion</i>	126
<i>Références bibliographiques</i>	129

Première partie
Etude
Bibliographique

Introduction

La salinité est l'un des plus grands problèmes, dans les environnements arides et semi-arides du monde (Navarro et al, 2007). Elle est considérée comme l'une des principales contraintes environnementales auxquelles l'agriculture moderne est confrontée. Elle est reconnue comme l'une des menaces principales à la durabilité des périmètres irrigués de notre siècle (Dounia, 1999).

En Afrique, près de 40 Mha sont affectés par la salinisation, soit près de 2% de la surface totale.

En Algérie, plus de 20% des sols irrigués sont concernés par le problème de salinité (Douaoui et Hartani, 2007). Dans l'ouest Algérien, plusieurs périmètres irrigués sont soumis à de graves problèmes qui se traduisent par une dégradation des sols et une baisse de productivité, en l'occurrence la remontée de la nappe phréatique, la salinisation des sols et une progressive réduction des rendements. 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). Selon Saidi (2004), la production agricole, elle est limitée par de faibles ressources hydrauliques, une mauvaise répartition des précipitations et par des teneurs élevées en sel solubles dans les sols et les eaux.

La plaine irriguée de la Mina (Relizane) est l'une des plus touchées par le phénomène de salinisation secondaire en Algérie. En effet, la gestion hydro-agricole (conduite de l'irrigation- drainage) constitue un facteur pertinent dans le processus de salinisation et de sodisation des sols.

L'objectif dans ce cas, d'étudier un phénomène de salinisation et de sodisation sur une parcelle planter en jeune plantation d'olivier soumet à l'irrigation goutte à goutte et de comprendre les processus géochimiques qui interviennent dans ces sols. Une bonne compréhension de ces phénomènes doit être suivie par une modélisation des processus hydrogéochimiques de la salinisation et de sodisation des sols. Ceci est de nature à permettre de prédire le comportement des sols dans le temps et donc de prévenir leur dégradation par une optimisation de leur gestion hydro agricole.

Chapitre I - Présentation de la zone d'étude

Le périmètre irrigué de la Mina, crée en 1943, occupe une superficie totale de 13647 ha, dont 9592 ha sont irrigables sur les 10580 ha, soit 90 % de la SAU. Il est situé dans la vallée du plus grand affluent du Chélif (Oued Mina). Il est traversé par la route nationale N°4.

La partie centrale du périmètre se trouve dans le nord de l'Oued Mina qui coule vers le Nord et se jette dans l'Oued Chélif. La partie Ouest du périmètre s'étend à gauche et à droite de la route menant à la ville d'Oran et comprend le voisinage immédiat de la ville d'El Matmar. La partie Est s'étend à gauche et à droite de la route menant vers la ville de Chlef et comprend les environs de la localité de la ville d'Oued Djemaa.

Situation géographique

La zone d'étude, d'une superficie d'environ de 0,5ha, est située à l'Ouest du chef-lieu de la wilaya de Relizane d'une distance de 03 km et 2 km à l'Est de la ville d'El Matmar. La région d'étude est implantée dans un vaste étendu du périmètre irrigué de la Mina, qu'on appelle le Gâa. (Figure 1)

Les coordonnées géographiques de la zone d'étude sont :

Longitudes : $0^{\circ}29'35''$ et $0^{\circ}29'46''$

Latitudes : $35^{\circ}43'56''$ et $35^{\circ}44'9''$

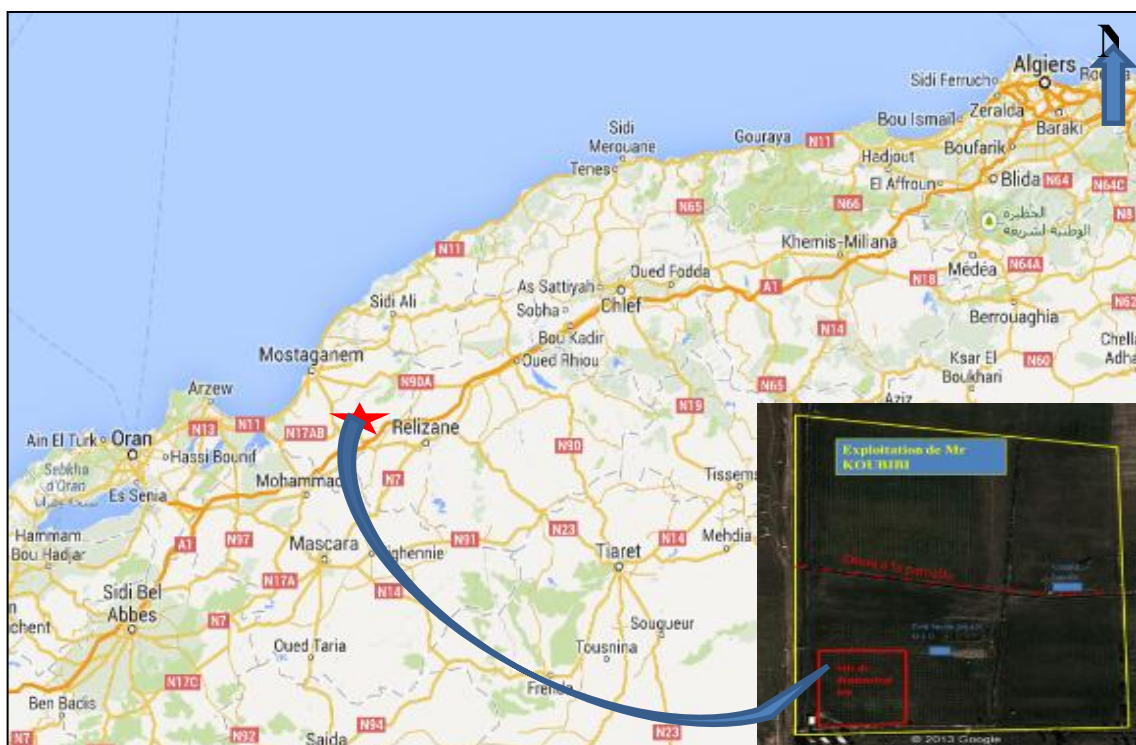


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

Conditions climatiques

L'observation du climat de la Mina est effectuée sur la base des données de la station climatique de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). Ces données climatiques couvrent une période de vingt-cinq ans, allant de 1988 à 2013. Le périmètre de la Mina appartient à l'étage bioclimatique aride d'hiver moins tempéré et très froid et d'été très chaud. Les coordonnées géographiques de la station climatique du barrage de sidi M'hamed Benaouda sont les suivantes :

Longitude E = 304,3 km Latitude N = 272,2 km Altitude Z = 75m

Pluviométrie

L'analyse pluviométrique de la région de la Mina déduite à partir des précipitations (Tableau 1 et figure 2) est résumée par les points suivants sur la période 1988 à 2013 :

- Le mois de novembre est le mois le plus pluvieux (43,5 mm) sur une moyenne de vingt-cinq ans.
- Le mois de juillet enregistre la plus faible pluviosité dans l'année avec une pluviométrie égale à 1,9 mm (figure 2).
- Bien que la période estivale soit la moins pluvieuse dans l'année, celle-ci enregistre des pluies tombant sous forme d'averses de forte intensité. Ces pluies interviennent en période hivernale comme en période estivale, dans le processus de dégradation et d'érosion du sol.

Tableau 1 : Données pluviométriques de la station ANRH Relizane (1988-2013)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Pluie mm	30,62	33,99	30,65	38,31	23,89	7,36	1,90	4,25	12,63	22,80	43,5	31,32	281,21

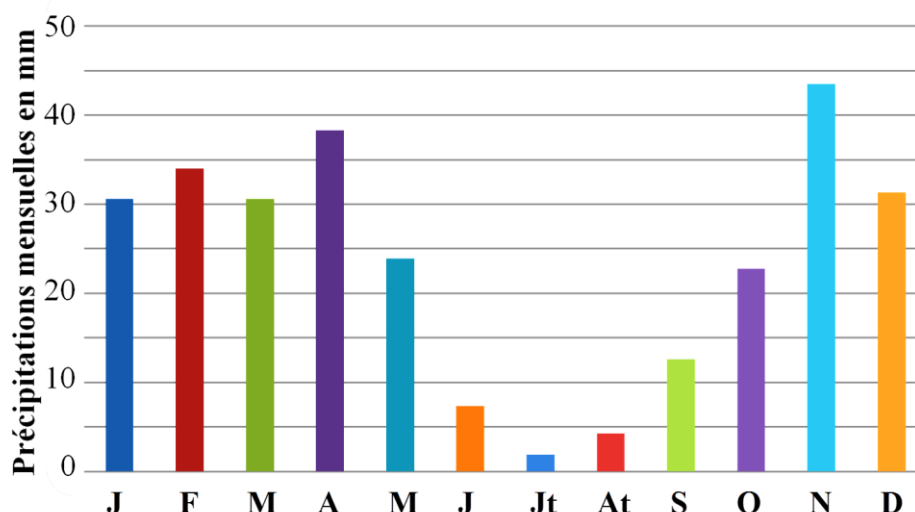


Figure 2: Histogramme de la pluviométrie, station ANRH Relizane (1988- 2013)

Températures

La température élevée est enregistrée au mois d'août et juillet au niveau de la station ANRH (fig. 3). Elle atteint 30,11 °C sous abri durant le mois d'Aout, ce qui correspond à une forte évaporation et une remontée capillaire de la nappe phréatique qui se trouve parfois à 1m de profondeur et par conséquent les sels se concentrent sur la surface des sols avec saturation des complexes absorbant par le sodium échangeable. La température moyenne la plus faible est enregistrée durant le mois de janvier 11,30°C.

Tableau 2 : Températures mensuelles des minis et maxis en °C (ANRH Relizane, 1988-2013)

Mois / paramètres	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D	Moy
T. moy. minis (°C)	6,12	5,82	8,15	10,10	13,78	17,56	20,85	21,61	18,18	14,74	9,89	7,05	12,82
T. moy. maxis (°C)	16,50	17,56	21,14	24,28	28,90	34,34	38,33	38,70	32,24	28,04	21,08	17,74	26,57
T. moy. (°C)	11,30	11,71	14,63	16,39	21,36	25,92	29,58	30,11	25,14	21,39	15,46	12,41	19,62

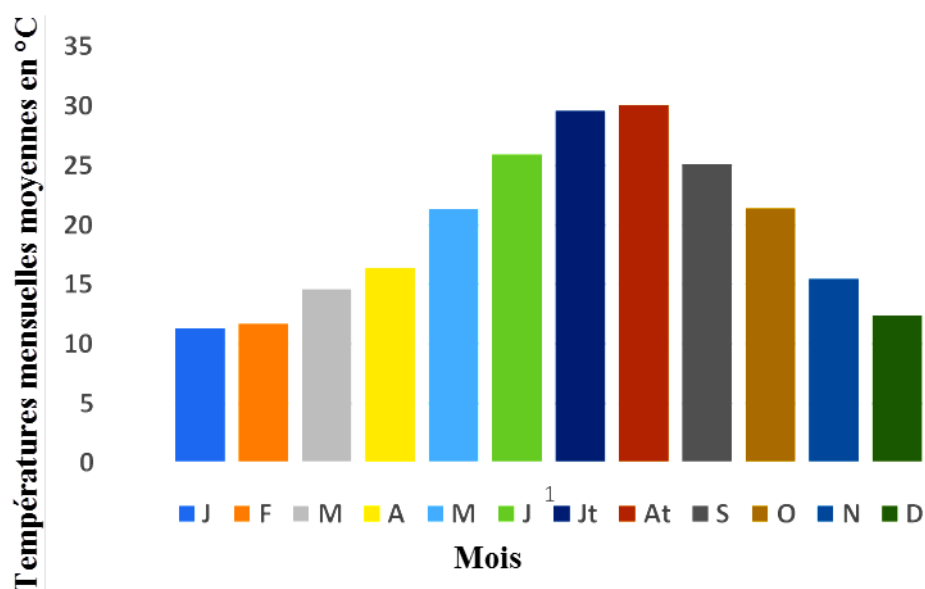


Figure 3 : Histogramme des températures (ANRH Relizane, 1988-2013)

Diagramme ombrothermique de Gaussen

Le diagramme ombrothermique de Gaussen permet de calculer la durée de la saison sèche. Il tient compte de la pluviosité moyenne mensuelle et la température moyenne mensuelle de la station de l'ANRH de Relizane, entre 1988 et 2013, qui sont portées sur des axes où l'échelle de la pluviosité est double de la température. Cette allure permet de constater que la période sèche s'étale sur le long de l'année avec une intense sécheresse de sept mois, allant du mois d'Avril au mois d'octobre. Cette période se caractérise par une forte évapotranspiration avec des irrigations intense pour satisfaire les besoins des cultures (Figure 4)

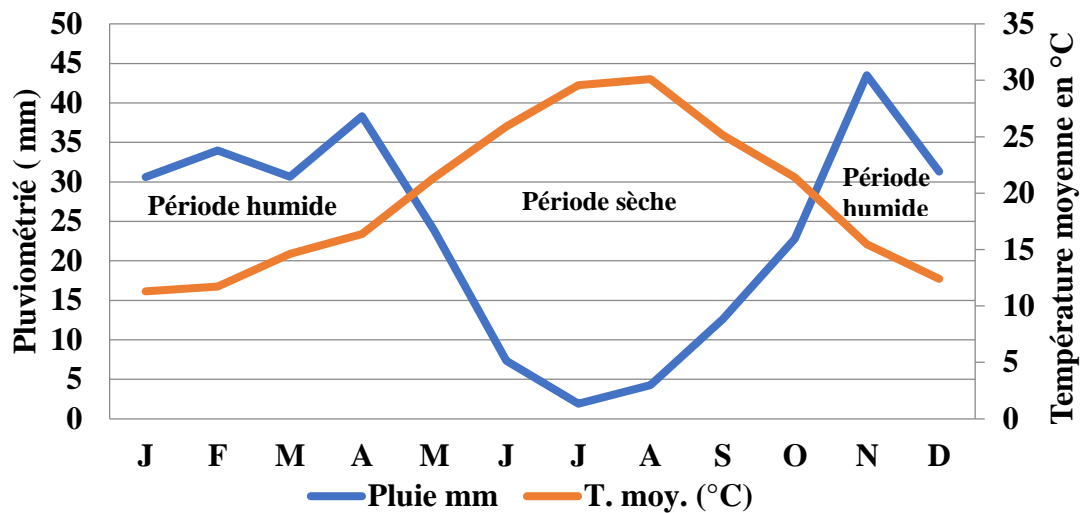


Figure 4 : Diagramme ombrothermique, (ANRH Relizane, 1988-2013)

Humidité relative

L'humidité relative de l'air est généralement plus élevée le matin pour tous les mois. Elle se situe entre 60 et 75 % en hiver et près de 35 % en été, ceci s'explique par l'effet de la température qui est élevée en été et baisse en hiver. Le mois le plus humide est le mois de décembre, en revanche, le mois le plus sec est le mois d'août.

Vents

La connaissance de leur direction, force et fréquence est importante pour la mise en valeur agricole d'un périmètre. Pendant les mois du septembre à avril, les vents froids sont dominants du secteur Sud à Sud-Est et les mois de mai à Août se caractérisent par les vents chauds du secteur Ouest.

Gelées

Le problème des gelées est important pour les cultures surtout maraîchères. Elles sont liées aux températures. Les données des mois de décembre, janvier et février montrent que la température moyenne brute des minima descend au-dessous de 0°C. Le nombre de jours de gelées blanchâtres est estimé à environ 40 jours par an.

Sirocco

Comme les gelées, le sirocco est particulièrement important en été particulièrement durant les mois de juillet et août. On estime à 20 jours, la période moyenne annuelle du sirocco dans le périmètre de la Mina.

Climagramme d'Emberger

Ce climagramme permet, grâce au quotient pluviométrique de **Stewart (Q)** spécifique au climat méditerranéen, de situer une zone d'étude dans un étage bioclimatique.

Ce quotient tient compte des précipitations et des températures est déterminé comme suit :

$$Q = 3,43 \times \frac{P}{M - m}$$

- Q : le quotient pluviométrique d'Emberger ;
- P : Pluviométrie annuelle moyenne en mm = 281,21 mm
- M : Moyenne maximale du mois le plus chaud = 38,7 °C
- m : Moyenne minimale du mois le plus froid = 5,82 °C

Après application de la formule, nous obtenons la valeur de Q égale à 29,33, ce dernier situe la région de Relizane dans l'étage Aride (Fig. 5).

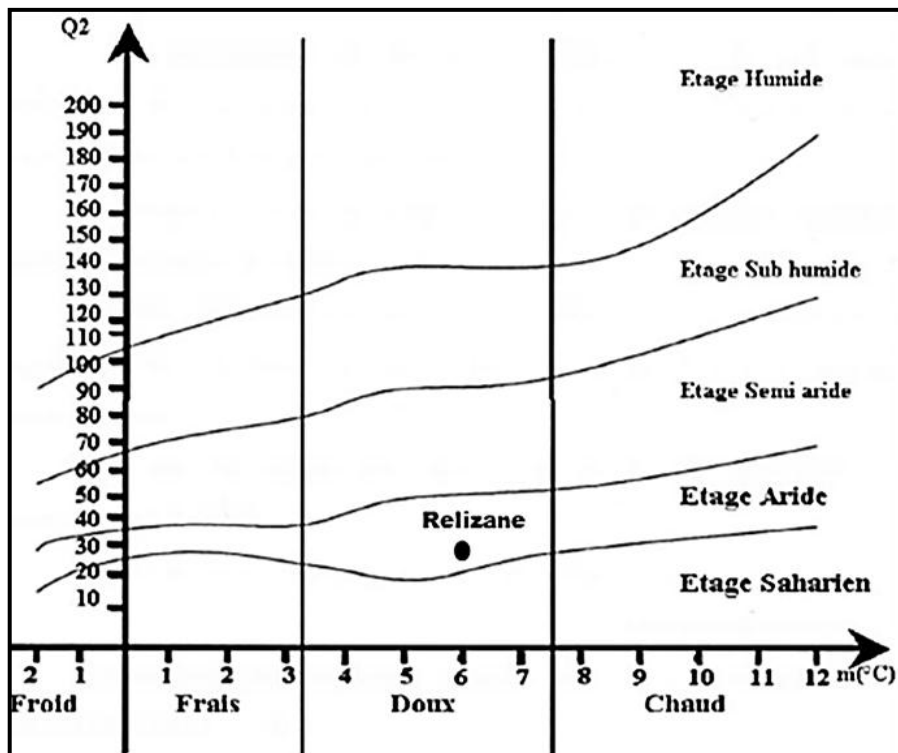


Figure 5. Climagramme pluviométrique d'Emberger, station ANRH Relizane (1988-2013)

En résumé, la plaine de la Mina est caractérisée par un climat continental du fait de sa position en cuvette entourée de massifs montagneux très chaud en été et très froid en hiver et une faible pluviométrie moyenne annuelle de 281 mm irrégulièrement répartie d'une année à l'autre (par exemple 428 mm en 2012 et 388 mm en 2013).

L'évapotranspiration de référence moyenne annuelle est de 1639 mm sur une période de 25 ans selon l'ONM (Office National de la Météorologie) d'Oran. Etant donné la faiblesse et l'irrégularité des

précipitations dans la région située à l'étage bioclimatique aride ($Q_{\text{Emberger}} = 29,33$), le recours à l'irrigation est nécessaire pour non seulement combler les besoins en eau des cultures mais aussi pour apporter des doses supplémentaires d'eau de lessivage des sels en profondeur en dehors de la zone racinaire.

Chapitre II - Caractérisation du milieu

Géologie

Le site d'étude fait partie de la plaine du Mina. Cette plaine est une région de subsidence, des mouvements orogéniques atlasiques qui, depuis la fin de l'Eocène, semblent se poursuivre jusqu'à l'heure actuelle (**Tinthoin, 1954**).

Au Nord-Ouest, par les monts de Bel-Hacel qui sont formés, dans leur partie drainée vers la plaine de grès pliocènes et de désagrégation de ces grès (sables du plateau de Mostaganem) qui peuvent donner des dunes (région Nord-est de Hillil), le piedmont de cette zone est encroûté (croûte calcaire).

Au Sud, les monts de Guerbouça sont formés de grès dans leur partie occidentale et de grès et marnes pliocènes. Ces formations se raccordent à la plaine par un glacis encroûté.

Au Sud et à l'Est, la vallée est bordée de massifs érodés de marnes Miocènes (Helvétienes) à petits cristaux de gypse.

Au niveau de la confluence de l'Oued Mina et de l'Oued Malah, la vallée est bordée à l'Ouest par les collines de Relizane formées de grès et de poudingues et localement encroûtées.

Sur la partie Sud et Sud-Ouest de Oued Djemâa, les affleurements de marnes et d'argiles miocènes, se raccordent à la plaine de Relizane par un glacis de piedmont ancien, recouvert d'une croûte calcaire. A l'Est et au Sud-est, les monts environnants sont formés de marnes et argiles miocènes.

Géomorphologie

On peut distinguer 4 types de formations géomorphologiques dans la plaine de la Mina :

a)- Les glacis de piedmont

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

- Ces glacis encroûtés entourent la plaine d'Hillil, la plaine de Touila-Khaourara et forment le piedmont en bordure de la plaine de l'oued Djemaa. Un lambeau de glacis encroûté isolé est localisé entre les oueds Mina et Malah, au sud de la confluence.

- A ces glacis de piedmont encroûtés peuvent être emboîtés vers l'aval des glacis plus récents colluviaux portant des sols à encroûtement calcaire en profondeur ou présentant une accumulation de calcaire sous forme de nodules ou d'amas apparaissant vers 60cm de profondeur.

b)- Les alluvions

Il s'agit de formations déposées par les oueds qui coulent dans la plaine de (Hillil, Mina, Malah et Djemaa). La texture variable de ces alluvions est sous la dépendance de la lithologie de l'arrière-pays drainé vers la plaine.

Dans les zones basses, les alluvions deviennent plus argileuses ; dans la zone d'épandage de l'oued Hillil, vers le centre de la plaine, les sols de la rive gauche sont de texture moyenne ; ils deviennent de texture fine et sont mal structurés dans la rive droite ou ils présentent un encroûtement calcaire de nappe le long de la voie ferrée. Elles sont moyennement salées dans la limite Est.

Les alluvions déposées par les oueds sont salées dans certaines zones et cela provient du fait que certains oueds ont raviné des formations géologiques salées (marnes à gypse miocène du bassin versant de la Mina, massif de gypse du trias du bassin versant de l'oued Malah).

Les alluvions salées sont localisées dans la vallée de l'oued Malah, la plaine de khaourara, la vallée de la Mina et la partie sud de la Sebkha de Ben Ziane.

c- Les cônes déjections des oueds

Les bordures géologiques de la région sont ravinées par des petits oueds qui déposent un cône de matériaux de texture variable à l'aval.

d- Les couvertures sableuses

Il s'agit de dépôts sableux épais d'origine éolienne, provenant de la désagrégation des grès pliocènes. Ces dépôts sont localisés dans la plaine d'Hillil au pied du massif de Bel Hacel au nord-ouest du village d'Hillil.

Hydrogéologie

Dans la plaine de la Mina, il y a une distinction nette de deux nappes superposées contenues dans le complexe alluvio-plio-quaternaires :

- Les nappes superficielles libres contenues dans les formations alluvionnaires du quaternaire.
- Les nappes profondes captives contenues dans les formations plio-quaternaires.

Les nappes superficielles sont contenues surtout dans la formation alluvionnaire du quaternaire récent. Elles sont utiles pour l'irrigation et localement pour les besoins d'alimentation de quelques habitations éparses dans la plaine de la Mina.

Au sujet de ces nappes, **AUBERT** (1943), a fait remarquer qu'il n'y a pas une seule nappe continue, mais plutôt une série de nappes dont le cloisonnement dépend surtout de la constitution physique des alluvions. La notion d'une nappe unique ne correspond pas à la réalité ; il y a autant de niveaux aquifères que de niveaux relativement perméables (**Ghoul, 1973**).

Le réseau hydrographique est constitué par deux oueds principaux drainent la plaine de la Mina.

L'oued Hillil à l'ouest et l'oued Mina au centre. Ce dernier reçoit un affluent salé au sud du périmètre oued Malah. Les lits de ces oueds sont encastrés dans la terrasse alluviale récente à un niveau inférieur à 10 m avec des bords escarpés et très abrupts. Ces oueds sont pratiquement à sec pendant la période estivale.

M. Gaucher a reconnu dans la plaine l'existence d'une série de nappes d'eau. Les unes peu ou pas salées, comme celle de la Mina alimentée par les infiltrations de l'oued en crue. Les autres saumâtres sont grossies par les chabets Sud Est de la plaine (3 à 4 g de NaCl). Parmi les nappes superposées salées de la cuvette de Chantrit et de la basse Mina, de la Sebkhha Ben Ziane et de la Daya, seules les deux premières (17 à 35 g de NaCl) ont une action sur la salure de la plaine (Tinthon, 1954)

La majorité de superficie de la plaine de la Mina est irriguée par les eaux du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda, qui a été réalisé en 1978 avec une capacité de 225 Hm³. Les tableaux ci-dessous montrent la salinité et la qualité de l'eau d'irrigation, au niveau de ce barrage, celle-ci se situe entre 1,28 et 2,02 dS/m (de 1990 à 2002) avec une moyenne générale de 1,47 dS/m.

Ainsi, l'irrigation avec cette eau présente un risque important de salinisation secondaire sur les sols lourds à drainage déficient (Gacem. 2014).

Tableau 3. Salinité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda-Relizane (ANRH, 2003)

Année	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Salinité dS.m ⁻¹	1,35	1,39	1,67	2,02	1,28	-	1,28	1,33	1,44	1,64	1,59	1,29	1,3

Tableau 4 - Qualité de l'eau du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda – Relizane (insid, 2008).

Paramètres	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SAR	CE	Classe
Unité	meq.l ⁻¹									dS.m ⁻¹	
Décembre 2005	7,6	7,65	0,24	2,2	4,72	6,09	0,19	6,39	2,74	1,71	C ₃ S ₁

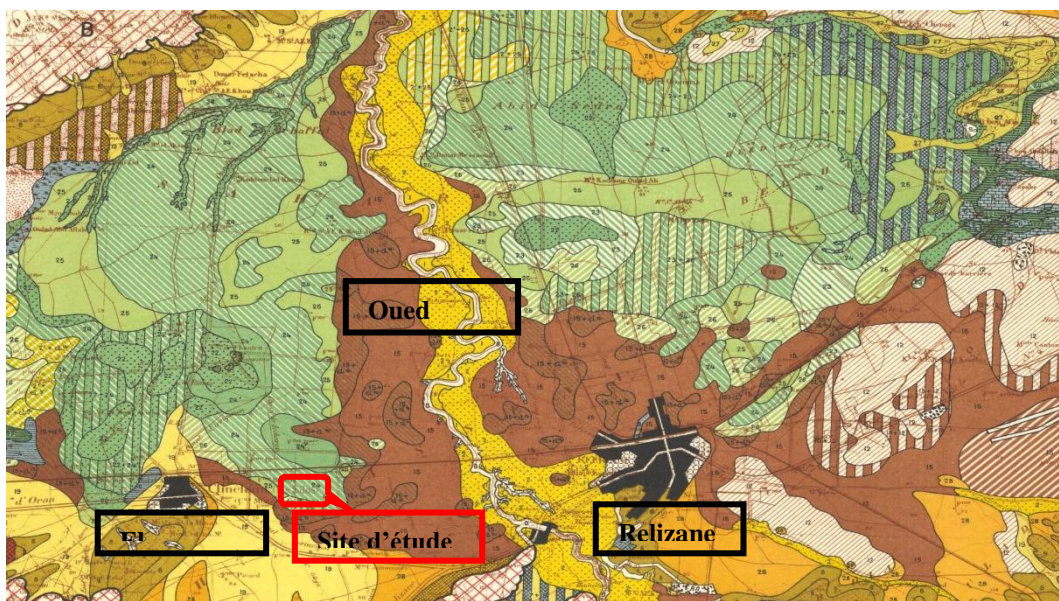
Les résultats analytiques montrent que la qualité de l'eau pour l'irrigation est moyenne à médiocre, elle est à utiliser avec précaution et nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.

Pédologie

Le périmètre de la Mina se caractérise principalement par des sols de texture fine, potentiellement soumis au phénomène de salinisation et constitués d'alluviaux ou d'alluviaux colluviaux. Ceux qui sont déjà irrigués sont affectés par la salinité. Les sols sont regroupés dans différentes classes

pédologiques, dont les plus importantes sont : les sols peu évolués, les sols holomorphes, les sols hydromorphes, les sols calcimagnésiques et les vertisols.

Tous ces types de sols présentent, à des degrés divers, de fortes teneurs en particules fines liées à l'origine des alluviaux, des caractères vertiques, des teneurs en sels élevées et des excès d'eau dans le profil. Les éléments fins dérivés de marnes ou argile tertiaire confèrent au sol du périmètre une cohésion et une compacité excessives. Ces sols de texture fine à moyenne sont plus argileux et souvent engorgés d'eau dans les dépressions (Ghoul, 1973). La zone d'étude se localise sur un sol Hyposolonchaks (de 0,7 à 1,8‰ de Cl en surface) et de solontchaks inertes (plus de 1,8‰ de Cl en surface) d'après la carte des sols d'Algérie établi par Boulaine en 1955.










	Sols colluviaux provenant des massifs gréseux et des formations quaternaires anciennes: Sol légers à moyens; Sables grossiers, sables limoneux et limons; riches, perméables, parfois peu épais, ils recouvrent alors les sols qui sont figurés latéralement sur la carte
	Sols partiellement décalcifiés à accumulation progressive du calcaire, à tendance solonetzique. Sols moyens (limons et limons argileux), profonds, accumulation du calcaire sous forme de nodules, assez riches.
	Sols alluviaux non évolués des dépôts sableux du bourrelet des oueds: peu épais, recouvrant le sol figuré latéralement. Sols légers (sables fins et limons plus ou moins sableux), riches, profonds, perméables mais recouvrant des formations moins perméables, ils sont moins épais vers l'intérieur des plaines. Leur excès de perméabilité peut être amélioré par le marnage,
	Sols alluviaux complexes : sols formés d'horizons de granulométries divers, toujours plus argileux et plus structurés en surface, profonds, riches, assez perméables, ils comportent souvent des horizons d'accumulation des chlorures. Ces sols doivent souvent être drainés lorsqu'ils sont irrigués.
	Solontchaks inertes (plus de 1,8 ‰ de Cl en surface) sans mouvement visible des solutions, avec accumulation en profondeur des chlorures et moins de 5 ‰ de Cl en surface, 24', avec plus de 5 ‰ de Cl en surface, sols lourds à très lourd (argile), peu perméables à imperméables, riches, profonds, très difficilement récupérables par drainage,
	+ Cl ^a , indique la présence dans un sol quelconque d'un horizon d'accumulation des chlorures en profondeur, avec moins de 1,8 ‰ de Cl.
	+ Cl ^b , indique la présence dans un sol quelconque d'un horizon d'accumulation des chlorures en profondeur, avec plus de 1,8 ‰ de Cl.

Figure 6: Carte des sols de la zone d'étude (extrait de la carte des sols d'Algérie, Boulaine, 1955)

Topographie

Le paysage de la zone d'étude présente une morphologie très légèrement ondulée. L'altitude de celle-ci varie entre 60 et 70 mètres avec des pentes dépassant très rarement les 2%.

Occupation du sol

L'agriculture dans le périmètre est très diversifiée. Les cultures pratiquées sont les céréales, les fourrages, le maraîchage, l'arboriculture (agrumes, oliviers, grenadiers et autres fruitiers).

Les superficies irriguées dans le périmètre se situent autour de 3856 Ha qui se répartissent entre les différentes spéculations pratiquées (**Tab. 5**).

Tableau 5. Répartition des superficies irriguées entre les différentes spéculations pratiquées (INSID, 2008)

Spéculations	Superficies (Ha)
Agrumes	2772
Oliviers	396
Arbres fruitiers	160
Fourrages verts	50
Pépinières	58
Maraîchages	100
Tomate industrielle	20
Artichaut	250
Pomme de terre	50
Total	3856

Les sols très salés abandonnés sont couverts par une végétation halophyte dont la densité de recouvrement est très variable dans l'espace et dans le temps.

Le tableau 6 et la figure 7, montrent le pourcentage des aires d'occupation du sol par les différentes cultures dans le périmètre par rapport une superficie de 6000 ha (**INSID, 2008**).

Tableau 6. Répartition de l'occupation du sol, dans le périmètre de la Mina (INSID, 2008)

Occupation du sol	Superficie (%)
Agrumes et arbres fruitiers	33
Oliviers	9
Céréales / Jachère	46
Maraîchages	4
Pépinières	1
Végétation naturelle (halophyte)	7
Total	100

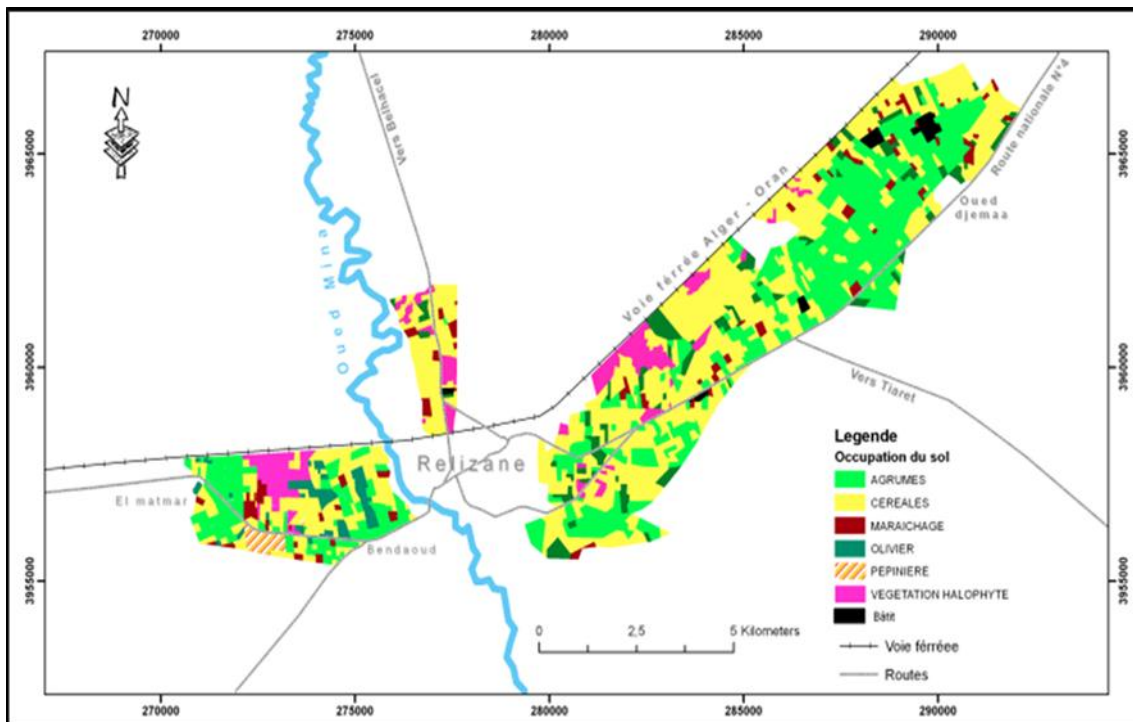


Figure.7 : Répartition végétatif du périmètre de la Mina

Le milieu physique doit son originalité à la combinaison d'un relief en cuvette, d'un climat à sécheresse saisonnière accentuée, d'eaux courantes peu abondantes, de terres en texture non équilibré présentant de forts éléments fins et parfois la salinité accentuée et d'une végétation d'halophytes (*Atriplex halimus* et *Salsola vermiculata*) couvrant certaines zones de la plaine.

Ces conditions naturelles défavorables à la mise en valeur agricole a conduit les pouvoirs publics à subvenir à l'insuffisance des précipitations par l'installation d'un réseau d'irrigation, alimenté à partir du barrage de Sidi M'Hamed Benaouda.

Chapitre III - Phénomènes de salinisation et de sodisation des sols dans les périmètres irrigués

L'objectif de cette partie est d'étudier les principaux phénomènes qui contribuent à la salinisation et la sodisation des sols dans le périmètre irrigué. La gestion hydro-agricole (conduite de l'irrigation- drainage) constitue un facteur pertinent dans le processus de salinisation et de sodisation des sols. Il est important dans ce cas, de comprendre les processus géochimiques qui interviennent lors des phénomènes de salinisation et de sodisation des sols. Une bonne compréhension de ces phénomènes doit être suivie par une modélisation des processus hydrogéochimiques de la salinisation et de sodisation des sols. Ceci est de nature à permettre de prédire le comportement des sols dans le temps et donc de prévenir leur dégradation par une optimisation de leur gestion hydro agricole en termes d'irrigation et de drainage.

Salinité et sodicité des sols

Dans la problématique de la salinisation des sols, il faut distinguer entre deux types de salinité qui concernent : les sols salins (Solontchaks) et les sols alcalins (Solonetz). C'est pourquoi, on parle souvent de sols salsodiques qui englobent les deux types de sols salés. La formation des sols salsodiques est en relation étroite avec la présence de l'ion sodium Na^+ sous l'une ou l'autre de ses formes NaCl et Na_2SO_4 en état soluble et/ou échangeable.

Les sols salins (Solontchaks) ont pour principales caractéristiques leur richesse en sels de sodium neutres (NaCl , Na_2SO_4) mais contenant également des quantités appréciables d'ions chlorites et de sulfates de sodium, calcium et magnésium. Ces sols sont généralement dominants dans les régions arides et semi arides.

Les sols alcalins (Solonetz) sont riches en sodium échangeable et en revanche pauvres en sels solubles (sels alcalins, carbonates et bicarbonates de sodium principalement). Les sols alcalins se trouvent plutôt dans les zones semi-aride et sub-humide.

Ces deux types de sols, souvent regroupés sous le terme de sols salés ont des propriétés chimiques et physiques distinctes, d'où des effets sur les plantes, des traitements pour leur mise en valeur, une distribution géographique et une qualité des aquifères adjacents différents (**Maillard, 2001**).

Répartition des sols salsodiques dans le monde

Selon les estimations les plus récentes de la FAO, la salinisation affecte déjà au moins 400 millions d'ha et en menace gravement une surface équivalente (**Legros, 2009**). La plupart de ces terres affectées par le sel sont situés dans les zones arides et semi-arides, en Afrique du Nord, en Asie orientale, en Asie centrale et en Asie du Sud (**FAO, 2006**). Les sols salsodiques présentent à des proportions notablement élevées en Egypte, la Tunisie, l'Iran, le Pakistan, le Bangladesh,

l'Ouzbékistan, la Chine et l'Argentine. Les sols salsodiques sont aussi étendus en Australie. Dans la majorité des cas de figures, les dommages et dégradations des sols dus au phénomène de salinisation sont causés par une gestion irrationnelle de l'irrigation et une absence totale ou partielle d'installation de drainage (Marlet *et Job*, 2006 ; Djili *et al*, 2003).

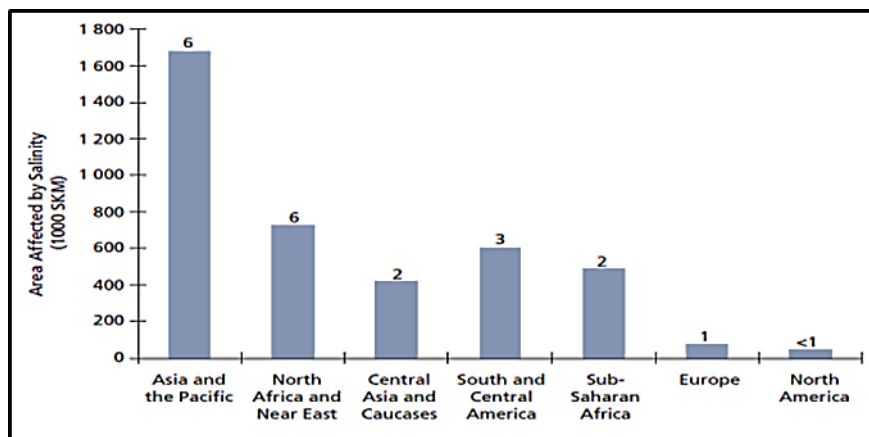


Figure 8. Superficies des sols affectées par la salinisation dans certaines régions du monde en milliers de km² (FAO, 2006)

Sols salsodiques en Algérie

En Algérie, les sols salés occupent de grandes étendues (Halitim, 1985). Selon Le Houerou (1993), les sols salés occupent de vastes superficies (3.2 millions d'hectares de la superficie totale). Près de 10-15 % de terres irriguées, sont concernées par ces problèmes. Bien que le problème d'alcalinisation, selon Daoud et Halitim (1994) ne se pose plus, on estime que les terres salinisées seront difficilement récupérables. La plupart de ces sols sont situés, en région aride et semi-aride, mais aussi sous bioclimat subhumide (Halitim, 1973).

