

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Hassiba Benbouali de Chlef
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département en Eau, Environnement et Développement Durable



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Agronomie

Spécialité : Eau et Environnement.

Par

NOUREDDINE ABDELKRIM

Thème :

**ELABORATION D'UNE METHODE D'ANALYSE DE LA DEGRADATION DES SOLS
IRRIGUES DANS LE BAS CHELIFF (ALGERIE).**

Soutenue le .../.../....., devant le jury composé de :

Abdelkader BOUTHIBA	Professeur	UHBC	Président
Tarik HARTANI	Professeur	C.U. Tipaza	Rapporteur
Mohamed RIABI	MCA	UHBC	Examineur
Mohamed Nacer CHABACA	Professeur	ENSA	Examineur
Saci NEDJAI	MCA	UHBC	Examineur

Dédicaces

C'est avec l'aide de dieu que j'ai pu arriver au terme de ce modeste travail, que je tiens à dédier le fruit de mes études :

A ma mère, décédée lors de ma troisième année de thèse, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. Sans elle, je n'aurais certainement pas fait d'études longues. Cette thèse représente donc l'aboutissement du soutien et des encouragements qu'elle m'a prodigués tout au long de ma scolarité. Qu'elle en soit remerciée par cette trop modeste dédicace.

A mon très cher et adorable papa que dieu le gardent, qui m'est bien encouragé pour atteindre mon but et je le remercie surtout pour leur amour et leur soutien moral,

A Mes chères sœurs

A Mes chers frères

A Toutes mes amies

A celles et ceux que je garde enfouie dans mon cœur et mes pensées.

ABDELKRIM.N

Remerciements

*Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de thèse, **Professeur HARTANI Tarik**, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.*

*Je voudrais également remercier le **Professeur DOUAOUI Abdelkader** pour ses remarques et ses conseils et ses orientations précieuses le long de mon travail.*

*Je tiens à remercier le **Professeur Saïdi Djamal** et le **Docteur TEBANI Mohamed**, pour l'encouragement.*

*Ainsi que les membres du jury : **Pr. Abdelkader BOUTHIBA**, **Pr. Chabaca Mohamed Nacer**, **Dr. Nedjai Saci** et **Dr. Riabi Mohamed** pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques, ainsi que le personnel et les enseignants de l'université Hassiba Benbouali de Chlef sans oublier les enseignants étrangers qui ont contribué à ma formation.*

*Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mes collègues **AKKACHA Abderrahmen**, **KOUADRI SAMEUT Moussa**, **SALHI Nassira ELGHADIRI Imene**, **FELLAGUE Meriem**, **BELMILOUD Nessrine**, **HAMEL Zineb** qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.*

A tous mes enseignants qui m'ont initié aux valeurs authentiques, en signe d'un profond respect.

ABDELKRIM.N

Table des matières

ملخص	i
Abstract	ii
Résumé	iii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux	v
Liste des abréviations.....	vi
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Aperçu bibliographique	
La dégradation des sols	5
I.1. Introduction.....	5
I.2. Définition	7
I.3. Les types de dégradation des sols	7
I.3.1. Dégradation physique.....	7
I.3.2. Dégradation chimique	8
I.3.3. Dégradation biologique.....	9
I.4. Conséquences liée à la dégradation des sols	10
I.4.1. Dégradation des sols et pauvreté.....	10
I.4.2. Dégradation des sols et biodiversité.....	11
I.5. Les enjeux de la conservation des sols.....	11
I.6. Qualité de l'eau d'irrigation et les risques de salinisation	11
I.7.Salinisation des sols irrigués	13
I.7.1. Définitions utiles.....	13
I.7.2. Les sols salés.....	13
I.7.3. Classification des sols salés	14
I.7.4. Processus et voies de salinisation des sols	14
I.7.5. L'irrigation et salinisation des sols	15
I.7.6. Impact de la salinisation sur les plantes et la structure d'un sol.....	17
Chapitre II: La simulation et la prédiction de la salinité des sols	
II-1 Modélisation de sol-eau-plante-atmosphère système.....	19
II.1.1 Limite des systèmes de classification de l'eau d'irrigation.....	19
II-1-2 Définition du modèle de simulation.....	19

II-2 Modélisation du transport de l'eau et de solutés dans le sol	20
II-3 Classification des modèles	21
II- 4 Le choix du modèle	22
Chapitre III : Matériel et Méthodes	
Présentation de la zone d'étude	24
III. 1 Localisation de la zone d'étude.....	24
III. 2 Climat	25
III. 2.1. Températures	25
III. 2.2. Précipitations	25
III. 2.3. Le quotient pluviothermétrique d'Emberger	26
III. 2.4. L'humidité	26
III. 3. Pédologie	27
III. 3.1. Les sols des bordures des plaines	27
III. 3.2. Les sols de la plaine proprement dite	27
III. 4. Ecologie et occupation du sol.....	28
III.5. l'irrigation dans la plaine du bas Chélif.....	29
III.5.1. Les ressource en eau d'irrigation des périmètres du Bas-Chélif.....	30
III.5.2. La qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation	31
III.6. Effet de l'irrigation sur la Salinité des sols du Bas-Chélif.....	32
Présentation de la partie expérimentale.....	35
Partie 1.....	35
III.7.1. Echantillonnage du sol et de l'eau.....	35
III.7.2. Analyses physicochimiques.....	36
III.7.3. Méthodologie.....	36
III.7.4. Indice de la dégradation biologique (IDB) :	37
III.7.5. Indice de la dégradation physique (IDP) :	38
Partie 2 :	40
III.8.1. Description du modèle.....	40
III.8.2. Echantillonnage du sol et de l'eau	46
III.8.3. Analyses de sol et de l'eau	46
III.8.4. Estimation de la teneur en eau à la capacité au champ et le point de flétrissement	47
III.8.5. Les données météorologiques, cultures et données de l'irrigation.....	48
III.8.6. Simulations et validation	50
III.8.7. Estimation des quantités d'irrigation optimales	50

Chapitre IV : Résultat et discussion

IV. Partie 1	52
IV.1.1. Qualité de l'eau d'irrigation	52
IV.1.2. Evaluation de la dégradation des sols	54
IV.1.2.a. Evaluation de la dégradation biologique (IDB).....	54
IV.1.2.b. Evaluation de la dégradation physique (IDP).....	56
IV.1.3. Impact de l'eau de l'irrigation sur les indices de dégradation des sols	58
Partie 2.....	61
IV.2.1. Les propriétés du sol	61
IV.2.2. La qualité d'eau	63
IV.2.3. Simulation du bilan de l'eau du sol dans les parcelles	64
IV.2.4. Salinité simulée et observée dans les parcelles	65
IV.2.5. Estimation des quantités d'irrigation optimales.....	67
IV.2.6. Évaluation de la qualité des eaux de drainage simulée pour l'irrigation.....	72
IV.2.5. a. Interrelation ionique.....	73
IV.2.5.b. Classification des eaux de drainage.....	73
Conclusion.....	76
Perspectives	78
Références Bibliographiques.....	79

الملخص

في هذه الدراسة ، تم تطبيق منهجية لتقييم التدهور البيولوجي والفيزيائي للتربة بالإضافة إلى تأثير مياه الري على تسريع تدهور الترب. تم اختيار أربعة مناطق مسقية وأخذت أكثر من 50 عينة تربة و 30 عينة ماء.

تم الحصول على خرائط التدهور البيولوجي والفيزيائي للتربة في سهل شلف السفلي. يمكن استخدام هذه الخرائط لإجراء تقييم فعال لتدهور الأراضي. تتأثر حوالي 68% من التربة المدروسة بالتدهور البيولوجي المتوسط إلى العالي ، وتتأثر 32% بالتدهور الفيزيائي المتوسط إلى العالي للغاية ، وتلعب جودة مياه الري دوراً مهماً للغاية في هذا التدهور.

لفهم هذا الدور والتعامل مع الملوحة ، أدخل المزارعون، من ناحية زراعة أراضي شوكي المقاوم للملوحة ، ومن ناحية أخرى زراعة البطيخ على الرغم من أنها أكثر حساسية للملح. كان الهدف من بحثنا هو دراسة جداول الري الأنسب لتوفير المياه والتحكم في الملوحة في هذين المحصولين المهمين في سهل شلف السفلي.

لذلك ، تم اختيار قطعتين ، إحداها مزرعة بالأراضي شوكي والأخرى مزرعة بالبطيخ. تم ري قطع الأراضي بالتنقيط بمياه ذات مستويات ملوحة مختلفة (1.8 و 5.5 ds/m) وتمت مراقبتها على التوالي بين سبتمبر 2010 ويونيو 2011 وبين أبريل ويوليو 2011. تم استخدام نموذج شهري أحادي البعد SALTIRSOIL_M للتنبؤ بالتوازن المائي والتكوين الأيوني غير العضوي لمحلول التربة.

أظهرت النتائج المنمجة والملحوظة للأس الهيدروجيني والتربة وتركيزات الأيونات الرئيسية والملوحة اتفاقاً معقولاً يشير إلى أنه يمكن استخدام النموذج بشكل موثوق في جدولة الري. في قطعة أرض الخاصة بالأراضي شوكي، كان معدل الري (290 ملم في العام) أقل من ذلك المستخدم بالفعل، كان ضرورياً لتجنب تبذير المياه مع الحفاظ على ملوحة التربة أقل من القيم الضارة. على العكس من ذلك، في قطعة أرض البطيخ، كان معدل الري (480 ملم في العام) كبيراً مقارنة بالمعدل المستخدم بالفعل و هذا لتجنب نقص المياه مع الحفاظ على ملوحة التربة أقل من القيم الضارة.

و للحصول على نتائج تساعدنا على فهم الوضعية بشكل أدق يمكن دمج هذا النموذج مع نظام المعلومات الجغرافية (GIS) في أعمالنا المستقبلية.

الكلمات المفتاحية: الري ، تدهور التربة ، منخفض الجلف ، ملوحة التربة ، SALTIRSOIL_M

Abstract

In this study, a methodology was applied to assess the biological and physical degradation of soils as well as to have the impact of irrigation water on the acceleration of soil degradation in the Lower Cheliff. Four perimeters of the Bas-Chélif plain were selected and more than 50 soil samples and 30 water samples were taken.

Biological and physical soil degradation maps of the Bas-Chélif plain were obtained. These maps can be used to make an effective assessment of soil degradation. About 68% of the soils studied are affected by medium to high biological degradation, 32% are affected by medium to very high physical degradation, the quality of irrigation water plays a very important role in this degradation. In order to understand this role and to cope with salinity, farmers have introduced salt-tolerant artichoke cultivation on the one hand and melon cultivation on the other hand, although they are more sensitive to salt. The purpose of our research was to study which are the most appropriate irrigation schedules for water saving and salinity control in these two important crops in the Lower Cheliff Plain. Therefore, two plots, one grown with artichokes and the other, grown with melons and representative of the horticulture of Bas Cheliff were selected. The plots were irrigated drop by drop with waters with different salinity levels (1.8 and 5.5 dS m^{-1}) and were monitored between September 2010 and June 2011 respectively and between April and July 2011. A modèle SALTIRSOIL_M one-dimensional transient state monthly was used to predict the water balance and inorganic ion composition of the soil solution.

Modeled and observed results for pH, soil, main ion concentrations and salinity showed a reasonable agreement suggesting that the model could be used reliably for irrigation scheduling. In the artichoke plot, an irrigation rate (290 mm year^{-1}) lower than the one actually used would have been necessary to avoid the water deficit while keeping the soil salinity below the harmful values. Conversely, in the melon plot, an irrigation rate (480 mm year^{-1}) in relation to that actually used would have been necessary to avoid the water deficit while keeping the salinity of the soil below the harmful values.

In order to obtain results that help us better understand the situation, this model can be integrated into the Geographic Information System (GIS) in our future work.

Key words: Irrigation, Soil degradation, Low-Cheliff, Soil salinity, SALTIRSOIL_M

Résumé

Dans cette étude, une méthodologie a été appliquée pour évaluer la dégradation biologique et physique des sols ainsi que pour avoir l'impact de l'eau d'irrigation sur l'accélération de la dégradation des sols dans le Bas Cheliff. Quatre périmètres de la plaine de Bas-Chélif ont été sélectionnés et plus de 50 échantillons de sol et 30 échantillons de l'eau ont été pris. Des cartes de dégradation biologique et physique des sols de la plaine du Bas-Chélif ont été obtenues. Ces cartes peuvent être utilisées pour procéder à une évaluation efficace de la dégradation des sols. Environ 68% des sols étudiés sont affectés par une dégradation biologique moyenne à élevée, 32% sont affectés par une dégradation physique moyenne à très élevée, la qualité de l'eau d'irrigation joue un rôle très important dans cette dégradation. Pour connaître ce rôle et pour faire face à la salinité, les agriculteurs ont d'une part introduit la culture de l'artichaut tolérant au sel et, d'autre part, la culture du melon, bien que plus sensible au sel. Le but de notre recherche était d'étudier quels sont les calendriers d'irrigation les plus adéquats pour l'économie d'eau et le contrôle de la salinité dans ces deux cultures importantes dans la plaine du Bas Cheliff. Par conséquent, deux parcelles, l'une cultivée avec des artichauts et l'autre, cultivée avec des melons représentative de l'horticulture du Bas Cheliff ont été sélectionnées. Les parcelles ont été irriguées goutte à goutte avec des eaux ayant des niveaux de salinité différents (1,8 et 5,5 dS m⁻¹) et ont été surveillées respectivement entre septembre 2010 et juin 2011 et entre avril et juillet 2011. Un modèle mensuel à état transitoire unidimensionnel SALTIRSOIL_M a été utilisé pour prédire le bilan hydrique et la composition des ions inorganiques de la solution du sol.

Les résultats modélisés et observés du pH, du sol, des concentrations d'ions principaux et de la salinité ont montré un accord raisonnable suggérant que le modèle pourrait être utilisé de manière fiable pour l'ordonnement de l'irrigation. Dans la parcelle d'artichaut, un taux d'irrigation (290 mm an⁻¹) inférieur à celui réellement utilisé aurait été nécessaire pour éviter le déficit hydrique tout en maintenant la salinité du sol en deçà des valeurs nuisibles. Inversement, dans la parcelle de melon, un taux d'irrigation (480 mm an⁻¹) par rapport à celui effectivement utilisé aurait été nécessaire pour éviter le déficit hydrique tout en maintenant la salinité du sol en dessous des valeurs nocives.

Afin d'obtenir des résultats qui nous aident à mieux comprendre la situation, ce modèle pourra être intégré au Système d'Information Géographique (SIG) dans nos futurs travaux.

Mots clef : irrigation, dégradation des sols, Bas-Cheliff, Salinité du sol, SALTIRSOIL_M

Liste des figures

Figure 1: Les classes de dégradation des sols dans le monde.	6
Figure 2: type de dégradation de sol Source : Reich et autres, 2001.....	10
Figure 3: Évolution du SAR et la CE pendant une expérience d'évaporation à la casserole des trois eaux d'irrigation du Mexique, Tunisie et le Niger.....	12
Figure 4: Processus des différents voies de la salinisation et leurs impact sur la dégradation des sols et sur les cultures Tabet (1999).....	15
Figure 5: le risque de l'irrigation par les eaux salées.....	16
Figure 6: Localisation géographique de la zone d'étude.....	24
Figure 7: Diagramme ombrothermique de Gaussen de la station de Relizane de la période (1985/2014).....	26
Figure 8: Les périmètres irrigués de la plaine du Bas-Chélif.....	30
Figure 9: Les cartes EC interpolées du sol à partir (a) des données observées du terrain et (b) des données prédites (Yahiaoui et al ; 2021).....	33
Figure 10: Distribution spatiale d'échantillonnage des sols.....	35
Figure 11: Plan d'échantillonnage de l'eau.....	36
Figure 12: Organigramme de modèle SALTIRSOIL_M.....	41
Figure 13: Lancement du modèle SALTIRSOIL.....	42
Figure 14: Méthode d'application pour calculer les coefficients mensuels de culture basale pour les récoltes.....	43
Figure 15: Méthode d'application pour calculer l'évapotranspiration de référence.....	44
Figure 16: Configuration de la parcelle.....	45
Figure 17: Carte d'échantillonnage de l'eau et du sol.....	46
Figure 18: Diagramme de Piper établi pour les anions et les cations des eaux souterraines.....	52
Figure 19: La projection des points sur Le diagramme de Riverside.....	53
Figure 20: Résultat d'analyse de la sensibilité de l'indice de dégradation biologique par la teneur en matière organique.....	54
Figure 21: Carte de dégradation biologique des sols étudiés de la plaine du Bas-Chélif.....	55
Figure 22: Résultat d'analyse de la sensibilité de l'indice de dégradation physique par les paramètres physique (la teneur en eau à la capacité au champ, la stabilité structurale et la teneur en argile).....	56
Figure 23: Carte de dégradation physique des sols étudiés de la plaine du Bas-Chélif.....	58
Figure 24: Séquences mensuelles du bilan hydrique du sol durant les campagnes 2010-2011 simulées par SALTIRSOIL_M dans la parcelle d'artichaut (à gauche) et la parcelle de melon (à droite) (P: pluie, I: irrigation, ETc: évapotranspiration des cultures, Eta évapotranspiration des cultures, Eta: évapotranspiration réelle, D: drainage).....	64
Figure 25: Diagrammes de dispersion des concentrations simulées ou observées d'ions principaux, pH et C _{EE} dans les parcelles d'artichaut (en haut) et de melon (en bas) en juin 2011. Tous les paramètres sont pour l'extrait de saturation sauf le pH et la CE, pour la pâte saturée, tous les ions mmol L ⁻¹ , alcalinité (Alk) en mmol _C L ⁻¹ et CE ₂₅ en dS m ⁻¹	66
Figure 26: la CE moyenne du sol dans la parcelle de melon pendant la saison de culture par rapport au taux d'irrigation simulé par SALTIRSOIL_M (à gauche), et par rapport au taux d'irrigation inverse.	71
Figure 27 : le diagramme de Piper.....	72

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification des sols salés d'après USSS Staff (United States Salinity Laboratory Staff), (1954)	14
Tableau 2: Estimation globale de la salinité des sols irrigués dans le monde (Marlet et job, 2006).	17
Tableau 3: Moyennes mensuelles des précipitations et des températures de la station de Hmadna (1985-2014). (Kouadri Sameut, 2019)	25
Tableau 4: Synthèse des sols de la plaine du Bas-Chélif d'après la carte pédologique de Mc Donald et BNEDER, (1990).	28
Tableau 5 : Occupation des sols de la Plaine du Bas-Chélif (DSA 2020).....	29
Tableau 6: Surface calculée des classes de salinité et leur pourcentage d'étendue spatiale à partir de cartes de (a) la CE du sol mesurée et (b) la CE du sol prévue. (Yahiaoui et al ; 2021).....	34
Tableau 7: Classification de la dégradation biologique (Jose ´-Miguel de Paz, 2006)	38
Tableau 8: Classification de la dégradation physique (Jose ´-Miguel de Paz, 2006)	39
Tableau 9: Données météorologiques, gestion de l'irrigation et les données sur le développement des cultures utilisées dans les simulations*	49
Tableau 10: Classification des sols touchés par la dégradation Biologique dans la plaine du Bas Chélif.....	55
Tableau 11: Matrice de corrélation linéaire entre les paramètres physique du sol et l'indice de dégradation physique.....	56
Tableau 12: Classification des sols touchés par la dégradation physique dans la plaine du Bas Chélif.....	57
Tableau 13 : Matrice de corrélation.....	59
Tableau 14 : valeurs propre.....	60
Tableau 15 : Corrélations des variables actives avec les facteurs.....	60
Tableau 16: Propriétés du sol dans les deux parcelles expérimentales *.....	62
Tableau 17: Qualité de l'eau dans les deux parcelles expérimentales *.....	63
Tableau 18: Simulation de différents calendriers d'irrigation et leurs effets sur la salinité des sols du Bas Cheliff.....	68
Tableau 19 : la qualité de l'eau de drainage simulée.....	72
Tableau 20 : Matrice de corrélation de la qualité des eaux de drainage simulée pour l'irrigation.....	72

Liste des abréviations

CE, conductivité électrique à 25C dans l'extrait de saturation;
 SAR, taux d'adsorption de sodium dans l'extrait de saturation.
 CCE = équivalent carbonate de calcium ;
 CO₂ = pression partielle à l'équilibre avec la pâte saturée ;
 D = drainage;
 EC25 = conductivité électrique à 25 °C ;
 ECe = EC25 de l'extrait de saturation du sol ;
 ET0 = évapotranspiration de référence de Penman-Monteith;
 Eta = évapotranspiration réelle ;
 ETc = évapotranspiration des cultures ;
 Fc = couverture végétale maximale de la canopée;
 Fc,m = couvert végétal de la canopée au mois m ;
 f_w = fraction de la surface du sol mouillée par l'irrigation;
 I = taux d'irrigation ; Si = nombre de jours d'irrigation ;
 IA = indice d'accord ;
 Kcbmax = coefficient maximal de culture de base;
 Kcb,m = coefficient de culture de base au mois m;
 LF = fraction de lessivage;
 MO = teneur en matière organique du sol ;
 pCO₂sp = apparent
 pIAPCaCO₃ = cologarithme décimal du produit d'activité ionique du carbonate de calcium ;
 pIAPCaSO₄·2H₂O = cologarithme décimal du produit d'activité ionique du gypse ;
 pH= potentiel d'Hydrogène
 R = taux de précipitation;
 Rf = nombre de jours de pluie ;
 RMSE = erreur quadratique moyenne;
 SAR = taux d'adsorption de sodium;
 SP = pourcentage de saturation (teneur en eau gravimétrique à saturation) ;
 θ = teneur en eau volumétrique du sol;
 θ_{fc} = teneur en eau volumétrique du sol à la capacité au champ;
 θ_{pwp} = teneur en eau volumétrique du sol au point de flétrissement permanent;
 ρ_b = densité apparente du sol
 .

Introduction générale

Introduction générale

Les sols irrigués sont soumis à des risques de dégradation en rapport soit avec la modification du régime hydrique soit avec la qualité de l'eau d'irrigation (Samba, 1998 ; Marlet et Job, 2006). La plupart des sols irrigués sont soumis ou menacés, à court terme, par le problème de la dégradation à cause du phénomène de salinisation des sols qui est définie comme l'accumulation des sels solubles dans le profil (Cheverry et Bourrié, 1995).

La salinisation secondaire des sols est le résultat de mauvaise irrigation et la gestion du drainage des terres agricoles irriguées principalement sous les climats subhumides arides, semi-arides et sèches (Zhou *et al.*, 2013). La salinisation secondaire des sols avec l'épuisement de l'eau douce, la pollution, l'engorgement des sols et le lessivage des nutriments sont les principales menaces qui pèsent sur la durabilité de l'agriculture irriguée dans le Monde (Burkhalter et Gates, 2005; Houk *et al.*, 2006; Jia *et al.*, 2011; Kiggundu *et al.*, 2012). Globalement 76 Mha de terres agricoles sont déjà touchées par la salinisation, et ce chiffre va augmenter dans les prochaines années en raison de l'aridification du climat prévu dans plusieurs domaines d'irrigation importants dans le Monde (Ghassemi *et al.*, 1995): le bassin méditerranéen, le sud-ouest États-Unis, le nord du Mexique, sud de l'Australie, le sud-africain et certaines parties de l'Amérique du Sud (Seidel *et al.*, 2008).

Salinisation secondaire est un processus de dégradation des sols qui diminue la fertilité des sols résultant de la productivité agricole réduite, et la perte de la diversité des cultures. Les sols dans le bassin méditerranéen sont particulièrement sujets à la dégradation, et vulnérables à la salinisation (Lahmar et Ruellan, 2007). En Italie, la salinisation des sols est un processus de dégradation des terres important, en particulier en Toscane, la Sardaigne et les plaines côtières (Corribia Val di Val di Cecina, Pianura Versiliese) (Ministero dell'Ambiente, 1997). En Espagne, les sols salins couvrent une superficie comprise entre 0,6 et 2,4 Mha (Crescimanno, 2003). En Egypte, environ 1,26 Mha sont affectés par le sel, ainsi que environ 50% des sols irrigués (Hachicha et Abdelgawed, 2003). Au Maroc, la superficie des sols salins est actuellement estimé pour atteindre 0,35 Mha à, dont la plupart se trouve dans le Tafilalet, Ouarzazate, Bahira, Tessaout aval Moulouya Tadla, Doukkala et Gharb (Badraoui *et al.*, 1998). En Tunisie les sols affectés par le sel sont d'environ 1,5 Mha, 10% de la superficie totale (Hachicha et Abdelgawed, 2003). En Algérie, le secteur agricole est

d'environ 8,5 Mha avec 2,7 Mha sous irrigation (RGA, 2017). La zone touchée par les sels en Algérie a été estimée à 20% de la superficie totale dans ce pays (Douaoui *et al.*, 2006).

La plaine du Bas-Chélif se trouve dans cette partie du pays. Il couvre une superficie d'environ 60,000 ha où l'agriculture est la principale activité économique. Le climat dans la plaine du Bas- Chélif est caractérisée par des précipitations rares ($R < 400 \text{ mm an}^{-1}$) et une forte évaporation ($ET_0 > 1400 \text{ mm an}^{-1}$), ce qui accroît la salinisation des sols, très intense dans divers endroits au sein de la plaine, et affectant 80% de la surface totale (Douaoui *et al.*, 2006).