Selon Djili (2000), les sols salés sont localisés au Nord qu'au Sud Algérien et s'expriment mieux entre les isohyètes 450mm qui semblent être la limite supérieure des sols fortement sodiques. Selon l'INSID (2008), la salinité est observée 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 Sebkhass (Chott Chergui, Chott Gharbi, Chott Hodna, Chott Melghir, Sebkhass d'Oran, de Benziane, Zemmoul, Zahrez Gharbi et Chergui, etc..) et dans le grand Sud (dans les Oasis, le long des oueds, etc.)

Les sels les plus fréquents, dans les régions arides et semi- arides, sont surtout les chlorures, les sulfates de sodium, les sulfates de magnésium et à un moindre degré les carbonates de sodium (Halitim, 1988).

Processus de salinisation et de sodisation des sols

La salinité désigne la concentration des sels présents dans l'eau ou dans le sol. 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^{2-}). La précipitation de ces sels est connue sous le nom salinisation (**Tabet, 1999 ; Comdon, 2000 ; Marlet et Job, 2006**). Les minéraux les plus communs sont la calcite, le gypse et des silicates comme la sépiolite, contribuant principalement au contrôle du magnésium dans les sols (**Marlet et Job, 2006 ; in Bradai et al. 2008**).

Si un minéral AB précipite au cours de la concentration de la solution du sol, A et B ne peuvent augmenter simultanément car le produit de solubilité (Q) :

$Q = (A) \cdot (B)$ reste constant. Ainsi, si $A > B$, A augmenté et B diminue, inversement, si $B > A$, B augmente et A diminué.

Ce concept dit d'alcalinité résiduelle a été généralisé à la précipitation successive de plusieurs minéraux (**Van Beek et al. 1973 ; Al Droubi et al. 1980 in Barbiero et Valles, 1992**). Il est souvent utilisé pour prédire l'évolution de la composition chimique d'une solution (**Barbiero et Valles, 1992**). L'alcalinité résiduelle est calculée en soustrayant les charges de cations et en ajoutant celle d'anions, impliqués dans les précipitations, à l'alcalinité (**Barbiero et Valles, 1992 ; Marlet et Job, 2006 ; in Bradai et al. 2008**). Elle est le plus souvent considérée par rapport à la précipitation de calcite et de sépiolite, et correspond alors à la définition du concept **de Residual Sodium Carbonates (RSC)** utilisé suite aux travaux d'**Eaton, (1950), (Richards, 1954)**.

$$\text{RSC} = \text{Alcalinité carbonate} - \text{Ca} - \text{Mg} \text{ (meq.l}^{-1}\text{)}$$

On distinguera trois voies principales déterminant l'évolution des propriétés des sols :

1- Le RSC est positif, c'est la voie alcaline relative à la précipitation de calcite/sépiolite. Ces sols présentent un risque majeur d'alcalinisation et de dégradation des propriétés physiques.

Dans le cas contraire ($\text{RSC} < 0$), c'est la voie saline neutre. Dans ce cas, deux cas peuvent se présenter en fonction du signe de l'alcalinité résiduelle appliquée à la précipitation de calcite de sépiolite et de gypse (**Marlet et Job, 2006 ; in Bradai et al. 2008**).

$$\text{RSC} < 0 : \text{RSC2} = \text{Alcalinité carbonatée} - \text{Ca} - \text{Mg} + \text{SO}_4 > 0$$

2- L'alcalinité résiduelle devient positive à la suite de l'addition des sulfates relatifs à la précipitation du gypse, c'est la voie saline neutre à dominance sulfatée. Ils présentent principalement un risque de dégradation des propriétés physiques des sols suite à une sodisation rapide que le SAR ne caractérise qu'imparfaitement.

3- L'alcalinité résiduelle devient négative même par addition des sulfates, on parle alors de la voie saline neutre à dominance chlorurée. Le risque de dégradation de ces sols est faible dans la mesure où

la sodisation est progressive et la salinité alors suffisamment élevée pour assurer la stabilité structurale des sols (Sumner, 1993 ; Douaoui et al. 2004 ; Marlet et job, 2006 ; in Bradai et al. 2008).

$$RSC < 0 \quad RSC2 = \text{Alcalinité carbonatée} - Ca - Mg + SO_4 < 0$$

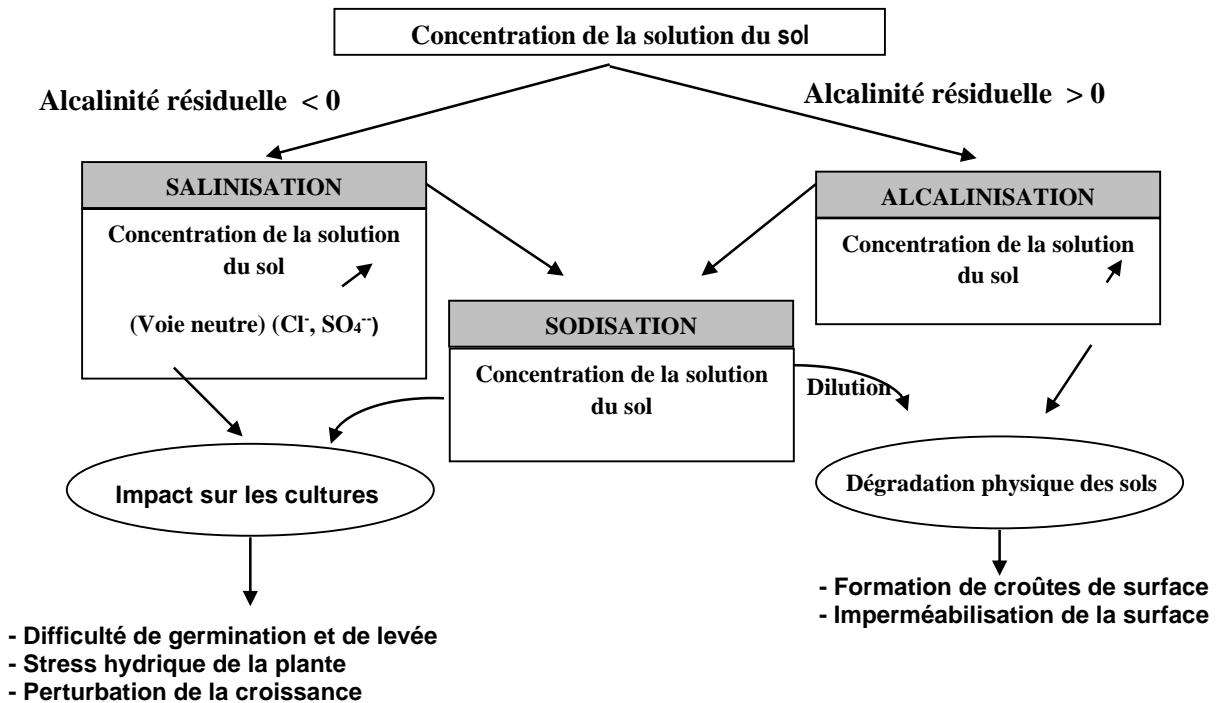


Figure 9 : Processus de la salinisation et ses impacts sur la dégradation des sols et des cultures. (Tabet, 1999)

Salinisation et dégradation des sols

L'origine de la salinisation des sols agricoles varie d'une région à l'autre. Les causes sont multiples et sont liées, d'une part, à la nature géologique et chimique de la roche mère qui est constituée de minéraux sodiques, potassiques, magnésiques, carbonates et bicarbonates et dont l'altération donne souvent des sels solubles dans la solution du sol, on parle de la salinisation primaire (Aubert G, 1976). D'autre part, les conditions climatiques arides caractérisées par les précipitations très limitées, les évaporations considérables et l'utilisation des eaux d'irrigation de qualité médiocre sans système de drainage fonctionnel. Tous ces facteurs anthropiques favorisent considérablement la salinisation secondaire des terres agricoles ainsi que la détérioration de la qualité des eaux des nappes souterraines.

En Algérie, la dégradation des sols par la salinité s'accroît, ce qui est défavorable pour le système écologique et le potentiel de la production agricole. La salinisation constitue l'un des obstacles principaux pour la production agricole dans les zones arides et semi-arides. Le phénomène de la salinité des sols implique des processus complexes (sodicité, salinité) et évolutifs dans le temps. En

effet, l'évolution dans le temps de la salinité des sols dans la plaine se confirme à travers par les travaux de cartographie réalisés par (**Boulaine, 1956**) et qui montrent que 34% des sols sont touchés par la salinité ($CE > 4$ dS/m). Selon **Douaoui et lépınard (2010)**, la salinité s'étend davantage pour atteindre 76% des sols de la plaine ($CE > 4$ dS/m) dont 16% sont très salés ($CE > 16$ dS/m).

La plupart de ces sols sont situés, en région aride et semi-aride, mais aussi sous bioclimat subhumide (**Halitim, 1973**). Selon **Djili (2000)**, les sols salés sont localisés au Nord qu'au Sud Algérien, et s'expriment mieux entre les isohyètes 450 mm qui semblent être la limite supérieure des sols fortement sodiques.

Selon l'**INSID (2008)**, la salinité est observée 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 Sebkhass (Chott Chergui, Chott Gharbi, Chott Hodna, Chott Melghir, Sebkhass d'Oran, de Benziane, Zemmoul, Zahrez Gharbi et Chergui, etc..) et dans le grand Sud (dans les Oasis, le long des oueds, etc.).

Contraintes d'évaluation de la salinité et de la sodicité des sols

Vu que la salinité et la sodicité des sols sont des paramètres extrêmement variables aussi bien spatialement dans les deux directions verticale et horizontale que temporellement, plusieurs méthodes ont été envisagées pour leur estimation (Corwin et Lesch, 2003) :

-L'observation visuelle des cultures par le biais de l'état morphologique, le rendement et le calibre est une méthode utilisée depuis longtemps par les agriculteurs. Bien qu'elle soit économique et rapide, elle présente l'inconvénient de ne détecter le degré de dégradation causé par la salinité qu'après leurs apparitions, ce qui est relativement tard pour envisager des mesures de remédiation.

- Les méthodes de laboratoire basées sur la mesure de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée ou l'extrait dilué des sols.

- Les méthodes géophysiques non destructives basées pour la mesure de la conductivité électrique apparente du sol (ECa). Elles sont basées sur la résistivité électrique en utilisant le dispositif de Wernner, par induction électromagnétique EM et par des capteurs time-domain reflectometry (TDR).

Méthodes de mesure in situ

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

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

Echantillonnage

Extrait dilué

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

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

Sur le plan pratique, cette méthode est plus facile à réaliser et surtout utilisable dans le cas de concentration faible et une proportion de gypse peu élevée (**Abdelhafid Y, 2009**). Elle permet ainsi de faire un grand nombre d'analyses, ce qui est au contraire plus difficile par pâte saturée. De nombreux travaux de recherche ont vu l'utilisation de la conductivité électrique de l'extrait dilué pour l'évaluation de la salinité du sol (**Djili et al, 2003 ; Douaoui, 2005**).

Extrait de la pâte saturée

C'est la méthode de référence internationale préconisée par le laboratoire de Riverside (US Salinity Laboratory Staff ; Richards, 1954) (**Mathieu et Pietain, 1998**). Devant la difficulté d'obtenir un extrait représentatif de la solution du sol à un instant donnée et qui soit compris entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent, cette méthode standardisée consiste à amener l'échantillon à saturation, c'est-à-dire proche de sa limite de liquidité (**Servant, 1975**). En opérant ainsi, on cherche à se rapprocher au mieux d'une réalité agronomique, l'humidité étant à proximité de la capacité de rétention, la plus efficace pour la plante (**Le Brusq et al, 1982 ; cités par Diba, 1995**). La méthode de l'extrait de pâte saturée est lourde à mettre en œuvre du fait de la difficulté de

confection de la pâte et de l'extraction de la solution parfois impossible mais qui reste une méthode de référence internationale pour la classification des sols (**Mathieu et Pietain, 1998**).

Méthodes géophysiques in situ

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

Conductivité électrique apparente du sol CEa

Se définit comme une mesure de la capacité d'un matériel à transmettre une charge électrique exprimée en dS.m^{-1} (**Doerge et al, 2003 ; cité par Fox, 2004**). Les mesures de la CEa du sol utilisées longtemps en géologie et en science de l'environnement afin de distinguer les propriétés du sol (**Lund et al, 1999**). Sur un modèle un peu plus simple à trois chemins, **Rhoads et al (1989)** ont proposé une formule qui permet de calculer la conductivité électrique apparente du sol CEa comme une fonction de trois phases : liquide, solide et sol-liquide (**Sudduth et al, 2003**).

La conductivité électrique apparente du sol ECa est donnée par la formule suivante

$$ECa = \left[\frac{(\theta_{ss} + \theta_{ws})^2 \cdot EC_{ws} \cdot EC_{ss}}{\theta_{ss} \cdot EC_{ws} + \theta_{ws} \cdot EC_s} \right] + (\theta_{sc} \cdot EC_{sc}) + (\theta_{wc} \cdot EC_{wc})$$

où : **ECa** : Conductivité électrique apparente du sol ;

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

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

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

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

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

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

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

EC_{sc} : Conductivité électrique de la surface de la phase solide.

Résistivité électrique

L'appareil de mesure comprend quatre électrodes disposées horizontalement selon la configuration de WENNER (**Corwin et Lesch, 2003**). Cette méthode est basée sur un principe simple : la capacité du sol à conduire le courant électrique est fonction de la concentration en

l'ectophytes de la solution du sol. L'épaisseur du sol prospecté est en fonction de l'écartement entre les deux électrodes sources. L'appareil est un matériel encombrant à manipuler et parfois le contact des électrodes avec le sol est imparfait aux dispositifs de résistivité convertissent des mesures de la résistivité apparente en mesures de la conductivité apparente.

Diagnostic de la salinité et de la sodicité des sols dans les périmètres irrigués

A l'échelle d'un périmètre en zone aride ou semi-aride, il apparaît que les conditions naturelles sont souvent favorables à la salinisation des sols. De plus, l'introduction de l'irrigation modifie le milieu et favorise la salinisation des sols.

La salinité peut constituer un gène majeur au développement de la production agricole, et même, mener à la stérilité des sols. Elle se rencontre en Algérie en de nombreuses zones telles que les périmètres de la Mina, Habra Sig et Maghnia.

Indicateurs physico-chimiques

Il existe plusieurs indicateurs physiques et chimiques pour évaluer la salinité des sols. Souvent, les éléments dominants dans les sols salés sont les sels solubles neutres, principalement les chlorures et les sulfates de sodium, de calcium et de magnésium. Les indicateurs de la salinité des sols peuvent être :

- Le pH du sol est généralement de moins de 8,2.
- La conductivité électrique, si celle de l'extrait de pâte saturée du sol est supérieure ou égale à 4 dS.m⁻¹, le sol est considéré comme salin. Il n'y a généralement pas de relation bien définie entre le pH du sol et le pourcentage de sodium échangeable ou le SAR (Sodium Absorption Ratio).
- Concentrations en Ca²⁺ et Mg²⁺, bien que le sodium soit généralement le cation dominant, la solution du sol contient également des quantités non négligeables de cations divalents tels que le calcium (Ca²⁺) et le magnésium (Mg²⁺).
- Présence de gypse, le sol peut contenir des quantités significatives mais modérées de composés calciques solubles tels que le gypse (CaSO₄, 2H₂O) sous forme de couverture blanche après ressuyage des eaux d'irrigation.
- La teneur en argile du sol, en présence de sels soluble neutre en excès, la fraction argileuse est en état flocculé et donc la structure du sol est stable. Cependant, les sols salés sont plus fragiles et souvent sujet à dégradation.
- Présence des lamelles peu épaisses, durcies, recouvrant un horizon poudreux de pseudo sable.
- L'irrégularité dans la croissance des végétaux dans le temps et dans l'espace.

- La présence de plages de sol humides même à l'état sec, ceci peut est due à la richesse en sels sous forme hygroscopique.
- Présence de fentes de retrait verticales et horizontales plus ou moins profondes.

Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique. Cette notion est inversement proportionnelle à celle de résistivité électrique. L'unité de mesure communément utilisée est le Siemens ($S.cm^{-1}$) exprimé souvent en $dS.m^{-1}$. La conductivité est directement proportionnelle à la quantité de solides (les sels minéraux) dissous dans l'eau. Ainsi, plus la concentration en solide dissous sera importante, plus la conductivité sera élevée. Généralement, le rapport entre conductivité et concentration ionique s'exprime approximativement de la façon suivante : $1 dS.m^{-1} = 1 mmhos.cm^{-1} = 640 mg$ de sels,

ou $1 ppm = 1 mg.l^{-1}$ correspond à la concentration en solide dissous.

L'activité ionique d'une solution varie en fonction de la température. Il convient donc, pour effectuer des mesures précises, de tenir compte de la température dans les mesures de conductivité. Les températures standard sont généralement prises à $25^{\circ}C$.

Tableau 7 : Echelle de salure en fonction de la CE de l'extrait aqueux 1/5 (U.S. S. L. Staff. 1954)

	Non salé	Peu salé	Salé	Très salé	Extrêmement salé
CE 1/5 $dS.m^{-1}$	0,6	1,4	2,4	6	
Salure (SST) Még. $100g^{-1}$	3	6	12	30	

Tableau 8 : Echelle de salure de la CEeps (US Salinity Laboratory) (U.S. S. L. Staff. 1954)

	Non salé	Peu salé	Salé	Très salé	Extrêmement salé
Extrait de pâte saturée ($dS.m^{-1}$)	2	4	8	16	

Sodicité (SAR)

La sodicité décrit la quantité de sodium en excès par rapport aux cations calcium et magnésium, qui eux, peuvent être tolérés en relativement grande quantité dans l'eau d'irrigation et exprime l'équilibre entre le cation monovalent Na^{+} et les principaux cations bivalents Ca^{2+} et Mg^{2+} , il

est défini par la relation :

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

où $[Na^+]$, $[Ca^{++}]$ et $[Mg^{++}]$ désignent respectivement les concentrations des cations solubles Na^+ , Ca^{++} et Mg^{++} , exprimées en $meq.l^{-1}$. Le SAR est un paramètre qui prend en compte uniquement les cations et ignore l'alcalinité causée par les anions (**Gupta et Abroul, 1990 in Gacem, 1991**). Les risques de dégradation des sols par le phénomène de sodisation peuvent être résumés comme suit :

Classe de risque	Risque de sodicité
$SAR < 10$	Faible
$10 < SAR < 18$	Moyen
$18 < SAR < 26$	Élevé
$SAR > 26$	Très élevé

Pourcentage de sodium échangeable (ESP) et alcalinisation

L'ESP est le pourcentage de sodium échangeable par unité de masse de sol (PSE) ou ESP (Exchangeable Sodium Percentage) est un bon indicateur de la sodicité. Il est défini de la façon suivante :

$$ESP = 100 \times [Na^+] / CEC \text{ en } (\%)$$

la CEC désigne la capacité d'échange cationique en $meq.100 g^{-1}$ du sol et $[Na^+]$ la concentration du sodium échangeable en $meq.100g^{-1}$. En raison de sa détermination, relativement facile, le SAR a souvent remplacé l'ESP pour le diagnostic de la sodicité. Néanmoins, l'ESP est un indicateur plus fiable pour la mesure de la sodicité malgré sa détermination relativement délicate par le fait que la CEC totale d'un sol est difficilement évaluable avec suffisamment de précision (**Jurinak et Suarez, 1990 in Tabet, 1999**). Les classes de l'ESP sont définies par la F.A.O (1984) :

$ESP < 5 \%$	Légère alcalinité.
$5 \% < ESP < 20 \%$	Alcalinité modérée.
$20 \% < ESP < 45 \%$	Alcalinité grave.
$ESP > 45 \%$	Alcalinité très graves.

D'après l'USSL (1954), un sol est dit sodique lorsque son ESP est supérieure à 15 %. Cette valeur est souvent critiquée par les chercheurs qui montrent que la structure du sol se dégrade pour des valeurs de 5-6 % (**McIntyre, 1979 in Shainberg, 1984 ; Sumner, 1993 ; Shainberg et Singer, 1990 in Tabet, 1999**). Certains auteurs définissent des seuils de sodicité (en ESP) par type d'argile, **Richards (1954)** suggère, les valeurs seuils de 5 % pour les illites et 13 % pour les montmorillonites.

Un sol alcalin est un sol correspondant à une adsorption du sodium à la place des autres cations (potassium et calcium notamment) sur ses minéraux argileux. Elle peut conduire à une grave dégradation de sa structure par dispersion des substances colloïdales, argileuses ou organiques. Un sol alcalin a généralement une faible perméabilité à l'eau et à l'air, et un pH élevé (dépassant 8,2) ce qui

inhibe la croissance de la plupart des plantes, à l'exception de quelques espèces adaptées à ces milieux très particuliers en l'occurrence les halophytes.

D'après **Middleton et al., 1997 in Antipolis (2003)**, la salinité et l'alcalinité secondaires touchent surtout les périmètres irrigués qu'elles stérilisent peu à peu : un tiers des 2,5 Millions d'hectares de terres irriguées dans la région méditerranéenne en seraient affecté.

En Afrique du Nord la salinisation affecte surtout les régions irriguées et les parties basses sujettes à des taux d'évaporation importants. Dans ces régions il existe un risque important de salinisation des nappes (**Conacher et al., 1998 in Antipolis, 2003**). En Algérie, la salinité primaire et secondaire atteint 72000 km², soit 90 % de la surface cultivée du pays (**Antipolis, 2003**). Il reste actuellement à lancer des études à travers le territoire national, auprès des services concernés, pour identifier les terres menacées par le phénomène d'excès de sodium échangeable qui touche sévèrement leur productivité.

Relation entre le SAR et l'ESP

Le laboratoire de la salinité des USA (USSL), propose la relation suivante pour relier le SAR et l'ESP :

$$ESP = \frac{100(-0,0126 + 0,01475SAR)}{1 + (-0,0126 + 0,01475SAR)}$$

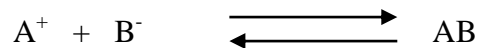
Ce type de relation mathématique entre le SAR et l'ESP d'un sol obtenu par des traitements statistiques ne peut être généralisé à des sites autres que celui dans lequel il a été réalisé. Pour une région donnée, ce type de relation peut servir à un diagnostic rapide de l'ESP par simple mesure du SAR.

Par ailleurs, la concentration de la solution du sol augmente sous l'effet de l'eau d'irrigation. Comme les quantités de sels absorbés par les plantes sont faibles, les irrigations successives concourent à une solution du sol de plus en plus concentrée particulièrement dans des conditions de mauvais drainage. D'irrigation en irrigation, la solution du sol sera soit partiellement infiltrée vers le bas, soit plus concentrée. Ainsi la concentration de la solution du sol est soumise à des variations saisonnières en fonction du temps et suivant le point considéré dans le profil du sol. En supposant qu'il est possible de négliger la précipitation des sels solubles et leur absorption par les racines, l'eau d'irrigation se concentrera donc sans changer de composition relative et en particulier le pourcentage de sodium soluble ne changera pas par rapport aux autres cations. Par contre le rapport d'absorption du sodium variera en fonction des concentrations relatives des deux autres cations : le calcium et le magnésium, (**Durand, 1958**). Des essais ont cherché à comparer le sodium absorbé de sols irrigués

depuis longtemps à celui donné par le calcul à partir du coefficient d'absorption de l'eau d'irrigation sur des périmètres irrigués de Relizane, de Mohamadia et de Sig. Le résultat obtenu à partir de ces expériences n'a donné aucune cohérence entre les valeurs de sodium échangeable d'un sol irrigué et celui obtenu par le calcul à partir du SAR de l'eau d'irrigation (**Gorine, 2010**).

Précipitation et dissolution des minéraux

L'enrichissement en sels de la solution du sol dépend de la concentration par évaporation et des processus de précipitation et de dissolution de minéraux. En fait, le processus de concentration de la solution du sol s'accompagne des précipitations successives des minéraux, du moins soluble au plus soluble d'entre eux. Si l'on considère la réaction de précipitation – dissolution d'un minéral AB :



A^+ et B^- désignent respectivement le cation et l'anion issus d'AB. L'équilibre de la réaction est défini par la constante d'équilibre K_s ou par le produit de solubilité pK_s définis de la façon suivante :

$$K_s = [A^+] * [B^-]$$

$$-pK_s = \log_{10}[A^+] + \log_{10}[B^-]$$

K_s désigne une donnée thermodynamique du minéral AB, constante à une pression et à une température données, et désigne les activités des ions en solution.

Les ions A^+ et B^- sont en solution tant que la solution est sous-saturée. Lorsque la solution du sol se concentre, par exemple par évaporation, les concentrations de A^+ et B^- augmentent proportionnellement au facteur de concentration jusqu'au point de saturation défini par K_s . A ce stade, le minéral AB précipite et les ions A^+ et B^- correspondants sont soustraits de la solution. Si la solution continue à se concentrer, le minéral continue à précipiter, la concentration de l'ion majoritaire, désigné par ion « non contrôlé », continue à augmenter et la concentration de l'autre ion, dit « Contrôlé » diminue jusqu'à s'annuler. Cette description des processus est connue sous le nom de la loi du T (**Al Droubi, 1976 ; Vallès et al, 1989 in Tabet, 1999**). En effet, une telle solution se saturant et atteignant la droite de saturation décrit un T dans un graphique log/log suivant.

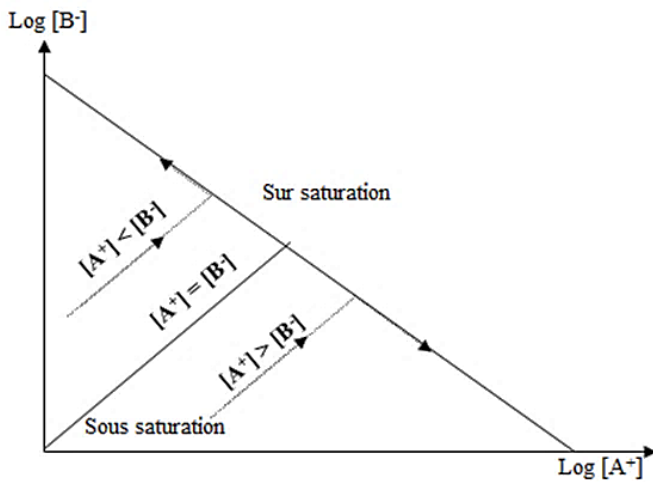


Figure 10 : Evolution des concentrations selon la loi T (Valles et al., 1989)

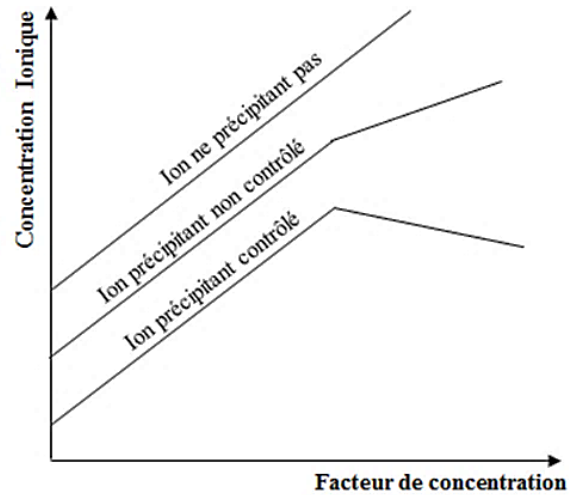


Figure 11 : Evolution schématique des concentrations des ions de la solution du sol en fonction du facteur de concentration

Lors de la concentration de la solution du sol, la concentration des ions varie donc de trois façons : si ne précipite pas, sa concentration augmente proportionnellement au facteur de concentration ; pour les ions qui précipitent, la concentration de l'ion non contrôlé subit une rupture de pente (précipitation) puis continue et la concentration de l'ion contrôlé converge vers 0.

La loi du T permet d'expliquer en partie les processus de dégradation des sols en milieu alcalin.

Classification des sols sodiques

La classification des sols sodiques est délicate du fait des variations saisonnières ou sous l'action de l'homme. En particulier, dans ce dernier cas, elles peuvent être extrêmement importantes comme dans les sols très sableux des oasis du sud Tunisien. Dans certaines classifications ils sont considérés dès le niveau supérieur (Classification russe, française) ; dans d'autres à un niveau beaucoup plus bas.

Classification C.P.C.S (1967)

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

Plusieurs noms lui ont été donnés : sols salés, sols halomorphes, sols sodiques ; aucun ne recouvre l'ensemble des sols concernés. La dénomination de sols salsodiques que propose Servant (1975), paraît bien meilleure. Selon la présence ou de l'absence d'un horizon à structure dégradée, deux sous-classes ont été distinguées :

a- Sous-classe de sols salsodiques, à structure non dégradée avec deux groupes : les sols salins à complexe calci-magnésique, de ESP < 15 %, et les sols salins à complexe sodique, enrichi en sodium échangeable de ESP >15%.

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

Classification WRB (World Référence Base)

La plupart des sols salés du Maghreb sont des Solontchaks. Ils peuvent être classés comme orthiques, gleyiques, ou parfois, takyriques. Les Solonetz y sont rarement représentés. Cependant, les phases salines et natriques y caractérisent des sols sur de grandes étendues.

Il y a un bon accord entre les différents systèmes de classification qui, à quelques détails près, ont repris les travaux russes et leurs dénominations (tableau 9)

Tableau 9: Correspondances entre les classifications CPCS et WRB des sols salsodiques (Legros, 2004)

CPCS	WRB
Sols salins	Solonchak (Horizon Salic)
Sols salins à alcalis	Solonchak-Solonetz
Sols sodiques	Solonetz (Horizon Natric)
Sols sodiques dégradés	Solonetz glossalbic

Classification de l'US Department of Agriculture (USDA)

Cette classification se base sur des caractères morphologiques avec des horizons d'accumulation de carbonate, des sels solubles du gypse et ou des horizons (couches) cimentées. On appelle des horizons diagnostiques argilliques ou natriques présentant des valeurs de SAR > 13 % ou Na/T > 15 %. La présence de l'horizon natrique permet de définir 12 groupes de sols dans les trois ordres : alfisols, aridisols et mollisols ; l'horizon salique, un seul groupe celui des salorthids. Les caractères de salure et d'alcalisation interviennent le plus souvent au niveau des sous-groupes.

Contraintes de la qualité des eaux en agriculture irriguée

La qualité d'eau d'irrigation est donc un des facteurs limitant de la production agricole. Le choix d'une source d'eau de bonne qualité n'est pas toujours aisé. La qualité d'une eau d'irrigation dépend du type et de la concentration des substances dissoutes ou en suspension (**Ollier et Poirée, 1986**). Il dépend aussi des caractéristiques physiques et chimiques du sol (**Durand, 1982**). Bien que certaines sources d'eau soient pures, d'autres par contre contiennent des taux élevés de sels, de microorganismes et d'autres résidus.

Les principaux éléments qui ont un effet déterminant sur la qualité de l'eau sont :

- la concentration totale de sels solubles,
- la proportion relative du sodium, du bicarbonate, du calcium et du magnésium,
- la quantité de bore dans l'eau.

Concentration saline totale

La salinité de la solution d'un sol est un critère important car tout excès de sel augmente la pression osmotique de l'eau qui concurrencerait celle d'absorption des racines de la plante, ce qui se manifeste par une sécheresse physiologique. Même si le sol semble suffisamment humidifié, les plantes flétrissent parce que leurs racines n'absorbent pas assez d'eau pour compenser celle perdue par évapotranspiration (**Durand, 1982 ; Ayers et Westcot, 1988**).

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium (Ca^{2+}), de Magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), de potassium (K^+), les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les bicarbonates (HCO_3^-). Une valeur élevée de la salinité signifie une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend plus difficile l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la plante (**Tanji, 1990 ; in Hamdy, 2004**). La qualité des eaux d'irrigation peut être évaluée en considérant sa conductivité électrique et sa teneur en résidus sec (Tableau 10).

Tableau 10 : Classification des eaux d'irrigation (Daoud et al., 1984 in Slama 2004)

Classes salinité (dS.m^{-1})	Résidé sec (g.l^{-1})	Evaluation Américaine	Evaluation Russe	Durand 1958
$\text{CE} < 0,25$	$< 0,2$	Faiblement salée	Bonne qualité	Non saline
$0,25 < \text{CE} < 0,75$	$0,2 - 0,5$	Moyennement salée	-	Salinité moyenne
$0,75 < \text{CE} < 2,25$	$0,5 - 1,5$	Fortement salée	Risque de salinisation	Forte salinité
$2,25 < \text{CE} < 5$	$1,5 - 3,0$	Très fortement salée	-	Très forte salinité
$5 < \text{CE} < 20$	$3,0 - 7,0$	Salinité excessive	Nécessité de lessivage	Salinité excessive

La salinité globale de l'eau d'irrigation influence directement celle de la solution du sol dans les horizons 0-40 cm et 40-80 cm, CRGR, 1973 ; in Slama, 2004. L'eau d'irrigation des nappes souterraines au niveau du périmètre irrigué de la Mina présente une conductivité électrique supérieure à 2 dS.m^{-1} susceptible d'accroître la salinité des sols.

On utilise le SAR pour classer les sols en fonction de leur dégradation physique due à la présence du sodium échangeable dans le complexe d'échange en rapport avec sa concentration dans les eaux d'irrigation. Le sodium agit au niveau de la défloculation du complexe argilo-humique du sol, ce qui entraîne une dégradation de sa structure et une chute rapide de son pouvoir d'infiltration à l'eau. À l'aide du SAR, on divise les eaux d'irrigation en quatre classes

En plus des effets des cations que constituent les sels sur les propriétés hydriques et physico-chimiques des sols ainsi que la croissance et le développement des plantes, les effets des anions, du pH et des oligo-éléments ne sont pas à sous-estimer. En effet, les chlorures sont très solubles dans l'eau et se déplacent facilement dans la solution du sol. Ils sont prélevés par la plante, circulent par la voie de la transpiration et s'accumulent dans les feuilles. Des symptômes de toxicité apparaissent, comme la brûlure des feuilles ou le dessèchement des tissus foliaires au seuil de 0,3 à 1 % du poids sec en chlorures (FAO, 1988).

Le bore (B) est un élément mineur essentiel à la croissance de la plante mais il n'est nécessaire qu'à une quantité minimale. Il faut près $0,2 \text{ mg.l}^{-1}$ de bore dans l'eau d'irrigation pour que la croissance des plantes ne soit pas affectée alors que la toxicité peut apparaître à près de 1 à 2 mg.l^{-1} (Ayers et Westcot, 1988). En plus de l'extrême proximité entre ses seuils de carence et de toxicité, le bore est soluble dans l'eau et on le retrouve rarement dans les eaux superficielles et plus fréquemment dans les eaux de sources et de forages. De plus, il a tendance à s'accumuler dans le sol en formant des complexes chimiques qui sont difficiles à lessiver.

Le pH est la concentration en ion d'hydrogène (H^+) de l'eau, il mesure son acidité ou son alcalinité. Il peut constituer un bon indicateur non seulement de la salinité mais aussi de la sodicité. De manière générale, un pH de l'eau d'irrigation devrait se situer entre 6,5 et 8,4 (Ayers et Westcot, 1988).

Estimation de la qualité des eaux d'irrigation

La qualité des eaux d'irrigation est déterminante sur les risques de contamination des sols par la salinité et la sodicité et constitue un paramètre rigide non maniable qu'il importe de prendre en compte en termes de restriction à une gestion optimisée de l'irrigation. L'accent doit être mis sur l'influence, à

long terme, de la qualité de l'eau d'irrigation sur le fonctionnement du sol et la production des cultures via la gestion hydroagricole et les techniques culturales.

L'importance des effets de la qualité des eaux d'irrigation, nous imposa dans un premier temps, d'effectuer un balayage de caractérisation de la qualité des eaux utilisées dans le site de notre étude. Cette approche est primordiale pour la simple raison qu'elle constitue le premier maillon du processus de dégradation des sols par les phénomènes de salinisation et de sodisation. Dans cette démarche, des échantillons d'eau de 178 puits de la plaine de la Mina ont fait l'objet d'une analyse physicochimique, principalement la conductivité électrique (EC), le taux d'adsorption de sodium (SAR), l'indice de la qualité de l'eau d'irrigation (IQWI) pour identifier les classes de la qualité des eaux et l'alcalinité résiduelle (RSC) pour déterminer les voies de salinisation.

Méthode de Riverside

Le dépouillement des analyses physico-chimiques des eaux d'irrigation de la plaine de la Mina révèle une qualité médiocre pour l'irrigation. La classification de Richards (1954) modifiée par Durand (1958), fait ressortir deux classes potentiellement salinisantes (C_4 et C_5) et trois autres potentiellement sodisantes (S_2 , S_3 et S_4). Le diagramme de Riverside (figure 15), montre une forte dominance des classes C_4S_4 et C_5S_4 avec un pourcentage global de 88,77 % qui sont déconseillées pour l'irrigation.

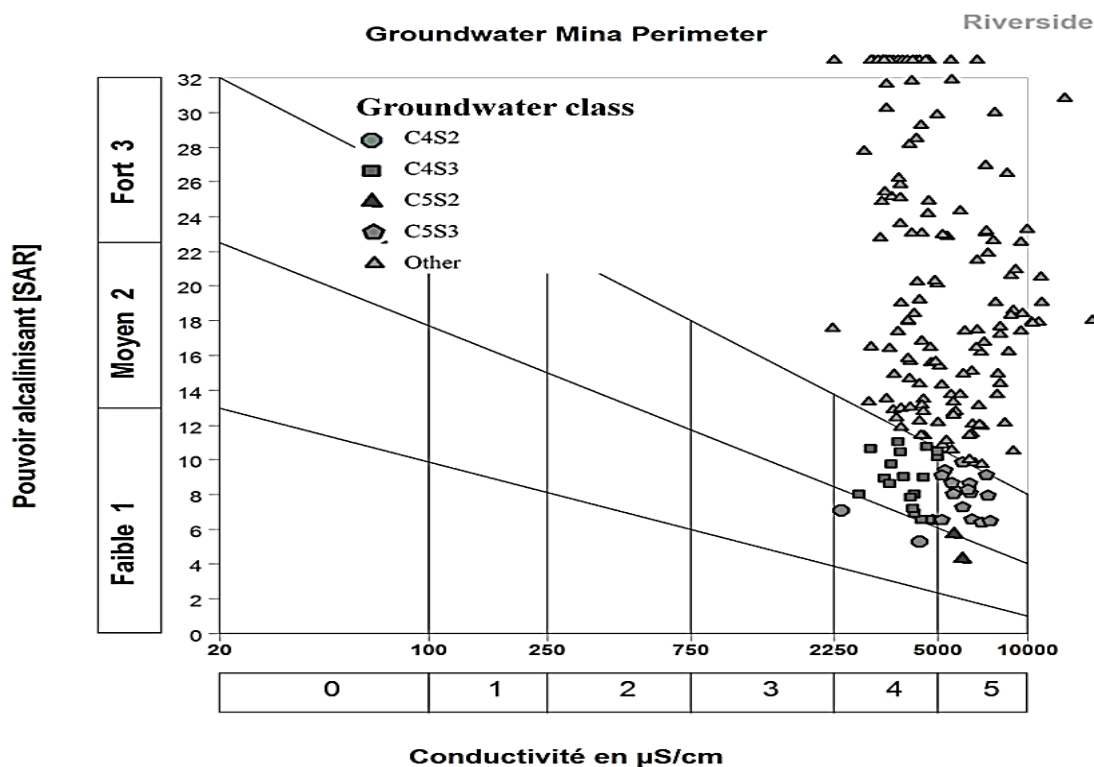


Figure 12 : Diagramme de Riverside des eaux d'irrigation

Il est à remarquer que 1,12 % des eaux sont de mauvaise qualité (C₄S₂) et ne peuvent être utilisées que pour des sols à fort pouvoir de drainage et des plantes tolérantes à la salinité avec l'application recommandée de doses de lessivage. La classe C₄S₃ qui représente 10,11 % des eaux est de très mauvaise qualité et ne peut être appliquée qu'à des circonstances exceptionnelles. En définitif, seulement 11,23 % des puits peuvent être utilisés pour l'irrigation.

Nous allons faire recours à d'autres méthodes d'estimation de la qualité des eaux d'irrigation pour diversifier les voies de diagnostic et donc approfondir l'analyse et pouvoir ajuster les résultats à une gestion optimisée de la gestion de l'irrigation et du drainage.

Alcalinité résiduelle des eaux d'irrigation

Bien que le SAR constitue un indicateur intéressant de la sodicité, très souvent il sous-estime le degré de contamination sodique des sols irrigués par une eau de mauvaise qualité (Bouzada, 2013), c'est pourquoi il s'apparente bien avec l'indicateur de l'alcalinité résiduelle (RSC). En effet, Gouaidia et al., 2012, rapporte que le SAR minimise fréquemment les risques de sodisation et d'alcalinisation des eaux en présence d'un faciès chimique chlorurés. Selon les résultats des analyses des eaux d'irrigation que nous avons effectuées, on constate la présence de trois voies d'alcalinité résiduelle :

RSC > 0, avec salinisation par voie alcaline (RSC1),

RSC < 0, avec salinisation par voie neutre (RSC2) : - avec une dominance sulfatée (RSC2.1)

- avec une dominance chlorurée (RSC2.2)

Dans ces conditions, la salinisation par voie neutre représente 83,71 % de l'ensemble des puits d'eau (Tableau 11). Bradai (2017), constate que l'eau à alcalinité résiduelle négative provoque une salinisation du sol et potentiellement une situation de fort stress osmotique préjudiciable au bon fonctionnement physiologique des cultures.

Tableau 11 : Classes des eaux dans la plaine de la Mina

Type d'eau	Désignation	Effectif %	SAR
RSC1	RSC : Alcalinité carbonatée - (Ca+Mg) >0	16,29	37,52
RSC2.1	RSC : Alcalinité carbonatée - (Ca+Mg) + SO ₄ >0	41,61	83,71
RSC2.2	RSC : Alcalinité carbonatée - (Ca+Mg) + SO ₄ <0	58,39	

Carte d'aptitude des eaux d'irrigations par la méthode d'intersection entre la carte de la CE et la carte du SAR

Le résultat des analyses des classes de la qualité des eaux obtenus par l'intersection entre les données de la CE et du SAR montrent que la classe C₅S (C₅S₂, C₅S₃ et C₅S₄) sous le numéro 4 dans la

figure 13 est la plus dominante avec un pourcentage de 73,44 % par rapport à la superficie totale de la parcelle d'étude qui compte 5678,07 ha. Selon la carte thématique de l'aptitude des eaux, la classe C₅S est uniformément répartis dans la zone d'étude. Par ailleurs, les classes n° 2 (C₄S₃) et n° 3 (C₄S₄) couvrent respectivement 10,02 et 15,39 % par rapport à l'aire totale de la parcelle (figure 1) et se localisent dans la partie nord et la partie sud de la plaine. La classe n° 1 (C₄S₂) enregistre le plus faible pourcentage de présence avec 1,15 % localisée au centre de la parcelle.

La carte thématique de la qualité des eaux d'irrigation établie, a l'avantage de visualiser spatialement la capacité des eaux d'origine souterraine utilisées à dégrader le milieu à une échelle bien plus étendue que la parcelle réservée au diagnostic de la qualité des sols. Elle peut non seulement prévoir les risques de dégradation des sols diagnostiqués mais aussi prédire le devenir du reste des sols irrigués par ces même eaux à l'échelle de toute la parcelle où l'eau est analysée (5678,07 ha). Ce qui constitue une voie préventive d'extrapoler d'éventuelles mesures de remédiation en termes d'optimisation de la gestion de l'irrigation à l'ensemble du périmètre irrigué.

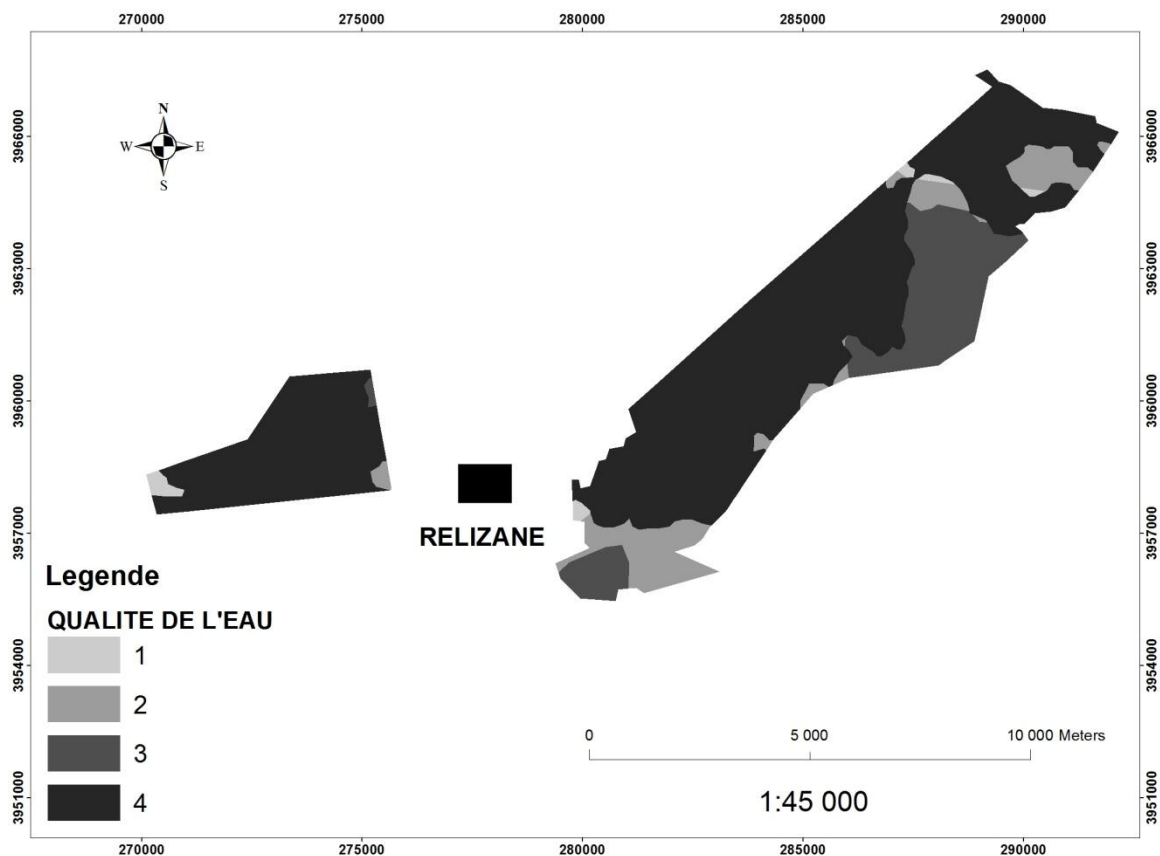


Figure 13 : Carte thématique de l'aptitude des eaux souterraines de la zone d'étude

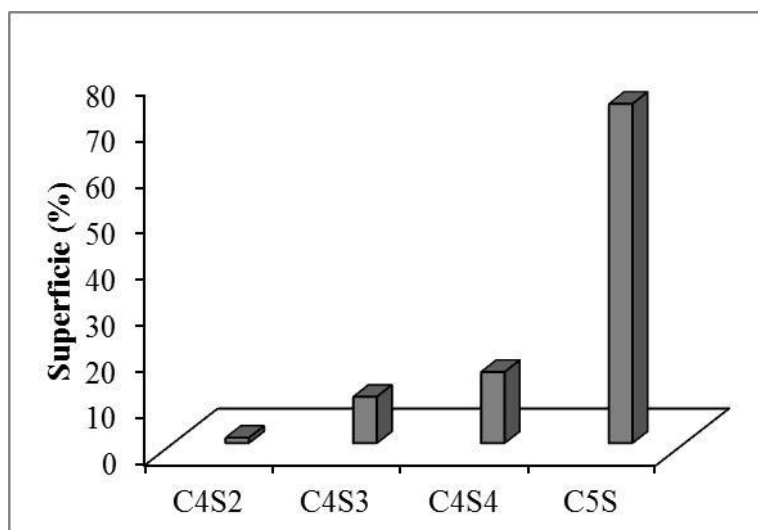


Figure 14 : Classes d'aptitude des eaux souterraines

La figure (15) montre la répartition spatiale de l'Indice de la Qualité des Eaux d'Irrigation (IWQI) dans la zone d'étude, cet indice peut indiquer une restriction sévère (SR) à une haute restriction (HR) selon le tableau (13). Le domaine d'utilisation de la qualité d'eau (restriction sévère) peut être retrouvé sur une grande zone du sud-est et de l'est-ouest de la zone d'étude. Ces zones de qualité (restriction sévère) représentent 87,55 % (près de 4971,7 ha de la superficie totale d'étude). Le reste de la zone d'étude compte environ 12,44 % (près de 706,37 ha classés comme qualité haute restriction). De plus, l'IWQI est légèrement diminué au sud-est et au sud-ouest, en raison de l'augmentation de la conductivité électrique, du SAR et des concentrations en sodium et en chlorure. Selon les recommandations (tableau 3), ces types d'eaux devraient être utilisés uniquement avec les sols caractérisés par une grande perméabilité et soumis à de fortes doses de lessivage avec certaines contraintes imposées aux types de plantes pour la tolérance spécifiée des sols.

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines par des méthodes classiques a révélé une CE qui fluctue entre 2,24 et 16,50 dS.m⁻¹. La distribution des fréquences des classes de la CE a montré la présence de la classe C₄ (mauvaise pour l'irrigation) et la classe C₅ (déconseillé pour l'irrigation). Selon la classe du SAR (10 -18) de risque moyen qui représente 49,57 % des puits étudiés, les eaux souterraines présentent un faible danger d'alcalinisation, l'alcalinité résiduelle est positive pour les 16,29 % des échantillons analysés, ce qui montre l'existence d'un risque d'alcalinisation qui n'a pas été montré par le SAR. La carte thématique établie par la méthode d'intersection de la CE et le SAR, montre une répartition spatiale de 73,44 % de la superficie totale des eaux souterraines sont utilisables pour l'irrigation.

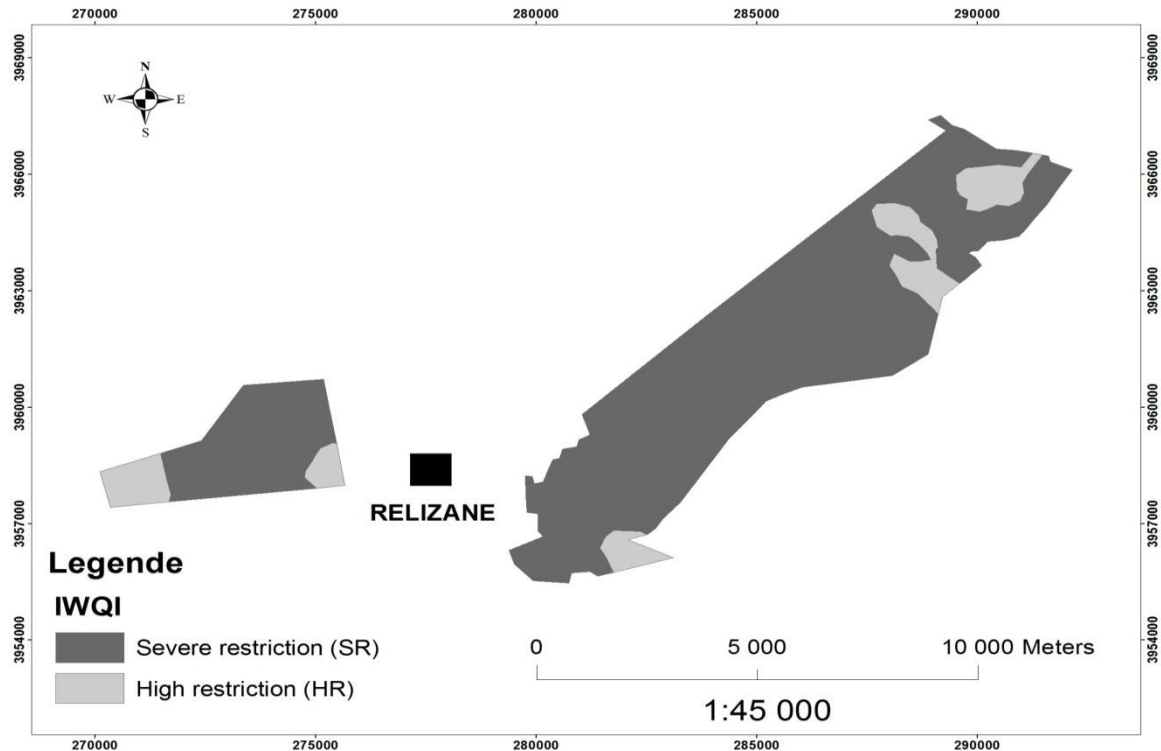


Figure 15 : Carte de l'IWQI des eaux souterraines de la zone d'étude

Par contre la carte établie par l'indice de la qualité des eaux d'irrigation (IWQI), montre une répartition spatiale de 87,55% de la superficie totale des eaux souterraines de la zone d'étude peuvent être utilisés pour l'irrigation dans des sols à une perméabilité élevée et une eau excessive doit être appliquée pour éviter l'accumulation des sels.

Cet indice de qualité de l'eau (IWQI) pourrait constituer un outil efficace pour récapituler et faire rapport sur les données de suivi aux décideurs afin de pouvoir comprendre le statut des qualités de l'eau souterraine et d'avoir la possibilité d'une meilleure utilisation à l'avenir sur la base des résultats de l'eau d'irrigation.

Carbonate de Sodium Résiduel (RSC)

Pour évaluer la qualité des eaux souterraines en vue d'un usage agricole, le diagramme de Riverside (**Richards, 1954**) est utilisé pour apprécier le risque de salinisation et sodisation des sols. Pour cela, le paramètre sodium adsorption ration (SAR) est estimé par la formule suivante :

$$SAR = \sqrt{\frac{Na^+}{\left(\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}\right)}}$$

De plus, le paramètre Carbonate de Sodium Résiduel (RSC) contribue également à cette évaluation. Il est estimé d'après Eaton (1950), Richards (1954) et Marlet et Job (2006) par la formule :

$$RSC \text{ (meq/l)} = \text{Alcalinité carbonatée} - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

Si RSC est positif, c'est la voie alcaline relative à la précipitation de calcite/sépiolite, dans le cas contraire (RSC <0) c'est la voie saline neutre. Dans ce cas, deux cas peuvent se présenter en fonction des signes de l'alcalinité résiduelle appliquée à la précipitation de calcite de sépiolite et de gypse (**Marlet et Job, 2006**) :

- L'alcalinité résiduelle est positive suivant l'addition des sulfates relatives à la précipitation du gypse, c'est la voie saline neutre à dominance sulfatée, cependant elle négative par addition des sulfates, on parle alors de la voie saline neutre à dominance chlorurée.

Indice de la qualité de l'eau d'irrigation (IQWI)

Le résultat d'utilisation de l'indice IQWI sur l'ensemble des eaux des puits de la zone d'étude, a fait ressortir deux principales classes. Une classe à restriction sévère (SR) et une classe à haute restriction (HR) représentant un pourcentage respectif de 64.04% et 36.52%. L'indice a révélé que les eaux de la plaine de la Mina peuvent être utilisées en irrigation avec des restrictions haute à sévère. La méthode de l'IQWI, a déclassé 21.91% des puits appartenant aux classes C4S4 et C5S4 vers la classe HR. Ainsi, le pourcentage de 11.23% des puits disponibles pour l'irrigation classé par la méthode de Riverside, a triplé (33.14%). Bien que l'IQWI soit habituellement orienté pour qualifier l'approvisionnement urbain en eau, il a été largement utilisé par les décideurs en matière de planification environnementale (**Khalafet Hassan, 2013 ; Haussain et al., 2014**).

C'est un indice simple qui utilise les plus importants paramètres qui évaluent la qualité de l'eau d'irrigation (**Yogendra et Puttaiah, 2008**). **Horton (1965)**, est le premier concepteur des indices de dégradation de la qualité de l'eau. Après, plusieurs recherches ont été conduites pour la mesure de l'indice de qualité de l'eau. En effet, **Rokbani et al. (2011)**, **Jerome et Pius (2010)**, **Simsek et Gunduz (2007)** ont utilisé l'indice de la qualité de l'eau d'irrigation (IQWI) comme outil de gestion de la qualité des eaux souterraines.

Le modèle IQWI a été développé par **Meireles et al., (2010)** en deux étapes. Dans premier temps, les paramètres pertinents pour la qualité de l'eau d'irrigation sont identifiés. Dans un second temps, la définition des valeurs de qualité (qi) et le poids d'agrégation (wi) sont établis. Les valeurs de (qi) (Tableau 12), sont estimées en fonction de la valeur de chaque paramètre de qualité de l'eau.

Tableau 12 : Valeurs limites pour la mesure du q_i (Ayers et Westcot, 1999)

q_i	CE (dS.m ⁻¹)	SAR (meq.l ⁻¹) ^{0,5}	Na ⁺ (Meq.l ⁻¹)	Cl (Meq.l ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ (meq.l ⁻¹)
85-100	0,20 ≤ CE < 0,50	SAR < 3	2 ≤ Na < 3	Cl < 4	1,00 ≤ HCO ₃ < 1,50
60-85	0,75 ≤ CE < 1,50	3 ≤ SAR < 6	3 ≤ Na < 6	4 ≤ Cl < 7	1,50 ≤ HCO ₃ < 4,50
35-60	1,50 ≤ CE < 3,00	6 ≤ CE < 12	6 ≤ Na < 9	7 ≤ Cl < 10	4,50 ≤ HCO ₃ < 8,50
0-35	CE < 0,20 ou CE ≥ 3,00	SAR ≥ 12	Na < 2 ou Na ≥ 9	Cl ≥ 10	HCO ₃ < 1,00 ou HCO ₃ ≥ 8,50

Ces paramètres d'irrigation sont proposés par le Comité des Consultants de l'Université de Californie (UCCC) et selon les critères établis par **Ayers et Westcot** (1999).

Ainsi les valeurs de (q_i) sont déterminées par la formule suivante :

$$q_i = q_{i\max} - \left\{ \frac{[(x_{ij} - x_{\inf}) * q_{i\text{amp}}]}{x_{\text{amp}}} \right\}$$

où : $q_{i\max}$: la valeur maximale du q_i pour la classe ; x_{ij} : la valeur observée du paramètre ;

x_{\inf} : la limite inférieure de la classe du paramètre ; $q_{i\text{amp}}$: l'amplitude de la classe du q_i ;

x_{amp} : l'amplitude de la classe du paramètre.

Les valeurs de q_i sont représentées par des valeurs non dimensionnelles. Plus la valeur est élevée, meilleure est la qualité de l'eau. Afin d'évaluer x_{amp} de la dernière classe de chaque paramètre, la limite supérieure a été considérée comme la valeur la plus élevée déterminé dans l'analyse physico-chimique des échantillons d'eau. Chaque paramètre de poids (w_i) utilisé dans l'IWQI (Tableau 12), a été obtenu par Meireles et *al.*, 2010.

Tableau 13 : Poids des paramètres de l'IWQI

Paramètres	Poids (w_i)	Paramètres	Poids (w_i)
CE	0,211	Cl ⁻	0,194
Na ⁺	0,204	SAR	0,189
HCO ₃ ⁻	0,202	Total	1,000

L'IQWI variant de 0 à 100, est subdivisé en classe en fonction du risque du problème de salinité, de la réduction de l'infiltration de l'eau dans le sol et de la toxicité pour les plantes (Tableau 14).

Tableau 14 : Caractéristiques des classes de l'indice de la qualité de l'eau

IWQI	Restriction d'usage d'eau	Recommandations	
		Sol	Plant
85-100	Aucune Restriction (AR)	Peut être utilisé pour la majorité des sols avec une faible probabilité de causer des problèmes de salinité et de sodicité, en étant la lixiviation recommandée dans les pratiques d'irrigation, à l'exception des sols à très faible perméabilité	Aucun risque de toxicité pour la plupart des plantes
70-85	Faible Restriction (FR)	Recommandé pour une utilisation dans les sols irrigués avec une texture légère ou une perméabilité modérée, en recommandant la lixiviation saline. La solubilité dans les sols à forte texture peut se produire, ce qui recommande d'éviter son utilisation dans les sols à haute teneur en argile 2: 1	Éviter les plantes sensibles au sel
55-70	Restriction modérée (MR)	Recommandé pour une utilisation dans les sols irrigués avec une texture légère ou une perméabilité modérée, en recommandant la lixiviation saline. La solubilité dans les sols à forte texture peut se produire, ce qui recommande d'éviter son utilisation dans les sols à haute teneur en argile 2: 1	Les plantes ayant une tolérance modérée aux sels peuvent être cultivées
40-55	Haute Restriction (HR)	Peut être utilisé dans des sols à haute perméabilité sans couches compactes. Un calendrier d'irrigation à haute fréquence devrait être adopté pour l'eau avec une CE au-dessus de 2 dS.m ⁻¹ et SAR au-dessus de 7.0.	Doit être utilisé pour l'irrigation de plantes de moyenne à haute Tolérance aux sels avec des pratiques spéciales de contrôle de la salinité, à l'exception de l'eau à faible valeur de Na, Cl et HCO ₃
0-40	Sévère Restriction (SR)	Devrait être évitée son utilisation pour l'irrigation dans des conditions normales. Dans des cas particuliers, peut être utilisé occasionnellement. L'eau à faible teneur en sel et une SAR élevée nécessitent une application de gypse. Dans une teneur élevée en solution saline, les sols doivent avoir une perméabilité élevée et une eau excessive doit être appliquée pour éviter l'accumulation de sel	Seules les plantes à forte tolérance au sel, excepté les eaux extrêmement faibles en Na, Cl et HCO ₃

Classification des eaux d'irrigation

Plusieurs classifications ont été proposées pour classer les eaux par rapport à leur qualité pour l'irrigation, la plupart de ces classifications se basent sur le calcul de deux facteurs essentiels, à savoir la salinité présentée par la conductivité électrique CE en dS/m, et le SAR (Sodium Adsorption ratio).

La classification de RIVERSIDE de l'USSR (1954) est la plus préconisée des domaines de qualité des eaux pour prédire les effets de ces eaux d'irrigation sur la salinité des sols. Le diagramme de Riverside repose sur le croisement de deux critères :

- le premier est la conductivité électrique (CE). Ce critère vise à quantifier la charge en sel de la solution et par voie de conséquence le risque de salinisation (accumulation de sel dans les sols). Les eaux sont classées de C1 à C4 selon le risque croissant de salinisation.
- le second est le S.A.R. (Sodium Adsorption Ratio) de l'eau ou bien le taux de sodium échangeable induit par l'eau dans le sol (ESP). Ce second critère permet d'évaluer le risque de sodisation du sol par l'eau d'irrigation. Les eaux sont classées de S1 à S4 selon le risque croissant de sodisation.

Statistiques descriptives

Les analyses physico-chimiques des eaux souterraines révèlent des amplitudes très importantes entre les valeurs minimales et les valeurs maximales (Tableau 15).

Tableau 15 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de la plaine de la Mina

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH	6,77	8,79	7,53	0,34
CE (dS/m)	2,24	16,50	5,47	2,19
Ca ⁺⁺ (meq/l)	0,05	47,33	6,27	7,06
Mg ⁺⁺ (meq/l)	0,04	65,38	12,14	12,54
Na ⁺ (meq/l)	8,87	100,00	42,43	21,62
K ⁺ (meq/l)	0,01	7,83	0,44	0,81
HCO ₃ ⁻ (meq/l)	0,04	14,60	2,60	2,88
Cl ⁻ (meq/l)	10,00	192,95	43,33	24,93
SO ₄ ⁻⁻ (meq/l)	0,77	42,55	12,65	7,13
SAR	4,28	94,73	19,60	13,15

Les conductivités électriques les plus élevées avoisinent la valeur de 16,50 dS/m, ce qui traduit une salinité excessive, due à la lithologie et à la forte évapotranspiration pendant la période estivale qui concentre la solution du sol (**Cheverry et Robert, 1998**). Généralement la qualité des eaux

souterraines avec une conductivité électrique moyenne de 5,47 dS/m, est considérée comme mauvaise pour l'irrigation. En plus, on constate que seulement 5,06% des puits analysés, ont une $CE \leq 3$ qui est la valeur maximale admissible pour la plupart des cultures (Ayers et Wescot, 1994). Les superficies pour chaque classe (C4 et C5) avoisinent les 50% et ils ont les valeurs respectives de 44.03% et 55.97% (Figure 16).

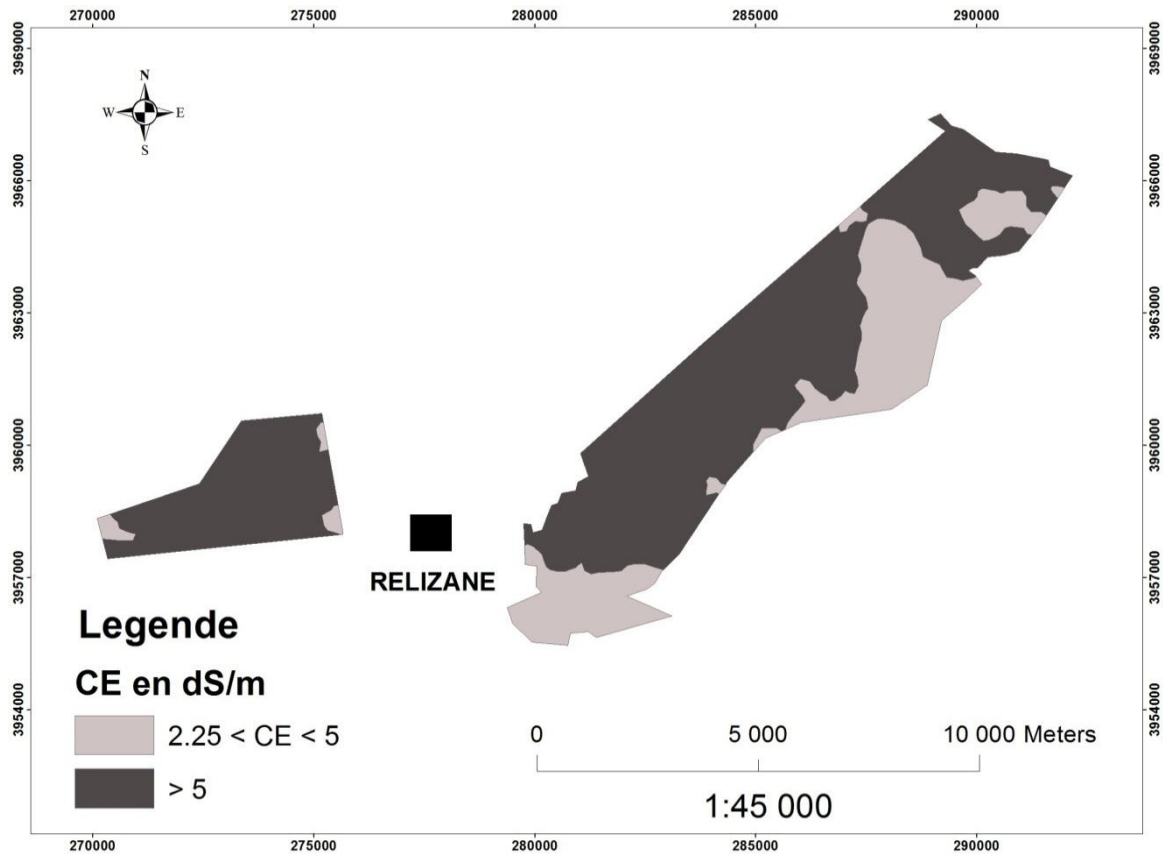


Figure 16 : Répartition spatiale des classes de salinité des eaux souterraines

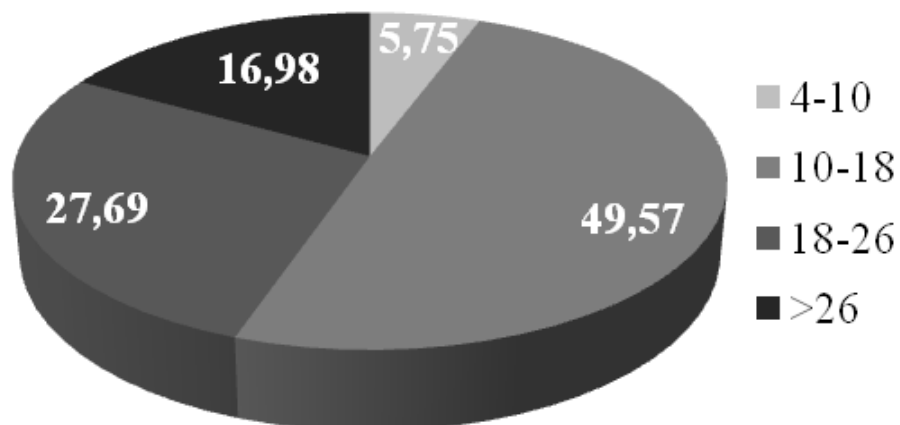


Figure 17 : Superficie de sol pour chaque classe de SAR

Concernant le paramètre SAR, on constate l'existence de quatre classes (Figure 17). Les sols affectés à la classe S1, se localisent dans le Nord-Est et le Sud-Ouest de la zone d'étude. En revanche, la classe S4 se regroupe en une seule plage située dans la partie Est de la zone prospectée (Figure 18).

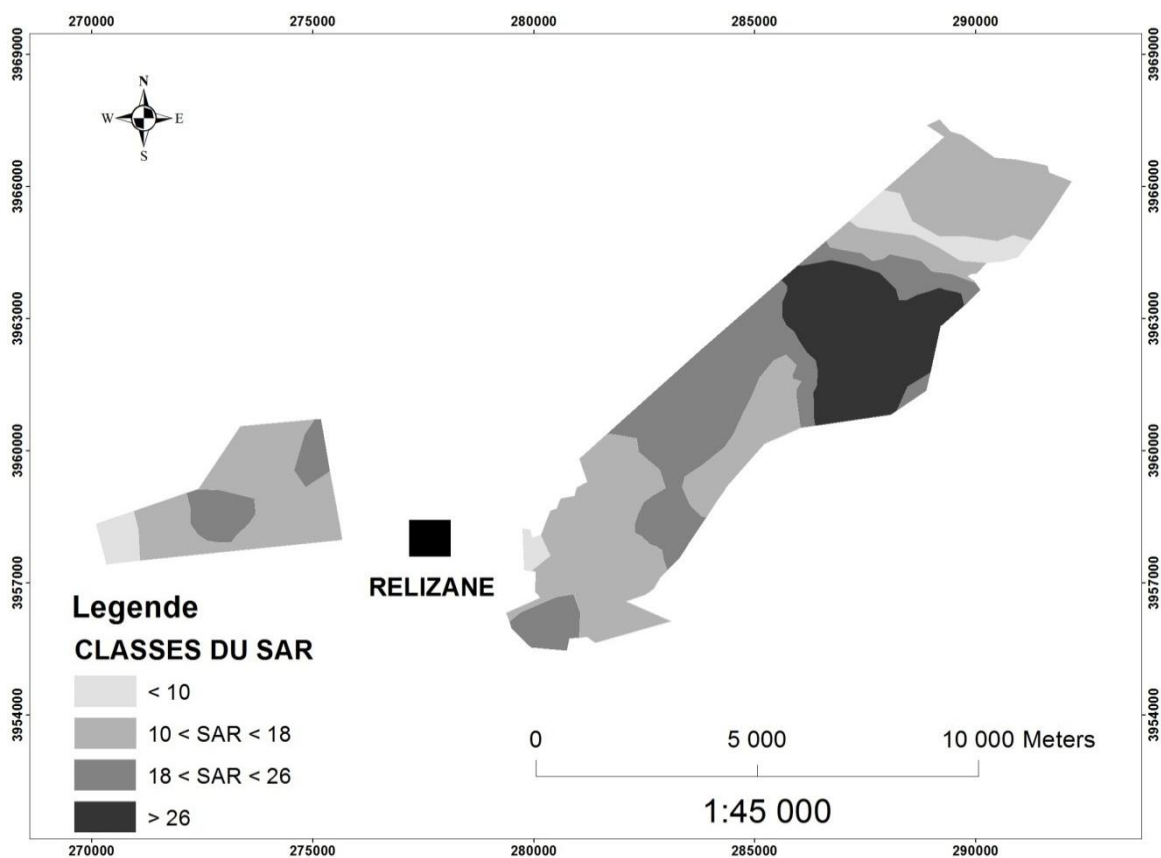


Figure 18 : Répartition spatial des classes de SAR des eaux souterraines

Approche énergétique de la salinité des sols

L'augmentation de la teneur en sels dans les sols se traduit par :

- Une modification du potentiel osmotique. Le potentiel osmotique de la solution du sol est lié à la concentration saline par la relation proposée par l'USDA(1954) :

$$\theta_0 = kCE \text{ (dS/m)}$$

où : k est un coefficient qui dépend de la nature des sels et CE est la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée à 25°C.

Le changement du potentiel osmotique de la solution des sols salés diminue la capacité de la plante à utiliser l'eau dont elle a besoin au risque de la priver complètement d'eau en la soumettant à une sécheresse conditionnée. Seules les plantes tolérantes aux sels peuvent se développer. Dans certains cas, elle est tellement élevée que le terrain devient totalement stérile et dépourvu de toute végétation y

compris les plantes halophytes; c'est le cas de la Gaa et de certaines zones du périmètre de Hmadna (**Douaoui et al, 2006**).

- Une toxicité intervient à l'intérieur de la plante et provient d'un prélèvement excessif de certains ions qui s'accumulent dans le sol lorsque la salinité se développe. Il s'agit le plus souvent du sodium et du chlore et parfois du bore (Ayers et Westcot, 1988).
- Une sodisation qui provoque une élévation du pH (souvent $\text{pH} > 8,5$) et une dégradation structurale dont le pourcentage du sodium échangeable dépend de la nature du sol et de la qualité des eaux apportées (**Sumner, 1993**).

Conclusion

On peut repartir en deux grandes catégories les facteurs qui déterminent la fréquence, l'étendue et le degré de salinisation des sols :

- Les facteurs stables, qui demeurent plus ou moins inchangés comme les matériaux originaux dans les couches géologiques, la topographie du paysage, le drainage du sol, l'hydrologie des eaux souterraines et les conditions climatiques régionales.

- Les facteurs variables susceptibles de changer à court terme, notamment les précipitations, l'évapotranspiration, l'usage des sols et les pratiques agricoles. Dans le cas de la plaine de la Mina, divers facteurs ont été à l'origine de la salinisation des sols.

- La salinisation des sols de cette plaine est d'abord primaire, comme pour la plupart des sols d'Afrique de Nord, c'est-à-dire que les sols sont des alluvions dont le matériau originel est lui-même plus au moins salé. En effet, le quaternaire représente une histoire complexe caractérisée par l'édification de plusieurs niveaux de remblaiement depuis les glacis d'accumulation en bordure des massifs montagneux jusqu'au lit actuel de l'oued Mina, en passant par les alluvions récentes qui couvrent la majeure partie de la plaine. Ces formations quaternaires se sont déposées dans les conditions de pluviosité intense, permettant d'une part le creusement du lit de l'oued Mina, d'autre part, une érosion des versants dont plusieurs formations géologiques sont composées par des roches salifères (Trias, Miocène, Helvétien, Sahélien) d'où un alluvionnement de matériaux salés.

- L'aridité du climat : le déficit hydrique dû à une faible pluviométrie annuelle (281 mm et à une évapotranspiration annuelle très élevée (1639 mm) contribue à l'accumulation des sels dans les sols.

- Les techniques culturales utilisées : parmi ces techniques, les pratiques d'irrigation agissent comme catalyseur du phénomène naturel de concentration lorsque les quantités de sels apportées par l'eau d'irrigation dans un sol ou un périmètre à celles qui sont exportées. Indirectement, en provoquant la remontée de nappe, elles accentuent aussi les rendements de sels des horizons profonds.

- L'utilisation de mauvaise qualité d'eaux souterraines dont la conductivité électrique dépasse souvent 3 dS.m^{-1} en moyenne pour l'irrigation avec le plus souvent des drains non fonctionnels, quand ils existent dans certains cas, c'est carrément l'eau drainée qui est recyclée dans l'irrigation.

Deuxième partie – Etude Expérimentale

Chapitre IV – Matériel et méthodes

Dans les périmètres irrigués, le phénomène de salinisation-sodisation constitue le principal facteur de dégradation de la qualité des sols et des eaux. Ce qui limite sévèrement la durabilité de la production agricole et affecte par conséquence l'équilibre socio-économique des populations. La dégradation par salinisation-sodisation risque de provoquer des détériorations physiques des sols irréversibles. Dans ces conditions, la gestion hydro-agricole optimisée (conduite de l'irrigation et du drainage) est déterminante en termes d'atténuation du processus de salinisation et de sodisation des sols. Il devient donc important, de comprendre non seulement les processus géochimiques qui interviennent lors du phénomène de salinisation-sodisation des sols, mais aussi pouvoir établir un diagnostic réel de l'état de dégradation pour orienter efficacement les mesures de remédiation du milieu. Dans ces conditions, il est tout aussi important, d'aborder le phénomène de salinisation-sodisation par une approche de modélisation des processus hydrogéochimiques mis en jeu. Ceci est de nature à permettre de prédire le comportement des sols et leurs dégradations en fonction du management hydro-agricole. Cette prédiction est un outil très percutant pour l'optimisation durable de la gestion hydro agricole dans les périmètres irrigués.

Méthodologie de travail

La méthodologie adoptée pour la réalisation du présent travail de recherche est composée de plusieurs étapes résumées sur le schéma de la Figure 19.