L'agriculture dans la plaine du Bas-Chélif se compose de cultures permanentes, y compris les agrumes, d'oliviers et divers arbres fruitiers (pommiers, abricotiers, et la grenade). L'horticulture est également importante, plus particulièrement l'artichaut en hiver et le melon en été. L'artichaut est une plante originaire de la Méditerranée, qui a un intérêt commercial dans la région du Bas-Chélif. Cette plante est bien adaptée aux sols de la région, car il est modérément tolérant à la salinité du sol avec $4,9 \text{ dS m}^{-1}$ de seuil conductivité électrique dans l'extrait de saturation (EC_e) (Shannon et Grieve, 1999), et parce qu'il se développe bien dans les très fines textures des sols de la région. L'extension de terres consacrées à l'artichaut dans la plaine du Bas-Chélif est de 3200 ha (DSA, 2014). Le melon cantaloup, est reconnu dans le monde entier. Est une plante annuelle, originaire d'Asie du sud. Une importante variété cultivée dans la région est le melon jaune et vert "Valencia". Les besoins en eau de cette culture sont estimés à 472 mm dans la région du Bas-Chélif (Hassani, 2007) avec un seuil EC_e de $2,2 \text{ dS m}^{-1}$ (Turini, 2011).

Depuis le début du 20ème siècle la température augmenté entre 1 et 2 ° C en Afrique du Nord, tout en ce qui concerne les précipitations, une tendance à la baisse, bien que non significative, existe aussi (Nianget *al.*, 2014). La hausse des températures et la diminution des précipitations ont un impact sur l'agriculture grâce à l'augmentation des besoins en eau des cultures (Doll, 2002). En utilisant $2,722 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$ de l'eau douce à l'échelle mondiale, l'agriculture atteint 71% du total des prélèvements d'eau (FAO, 2015). En Algérie le retrait de l'eau agricole atteint $3,502 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$, qu'est de 61% du total dans ce pays (FAO, 2015). Une augmentation de la demande en eau agricole mondiale atteignant $3.000 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$ en 2050 (FAO, 2011) va avoir de graves conséquences à la fois sur l'environnement et l'agriculture dans ce siècle. Pour minimiser les dommages à l'environnement tout en maximisant les rendements agricoles, plusieurs stratégies d'adaptation doivent être conçus et mis en œuvre dans le but d'augmenter l'économie d'eau (EUE) dans les systèmes agricoles. EUE à l'échelle

de la parcelle peut être augmentée en limitant le ruissellement et en limitant aussi la percolation de l'eau nécessaire dans le sol profond loin des racines des plantes, en augmentant l'efficacité de l'application de l'eau (*Hsiao et al.*, 2007). Cependant, dans les terres menacées par les sels une partie de l'eau d'irrigation doit percoler dans le sol profond loin des racines des plantes, afin d'assurer une certaine élimination de sel sur le système sol-eau-plante.

L'enjeu du développement agricole de cette plaine est de préserver les terres non salées et la qualification de milliers d'hectares déjà touchés par ce problème. Selon la classification (USSS Staff ; 1954), environ 60 % des sols de la plaine du Bas-Chéiff sont classés parmi les sols salés à très salés, 20 à 25 % font partie des sols moyennement salés ; seuls 15 à 20 % des sols sont considérés comme non salés (*Walter et al.*, 2001 ; Douaoui et Walter, 2002). Donc un système de qualification des de dégradation des sols irrigués et la gestion des irrigations sont nécessaire pour identifier l'étendue des zones dégradés et menacés et planifier de manière appropriée l'irrigation de façon à éviter la salinisation des sols, tout en préservant les ressources en eau.

Cette étude est divisée en deux grandes parties ;

1) Mise en place d'une méthodologie permettant de qualifier la dégradation Biologique et Physique des sols. Test de cette méthodologie sur des parcelles irriguées dans le Bas Cheliff.

2) Une étude sur la gestion de l'eau pour deux parcelle l'une de l'artichaut et l'autre du melon, La question de savoir combien l'irrigation est nécessaire pour permettre le lessivage du sel sans gaspiller l'eau peut être répondu par l'utilisation de modèles de salinité du sol capables de simuler à la fois l'eau et l'équilibre de sel dans le système sol-eau-plante. Il existe plusieurs modèles de salinité utiles pour planifier de manière appropriée l'irrigation de façon à éviter la salinisation des sols, tout en préservant les ressources en eau. Le modèle unidimensionnel SALTIRSOIL_M-état transitoire mensuelle est un exemple (*Visconti et al.*, 2013). Il a été développé pour maximiser le rapport applicabilité à des données exigences, et donc son public cible est formée par des ingénieurs, des spécialistes de la vulgarisation, responsables de l'irrigation et des urbanistes. Quel que soit le cas, les modèles doivent être testés avant d'être utilisés pour élaborer des recommandations d'irrigation. Les objectifs de cette étude étaient de développer une analyse originale avec le modèle de SALTIRSOIL_M afin d'élaborer des pratiques d'irrigation les plus adéquates pour la gestion de la salinité tout en économisant de l'eau dans l'horticulture de la plaine du Bas-Chéiff au nord-ouest de l'Algérie. Auparavant, la capacité du modèle de SALTIRSOIL_M pour simuler la salinité de

deux parcelles irriguées par goutte à goutte et plantés d'artichaut et de melon sol a été testé comparer simulé contre les valeurs de la salinité des sols observée.

Le choix de travailler sur ce sujet est justifié par l'importance de l'activité agricole pour l'ensemble du pays en général, et pour la plaine du Bas-Chéiff en particulier, et cela aux niveaux: social, économique, commercial, alimentaire, et environnemental.

Chapitre I

Aperçu bibliographique

La dégradation des sols

I.1. Introduction

L'Agriculture et la production forestière ainsi que les écosystèmes naturels sont menacés par les processus de dégradation des sols qui avancent. En raison de cette dégradation des sols, les systèmes de cultures nécessitent un plus grand apport d'engrais pour maintenir des rendements rentables. Dans les pays en développement, le problème de la dégradation des sols est encore pire parce que du financement économique insuffisante pour les agriculteurs, ainsi que l'augmentation des taux de croissance de la population. Les principaux processus de dégradation des sols dans le monde sont: l'érosion de l'eau, la compaction, la salinisation et la réduction de la fertilité. La baisse des rendements des cultures, changement climatique, la perte de la biodiversité et la rareté des ressources en eau de bonne qualité peuvent être affectés par la dégradation des sols. Ces processus incluent des actions biologiques qui influent sur la capacité du sol de la réglementation et de la productivité de sol physique et chimique (*Lal et al.*, 1989). Problèmes de dégradation augmentent dans le monde entier, donc un système d'évaluation est nécessaire pour améliorer les connaissances et d'identifier l'étendue des zones déjà dégradées et menacées. Depuis la reprise des sols dégradés est généralement très coûteux, si possible, les politiques de prévention ont été mis en œuvre dans de nombreux pays. Beaucoup de ces politiques comptent habituellement sur les approches empiriques et / ou généraux pour évaluer la dégradation des terres qui ont été développés pour des conditions différentes de celles auxquelles ils sont appliqués. Par conséquent, les pratiques de gestion de conservation inadéquates sont souvent recommandés pour des problèmes spécifiques et / ou locales.

(Pla, 1992; Lal, 1994). Bien que les caractéristiques du sol et du climat jouent un rôle important, la dégradation des sols est principalement causée par l'utilisation et la gestion des ressources en sols et en eau inapproprié. Par conséquent, l'état de dégradation doit être évalué avant de recommander les activités humaines qui peuvent affecter la productivité des sols. Plusieurs tentatives ont été faites pour évaluer la dégradation des sols à l'échelle mondiale (Roberto et al, 2006). **(Figure 1)**

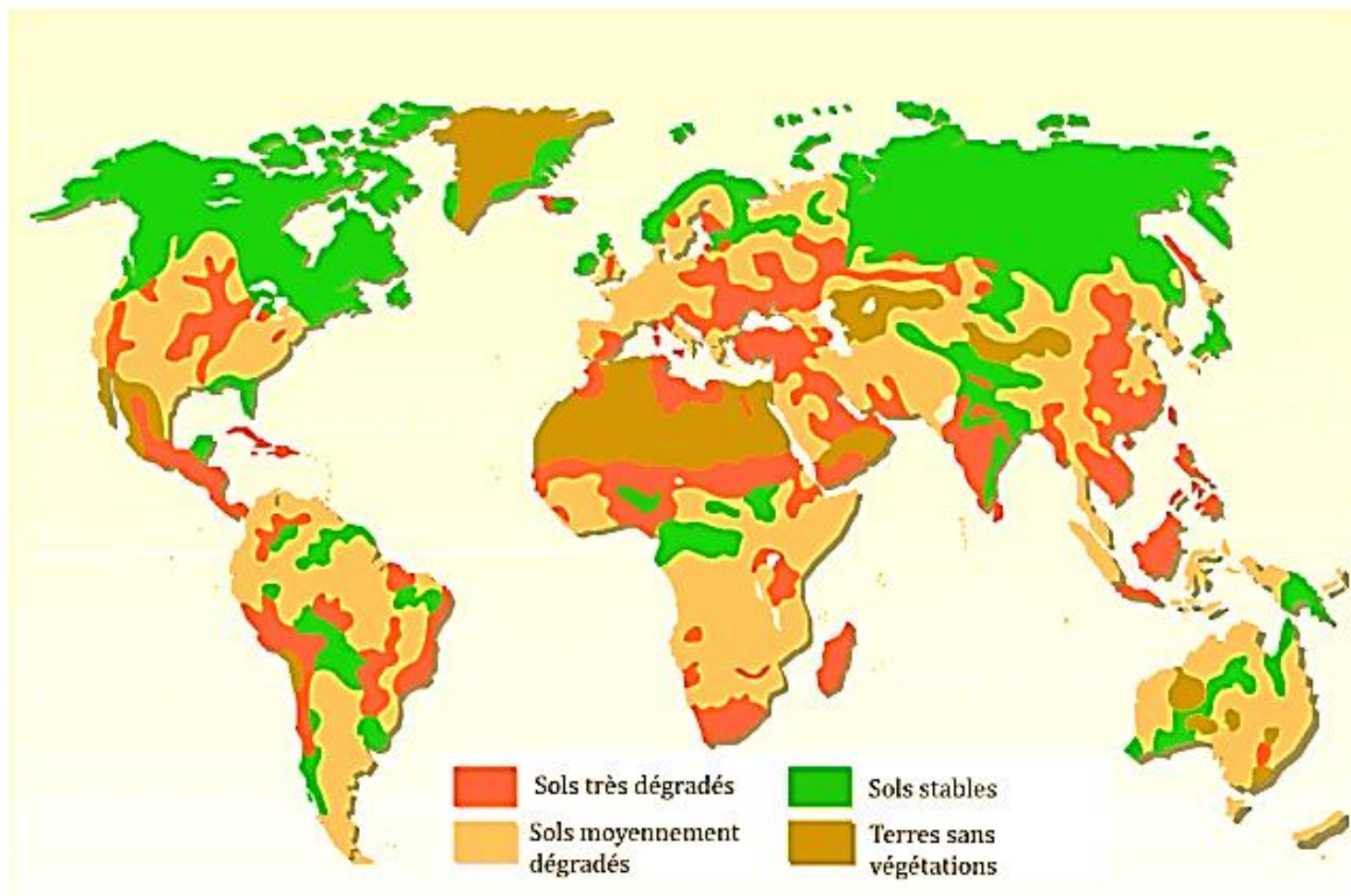


Figure 1: Les classes de dégradation des sols dans le monde.

I.2. Définition

- 1- La Convention des Nations Unies pour la lutte contre la Désertification dans les Pays gravement touchés par la Sécheresse et/ou la Désertification (CNULCD) définit la dégradation des terres comme étant : « la diminution ou la disparition, dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches, de la productivité biologique ou économique et de la complexité des terres cultivées non irriguées, des terres cultivées irriguées, des parcours, des pâturages, des forêts ou des surfaces boisées du fait de l'utilisation des terres ou d'un ou de plusieurs phénomènes, notamment de phénomènes dus à l'activité de l'homme et à ses modes de peuplement, tels que l'érosion des sols causée par le vent et/ou l'eau ».
- 2- La dégradation des sols est la perte réelle ou potentielle de productivité ou d'utilité consécutive à des facteurs naturels ou anthropiques. Il s'agit essentiellement d'une diminution de la qualité du sol ou d'une réduction de sa productivité et de sa capacité de régulation environnementale (Lal, 1997 in Gueye I., 2013).
- 3- La dégradation des terres « est un processus qui réduit ou qui détruit la capacité des terres pour la production agricole, végétale et animale, et pour la production forestière. Elle résulte des activités humaines ou elle est un phénomène naturel aggravé par l'effet des activités humaines » (Brabant P., 2008 in Gueye I., 2013).

I.3. Les types de dégradation des sols

La dégradation peut être de trois formes : physique, chimique et biologique (**Figure 2**).

I.3.1. Dégradation physique

Elle contribue à l'affaiblissement de la structure du sol induisant l'encroûtement, la compaction, et l'érosion.

L'encroûtement est le résultat de la réorganisation des particules de la surface du sol, sous l'effet du vent ou de la pluie. Il peut survenir par exemple lorsque le lit de semence (stade final de préparation du terrain avant le semis) se mouille et sèche rapidement. Une couche de terre solide et compacte se forme alors à la surface du sol (dans les 5 premiers cm), empêchant la culture de bien lever

La compaction désigne la réorganisation des particules de sol sous l'effet d'une pression externe (piétinement des animaux en conditions humides ou du passage de lourdes machines) et une réduction de l'espace poral.

L'érosion est l'ablation et le transport latéral de particules solides du sol par le vent et l'eau sur la surface du sol (Gueye I., 2013)

I.3.2. Dégradation chimique

La dégradation chimique des sols comprend les phénomènes de salinisation et d'alcalinisation.

I.3.2.a. La dégradation des sols par salinisation

La salinisation est l'augmentation de la quantité de sels solubles dans la zone racinaire et qui entraîne par conséquent une baisse des rendements.

Les sources de sel sont variables :

*Le matériau géologique, par le biais de l'altération, peut libérer les éléments nécessaires à la formation des sels solubles (altération de minéraux primaires riches en sodium, de roches volcaniques, des produits de l'hydrothermalisme riches en soufre et en chlore, ou encore dissolution des évaporites, qui sont des accumulations salines anciennes).

*L'eau de mer est, bien entendu, une source principale de sel en milieu côtier. La salinisation peut alors être un phénomène permanent lié aux marées (salinisation marine), ou encore due à la présence de lentilles d'eau sur salées lorsque les zones basses sont isolées de la mer par un colmatage alluvial

*Une nappe phréatique, d'origine continentale et salée par héritage géologique, peut contaminer le sol par ascension capillaire.

*L'eau d'irrigation, on parle alors de salinisation anthropique. Elle peut être très rapide et se manifester à l'échelle de l'année, de la dizaine d'année (cas de la plaine du Bas Chélif, Algérie). Ce type de salinisation est la conséquence de pratiques agricoles ou d'aménagements inadaptés. Le risque de salinisation dépend de la charge en sel de l'eau d'irrigation, mais, même si les eaux d'irrigation sont de bonne qualité, très peu chargées en sel, il faut garder en mémoire que ces sels peuvent malgré tout s'accumuler au sein de la zone racinaire à chaque irrigation sous l'influence de l'évaporation.

Il n'existe pas de profil morphologique type de sols salés, car le sel vient en général se surimposer à un profil de sol déjà existant.

Les problèmes rencontrés sont :

*D'ordre osmotique : l'augmentation de la pression osmotique dans la solution du sol empêche la pénétration de l'eau dans la plante, provoque une plasmolyse des cellules, parfois irréversible et qui peut aboutir à la mort du végétal.

*D'ordre de toxicité (chlorure, sodium, bore, etc. s'accumulent dans les feuilles et peuvent provoquer des dommages métaboliques).

*D'ordre microbiologique : la salinisation diminue l'activité microbienne du sol, la nitrification et la production de CO₂. Les produits organiques formés changent. On observe une augmentation des composés organiques solubles et une diminution des composés humiques polycondensés.

I.3.2.b. La dégradation des sols par alcalinisation

Si on apparente généralement les sols alcalins caractérisés par un pH élevé, souvent au-dessus de 9, et une forte proportion de sodium sur le complexe d'échange supérieure à 15 % aux sols salés, c'est parce qu'ils résultent eux aussi d'une dégradation suite à une concentration de la solution du sol. Mais deux points les distinguent des sols salés. Ce sont :

*La composition chimique de la solution du sol à nette prédominance bicarbonaté sodique ;

*Une dégradation des propriétés physiques des sols qui peut survenir très tôt dans le processus de concentration, bien avant l'apparition de problèmes osmotiques ou de toxicité. Aussi, dans les environnements cultivés, la chute des rendements survient-t-elle bien avant la présence d'efflorescences salines à la surface des sols.

Le profil chimique particulier de ces sols peut être de cause naturelle (altération de roches cristallines dans un contexte aride, par exemple) ou bien anthropique (causé par une irrigation mal gérée avec une eau elle-même déséquilibrée vers le pôle carbonaté).

I.3.3. Dégradation biologique

Dans le sol, l'activité biologique contrôle des processus importants qui déterminent sa fertilité : par exemple le taux ou vitesse de décomposition, de minéralisation, de dénitrification ou de lixiviation. En fait, il y a une très étroite relation entre l'activité microbienne et la teneur en eau du sol.

Ainsi, il existe un seuil critique de la teneur en eau en dessous duquel les processus biologiques tels que les taux de diffusion de l'oxygène et des éléments nutritifs sont inhibés (*Scholes et al.*, 1994 in Woomer et Swift 1994).

Malgré l'importance des sols, ils sont trop souvent négligés par les gouvernements et par les médias. On constate que les questions liées à sa dégradation ne sont pas, actuellement, une priorité dans les pays développés. Il y est oblitéré par un apport massif d'intrants dû à un type d'agriculture fondé sur des aides et la domination des grandes centrales d'achat des hypermarchés et ainsi qu'à de nombreux polluants, et cela malgré des conséquences

environnementales néfastes. Il ne l'est pas non plus dans de nombreux pays en développement qui ont de tels problèmes sociaux et économiques à résoudre que la dégradation des sols et des ressources naturelles en général passe au second plan. Soit le quart de la population mondiale, dépendent directement des sols qui se dégradent.

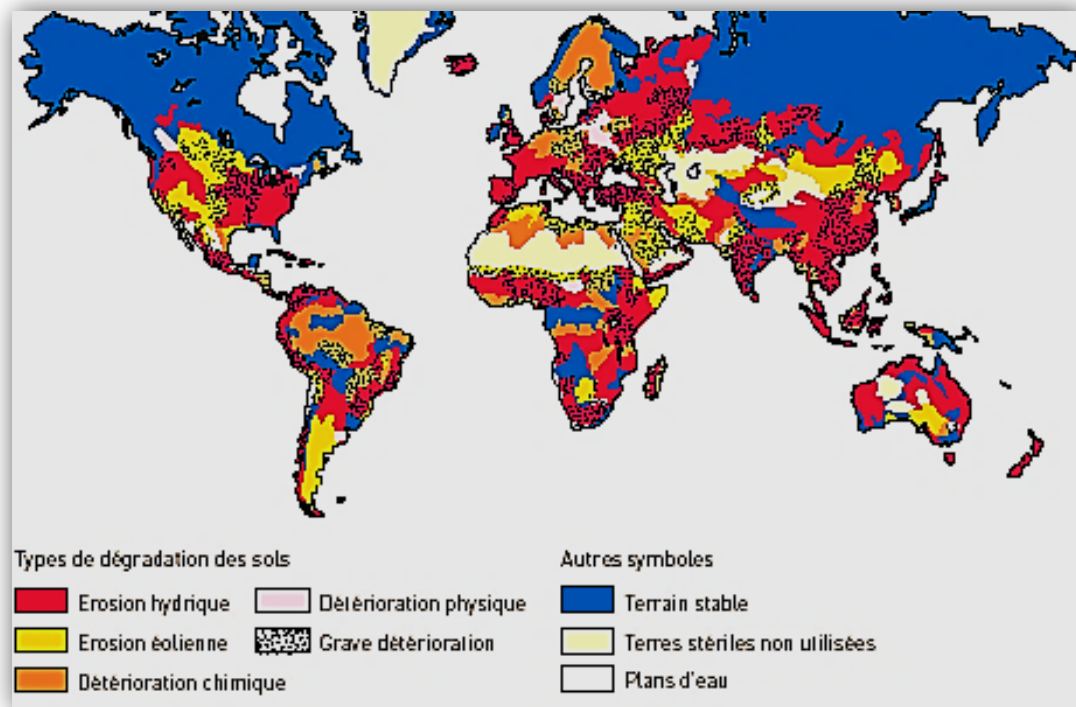


Figure 2: type de dégradation de sol Source : Reich et autres, 2001

I.4. Conséquences liée à la dégradation des sols

I.4.1. Dégradation des sols et pauvreté

C'est un véritable cercle vicieux qui lie dégradation des sols et pauvreté : les plus pauvres n'ayant que le sol pour subvenir à leurs besoins (de chauffage, d'alimentation), l'exploitent, souvent le surexploitent. Il en résulte une perte de fertilité des sols, une érosion de ceux – ci et, de manière ultime, les sols deviennent stériles. Les sols ruraux deviennent inhospitaliers : l'espoir de trouver en ville des conditions d'existence meilleures que dans les zones rurales est à l'origine de mouvements migratoires vers les zones urbaines où la paupérisation et la précarisation s'amplifient, où les flux de nuisances (eaux usées, déchets, aménagements informels) sont de plus en plus chargés. Ce cercle infernal devra être brisé, aussi bien pour des raisons environnementales que pour des raisons humanitaires (RSMJ, 2002).

I.4.2. Dégradation des sols et biodiversité

La dégradation des sols est la cause principale de la perte de diversité biologique : elle s'accompagne en effet d'une perte de la capacité des sols à être l'habitat d'une diversité d'espèces, aussi bien dans les terres cultivées que dans les zones forestières. La désertification menace ainsi la faune sauvage et de nombreuses espèces végétales, composantes essentielles de la pharmacopée (RSMJ, 2002).

I.5. Les enjeux de la conservation des sols

Du fait que la dégradation des sols affecte leur capacité à remplir leurs fonctions écologiques et les usages socio-économiques qui en dépendent, leur conservation est un enjeu politique et social. Les mesures susceptibles d'être prises pour répondre à cet enjeu sont très diverses. Outre les interventions techniques, elles peuvent, notamment, inclure des changements législatifs ou réglementaires (y compris des modifications des droits de propriété et d'usage), et des actions économiques portant sur les impôts, les taxes, les subventions les crédits, etc. Selon la nature des mesures prises, les effets redistributifs sur les divers groupes sociaux seront différents, de même que les impacts sur les enjeux agricoles, territoriaux et environnementaux (RSMJ, 2002)

I.6. Qualité de l'eau d'irrigation et les risques de salinisation

La conductivité électrique (CE) et le SAR ($SAR = [Na] / [\sqrt{((Ca + Mg)/2)}]$) d'une eau d'irrigation sont les paramètres les plus évoqués pour évaluer sa qualité. Cela pose des problèmes pour la prédiction des risques effectifs en particulier pour le SAR car ce dernier change avec le facteur de concentration (Samba, 1998). Selon *Barbiéro et al*, (2004), le concept de SAR présente deux problèmes principaux :

1. L'évaluation du risque de sodicité par le SAR a été établie empiriquement par des données rassemblées principalement en Amérique du Nord (Richards, 1954) qui évoluent en voie saline sous l'influence de l'évaporation (Cheverry, 1974). En général, les eaux utilisées présentent une alcalinité résiduelle de calcite négative ($RA_{calcite} < 0$), et le risque de sodicité est pratiquement zéro dans ce scénario. D'autre

part, le risque de sodicité est présent dans les endroits où les eaux d'irrigation ont une alcalinité résiduelle de calcite positive (RA calcite > 0) tels que ceux du Niger (Cheverry, 1974). Par conséquent, dans le dernier cas, l'utilisation du concept du SAR mène à une sous-estimation du risque de sodicité, comme il a été observé pour l'eau d'irrigation utilisée dans la vallée du Niger au Mali (Valles *et al*, 1989) ou au Niger (Barbiéro *et al*, 1995).

2. L'évaluation du risque de sodicité du SAR est une vue statique du problème et ne tiens pas compte des changements de la chimie de l'eau due à la concentration après évaporation. Ceci est illustré dans figure (3), où l'évolution du SAR et la conductivité électrique (CE) de trois types d'eau pendant une expérience d'évaporation à la casserole sont tracées. Les données ont été prises par Valles (1987) en Tunisie, Gonzalez Barrios (1992) au Mexique, et Barbiéro (1995) au Niger. Les trois eaux d'irrigation présentent le même risque de sodisation au sol mais évoluent par trois manières différentes. Par conséquent, l'expérience soulève la limitation du concept de SAR.