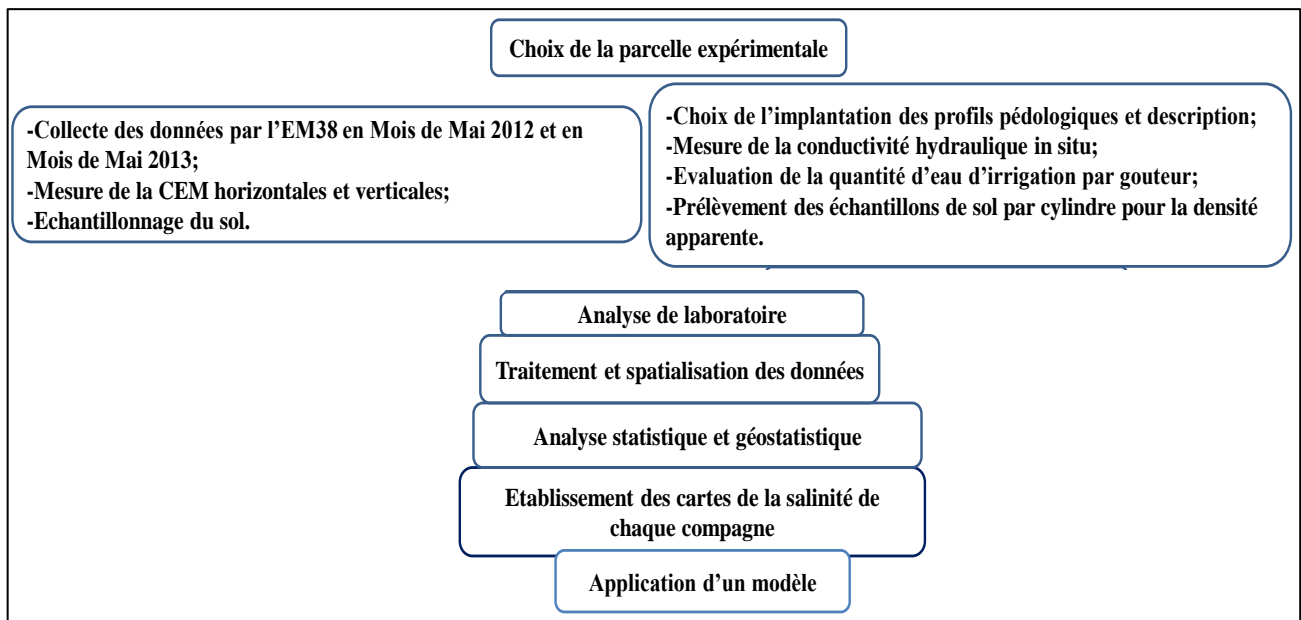


Figure 19: Chronogramme méthodologique de l'approche adoptée

L'expérimentation s'est déroulée dans une parcelle cultivée, située dans une zone salée de la plaine de la Mina à environ 5 km à l'Ouest de la ville de Relizane et 3 km à l'Est de la ville d'El

Matmar. Les coordonnées de la parcelle (en WGS 1984) se situent entre les longitudes 0°29'35'' et 0°29'46'' et les latitudes 35°43'56'' et 35°44'9'' (Fig. 20). La parcelle présente une aire d'environ 5000 m² et est occupée par une jeune oliveraie irriguée en goutte à goutte.

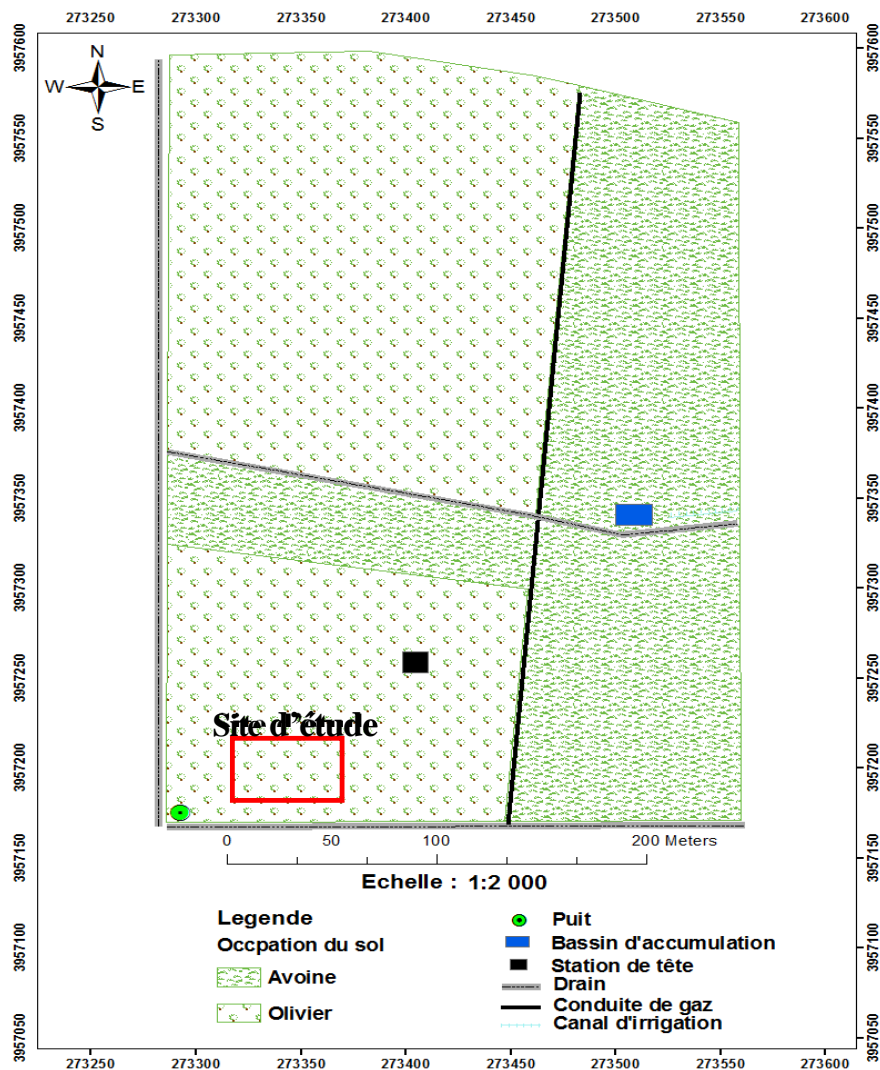


Figure 20: Localisation du site d'étude

La mesure de la conductivité électromagnétique (CEM) est effectuée selon un maillage systématique au niveau de chaque pied de l'olivier par le conductimètre électromagnétique EM38 qui couvre l'ensemble de la parcelle expérimentale avec un total de 306 points de lecture (figure 21). Le prélèvement des échantillons de sol était réalisé selon deux transects centraux, l'un longitudinal et l'autre transversal à chaque deux plants d'oliviers distants de 25 cm. Le prélèvement des échantillons du sol était effectué aux totales de 18 points sur trois profondeurs (25, 50 et 75 cm) avec un total de 54 échantillons.

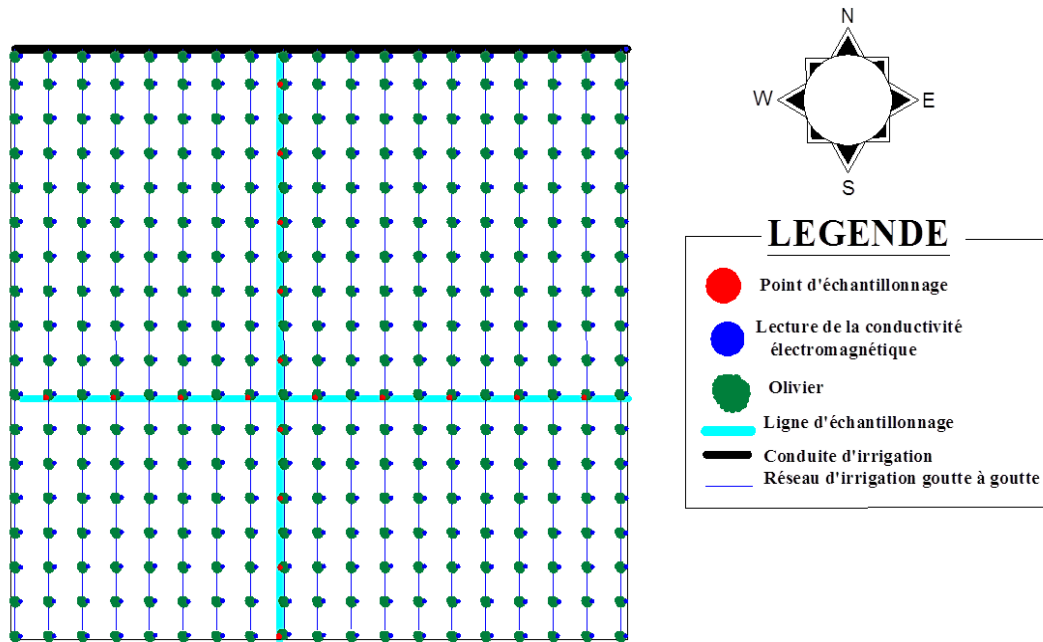


Figure 21: Plan d'échantillonnage sur le site d'étude

Matériels

Conductivimètre électromagnétique (EM 38)

La conductivité électromagnétique (CEM) est une technique de géophysique récemment adaptée à l'étude des sols (De JONC *et al.* 1979 ; in Job *et al.* 1990). Elle permet entre autres, d'évaluer la salinité globale apparente des sols, sur une profondeur de deux mètres.

L'appareil que nous avons utilisé est un EM-38 de Geonics. Il est composé de deux solénoïdes verticaux distants d'un mètre. Le premier transmet dans le sol un champ magnétique constant, induisant des courants qui s'y propagent d'autant mieux que le milieu soit plus conducteur. Ces courants créent à leur tour, suivant la loi d'Ampère, un champ magnétique proportionnel à la surface des lignes de courant, donc à la conductivité électrique du sol. Ce champ est capté par un solénoïde récepteur qui le transforme en réponse galvanométrique (figure 22).

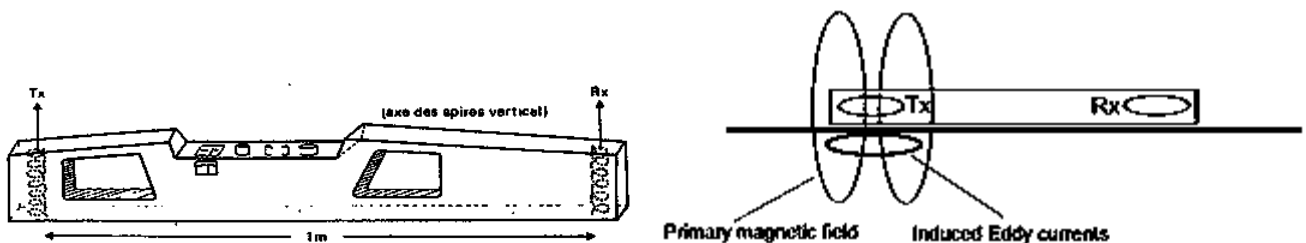


Figure 22: Appareil utilisé pour les mesures de la conductivité électromagnétique (EM-38)

L'utilisation de l'appareil dans l'étude des sols salés a été possible quand on est parvenu à obtenir un champ secondaire, proportionnel à la conductivité du matériau traversé sous certaines conditions entre la bobine émettrice et la bobine réceptrice (Figure 23).

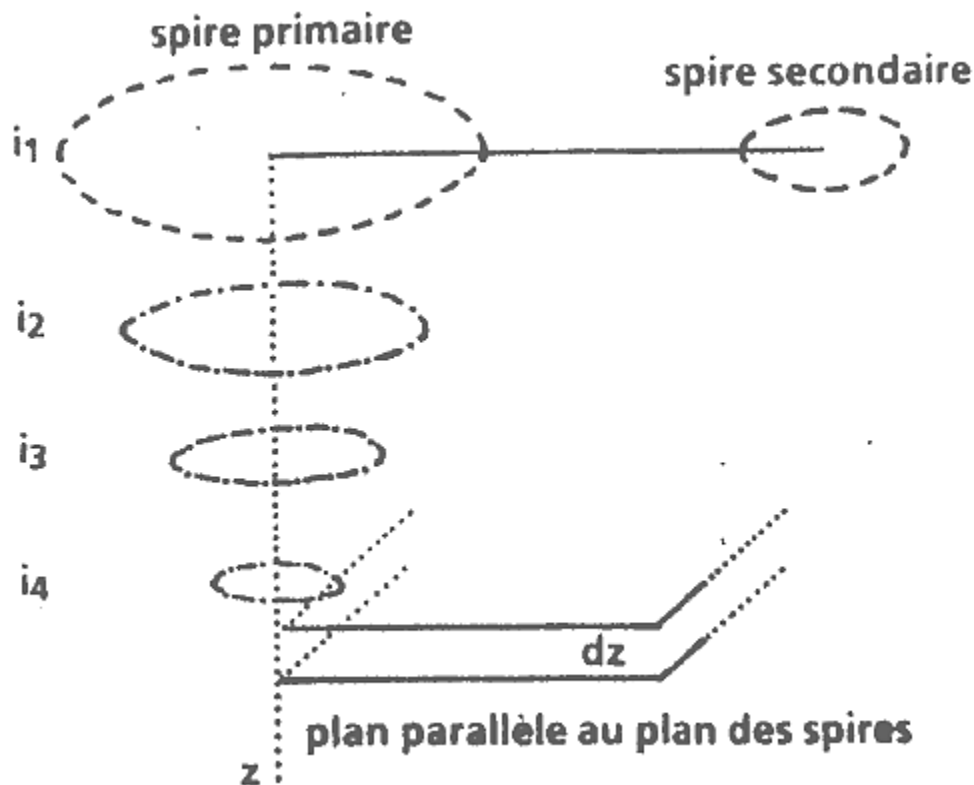


Figure 23: Principe de la mesure de CEM (d'après McNeill, 1980)

Chaque couche de sol apporte une contribution différente au champ secondaire capté par le récepteur. Cette configuration dépend de l'appareillage utilisé, de la forme, des fréquences du courant inducteur (Tabbagh, 1986 in Job et al., 1990). La représentation montrée ici est de l'EM-38 qui à deux bobines parallèles, distantes de 1 mètre, excitées par un courant de 14,6 KHz.

L'EM38 permet de mesurer la conductivité électromagnétique apparente en mode vertical sur une profondeur de 1,5 m (figure 24) et en mode horizontal sur 0,75 m de profondeur (McNeill, 1990 in Roger et al., 2003).

Les mesures de l'EM38 sont données en mS.m^{-1} et concerne la salinité apparente globale. A titre indicatif, pour une humidité pondérale moyenne du sol de 15 %, les valeurs moyennes des CEV et CEH sont comme suit (Job et al., 1990) :

0 – 30 mS.m^{-1} : sols anthropisés non salés ou sols squelettiques.

30 – 100 mS.m^{-1} : sols cultivés salés supportant des cultures.

100 – 200 mS.m^{-1} : sols salés cultivés avec baisse des rendements.

200 – 1000 mS.m^{-1} : sols à croûte ou accumulation de sels.

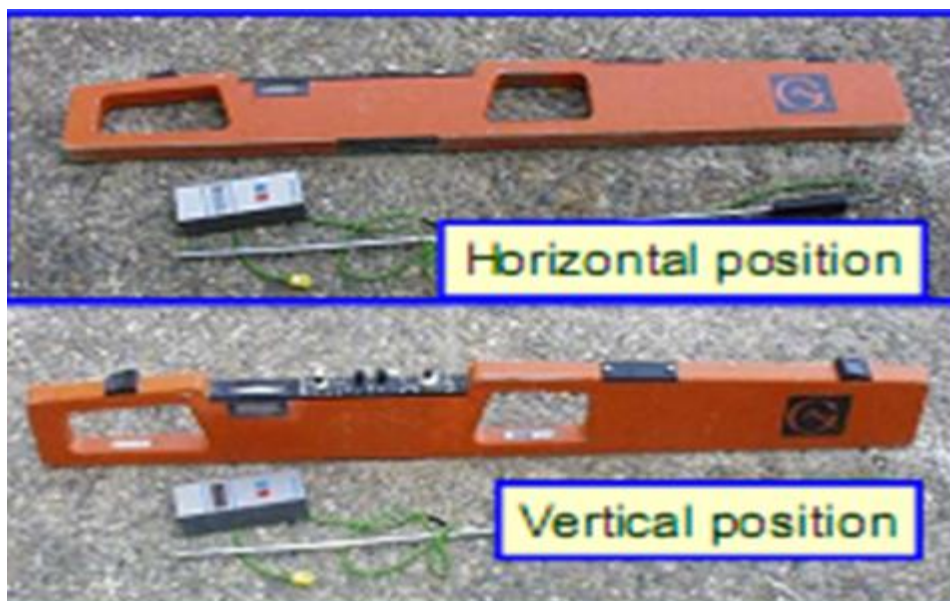


Figure 24: EM38 en mode vertical et en mode horizontal

Double cylindre de Siegrist (mesure de la CHs)

La mesure de la CHs par le double anneau de Muntz (figure 26), consiste à déterminer sur le terrain la vitesse d'infiltration de l'eau sous une charge de 3 cm. Cette charge constante est établie à l'intérieur d'un cylindre métallique de 32 cm de diamètre enfoncé de 6 cm dans le sol. Autour du cylindre de mesure, on maintient une charge identique dans un cylindre de garde de diamètre 57 cm concentrique avec le premier pour assurer une infiltration verticale (Clément M, 1997).



Figure 25: Dispositif de Muntz à double anneau pour la mesure de l'infiltration

L'essai était conduit avec 3 répétitions et a abouti aux trois graphes A, B et C (figure 26), qui révèlent les valeurs de la vitesse d'infiltration respectivement de 0,016, 0,010 et 0,006 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Ces valeurs sont faibles à cause des fortes teneurs en argile et en limon des sols. Dans ces conditions, le phénomène de fissuration polygonale des sols est souvent la cause de non-stagnation de l'eau en surface notamment durant la période s'étalant d'avril à septembre.

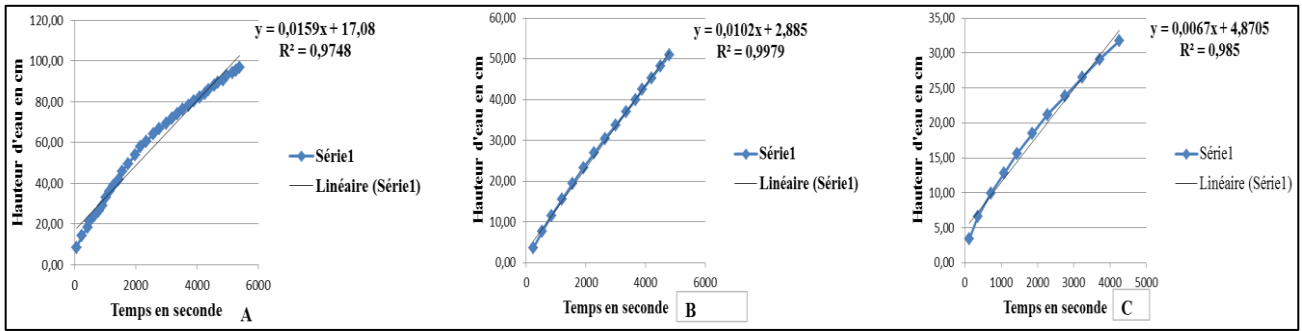


Figure 26 : Evolution de l'infiltration en fonction du temps

Global Positioning system (GPS)

Le GPS est une constellation de satellites en orbite autour de la terre. Ces derniers transmettent leurs positions dans l'espace ainsi que l'heure précise (la dérive horaire dans le temps du système GPS est de 1 seconde tous les 70000 ans). Ces données sont utilisées par le GPS pour faire des mesures de triangulation afin d'obtenir la position géographique.

Le système est dorénavant totalement opérationnel et fournit une couverture mondiale en continu et en 3 dimensions (position et altitude).

Système d'irrigation

Dans l'exploitation, on utilise le système d'irrigation au goutte à goutte sur tout le verger d'oliviers (figure 25).

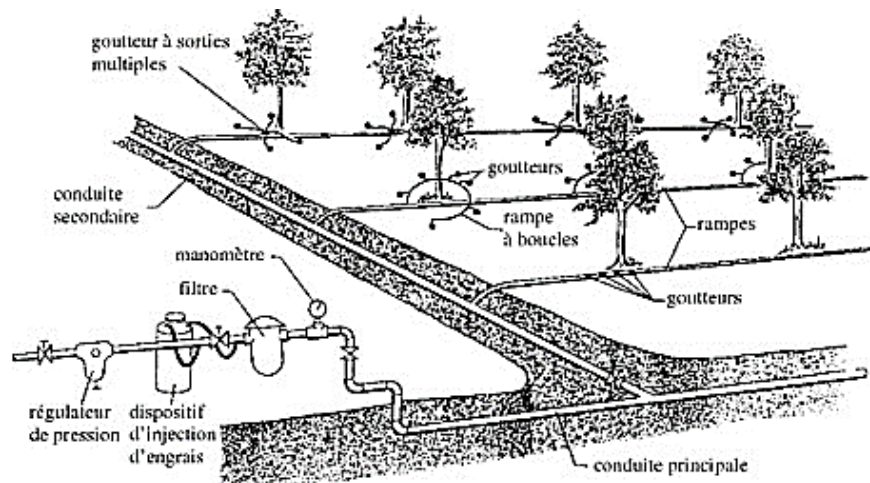


Figure 27: Schéma du principe de fonctionnement du réseau d'irrigation goutte à goutte

Les rampes portes goutteurs ont un diamètre de 20 mm et sont alimentés par une station de pompage installée à côté du bassin d'accumulation. La dose d'irrigation est variée de 35, 75 et 100 litres par plant d'une qualité d'eau de 2 dS.m^{-1} alimenté par l'eau du barrage de Sidi M'hamed Benaouda.

Méthodes

Localisations des profils pédologiques

La stratégie de localisation des profils pédologiques était raisonnée sur la base d'une prospection des niveaux de salinité dans la parcelle d'étude obtenue par l'utilisation de l'EM38 qui a permis de diviser le terrain en trois zones A, B et C (figure 28) :

Zone A : localisée au sud-ouest de la parcelle et correspond aux faibles valeurs de la salinité variant de 0,3 à 1 dS.m⁻¹,

Zone B : localisée à l'est et au centre de la parcelle et correspond aux fortes valeurs de la salinité variant de 1 à 2 dS.m⁻¹,

Zone C : localisé au nord de la parcelle et correspond à des valeurs élevées de la salinité supérieures à 2 dS.m⁻¹.



Figure 28 : Zones d'implantation des profils pédologiques

Description du profil B

Données générales

- Date: le 16/09/2012
- Coordonnée géographique: 0°29'36.7'' longitude et 35°44'0.1'' latitude
- Altitude: 62 m
- Temps: Ciel clair
- Topographie: Terrain plat
- Matériaux d'origines: Alluvions

- Etat de surface: Jeune plantation d'olivier

Description morphologique

Anp (0 à 25 cm): Sec; couleur 10YR6/3; argilo-limoneux; structure polyédrique angulaire fine à moyenne; poreux; plastique; collant; peu compacte; friable; absence d'éléments grossiers; moyennement organique; présence de fentes verticales; présence de racine fines; forte activité biologique; présence de taches blanchâtres hétérogènes; vive effervescence à l'HCl généralisée; transition nette régulière.

BCny (25 à 70 cm): Humide; couleur 10 YR 6/3; argilo-limoneux; structure polyédrique anguleuse grossière; collant; compacte; peu friable; porosité structurale importante; absence d'éléments grossiers; présence de fentes verticales; présence de racines mortes; moyennement organique; activité biologique moyenne; plastique; présence de taches planchâtes sous formes de pseudo-mycéliums; vive effervescence à HCl généralisée; transition nette et régulière.

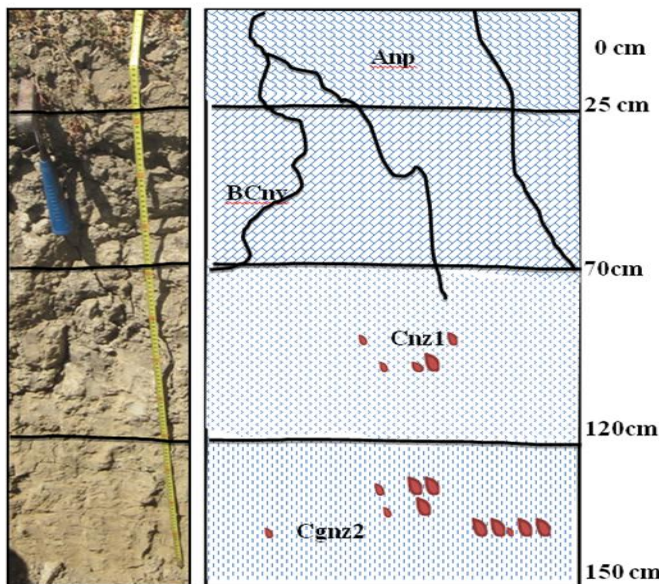


Figure 29: Image schématique du profil B



Figure 30: Accumulations des sels

Cnz1 (70 – 120 cm): Humide; couleur 10YR 6/6; limoneux; structure massive à éclat anguleux; moyennement compact; moyennement faible; collant; plastique; très poreux; très fragile; absence d'élément grossiers; non organique; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines; faible activité biologique; présence de petites taches blanchâtres; présence de quelques tâches d'hydromorphes (oxydo-réduction) de couleur grisâtres et ocrés; vive effervescence à HCl; généralisée; transition régulière et nette.

Cnz2 (120 - 150 cm): Humide; couleur 10YR 6/6; limoneux; structure massive; peu compact; très friable; collant; plastique; très peu poreux; très fragile; non organique; présence de traces-noirâtres correspondant à des anciennes racines; faible activité biologique; diminution des tâches blanchâtres; présence de tâches d'hydromorphes (oxydo-réduction) de plus nombreuses que l'horizon sus-jacent; vive effervescence à l'HCl généralisée.

Ce profil est développé sur des alluvions, sa profondeur est supérieure à 150 cm. Il est caractérisé par la présence de fentes jusqu'à une profondeur de 70 cm. Le profil est caractérisé par la présence de fortes accumulations salines dans les horizons de profondeur, ainsi que de quelques tâches d'oxydo-réduction à partir de 70 cm mais deviennent plus accentuées en profondeur.

Tableau 16 : Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil B

Paramètres	pH	CE dS.m ⁻¹	Cations (meq.l ⁻¹)				Anions (meq.l ⁻¹)			
			Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K+	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	SAR
Min	8,3	14,8	132,6	38,3	27,7	0,5	108,2	71,9	1,0	18,4
Max	8,5	45,0	460,3	64,6	87,1	0,9	473,1	91,5	3,0	49,7
Moy	8,4	30,9	288,0	50,1	59,6	0,7	285,0	83,7	1,8	31,7
CV%	1	44,1	47,9	22,2	41,9	23,1	56,7	10,1	54,7	41,4

Les principaux résultats analytiques (Tableau 16) indiquent que le profil B se caractérise par un profil salin descendant fortement salé avec une CE variant de 14,8 à 44 dS.m⁻¹ et un SAR compris entre 18,4 et 49,7. Le pH est légèrement alcalin à alcalin (8,3 à 8,5). Les chlorures **76,9 %** et le sodium 73 % sont les ions prédominants dans la solution du sol. Le faciès chimique de la solution du sol est donc de type chloruré-sodique figure 31.

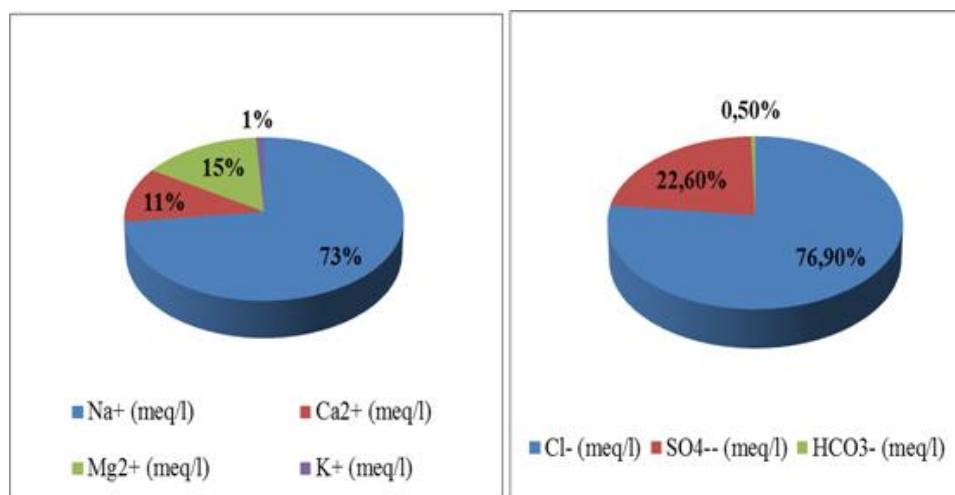


Figure 31: Répartition moyenne des cations et des anions dans la solution du sol du profil B

Description du profil A

Données générales

- Date de description: le 16/09/2012
- Coordonnée géographique: 0°29'44.8'' longitude et 35°43'59'' latitude
- Altitude: 63 m
- Temps: ciel clair
- Topographie: Terrain plat
- Matériaux d'origines: Alluvions
- Etat de surface: Terrain cultivé (avoine)

Description morphologique

Anp (0 à 28 cm): Sec; couleur à l'état sec 10 YR 6/3 argilo-limoneux; structure polyédrique angulaire fine à moyenne; poreux; plastique; collant; peu compact; friable; absence d'éléments grossiers; moyennement organique; présence de fissures; présence de racines fines; forte activité biologique; présence de taches blanchâtres hétérogènes; vive effervescence à Hcl généralisée; transition nette régulière.

BCny (28 à 76 cm): Frais; couleur 10 YR 6/4; argilo-limoneux; structure polyédrique anguleuse grossière; collant; compact; peu friable; porosité structurale importante; absence d'éléments grossiers; présence de fentes verticale (plus épaisses au sommet et moins épaisses à la base); présence de racines mortes; moyennement organique; activité biologique moyenne; plastique; présence de tâches blanchâtres sous forme de pseudo-mycéliums; vive effervescence à Hcl généralisée; transition nette et régulière.

Cny1 (76 à 95 cm): Humide; couleur 10YR 6/4; limono-argileux; structure massive; compact ; peu friable; collant; plastique; peu poreux; absence d'éléments grossiers; non organique; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines; faible activité biologique; présence de tâches blanchâtres moins intenses que l'horizon sus-jacent; vive effervescence à HCl généralisée; transition régulière et nette.

Cny2 (95 à 150 cm): Humide; couleur 10YR 7/4; limoneux; structure massive; peu compact; très friable; collant; plastique; très peu poreux; très fragile; absence d'éléments grossiers; non organique; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines; faible activité biologique; présence des taches blanchâtres moins intenses que l'horizon sus-jacent; présence de tâches d'hydromorphes (oxydo-réduction) de couleur grisâtres et ocre; vive effervescence à Hcl généralisée.

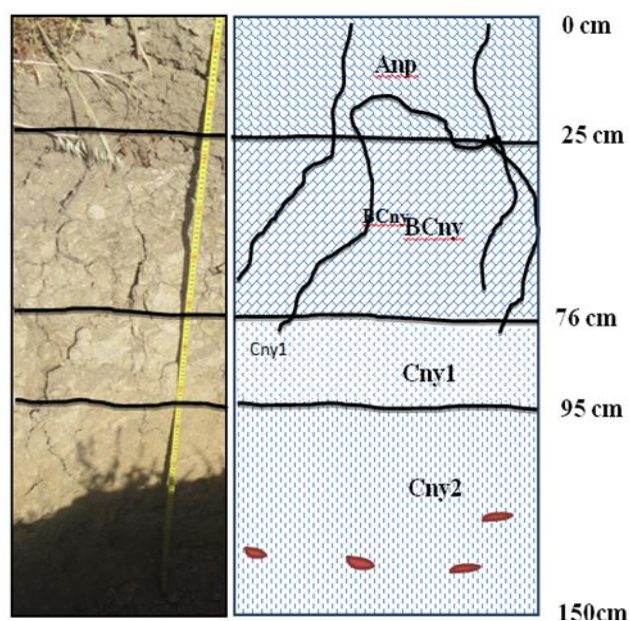


Figure 32: Image schématique du profil A

Ce profil est développé sur des alluvions, sa profondeur est supérieure à 150 cm. Il est caractérisé par la présence de fentes jusqu'à une profondeur de 76 cm du profil. Ces fentes sont plus larges en surface (1 à 2 cm) et deviennent moins épaisses en profondeur avec la présence de quelques tâches d'hydromorphes au-delà de la profondeur de 95 cm figure 32.

Tableau 17: Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil A

Paramètres	pH	CE dS.m ⁻¹	Cations (meq.l ⁻¹)				Anions (meq.l ⁻¹)			SAR
			Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	
Min	8,18	2,42	61,73	9,60	12,75	0,56	55	1,0	23,1	14,28
Max	8,67	23,2	207,40	54,20	52,54	0,72	218,1	2,0	60,8	23,12
Moy	8,3	13,9	134,78	35,78	31,92	0,65	137,98	1,5	51,2	18,58
CV%	2,7	68,6	42,42	40,88	48,32	6,98	51,22	38,5	36,6	20,00

Les principaux résultats analytiques indiquent que le profil A se caractérise par un profil salin descendant, faiblement salé en surface à fortement salé en profondeur avec une CE variant de 2,42 à 23,2 dS.m⁻¹ et par un SAR compris entre 14,28 et 23,12. Le pH est légèrement alcalin à alcalin (8.18 < pH < 8.67). Les ions prédominants dans la solution du sol sont les chlorures (72,4%) et le sodium (66,4%). Le faciès chimique de la solution du sol est de type chloruré-sodique figure 33.

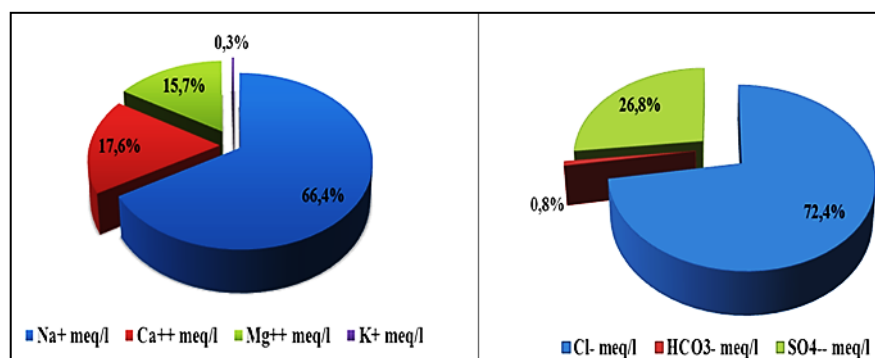


Figure 33: Répartition moyenne des cations et des anions dans la solution du sol du profil A

Description du profil C

Données générales

- Date de description: le 16/09/2012
- Coordonnée géographique: 0°29'36.8'' longitude et 35°44'7'' latitude
- Altitude: 61 m
- Temps: Ciel clair
- Topographie: Terrain plat
- Matériaux d'origines: Alluvions
- Etat de surface: Jeune plantation d'olivier.

Description morphologique

Anp (0 à 25 cm) : Sec; couleur à l'état sec 10 YR 6/4 argilo-limoneux; structure polyédrique angulaire fine à moyenne; poreux; plastique; collant; peu compacte; friable; absence d'éléments grossiers; moyennement organique; présence de fissures, présence de racines fines, forte activité biologique; présence de tâches blanchâtres hétérogènes; vive effervescence à HCl généralisée ; transition nette régulière.

BCnyz (25 - 70cm) : Humide; couleur 10YR 5/4; argilo-limoneux; structure polyédrique anguleuse grossière; collant; compact; peu friable; porosité structurale importante; absence d'éléments grossiers; présence de fentes verticale (plus épaisses au sommet et moins épaisses à la base); présence de racines mortes; moyennement organique; activité biologique moyenne; plastique; présence de tâches blanchâtres sous forme de pseudo-mycéliums; présence de quelques taches d'hydromorphes (oxydo-réduction) de couleur grisâtres et ocres; vive effervescence à HCl généralisée; transition nette et régulière.

Cgnyz (70 - 150 cm): Humide; couleur 10YR 6/3; argilo-limoneux; structure massive à éclat anguleux; moyennement compact; moyennement friable; collant; plastique; très poreux; très fragile;

absence d'éléments grossiers; non organique; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines; faible activité biologique; présence de nombreuses taches d'hydromorphes (oxydo-réduction) de couleur grisâtres et ocres; présence de taches blanchâtres; vive effervescence à HCl généralisée.

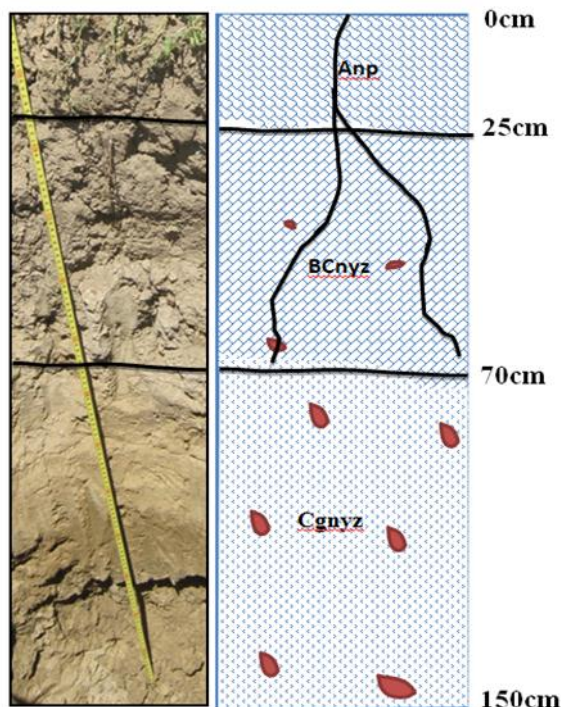


Figure 34: Image schématique du profil C

Ce profil est développé sur des alluvions, sa profondeur est supérieure à 150 cm. Il est caractérisé par la présence de fentes et l'apparition d'une fine couche de pseudo-sable à la surface du sol. Le profil est caractérisé par la présence de très fortes accumulations salines dans les horizons de profondeur, ainsi que de fortes tâches d'oxydo-réduction à partir de 50 cm.

Tableau 18: Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil C

			Cations en (meq.l ⁻¹)				Anions en (meq.l ⁻¹)			
Paramètres	pH	CE dS.m ⁻¹	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	SAR
Min	8,3	8,4	92,6	35	15,1	0,8	49	75,3	1	14,2
Max	8,6	50,1	517,4	50,6	72,1	1	493,6	134,4	2	55,6
Moy	8,5	31,3	330,1	42,1	45	0,9	299,8	95,6	1,7	39
CV%	2	67,6	65,7	18,7	63,6	13,3	76	35,2	34,6	56,1

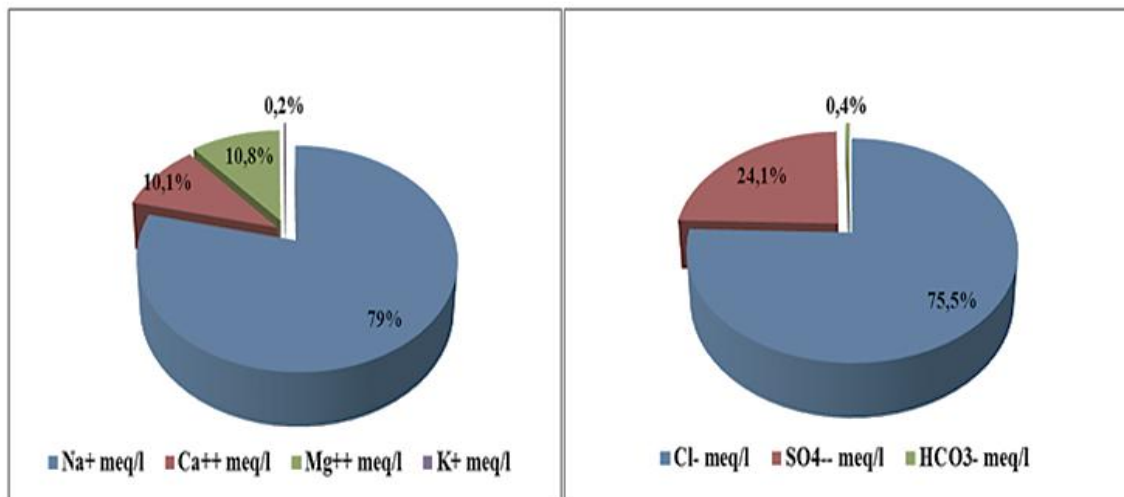


Figure 35: Répartition moyenne des cations et des anions dans la solution du sol du profil C

Les principaux résultats analytiques indiquent que le profil C se caractérise par un profil salin descendant très fortement salin avec une CE comprise entre 8,4 et 50,1 dS.m⁻¹ et par un SAR variant de (14,2 < SAR < 55,6%). Le pH est légèrement alcalin à alcalin (8,3 à 8,6). Les chlorures (75,5%) et le sodium (79 %) sont les ions prédominants de la solution du sol. Le faciès chimique de la solution du sol est donc de type chloruré-sodique figure 35.

Méthodes d'analyses

Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique, a été effectuée au laboratoire de l'Institut National des Sols de l'Irrigation et du Drainage (INSID), sur quarante-huit échantillons de sol prélevé au niveau du site par la méthode internationale de la pipette de Robinson.

Densité apparente

La densité apparente est l'un des paramètres les plus importants dans les études de caractérisation physico-chimique des sols. Pour un échantillon intact de sol, la densité apparente **da** est exprimée par la relation suivante :

$da = [Ms \text{ (masse du solide sec en gramme)} / Va \text{ (volume apparent en cm}^3\text{)}] / pe \text{ (masse volumique de l'eau)}$.

Humidités pondérale et volumique

En termes de gestion de l'irrigation, l'évaluation de l'humidité du sol est importante pour assurer un confort hydrique à la plante sans gaspillage de l'eau. La méthode gravimétrique permet d'obtenir l'humidité massique **Hm** d'un échantillon de sol en % par rapport à sa masse **Ms** à l'état sec en gramme :

$H_m (\%) = [M_e \text{ (masse d'eau en gramme)} / M_s] \times 100.$

Il est possible de déterminer la teneur en eau volumique H_v comme suit :

$H_v = H_m \times d_a$, d_a étant la densité apparente ($d_a = M_s / V_a$), V_a volume apparent en cm^3 .

Dose pratique d'irrigation

D'après **Rhodes, 1974**, le lavage requis LR ou l'exigence de lixiviation est une fraction d'eau qui doit passer au travers du profil du sol pour amener les sels en dehors la zone des racines qui s'accumuleront à l'interface limite entre la partie mouillée du sol est la partie sèche. En irrigation goutte à goutte, le LR est obtenu par la formule suivante :

$LR = CE_i / 2 CE_{max} (\%)$

avec CE_i : conductivité électrique de l'eau d'irrigation,

CE_{max} : CE_{esp} qui provoquerait une chute totale du rendement de la culture.

Dans le cas de l'olivier, $CE_{max} = 14 \text{ dS.m}^{-1}$ (FAO, 1985),

avec $CE_i = 2,24 \text{ dS.m}^{-1}$, $LR = 2,24 / (2 \times 14) = 0,08$.

Dans ces conditions la dose de lessivage $DL = LR / (1 - LR) = 0,08 / (1 - 0,08) = 8,69 \%$, ce qui veut dire qu'il faut ajouter lors de l'irrigation une dose supplémentaire qui correspond à 8,69 % de la quantité d'eau répondant aux besoins de la culture (l'équivalent de l'évapotranspiration maximale de la culture ETM).

Le lessivage est efficace lorsque l'eau de drainage salée est déversée à travers des drains souterrains transportant cette eau à l'extérieur de la zone racinaire. Il peut également être efficace en l'absence de drains souterrains à condition que le drainage naturel soit effectif et n'augmente pas le niveau de la nappe adjacente. Il est préférable de faire ce lessivage lorsque l'humidité du sol est faible et la nappe phréatique adjacente suffisamment basse. Lessiver durant les mois d'été est moins efficace du fait de la forte évaporation et des quantités d'eau qui y sont perdues. Néanmoins, le choix de la période de lessivage doit se faire en relation avec la disponibilité en eau, le type de sol, la qualité de l'eau et la tolérance de la culture.

L'expérimentation est basée sur des mesures techniques réalisées sur le terrain d'étude, la dose d'irrigation goutte à goutte est évaluée pendant les deux campagnes 2012 et 2013. Chaque campagne a fait l'objet de deux cycles d'arrosage. Durant la première campagne, l'irrigation est déclenchée, dans un premier temps, le 28/06/2012 avec une dose de 75 litres par plant et dans un second temps, le 09/07/2012 avec une dose de 35 litres par plant. Durant la deuxième campagne, l'irrigation est déclenchée le 21/07/2013 avec une dose d'irrigation de 100 litres par plant et le 30/07/2013 avec la même dose.

CE de l'extrait de la pâte saturée

Afin de suivre l'évolution de la salinité, les lectures de la CEM doivent être calibrées avec la conductivité électrique de l'extrait de pâte de saturation (CEeps), estimée au laboratoire par la méthode rapportée par Richards (1954). Cette méthode permet d'approcher la solution du sol quand elle se trouve à son humidité à la capacité au champs (HCC), ce qui permet de mieux évaluer les effets de la salinité sur la croissance des plantes (Richards, 1954, Rhoades et *al.*, 1999 ; Khorsandi et Yazdi, 2011).

L'extrait de pâte de saturée est préparé dans une capsule de porcelaine sur un échantillon de 200 à 500 g de sol. À l'aide d'une éprouvette graduée remplie d'eau distillée, on humecte le sol très lentement en mélangeant à l'aide d'une spatule jusqu'à l'obtention d'une pâte satisfaisant les conditions suivantes :

- elle doit couler lentement, lorsqu'on incline la capsule de près de 45°,
- sa surface doit apparaître brillante sans le moindre surplus d'eau,
- quand on ouvre une rainure sur la pâte, elle disparaît au bout de quelques à-coups effectués sur le récipient.

On note le volume d'eau versé et on rassemble la pâte au fond de la capsule en ménageant un trou de 2 à 3 cm³. Après une heure, si de l'eau s'est rassemblée dans le creux, le point de saturation a été dépassé, il convient d'ajouter de la terre (en notant la masse ajoutée) et de renouveler les trois tests précédents. On laisse reposer pendant 4 heures en couvrant d'un papier filtre humide ou d'un film plastique pour éviter l'évaporation. On procède ensuite à la centrifugation de la pâte saturée, pendant 10 minutes, à 3000 tours par minute, dans des supports en godets (de 250 à 500 ml) préalablement tapissé de film plastique pour éviter les risques de contamination. Après séparation par centrifugation, on récupère l'aliquote et on mesure la conductivité électrique à l'aide d'un conductivimètre de paillasse. Par la suite, on procède à une filtration de l'aliquote, sur papier filtre sans cendre, afin d'éliminer les fragments de matière organique. La solution doit être parfaitement limpide. Les volumes récupérés sont généralement faibles mais les solutions sont concentrées. A cet effet, on effectue des dilutions (1/50 ou 1/100) après avoir mesuré la conductivité électrique. Cette solution est destinée aux analyses du bilan ionique (cations et anions solubles).

Etude de la variabilité spatiale de la salinité

Les statistiques descriptives ont été utilisées pour appuyer l'interprétation des variables en tenant compte de la corrélation et de la localisation des échantillons. Par la suite, nous avons utilisé les régressions linéaires qui ont servies à réaliser un étalonnage des mesures électromagnétiques et répondre ainsi à notre objectif.

Coefficient de variation

En analyse statistique classique, le coefficient de variation est souvent utilisé pour décrire et étudier la variabilité des propriétés physico-chimiques des sols. Il ne rend toutefois pas compte de la nature de la loi de distribution dont la connaissance est essentielle pour traiter des données en termes de valeurs moyennes ou de probabilité d'avoir une valeur inférieure à une certaine limite (**Vauclin, 1982**). L'approche géostatistique fournit un outil moderne pour comprendre le modèle de variabilité spatiale des sols en analysant la dépendance spatiale ou temporelle des échantillons (**Trangmar et al, 1985**).

Lorsque l'on obtient un C.V. faible, il est inutile d'augmenter le nombre d'observations pour mieux définir la loi de distribution car l'erreur commise est faible. En revanche, pour un C.V. élevé, la détermination de la loi de distribution est impérative puisque que l'on ne peut a priori assimiler mode et moyenne (**Vauclin, 1982**).

Cinq classes, basées sur la valeur du CV, sont proposées par **Nolin et al (1997)** pour qualifier l'intensité de la variabilité des sols (**Tab.19**).

Tableau 19: Classes d'intensité du coefficient de variabilité (Nolin et al, 1997).

Intensité de la variabilité	Coefficient de variabilité (%)
Faible	<15
Modérée	15-35
Élevée	35-50
Très élevée	50-100
Extrêmement élevée	>100

Régression linéaire et corrélation

Si une relation suffisamment importante se confirme entre X et Y, on peut poursuivre l'analyse en effectuant une régression. Cette relation peut être linéaire : $Y = a + bX$

Les paramètres a (ordonnée à l'origine) et b (pente) peuvent être déterminés selon deux méthodes, la méthode des moindres carrés, ou celle des moindres rectangles, qui seront choisies en fonction du type de relation existant entre X et Y.

Lors de l'établissement d'une équation de régression, le coefficient de détermination (R^2) détermine à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points. Si R^2 est nul, cela signifie que l'équation de la droite de régression détermine 0 % de la distribution des points, le modèle mathématique n'explique pas la distribution des points. Si le R^2 vaut 1 la droite de régression est

capable de déterminer 100% de la distribution des points. Le modèle mathématique et les paramètres a et b calculés déterminent correctement la distribution des points.

Plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points est diffus autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R^2 tend vers 1, plus le nuage de points se rapproche de la droite de régression. Quand les points sont bien alignés sur la droite de régression, $R^2 = 1$ ($0 \leq R^2 \leq 1$).

Le R^2 est calculé selon la formule: $R^2 = \frac{\text{SCEy estimés par l'équation de régression}}{\text{SCE totale}}$

R^2 exprime la variabilité expliquée par la régression par rapport à la variabilité totale.

Pour l'évaluation de l'adéquation entre les valeurs calculées par les équations de régressions et les valeurs mesurées de la conductivité électrique de la pâte saturée du sol (CEeps), le critère d'erreur

suivant est utilisé: $\text{Erreur (\%)} = \frac{[(\text{Valeur calculée} - \text{Valeur mesurée})^2]^{1/2}}{[(\text{Valeur mesurée})^2]^{1/2}}$

Chapitre V - Résultats et discussions

Paramètres physico-chimiques du sol

Analyse granulométrique

D'après les résultats d'analyses, on remarque que la fraction fine est généralement abondante dans tous les horizons des profils étudiés. La fluctuation est variée entre le taux d'argile et le taux de limon des horizons de subsurface à la profondeur (Tableau 20) avec un faible taux de la fraction des sables. L'augmentation de la fraction de limon peut provoquer le colmatage des pores et de l'aération, et par conséquent une diminution de la perméabilité en profondeur.

Tableau 20: Résultats de l'analyse granulométrique

Horizons (cm)	0 - 25	25 - 50	50 - 75	75 - 100
Argiles (%)	46,5 à 52,6	55,5 à 60,4	40,2 à 45,7	30,6 à 36,7
Limons (%)	35,5 à 40,3	30,8 à 40,4	46,5 à 50,2	55,8 à 60,6
Sables (%)	8,3 à 10,2	8,1 à 11,2	5,8 à 14,1	3,7 à 14,6

Densité apparente

Plusieurs essais ont été effectués sur site à différentes profondeurs pour avoir les données de la densité apparente, comme c'est un facteur très important pour la détermination de la réserve utile (UR) de l'eau dans les sols et aussi pour la gestion de l'irrigation. Nous avons enregistré des valeurs diverses (Tab : 21) du premier horizon jusqu'aux la troisième et on remarque que plus en allons à la profondeur la densité apparente augmente, ça explique que ce sont des sols lourds et très compacte en profondeur.

Tableau 21: Valeurs de la densité apparente

Horizons (cm)	0 - 25	25 - 50	50 - 75
Densité apparente (g.cm ⁻³)	1,47	1,66	1,76

Humidité

Les résultats statistiques descriptifs de l'humidité des horizons durant les deux campagnes 1 et 2 sont présentés dans les deux tableaux suivants, ils montrent des fluctuations proches pour les valeurs moyennes de l'humidités. Ces humidités représentent ce que les irrigations apportent au verger sachant que l'agriculteur menait l'irrigue sous les contraintes de la disponibilité de l'eau liée essentiellement aux lâchées d'eau effectuées par les services de distribution tel que l'ONID (office National de l'Irrigation et du Drainage) sans tenir au compte de la texture, la perméabilité et la salinité du sol.

Tableau 22: Résultats statistique de l'humidité et de déficit hydrique pendant la première campagne

	Horizons	Max %	Min %	Moyenne %	Hv %	RU _{théor} mm	RU _{calcul} mm	Déficit hydrique mm
Avant Irrigation	Horizon H1	16,44	11,12	15,29	22,63	37,00	6,72	30,28
	Horizon H2	20,48	14,35	17,30	26,82	38,75	15,15	23,60
	Horizon H3	23,20	14,06	18,90	30,24	40,00	22,48	17,52
Après 1 ^{ère} Irrigation	Horizon H1	30,67	19,01	24,41	36,13	37,00	31,69	5,31
	Horizon H2	28,77	16,38	20,63	31,98	38,75	25,15	13,60
	Horizon H3	23,74	14,56	18,68	29,89	40,00	21,78	18,22
Après 2 ^{ème} Irrigation	Horizon H1	25,95	12,88	18,44	27,29	37,00	15,34	21,66
	Horizon H2	23,75	15,78	19,10	29,61	38,75	20,56	18,19
	Horizon H3	25,00	15,83	18,90	25,33	40,00	12,66	27,34

Les figures ci-dessous représentent le déficit hydrique après l'irrigation en 1^{er} campagne et la 2^{ème} campagne. La figure 36 montre que le déficit hydrique est important par rapport à la réserve utile calculé pendant toute la campagne d'irrigation, cela signifie que l'agriculteur néglige les propriétés physiques et chimiques du sol. Cependant à la 2^{ème} campagne il arrive de satisfaire les besoins en eau du sol sans tenir compte la dose de lessivage figure 37.

Tableau 23: Résultats statistique de l'humidité et de déficit hydrique pendant la deuxième campagne

	Horizons	Max %	Min %	Moyenne %	Hv %	RU _{théor} mm	RU _{calcul} mm	Déficit mm
Avant Irrigation	Horizon H1	20,47	14,88	17,76	26,29	37,00	13,49	23,51
	Horizon H2	20,11	13,83	17,46	27,06	38,75	15,62	23,13
	Horizon H3	20,88	16,10	18,05	28,88	40,00	19,76	20,24
Après 1 ^{ère} Irrigation	Horizon H1	34,31	25,28	28,12	41,62	37,00	41,85	-4,85
	Horizon H2	36,34	22,19	26,35	40,85	38,75	42,33	-3,58
	Horizon H3	31,98	22,34	25,37	40,59	40,00	43,18	-3,18
Après 2 ^{ème} Irrigation	Horizon H1	34,68	18,29	27,34	40,47	37,00	39,72	-2,72
	Horizon H2	32,36	21,61	25,78	39,96	38,75	40,61	-1,86
	Horizon H3	36,28	21,55	25,73	41,17	40,00	44,34	- 4,34

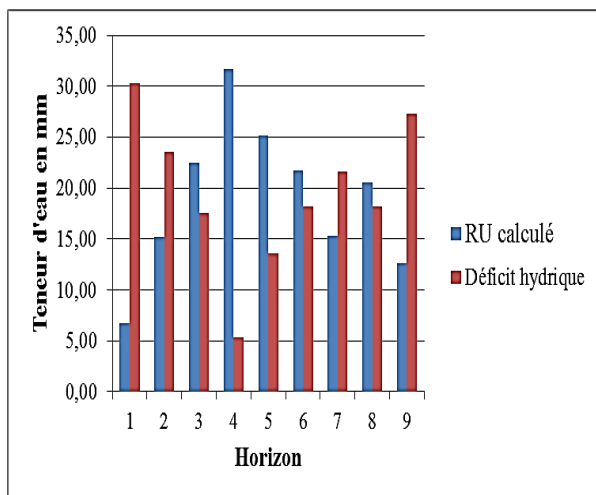


Figure 36: Déficit hydrique 1er campagne

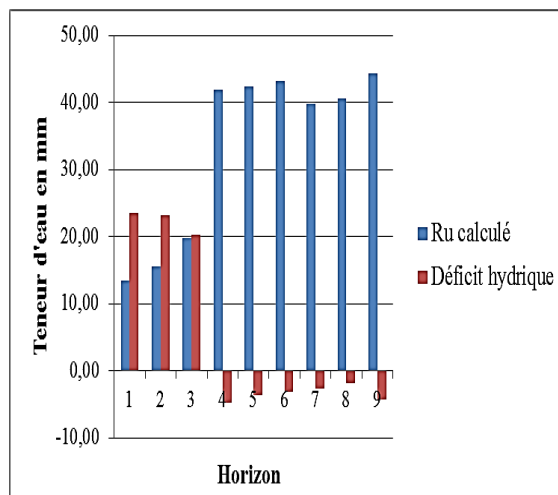


Figure 37: Déficit hydrique 2ème campagne

Variation de l'humidité H pour les deux campagnes

Variation de H dans le premier horizon

Les variations de l'humidité des horizons H0, H1 et H2 pour les deux campagnes d'irrigation sont présentées au tableau suivant, ils montrent une différence de 50 % de minima avant l'irrigation. On observe aussi que le maxima enregistre les mêmes valeurs pendant l'irrigation 1 et 2 de la deuxième campagne avec des valeurs élevées des coefficients de variation avant irrigation et après la seconde irrigation de la campagne 1.

Tableau 24: Paramètres statistiques des humidités de l'horizon H1 de la campagne 1 et 2

Paramètres	Horizon H1 (première campagne)			Horizon H1 (seconde campagne)		
	Avant Irrigation	Après 1 ^{ère} Irrigation	Après 2 ^{ème} Irrigation	Avant Irrigation	Après 1 ^{ère} Irrigation	Après 2 ^{ème} Irrigation
Min	7,01	19,01	12,88	14,88	25,28	18,29
Max	16,44	30,67	25,95	20,47	34,31	34,68
Moy	12,29	24,41	18,44	17,76	28,12	27,34
Ecart type	2,84	2,94	3,42	1,73	2,31	4,25
CV %	23,12	12,06	18,57	9,76	8,22	15,53

Variation de H dans le deuxième horizon

On remarque que le minima, le maxima et la moyenne restent stables au niveau de l'horizon H₂ avant l'irrigation pendant les deux campagnes, on registre néanmoins des variations importantes des humidités de l'horizon H₂ après les irrigations pendant les deux campagnes. On signale que le

coefficient de variation reste non élevé c'est-à-dire que la dispersion des points échantillonnés n'est pas importante.

Tableau 25: Paramètres statistiques des humidités de l'horizon H2 pour les deux campagnes 1 et 2

Paramètres	Horizon H2 (première campagne)			Horizon H2 (seconde campagne)		
	Avant Irrigation	Après 1 ^{ère} Irrigation	Après 2 ^{ème} Irrigation	Avant Irrigation	Après 1 ^{ère} Irrigation	Après 2 ^{ème} Irrigation
Min	14,35	16,38	12,88	13,83	22,19	21,61
Max	20,48	28,77	25,95	20,11	36,34	32,36
Moy	17,30	20,63	18,44	17,46	26,35	25,78
Ecart type	1,82	3,28	3,42	2,01	4,04	3,25
CV %	10,50	15,91	18,57	11,52	15,31	12,63

Variation de H dans le troisième horizon

On observe que le minima, le maxima et la moyenne du troisième horizon H3 restent stables pendant la première campagne que la deuxième campagne avec un même écart-type sauf l'humidité de la deuxième campagne d'irrigation qui est légèrement élevé. Le coefficient de variation enregistre une valeur faible pendant la deuxième campagne avant l'irrigation par rapport aux périodes d'irrigations.

Tableau 26: Paramètres statistiques des humidités de l'horizon H3 de la campagne 1 et 2

Paramètres	Horizon H3 (première campagne)			Horizon H3 (seconde campagne)		
	Avant Irrigation	Après 1 ^{ère} Irrigation	Après 2 ^{ème} Irrigation	Avant Irrigation	Après 1 ^{ère} Irrigation	Après 2 ^{ème} Irrigation
Min	14,06	14,56	15,83	16,10	22,34	21,55
Max	23,20	23,74	25,00	20,88	31,98	36,28
Moy	18,90	18,68	18,90	18,05	25,37	25,73
Ecart type	2,83	2,97	2,56	1,24	2,64	4,01
CV %	14,97	15,89	13,55	6,86	10,42	15,60

La figure suivante confirme les résultats de l'humidité moyennes des horizons H0, H1 et H2 pour les deux campagnes d'irrigation 1 et 2 discutés par rapport aux deux tableaux précédents. La tendance globale pour tous les horizons et pour les deux campagnes, une augmentation de l'humidité au bout de la première irrigation par rapport à l'état du sol avant irrigation et une légère diminution après la seconde irrigation par rapport à la première.

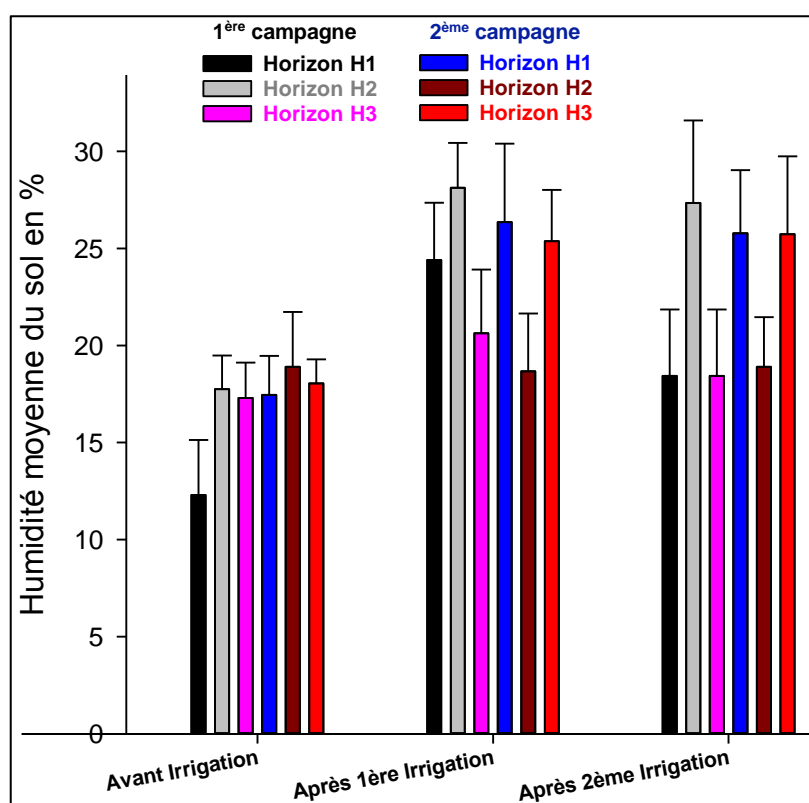


Figure 38 : Variation d'humidité de l'horizon H3 des campagnes 1 et 2

Salinité totale du sol

Dans les méthodes classiques, l'étude de la salinité se fait par un prélèvement des échantillons de sol en différents points et à différentes profondeurs. La quantité de sels est ensuite estimée par extraction des échantillons à l'eau (sous forme de pâte saturée ou d'extraits aqueux avec plusieurs rapport sol-eau). Le prélèvement des échantillons est limité en nombre en raison de la lourdeur de l'opération qui bien qu'elle fournisse des résultats relativement précis demeure localisée au volume de sol prélevé. La prospection électromagnétique, en revanche, concerne un volume de sol plus important balayé par le champs électromagnétique (De JONG *et al.*, 1979). En effet, les mesures de la conductivité électromagnétique des sols peuvent être exacerbées avec une fréquence spatiale plus importante et sont plus faciles à l'établissement de cartographie. C'est pourquoi, avec le temps la conductivité électromagnétique s'est imposée comme une voie à grande échelle d'utilisation pour la mesure de la salinité des sols (Job *et al.*, 1987 ; Williams et Bake, 1982 ;). Il importe par la suite de transformer la conductivité électromagnétique en conductivité électrique moyenne de l'extrait de pâte saturée du sol (CEsat) via des corrélations avec des mesures in situ avec un nombre d'échantillons prélevés suffisant. Les résultats de la salinité totale peuvent être discutés en fonction de la texture du

sol et de son état hydrique. La salinité totale en termes de conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée du sol est exprimée en Décisiemens par mètre (dS.m^{-1}) ou en millimhos par centimètre (mmho.cm^{-1}) qui était anciennement utilisée. La salinité totale peut être aussi exprimée en TDS (quantité totale des matières dissoutes) exprimée en (mg.l^{-1}). Il s'agit des concentrations totales des ions non organiques présents dans le sol et dans les eaux d'irrigation et de drainage : Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^- sous formes dissoutes. Les concentrations de ces ions pour un volume d'eau donné de sol peuvent être exprimées en mmol.l^{-1} ou en mg.l^{-1} . Les mesures de la CE sont rapportées conventionnellement à une température de 25°C pour rendre possibles des comparaisons sous différentes conditions climatiques.

Conductivité électromagnétique et conductivité électrique

Après les mesures de la conductivité électromagnétique de l'ensemble des points par l'EM38, des prélèvements d'échantillons de sol préparés et analysés au laboratoire ont été effectués pour déterminer leur salinité. Par la méthode de la régression linéaire, on a abouti à transformer toutes les lectures de l'EM38 (conductivité électromagnétique) en conductivité électrique (salinité totale) figure 39 à 44.

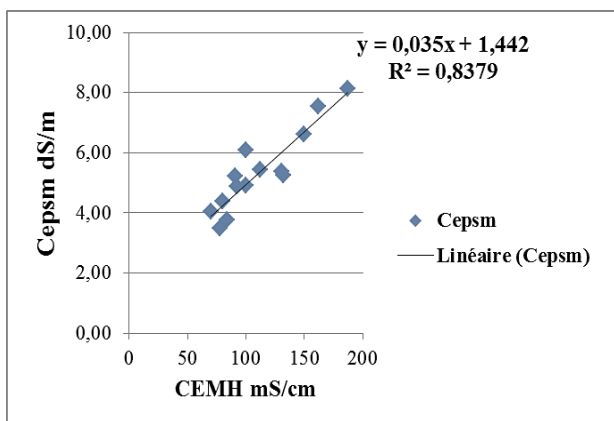


Figure 39 : Droite de corrélation entre CEMH et CÉpsm 1er compagne avant irrigation

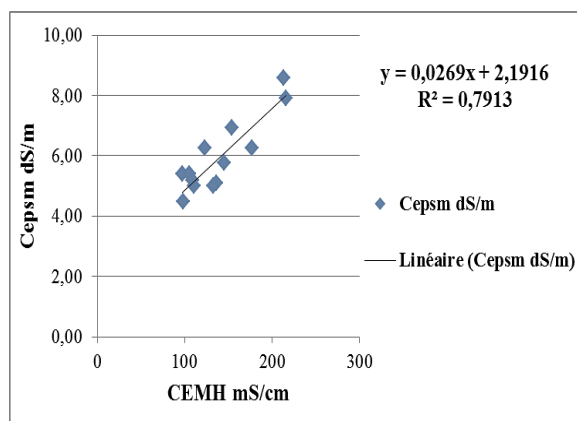


Figure 40 : Droite de corrélation entre CEMH et CÉpsm 1er compagne 1ère irrigation

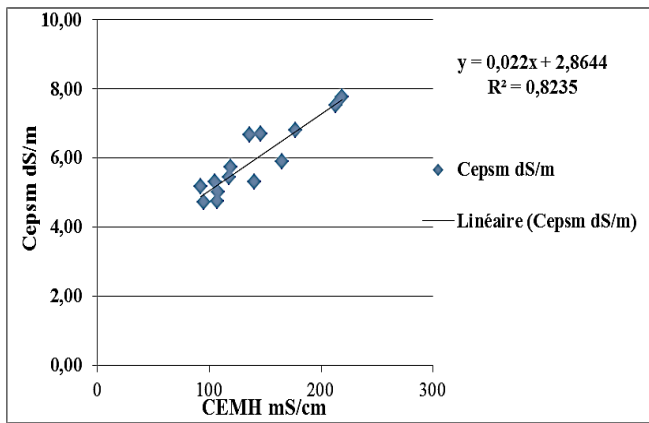


Figure 41: Droite de corrélation entre CEMH et CEpsm 1er campagne 2ème irrigation

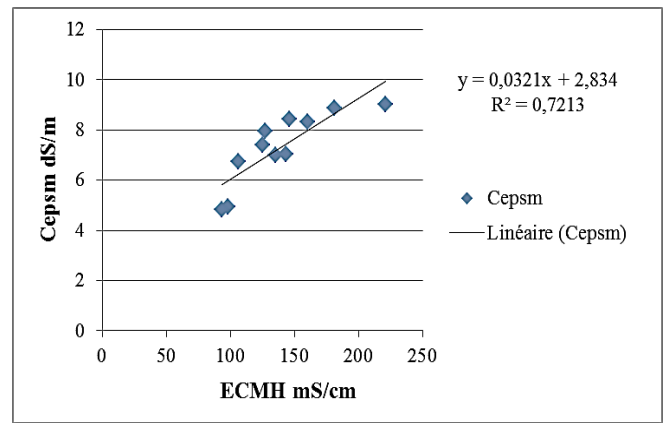


Figure 42 : Droite de corrélation entre CEMH et CEpsm 2ème campagne avant irrigation

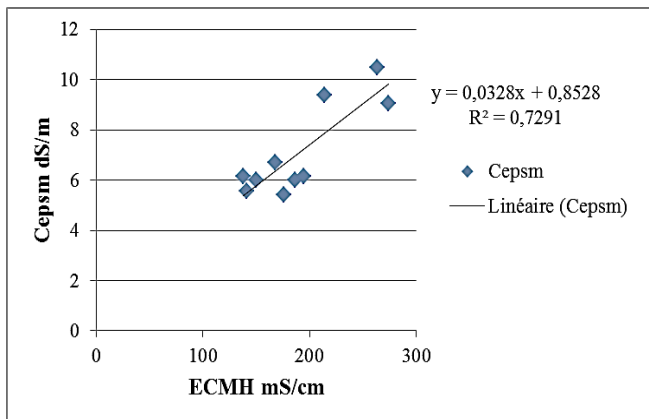


Figure 43: Droite de corrélation entre la CEMH et CEpsm 2ème campagne 1er irrigation

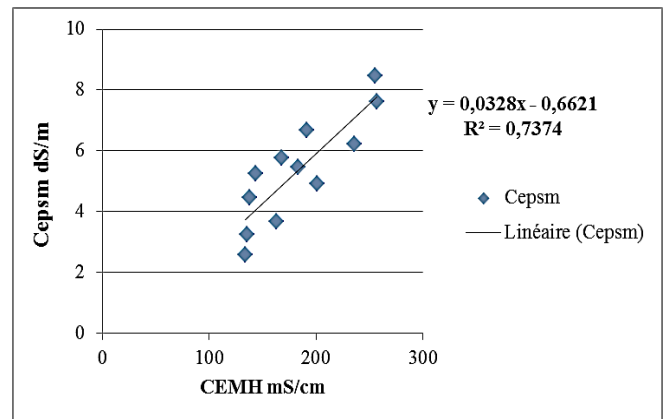


Figure 44: Droite de corrélation entre la CEMH et CEpsm 2ème campagne 2ème irrigation

L'ensemble des figures présentent un modèle mathématique linéaire de la forme $Y = aX + b$ avec des coefficients de corrélations proche de 1, ce qui confirme la corrélation entre la CEM et la CE rapportée dans la littérature.

Distribution de la salinité dans les horizons

Première campagne

Les résultats de la salinité totale (CEps) de l'extrait de pâte saturée (Tableau 27), des

Tableau 27: Salinité totale (CEps) des horizons durant la 1ère campagne en dS.m-1

N° Ech	Avant l'irrigation				Après la 1 ^{ère} irrigation				Après la 2 ^{ème} irrigation			
	Horizons			Moy	Horizons			Moy	Horizons			Moy
	H1	H2	H3		H1	H2	H3		H1	H2	H3	
1	4,54	6,88	11,17	7,98	2,38	1,875	8,91	4,39	3,36	6,35	7,98	5,90
2	2,36	5,56	8,43	8,28	2,76	6,58	9,48	6,27	3,61	8,48	8,28	6,79
3	1,61	3,74	5,76	10,3	3,52	8,38	8,91	6,94	3,56	6,26	10,3	6,71
4	3,05	5,13	6,56	7,56	2,68	5,7	6,9	5,09	3,04	5,29	7,56	5,30
5	3,47	5,31	7,53	7,5	2,51	5,94	6,57	5,01	2,79	6,93	7,5	5,74
6	1,192	3,86	5,4	6,91	2,46	5,95	7,76	5,39	2,82	5,8	6,91	5,18
7	1,241	4,24	5,84	6,65	3,08	5,68	6,23	5,00	2,94	5,48	6,65	5,02
8	2,44	6,54	9,25	7,46	5,65	5,98	7,12	6,25	3,27	5,6	7,46	5,44

9	1,566	4,47	6,08	5,85	2,21	5,44	5,77	4,47	2,43	5,85	5,85	4,71
10	1,826	5,25	8,72	8,54	2,59	3,77	6,92	4,43	2,55	6,62	8,54	5,90
11	2,15	8,04	9,69	10,9	3,1	8,7	11,97	7,92	4,39	8,02	10,9	7,77
12	3,11	8,18	13,12	11,81	2,65	11,7	11,4	8,58	2,9	7,83	11,81	7,51
13	3,74	5,48	6,41	6,94	3,33	5,93	6,92	5,39	3,38	9,65	6,94	6,66
14	2,32	4,87	6	7	4,89	6,09	7,59	6,19	3,66	5,3	7	5,32
15	2,12	4,87	7,68	6,62	2,3	5,44	7,84	5,19	2,51	5,15	6,62	4,76
16	3,06	5,54	7,51	8,52	3,99	6,06	7,25	5,77	4,56	6,89	8,52	6,66
Max	4,54	8,18	13,12	11,81	5,65	11,7	11,97	8,58	4,56	9,65	11,81	7,77
Min	1,192	3,74	5,4	5,85	2,21	1,875	5,77	4,39	2,43	5,15	5,85	4,71
Moy	2,49	5,50	7,82	8,05	3,13	6,20	7,97	5,77	3,24	6,59	8,05	5,96
ET	0,94	1,32	2,16	1,66	0,97	2,13	1,76	1,22	0,62	1,31	1,66	0,95
CV %	37,95	23,99	27,65	20,59	31,05	34,33	22,07	21,10	19,23	19,85	20,59	15,96

Les données de la CEeps du tableau 28, montrent une tendance nette vers l'accroissement de la salinité du sol dans les trois horizons étudiés par suite de l'irrigation (Figure 45). Cette constatation est confirmée

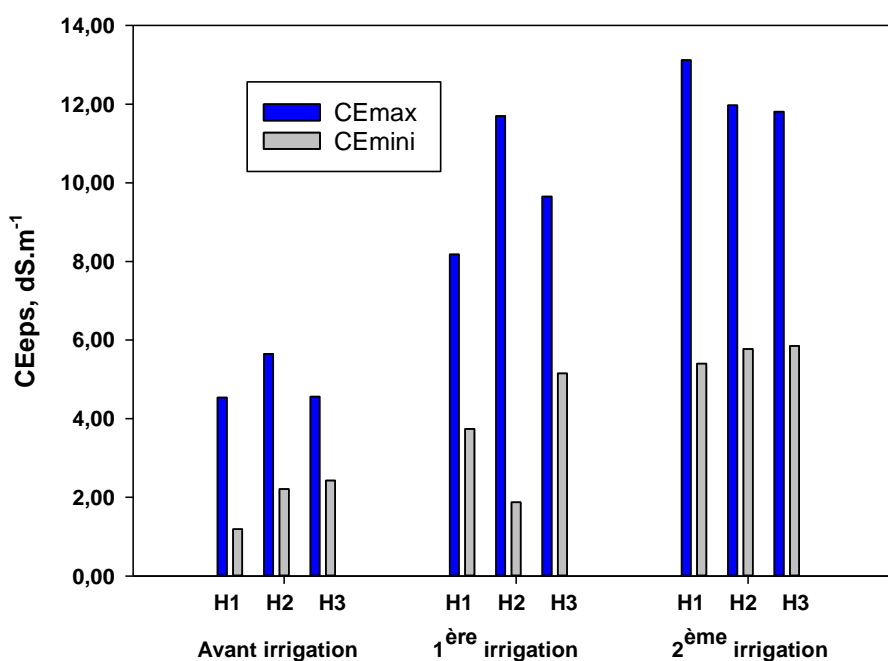


Figure 45 – Evolution des valeurs maxi et mini de la CEeps durant la première campagne à la suite des irrigations et pour les trois horizons H1, H2 et H3 du profil du sol

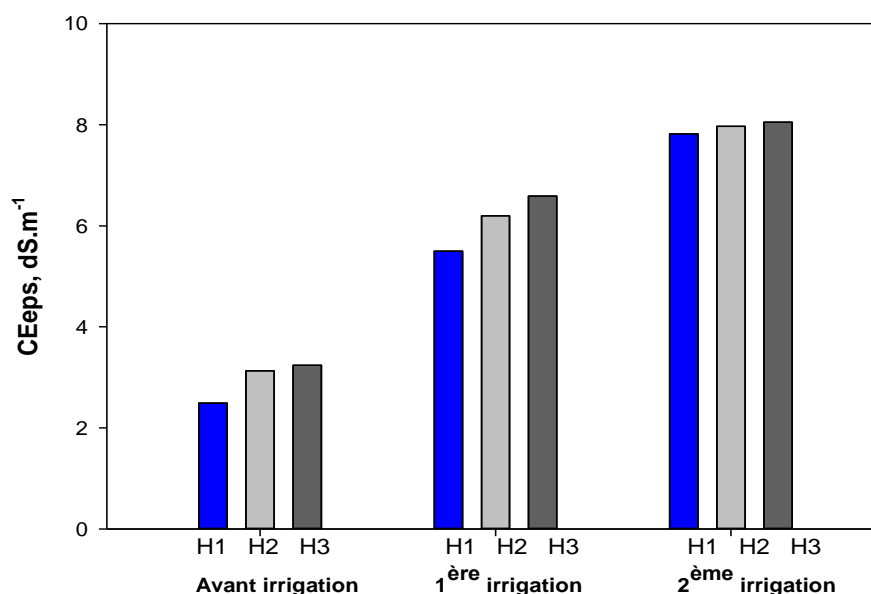


Figure 46 – Evolution des valeurs moyennes de la CEEps durant la première campagne à la suite des irrigations et pour les trois horizons H1, H2 et H3 du profil du sol

si l'on se réfère à la figure 46 où les valeurs moyennes de la CEEps augmentent à la suite des irrigations et successivement pour les trois horizons du profil du sol. Ce qui permet d'affirmer que durant la première campagne de production des olives, la conduite actuelle de l'irrigation s'apparente d'une augmentation de la salinité du sol à la suite des irrigations. Le profil de la salinité semble ascendant puisque qu'elle augment de l'horizon de surface H1 vers l'horizon inférieur H3.

Deuxième campagne

Les résultats de la salinité totale (CEEps) de l'extrait de pâte saturée, des échantillons prélevés sur les trois horizons H1, H2 et H3 durant la seconde campagne de culture de l'olivier avant et après les deux irrigations sont présentés dans le Tableau 28.

Pour la seconde campagne, les données de la CEEps du tableau 28, montrent contrairement à la première campagne, une tendance nette vers la diminution de la salinité du sol dans les trois horizons étudiés au bout de la seconde irrigation bien qu'il y ait une augmentation après la première irrigation (Figure 47). Cette constatation n'est pas confirmée par la figure 50 où les valeurs moyennes de la CEEps entre les 3 horizons augmentent à la suite des irrigations et successivement pour les trois horizons du profil du sol. Ce qui permet d'attester que les valeurs maxi et mini de la CEEps ne permettent pas de rendre compte réellement de l'évolution de la salinité dans les profils de sol. Les valeurs moyennes des 16 échantillons prélevés pour chaque horizon (figure 48) corrobore cette affirmation.