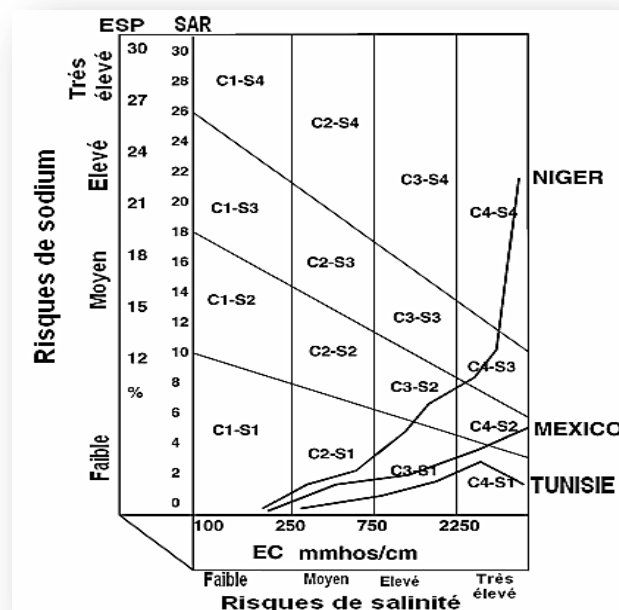


Figure 3: Évolution du SAR et la CE pendant une expérience d'évaporation à la casserole des trois eaux d'irrigation du Mexique, Tunisie et le Niger

I.7. Salinisation des sols irrigués

I.7.1. Définitions utiles

Le terme *salinisation* désigne le processus regroupant trois grands types de phénomènes (Tabet, 1999 ; Condom, 2000) : *la salinisation neutre*, *la salinisation alcaline* ou *alcalinisation* et *la sodisation*. Ces trois mécanismes peuvent apparaître lorsque la solution du sol se concentre. Le faciès chimique de cette dernière détermine la voie empruntée : voie saline neutre ou voie alcaline. La sodisation est une résultante de cette dernière et traduit l'accumulation de l'ion sodium sur le complexe d'échange des argiles. Les états résultants de ces processus de salinisation neutre, d'alcalinisation et de sodisation sont qualifiés de salés, d'alcalins et de sodiques. Les sols sodiques, lorsqu'ils sont au contact avec une eau peu concentrée peuvent subir une destruction de leurs propriétés physiques (Sumner, 1993 ; Tabet, 1999 ; Douaoui *et al*, 2004).

La salinisation si elle affecte les milieux naturels sans qu'il y ait l'intervention de l'homme et dite *salinisation primaire*. Elle peut être la résultante des pratiques agricoles et des irrigations : on parle de *salinisation secondaire*. En général, 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 sont supérieures à celles qui sont exportées. Elles peuvent aussi accentuer les remontées de sels des horizons profonds en provoquant la remontée de la nappe (Barbéiro et Vallès, 1992 ; Condom, 2000 ; Douaoui, 2005).

I.7.2. Les sols salés

Sont ceux dont l'évolution est dominée par la présence de forte quantités de sels solubles – plus solubles que le gypse- ou par la richesse de leur complexe absorbant en ions provenant de ces sels et susceptibles de dégrader leurs caractéristiques et propriétés physiques, en particulier leur structure, qu'ils rendent diffuse. Ces deux caractères de ces sols modifient également et diminuent le développement de leur végétation et des cultures que l'on peut y faire. Certains des sols « salés » n'ont que l'un de ces caractères, d'autres présentent les deux à la fois.

On parlera en général de sol salé lorsque la concentration en sels des solutions dépasse 0.5 g/l cette concentration est le plus souvent mesurée par la conductivité électrique (CE) de la solution du sol saturée exprimée en mmhos/cm ou actuellement en dS/m (Robert, 1996). Selon Calvet (2003) un sol est dit salé quand la conductivité électrique, est supérieure à 4 dS m⁻¹. Cependant la salinité d'un sol s'apprécie plus par le comportement des plantes de sorte que cette limite peut être très différente selon la sensibilité des espèces végétales.

I.7.3. Classification des sols salés

D'après Richards, (1954), et selon USSL Staff, Un sol devient salin si sa conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée est supérieure à 4 dS/m; cette valeur critique constitue le seuil de sensibilité de la majorité des plantes à la salinité des sols. Toutefois, la définition de l'USSEL Staff n'est pas la seule couramment admise et la valeur seuil dépend à l'évidence des cultures. Par exemple Servant (1978) considère qu'un sol présentant un caractère salin que si la CEe est supérieure à 8 dS m⁻¹ sur l'ensemble de ces profils pendant la majeure partie de l'année. Ayes et Westcot, (1988), considèrent que ce seuil doit être fixé à 3 dS m⁻¹, car à partir de ce seuil on commence à observer des effets néfastes sur les plantes.

Ce pendant la classification des sols salés la plus adaptée par les pédologues reste celle de l'USSL Staff cité par Richards, (1954). Cette classification est universelle selon Maillard, (2001). Le tableau 1 donne la classification des sols salés suivant leur degré de salinité.

Tableau 1: Classification des sols salés d'après USSL Staff (United States Salinity Laboratory Staff), (1954)

<i>Classe de salinité</i>	<i>Conductivité Electrique de l'extrait de pâte saturée dS m⁻¹</i>
Non salin	0 à 4
Modérément salin	4 à 8
salin	8 à 16
Très salin	> 16

I.7.4. Processus et voies de salinisation des sols

La salinité désigne la concentration des sels présents dans le sol. Ces sels sont représentés en grande partie par des cations (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, et le k⁺), et des anions (Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻, NO₃²⁻). La précipitation de ces sels est connue sous le nom salinisation (Tabet, 1999; Condom, 2000). Selon la dominance de ces anions et leurs interactions, plusieurs voies de salinisation sont possibles (fig. 4).

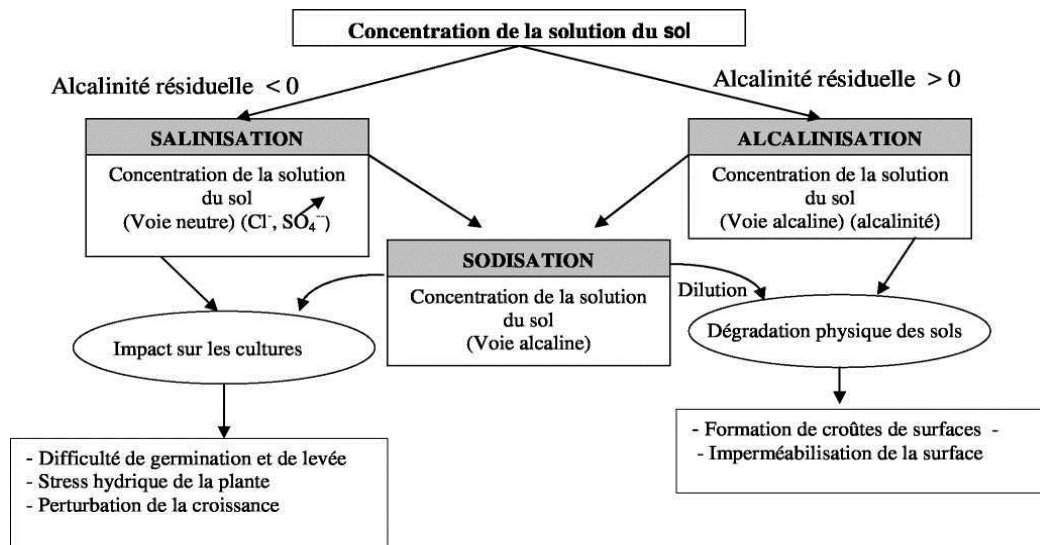


Figure 4: Processus des différents voies de la salinisation et leurs impact sur la dégradation des sols et sur les cultures
Tabet (1999)

I.7.5. L'irrigation et salinisation des sols

Les sols irrigués sont soumis à des risques de dégradation en rapport soit avec la modification du régime hydrique, soit avec la qualité de l'eau d'irrigation (Samba, 1998 ; Marlet et Job, 2006). La plus part des sols irrigués du globe sont soumises ou menacées, à court terme, par la salinisation des sols qui est définie comme l'accumulation des sels solubles dans le profil (Cheverry et Bourrié, 1995). Cet état de lieu est très fréquent dans les zones semi-arides et arides où on y installe des périmètres irrigués afin de couvrir les besoins d'alimentaires de ces régions (**Figure 5**).

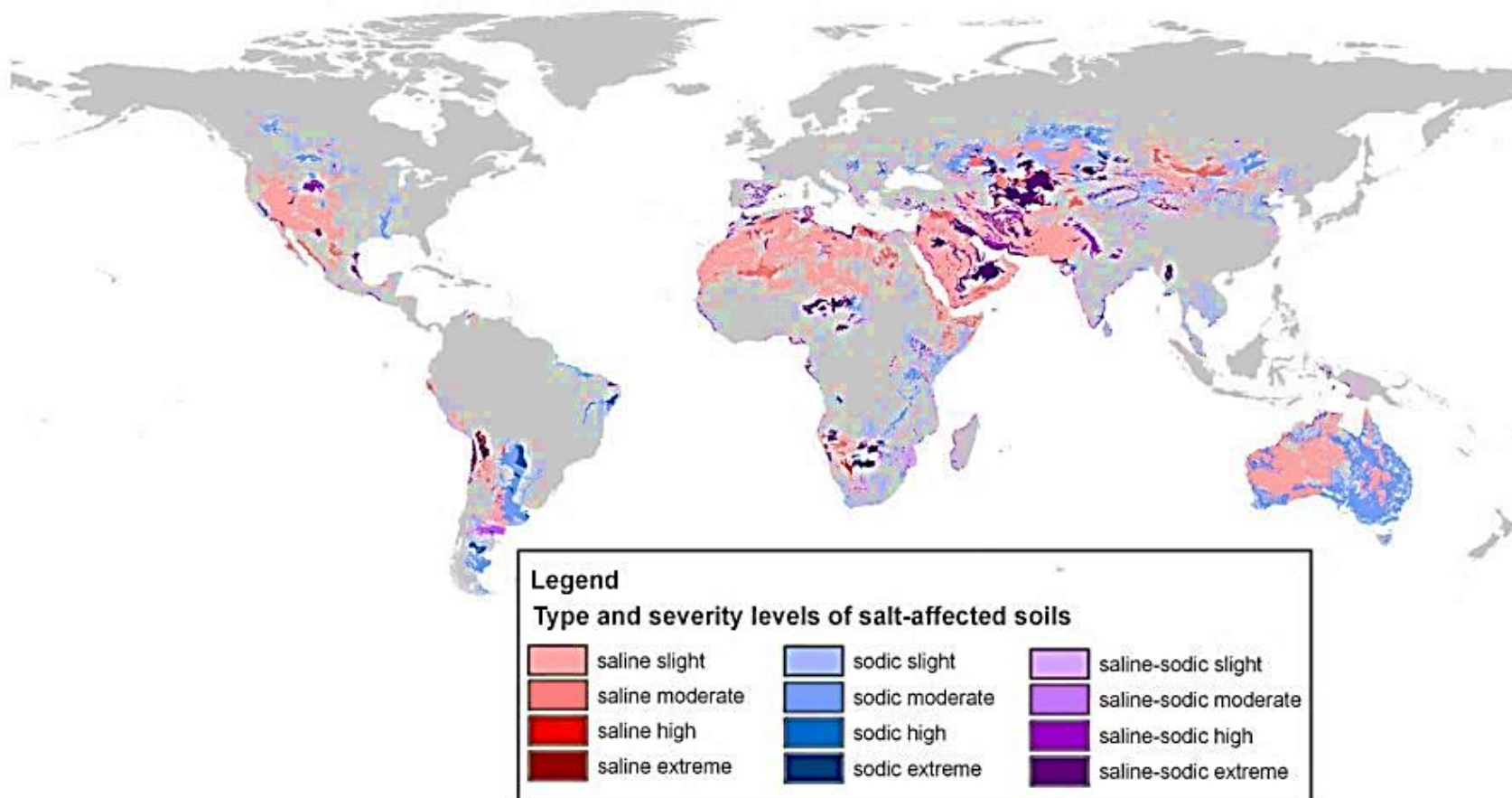


Figure 5: le risque de l'irrigation par les eaux salées. [Source : Wicke et al., 2011]

Le tableau 2 montre que près de 77 Mha des terres du globe sont affectées par la salinisation due à l'action de l'homme avec : 53,6 Mha en Asie (70 %) 14,8 Mha en Afrique (19,3%) et 3,8 Mha en Europe (5%). Les quatre (4) degrés de salinité (léger, modéré, sévère et extrême) définis par *Ghassemi et al (1995) in Marlet et Job, (2006)* couvrent respectivement 34,6, 20,8, 20,4 et 0,8 Mha. Pour la salinisation naturelle, Tangji (1990) estime que plus de 340 Mha présenteraient des sols salés (salinisation neutre) et 560 Mha seraient couverts par des sols à alcali (alcalinisation et sodisation)

Tableau 2: Estimation globale de la salinité des sols irrigués dans le monde (Marlet et job, 2006).

Continents	Superficie (10 ⁶ ha)				Total	%
	Légère	Modérée	Sévère	Extrême		
Afrique	4,7	7,7	2,4	-	14,8	19,3
Asie – Pacifique	26,8	9,0	17,0	0,8	53,6	70,0
Amérique du sud	1,8	0,3	-	-	2,1	2,7
Amérique du nord et Centrale	0,3	1,5	0,5	-	2,3	3,0
Europe	1,0	2,3	0,5	-	3,8	5,0
Total	34,6	20,8	20,4	0,8	76,6	100

I.7.6. Impact de la salinisation sur les plantes et la structure d'un sol

Dans le cas de la voie saline neutre, l'augmentation de la pression osmotique n'est pas le seul risque. Peuvent également entrer en jeu :

- le rôle spécifique de certains ions qui s'accumulent lorsque le phénomène de salinisation développe : certains arbres fruitiers peuvent par exemple être sensibles à l'accumulation de chlorures ou de sodium (Samba, 1998) ;

- L'accumulation d'éléments de transition comme le bore (B), le sélénium (Se) et l'arsenic (As) ou de métaux lourds tels que Cadmium (Cd), Mercure (Hg), peut parfois « accompagner » les ions majeurs lors de l'accumulation saline : le cas du bore est souvent évoqué car dans le sol, la marge entre les concentrations qui provoquent des phénomènes de carence chez la plante et celles qui entraînent une toxicité est étroite pour beaucoup de cultures (Ayers et Wescot, 1988 ; Cheverry et Bourrié, 1995). Quant à la voie alcaline, sa principale conséquence est la dégradation de la structure du sol et donc des propriétés agronomiques. Elle se manifeste de différentes manières :

- La hausse du pH que l'on observe lorsque les carbonates de sodium précipitent, entraîne une solubilisation de la matière organique du sol et on parle de sols à « *salant noir* » : la fertilité de ces sols est alors très fortement réduite car de nombreux éléments indispensables à la plante deviennent totalement insolubilisés (Samba, 1998).

- Lorsque la quantité de sodium fixée sur le complexe est significative, la conductivité hydraulique du sol diminue ; on observe alors une diminution de la porosité et de la stabilité structurale des agrégats (Samba, 1998) et une imperméabilisation du sol en surface par la formation de croûtes (Cheverry et Bourrié, 1995; Condom, 2000).

Chapitre II

La simulation et la prédiction de la salinité des sols

II-1 Modélisation de sol-eau-plante-atmosphère système.

II-1-1 Limite des systèmes de classification de l'eau d'irrigation

Les systèmes de classification des eaux d'irrigation sont basés sur l'estimation de la concentration relative de l'extrait de saturation du sol en ce qui concerne l'eau d'irrigation. Cette estimation peut être basée sur l'expérience ou avoir été calculée à partir de plusieurs hypothèses sur l'équilibre de l'eau du sol dans les conditions générales. Dans la dérivation du système de classification de l'eau Westcot et Ayers (1985) adoptée par la FAO, il a été proposé un facteur de la concentration relative de l'extrait de saturation par rapport à l'eau d'irrigation de 1/5. Toutefois, selon ces auteurs, cette concentration relative est seulement indicative, car elle dépend de plusieurs facteurs, principalement le climat, la gestion des sols et de l'irrigation. Plus précisément, les deux facteurs qui influencent le niveau de concentration de l'extrait de saturation en ce qui concerne l'eau d'irrigation sont: i) le bilan hydrique du sol, qui est à son tour influencé par la pluie, l'évapotranspiration et l'irrigation, et ii) la dissolution ou la précipitation des sels de faible solubilité dans le sol. L'intégration de tous ces facteurs peut être accomplie par le développement de modèles de simulation (Visconti, 2009).

II-1-2 Définition du modèle de simulation

Un modèle de simulation mathématique est un ensemble de relations est formellement décrire le comportement d'un système. Le système réel d'intérêt est représenté par le modèle afin qu'il puisse effectuer des tâches d'analyse du système actuel à l'étude. La validité de l'analyse effectuée dépend de la capacité du modèle à capturer les relations fonctionnelles établies entre les différents éléments du système à l'étude (Stöckle, 2003).

Dans la modélisation, nous parlons d'un système comme une partie de la réalité qui est délimitée et contenant des éléments interdépendants (Leffelaar et Ferrari, 1989). Les systèmes environnementaux ont un degré élevé de complexité pour le grand nombre de facteurs qui interagissent en eux. Un nombre élevé de facteurs et les relations se traduisent par une grande quantité d'informations qui doit être gérée. L'avènement de l'ère de l'informatique a permis d'avoir des machines avec une grande puissance de calcul et de stockage, qui a révolutionné la façon dont les modèles de simulation sont développés.

II-2 Modélisation du transport de l'eau et de solutés dans le sol.

Il est maintenant établi un vaste corpus de connaissances sur les processus qui se produisent dans le système sol-eau-plante-atmosphère dans des conditions agricoles aride, semi-aride et subhumides sèches et son application dans la modélisation. Sans être exhaustif, nous citerons le manuel des processus et de la modélisation dans le système sol-plante (benbi et Nieder, 2003), les techniques d'irrigation (Fuentes, 2003), la production végétale en environnements salins (Goyal, 2003) la gestion des eaux de drainage dans les zones arides et semi-arides (Tanji et Kielen, 2002) la salinité de l'eau d'irrigation dans l'agriculture irriguée (Aragüés et Cerda, 2001), le drainage agricole (Skaags et Van Schilfegaarde, 1999), l'évapotranspiration des cultures: Lignes directrices pour le calcul des besoins des cultures en eau, (Allen et al, 1998) principes et applications de drainage (Ritzema, 1994) Irrigation Agronomique (Martin de Santa Olalla et John, 1993) la production des cultures avec l'eau saline (Somani, 1991), l'évaluation de la gestion de salinité (Tanji, 1990), le drainage agricole et la récupération des sols Saline (Pizarro, 1985) gestion de la culture et de l'eau pour le contrôle de la salinité (Hoffman et Van Genuchten, 1983) Qualité de l'eau pour l'agriculture (Ayers et Westcot, 1985), les sols saline et sodique (Bresler et al., 1982), l'irrigation moderne des sols (James et al., 1982), la salinité dans l'irrigation et les ressources en eau (Yaron, 1981), Lignes directrices pour prévoir les besoins en eau des cultures (Doorembos et Pruitt, 1974), l'évaluation quantitative de la qualité de l'eau d'irrigation (Bernstein, 1967), Principes et pratiques de l'irrigation (Hansen, 1963), Diagnostic et réhabilitation des sols salins et sodiques (Richards et al., 1954). Les idées utilisées dans les modèles de développement actuellement en usage de la salinisation sont enracinées dans les connaissances scientifiques contenues dans ces documents. Les modèles qui ont été utilisés dans l'étude de la salinité des sols sont d'un usage général ou spécifique pour les sols affectés par le sel. Parmi ceux d'application générale peut être mis en évidence CROPSYST (Stöckle et al., 2003), LEACHM (Hutson et Wagenet, 1992) BUDGET (Raes, 2002). Plus spécifiques sont WATSUIT (Oster et Rhoades, 1990), CIRP (Aragüés et al., 1990), SALSODIMAR (Pla, 1997), UNSATCHEM (Suarez et Simunek, 1997), SWAP (Van Dam, 2000), SALTMOD (Oosterban 1998), SALTMED (Ragab, 2002.), SALTIRSOIL (Visconti et al, 2006) et SALTIRSOIL_M (Visconti et al, 2013).

II-3 Classification des modèles

Les modèles de l'eau et le transport de soluté dans le sol, parmi lesquels comprend la salinisation, peuvent être classés en fonction de trois critères classiques:

- a.** Selon le type de relation entre les variables qui considérer comme des modèles mécanistes ou empiriques. Dans la première, la relation entre les variables est dérivée de lois bien établies pour les processus est modélisé. Dans la deuxième entre les variables obtenues expérimentalement et purement descriptive, un exemple de la classe des derniers sont des modèles de pertes de sol sur les pentes de USLE (Universal équation de perte de sol; Wischmeier et Smith, 1978).
- b.** Selon la variable temps avoir des modèles statiques ou dynamiques. Dans le premier cas on ne considère pas le temps est utilisée pour modéliser l'équilibre chimique, par exemple. Dans le second oui, il est considéré comme la dimension temporelle du processus et ont été largement utilisés dans la modélisation des systèmes biologiques.
- c.** Selon l'incertitude dans l'information fournie et obtenu à partir du même modèle, et sur les autres modèles stochastiques et modèles déterministes. Les premiers comprennent les prévisions de la variabilité de celle-ci, tandis que le second n'a pas pris en compte.

La classification ajustée d'un modèle est d'autant plus difficile que les systèmes sont complexes qui essaie de modéliser. Le degré de connaissance des différents processus qui se produisent dans les systèmes naturels n'est pas le même et donc dans le même modèle de simulation, il peut être nécessaire considérer les relations mécanistes pour certains processus et empiriques pour d'autres. D'autre part, comme l'information sur la vitesse des processus est généralement difficile à obtenir, lorsqu'il est possible de le faire, des approximations d'équilibre sont effectuées des systèmes dynamiques.

Enfin, les modèles déterministes peuvent être utilisés d'une manière probabiliste. Au lieu de considérer une seule donnée pour chaque variable, vous pouvez être considéré comme une gamme de données. Cet intervalle est généré sous une distribution de probabilité marginale autour d'une valeur centrale. Cela devient incorporé dans une technique connu comme de Monte Carlo (Vanclooster et al., 1995).

Parmi les modèles de la salinisation des sols, il peut être considéré qu'il existe une famille de modèles de capacité statique dont le représentant était d'abord WATSUIT et a continué dans les modèles comme SALSODIMAR, IMAGE, SALTIRSOIL et

SALTIRSOIL_M. (Visconti, 2009). Ils sont des modèles simples en utilisant des renseignements facilement accessibles, et peuvent donc être appliqués au complet. Comme UNSATCHEM modèle complexe est utile pour la recherche en détail sur les interactions dans le système sol-plante-atmosphère de l'eau, mais pas pour les études à la parcelle. D'autre part, BUDGET et SALTMED ont été développés pour les études au terrain et d'avoir une complexité qui se situe entre UNSATCHEM et le SALTIRSOIL au détail dans la modélisation de la circulation de l'eau dans le sol. Détail inexistant dans la modélisation de la chimie de la solution du sol. Le paramètre de salinité utilisé dans ces deux modèles est la conductivité électrique de la solution du sol, qui est considérée comme une magnitude conservatrice. Quant à la philosophie et les objectifs de ces modèles, la plupart sont orientés vers la prédiction de la salinité du sol, tandis que d'autres comme SALMADINAR sont orientés à la recommandation de certaines pratiques de gestion qui maintiennent la productivité agricole à un niveau défini par l'utilisateur. En tout cas, d'autres modèles peuvent également être utilisés pour trouver le plus approprié pour le même but des pratiques de gestion de l'irrigation. Enfin, la plupart des modèles, à l'exception SALTMOD par exemple, considèrent que la nappe phréatique est sous contrôle et ne sont pas une entrée de l'eau ou de solutés au sol. Modèles de la salinisation peuvent également être classés en vertu de leurs objectifs, et si oui ou non modélisés chacun des principaux facteurs impliqués dans les processus de salinisation.

Le niveau de détail à l'intérieur des différents modèles est très variable. Avec un modèle plus détaillé permet d'ajuster les prévisions, mais ces modèles exigent souvent beaucoup de données, qui sont coûteuses à obtenir. Le modèle le plus approprié est celui qui parvient à un compromis entre le haut niveau de détail et le faible coût de la collecte des données.

II- 4 Le choix du modèle

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés par un modèle de prévision de la salinité, sodicité et de l'alcalinité du sol. Ce modèle doit répondre aux caractéristiques énumérées ci-dessous :

1. Quantitative : Selon cette caractéristique, nous ne sommes pas intéressés par un modèle qui effectué des estimations qualitatives.
2. Applicable à long terme : Selon cette caractéristique nous sommes intéressés à un modèle qui utilise l'information facilement accessible de la météo, de l'eau et la culture du sol.

3. Applicable aux sols à drainage bien fonctionné : Selon cette caractéristique qui nous intéresse le modèle pour le calcul de la composition moyenne de la solution du sol de saturation de l'eau telle qu'obtenue dans le laboratoire .
4. Valide avec les informations de la pâte saturée : Selon cette caractéristique nous sommes intéressés à un modèle qui tient l'équilibre des ions majeurs dans le sol, appliquer un modèle chimique qui simule la précipitation ou de dissolution de la calcite et de gypse, si nécessaire.
5. Conservateur avec des ions, et ne pas avec la conductivité électrique : Selon cette caractéristique nous sommes intéressés à un modèle qui utilise une équation pour calculer la conductivité électrique de la solution résultante. L'application du modèle prédictif de la salinisation, l'alcalinisation et sodisation des sols est appelé SALTIRSOIL_M répond aux exigences décrites.