Tableau 28: Salinité totale (CEeps) des horizons durant la 2^{ème} campagne en dS.m⁻¹

N° Ech	Avant l'irrigation				Après la 1 ^{ère} irrigation				Après la 2 ^{ème} irrigation			
	Horizons			Moy	Horizons			Moy	Horizons			Moy
	H1	H2	H3		H1	H2	H3		H1	H2	H3	
1	8,04	7,82	10,78	8,88	13,37	12,26	15,14	13,59	3,80	5,97	8,89	6,22
2	3,64	9,96	11,3	8,30	4,5	5,87	9,03	6,47	2,64	5,63	8,17	5,48
3	4,29	8,98	12,00	8,42	6,53	9,05	12,58	9,39	2,47	5,31	6,98	4,92
4	5,11	8,67	10,12	7,97	3,72	2,55	4,46	3,58	3,6	2,44	5	3,68
5	2,68	7,37	11,00	7,02	2,16	6,82	9,02	6,00	3,13	5,57	7,7	5,47
6	3,43	7,60	9,77	6,93	3,4	7,07	9,69	6,72	3,56	7,58	8,38	6,51
7	2,55	4,90	7,35	4,93	3,4	6,55	8,04	6,00	3,14	5,8	6,78	5,24
8	2,86	8,18	11,14	7,39	3,55	4,78	7,98	5,44	5,28	5,65	6,35	5,76
9	2,47	5,72	6,32	4,84	4,69	6,57	8,65	6,64	2,54	3,23	2,01	2,59
10	3,24	7,38	10,49	7,04	2,89	7,05	8,55	6,16	2,8	7,36	9,87	6,68
11	3,35	7,85	12,3	7,83	5,77	11,25	14,46	10,49	2,7	8,28	11,89	7,62
12	4,12	9,52	13,45	9,03	4,62	9,16	13,41	9,06	3,52	8,83	13,05	8,47
13	3,18	6,78	10,23	6,73	4,11	6,84	9,15	6,70	2,28	7,71	6,85	5,61
14	4,04	7,96	7,78	6,59	3,48	6,06	7,17	5,57	2,18	2,75	4,85	3,26
15	1,51	4,23	4,79	3,51	4,45	6,43	7,62	6,17	2,88	4,64	5,86	4,46
16	1,62	2,77	7,9	4,10	2,4	5,74	9,02	5,72	4,56	2,15	2,96	3,22
Max	8,04	9,96	13,45	9,03	13,37	12,26	15,14	13,59	5,28	8,83	13,05	8,47
Min	1,51	2,77	4,79	3,51	2,16	2,55	4,46	3,58	2,18	2,15	2,01	2,59
Moy	3,51	7,23	9,80	6,84	4,57	7,13	9,62	7,11	3,19	5,56	7,22	5,32
ET	1,53	1,95	2,35	1,68	2,61	2,36	2,85	2,41	0,84	2,10	2,91	1,62
CV %	43,70	26,96	23,95	24,61	57,12	33,12	29,66	33,94	26,35	37,71	40,26	30,39

De ce fait, il apparait évident que comme pour la première campagne, la deuxième campagne de conduite hydroagricole des oliviers, enregistre une augmentation de la salinité du sol à la suite des irrigations successives. Le profil de la salinité est ascendant comme pour la première campagne puisque qu'elle augment de l'horizon de surface H1 vers l'horizon inférieur H3.

Dans ces conditions, il est important de comparer les doses d'irrigation réellement apportées par l'agriculteur et celles calculées scientifiquement sur la base de la qualité de l'eau d'irrigation, des besoins réelles de l'olivier en eau (ETM : évapotranspiration maximale) et le lavage requis LR.

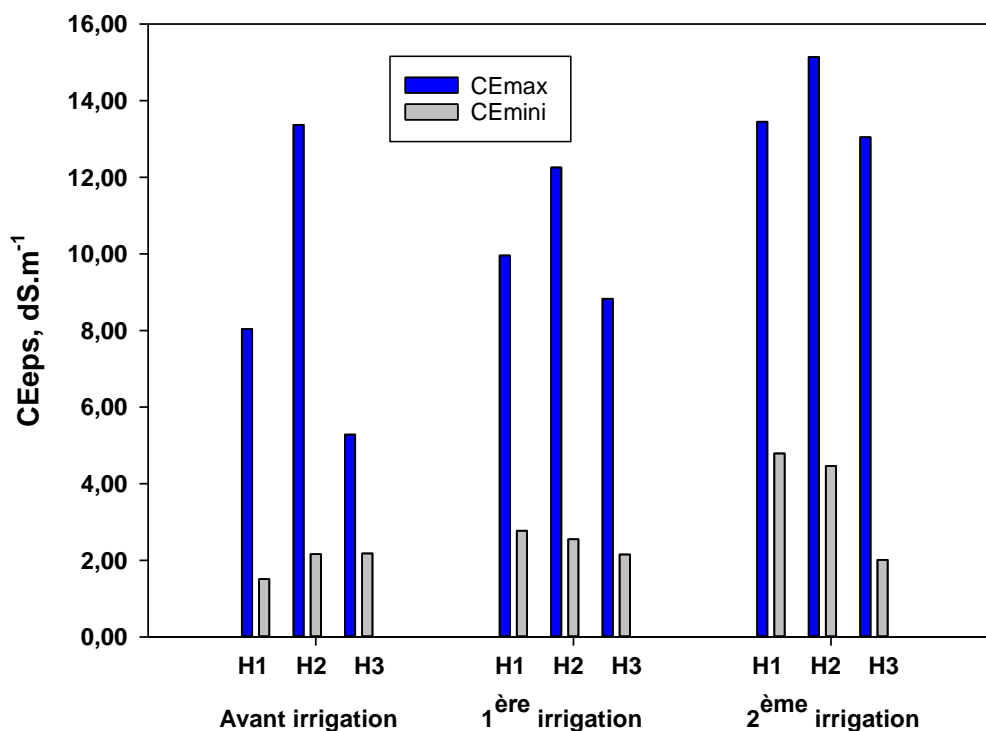


Figure 47 – Evolution des valeurs maxi et mini de la CEEps durant la première campagne à la suite des irrigations et pour les trois horizons H1, H2 et H3 du profil du sol

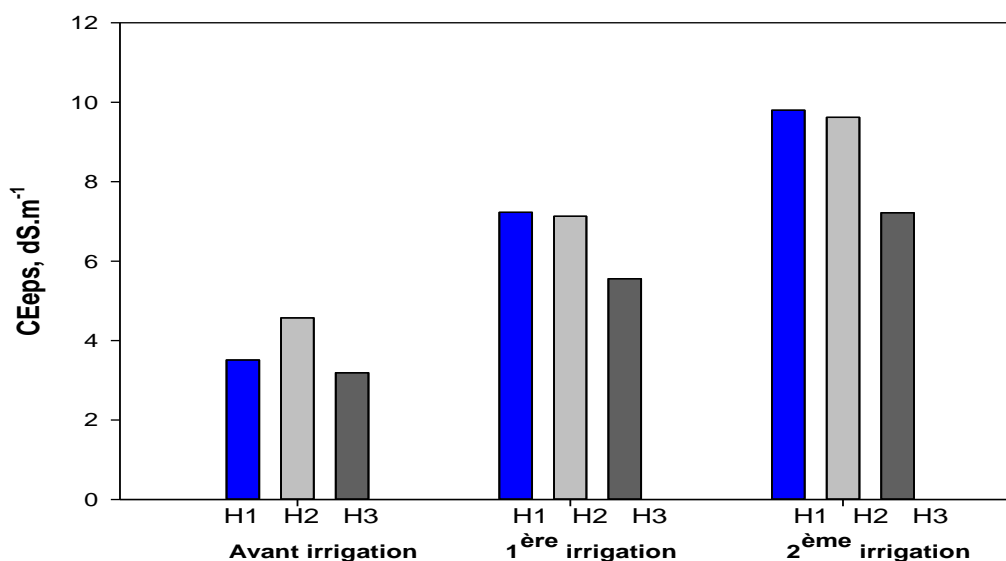


Figure 48 – Evolution des valeurs moyennes de la CEEps des 16 échantillons pour les horizons H1, H2 et H3 du profil du sol durant la deuxième campagne à la suite des irrigations successives

Cartographie de la salinité

Les données acquises à l'aide du conductimètre électromagnétique EM38 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.

L'emploi de ces méthodes se trouve facilité par le développement de logiciels fonctionnant sur micro-ordinateurs et pouvant même être utilisés sur du matériel portable (Boivin, 1988).

Analyse variographique des résultats de la première campagne

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

Structure du semi-variogramme de la salinité moyenne avant l'irrigation

Le semi-variogramme de la figure 30 s'ajuste mieux à un modèle normal avec un rapport d'anisotropie égal à 1.95 selon la direction 274,5° (Tab.29). Ce résultat signifie que la CEepsm du profil évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépité est de 0,25 dS.m⁻¹ indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (2,25 dS.m⁻¹) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 15,62 m, selon la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEepsm deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

Tableau 29: Paramètres du modèle de variogramme de l'horizon pendant la campagne 1

Compagne 1	Modèle	Pépité (dS.m ⁻¹)	Palier (dS.m ⁻¹)	Portée (m)	Anisotropie	Direction (°)
Avant irrigation	Normale	0,25	2,25	15,62	1,95	274,5
Après 1^{er} irrigation	Normale	0,39	2,20	15,05	1,88	288,6
Après 2^{ème} irrigation	Normale	0,24	2,20	15,02	1,88	282,9

Structure du semi-variogramme de la salinité moyenne après la 1^{ère} l'irrigation

Le semi-variogramme de la figure 31 s'ajuste mieux à un modèle normal avec un rapport d'anisotropie égal à 1.88 selon la direction 288,6° (Tab.34). Ce résultat signifie que la CEepsm du profil après la première irrigation évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépité est de 0,39 dS.m⁻¹ indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (2,20 dS.m⁻¹) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 15,05 m, selon la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEepsm deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

Structure du semi-variogramme de la salinité moyenne après la 2^{ème} irrigation

Le semi-variogramme de la figure 32 s'ajuste mieux à un modèle normal avec un rapport d'anisotropie égal à 1.88 selon la direction 282,9° (Tab.34). Ce résultat signifie que la CEepsm du profil après la deuxième irrigation évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépite est de 0,24 dS.m⁻¹ indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (2,20 dS.m⁻¹) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 15,02 m, selon la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEepsm deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

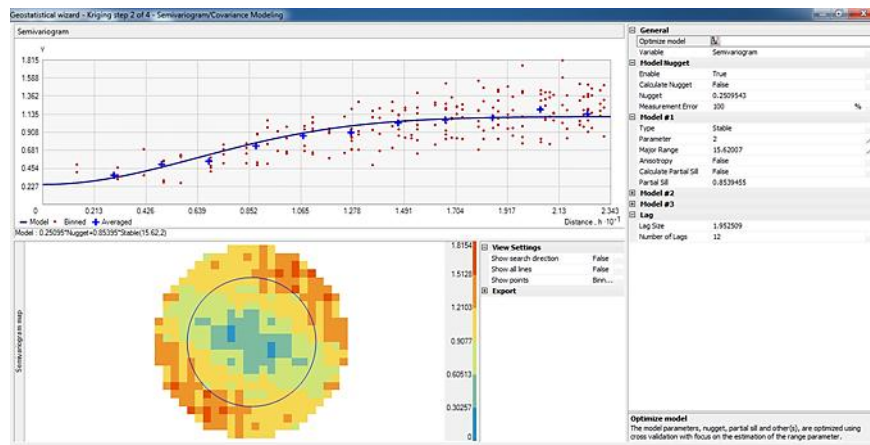


Figure 49 : Modèle du variogramme de l'horizon avant l'irrigation

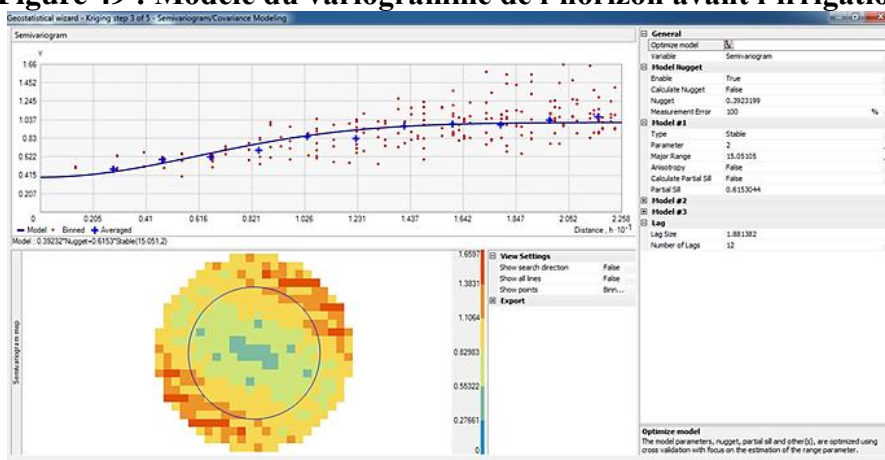


Figure 50 : Modèle du variogramme de l'horizon après la 1ere l'irrigation

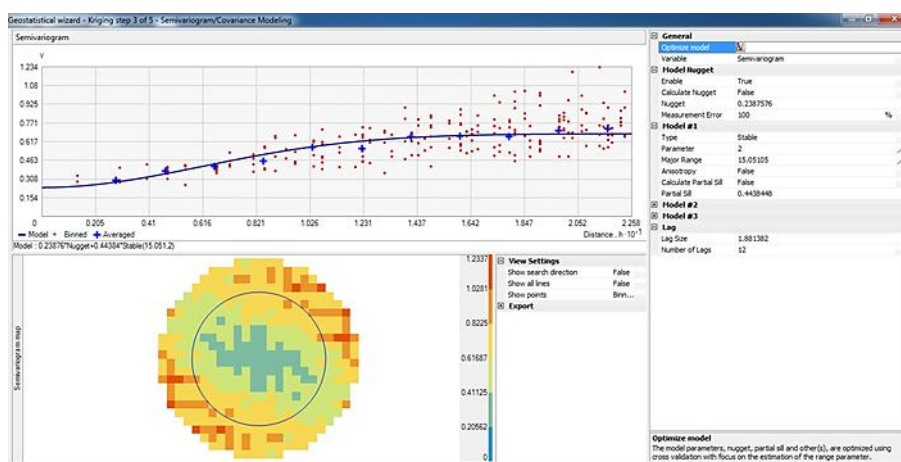


Figure 51 : Modèle du variogramme de l'horizon après la 2ème irrigation

Analyse variographique des résultats de la 2^{ème} campagne

Structure du semi-variogramme de la salinité avant irrigation

Le semi-variogramme de la figure 52, s'ajuste mieux à un modèle normal avec un rapport d'anisotropie égal à 2,47 selon la direction 275,5° (Tab.30). Ce résultat signifie que la CEepsm du profil évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépite est de 0,22 dS.m⁻¹ indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (2,90 dS.m⁻¹) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 19,82 m, selon la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEepsm deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

Tableau 30: Paramètres du modèle de variogramme de l'horizon durant la seconde campagne

Compagne 1	Modèle	Pépite (dS.m ⁻¹)	Palier (dS.m ⁻¹)	Portée (m)	Anisotropie	Direction (°)
Avant irrigation	Normale	0,22	2,90	19,82	2,47	275,5
Après 1 ^{er} irrigation	Normale	0,99	2,20	15,05	1,88	281,6
Après 2 ^{ème} irrigation	Normale	0,51	7,40	5,05	0,63	288,7

Structure du semi-variogramme de la salinité moyenne après la 1^{ère} l'irrigation

Le semi-variogramme de la figure 53, s'ajuste mieux à un modèle normal avec un rapport d'anisotropie égal à 1,88 selon la direction 281,6° (Tab.35). Ce résultat signifie que la CEepsm du profil évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépité est de $0,99 \text{ dS.m}^{-1}$ indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier ($2,20 \text{ dS.m}^{-1}$) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de $15,05 \text{ m}$, selon la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEepsm deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

Structure du semi-variogramme de la salinité moyenne après la 2^{ème} irrigation

Le semi-variogramme de la figure 54, s'ajuste mieux à un modèle normal avec un rapport d'anisotropie égal à $0,63$ selon la direction $288,7^\circ$ (Tab.35). Ce résultat signifie que la CEepsm du profil évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée. L'effet de pépité est de $0,51 \text{ dS.m}^{-1}$ indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier ($7,40 \text{ dS.m}^{-1}$) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de $5,05 \text{ m}$, selon la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEepsm deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

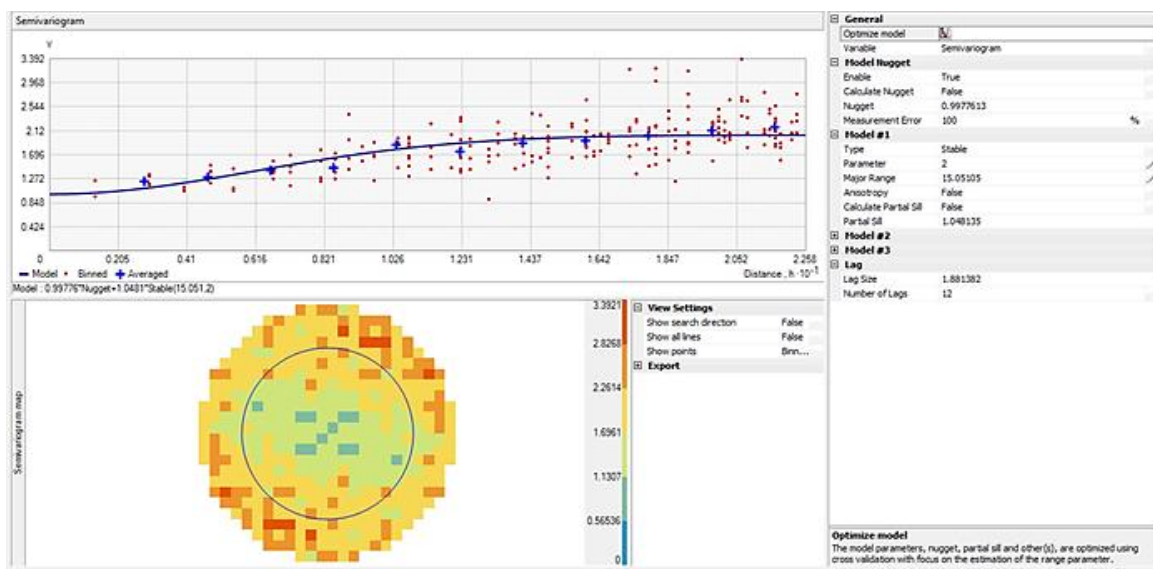


Figure 52 : Modèle du variogramme de l'horizon avant l'irrigation

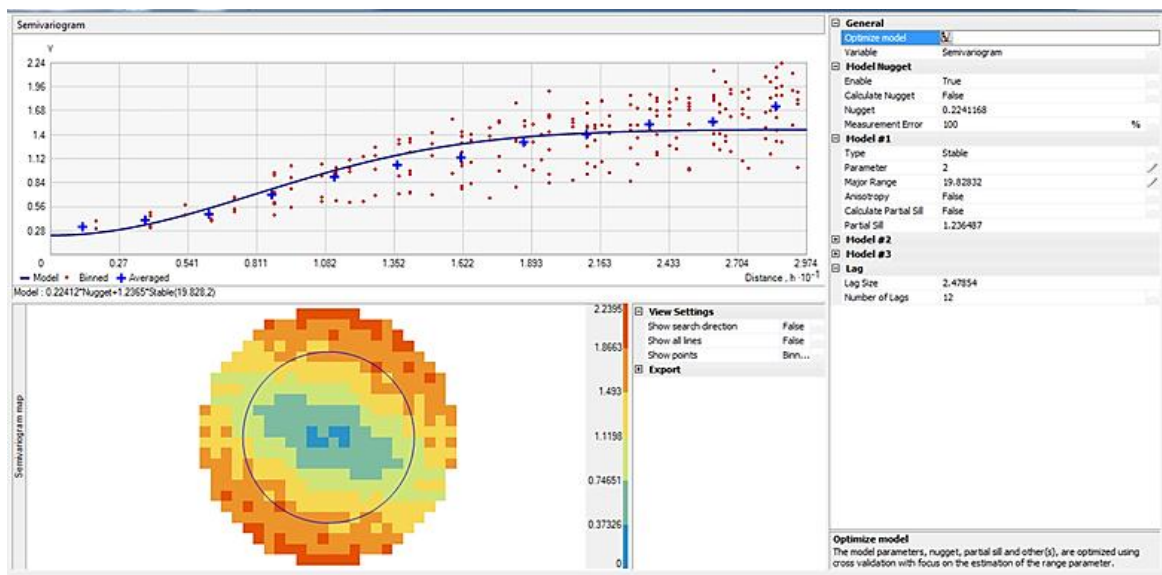


Figure 53 : Modèle du variogramme de l'horizon après la 1ere l'irrigation

Par ailleurs, la salinité est un phénomène très variable dans le temps et dans l'espace, influencé par les facteurs pédoclimatiques de la région. Les résultats d'analyses enregistrés pendant la première campagne et la deuxième campagne ont confirmé qu'il y a des fluctuations surtout avant et après l'irrigation. Nous avons enregistré un coefficient de variation (CV) élevée qui est égal à 37,95% à l'horizon (0H1) avant irrigation de la première campagne, ça explique que le nombre d'observation est limité.

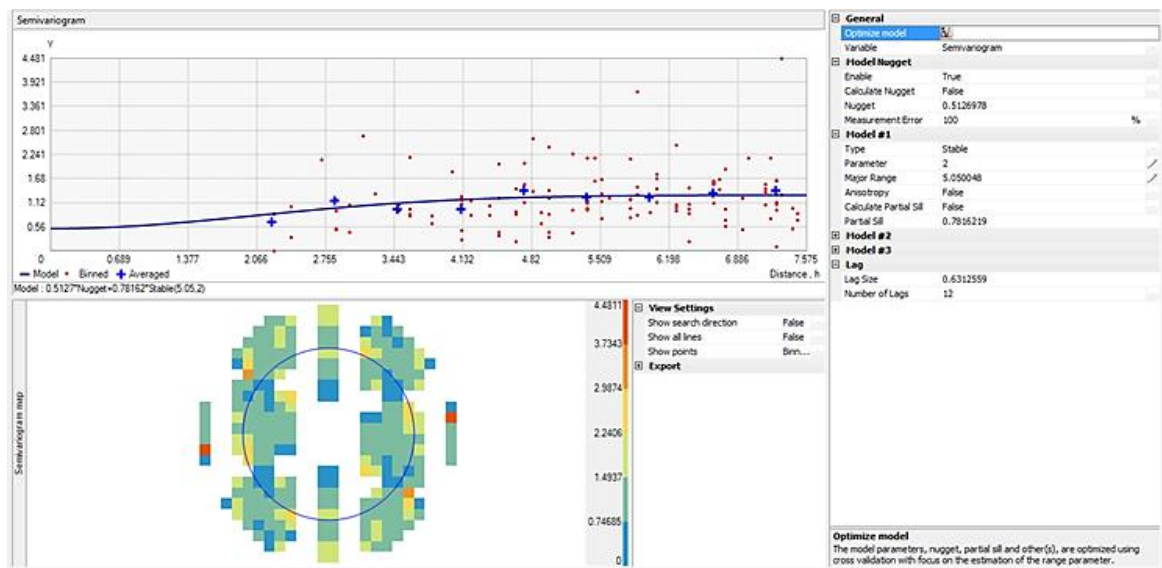


Figure 54 : Modèle du variogramme de l'horizon après la 2ème irrigation

Cependant les autres horizons et même pendant les irrigations, les CV restant dans la classe modérée ça explique qu'il n'y a pas d'erreur entre les points d'observations, par conséquent que les doses d'irrigations sont bien réparties sur la parcelle et la salinité moyenne des horizons reste la même

pendant la première campagne (Fig 47). Pendant la deuxième, on registre des CV élevée à très élevée à des horizons 0H1, 1H1 et 2H3 de 43,70 ; 57,12 et 40,26 respectivement par rapport aux autres horizons, qui vont montrer que l'irrigation n'a pas été bien réparti à la parcelle et par conséquent la salinité moyenne très varié (Fig 48).

Etablissement des cartes de la salinité

Les cartes krigées, issues de l'analyse géostatistique des conductivités électriques estimées aux 306 emplacements de mesures de la conductivité électromagnétique transformés en conductivité de la paille saturée dans les figures (41 à 46), sont présentées dans les figures (55 à 59). Les couleurs ont été choisies pour correspondre aux seuils d'interprétation habituels de la salinité de l'USDA. Les calculs des superficies ont été établis automatiquement, par le module Géostatistical Analyst du logiciel ARCGIS 9.3, avec lequel les cartes de salinité ont été générées. Le tableau représente la répartition des superficies en hectares (Ha) en fonction des classes de salinité.

Cela montre que sur la parcelle d'étude, le gradient de salinité est très important, depuis des sols peu salés jusqu'à des sols très salés.

Spatialisation des cartes de la première campagne

Distribution de la salinité avant l'irrigation

La figure 55 montre une répartition de deux classes de la salinité au niveau de la parcelle. La plus forte concentration de la salinité est située dans la partie nord de la parcelle et la plus faible concentration est située dans la partie sud.

- Les sols peu salés ($2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{epsm}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent une faible partie de la parcelle (0,1 ha soit 20 %) et se situent au centre et au sud-est;

- Les sols salins ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{epsm}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent 0,4 ha soit 80 % et se répartissent majoritairement à la parcelle.

Distribution de la salinité après la première irrigation

La figure 56 montre une répartition de deux classes de la salinité au niveau de la parcelle. La plus forte concentration de la salinité est répartie faiblement sur la parcelle.

- Les sols salés ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{epsm}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent la majorité de la parcelle (0,45 ha soit 90 %)

- Les sols très salins ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{epsm}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) se présentent comme des poches à sud-ouest et au nord-est de la parcelle avec une superficie de 0,05ha soit 10% de la surface totale.

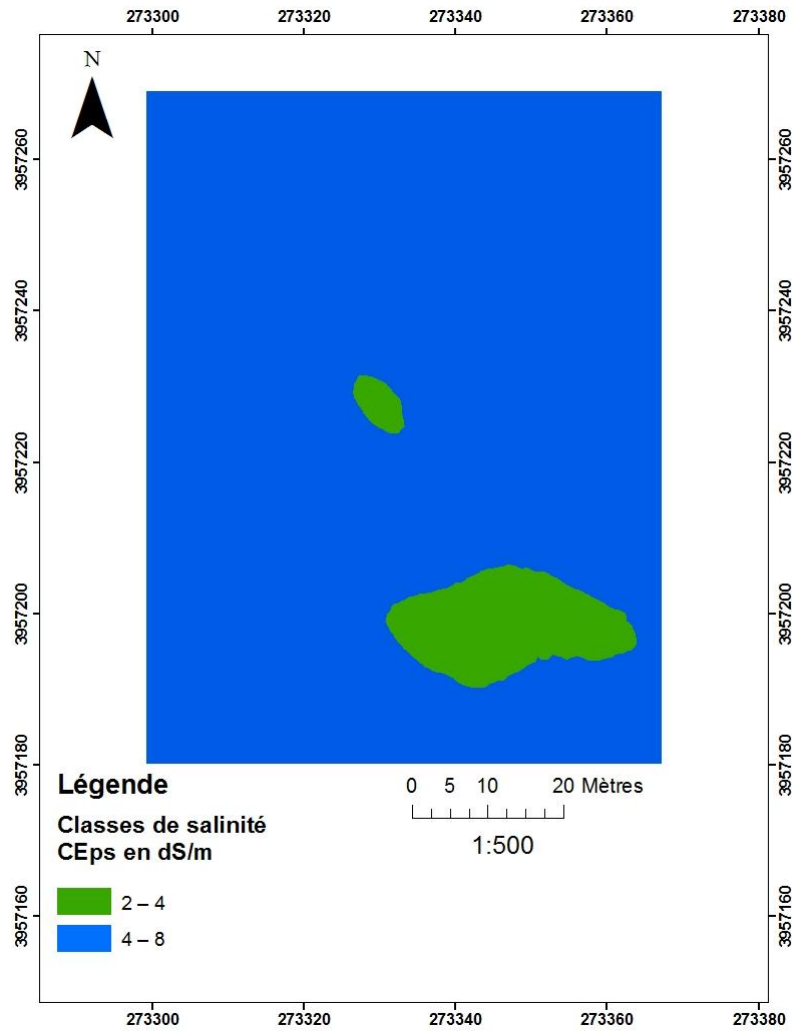


Figure 55 : Carte de salinité avant l'irrigation

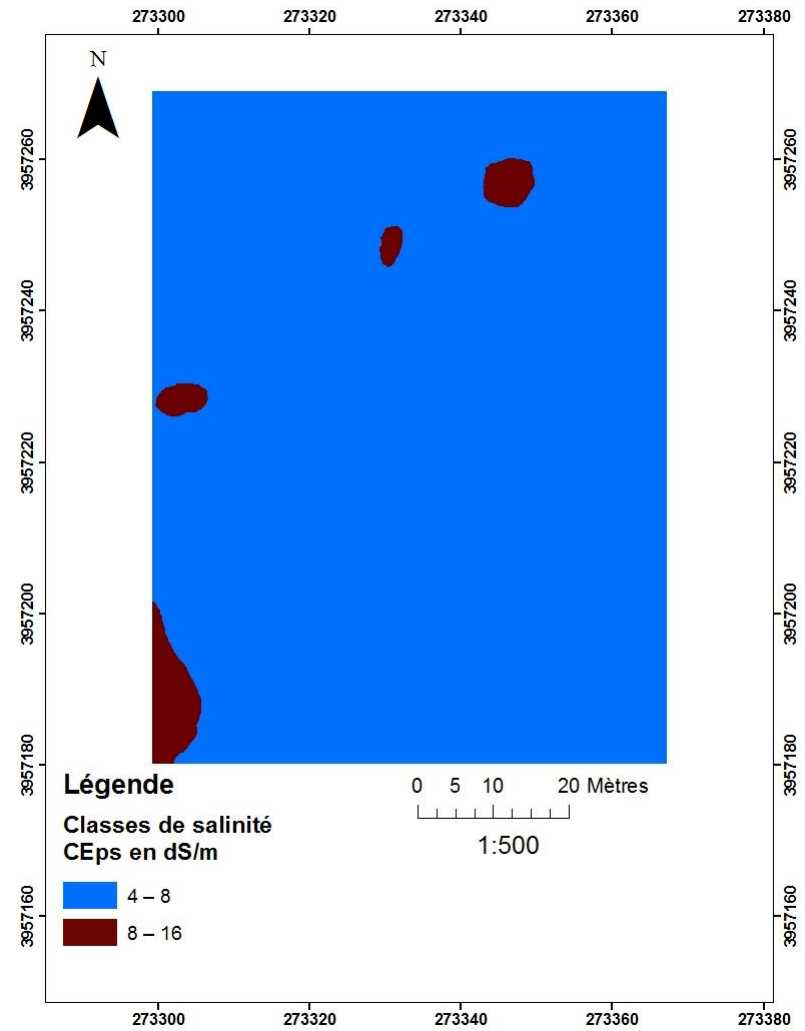


Figure 56: Carte de salinité après la 1ère irrigation

Distribution de la salinité après la deuxième irrigation

La figure 57 montre une répartition de deux classes de la salinité de la parcelle. La plus forte concentration de la salinité est présentée très faiblement sur la parcelle.

- Les sols salés ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEpsm} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent la majorité de la parcelle (0,49 ha soit 98%);

- Les sols très salins ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEpsm} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) se présentent très faiblement au nord-est de la parcelle avec une superficie de 0,01ha soit 2% de la surface totale.

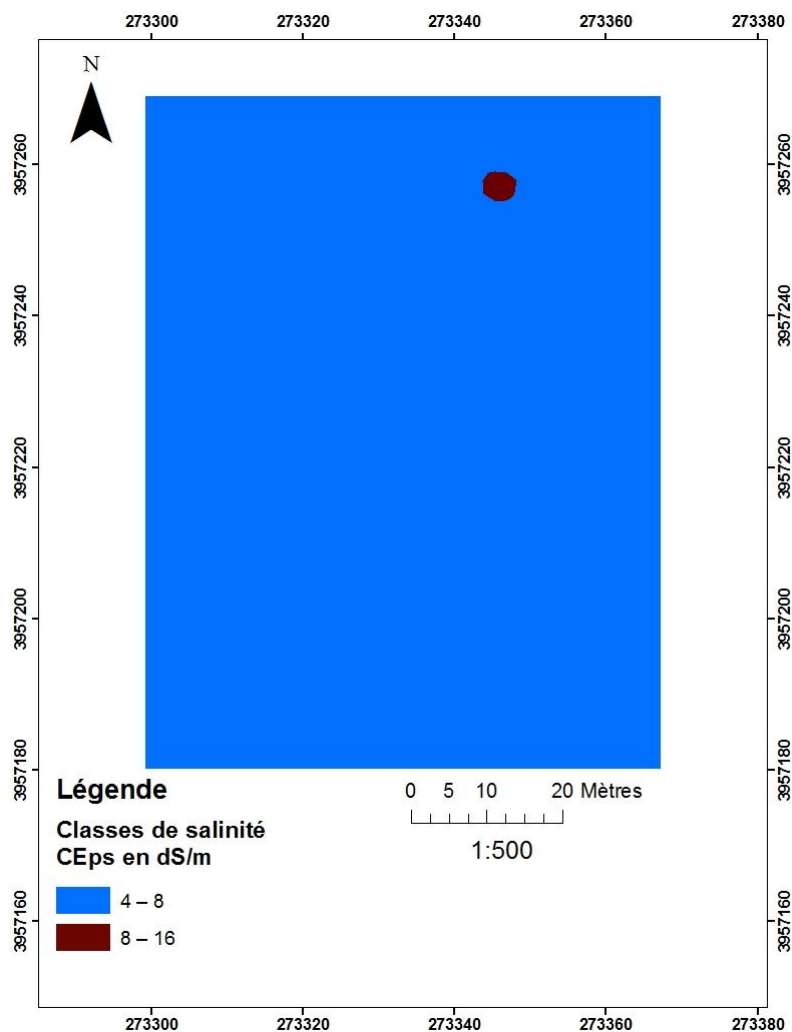


Figure 57: Carte de salinité après la 2ème irrigation

Spatialisation des Cartes de la deuxième campagne

Distribution de la salinité avant l'irrigation

La figure 58 montre une hétérogénéité de deux classes de la salinité au niveau de la parcelle. La plus forte concentration de la salinité est répartie dans la partie nord-est et de sud-ouest de la parcelle.

- Les sols salés ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEpsm} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent une grande partie de la parcelle (0,3 ha soit 60%);
- Les sols très salins ($8 \text{ dS/m} < \text{CEpsm} < 16 \text{ dSm}$) occupent 0,2 ha soit 40%.

Distribution de la salinité après la première irrigation

La figure 59 montre une répartition de trois classes de la salinité au niveau de la parcelle. La plus forte concentration de la salinité est répartie au nord et au sud-ouest avec une dominance de la classe salée sur toute la parcelle.

- Les sols peus salés ($2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEpsm} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) occupe une faible partie en sud-est de la parcelle (0,01 ha soit 2%);
- Les sols salins ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEpsm} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) occupe la majorité de la parcelle avec une superficie de 0,315ha soit 63% de la surface totale ;
- Les sols très salins ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEpsm} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) occupe la deuxième place avec une superficie de 0,175ha soit 35% de la surface totale.

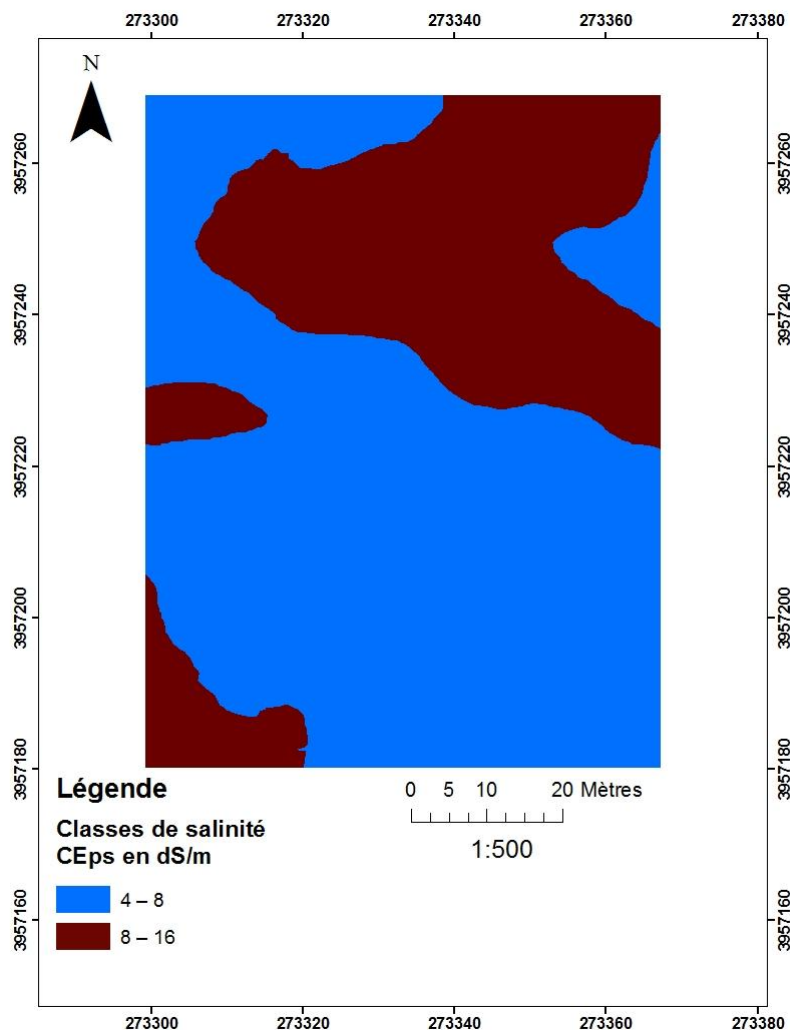


Figure 58: Carte de salinité avant l'irrigation

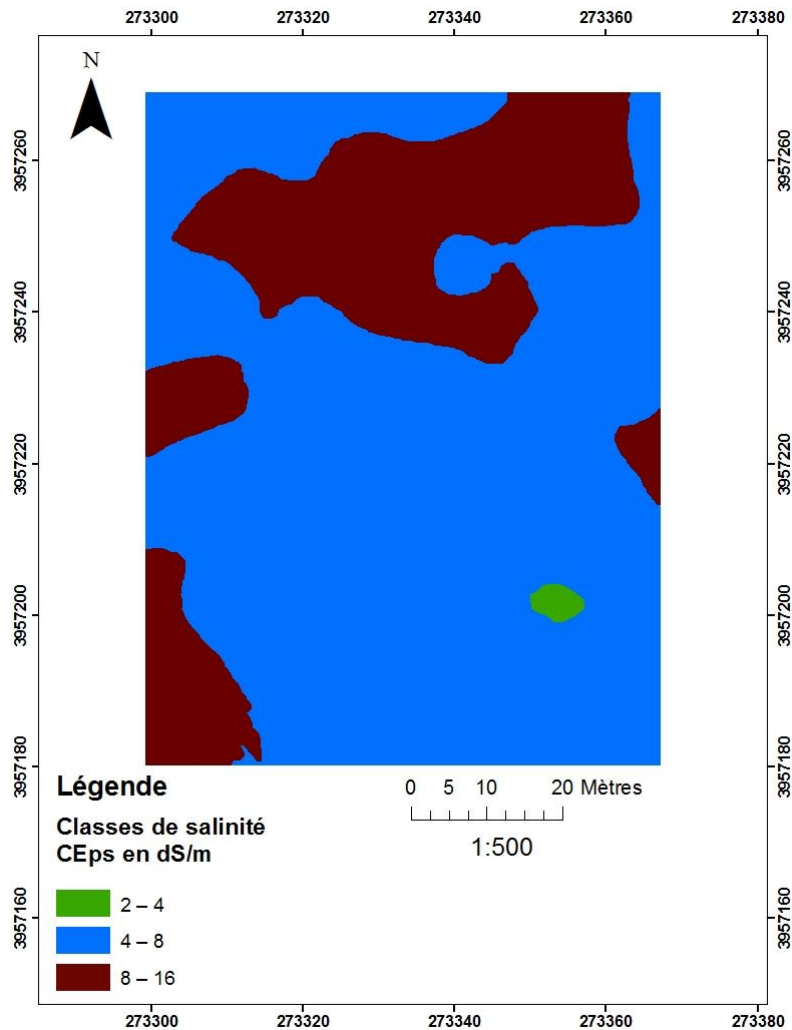


Figure 59: Carte de salinité après la 1ère irrigation

Distribution de la salinité après la deuxième irrigation

La figure 60 montre une répartition de trois classes de la salinité au niveau de la parcelle. La plus forte concentration de la salinité est démunie par rapport à la première irrigation et répartie sur nord-est de la parcelle avec une diffusion de la classe peu salés en sud-est et de dominance de la classe salé sur la totalité de la parcelle.

- Les sols peu salés ($2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEpsm} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) occupe une partie assez considérablement de la parcelle (0,125 ha soit 25%);

- Les sols salés ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEpsm} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) occupe la totalité de la parcelle (0,355 ha soit 71%);

- Les sols très salins ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CEpsm} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) se présentent très faiblement avec une superficie de 0,02 ha soit 4% de la superficie totale.

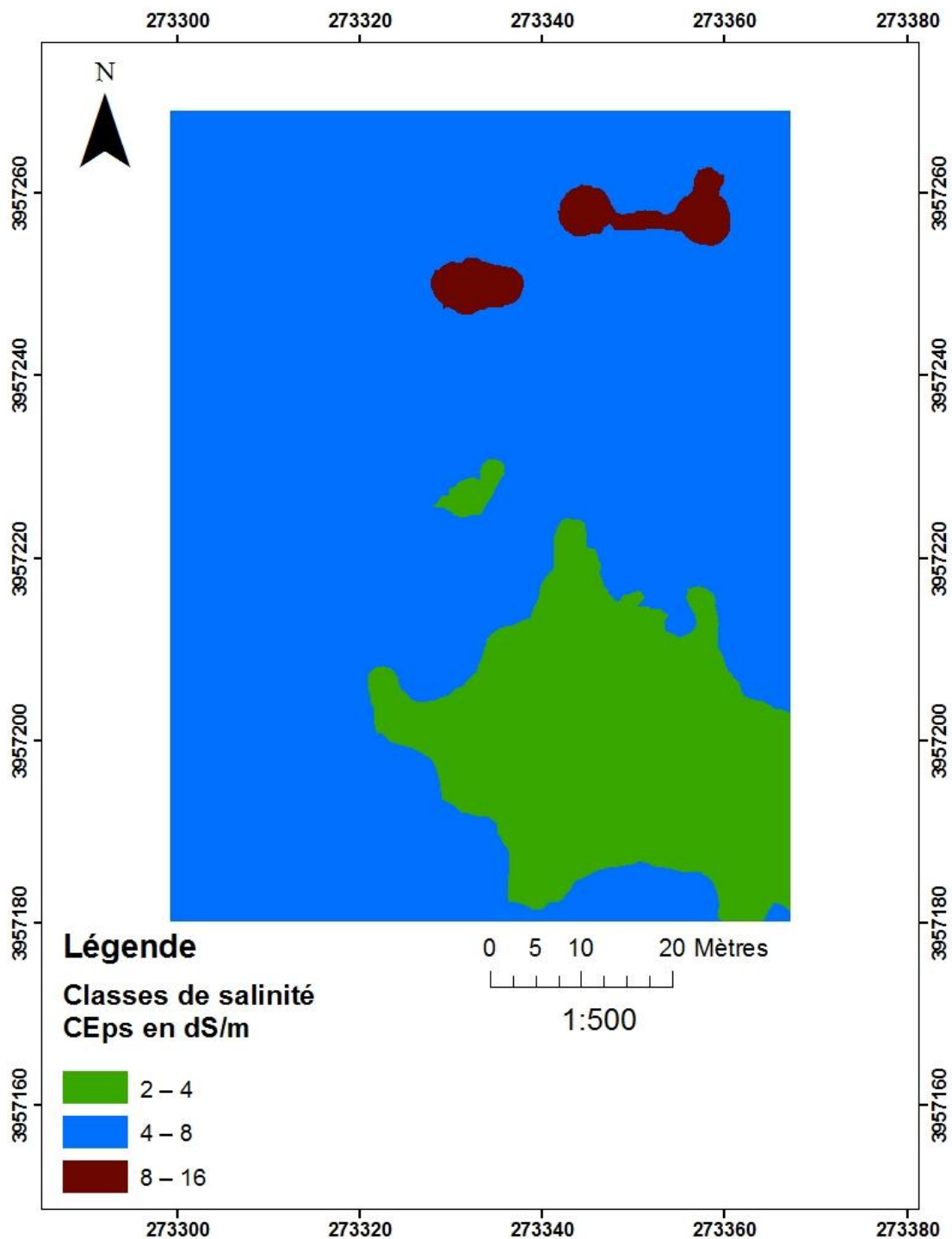


Figure 60 : Carte de salinité après la 2ème irrigation

Il est important de rappeler que la salinité de la parcelle d'étude était abordée selon deux échelles d'observation :

- Détermination de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée CEps sur 54 échantillons prélevés à trois niveaux de profondeur (0-25, 25-50 et 50-75 cm).
- Détermination de la conductivité électromagnétique CEM à l'aide de l'EM38 par une couverture de la totalité de la surface de la parcelle.

C'est ces deux échelles d'observations qui nous ont permis d'obtenir les cartes de la CEeps sur toute la parcelle via des corrélations entre cette dernière et l'ECM. En effet, la CEeps est une information très importante puisqu'elle concerne la salinité du sol à son humidité à la capacité au champs (HCC), ce qui permet de contourner la contrainte de l'extrême variation spatiale et temporelle de la salinité du sol puisque les plantes disposent d'un confort hydrique quand l'humidité du sol se trouve à HCC et qui généralement maintenue entre deux irrigations.

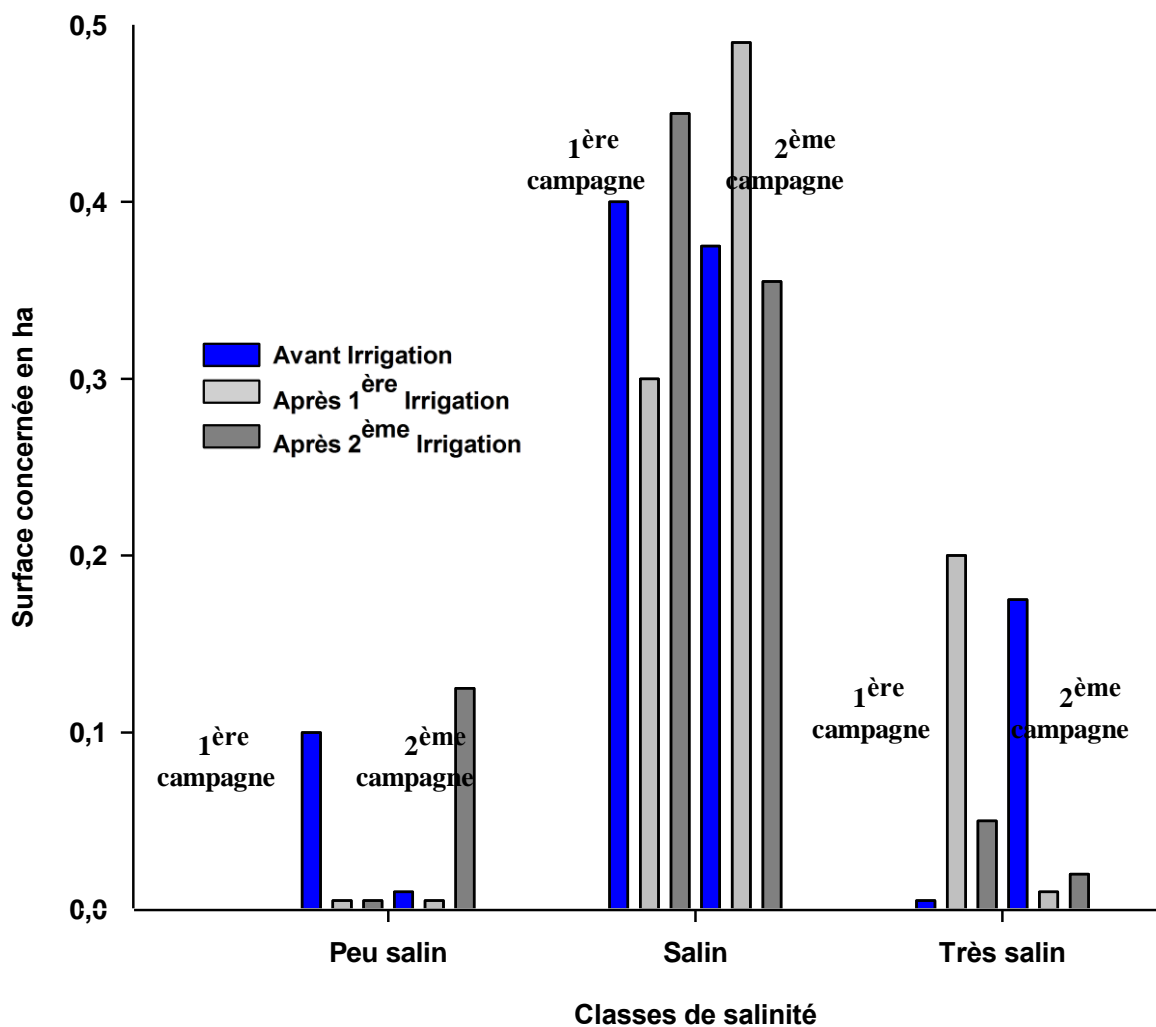


Figure 61: Distribution des superficies en salinité pendant la 2^{ème} campagne

En résumé, il apparaît qu'aussi bien pour la première campagne de production de l'olivier que la seconde (Figure 61), les deux irrigations successives entraînent une augmentation de la salinité. En effet, les deux irrigations ont fait passer l'essentiel de la surface de la parcelle étudiée de la classe peu salin avant irrigation (avec 6,67 et 8,65 % de la surface totale de la parcelle respectivement pour la première et seconde campagne), vers les deux classes salin (avec 89,33 et 86,03 % de la surface totale de la parcelle respectivement pour la première et seconde campagne) et très salin (avec 4 et 25,32 % de la surface totale de la parcelle respectivement pour la première et seconde campagne). Ce qui permet

d'affirmer que la qualité médiocre de l'eau d'irrigation favorise le processus de salinisation du sol. Il importe maintenant, d'analyser la part d'effet de la conduite de l'irrigation dans ce processus de salinisation de la parcelle (dose et fréquence d'irrigation). Pertinemment, le calcul de la dose de lessivage que nous avons effectué (§ Dose pratique d'irrigation, p78) montra qu'il faudrait apporter en plus de la dose nette d'irrigation (besoin en eau de la culture) une quantité supplémentaire de lessivage qui correspond à 8,69 % des besoins en eau de la culture. En règle générale, dans la région méditerranéenne maghrébine à climat semi-aride, l'ETM annuelle de l'olivier varie de 344 et 454 mm (Mouna et *al.*, 2012 et Chiraz et *al.*, 2004). Pour développer une approche qui prend en compte particulièrement la salinité du sol de notre parcelle d'étude, on considère la valeur moyenne annuelle de l'ETM qui correspond en moyenne à 399 mm. Dans ces conditions, la DL annuelle serait de 34,67 mm. Il s'agit maintenant de comparer la quantité d'eau d'irrigation qui amènerait les sels en dehors de la zone racinaire ($399 + 34,67 = \mathbf{433,67 \text{ mm}}$) avec la dose d'irrigation apportée par l'agriculteur lui-même. La plus grande dose qui a été apportée par ce dernier est de 100 litres par arbre, avec un total de 306 arbres ça revient à 30600 litres, c'est-à-dire $30,6 \text{ m}^3$ pour toute la parcelle et donc 6,12 mm par lâchée (les agriculteurs sont contraints à irriguer en fonction des lâchées d'eau effectuées par les services de distribution de l'eau d'irrigation qui peuvent varier en durée de lâchée). A raison de deux irrigations par semaine et en considérant les cinq mois de sécheresse qui nécessite l'irrigation (de mai à septembre), l'agriculture apporte une dose d'irrigation annuelle de près de 245 mm, ce qui est très faible par rapport à la moyenne de 433,67 mm rapportée par la littérature dans les mêmes conditions pédoclimatiques. Encore plus, nous avons raisonné sur la plus grande dose que l'agriculteur a apportée, cela veut dire que si l'on se fier aux autres doses plus faibles de 35 et 75 mm la différence serait encore plus importante par rapport à la dose moyenne de 433,67 mm. Non seulement la dose d'irrigation n'est pas satisfaite mais plus encore la dose supplémentaire qui devrait entraîner les sels en profondeurs n'est pas prise en compte. C'est ce qui explique les différents résultats de la salinité du sol que nous avons trouvés aux deux échelles d'observations in situ par le biais de la CEEps et de la CEM corroborés par les cartes thématiques en fonctions des classes de salinité.

Modélisation hydrodynamique des solutés dans les sols salsodiques

On distingue en général la salinisation primaire, liée à la présence naturelle relativement concentrée de sels (proximité de mers ou d'océans, présence de dépôts de sels...), et la salinisation secondaire, dont le développement apparaît étroitement lié à l'irrigation. Cette dernière est le processus de dégradation de la qualité des sols le plus rapide dans les périmètres irrigués (cas de la Mina). D'après Szabolcs 1994, à terme, près de la moitié des surfaces irriguées dans le monde apparaîtraient menacée de salinisation secondaire.

Le degré de salinisation d'une surface irriguée dépend de plusieurs facteurs dont la qualité de l'eau d'irrigation, la qualité du sol, les conditions climatiques et le niveau de la nappe. Chacun de ces facteurs fait intervenir un certain nombre de paramètres.

Ainsi, le nombre de paramètres qui interviennent dans le processus de salinisation est tellement important que la compréhension du phénomène nécessite le recours à la modélisation.

L'objectif de ce chapitre est de présenter un modèle pour répondre à deux questions principales.

- Le devenir de la salinité/sodicité d'un sol donné suite à l'irrigation avec une eau d'une qualité donnée ;
- Le volume d'eau d'irrigation (de qualité connue) nécessaire pour atteindre un seuil désirable de salinité et/ou sodicité dans le sol.

Présentation des modèles

HYDRUS-1D est un logiciel informatique qui peut être utilisé pour simuler le mouvement de l'eau, de la chaleur et des solutés dans des milieux poreux à saturation variable unidimensionnelle. Il peut également être utilisé pour simuler le mouvement du dioxyde de carbone et des solutés ioniques majeurs. Fondamentalement, l'équation de Richards pour le débit d'eau saturé de manière variable et les équations de type advection-dispersion (CDE) pour le transport de chaleur et de soluté sont résolues numériquement. Pour tenir compte de la variabilité des propriétés du sol, de nombreuses modifications sont apportées à l'équation d'écoulement, comme un terme de base pour tenir compte de l'absorption d'eau par les racines des plantes, et un débit de type à double porosité ou de type à double perméabilité pour tenir compte de l'écoulement hors équilibre. Le programme peut traiter différents flux d'eau et conditions aux limites de transport des solutés (Šimůnek, et *al.*, 2009).

En plus du code informatique HYDRUS, le logiciel HYDRUS-1D dispose d'un module d'interface utilisateur graphique interactif. Fondamentalement, le module se compose d'une interface principale et d'une unité de pré-traitement et de post-traitement.

Composantes du modèle

Le modèle Hydrus est basé sur l'équation de Richards avec les hypothèses d'un milieu poreux rigide dans lequel l'air joue un rôle négligeable dans un processus d'écoulement de l'eau de type Darcien. Les paramètres gouvernant le transfert d'eau sont les paramètres de la courbe de rétention de Van Genuchten et la conductivité hydraulique du sol au niveau de la zone racinaire, rarement disponibles car très délicats à obtenir. Le difficile accès aux caractéristiques hydrodynamiques du sol constitue d'ailleurs le handicap majeur à l'utilisation de cette approche pour estimer les flux d'eau sous culture irriguée. Cependant les conditions de sol (notamment cultivé) invalident souvent les hypothèses sur lesquelles repose ce modèle (écoulements préférentiels, effets macropores). Les paramètres hydrodynamiques du sol (K_s et les quatre paramètres de la courbe de rétention de Van Genuchten) sont indispensables pour le calage du modèle.

Il faut imposer à la base du profil une condition aux limites (drainage libre par exemple) et les conditions atmosphériques régissent la partie supérieure du profil. L'accroissement racinaire introduit dans HYDRUS repose sur l'évolution du plan de flux nul qui peut être obtenu à partir des tensiomètres.

Débit d'eau dans la zone non saturée

L'écoulement de l'eau est généralement décrit par une combinaison de l'équation de continuité 2.1 et de Darcy–Buckingham eq.2.3, L'équation de continuité 2.1 indique que le changement de la teneur en eau dans un volume donné de sol, en raison des changements spatiaux des flux d'eau et des sources et puits possibles dans ce volume de sol:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q_i}{\partial z_i} - S \quad 2.1$$

Où θ est la teneur en eau volumétrique, [$L^3 L^{-3}$], t est le temps [T], q est la densité de flux volumétrique [$L T^{-1}$], z_i est la coordonnée spatiale [L], et S est un terme général de puits ou de source [$L^3 L^{-3} T^{-1}$], par exemple, absorption d'eau par les racines.

Darcy (1856) a fait une expérience sur l'infiltration d'eau à travers un tuyau rempli de sable. Il a prouvé que le débit Q à travers le tuyau rempli de sable était directement proportionnel à sa section transversale A et à la différence de charge hydraulique h à travers la couche, et inversement proportionnel à la longueur du tuyau:

$$Q = -KA \frac{h_2 - h_1}{\Delta L} \quad 2.2$$

Où le coefficient de proportionnalité K est une conductivité hydraulique, [LT⁻¹].

Premièrement, la loi de Darcy a été appliquée au débit partiellement saturé par Buckingham (1907) et il a constaté que dans ce cas, la conductivité hydraulique est fonction de la teneur en eau $K = K(\theta)$. Cela signifie qu'une petite diminution de θ entraîne une diminution significative de K. C'est pourquoi, pour de nombreux sols, la différence entre les conductivités hydrauliques au-dessous et au-dessus de la nappe phréatique peut être importante.

Normalement, on suppose que l'écoulement non saturé a une direction pratiquement verticale contrairement à l'écoulement saturé sous la nappe phréatique, qui est généralement horizontal ou parallèle aux couches imperméables. En effet, à l'interface, là où se rencontrent les sols de différentes conductivités hydrauliques, «les lignes de courant présentent une réfraction prononcée» (Brutsaert, 2005). La loi de Darcy a été développée pour un milieu insaturé:

$$Q = -K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \quad 2.3$$

Où h est la charge hydraulique et défini comme :

$$H = H(\theta) - z \quad 2.4$$

Combinaison des équations 2.3 et 2.1 et s'appelle l'équation de Richards et décrit le mouvement vertical descendant de l'eau dans la zone non saturée

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial H}{\partial z} - 1 \right) \right] - S \quad 2.5$$

Où H est la hauteur de pression de l'eau du sol par rapport à la pression atmosphérique ($H \leq 0$).

L'équation de Richards est partiellement différentielle et hautement non linéaire car θ -H-K a une relation non linéaire dans la nature, ce qui indique également son origine fortement basée physiquement. De plus, les conditions aux limites à la surface du sol changent de façon irrégulière. C'est pourquoi il ne peut être résolu analytiquement que pour des conditions aux limites. Si les relations entre θ -H-K sont connues, des solutions numériques peuvent résoudre l'équation pour diverses conditions aux limites supérieures (Dam, et al., 2004).

Dans cette étude, le transport de soluté a été simulé numériquement par HYDRUS-1D. Le logiciel utilise l'équation de Richards modifiée (2.6) et décrit l'infiltration dans la zone d'étude et la modélise comme un écoulement vertical unidimensionnel.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\mathbf{k}(\theta) \left(\frac{\partial H}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right] - S \quad 2.6$$

Où H est la hauteur de pression de l'eau [L], α est l'angle entre la direction d'écoulement et l'axe vertical (c'est-à-dire $\alpha = 0^\circ$ pour l'écoulement vertical, 90° pour l'écoulement horizontal et $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ pour l'écoulement incliné), et K est la conductivité hydraulique insaturée [LT^{-1}] donnée par (Simunek, et al., 2005).

$$K(h,z) = K_s(r) K_r(h,z) \quad 2.7$$

Où K_r est la conductivité hydraulique relative [-] et K_s la conductivité hydraulique saturée [LT^{-1}].

Écoulement dans un système à porosité unique

Le mouvement de l'eau et du soluté dans la zone non saturée a été simulé par HYDRUS-1D en utilisant un modèle d'écoulement simple à porosité unique (figure 62). Le modèle à porosité unique décrit un écoulement uniforme dans des milieux poreux tandis que les autres modèles sont appliqués pour simuler un écoulement ou un transport préférentiel. Dans ce cas, l'équation de Richards et l'équation de dispersion de convection basée sur Fickian pour le transport de soluté sont résolues pour l'ensemble du domaine d'écoulement.

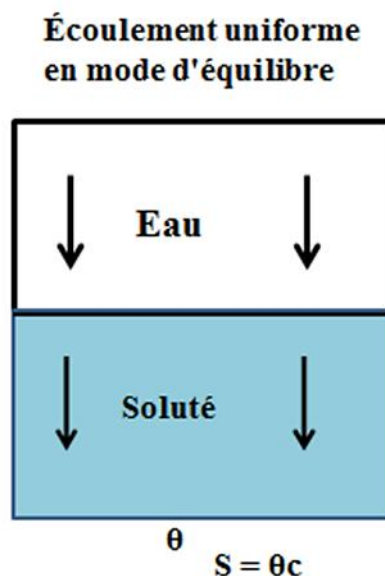


Figure 62: Modèle conceptuel d'équilibre physique pour l'écoulement de l'eau et le transport de soluté dans un système à porosité unique (Simunek et al., 2005).

Propriétés du sol et débit d'eau non saturée

Le sol est un système triphasé; il est constitué de phases solide, liquide et gazeuse réparties dans l'espace. Le mouvement du soluté entre ces phases est contrôlé par des processus physiques, chimiques et biologiques. La zone d'étude est délimitée par la surface du sol et se joint aux eaux

souterraines dans la frange capillaire. Les forces principales responsables de la rétention de l'eau dans un sol sont les forces capillaires et adsorbants. L'eau et son contenu chimique changent en raison de l'infiltration des précipitations ou de l'irrigation, de l'absorption d'eau par les plantes et de l'évaporation de la surface du sol (Parlange, et al., 2006).

La porosité d'un sol [L^3L^{-3}] peut être exprimée comme suit:

$$\varepsilon = 1 - \frac{Pb}{Ps} \quad 2.8$$

Où Pb est une densité apparente du sol et Ps est la densité des particules du sol. À partir de l'éq. 2.8, On voit que la porosité du sol diminue lorsque la densité apparente augmente.

La teneur en eau du sol peut être définie par la masse, éq. 2.9, ou en volume, éq. 2.10, mais généralement pour de nombreuses applications hydrologiques, il est utilisé sous une forme non dimensionnelle, c'est-à-dire éq. 2.10.

$$W = M_l / M_t = W_l / W_t \quad 2.9$$

$$\theta = V_w / V_t = w\rho_d / P_w \quad 2.10$$

où, V_w - volume d'eau, [L^3] V_t - volume solide, [L^3], w est défini comme la teneur massique en eau et ρ_w est la densité spécifique de l'eau, $\rho_w \approx 1 \text{ g/cm}^3$

La teneur en eau du sol peut également être exprimée par le degré de saturation S [-],

$$S = \frac{\theta}{\varepsilon} \quad 2.11$$

La teneur en eau volumétrique varie entre 0 pour un sol sec et la teneur en eau saturée θ_s , qui est censée être égale à la porosité si le sol était complètement saturé. Le degré de saturation varie d'un (sol complètement rempli d'eau) à zéro (sol complètement sec). En remplaçant la porosité par θ_s et en soustrayant la teneur en eau résiduelle θ_r dans l'équation 2.11, une saturation efficace Se a été obtenue.

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad 2.12$$

Par ailleurs, la teneur en eau saturée efficace n'atteint normalement pas 100% de saturation de l'espace poreux, en raison de l'invasion de l'air (Parlange, et al., 2006).

Caractéristiques de l'humidité du sol

Le mécanisme de rétention d'eau diffère avec l'aspiration. Aspiration généralement exprimée par la charge matricielle eau du sol (strictement négative) ou par l'aspiration du sol (strictement positive). Si l'aspiration est très faible (teneur en humidité plus élevée), la rétention d'eau dépend des effets de la tension superficielle capillaire, et la dernière dépend de la taille des pores et de la structure du sol (c'est-à-dire de l'agrégation des particules solides dans le sol). Si l'aspiration est plus élevée (teneur en humidité plus faible), la rétention d'eau a principalement influencé l'adsorption, qui dépend de la texture du sol (c'est-à-dire de la distribution de la taille des particules solides dans le sol) et de la surface spécifique (c'est-à-dire de la surface par unité de volume) du matériau. Les particules d'argile ont une grande surface spécifique par rapport au sable, car elles sont plus petites et plus aplaties, lorsque les particules de sable sont plus grosses et plus rondes. Pour cette raison, les sols argileux ont des pores plus fins et une grande adsorption qui leur permettent d'avoir une plus grande teneur en eau à une aspiration donnée plutôt que du sable (Ward et Robinson, 2000b).

L'une des principales limites de l'utilisation des courbes de rétention est que la teneur en eau à une aspiration donnée dépend non seulement de la valeur de cette aspiration, mais aussi de «l'histoire» de l'humidité du sol (Ward et Robinson, 2000b). Les courbes de rétentions seront différentes pour les sols secs et mouillants: à une pression matricielle donnée, la teneur en eau pour les sols mouillants sera inférieure à celle pour les sols séchants.

Dans HYDRUS-1D, la formule de van Genuchten a été utilisée pour décrire la rétention d'eau :

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta(\Psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha|\Psi|)^n)^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad 2.13$$

où

$$m = \left(1 - \frac{1}{n}\right), \quad n > 1 \quad 2.14$$

$$K(h) = K_s S_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]^2, \quad h < 0 \quad 2.15$$

2.16

$$K(h) = K_s, \quad h \geq 0$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$\theta(\psi)$ - eau du sol (rétention), qui est une fonction hautement non linéaire de la hauteur de pression, ψ ; θ_r et θ_s sont respectivement les teneurs volumétriques résiduelles et saturées en eau; n est un paramètre empirique lié à la distribution de la taille des pores, qui se reflète dans la pente de la courbe de

rétenction d'eau; α est un paramètre empirique supposé lié à l'inverse de l'aspiration d'entrée d'air, [L^{-1}]; S_e - saturation effective [-]; K_s - conductivité hydraulique à saturation naturelle, [LT^{-1}] (Simunek, et *al.*, 2005).

Conductivité hydraulique

Une autre propriété hydraulique importante du sol qui décrit le mouvement de l'eau du sol est la relation entre la conductivité hydraulique non saturée du sol, K , et la teneur en eau volumétrique, θ . La conductivité hydraulique reflète la capacité du milieu poreux à transférer l'eau. Il peut être exprimé comme suit:

$$K(\theta) = k \frac{\rho_w g}{\mu_w} k_{rw}(\theta) \quad 2.17$$

Où k est la perméabilité intrinsèque; $k_{rw}(\theta)$ est la perméabilité à l'eau relative (le rapport de l'insaturé à la perméabilité à l'eau saturée) qui varie de 0 pour les sols complètement secs à 1 pour les sols complètement saturés; et μ_w est la viscosité de l'eau.

L'équation 2.17 démontre que la conductivité hydraulique dépend de la taille, de la forme des pores remplis d'eau (Wang, 2009) et de la manière dont ils sont connectés entre eux, du fluide qui coule (μ_w et ρ_w) et de la teneur en eau du sol ($k_{rw}(\theta)$). Conductivité hydraulique égale ou supérieure à la saturation ($h \geq 0$) définie comme la conductivité hydraulique à saturation naturelle (K_s) (Simunek et Genuchten, 2006).

Transport de soluté

HYDRUS-1D utilise l'équation d'advection-dispersion pour simuler le transport de soluté dans une zone non saturée. Pour les solutés inertes et non adsorbants pendant l'écoulement d'eau unidimensionnel, il propose la forme :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta C) + \frac{\partial}{\partial z} (qC) - \frac{\partial}{\partial z} \left(D' \frac{\partial}{\partial z} \right) = 0 \quad 2.19$$

où $D' = D(\theta)$ est le coefficient de dispersion longitudinale. L'équation combinée de transport de soluté et d'humidité aura une forme

$$\theta(z,t) \frac{\partial C}{\partial t} + q(z,t) \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(D'(z,t) \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad 2.20$$

La majorité des solutions approchées de l'équation. 2.20 sont basées sur l'hypothèse que q et D aux alentours du front d'humectation ne varient que légèrement sur la profondeur mais sont des fonctions du temps. Dans ce cas, l'équation 2.21 peut s'écrire

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u(z, t) \frac{\partial C}{\partial z} - D'(z, t) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = 0 \quad 2.21$$

La solution analytique de l'advection – dispersion est

$$C = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{z\theta - l}{\sqrt{4\sigma l\theta}} \quad 2.22$$

Développement du modèle HYDRUS-1D

Données d'entrée

Propriétés hydrauliques du sol

L'étude du transport couplé d'eau et de soluté a été réalisée dans des conditions climatiques semi-arides et pour un sol aux propriétés physiques homogènes dans la zone d'étude. Le profil B a été sélectionné parmi les deux autres profils A et C à cause du fait qu'il est le plus représentatif de la parcelle d'étude puisqu'il comporte les quatre horizons sur une profondeur de 150 cm, les données de ce profil ont été utilisées comme valeurs d'entrée pour HYDRUS-1D (Tableau 31).

Tableau 31: Propriétés du sol de la parcelle d'étude

Profondeur cm	Argile %	Limon %	Sable %	Densité apparente (g/cm ³)
0 - 25	49,5	37,9	12,6	1,47
25- 70	57,9	35,6	6,3	1,66
70 - 120	47,7	48,3	4	1,76
120 - 150	33,6	58,2	8,2	1,76

Contaminants en sels

L'eau utilisée pour l'irrigation est chargée en sels solubles avec une concentration de 1,28 g.l⁻¹, elle a été utilisée comme donnée d'entrée du modèle. Le volume d'eau attribué à la plante pendant l'irrigation est évalué à partir des trois doses : 0,1 - 0,075 et 0,035 m³ pour la quantification de la dose d'irrigation. On a supposé que les 5 premiers cm de sol d'une superficie de 1 m² avec une phase de contamination résiduelle s'étendant jusqu'à une profondeur de 1,5 m sous la surface du sol étaient contaminés par 96 g de soluté non volatil et non réactif.

La teneur en eau volumétrique du sol a été calculée selon la formule de van Genuchten (éq. 2.13). Les paramètres hydrodynamiques de Van Genuchten θ_r et θ_s ont été prédits par Hydrus-1D à partir de la distribution granulométrique et de la densité apparente des sols (Tableau 31).

Pour la simulation du transport de soluté par HYDRUS-1D, la concentration initiale en phase liquide (masse de soluté par volume d'eau) a été utilisée comme entrée du modèle. Le volume d'eau dans un volume de 0,05 m³ de sol sec a été calculé à partir de l'équation 2.10.

La teneur en eau volumétrique du sol a été calculée selon la formule de van Genuchten (éq. 2.13). Les paramètres hydrodynamiques de Van Genuchten θ_r et θ_s ont été prédits par Hydrus-1D à partir de la distribution granulométrique et de la densité apparente des sols (Tableau 32).

Tableau 32: Paramètres hydrauliques du sol obtenus sur Hydrus-1D (modèle d'écoulement à porosité unique)

Profondeur (cm)	θ_r	θ_s	a (1/cm)	n	Ks (cm.h ⁻¹)	l
0 - 25	0,0946	0,4531	0,0143	1,3232	0,263	0,5
25- 70	0,0900	0,4053	0,0157	1,2354	0,099	0,5
70 - 120	0,0833	0,378	0,0136	1,2707	0,045	0,5
120 - 150	0,0733	0,3631	0,0101	1,3686	0,058	0,5

Comme le montre la figure 63, la fenêtre de dialogue de processus principale contient les processus qui peuvent être simulés dans HYDRUS tels que le débit d'eau, le transport de soluté et de

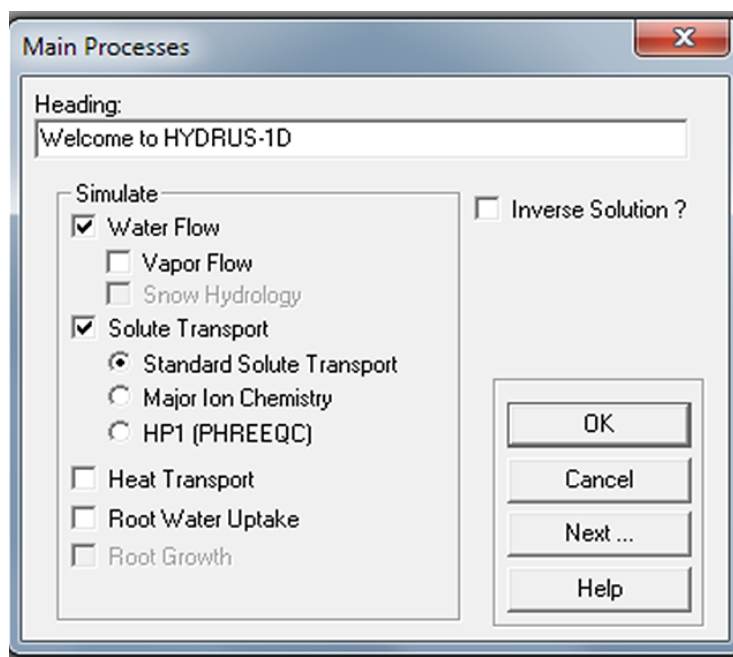


Figure 63: Paramètres de choix pour activer le processus de simulation de l'écoulement dans le programme HYDRUS-1D 2009

chaleur, l'absorption d'eau par les racines et la croissance des racines. Seul le débit d'eau et les options générales de transport des solutés ont été sélectionnés et simulés dans cette recherche.

Informations sur la géométrie

Dans HYDRUS-1D, la géométrie du modèle peut être définie. Tout d'abord, le nombre de types de sol, la profondeur totale du profil de sol et les unités de longueur peuvent être définis dans la boîte de dialogue d'informations géométriques. Ensuite, un modèle d'éléments finis peut être construit en subdivisant chaque région en éléments linéaires au moyen d'un éditeur graphique de profil de sol ou de fenêtres de dialogue de résumé de profil de sol. Dans cette étude, un profil de sol a été utilisé. La profondeur totale de ce profil de sol est de 150 cm, ce qui représente la profondeur moyenne de la zone non saturée avec quatre couches distinctes.

Dans cette section, les unités de temps, la discrétisation temporelle et les conditions aux limites variables dans le temps peuvent être définies (Figure 64). L'unité de temps a été choisie en jours et la période de 1^{er} irrigation en 1^{er} campagne jusqu'au la 2^{ème} irrigation en 2^{ème} campagne environ 365 jours a été utilisée à des fins de simulation.

Dans le code HYDRUS-1D, le nombre maximum d'enregistrements de variable de temps est de 2; par conséquent, 365 jours sont choisis comme période de simulation, ce qui signifie par conséquent avoir 2 enregistrements lors de l'utilisation des données d'entrée de précipitations et d'évaporation.

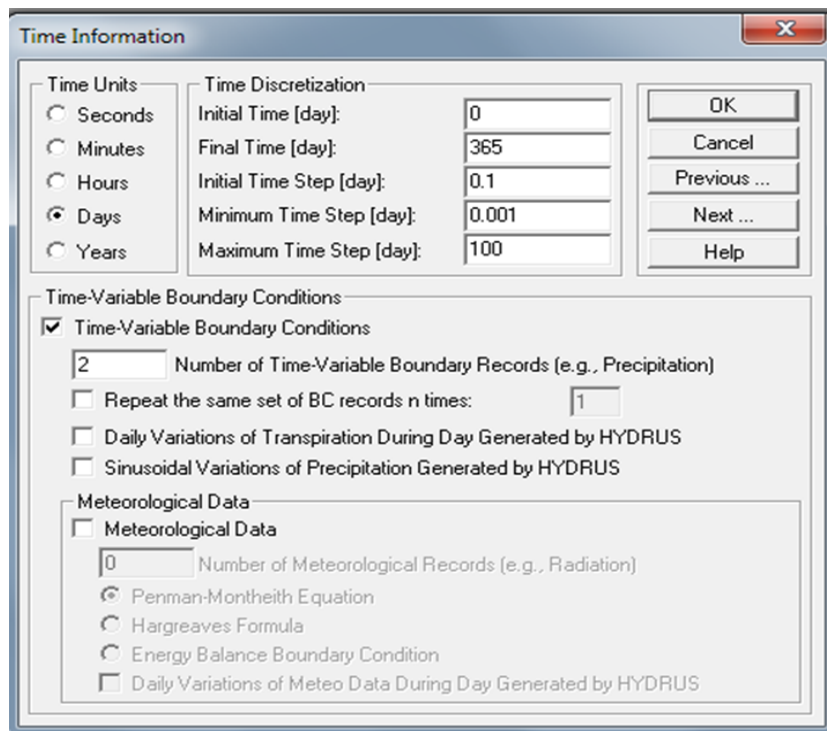
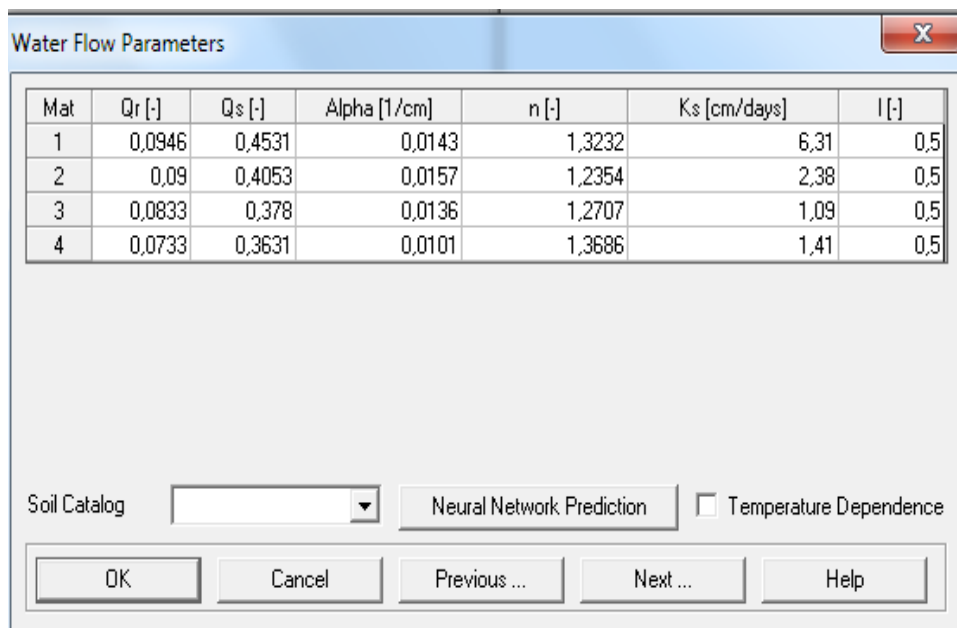


Figure 64: Paramètres de choix des données temporelles dans le programme HYDRUS-1D 2009.

Modèle des propriétés hydrauliques du sol

Dans cette fenêtre de commande, le modèle hydraulique et l'hystérésis peuvent être définis avec différentes approches hydrauliques. Dans notre cas, nous avons choisi le modèle de porosité unique de Van Genuchten-Mualem qui ne prend pas en compte l'hystérésis puisque ce qui nous intéresse c'est la phase d'humidification et transfert vertical.