Chapitre III

Matériel et Méthodes

Présentation de la zone d'étude

III. 1 Localisation de la zone d'étude

La plaine du Bas-Chélif est l'une des trois plaines composant la vallée du Chélif (haut, moyen et bas Chélif). elle se situe au nord-ouest de l'Algérie à 250 Km d'Alger ; elle fait partie du bassin versant du Chélif et occupe sa partie ouest, elle est bordée par le périmètre de moyen Cheliff à l'est, le périmètre de la Mina à l'ouest, le massif du Dahra au Nord et le massif de l'Ouarsenis au sud. La région est limitée par l'Oued Touchait (environ 3 Km à l'ouest de la ville de Boukadir willaya de Chlef) à l'Est, et la ville de Sidi-Khattab (willaya de Mostaganem) à l'Ouest. Boukadir, Merdjet-Sidi Abed, Oued Rhiou, Djédiouia, Hmadna, Ouarizanze et Sidi-Khattab sont les principales villes situées dans le périmètre allant d'Est en Ouest.

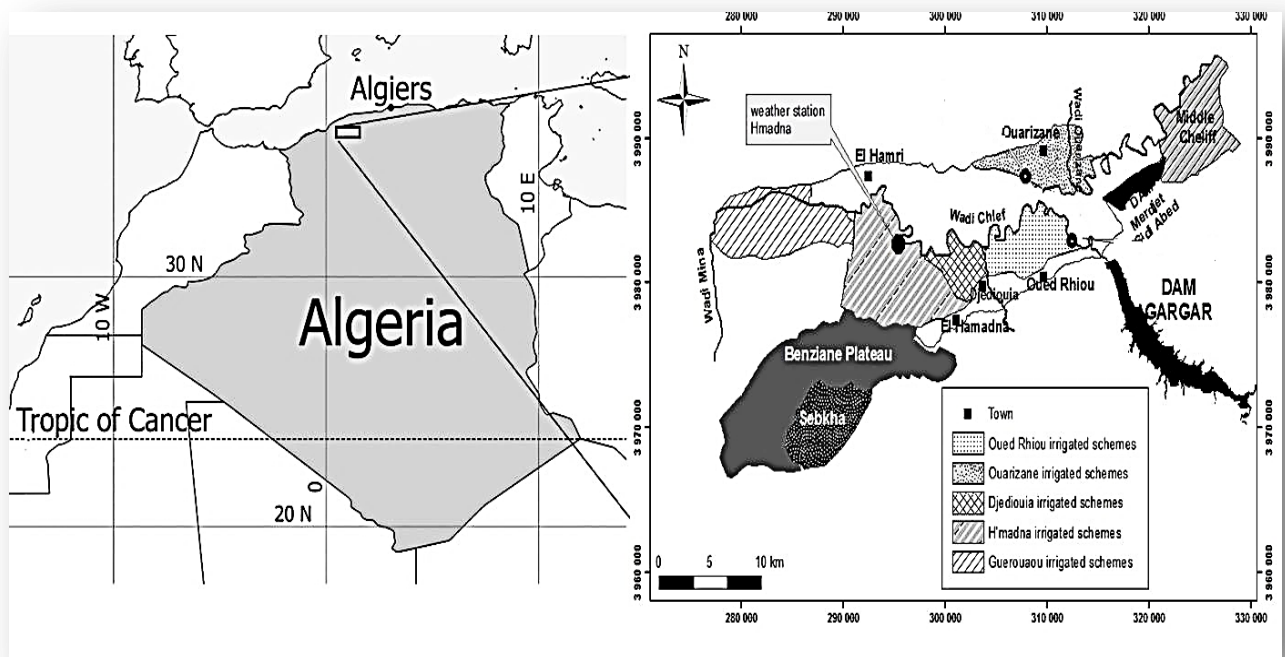


Figure 6: Localisation géographique de la zone d'étude (nos travaux).

La région du Bas-Cheliff se trouve entre $0^{\circ} 40'$ et $1^{\circ} 6' 8''$ de longitude et entre $34^{\circ} 3' 12''$ et $36^{\circ} 5' 57''$ de latitude nord. Avec les coordonnées géographiques x et y, selon la projection UTM Algérie fuseau 31, sont :

$$X = 275\ 649 \quad \text{et} \quad 328\ 533 \text{ m}$$

$$Y = 3\ 968\ 469 \quad \text{et} \quad 3\ 996\ 812 \text{ m.}$$

III. 2 Climat

III. 2.1. Températures

Les températures les plus élevées sont enregistrées durant les mois de juillet et août, avec une température moyenne de 29.75 °C.

Les basses températures se manifestent au mois de janvier avec une température moyenne de 10.44 °C (Tab. 3).

Tableau 3: Moyennes mensuelles des précipitations et des températures de la station de Hmadna (1985-2014). (Kouadri Sameut, 2019)

Mois	Température (°C)	Précipitation (mm)
Janvier	10,44	41,76
Février	11,57	37,11
Mars	14,22	29,35
Avril	16,81	34,49
Mai	21,27	21,98
Juin	25,71	5,05
Juillet	29,32	1,27
Août	29,75	2,02
Septembre	25,17	13,29
Octobre	20,96	28,6
Novembre	14,79	49,96
Décembre	11,77	32,7
Max	29,75	49,96
Min	10,44	1,27
Moy	19,32	297,59

III. 2.2. Précipitations

Décrites dans la bibliographie comme éléments primordiales, les précipitations de la plaine sont d'une part à la base du maintien et de l'avènement du couvert végétal d'autre part, elles jouent un rôle important dans la dégradation des sols par l'érosion hydrique lors des averses torrentielles comme l'a bien précisé Boulaine en 1957 : « Certaines années comme ce fut le cas en 1927-1928 ce fut la zone oranaise de la vallée du Chélif qui a reçu les précipitations les plus abondantes. Celles-ci se traduisent par des crues catastrophiques. La répartition des pluies suivant les mois de l'année est évidemment marquée par une sécheresse aiguë des mois d'été, juin et surtout juillet et août » ; en plus par la remontée des sels en cas d'insuffisance pluviométrique.

III. 2.3. Le quotient pluviométrique d'Emberger

Parmi les formules les plus utilisées qui combinent entre les précipitations et les températures on retient le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1953), qui exprime la durée de la période sèche de l'année, et l'indice pluviométrique d'Emberger qui demeure l'indice le plus efficace dans la description du climat méditerranéen.

Bagnouls et Gaussen (1953) définissent la saison sèche comme étant : « l'ensemble des mois où le total mensuel des précipitations exprimé en millimètre est inférieur ou égal au double de la température moyenne mensuelle exprimée en degrés centigrades ($P \leq 2T$). ».

Le diagramme ombrothermique de la station climatique de Hmadna entre 1985 et 2014 (Fig. 7) indique un climat de type méditerranéen avec une période de sécheresse très longue, qui s'étale sur six mois, allant de la mi-avril à la mi-octobre. (Kouadri Sameut, 2019)

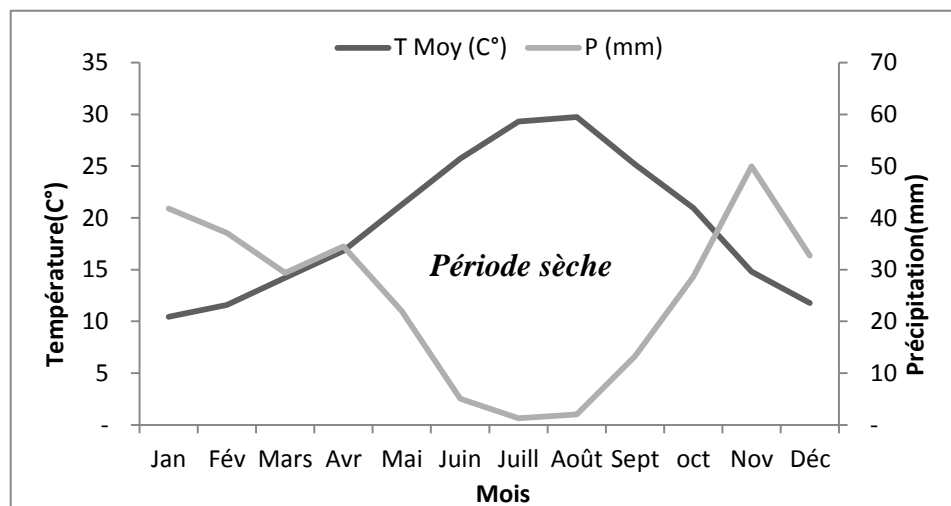


Figure 7: Diagramme ombrothermique de Gaussen de la station de Relizane de la période (1985/2014).

III. 2.4. L'humidité

L'humidité relative de l'air est généralement plus élevée le matin pour tous les mois, elle est de l'ordre de 65 à 75 % en hiver et près de 35 % en été. Elle peut compenser en un certain degré l'absence ou la rareté des précipitations en favorisant le développement des plantes.

Le mois le plus humide est le mois de décembre, par contre le mois le plus sec est le mois de juillet.

III. 3. Pédologie

Boulaine (1957) distingue deux grandes divisions des sols :

III. 3.1. Les sols des bordures des plaines

Ces sols sont formés par des associations de sols plus ou moins érodés, qui peuvent évoluer sur du calcaire dur ou tendre, des grès ou des marnes. Lorsque la roche n'affleure pas à la surface, ce sont des sols généralement calcimagnésiques, le plus souvent rendziniformes avec parfois la présence d'une croûte calcaire.

III. 3.2. Les sols de la plaine proprement dite

Cinq classes ont été décrites : les sols salés, les sols hydromorphes, les vertisols, les sols peu évolués alluviaux et colluviaux et les sols calcimagnésiques.

Dans la classe des sols salés, Boulaine (1957) distingue les Solontchaks inertes avec accumulation des sels en surface ou en profondeur, les Solontchaks vifs (horizon de surface à structure micropolyédrique en pseudo-sables durant l'été) pouvant être parfois hydromorphes, les Solontchaks vifs défloculés (dispersés en surface), les Hyposolontchaks et les Eosolonetz des lunettes érodées.

La carte des sols établie par McDonald et BNEDER (Bureau National d'Etude pour le Développement Rural) (1990) selon la CPCS (1967) montre l'existence des mêmes types de sols dans la plaine. On retrouve :

Tableau 4: Synthèse des sols de la plaine du Bas-Chélif d'après la carte pédologique de Mc Donald et BNEDER, (1990).

Type de sol	Caractéristiques
Sols peu évolués	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Les sols peu évolués d'apport alluvial</i> : avec des caractéristiques physicochimiques très variées. Textures peu argileuses, limoneuse ou sableuse. Localisé surtout aux bords des oueds. - <i>Les sols peu évolués d'apport colluvial</i> : Ils sont caractérisés le plus souvent par des dépôts de cailloux et de graviers à la surface et en profondeur du profil. Leur texture peut être très variée. Localisés aux bords de la plaine.
Les Vertisols	Riches en argiles gonflantes (smectites). C'est des sols à mauvais drainage. On les retrouve sur les alluvions des terrasses Rharbiennes. Ils présentent souvent le caractère salin avec une hydromorphie en profondeur.
Les sols Calcimagnésiques	Des sols carbonatés, plus ou moins différenciés et présentent parfois des accumulations calcaires nodulaires ou continues sous forme d'encroûtement et de croûte. Ils montrent parfois des caractères vertiques.
Les sols isohumiques	Moins fréquents dans le Bas-Chélif. Ils sont de couleur marron et présentent, parfois, le caractère vertique ou des accumulations discontinues de calcaire. Localisés sur les colluvions de la partie Sud de la plaine et sur le plateau de Benziane.
Les sols hydromorphes	Des sols profonds avec un drainage imparfait dû à leur position basse. Ils forment généralement des dépressions fermées telles que les sols de la Gaa. On les rencontre un peu partout dans le Bas-Chélif.
Les sols salsodiques	Appelés halomorphes : sont des sols dont l'évolution est influencée par la présence de sels solubles et du pourcentage du sodium échangeable. Lorsque la conductivité électrique dépasse les 4 dS/m par la méthode de la pâte saturée, ils sont appelés sols salés ¹ (Richards, 1954).

III. 4. Ecologie et occupation du sol

La plaine du Bas-Chélif est à vocation agricole. De ce fait, les sols sont soit cultivés, soit abandonnés pour être occupés par la végétation halophyte.

L'agriculture concerne essentiellement Les vergers d'agrumes et d'oliviers dont la date de plantation remonte le plus souvent à la période coloniale. Ces vergers sont irrigués et se localisent plus souvent dans les périmètres d'Oued Rhiou, Djdiouia et Ouarizane.

Tableau 5 : la superficie des sols de la Plaine du Bas-Chélif (DSA 2020) (Hectare)

ANNEES	2017-18		2018-19		2019-20	
	SUP (ha)	PROD	SUP (ha)	PROD	SUP (ha)	PROD
RELIZANE	100	18000	160	28800	160	28800
OUED RHIOU	635	121950	334	56805	960	112000
OULED YAICH			40	6400	05	750
EL HMADNA	120	27600	120	21600	110	23650
SIDI KHETTAB	650	91000	650	91000	800	112000
AMMI MOUSSA			05	750		
ZEMMOURA	40	13000	40	13000		
JDIOUIA	450	103500	460	82800	470	101050
EL HAMRI	120	27600	120	21600	120	25800
EL MATMAR	220	33000	220	33000	200	32000
AIN TAREK	04	600	05	750	08	1200
OUARIZANE	250	45000	255	40800	350	70000
YELAL	70	11900	69	11730	80	13500
OUED EL DJEMAA	175	31500	175	31500	175	31500
MARDJET SIDI ABED	65	11700	70	11900	70	14000
TOTAL	2899	536350	2723	301285	3508	566250

III.5. L'irrigation dans la plaine du bas Chélif

La plaine du Bas Chélif, à vocation agricole, s'étend sur 60000 ha et comprend plusieurs périmètres irrigués de grande hydraulique. Son périmètre irrigué a été créé durant la période coloniale à partir de 1937. Il s'étendait en 1951 sur plus de 28 000 ha (surface "classée") dont près de 20 000 ha irrigables et 15 000 ha équipés. Actuellement, la surface irrigable est estimée aux environs de 16 000 ha dont moins de 7 000 ha équipés. En 2004, la surface irriguée était de 4 500 ha environ. Les principaux périmètres irrigués de la plaine sont : Ouarizane, H'madna, Oued Rhiou, Djédiouia et Garouaou (figure.8).

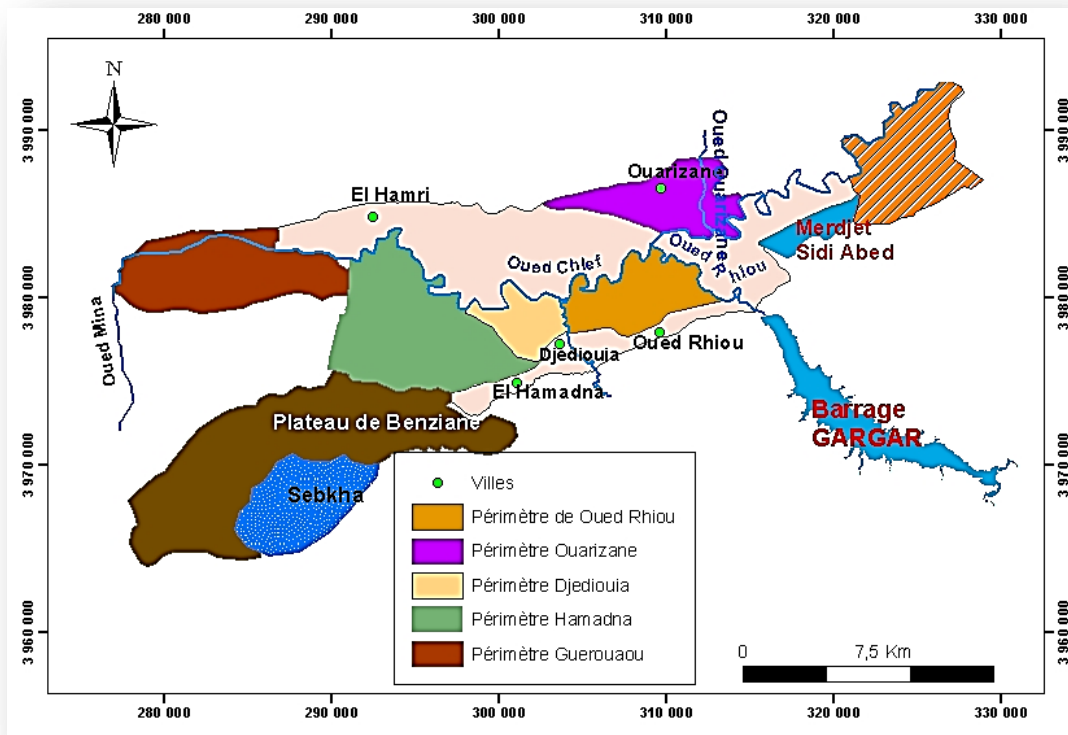


Figure 8: Les périmètres irrigués de la plaine du Bas-Chéliff (nos travaux).

Actuellement, de nombreuses études climatiques ont montré que l'ouest d'Algérie est caractérisé par une faible moyenne annuelle de pluviométrie et une forte évaporation. Cet état n'a fait que la plaine à un bilan hydrique négatif sur une longue période de l'année. L'intensification de l'irrigation est plus qu'indispensable pour combler le déficit en eau pour la majorité des cultures.

En plus du déficit climatique, la salinité des sols de la plaine est un vrai problème environnemental. Comme la majorité des sols d'Afrique du nord, la salinité dans la région est d'abord primaire c'est-à-dire que les sols sont des alluvions dont le matériau originel était lui-même plus ou moins salé. Les formations salifères (Trias, Miocène, Helvétien, Sahélien) qui affleurent dans l'Ouarsenis en sont les principaux pourvoyeurs (Boulaine, 1957 ; Gaucher et Burdin, 1974). Le processus s'est ensuite accentué sous l'effet de l'irrigation. Douaoui, (2005), montre que la salinité touche plus de 80 % de la surface des sols de la plaine.

III.5.1. Les ressources en eau d'irrigation des périmètres du Bas-Chéliff.

Les principales ressources en eau d'irrigation pour le périmètre du Bas-Chéliff sont constituées par les cours d'eau et les accumulations. Les ouvrages d'accumulations sont

essentiellement le barrage de Gargar sur l'Oued Rhiou d'une capacité initiale de 420 Mm³ et la retenue de Merdja de Sidi Abed située à l'amont du périmètre d'une capacité de 50 Mm³ (fig.1). Les deux ressources en question sont affectées, et depuis 2003, vers la ville d'Oran et n'alimentent plus le réseau d'irrigation (Douaoui et Hartani, 2007 ; *Bradai et al*, 2008).

La plaine du Bas Chélif bénéficie, aussi, de ressources en eau souterraines. L'ABH-CZ³, (2001), a recensé trois aquifères, il s'agit de :

- La nappe du Miocène calcaire : localisée le long de la limite sud de la plaine. Elle est constituée par des grès et des calcaires du lithothamnium, sa recharge annuelle est évaluée à 1,4 hm³.
- La nappe du Pliocène marin : qui est une suite d'argiles et de marnes avec des couches minces de grès qui affleurent au nord de la plaine. Elle a une recharge annuelle estimée à 11 hm³.

-Le Quaternaire Pliocène continental : constitué de sédiments à base d'argile, de marnes et des lits de sable, de graviers et de conglomérats. Sa recharge annuelle est la plus importante, elle est estimée à 27 hm³. localisé au centre de la plaine.

Actuellement, les eaux souterraines sont de plus en plus utilisées en irrigation. Cela est survenu suite à la non disponibilité des eaux de surface à savoir les eaux du barrage de Gargar et de la retenue de Merdjet Sidi Abed (Bradai et al, 2011), (Kuper et al (2016).

III.5.2. La qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation

Suite à la forte utilisation des eaux souterraines de la plaine du Bas-Chélif pour l'irrigation, une attention particulière à la qualité chimique de ces eaux. Une étude effectuée en 2008 par Bradai et *al*, sur une collecte d'eau de 56 forages fonctionnels durant la période des irrigations en 2006 nous a montré que sur la composition chimique de ces eaux et les risques de salinisation des sols irrigués (Bradai et *al*, 2011). L'étude montre que :

- Les eaux souterraines du Bas-Chélif sont d'une salinité excessive parfois déconseillée en irrigation ;
- La meilleure classe trouvée lors de la projection des points sur le diagramme de RIVERSIDE est C3S2, qui doit être utilisée avec beaucoup de précaution et en présence d'un réseau de drainage ;

Le risque de l'évolution chimique des eaux lors de leur concentration par évaporation en s'intéressant au signe de l'alcalinité résiduelle de l'eau.

² Mm³ : Millions de mètre cubes.

³ Agence du Bassin Hydrographique – Chélif Zahrez.

III.6. Effet de l'irrigation sur la salinité des sols du Bas-Chélif

La plaine du Bas-Chélif qui se caractérise par la présence de nombreux sols salés avait fait l'objet de plusieurs études (Boulaine, 1957 ; Douaoui, 2005 ; Saidi, 2005). Les études récentes ce sont principalement basées sur l'évolution spatio-temporelle de la salinité des sols et ont montré une diminution des superficies à faible salinité avec en parallèle une augmentation des superficies à salinité élevée (Douaoui et al., 2006 ; Douaoui et Lépinard, 2010 ; Yahiaoui, 2015).

Cette expansion est due principalement à l'irrigation par les eaux souterraines souvent chargées en sels, le mauvais drainage et l'aridité du climat (Douaoui et Hartani, 2007 ; Bradai et al., 2011). Cette salinité caractérise les états de surface des sols soit par accumulation des sels à la surface soit par son intervention sur la qualité des sols et la végétation (Douaoui, 2005).

Des cartes de prédiction sont souvent générées pour évaluer l'étendue spatiale d'un danger statique comme la salinité du sol. Yahiaoui et al en 2021 ont créé deux cartes interpolées avec la technique OK. La classe de salinité dominante est celle avec des valeurs extrêmes qui se propage majoritairement dans la partie occidentale. La classe de salinité moyenne arrive en deuxième position et elle se manifeste par une étendue modérée de l'est à l'ouest. Les deux cartes révèlent que les classes non salines et légèrement salines sont les moins étendues.

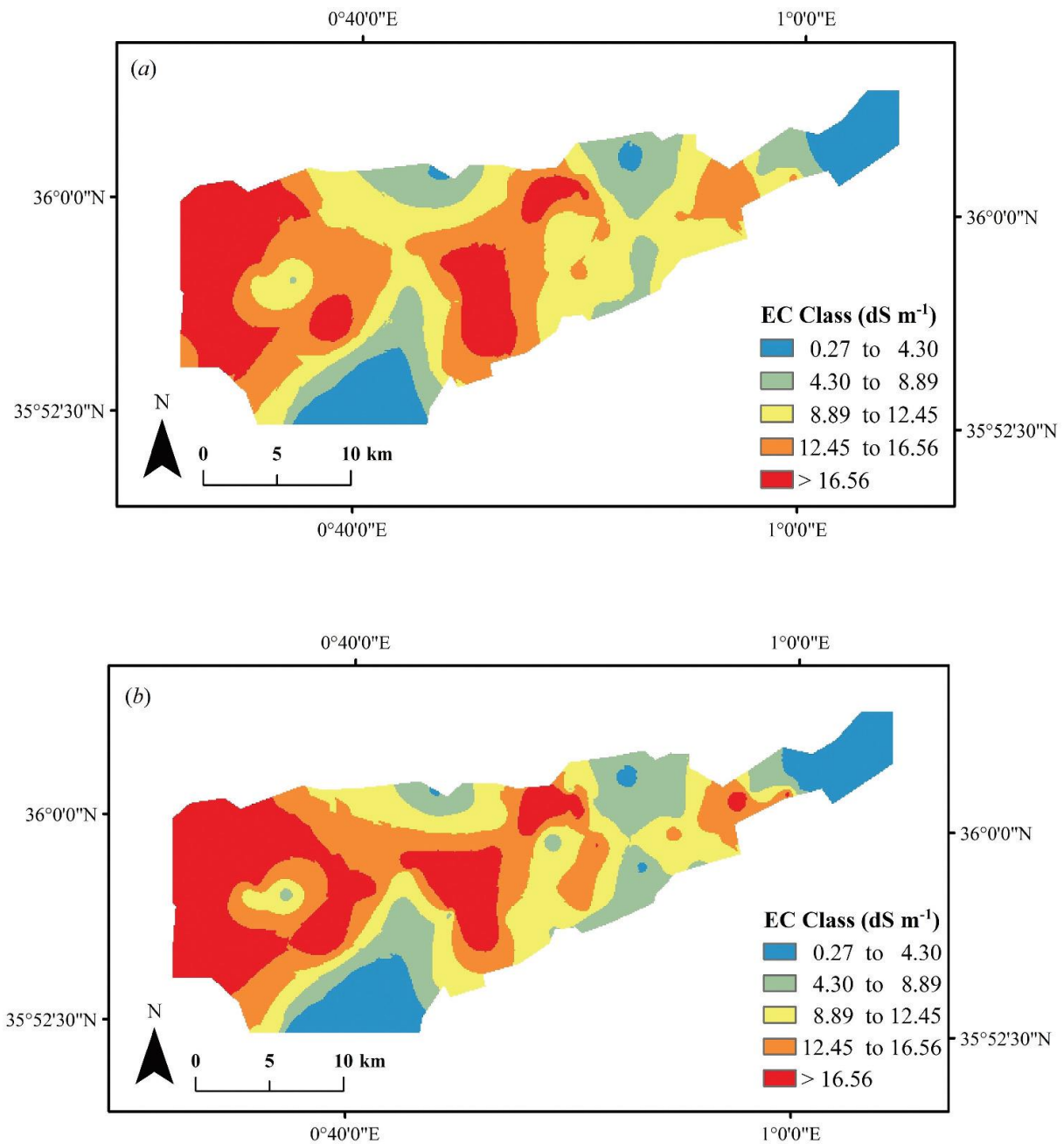


Figure 9: Les cartes CE interpolées du sol à partir (a) des données observées du terrain et (b) des données prédites (Yahiaoui et al ; 2021)

Les superficies calculées pour chaque classe de salinité exprimées dans le tableau (6) montrent une variabilité au sein de l'extension de cet aléa dans toute la plaine étudiée.

Tableau 5: Surface calculée des classes de salinité et leur pourcentage d'étendue spatiale à partir de cartes de (a) la CE du sol mesurée et (b) la CE du sol prévue. (Yahiaoui et al ; 2021)

EC _{Class}	Non-Saline	Slightly Saline	Moderately Saline	Highly Saline	Extremely Saline	Total
Area (km ²)	56.00	81.58	118.07	112.82	138.62	507.12
Extent (%)	11.04	16.09	23.28	22.24	27.33	100.00
(b)						
EC _{Class}	Non-Saline	Slightly Saline	Moderately Saline	Highly Saline	Extremely Saline	Total
Area (km ²)	56.74	82.78	121.14	104.12	142.32	507.12
Extent (%)	11.19	16.32	23.89	20.53	28.06	100.00
(b)						

Il semble que l'intervalle spatial de la salinité du sol dans le site d'étude a augmenté de façon spectaculaire. L'ampleur typique de la salinisation des terres de l'ensemble de données d'été 2019 atteint 75% de la superficie totale, ce qui correspond à une hausse de 10% par rapport à la valeur déclarée de (Douaoui and Lépinard, 2010). (Yahiaoui et al, 2021).

Présentation de la partie expérimentale

Partie 1

III.7.1. Echantillonnage du sol et de l'eau

L'objectif de notre échantillonnage est de prélever une partie du sol dont l'horizon 0-20 cm qui représente la couche arable et le volume (500g) est assez petit pour être transporté facilement mais suffisamment représentatif pour que son analyse démontre toutes les caractéristiques de notre sol.

Nous avons prélevé 50 échantillons du sol à partir des différents périmètres irrigués du Bas-Chélif Fig. (10). Nous n'avons pas utilisé une méthode d'échantillonnage spécifique, nous avons échantillonné à partir des parcelles irriguées par des eaux souterraines pour voir l'effet de ces dernières sur les sols.

Le prélèvement se fait après la période de récolte pour les raisons suivantes :

- Éviter de prendre un échantillon dans les endroits trop humides;
- Éviter de prendre un échantillon aussitôt après une fertilisation ou un amendement;

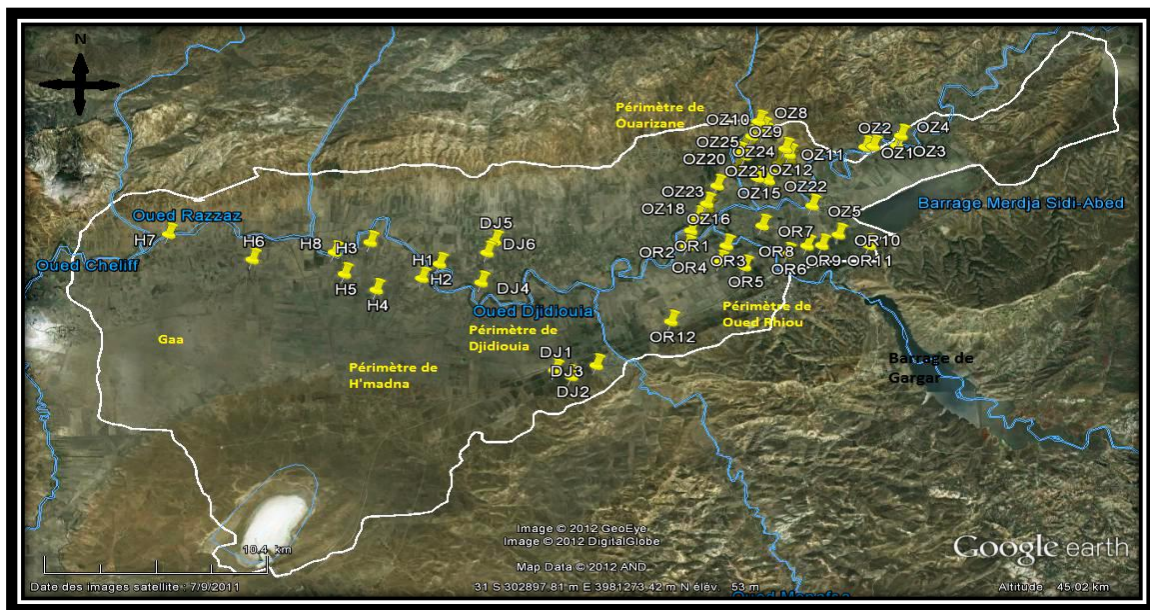


Figure 10: Distribution spatiale d'échantillonnage des sols (nos travaux).

Des échantillons d'eaux ont été prélevés à partir des forages utilisés pour l'irrigation ; ils appartiennent à la nappe alluviale du Bas-Chélif et correspondent à une profondeur allant de 60 à 100 m

Les prélèvements, au nombre de 34 ont été effectués manuellement dans des flacons en matière plastique de 1000 cm³ de capacité (fig.11).

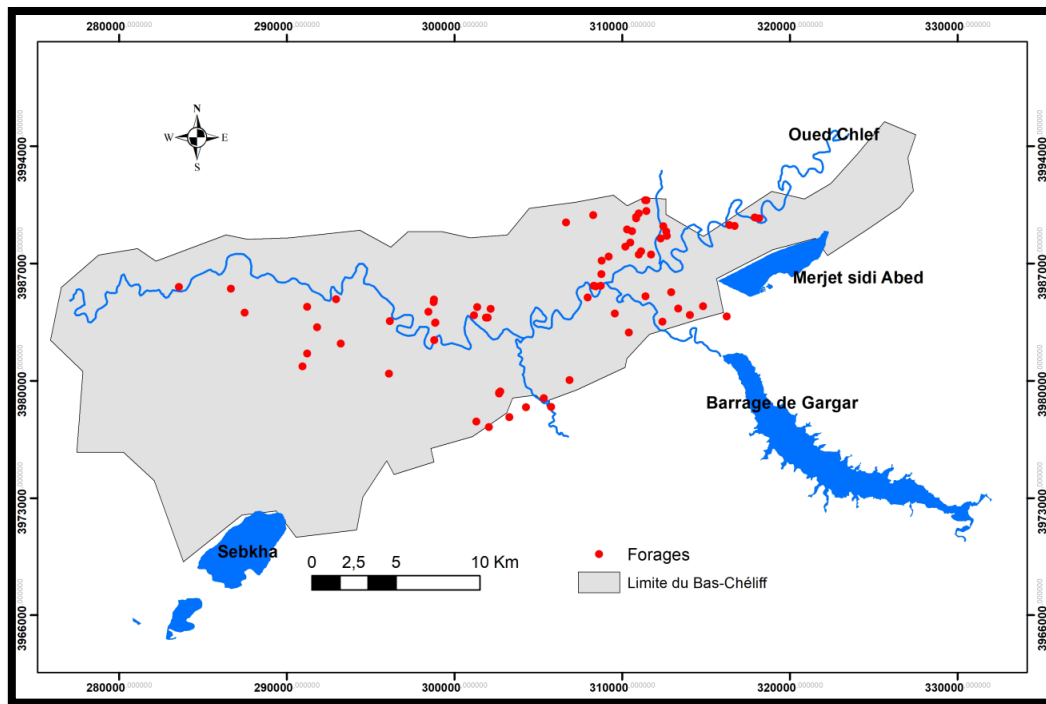


Figure 11: Distribution spatiale d'échantillonnage de l'eau (nos travaux).

III.7.2. Analyses physicochimiques

La teneur en carbone organique du sol (OC) a été déterminée selon la méthode NF ISO 14235 (Nelson et Sommers, 1982). La teneur en matière organique du sol (OM) a été calculée en multipliant le carbone organique par un facteur de conversion de 1,72 ($OM = 1,72 OC$). La texture du sol a été déterminée selon la méthode standard du personnel de l'enquête sur les sols (USDA, 1951).

Le chlorure (Cl^-) a été déterminé par titrage avec du nitrate d'argent et le sulfate (SO_4^{2-}) a été déterminé par la méthode gravimétrique $BaCl_2$ (Mathieu et Pielain, 2003). EC_{25} et le pH ont été mesurés avec un instrument de mesure multiparamètre. Le sodium (Na^+) et le potassium (K^+) ont été analysés par photométrie d'émission de flamme respectivement à 589 nm et 766,5 nm (Robbins et Wiegand, 1990; Helmke et Sparks, 1996). Les concentrations de Ca^{2+} et de Mg^{2+} ont été mesurées par titrage avec Na_2EDTA (Rodier et al., 2009).

III.7.3. Méthodologie

Nous proposons d'appliquer sur les sols de la plaine de Bas-Cheliff une méthodologie basée sur les indices de la dégradation physique et biologique des sols

irrigués, en conformité avec les critères d'équilibre entre la précision, la simplicité et la disponibilité des données (Jose ´-Miguel de Paz, 2006). Les processus de dégradation des sols sont complexes, avec plusieurs interrelations entre les facteurs et les propriétés. C'est pourquoi, l'utilisation d'un seul indice ne peut pas rendre compte de cette complexité, l'état de dégradation est mieux représenté par un indice pour chaque processus de dégradation. Plusieurs auteurs ont proposé des indices pour caractériser la dégradation des sols (Doran et Parkin, 1994; *Snakin et al*, 1996; Lopez-Bermudez et Barbera, 1998; *Hess et al*, 2000) avec des critères différents selon les objectifs.

Nous avons appliqué pour la première fois en Algérie une méthodologie utilisée pour l'évaluation de la dégradation des sols, proposée par la FAO-PNU-MA-UNESCO (1980) et testée par (Sánchez et al.1998, 1999, José -Miguel de Paz et al. 2006) en Espagne, et nous avons combiné entre cette méthode et notre méthode d'évaluation de l'eau de l'irrigation. Pour rappel, quatre sous périmètres de la plaine de Bas-Chélif ont été sélectionnés et plus de 50 échantillons de sol et 30 échantillons de l'eau ont été prélevés pour caractériser la dégradation des sols.

III.7.4. Indice de la dégradation biologique (IDB) :

La matière organique est le principal déterminant de l'activité biologique. La quantité, la diversité et l'activité de la faune et des micro-organismes sont en relation directe avec la présence de la matière organique. La dégradation biologique est liée à l'épuisement des matières organiques en raison d'une minéralisation rapide des sols. (Robert, 1996)

L'indice proposé est l'inverse de la teneur en matière organique ; cette dernière est considérée comme le seul facteur de dégradation biologique (Jose ´-Miguel de Paz, 2006) :

$$BDI = \frac{1}{OM} \quad (1)$$

MO : matière organique

Tableau 6: Classification de la dégradation biologique (Jose ´-Miguel de Paz, 2006)

Degré de dégradation	Indice de dégradation biologique
sols non dégradés	0 - 0,3
sols faiblement dégradés	0,3 - 0,6
sols moyennement dégradés	0,6 - 1
sols dégradés	1 - 2,5
sols très dégradés	> 2,5

III.7.5. Indice de la dégradation physique (IDP) :

Cet indice est composé de plusieurs propriétés physiques du sol telles que ; la porosité, la perméabilité, la stabilité structurale et la rétention en eau. Ces propriétés sont étroitement liées au mouvement de l'eau, transport nutritif, pénétration des racines et la croissance des plantes. La perturbation de l'une de ces propriétés physiques pourrait conduire à un fonctionnement défectueux de ces processus, ce qui provoque la perte de la fertilité et donc, la dégradation physique des sols FAO-PNUMA- UNESCO (1980). L'indice proposé est le suivant :

$$PDI = \frac{CI}{\%SA + (FC - WP) \times 100} \times 100 \quad (2)$$

-SA : pourcentage de stabilité des agrégats

-CF : capacité au champ (cm^3/cm^3).

-WP : point de flétrissement (cm^3/cm^3).

-CI : l'indice de croûte

1- Indice de croûte

Cet indice montre que les sols qui ont une faible teneur en argile et en matière organique, et une teneur élevée en limon sont très sujets à la formation des croûtes Lal (2000).

$$CI = \frac{1.5 \times \%FS + 0.75 \times \%CS}{\%Cy + \%OM \times 10} \quad (3)$$

-CI : l'indice de croûte

Où :
FS le limon fin, CS le limon grossier, Cy l'argile et OM la matière organique.

Tableau 7: Classification de la dégradation physique (Jose ´-Miguel de Paz, 2006)

Degré de dégradation	Indice de dégradation physique
sols non dégradés	0 – 1,4
sols faiblement dégradés	1,4 – 2,65
sols moyennement dégradés	2,65 - 5
sols dégradés	5 – 7,4
sols très dégradés	> 7,4

Partie 2 :

III.8.1. Description du modèle

Le modèle unidimensionnel SALTIRSOIL_M est basé sur un algorithme de godet de basculement pour simuler l'écoulement vers le bas de l'eau du sol où le sol est divisé en un certain nombre n de couches ou de nœuds empilés. Dans le modèle de SALTIRSOIL_M un équilibre de l'eau est effectué chaque mois pendant un an, et en conséquence un facteur de concentration de l'eau d'irrigation dans la solution du sol est évalué pour chaque mois. On obtient donc 12 facteurs de concentration. Suivant les principales concentrations d'ions dans l'eau d'irrigation (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} et l'alcalinité) chaque mois sont multipliés par le facteur de concentration correspondante pour obtenir une solution du sol loin de l'équilibre.

Ces solutions de sol à l'extérieur de l'équilibre sont introduits dans un module chimique pour calculer les concentrations en ions à l'équilibre avec la calcite, le gypse et dans les quantités présentes dans le sol, et la pression partielle de CO_2 de la solution de sol d'intérêt. Les calculs mis en œuvre dans le modèle pour évaluer l'écoulement vers le bas de l'eau du sol à travers les couches empilées, et comment le développement de la culture, et de la gestion de l'irrigation, les influence à travers l'absorption de l'eau de la plante (évapotranspiration), ont été présentés dans les travaux précédents (Visconti et al. 2011; Visconti et de Paz, 2012;. Visconti et al, 2014).

Le principal avantage de SALTIRSOIL_M est qu'il a été conçu pour maximiser le quotient de la fiabilité aux exigences de données (Shaffer et Delgado, 2001), à savoir la SALTIRSOIL_M vise à donner des prévisions acceptables de la salinité du sol en utilisant seulement des informations disponibles par le biais des enquêtes sur terrain régulières et des analyses. Dès le début de son SALTIRSOIL_M de développement a été soumis à la sensibilité et à la validation des analyses qui crédit assez haute fiabilité. Un autre avantage du modèle de SALTIRSOIL_M est son interface utilisateur graphique, qui permet un apprentissage rapide et intuitive de l'utilisation du modèle (Visconti et al., 2013).

SALTIRSOIL calcule la composition mensuelle d'ions inorganiques et la conductivité électrique à 25 °C de la solution du sol à saturation, la capacité au champ, et de l'eau de drainage. SALTIRSOIL_M est composé de deux modules primaires (Figure 12).

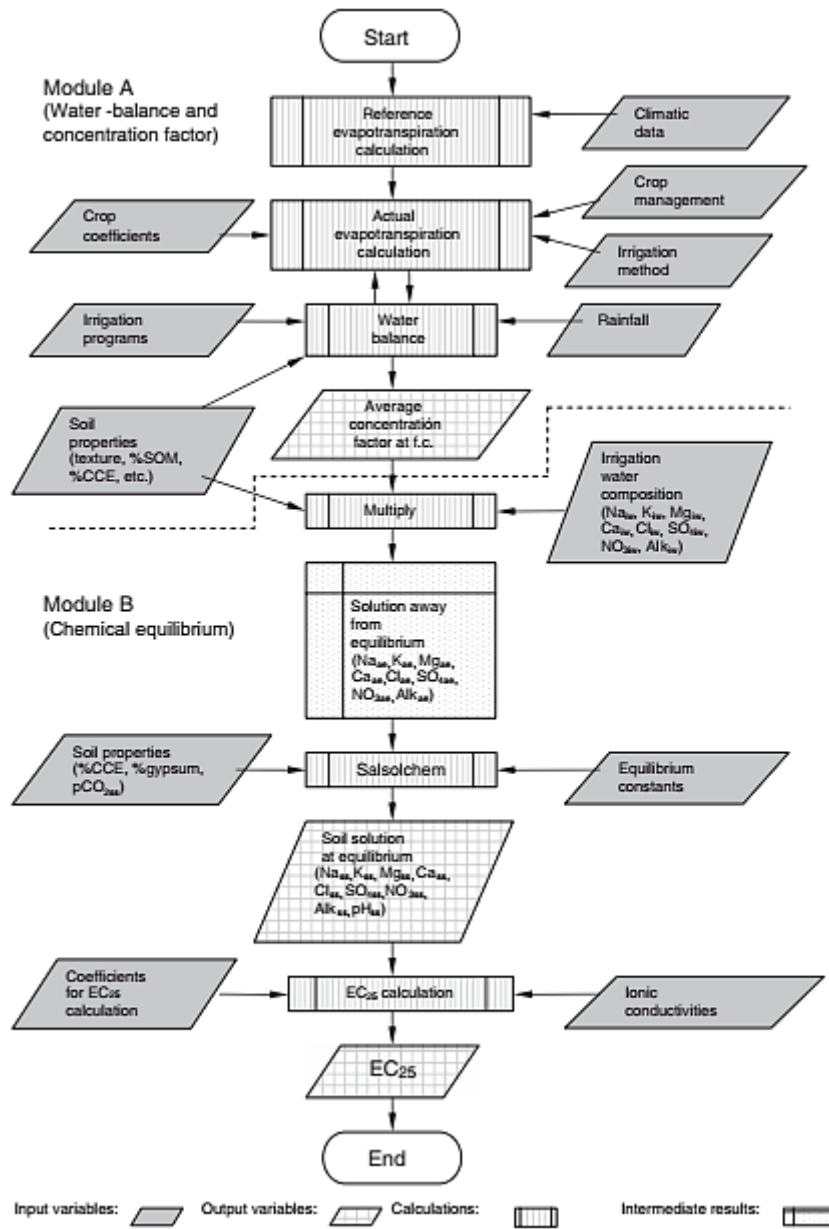


Figure 12: Organigramme de modèle SALTIRSOIL_M



Figure 13: Lancement du modèle SALTIRSOIL_M

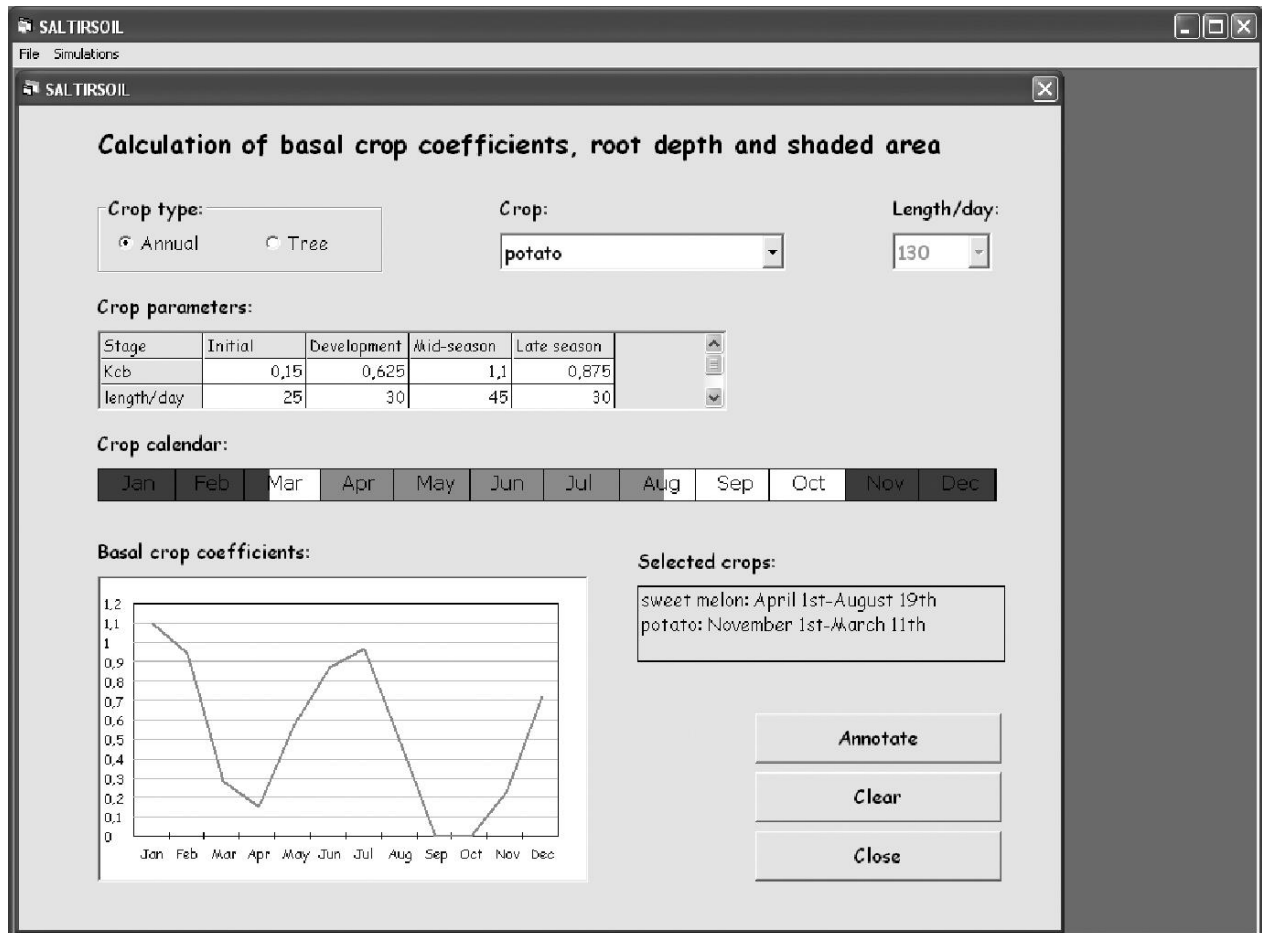


Figure 14: Méthode d'application pour calculer les coefficients mensuels de culture basale pour les récoltes.

Pour effectuer des simulations avec des cultures annuelles et la rotation des cultures, nous devons compléter les données de la Batch_Annual_Crops_Growth 'les tables et Batch_Annual_Crops_Irrigat 'à partir des données de la Annual_Crops_Growth' les tables et 'Annual_Crops_Irrigat', respectivement. Ceci est réalisé au moyen de cet outil, qui est accessible par le menu "Outils". Dans la liste déroulante "cultures" nous sélectionnons une des cultures annuelles. Les coefficients des cultures et la durée en jours de chacune des étapes de développement de la culture sélectionnée sont affichés dans la case "paramètres des cultures". Dans la liste déroulante "Longueur / jours" la longueur totale de la récolte est montré selon l'information dans la base de données. Déroulement de la liste nous pouvons choisir une autre longueur pour notre culture. Ensuite, nous sélectionnons la date de plantation de notre culture. Les calculs doivent être enregistrés en cliquant sur le bouton "Annoter".