Tous les paramètres nécessaires aux différents modèles hydrauliques du sol sont spécifiés dans cette section, la fenêtre de dialogue des paramètres de débit d'eau est illustrée à la figure 65. Les paramètres nécessaires sont les teneurs en eau résiduelle et saturée, la conductivité hydraulique saturée, le paramètre de connectivité des pores et les coefficients empiriques Alpha et n. Pour prédire les valeurs de ces paramètres, HYDRUS-1D utilise la DLL Rosetta (Dynamically Linked Library), de Marcel Schaap (Simunek, et *al.*, 2009). Le modèle de Rosetta peut être utilisé pour estimer les paramètres de rétention d'eau selon van Genuchten (1980), les paramètres de conductivité hydraulique saturée et de conductivité hydraulique non saturée selon van Genuchten (1980) et Mualem (1976). Pour ce faire, le modèle utilise une base de données de rétention d'eau mesurée et d'autres propriétés pour une grande variété de supports. Pour la distribution granulométrique d'un milieu donné et d'autres propriétés du sol, le modèle estime une courbe de rétention avec une bonne comparabilité statistique avec les courbes de rétention connues d'autres milieux ayant des propriétés physiques similaires (Nimmo, 2007). Comme le modèle utilise des données de base plus faciles à mesurer, il est considéré comme un modèle de fonction de pédotransfert (Schaap, et *al.*, 2001).



Mat	Qr [-]	Qs [-]	Alpha [1/cm]	n [-]	Ks [cm/days]	l [-]
1	0,0946	0,4531	0,0143	1,3232	6,31	0,5
2	0,09	0,4053	0,0157	1,2354	2,38	0,5
3	0,0833	0,378	0,0136	1,2707	1,09	0,5
4	0,0733	0,3631	0,0101	1,3686	1,41	0,5

Figure 65: Fenêtre de dialogue des paramètres de débit d'eau (HYDRUS-1D 2009, manuel de l'utilisateur)

Transport des Solutés

Informations générales

Dans ce sous-menu de prétraitement, le modèle de transport de soluté, le schéma de pondération temporelle, le schéma de pondération d'espace et certains autres paramètres peuvent être définis. La fenêtre de dialogue s'affiche dans la figure 66.

À des fins de simulation, le modèle de transport de soluté à l'équilibre est sélectionné avec Crank-Nicholson comme schéma de pondération temporelle et les éléments finis de Galerkin comme schéma de pondération spatiale.

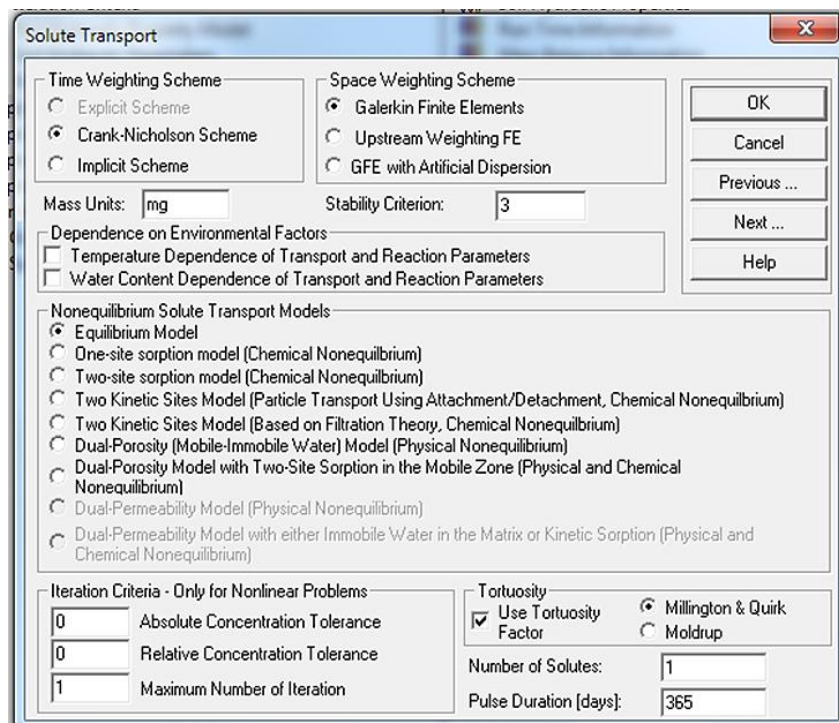


Figure 66: Paramètres d'équilibre du modèle de transport des solutés dans HYDRUS 1D 2009.

Paramètres de transport des solutés

Les paramètres de transport du soluté nécessaires sont la densité apparente, la dispersivité longitudinale, la fraction sans dimension des sites d'adsorption et la teneur en eau immobile qui est égale à zéro lorsque le non-équilibre physique n'est pas pris en compte. En plus de ces paramètres, certains paramètres spécifiques au soluté sont nécessaires, tels que le coefficient de diffusion moléculaire dans l'eau libre et le coefficient de diffusion moléculaire dans l'air du sol, qui ont tous deux été fixés à zéro (figure 67).

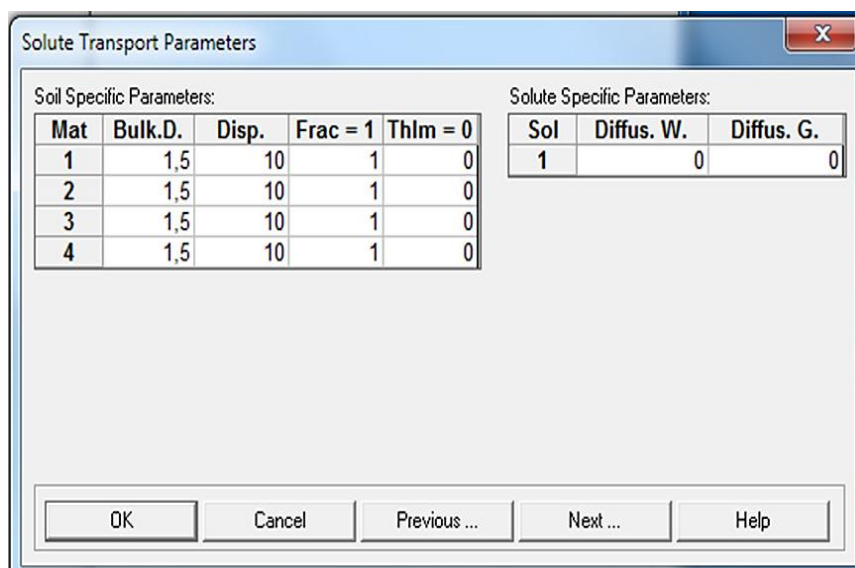


Figure 67: Paramètres de choix des données de transport des solutés dans HYDRUS 1D 2009.

Données de sorties

Post-traitement

Le post-traitement est également effectué dans le contenant.

Hydrus-1D propose des graphiques de la distribution de la hauteur de pression, de la teneur en eau, des flux d'eau et de soluté, de l'absorption d'eau des racines, de la température et de la concentration dans le profil du sol à des moments présélectionnés.

La sortie comprend également des graphiques variables en fonction du temps, tels que les flux réels, potentiels et cumulatifs à travers les frontières ou à la sortie de la zone racine.

Des points d'observation peuvent être ajoutés n'importe où dans le profil pour obtenir une sortie graphique pour la teneur en eau, la hauteur de pression, la température et / ou la concentration.

Limitations du modèle

L'étude de la zone non saturée est un travail complexe en raison de l'hétérogénéité des sols. Par conséquent, pour pouvoir modéliser le mouvement de l'eau et des solutés, et dans une tentative d'atteindre le but et les objectifs spécifiques de l'étude, quelques simplifications et limitations ont été apportées:

- En raison des limites de temps, seulement 1 an a été simulé. De plus, la période choisie pour les simulations (Juil 2012 - Juil 2013) pourrait ne pas être la pire condition pour la migration vers le bas des solutés dans tous les emplacements.

- On a supposé que la nappe phréatique est constante (150 cm sous la surface du sol) tout au long de la période de simulation.

- L'effet de l'absorption d'eau des racines a été négligé.
- Un mouvement vertical unidimensionnel a été supposé et simulé dans le modèle, bien qu'un flux tridimensionnel représentant plus correctement la réalité. Cependant, le mouvement vertical unidimensionnel est la direction dominante de l'écoulement dans la zone non saturée, dans une condition de champ à grande échelle, il pourrait être considéré comme une simplification de la réalité. Mais il faut être conscient que l'écoulement unidimensionnel surestime les concentrations par rapport à l'étalement arborescent.
- Un modèle de porosité unique a été utilisé pour décrire l'écoulement uniforme dans les milieux poreux non saturés qui néglige à la fois la variabilité des propriétés du sol et l'écoulement hors équilibre.
- L'estimation de la rétention d'eau a été réalisée avec une fonction de pédotransfert étalonnée statistiquement Le modèle de Rosetta. Cependant, il prédit la rétention d'eau pour un sol donné à partir d'une base de données de rétention d'eau mesurée pour une variété de milieux poreux, c'est pourquoi il est difficile de dire à quel point la prévision est bonne. Si l'on souhaite être plus précis, des mesures de rétention d'eau sont nécessaires.
- Des simulations ont été réalisées pour le transport de soluté non réactif. Cela pourrait être une surestimation de la véritable migration vers le bas des solutés.
- Les données d'entrée sur les précipitations, l'évaporation et l'irrigation sont un autre facteur d'incertitude, en particulier la réduction d'échelle des données d'entrée sur l'évapotranspiration.

Analyse des données

Hauteur de pression

Pendant toute la période de simulation de temps finale de 365 jours, avec un temps initiale de 0 jours. Le modèle est exécuté dans un pas de temps initial de 0,1 jours sur un intervalle de pas de temps minimal 0,001 à un maximum de 100 jours (figure 64). Les points d'observations à des profondeurs de 30 cm, 70 cm et 120 cm, on constate que la hauteur de pression (potentiel matriciel) augmente proportionnellement de la surface du sol vers la profondeur. Si on fixe une profondeur par exemple à 80 cm, on remarque sur le graphique qu'au temps T1, la hauteur de pression d'eau dépasse 170 cm, au temps T2, elle dépasse 220 cm et à temps au temps T3, elle dépasse 260 cm. A temps T0 le modèle démarre et ne registre aucun scénario.

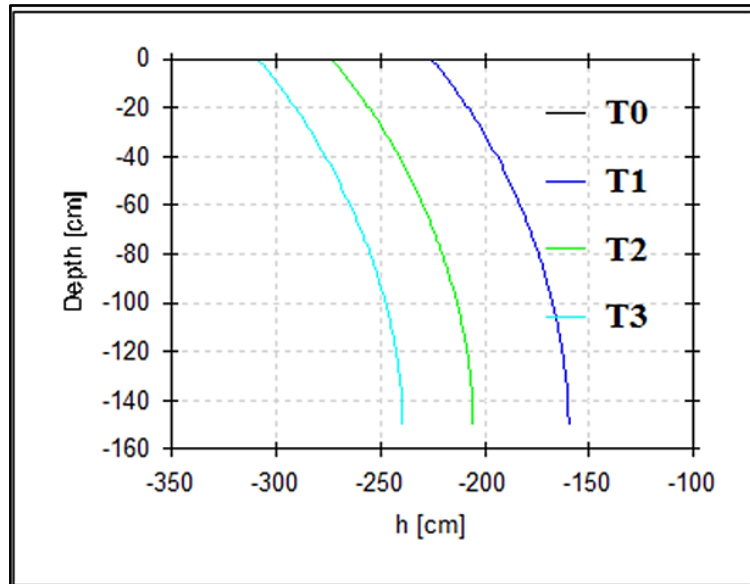


Figure 68: Variation de la hauteur de pression en fonction de la profondeur

Teneur en eau volumique du sol

Le graphe de la figure suivante montre que la teneur en eau volumique du sol augmente de la surface vers la profondeur, si on va faire la liaison à la profondeur de 20 cm du profil, on constate que la teneur en eau volumétrique est très importante au temps T1 par rapport à T2 et T3. Cette constatation reste valable tout au long de la profondeur du profil du sol.

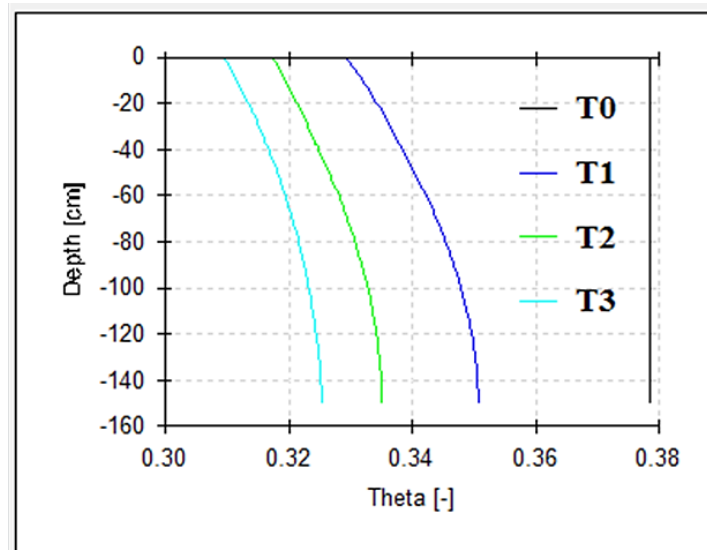


Figure 69: Variation de la teneur en eau volumique du profil de sol

Conductivité hydraulique saturée

La conductivité hydraulique saturée du sol devient presque constante à temps T2 et T3 mais une légère variation constatée à temps T1 avec une absence d'allure de T0 désigne le démarrage de simulation du modèle. En générale, la texture du sol agit de façon directe ou indirecte sur la

conductivité hydraulique du sol par leur forte proportion des éléments fins qui induit sur le colmatage des pores. La simulation de la conductivité hydraulique enregistre des valeurs très faibles qui varient entre 0,01 à 0,025 cm/jours (figure 70) en profondeur, ces valeurs reflètent qu'un sol devient imperméable dans le temps et vu le taux de la salinité est importante très chargé en sodium et peuvent provoquer la dégradation du sol.

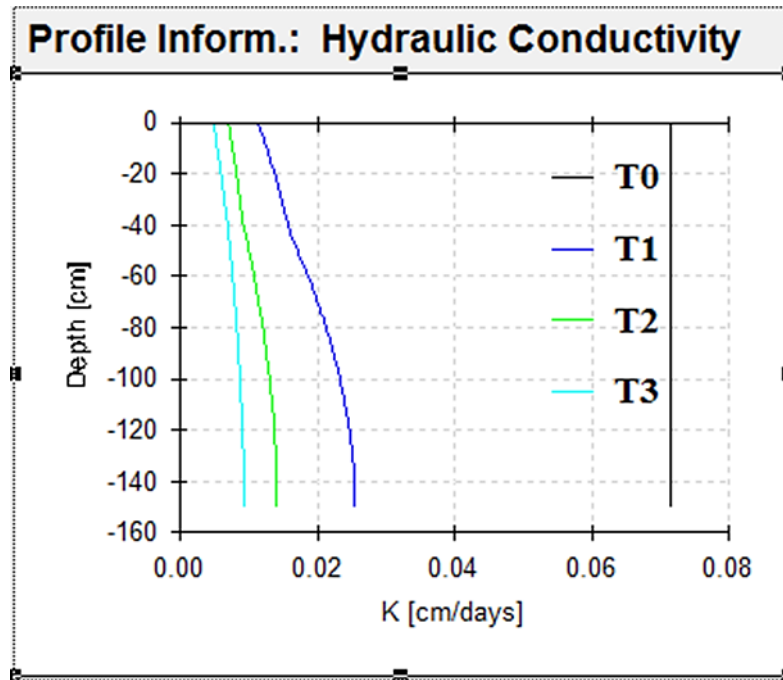


Figure 70: Variation de la conductivité hydraulique saturée du profil de sol

Concentration du sol

Le profil d'information de la concentration en sel du sol commence à la concentration de $98,5 \text{ mg.cm}^{-3}$ à trois temps d'observations T1, T2 et T3 et continue à l'élévation jusqu'à rejoindre la concentration maximum d'environ de 100 mg.cm^{-3} au point le plus bas du profil. En général, on constate que la concentration de la solution donnée au premier temps pour la simulation du processus va être diminuée progressivement au cours de la simulation et en profondeur du profil. Ce phénomène peut être influencé par d'autres facteurs qui ne sont pas pris en compte pendant cette simulation.

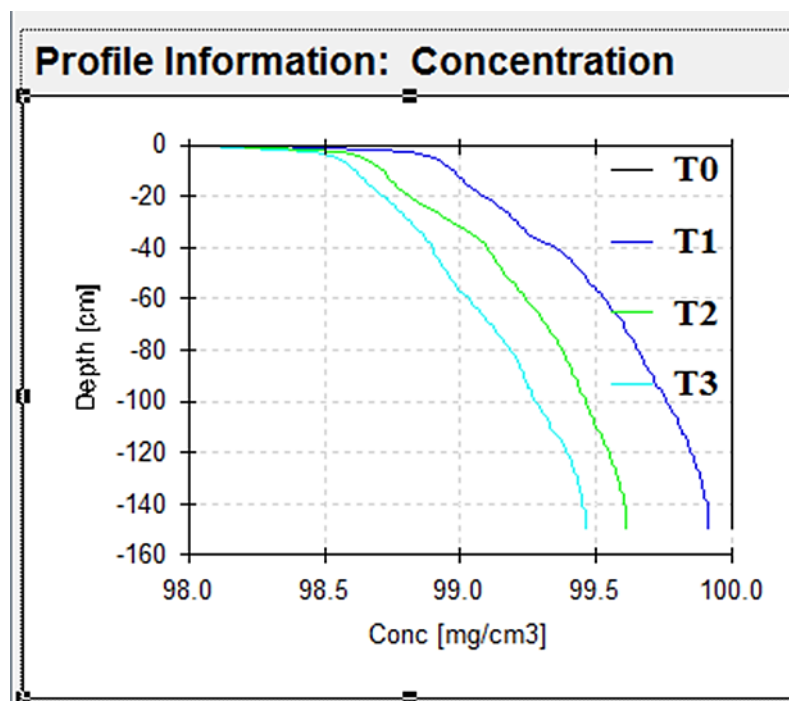


Figure 71: Profile d'information sur la concentration du sol

En termes de discussions, il est important de noter que l'eau d'irrigation est la source principale à l'origine du processus de salinisation et de sodisation des sols de notre parcelle d'étude. En effet, la simulation du processus de salinisation et de sodisation par Hydrus 1D à travers les paramètres hydrogéochimiques en fonction du temps, montre une augmentation du potentiel de pression avec le temps et en profondeur. Ceci est en adéquation avec le fait que le potentiel de pression augmente en profondeur en présence d'une nappe phréatique avec un niveau statique qui fluctue en fonction des cycles d'humectation et de dessiccation liés aux irrigations ou aux précipitations. Il importerai dans ce cas de figure, d'élargir le pas de variation du temps de simulation pour faire intervenir les variations saisonnières.

Pour l'humidité volumique, la simulation par Hydrus 1D prévoit sa diminution dans le temps et son augmentation en profondeur, ce qui entraîne, pour un temps donné une augmentation de la concentration des sels dans le profil du sol ajoutée à la quantité de sels véhiculée par l'eau d'irrigation particulièrement quand les besoins en évaporation du sol augmentent en période de sécheresse qui caractérise le climat semi-aride de la région. Ceci est en adéquation avec la simulation de la concentration en sels par hydrus 1D.

La simulation de la conductivité hydraulique saturée par Hydrus 1D constitue un indicateur pertinent du phénomène de sodisation du sol. Ce paramètre diminue dans le temps et augmente légèrement en profondeur. En effet, la forme sodique des sels dans la solution du sol est

vraisemblablement le paramètre qui va dégrader, avec le temps, la structure du sol qui se manifeste par une diminution de la conductivité hydraulique saturée. Dans l'état actuel du processus de salinisation, la conductivité hydraulique saturée ne montre pas de traces de dégradation physique du sol, néanmoins la simulation de ce paramètre par Hydrus 1D en vue de prédire dans le temps une éventuelle dégradation de la structure du sol nécessite suffisamment de données par rapport à celle disponibles. Ceci d'autant plus que les faciès chimiques des sels identifiés dans les profils du sol sont de type chloruré sodique et sulfaté sodique pour tous les échantillons analysés. Dans ces conditions, les risques liés à la sodicité des sols et donc leur dégradation physique n'est pas à écarter définitivement. En cas de dégradation physique, il importerait de prévoir des amendements calciques pour rééquilibrer le rapport Na/Ca en faveur d'une floculation du complexe argilo-humique du sol. Ces amendements ne peuvent être envisagés que si le réseau de drainage est entièrement fonctionnel et que l'apport des doses de lessivage est assuré.

L'importance de l'approche de modélisation des processus de salinisation et de sodisation des sols étudiés par Hydrus 1D se décline par le fait qu'elle permet de prédire l'évolution dans le temps de la salinité et de la sodicité des sols et donc de prévoir précocement les mesures hydroagricoles qui s'imposent pour une préservation de la qualité des sols et des rendements des cultures. C'est la nature des sols argileuse et la forme sodique du phénomène de salinisation qui présentent une situation problématique qui nécessite une approche intégrée de remédiation et inscrite dans la continuité.

Conclusion

Pour conclure ce travail de recherche, il est important de rappeler que la région d'étude est caractérisée par un climat semi-aride très évaporant, avec une pluviométrie annuelle de 281 mm et une longue période de sécheresse qui s'étale sur 8 mois. Le niveau piézométrique de la nappe phréatique est très proche de la surface du sol durant la période pluviale. Les sols présentent une texture très fine dans les horizons de surfaces, et moyennement fine dans les horizons profonds qui reposent sur une couche de marne.

L'étude de l'évolution de la salinité des sols abordée via deux échelles d'observation: (i) la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CEps) et la conductivité électromagnétique (CEM) (ii) la modélisation des processus hydrogéochimiques de salinisation et de sodisation se présentent comme des moyens pertinents non seulement pour comprendre le fonctionnement hydrodynamique des sols étudiés : importants pour l'optimisation de la gestion hydroagricole (en terme d'irrigation et de drainage) mais aussi pour prédire les effets des méthodes actuelles de conduite hydroagricole sur la qualité des sols et les conséquences sur les rendements des cultures.

A l'issue de cette étude, il ressort que les sols analysés sont sodiques à pH basique à très basique variant de 8,16 à 8,67. La fraction fine est généralement très abondante dans les horizons superficiels et varie entre 40,75 à 57,56%. Ce qui favorise la formation des croûtes de battance et par conséquent la stagnation des eaux ou leur ruissellement en surface des sols.

Le diagnostic établi a révélé que les sols sont salés à très salés avec un risque de sodisation élevé. Le chlorure de sodium est dominant dans le milieu et peut se voir sous forme de nervures de filaments blanchâtres localisées dans les horizons de rabattement de la nappe. Le faciès chimique de ces sols est de type chloruré sodique et sulfaté sodique pour tous les échantillons analysés.

La plaine de la Mina est pourvue pour l'essentiel en eau provenant des eaux des nappes moyennes et profondes. Ces eaux sont fortement salées à excessivement salées avec un risque de sodisation très élevé, leur faciès chimique est semblable à celui de la solution du sol. L'emploi de ces eaux devrait être limité aux sols très perméables en conditions de drainage bien fonctionnel et avec des doses de lessivage apportées.

L'étude met en évidence la relation entre les eaux de nappes et la salinité des sols. L'une des causes de la sodisation des sols de la zone d'étude est la présence de la nappe phréatique salée qui est riche en chlorures et en sodium. Ces derniers se fixent sur les colloïdes des sols et exercent une action

La nécessité de percevoir le drainage dans une vision intégrée en relation avec la gestion de l'irrigation et des doses de lessivage doit être prise en compte sachant que les sels ne se présentent pas sous forme statique mais se trouvent en perpétuelle variations en fonction des conditions pédoclimatiques et de gestion hydroagricole.

Une simulation a été appliquée par le modèle hydrus 1D sur un profil du sol dans un temps de 365 jours pour pouvoir prédire les quatre phénomènes tels que la hauteur de pression, la teneur en eau volumique, la conductivité hydraulique et la concentration du soluté du sol par les sels.

Cette modélisation de ces processus hydrogéochimiques de salinisation et de sodisation des sols du périmètre irrigué de la Mina doit être entreprise pour évaluer et comprendre l'évolution de ces phénomènes dans l'espace et dans le temps. La cartographie et l'usage du SIG et de la télédétection peuvent constituer des outils clés pour non seulement élargir la zone d'étude mais aussi augmenter le caractère intégré des mesures de remédiation et de préservation de la qualité des sols avec tous les impacts de développement agricole et socioéconomique de la région.

Références bibliographiques

Abdelhafid.Y., 2009. Cartographie de la salinité des sols par induction électromagnétique, cas de la zone du périmètre irrigué de la Mina. Thèse magister, ENSA El Harrach, 102p.

Antipolis S. 2003. Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens, Etude bibliographique. Les cahiers du plan bleu. 2, 80 pages

Aubert G. 1976. Les sols sodiques en Afrique du Nord. Ann, de l'INA d'Alger, vol.VI, n°1, pages 185- 196.

Ayers R.S et Westcot D.W., 1994 . Bulletin FAO d'irrigation et de drainage n°29 rev.1. La qualité de l'eau en agriculture. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, 180 pages.

Ayers R.S. and Westcot D.W., 1999. The Quality Toilets in agriculture, 2nd. Large Campina: UFPB Studies, FAO nr29, 218p.

Barbiero. L et Valles. V., 1992 . Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dallol Bosso. Cah. Orstom. Ser. Pedol., Vol. XXVII, n°2, France, page 143 à 152.

Boulaine J, 1955 : Carte des sols d'Algérie.

Bouzada N.R., 2013. Characterization geochemical of ground water used in the irrigation in the plains of Cheliff. Memory of magister, University Hassiba Ben Bouali Chlef, 91p.

Bradai A., 2017. Evolution of the geochemical quality of ground water used of the plain of Lower Cheliff. Thesis of doctorate, University Hassiba Ben Bouali Chlef, 123p.

Bradai A., Douaoui A et Marlet S., 2008. Qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols dans la plaine du Bas-Cheliff. Colloque sur économies d'eau en systèmes irrigués au maghreb, Mostaganem. Algérie, 8p.

Buckingham E., 1907. Studies on the Movement of Soil Moisture. US Department of Agriculture, Bureau of Soils No. 38.

Brutsaert, W., 2005. Hydrology - an introduction. Cambridge University Press.

Chevrery C. and Robert M.R., 1998. The impoverishment of the soil irrigated and water resource: A threat for the future of agriculture and the environment of the countries in the south of the Mediterranean. Study and Management of the Grounds, 5 (4), 217-226.

Chiraz Masmoudi C et Ben Mechlia N., 2004. Vegetative and reproductive behaviour of some olive tree varieties (*Olea europaea* L.) under deficit irrigation regimes in semi-arid conditions of Central Tunisia. Revue Ezzaitouna, vol. 10 (1 et 2), pp : 37-51.

<https://www.researchgate.net/publication/313627578>

Condom N., 2000. Analyse et modélisation couplée des processus hydrogéochimiques de la salinisation des sols. Application aux rizicoles irrigués de l'office du Niger (Mali), Thèse doctorat, ENA de Montpellier, 240p.

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

Dam, J. C. V., Rooij, G. H. D., Heinen, M. & Stagnitti, F., 2004. Concepts and dimensionality in modeling unsaturated water flow and solute transport. In: FEDDES, R. A., ROOIJ, G. H. D. & DAM, J. C. V. (eds.) *Unsaturated-zone modeling; progress, challenges, and applications*. Dordrecht etc.: Kluwer.

Daoud Y et Halitim A., 1994. Irrigation et Salinisation au Sahara Algérien. *Sécheresse*. 3 (5), pp : 151- 160.

De Jong. E., Ballantyne. A. K., Cameron D. R., Read D. W., 1979. Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 810-812p

Diba., 1995. Caractérisation d'un sol halomorphe du Delta du fleuve Sénégal, fertilisation du riz aux engrais minéraux. Mémoire d'ingénieur de l'institut des Sciences de la terre de l'UCAD, 57p.

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

Djili K., Daoud Y., Touaf L., 2003. La salinisation et la sodisation des sols d'Algérie. Congrès scientifique sur l'apport de la recherche scientifique et des nouvelles technologies dans le développement et la mise en valeur des régions arides et semi-aride climat. 2-3 octobre. El-Oued, 9 p.

Douaoui A., Gascuel. Odoux C., Walter CH., 2004. Infiltration et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas-Chélif, Algérie. Mesures au laboratoire sous simulation de pluie. *EGS*, 11, (4) : 379 à 392 pages.

Douaoui. A et Hartani. T. 2007. Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Actes de l'atelier régional SIRMA. 4-7 juin 2007, Nabeul, Tunisie.

Douaoui. A et Lepinard. P., 2010. Remote sensing & soil salinity: mapping of salinity in the Algerian plain "Lower-Chellif", *Geomatics expert*, 76- 36-41.

Douaoui.A., 2005. Variabilité spatiale de la salinité en relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chélif. Apport de la géostatistique et de la télédétection. Thèse Doct. D'état, INA- Alger. 115 – 142PP

Dounia H. Tabet., 1999. Intérêt d'une approche spatiale pour le suivi de la salinité des sols dans les systèmes irrigués. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montpellier, 435p.

Droubi A., 1976. Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation – Modèle thermodynamique de simulation – Application aux sols salés du Tchad. Mémoire des sciences Géologiques ; 46, 177 p.

Durand J. H., 1958. Les sols irrigables, étude pédologique. Section pédologie et Agrobiologie. Alger, 191p. electrical conductivity measurements. FAO Irrigation and Drainage Paper 57. FAO, Rome.

Durand J.H., 1983. Les sols irrigables, Agence de coopération culturelle et technique. P.U. France, 190 p

Eaton F.M., 1950. Significance of carbonates in irrigation waters. Soil Science, 69: 123-133.

FAO., 1984. Trace éléments in agriculture. FAO Soils Bulletin (Draft), Soils Resources, Management and conservation Service. FAO, Rome. 68 pages.

FAO., 2006. Conférence électronique sur la salinisation. Extension de la salinisation et stratégies de réhabilitation. Organisée et coordonnée par Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et Drainage, du 6 février au 6 Mars 2006. 12p.

Fox M. L., 2004. Identifying soils with potential of expanding sulfate mineral formation using electromagnetic induction. Submitted to the office of graduate studies of Texas A et M university in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of science. 80p.

Gacem F., 2014. Etude spatiale et temporelle de la salinité dans les sols de la plaine de Mina (Relizane). Mémoire du magister: Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 77p.

Ghoul A., 1973. Etude agropédologique des extensions du périmètre de la Mina. Rapport au secrétariat d'état à l'hydraulique sous-direction des ressources en sol. Alger, 52 pages.

Gorine M., 2010. Analyse de la salinité et détermination de la sensibilité à la dégradation des terres agricoles, cas du périmètre irrigué de la Mina, Relizane. Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 108p.

Gouaidia L., Guefafia O., Boudoukha B., Ugly Hemila M. And Martin C., 2012. Evaluation of the salinity of ground water used in irrigation and risks of impoverishment of the soil: example of the plain of Meskiana (North-eastern Algerian). *Physio-Géo*, 6,141-160.

Gupta,R. K. and Abrol, I. P., 1990. Salt-affected soil: Their reclamation and management For crop production. Advances in Soil Science Volume 11. Soil degradation ed. Lal, R.,Stewart, B. A ; Springer-Verlag, New York, 288 pages.

Halitim A., 1973. Etude expérimentale de l'amélioration des sols sodiques d'Algérie en vue de leur mise en culture. Thèse de 3eme cycle. Univ de Renne, 176 p.

Halitim A., 1985. Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes Plaines Steppiques d'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la génèse et le comportement des sols. Thèse Doct. d'Etat, Université de Rennes, 383 p.

Halitim A., 1988. Sols des régions arides d'Algérie. OPU, Alger, 384 p

Hamdy A., 2004. Non-conventional water Resources Salinity and Saline Irrigation Practices and Management. CIHEAM, IAMB, Italie, 199 p.

Haussain H. Mr., Al-Haidarey Mr. J.S., Al-Ansari NR. And Knutsson S., 2014. Evaluation and mapping groundwater suitability for irrigation using GI in Najaf Governorate, Iraq Journal off environmental hydrology, 22 (4), 1-16.

Horton R.K., 1965. Year index number system for rating toilets quality, Newspaper Toilets Pollution Control Federation, 37,300-305.

INSID., 2008. Le point sur la salinité des sols dans les périmètres irrigués : risques et recommandations, cas du périmètre irrigué du Bas chellif, rapport, 17 p.

Jerome C. and PIUS A., 2010. Evaluation off toilets quality index and its impact one the quality of life in year industrial area in Bangalore, South India, American Newspaper of Scientific and Industrial Research, 1 (3), 595-603.

Job J.O., Hachicha M., Loyer J.Y., 1990. Conductivimétrie électromagnétique et cartographie de la salinité des sols. ORSTOM. Fonds documentaries. N° 31.297 ex1, cote: B. 33p.

Khalaf R.M. and Hassan W.H., 2013. Evaluation of irrigation toilets quality Index For Al-Damman confined aquifer in the West and South West off Karbala City, Iraq International Newspaper off Civil Engineering, 2 (3), 21-34.

Le Brusq J. Y., Loyer J. Y., 1982. Relations entre les mesures de conductivité sur des extraits de sols de rapport sol/solution variables, dans la vallée du Fleuve Sénégal. Cah. ORSTOM.Sér. Pédo., Vol XIX, no 3 pp. 293-301.

Le Houerou H.N., 1993. Salt – tolerant plants for the arid region of the Mediterranean isoclimatique zone In: H. Leith et A Al Massoom (edits): towards the rational use of high salinity tolerant plants. Vol 1. Kluver academ, pp: 403- 422.

Legros J.P., 2009. La salinisation des terres dans le monde. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, 2009, <http://academie.biu-montpellier.fr/>, conférence n°4069, Bull. n°40, p. 257-269.

Lund E.D., Christy C. D et Drummond P.E., 1999. Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture. Dans precision Agriculture, Proc. Of the Fourth international Conference. P. C. Robert et al. (Eds), St-Paul, MN, (ASA-CSSA-SSSA). P 1089 – 1100.

Maillard J., 2001. Le point sur l'irrigation et la salinité des sols en zone sahélienne : Risques et recommandations. Handicap International, Document du Centre d'Actions et de Réalisations Internationales, France, 35 pages.

Marlet S., Job J.O., 2006. Processus et gestion de la salinité des sols. In Tiercelin, J.R. Traité d'irrigation, seconde édition. Tec & Doc Lavoisier. p. 797-822.

Mathieu .C et Pieltain .F., 1998. Analyse chimique des sols. Méthodes choisies. Edit. lavoisie TEC et DOC.265p.

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

Meireles A.C.M., De Andrade E.M and Chaves L.C.C., 2010. FRISCHKORN H. and CRISOSTOMO L.A., With new proposal off the classification off irrigation water. Revista Ciencia Agronomica, 41 (3), 349-357.

Mezghani M. A., Chiraz M. C., Gouiaa M and Labidi F., 2012. Vegetative and reproductive behaviour of some olive tree varieties (*Olea europaea* L.) under deficit irrigation regimes in semi-arid conditions of Central Tunisia. Scientia Horticulturae, vol. 146, pp : 143–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2012.07.030>

Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12: 513 – 522.

Navarro-Pedreno J., Jordan M. M., Melendez-Pastor I., Gomez I., Juan P, and Mateu J., 2007. Estimation of soil salinity in semi-arid land using a geostatistical model. Land Degradation & Development, 18: 339–353.

Nimmo John R., 2007. Simple predictions of maximum transport rate inunsaturated soil and rock. Water Resources Research, Vol. 43, W05426, <https://doi.org/10.1029/2006WR005372>

Nolin, M.C., Cambouris, A.N. et Simard, R.R., 1997. La variabilité des sols: son origine et sa gestion. Pages 35-77 dans Éditeur (ed.). Actes du Colloque : Nouvelle technologie en agriculture, Campus du fort St-Jean.

Ollier C et Poirée M., 1986 . Irrigation. Les réseaux d'irrigation : Théories, techniques et économie des arrosages. Eyrolles, Paris, 503 p.

Pansu. M et Gantheyrou.J., 2002. L'analyse du sol minéralogique, organique et minéral.

Parlange, J.-Y., Hopmans, J. & Assouline, S., 2006. Infiltration. The handbook of groundwater engineering, second edition. CRC Press.

Rhoades J.D., Manteghi N.A., Shouse P.J et Alves W.J., 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. *Soil Sci. Am*, 53(2): 433-439.

Rhoades J.O., 1974. Drainage for salinity control. In: *Drainage for Agriculture*. Van Schifaaarde J. Ed. Amer. Soc. Agronomy Monograph, 17: 433-462.

Richards L.A., 1954. Diagnostic and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture Handbook*, n° .60, 159 p.

Rokbani M.K., Gueddari NR. and Bouhlila R., 2011. Use of geographical information system and toilets quality index to assess groundwater quality in EL Khairat deep aquifer (Enfidha, Tunisian the Sahel). *Iranica Newspaper of Energy and Environment*, 2 (2), 133-144.

Saidi D., 2004. Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du Bas Cheliff. Thèse de Doctorat d'Etat Es Sciences en Sciences Agronomiques. Spécialité science du sol. Institut National Agronomique, El Harrach, Alger. 181p.

Schaap, M. G., Leij, F. J. & Van Genuchten, M., 2001. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163-176.

Servant J., 1975. Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes : l'exemple des sols salés du sud et du sud-ouest de la France. Thèse de Doctorat es-Science de l'Université de Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier. France. 194p.

Simsek C. and Gunduz O., 2007. IWQ index: With GI integrated technical to assess irrigation toilets quality, *Environmental Monitoring and Assessment*, 128,277-300.

Simunek, J. & Van Genuchten, M., 2006. Contaminant transport in the unsaturated zone. The handbook of groundwater engineering, second edition. CRC Press.

Šimunek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M. & Van Genuchten, M., 2009. *hydrus-1d* software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. 4.08 ed.

Simunek, J., Van Genuchten, M. & Sejna, M., 2005. The *hydrus-1d* software package for simulating the one- dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. University of California-Riverside Research Reports.

Slama F., 2004. La salinité et la production végétale. Document du Centre de Publication Universitaire, Tunisie. 73 p.

Sudduth K.A., Kitchen N.R., Bollero G.A., Bullock D.G. and Wiebold W.J., 2003. Comparison of Electromagnetic Induction and Direct Sensing of Soil Electrical Conductivity. *Agronomy Journal*, 95: pp 472-482.

Sumner, M.L, 1993 . « Sodic Soils : new perspectives ». *Australian journal of soil research*, vol. 45, pages 469 a 475.

Szabolcs I., 1994. Prospects of soil salinity for the 21 st Century. *Acapulco Mexique: Trans 15th World Congress of Soil Science, 1994;* vol. 1: 123-41.

Tinthoin R., 1954. Une plaine oranaise transformée par l'irrigation: la Mina. *Revue de géographie*. 42(2), pp : 223 – 287.

Trangmar, B. B., Yost, R.S and Uehara, G., 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy* 38, 45–94.

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

Van Genuchten M. T., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil science society of America journal*. U.S. Salinity Laboratory, AR – SEA, USDA, Riverside, 44: 5 p 892 – 898.

Vauclin M., 1982. Méthodes d'études de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. In : *Les colloques de l'INRA. Variabilité spatiale des processus de transfert dans le sol*. Ed INRA. Paris N° 15, pp 9-43.

Ward, R. C. & Robinson, M., 2000b. *Soil water. Principles of hydrology*. London [u.a.]: McGraw-Hill.

Williams B.G and Hoey D., 1982. An electromagnetic induction technique for reconnaissance surveys of soil-salinity hazards. *Austr. J. Soil Res.*, 20: 107-118.

Yogendra K. and Puttaiah E.T., 2008. Detrmination off toilets quality index and suitability gold year urban waterbody in Shimong Town, Karnataka. *The 12th World Lake Conference, Proceeding of Taal*, p. 342-346.