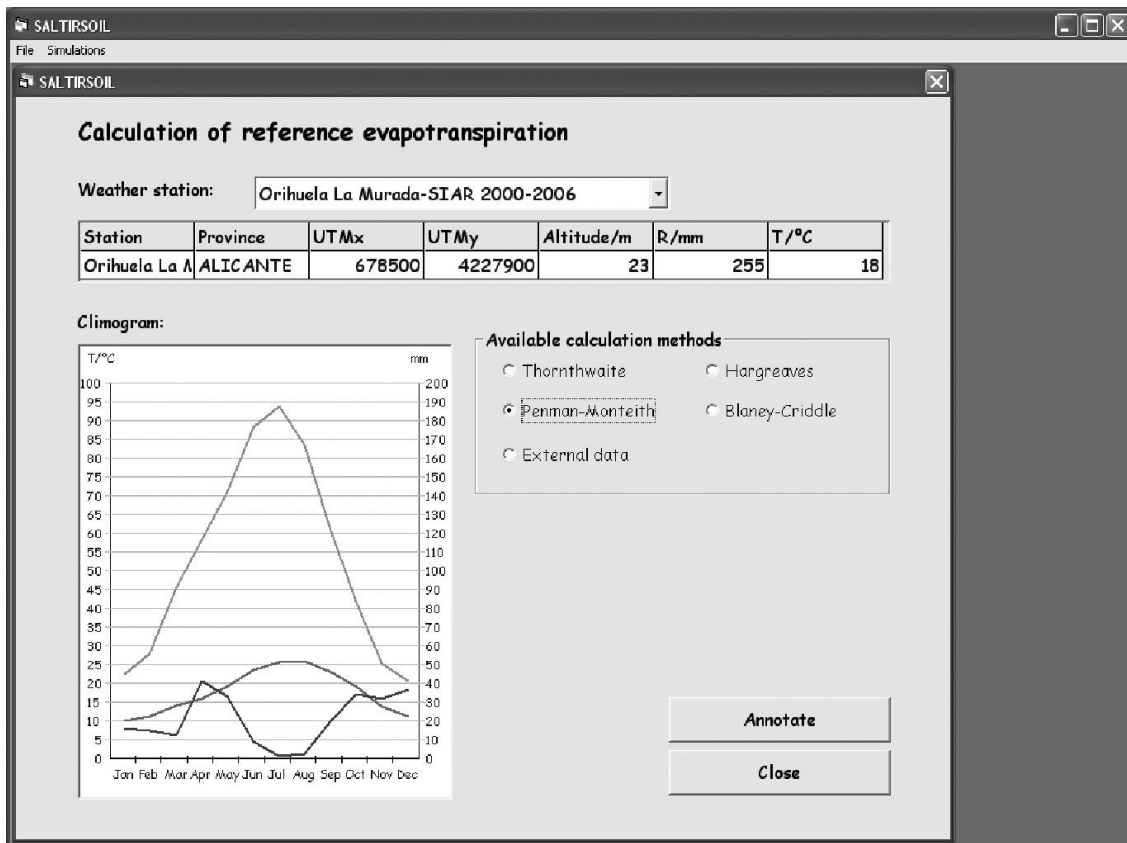


Figure 15: Méthode d'application pour calculer l'évapotranspiration de référence

L'absence de données de l'évapotranspiration de référence rend nécessaire leur obtention à partir de données climatologiques de base. Ceci peut être accompli à l'aide de cet outil du modèle de SALTIRSOIL_M. Il est accessible dans le menu "Outils" en cliquant dans le sous-menu "évapotranspiration de référence". Ensuite, la boîte de dialogue "Calcul de l'évapotranspiration de référence" est ouvert. Dans cette boîte, nous sélectionnons la station météorologique de la liste déroulante. Quand une station météo est sélectionnée, les données correspondant de la température et des précipitations moyennes mensuelles sont représentées graphiquement dans le climogram ci-dessous. Simultanément, les options pour calculer l'évapotranspiration de référence sont activées selon les besoins de données de chaque méthode et de la disponibilité des données dans la station. Les méthodes disponibles sont "Thornthwaite", "Penman-Monteith de la FAO", "Hargreaves", et "Blaney-Cridde". Pourvu que nous ayons nos propres mesures ET_0 ils peuvent également être utilisés en sélectionnant "données par défaut".

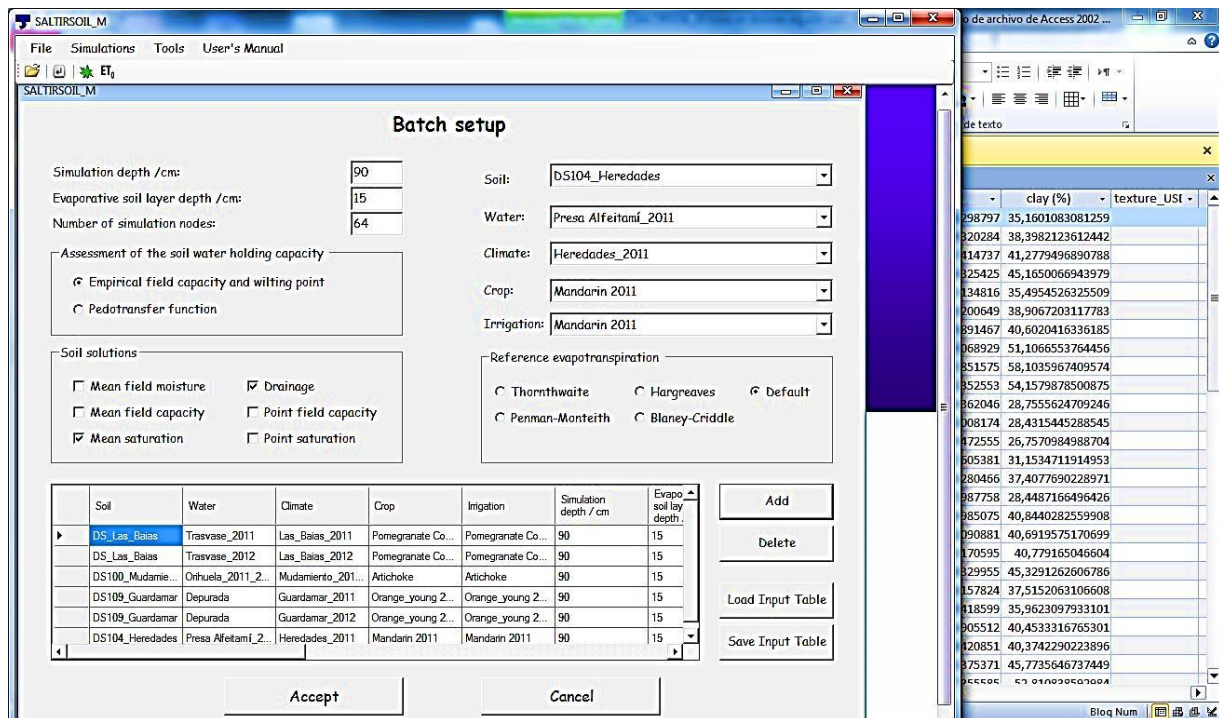


Figure 16: Configuration de la parcelle

Pour se faire, les simulations tables du 'Batch_ «Il faut être prêt. Puis nous sélectionnons "parcelle de données" dans le menu "Simulation" pour ouvrir la boîte de dialogue "Configuration de la parcelle ". Pour installer une nouvelle simulation scénario, le sol, la qualité de l'eau d'irrigation, le climat, la culture ou la rotation des cultures, et le calendrier d'irrigation sont choisis dans les listes déroulantes correspondantes. Autres données nécessaires pour effectuer les simulations sont ensuite sélectionnées comme une méthode pour évaluer la teneur en eau du sol, et les solutions de sol dont la composition sera évaluée. Chaque fois que nous avons une combinaison différente des données d'entrée, nous avons un scénario de simulation différent. Les scénarios peuvent être ajoutés au lot de simulation en cliquant sur le bouton "Ajouter", semblant ainsi dans la grille de fond. Lorsque nous avons un ensemble de scénarii, nous pouvons les enregistrer dans la base de données en cliquant sur le bouton "Enregistrer le tableau d'entrée".

III.8.2. Echantillonnage du sol et de l'eau

Deux parcelles expérimentales ont été sélectionnées à partir de 50 parcelles étudiées dans la **partie 1** dans la région et échantillonnées en Juin 2011. Parcelle 1 (P1) a été plantée avec artichaut et situé dans le périmètre d'Oued Rhiou (Fig. 17). Seul un échantillon représentant la totalité de l'intervalle de 0-80 cm de profondeur a été pris. Parcelle 2 (P2) a été plantée avec du melon et situé dans le périmètre de Ouarizane (Fig. 17). Encore une fois, un seul échantillon représentant la totalité de l'intervalle de 0 - 60 cm de profondeur a été pris. Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'une tarière de 1m.

Des échantillons d'eau ont été recueillis aussi en juin 2011 à partir des points d'eau utilisés pour l'irrigation de ces parcelles qui sont en fait des forages dans l'aquifère alluvial du Bas Cheliff à une profondeur allant de 60 à 100 m. Le choix de cette durée correspond à la sénescence de l'artichaut et à la maturation et du melon.

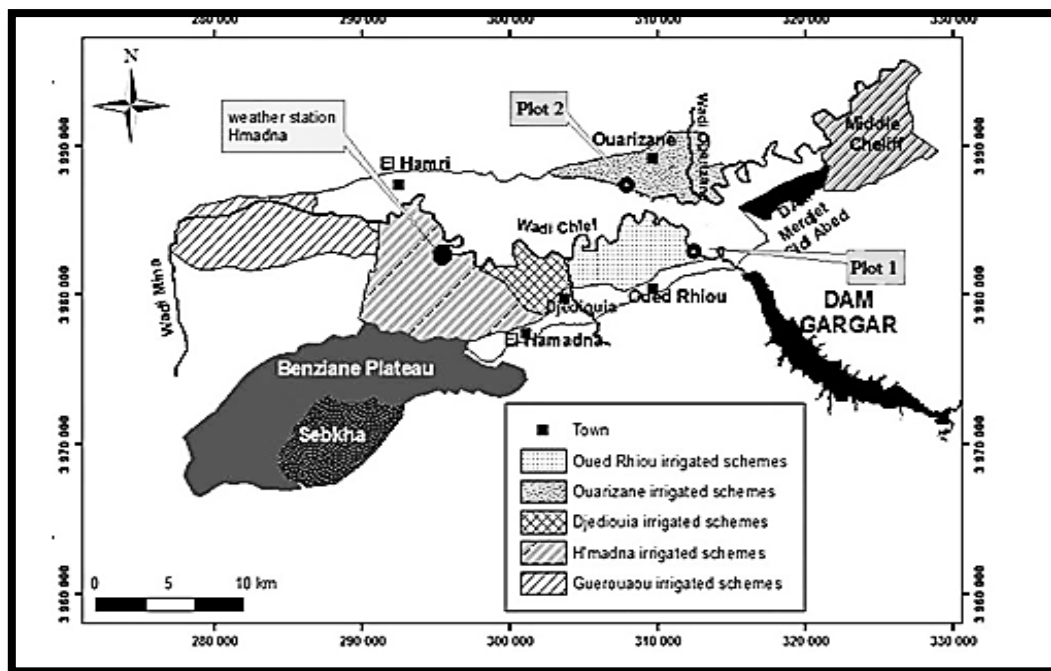


Figure 17: Carte d'échantillonnage de l'eau et du sol (nos travaux).

III.8.3. Analyses du sol et de l'eau

Dans le laboratoire, les échantillons de sol ont été séchés à l'air, et à côté ils étaient ventilées, et les fragments grossiers enlevés pour passer un tamis à mailles de 2 mm (Mathieu

et Pieltain, 2003). La teneur du sol en carbone organique (OC) a été déterminé selon la méthode de la norme internationale NF ISO 14235 (Nelson et Sommers, 1982), et ensuite la teneur du sol en matière organique (MO) a été calculée en multipliant par un facteur de conversion de 1,72 ($OM = 1,72 OC$). La texture du sol a été déterminée selon la méthode standard de la Soil Survey Staff (1951 et 1993).

Pour la préparation des pâtes saturés 120 g de terre fine ont été placés dans un bécher de 500 ml, et de l'eau distillée a été ajouté tout en remuant avec une spatule jusqu'à ce que les critères de saturation ont été remplies (USDA, 1954). Le pourcentage de saturation (PS) a été déterminé que la teneur en eau de la pâte saturée sur une ($105\text{ }^{\circ}\text{C}$) de base du sol sec à l'étuve. L'extraction de l'extrait de saturation du sol a été faite par centrifugation à 200 g dans un Spinchron KR 15 R (Beckman Coulter, Californie, USA). Les solutions ont été prélevées dans des bouteilles après affinement de la clarté.

Les extraits de saturation de l'eau et des échantillons ont été analysés pour la conductivité électrique (CE_{25}), et le sodium, le potassium, le calcium, le magnésium, le sulfate, le chlorure, l'alcalinité et de pH. Évaluation de la CE_{25} , pH et l'alcalinité a été effectuée dans les 2 heures suivant le prélèvement d'extrait. L'alcalinité a été déterminée par la méthode de Gran (1952). Le chlorure (Cl^{-}) et de sulfate (SO_4^{2-}) anions ont été déterminées par titrimétrie ultra-enfreint spectrométrie d'acacia (Mathieu et Pieltain, 2003).

CE_{25} et le pH ont été mesurés avec une Multi paramètre 340i (WTW GmbH, Weilheim, Allemagne) instrument de mesure. Le sodium (Na^{+}) et le potassium (K^{+}) ont été analysés par photométrie d'émission de flamme à 589 nm et 766,5 nm, respectivement (Robbins et Wiegand 1990; Helmke et Sparks 1996). Détermination du Ca^{2+} et Mg^{2+} concentrations a été réalisée par titrage avec Na_2EDTA (Rodier et al., 2009). L'équivalent en carbonate de calcium et la teneur en gypse dans les échantillons de sol ont été déterminées au moyen de Nelson (1982).

III.8.4. Estimation de la teneur en eau à la capacité au champ et le point de flétrissement

Les fonctions de pédotransfert développés par Rawls et al. (1982) pour estimer la teneur en eau du sol aux potentiels capillaires spécifiques de -33 et -1500 kPa ont été utilisés pour estimer les teneurs en eau et la capacité au champ (FC) respectivement à l'équation [4], et le point de flétrissement (WP) à l'équation. [3], à la fois en cm^3 / cm^3 , où S_n (%) est le pour

cent de sable, Cy (%) est le pour cent d'argile, et l'OM (%) est le pour cent de la matière organique.

$$FC = 0,2391 \text{ à } 0,0019 \text{ Sn (\%)} + 0,0036 \text{ Cy (\%)} + 0,0299 \text{ OM (\%)} \quad (4)$$

$$WP = 0,0260 + 0,005 \text{ Cy (\%)} + 0,0158 \text{ OM (\%)} \quad (5)$$

La détermination de la densité apparente a été faite en utilisant la méthode de la motte (Soil Survey Staff, 2014) sur des échantillons de sols perturbés.

III.8.5. Les données météorologiques, cultures et données de l'irrigation

Les seuls obstacles pour l'application de SALTIRSOIL_M à l'échelle de la parcelle sont ceux dérivés de ses exigences en matière de données, qui sont énumérés dans le tableau 8.

Les données météorologiques utilisées dans les simulations ont été prises à partir de la station de bourokba Hmadna qui est située à l'Institut National de recherche agronomique El Hmadna (20 km de Relizane, 16.1 de P1 et de P2 23,9) (Fig. 1). En 2011, la quantité de pluie était de 289 mm an⁻¹, qui a été recueillie en 79 jours.

L'évapotranspiration de référence (ET0) était 1 434 mm an⁻¹ selon la méthode de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). La méthode d'irrigation dans les deux parcelles expérimentales était goutte à goutte. En outre, les deux parcelles expérimentales ont été équipées de systèmes de drainage à 1,5 m de profondeur, 90 cm et l'espacement.

La récolte en P1 était artichaut (L. le cv de Cynara. "Violet de Provence»), avec des coefficients de cultures de base (KCB) prises d'Allen *et al.* (1998), et la saison de croissance depuis le 1er Septembre 2010 jusqu'au 8 Juin 2011, soit une longueur totale de la culture de 280 jours, la couverture maximale du sol de la canopée de 75% (Fc = 0,75), et la profondeur d'enracinement maximale (SD) de 80 cm. La quantité de précipitations pendant la saison de culture était de 367 mm, qui a été recueilli dans 73 jours, et ET0 était 929 mm.

La récolte en P2 était melon (Cucumis melo var. Cantalupo Ser.), Avec Kcb aussi d'Allen *et al.* (1998), et la saison de croissance depuis le 1er Avril au 29 Juillet 2011, soit une longueur totale de la culture de 120 jours, la couverture maximale du sol de la canopée de 35% (Fc = 0,35), et SD de 60 cm. La quantité de précipitations, le nombre de jours d'irrigation et ET0 correspondent à l'année 2011, et pendant la saison des récoltes, ils étaient, respectivement, 67 mm, 20 mm et 724 jours.

Tableau 8: Données météorologiques, gestion de l'irrigation et les données sur le développement des cultures utilisées dans les simulations*

Parcelle 1 / Artichaut													
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	TOTALS
Année	2010	2010	2010	2010	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2010-2011
<i>Climat</i>													
P (mm)	4.4	63.9	66.7	17	68.6	17.5	62.4	58.6	7.4	1	0	0.2	367.7
NP (jour)	2	4.3	6	6.5	12.5	6.1	11.7	11.2	4.8	4	0	3.9	73
ET ₀ (mm)	148.7	124.6	84.6	61.4	34.8	53.2	81.8	103.2	178.6	207.1	234.8	198.5	1511.3
<i>Gestion de l'irrigation</i>													
I (mm)	56	57.9	65.5	54	29	26.2	29	28.1	15.3	3	0	0	364
NI (jour)	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0	17
<i>Développement des cultures</i>													
Fc,m	0.13	0.13	0.41	0.77	0.75	0.75	0.75	0.75	0.46	0.02	0.00	0.00	—
Kcb,m	0.15	0.15	0.50	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90	0.55	0.12	0.00	0.00	—
Parcelle 2 / Melon													
Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	TOTALS
Année	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011
<i>Climat</i>													
P (mm)	68.6	17.5	62.4	58.6	7.4	1	0	0.2	0.9	3.2	52.5	17	289.3
NP (jour)	12.5	6.1	11.7	11.2	4.8	4	0	3.9	4	4.3	10.5	6	79
ET ₀ (mm)	34.8	53.2	81.8	103.2	178.6	207.1	234.8	198.5	130.6	101.8	63.1	46.2	1433.7
<i>Gestion de l'irrigation</i>													
I (mm)	0	0	4	101	52	44	39	0	0	0	0	0	240
NI (jour)	0	0	0	3	2	2	2	0	0	0	0	0	9
<i>Développement des cultures</i>													
Fc,m	0.00	0.00	0.00	0.08	0.21	0.35	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—
Kcb,m	0.00	0.00	0.00	0.22	0.60	1.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—

*P, millimètres de pluie; NP, nombre de jours de pluie; I, millimètres d'irrigation; NI, nombre de jours d'irrigation; Fc,m, couverture du sol couvert; Kcb,m, coefficient cultural basale

III.8.6. Simulations et validation

Le modèle SALTIRSOIL_M a été appliqué pour calculer le bilan hydrique et les principales propriétés chimiques de la solution du sol à la profondeur moyenne d'enracinement à la saturation de l'eau et de l'eau de drainage, à savoir la composition ionique principale, le pH et la conductivité électrique. Deux simulations ont été réalisées: simulation 1 pour l'artichaut en P1 et simulation 2 pour le melon en P2. Une pression partielle apparente de CO₂ à l'équilibre avec l'extrait de saturation de 10-2,5 atm a été utilisée pour les deux simulations. L'évaluation de la salinité du sol étant basée sur la norme de la pâte saturée, les simulations des solutions de sol à saturation d'eau obtenues pour juin 2011 ont été comparées aux résultats des analyses expérimentales d'extraits de saturation prélevés dans le sol le même mois. Les comparaisons entre les observations et les prédictions ont été faites au moyen de diagrammes de dispersion, et en évaluant le coefficient de détermination (R²) de la ligne de prédictions (P) par rapport aux observations (O), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) en tant que pourcentage, et l'indice d'accord (IA) (Wilmott, 1982).

$$\text{RMSE} = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$\text{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| - |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

III.8.7. Estimation des quantités d'irrigation optimales

Les effets de différents programmes d'irrigation sur l'EPE ont été simulés afin d'estimer les montants mensuels d'irrigations optimales pendant la campagne agricole dans les deux parcelles expérimentales. Le calendrier d'irrigation optimale est celle qui remplit les besoins en eau des cultures tout en gardant en même temps la salinité du sol en dessous des valeurs de plantes endommagé.

Par conséquent, le respect des exigences en eau des cultures a été vérifié par le calcul du déficit mensuel de l'évapotranspiration, à savoir, la différence entre la culture et l'évapotranspiration réelle chaque mois (ETC - ETA). En conséquence, les mois avec déficit de l'évapotranspiration de la dose d'irrigation a été augmenté d'un montant égal au déficit susmentionné. Dans le cas où les irrigations ont augmenté, les simulations ont été répétées pour évaluer la salinité du sol qui aurait résulté de ce nouveau calendrier d'irrigation. Suivant en fonction de la salinité du sol résultant de la simulation précédente, les irrigations mensuelles ont été diminuées ou augmentées dans 10%. Les critères pour arrêter en

augmentant ou en diminuant les irrigations ont été basées sur l'évitement de l'eau et de la salinité de stress sur les cultures. Pour caractériser la tolérance de deux cultures à la salinité du sol le modèle seuil-pente a été utilisé avec des paramètres de $4,9 \text{ dS m}^{-1}$ et $10,7\% / \text{dS m}^{-1}$ pour l'artichaut (Shannon et Grieve, 1999), et de $2,2$ et $7,4\% / \text{dS m}^{-1}$ pour le melon (Turini, 2011). Une perte de rendement de 10% a été choisie comme la contrainte maximale admissible de salinité. Un déficit de 5 mm pour un mois seulement de l'eau a été choisi comme la contrainte maximale d'eau autorisée

Chapitre IV

Résultat et discussion

Résultat et discussion

IV. Partie 1

IV.1.1. Qualité de l'eau d'irrigation

En complément de l'analyse statistique simple faite plus haut et pour connaître les faciès chimiques des eaux souterraines de la plaine du Bas-Chélif, on a eu recours aux diagrammes de Piper (fig.18) et de Riverside 1954 (fig. 19).

Comme cela a été déduit de l'analyse statistique, le diagramme de Piper établi pour les cations et les anions montre l'existence de six types de sels dont les plus prédominants sont les chlorurés sodiques (NaCl) et les sels sulfato-sodiques (Na_2SO_4) ainsi que les sels chlorurés et sulfatés qui peuvent être calciques (CaCl_2 , CaSO_4) et/ou magnésiques (MgCl_2 , MgSO_4).

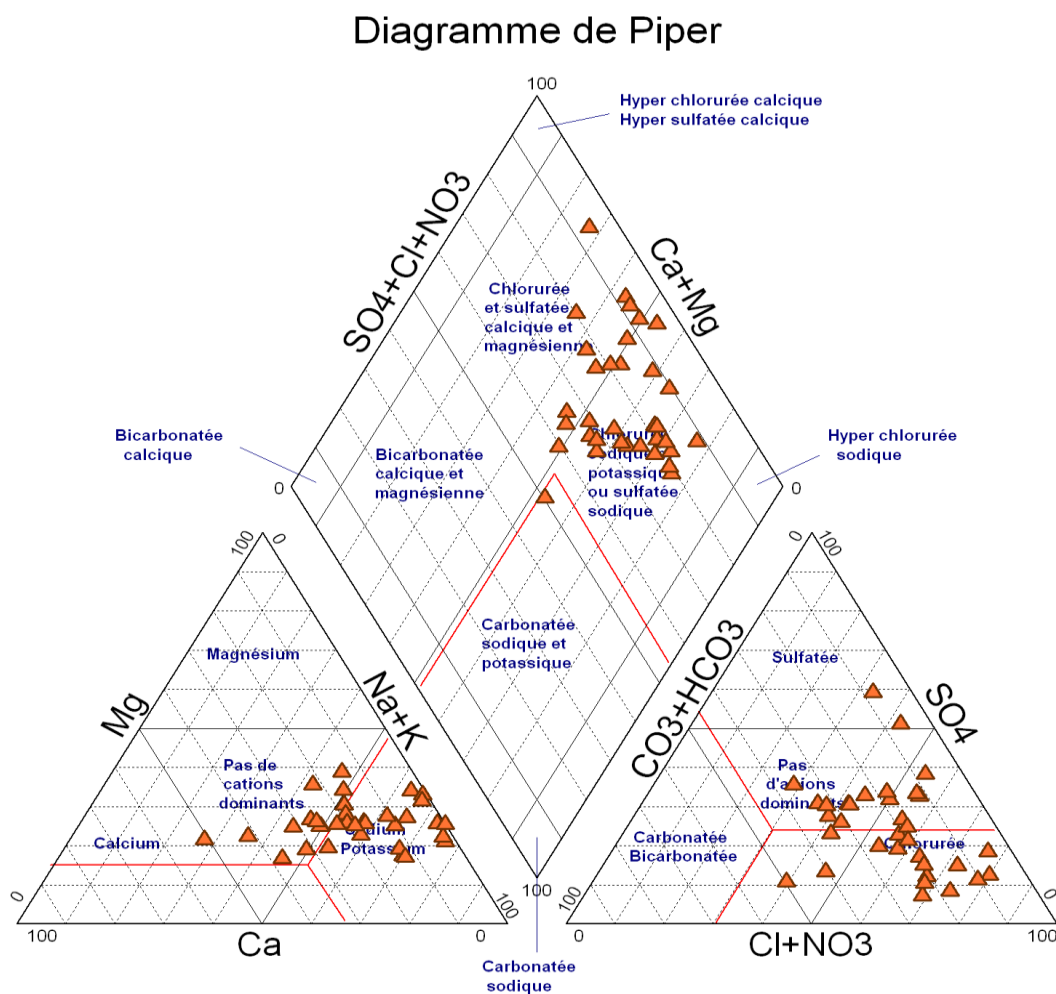


Figure 18: Diagramme de Piper établi pour les anions et les cations des eaux souterraines.

D'après le diagramme de Riverside (1954) établi pour les eaux souterraines du Bas-Chélif, il apparaît l'existence de plusieurs classes de salinité et de sodicité qui sont réparties en classes : **C 3S1, C 3S2, C4S2, C4S3 et C5S2.**

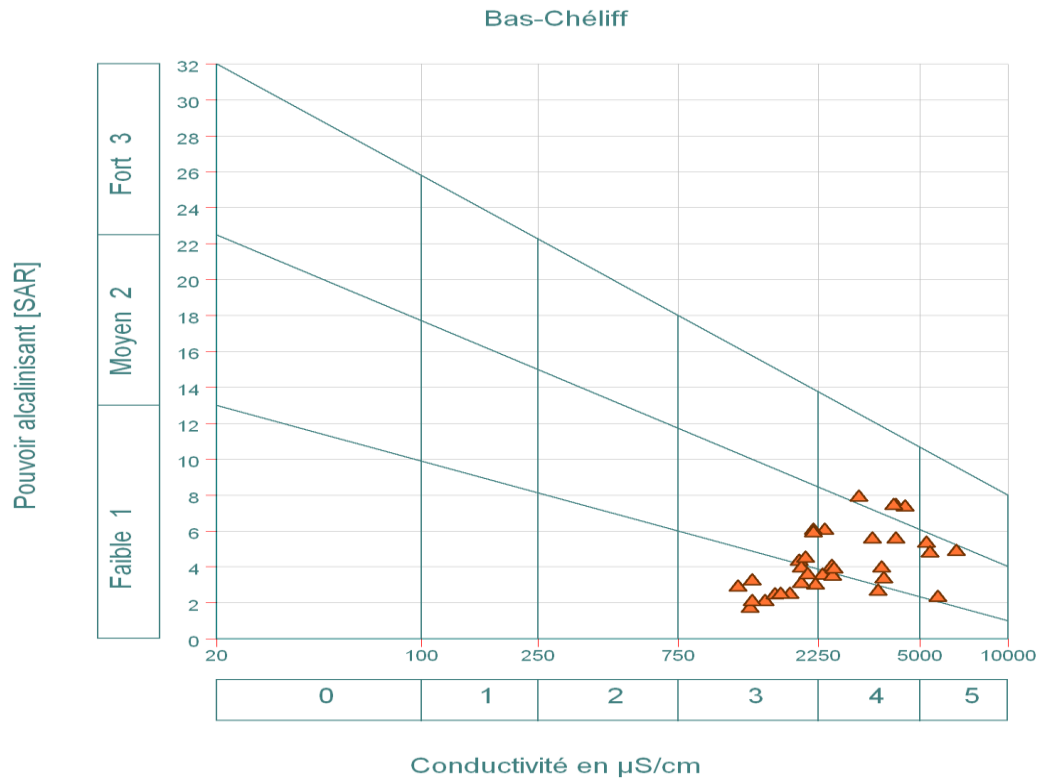


Figure 19: La projection des points sur Le diagramme de Riverside

En s'appuyant sur les interprétations des classes d'eau ressorties, on peut constater que la majeure partie des eaux de la plaine sont de mauvaise qualité en présentant des risques de salinisation élevés des sols.

IV.1.2. Evaluation de la dégradation des sols

IV.1.2.a. Evaluation de la dégradation biologique (IDB)

Une méthodologie d'analyse de la sensibilité de l'indice de dégradation biologique a été suivie.

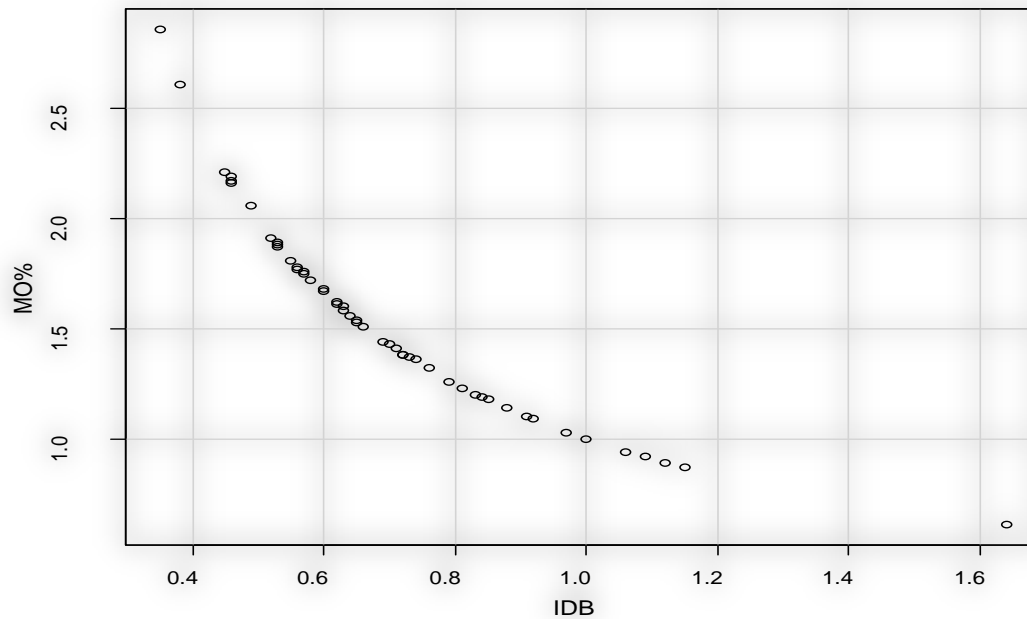


Figure 20: Résultat d'analyse de la sensibilité de l'indice de dégradation biologique par la teneur en matière organique

La teneur en matière organique a été variée dans une gamme connue à partir d'une valeur précise pour tous les sols étudiés et les variations de l'indice ont été observées. Cette figure montre qu'il y a deux grandes classes de dégradation selon la teneur en matière organique, la première classe est variée dans une gamme de 0% à 1,5% et qui représente les échantillons dégradés, la deuxième classe est variée dans une gamme de 1,5% à 2,86% et représente les échantillons non dégradés. A partir de cette observation, il est possible d'affirmer que l'indice de dégradation biologique n'a guère varié pour les sols dont la teneur en matière organique est élevée bien que les sols dont la teneur en matière organique inférieure à 1,5%.

Les sols qui ont une teneur en matière organique inférieure à 1,5% ont connu des variations plus sensibles.

Tableau 10: Classification des sols touchés par la dégradation biologique dans la plaine du Bas Chélif.

Degré de dégradation	La dégradation biologique(%)
sols faiblement dégradés	32
sols moyennement dégradés	56
sols dégradés	12

Les résultats obtenus montrent que 12% des sols étudiés ont été classés comme ayant une forte dégradation biologique (tableau 10). On y trouve les périmètres de Ouarizane et de H'madna (fig. 21). Ceci est dû essentiellement à la pauvreté de ces périmètres en matière organique : il y a peu d'accumulation de dépôts organiques et la teneur du sol en matières organiques est faible. Cette matière organique disparaît rapidement, tandis que 56% avaient un niveau de dégradation moyen tel que le périmètre de Djédiouia et une partie de périmètre de H'madna, et 32% avaient une dégradation faible et qui se trouve dans le périmètre de Oued Rhiou. Cette dégradation est en partie causée par les pratiques agricoles : labours, irrigation, système de cultures sous un climat semi-aride à aride.

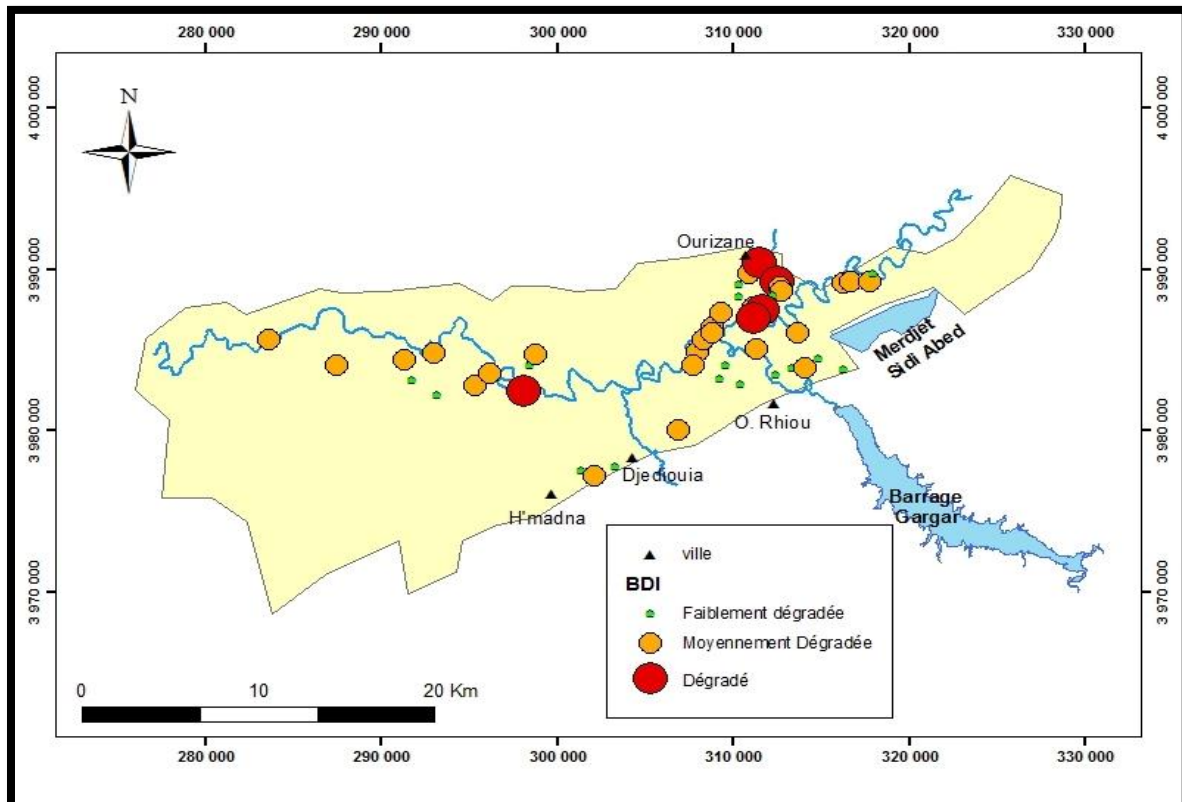


Figure 21: Carte de dégradation biologique des sols étudiés de la plaine du Bas-Chélif (nos travaux).

IV.1.2.b. Evaluation de la dégradation physique (IDP)

Les variables considérées dans cette analyse étaient les suivants: la teneur en eau à la capacité au champ, la stabilité d'agrégation et la teneur en argile.

Tableau 11 : Matrice de corrélation linéaire entre les paramètres physique du sol et l'indice de dégradation physique

	Argile %	CC	MWD	IDP
Argile %	1			
CC	0,92778813	1		
MWD	0,47127079	0,4923969	1	
PDI	-0,81704613	-0,79720211	-0,71912427	1

Le Tableau 11 montre l'existence d'une relation linéaire négative entre les paramètres physique (la teneur en eau à la capacité au champ, la stabilité d'agrégation et la teneur en argile) et l'indice de dégradation physique. Pour mieux comprendre cette relation nous avons fait la figure.22 qui représente les résultats d'analyse de la sensibilité de l'indice de dégradation physique.

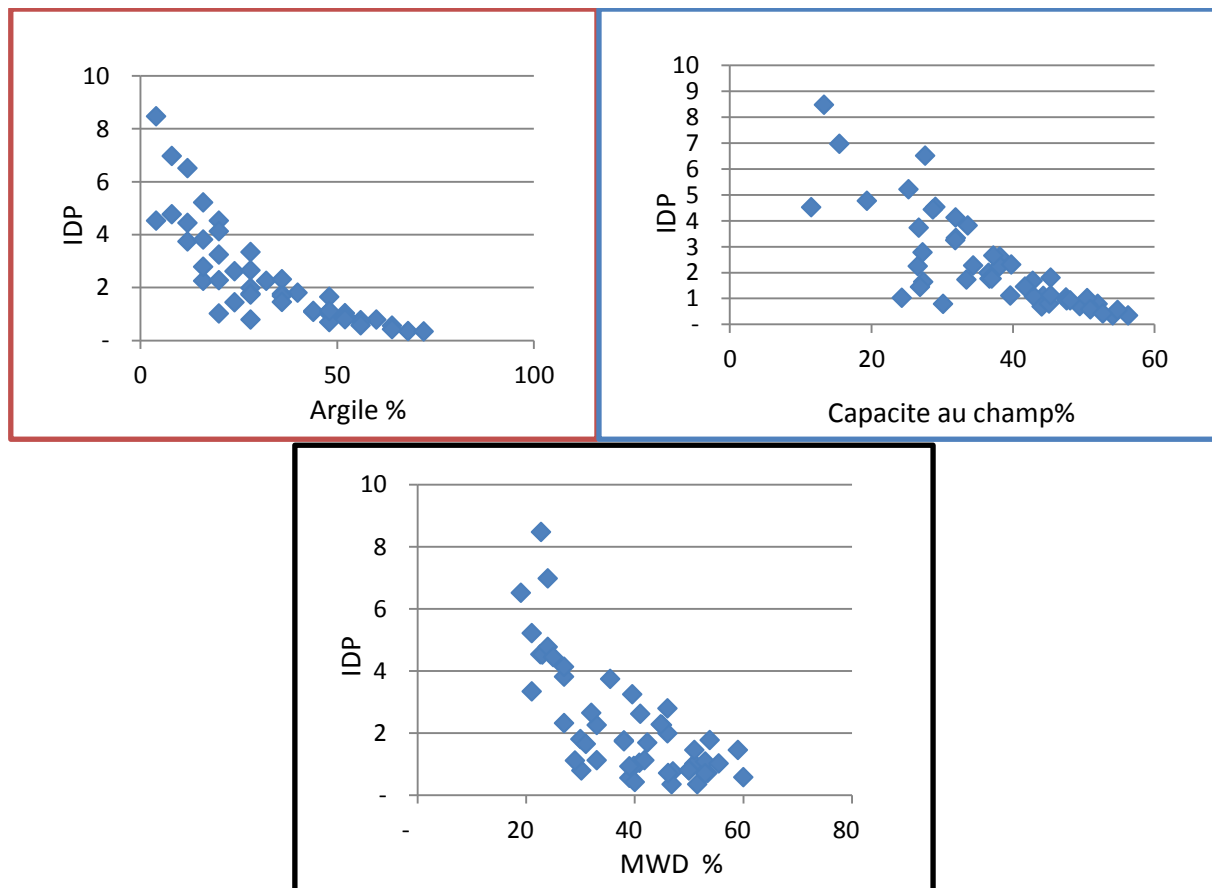


Figure 22: Résultat d'analyse de la sensibilité de l'indice de dégradation physique par les paramètres physique (la teneur en eau à la capacité au champ, la stabilité structurale et la teneur en argile).

On a observé que la teneur en eau à la capacité au champ, la stabilité structurale et la teneur en argile sont les variables les plus influentes sur l'indice de dégradation physique du sol Fig. (22). Cependant, une petite variation dans la stabilité structurale entraîne de grandes variations dans l'indice de dégradation physique Cette observation nous a donné une information importante sur l'influence de la stabilité structurale sur la dégradation physique du sol de la plaine du Bas-Cheliff.

Tableau 12: Classification des sols touchés par la dégradation physique dans la plaine du Bas Chéiff.

Degré de dégradation	La dégradation physique (%)
sols non dégradés	40
sols faiblement dégradés	28
sols moyennement dégradés	24
sols dégradés	6
sols très dégradés	2

Les résultats obtenus montrent que 32% des sols étudiés ont été classés comme ayant une moyenne à forte dégradation physique (Tableau 12).

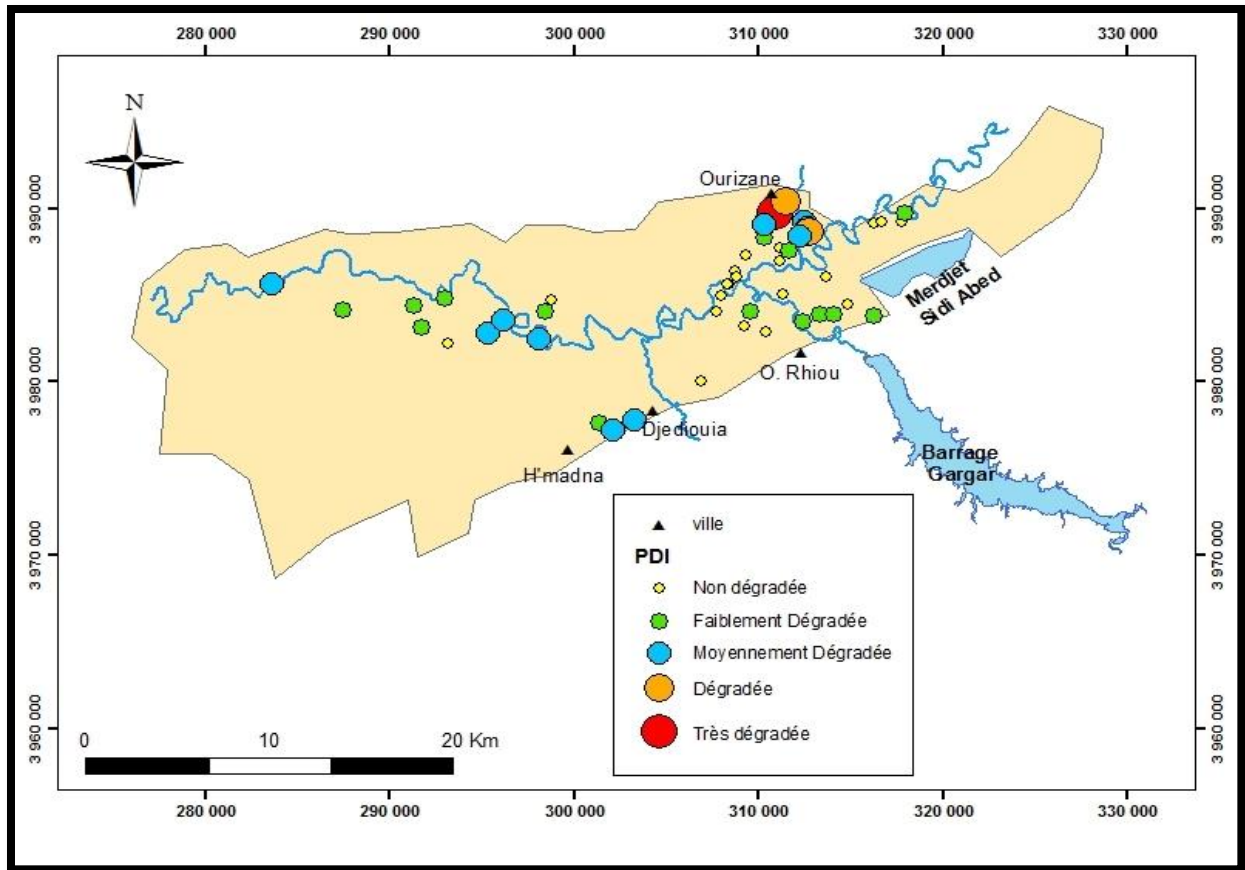


Figure 23: Carte de dégradation physique des sols étudiés de la plaine du Bas-Chélif (nos travaux).

En raison de leur faible stabilité structurale et un grand indice de croute, tandis que 24% des échantillons avaient un niveau de dégradation moyen tel que le périmètre de Djédiouia, périmètre de H'madna et périmètre de Ouarizane. De plus, 68% des échantillons sont des sols non dégradés et une dégradation faible et qui se trouvent dans les périmètres de Oued Rhiau, H'madna et une partie de périmètre de Ouarizane, Ceci est dû essentiellement à une grande stabilité structurale, une texture fine et un petit indice de croute. Dans les zones où il y a un indice de dégradation physique élevé, nous avons une manque de labour de conservation, la gestion des résidus, le paillage et les techniques pour accroître le contenu en matière organique qui permettrait d'atténuer la dégradation des sols.

IV.1.3. Impact de l'eau de l'irrigation sur les indices de dégradation des sols

Après la combinaison entre la qualité de l'eau de l'irrigation et les indices de dégradation, il a constaté que les périmètres les plus dégradés biologiquement sont les périmètres irrigués par des eaux de classe C3S1 et C3S2. Cela est accentué par l'absence d'un réseau de drainage ou le dysfonctionnement des drains lorsqu'il existe. Au contraire, pour la

dégradation physique ces classes coïncident avec une bonne stabilité des sols ce qui signifie que la dégradation physique des sols est faible dans ce dernier cas.

IV.1.4. Analyse d'ACP

Pour voir si il y a une relation entre la qualité des eaux d'irrigation (CE, pH) de la plaine du Bas-Chéiff et la dégradation physique et chimique des sols irrigués. Une analyse statistique multiparamétrique par l'application de la méthode d'analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée.

Les résultats de l'ACP étant influencés par les différences d'unités des variables (Philippeau, 1986), nous allons donc donner, dans ce travail, le même poids aux différentes variables d'où l'utilité de travailler sur des données centrées et réduites (normées), c'est à dire sur des valeurs des écarts à la moyenne, divisées par leurs écart-types (valeurs standardisées).

La matrice de corrélation montre une faible relation entre la conductivité électrique et les indices de dégradation physique et biologique. Ceci pourrait expliquer par le faible impact de la salinité des eaux sur les deux indices

Tableau 13 : Matrice de corrélation

	CE ds/m	pH	BDI	PDI
CE ds/m	1,00			
pH	-0,19	1,00		
BDI	-0,03	-0,02	1,00	
PDI	0,10	0,02	-0,02	1,00

Le tableau (14) montre que les trois premiers axes factoriels expriment **80.7 %** de la variance totale dont le premier explique **30.13 %** et **26.04 %** pour le second, **24.53 %** pour le troisième. Cette variance est suffisante pour fournir des renseignements sur les relations qui existent entre les indices de la dégradation des sols (physique et biologique) et les deux paramètres de la qualité de l'eau (CE, pH) dans la plaine du Bas-Chéiff. Le pourcentage cumulé de la variance exprimée par les deux premiers facteurs **56.18 %** et les regroupements des variables dans le plan F1-F2 rend compte de façon insuffisante de leur structure. Notre analyse a été poussée jusqu'aux trois premiers axes exprimé par une information totale de **80.70 %**.

Tableau 14 : valeurs propre

Trace de la matrice: **4.00000**

Numéro	Valeur propre	Pourcentage	Pourcentage cumulé
1	1,2053	30,13	30,13
2	1,0418	26,04	56,18
3	0,9812	24,53	80,70
4	0,7718	19,30	100,00

Le tableau (15) montre que les variables qui participent fortement à l'axe 1 sont les variables qui ont des valeurs des coordonnées les plus élevées en valeurs absolue ; cette composante principale représente l'axe de la salinité et le pH. C'est l'axe de la minéralisation et de l'alcalinité. Pour le deuxième et le troisième axe les variables qui participent le plus à leur formation sont respectivement l'indice de la dégradation biologique (BDI) et l'indice de la dégradation physique (PDI) ce qui montre les axes de la dégradation du sol.

Tableau 15 : Corrélations des variables actives avec les facteurs.

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
CE ds/m	-0,79	-0,06	0,00	-0,60
pH	0,68	-0,45	-0,19	-0,54
BDI	0,07	0,60	-0,79	-0,10
PDI	-0,32	-0,69	-0,56	0,32

Partie 2

IV.2.1. Les propriétés du sol

Dans les deux parcelles, le sol n'était pas pierreux, mais de texture argileuse, fortement compacté, de faible à très faible teneur en matière organique, modérément calcaire et légèrement gypsifère (tableau 12).

Le sol de la parcelle 1 était légèrement salin ($CE = 2,48 \text{ dS m}^{-1}$) et non-sodique ($SAR = 2$), tandis que le sol de la parcelle 2 variait de modérément à hautement salin ($CE = 8,05 \text{ dS m}^{-1}$) et légèrement sodique ($SAR = 4$). Parce que la salinité du sol entraînant une baisse de rendement de 10% est de $5,83 \text{ dS m}^{-1}$ et non-sodique ($SAR = 2$).

Le sol de la parcelle 2 variait de modérément à hautement salin ($CE = 8,05 \text{ dS m}^{-1}$) et légèrement sodique ($SAR = 4$). Parce que la salinité du sol entraînant une baisse de rendement de 10% est de $5,83 \text{ dS m}^{-1}$.

Tableau 16: Propriétés du sol dans les deux parcelles expérimentales *

Prop.	Prof cm	Prof /cm	S (%)	L (%)	A(%)	PS / g g⁻¹	CC / cm³ cm⁻³	PF / cm³ cm⁻³	DA / g cm³	FG (%)	CaCO₃	MO (%)	Gy (%)	CE / dS m⁻¹	SAR
p															
1	0	80	12.0	36.0	52.0	0.584	0.457	0.314	1.75	0.0	12.6	1.8	12.2	2.48	2.0
2	0	60	12.0	40.0	48.0	0.563	0.434	0.289	1.88	0.0	16.6	1.5	10.1	8.05	4.0

* S, teneur en sable; L, teneur en limon; A, teneur en argile; PS, pourcentage de saturation; CC, teneur en eau volumétrique à la capacité du champ; PF, teneur en eau volumétrique au point de flétrissement; DA, densité apparente; FG, teneur en fragments grossiers; CaCO₃, équivalent en carbonate de calcium; MO, contenu de matière organique; Gy, contenu en gypse; CE, conductivité électrique à 25C dans l'extrait de saturation; SAR, taux d'adsorption de sodium dans l'extrait de saturation.

IV.2.2. La qualité d'eau

L'eau utilisée pour irriguer l'artichaut était légèrement saline, non-sodique (RAS = 2,1), non alcaline (RSC = -10 méq L⁻¹) et avec une teneur modérée en chlorures, tandis que l'eau utilisée pour irriguer les melons 2 était modérément à hautement salin, non-sodique (SAR = 3,9), non alcalin (RSC = - 47 méq L⁻¹) avec une forte concentration de chlorure (Tableau 13). L'eau dans la parcelle 1 était représentative de la salinité des eaux souterraines la plus commune dans la zone d'étude, tandis que l'eau dans la parcelle 2 représentait l'extrême valeur de la salinité des eaux souterraines dans la zone. À l'inverse, les eaux des deux parcelles ne sont pas représentatives de la sodicité des eaux souterraines, qui est généralement plus élevée, avec un SAR allant de 5 à 31 (Bradai et al., 2012).

Les erreurs de la balance de charge des analyses de l'eau étaient de 4,7 et 1,5% en vedette par la sous-estimation des teneurs en anions. Cette sous-estimation est probablement due à la non-détermination des teneurs en nitrates, qui serait à peu près de 2 mmol L⁻¹ dans les deux échantillons. Par conséquent, en raison des incertitudes de la méthodologie les valeurs analytiques sont supposées être acceptables en ce qui concerne les normes. (Visconti 2009)

Selon la spéciation chimique réalisée avec le logiciel SALSOLCHEMIS, les deux eaux étaient en équilibre avec des pressions partielles de CO₂ de 0,022 et 0,014 atm (Visconti, 2009). Selon les produits d'activité ionique (IAP), le carbonate de calcium et le gypse, les deux eaux étaient saturées en calcite (pIAPCaCO₃ = 8,41 et 8,31 respectivement), et de sous-saturé à légèrement sous-saturé dans le gypse (pIAPCaSO₄ · 2H₂O = 5,46 et 4,82 respectivement).

Tableau 17: Qualité de l'eau dans les deux parcelles expérimentales *

Ion	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Alk.	pH	CE ₂₅
P										
1	5.8	0.1	5.4	2.2	6.9	nd	3.6	5.1	7.10	1.80
2	20.1	0.06	10.8	15.7	21.4	nd	21.9	5.8	7.30	5.52

* Tous les ions en mmol L⁻¹, l'alcalinité (Alk.) en mmolc L⁻¹ et la conductivité électrique à 25 °C (CE₂₅) en dS m⁻¹; nd, pas de données

IV.2.3. Simulation du bilan de l'eau du sol dans les parcelles

Dans la parcelle d'artichaut, l'évapotranspiration réelle (ETa) s'élevait à 601 mm et l'évapotranspiration des cultures (ETc) à 687 mm. Le déficit hydrique de 86 mm s'est produit principalement en septembre (37 mm) et en juin (47 mm), c'est-à-dire le premier et le dernier mois de la culture. En septembre, la majeure partie du sol n'était pas encore couverte par la canopée d'artichaut en raison du stade précoce du développement de la plante, et pour cette raison, la plupart de l'évapotranspiration des cultures était en réalité évaporée du sol nu entre les plantes. La récolte a été retirée le 8 juin, après quoi la majeure partie de l'évapotranspiration des cultures provenait du sol nu. Pendant le reste de la saison de croissance, le déficit hydrique n'a atteint que 2 mm et nous pouvons donc supposer que la culture n'a jamais été soumise à un stress hydrique. La somme de l'irrigation et des précipitations pendant la saison de croissance, qui était de 728 mm, soit 127 mm au-dessus de l'ETa, a non seulement fait évaporer l'évapotranspiration, mais aussi fourni 109 mm d'eau en dessous de la profondeur maximale d'enracinement. cm. Par conséquent, la fraction de lixiviation était de 15%. Sous les climats méditerranéens, les précipitations annuelles présentent habituellement deux pics, une chute primaire et un pic secondaire au printemps. En 2010- 2011, un sommet (131 mm) s'est produit en octobre-novembre et l'autre (121 mm) en mars-avril. Un autre petit pic (69 mm) s'est produit en janvier. Les précipitations d'automne et d'hiver ont aidé à produire les 109 mm d'eau de lessivage. Au printemps, il n'y a pas eu de lessivage en raison de l'ETc élevé provoqué par (i) le stade avancé du développement de la culture et par la suite le Kcb élevé, et (ii) l'ET₀ remarquablement élevé au printemps. Dans la parcelle 2, dans laquelle les melons étaient cultivés, les ETa s'élevaient à 291 mm et les ETc à 392 mm pendant la saison de croissance. Un total de 101 mm de déficit hydrique est survenu en mai (13 mm), juin (49 mm) et juillet (39 mm), ce qui est assez élevé pour produire un niveau élevé de stress hydrique chez les plantes à ces stades importants du développement et la maturation des fruits. Irrigation et précipitations pendant la période de croissance, qui était de 307 mm, fourni 25 mm d'eau de lessivage. La fraction de lixiviation correspondante pour toute la saison était de seulement 8%, ce qui semble très faible compte tenu de la forte salinité de l'eau d'irrigation dans cette parcelle.

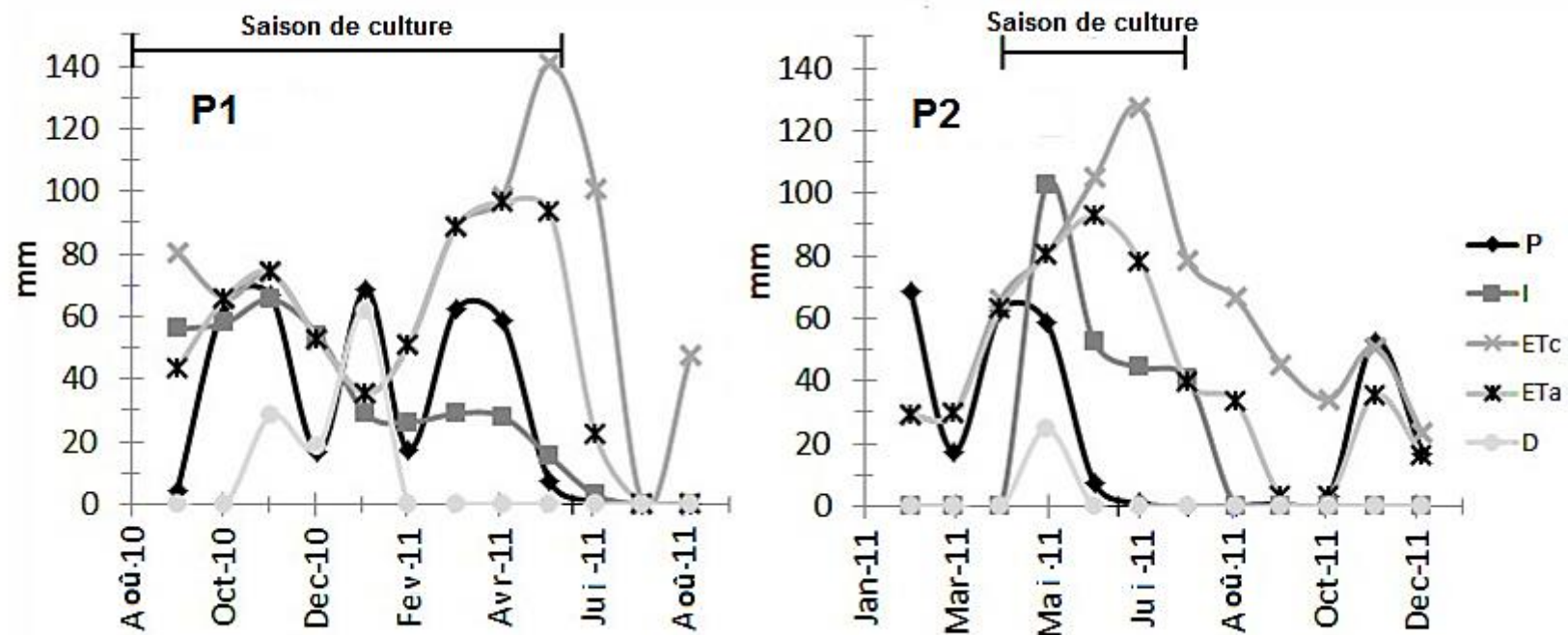


Figure 24: Séquences mensuelles du bilan hydrique du sol durant les campagnes 2010-2011 simulées par SALTIRSOIL_M dans la parcelle d'artichaut (à gauche) et la parcelle de melon (à droite) (P: pluie, I: irrigation, ETc: évapotranspiration des cultures, Eta évapotranspiration des cultures, Eta: évapotranspiration réelle, D: drainage)

IV.2.4. Salinité simulée et observée dans les parcelles

La figure 25 montre les teneurs en ions principaux simulées et observées et CE plus le pH des pâtes saturées. Dans le cas de l'artichaut, la droite de régression entre les valeurs observées et prédites a un coefficient de détermination de 0,95, une erreur quadratique moyenne de 23% et un indice d'accord de 0,98. Dans le cas du melon, le R2 est de 0,90, le RMSE de 84% et le IA de 0,97. Dans la courbe correspondant à la parcelle d'artichaut, les CE observées et prédites diffèrent dans le second chiffre significatif, c'est-à-dire 2,48 et 2,94 dS m⁻¹, respectivement. Dans la parcelle de melon, les CE observées et prédites diffèrent également dans le deuxième chiffre significatif, c'est-à-dire 8,05 et 8,66 dS m⁻¹. La salinité du sol a donc été un peu surestimé par SALTIRSOIL_M. Dans la parcelle d'artichaut, les ions les plus abondants étaient le calcium et le sulfate, qui reflètent la présence remarquable de gypse dans le sol et l'équilibre entre le calcium et le sulfate dans l'eau d'irrigation (tableaux 12 et 13). Le calcium et le sulfate ont été suivis respectivement par le sodium et le chlorure cations et anions les plus abondants. Dans la parcelle de melon, les ions les plus abondants étaient le sulfate, le chlorure, le sodium et le magnésium, reflétant le fait que ces quatre étaient aussi les ions les plus abondants dans l'eau d'irrigation (Tableau 14). Fait intéressant, malgré la présence de gypse dans le sol en P2, les concentrations déséquilibrées de sulfate et de calcium, avec un excès de sulfate dans l'eau d'irrigation, réduisent la concentration de calcium dans l'extrait de saturation en raison d'un effet ionique commun sur la dissolution du gypse aux sulfates. Les différentes concentrations d'ions dans l'extrait de saturation ont été simulées de façon satisfaisante par le modèle, ce qui signifie que (i) la principale source de transfert des sels vers le sol est l'eau d'irrigation en plus du gypse et (ii) que le régime hydrique du sol est à la baisse.

Le modèle SALTIRSOIL_M étant basé sur ces deux hypothèses, cela nous a donné confiance pour utiliser ultérieurement le modèle dans le but de planifier l'irrigation pour économiser l'eau et contrôler la salinité dans les deux parcelles. Une concordance entre les valeurs simulées et observées a confirmé que SALTIRSOIL_M produit des résultats raisonnables lorsque les exigences de données et d'étalonnage sont limitées.

Voilà pourquoi il constitue le noyau d'un système d'aide à la décision en ligne pour une région méditerranéenne semi-aride en Espagne similaire à la plaine du Cheliff, le DSS-SALTIRSOIL (<http://agrosal.ivia.es/>).

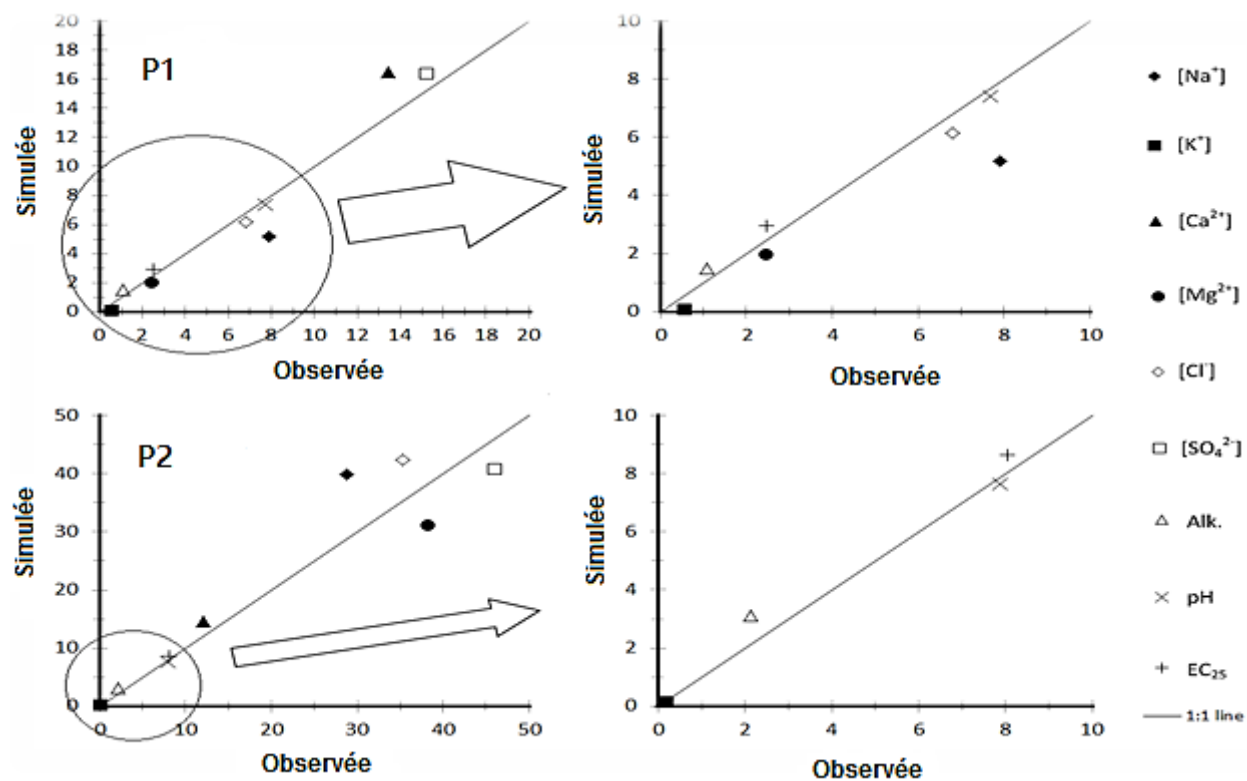


Figure 25: Diagrammes de dispersion des concentrations simulées ou observées d'ions principaux, pH et CEe dans les parcelles d'artichaut (en haut) et de melon (en bas) en juin 2011. Tous les paramètres sont pour l'extrait de saturation sauf le pH et la CE, pour la pâte saturée, tous les ions mmol L⁻¹, alcalinité (Alk) en mmol_c L⁻¹ et CE₂₅ en dS m⁻¹

IV.2.5. Estimation des quantités d'irrigation optimales

Selon les bilans hydriques et le niveau de salinité du sol, les artichauts n'étaient soumis ni au manque d'eau ni à l'excès de salinité alors que le melon souffrait des deux. Par conséquent, dans le graphique 25, les valeurs de la CE moyennes entre une profondeur de 0 et 80 cm qui auraient résulté de l'irrigation avec moins d'eau, à savoir 90, 80, 70 et 60% du taux d'irrigation réel ont été simulées (Tableau 18). En revanche, dans la parcelle 2, les valeurs CE moyennes entre une profondeur de 0 et 60 cm qui auraient résulté de l'irrigation avec plus d'eau, c'est-à-dire 100, 120, 140 et 160% ont bien été simulées (tableau 18).

Tableau 18: Simulation de différents calendriers d'irrigation et leurs effets sur la salinité des sols du Bas Cheliff

Parcelle 1 / Artichaut													
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	TOTALS
Année	2010	2010	2010	2010	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2010-2011
100% (mm)	56.0	57.9	65.5	54.0	29.0	26.2	29.0	28.1	15.3	3.0	0.0	0.0	364
90% (mm)	50.4	52.1	59.0	48.6	26.1	23.6	26.1	25.3	13.8	2.7	0.0	0.0	328
80% (mm)	44.8	46.3	52.4	43.2	23.2	21.0	23.2	22.5	12.2	2.4	0.0	0.0	291
70% (mm)	39.2	36.5	41.3	34.0	18.3	16.5	18.3	17.7	9.6	1.9	0.0	0.0	233
60% (mm)	33.6	27.8	31.5	25.9	13.9	12.6	13.9	13.5	7.3	1.4	0.0	0.0	181
Parcelle 2 / Melon													
Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec	TOTALS
Année	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011	2011
160% (mm)	0.0	0.0	0.0	206.8	105.3	89.2	81.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	483
140% (mm)	0.0	0.0	0.0	180.7	92.0	77.9	71.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	422
120% (mm)	0.0	0.0	0.0	155.0	78.9	66.8	61.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	362
100% (mm)	0.0	0.0	0.0	129.3	65.8	55.8	51.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	302

Dans la parcelle 1, si 70% du taux d'irrigation de l'agriculteur, soit 233 mm an^{-1} , avait été appliqué à la culture, elle aurait souffert de pénurie d'eau pendant la campagne, notamment en décembre et avril avec respectivement 6 et 10 mm du déficit en eau. Au contraire, si 80% du taux d'irrigation de l'agriculteur, soit 291 mm an^{-1} , avait été appliqué, des déficits supérieurs à 5 mm n'auraient pas été observés chaque mois. En outre, en utilisant 80% du taux d'irrigation de l'agriculteur, le maximum de la CE mensuel aurait été de $3,24 \text{ dS m}^{-1}$, c'est-à-dire bien en dessous du seuil de la CE pour l'artichaut ($4,9 \text{ dS m}^{-1}$). Ensuite, l'optimisation du programme d'irrigation dans cette parcelle peut être effectuée sur la base des besoins en eau, et 290 mm an^{-1} aurait été un taux d'irrigation adéquat pour cette parcelle au cours de la saison 2010-2011. Cela lixiviation de seulement 8% par rapport à la fraction de lixiviation de 15% réellement produite, c'est-à-dire que la production d'eau de drainage serait tombée de 109 à seulement 50 mm an^{-1} . Avec la diminution de l'eau de drainage les sels solubles lessivés de la parcelle auraient également diminué de $4,4 \text{ Mg ha}^{-1}\text{an}^{-1}$ à $2,6 \text{ Mg ha}^{-1}\text{an}^{-1}$. La dose d'irrigation habituelle utilisée pour les artichauts varie entre 300 et 700 mm.an^{-1} en utilisant l'irrigation goutte à goutte. En fait, dans cette étude de cas sur l'évapotranspiration des cultures (ETc), la dose était de 687 mm pendant la saison de culture de l'artichaut 2010-2011. Cependant, comme les précipitations au cours de la même période étaient de 387 mm, elles fournissaient à peu près la moitié des besoins en eau des cultures, permettant ainsi une économie d'eau d'irrigation. Les précipitations annuelles dans le bas Chélib au cours de la période de référence 1985-2010, soit moins que pendant la campagne agricole 2010-2011. Un taux général d'irrigation entre 310 et 480 mm.an^{-1} , distribué dans 30% en septembre et octobre, 35% en novembre et décembre, 15% en janvier et février, 15% en mars et avril et, enfin, 5% en mai et juin peuvent être recommandés. Dans la parcelle 2, dans le cas d'une augmentation du taux d'irrigation de 60% jusqu'à 483 mm.an^{-1} , le déficit hydrique aurait été évité. Néanmoins, la salinité moyenne du sol pendant la saison de culture aurait été élevée ($6,31 \text{ dS m}^{-1}$), ce qui signifie que le stress de la salinité aurait pu réduire le rendement potentiel du melon à 70%. Pour obtenir 80 ou 90% de rendements potentiels, la salinité moyenne du sol aurait été respectivement de 4,90 et $3,55 \text{ dS m}^{-1}$. Les taux d'irrigation requis pour atteindre ces rendements ciblés peuvent être estimés à partir de la relation linéaire entre la moyenne de la CE et l'inverse du taux d'irrigation qui a été obtenu dans les simulations de la culture de melon, soit $CE = -2,5 + 4200 I^{-1}$.

Selon ces calculs, des taux d'irrigation de 570 et 696 mm auraient dû être appliqués pour obtenir respectivement des rendements de 80 et 90%. La dose d'irrigation habituelle

utilisée pour le melon est comprise entre 300 et 500 mm an⁻¹ en utilisant l'irrigation goutte à goutte. L'utilisation de 570 et surtout de 696 mm an⁻¹ d'eau d'irrigation ne peut pas être considérée comme durable dans la zone. En outre, les taux d'irrigation requis pour des rendements en melon de 80-90% conduiraient à 190-300 mm an⁻¹ d'eaux de drainage chargées de 20-26 Mg.ha⁻¹ an⁻¹ de sels solubles. Ces quantités élevées de sels lessivés de la parcelle auraient un effet notable hors site avec des conséquences néfastes pour les utilisateurs d'eau en aval. Deux recommandations alternatives d'irrigation et de gestion des cultures peuvent donc être faites pour une culture durable dans cette parcelle. La première recommandation serait un taux général d'irrigation d'environ 480 mm an⁻¹ pour éviter le stress hydrique et obtenir au moins 70% de rendement en melon, soit 13% de plus que le rendement estimé pour 2011. Des rendements de 70% seulement seraient acceptables pour la culture du melon car, en conséquence d'un stress modéré de salinité du sol, la teneur totale en sucres solubles des melons augmente, et le pourcentage de fruits mous non commercialisables diminue (Bustan et al., 2005). La commercialisation du melon augmente, compensant ainsi les rendements inférieurs dans les sols affectés par le sel. Dans ce cas, l'eau d'irrigation devrait être distribuée mensuellement de la manière suivante: 35% en avril, 20% en mai, 30% en juin et 15% en juillet. Ce calendrier donnerait encore une LF de 19% avec 103 mm.an⁻¹ d'eaux de drainage chargées de 15 Mg.ha⁻¹.an⁻¹ de sels solubles. Une deuxième alternative pour la gestion durable de cette parcelle serait de cultiver des cultures plus tolérantes, par exemple l'artichaut ou l'orge.

Il est important de noter que pour l'artichaut et le melon, les dates et les quantités d'irrigation spécifiques au cours de chaque mois doivent être planifiées en fonction d'autres critères tels que l'expertise des agriculteurs, les capteurs, etc, en plus de la modélisation avec SALTIRSOIL_M. de cette façon, la modélisation complète les méthodes traditionnelles et / ou modernes afin d'optimiser l'irrigation goutte à goutte. .

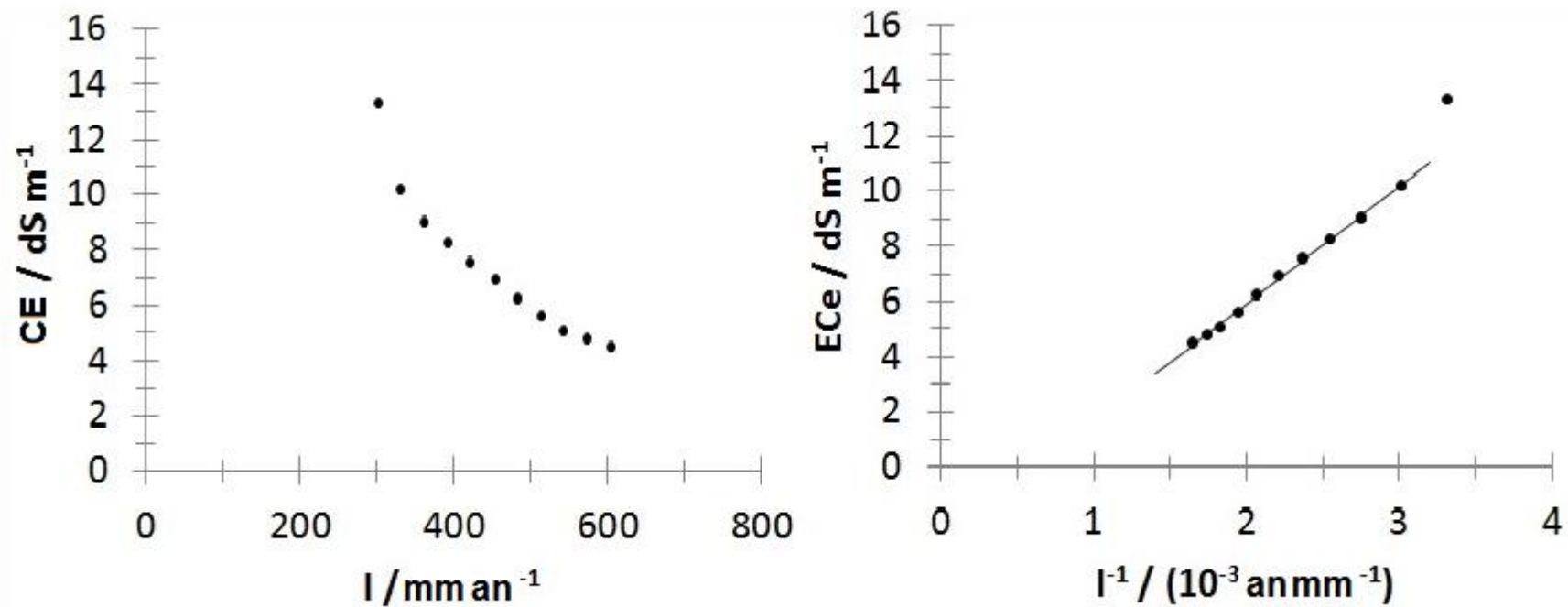


Figure 26: la CE moyenne du sol dans la parcelle de melon pendant la saison de culture par rapport au taux d'irrigation simulé par SALTIRSOIL_M (à gauche), et par rapport au taux d'irrigation inverse

IV.2.6. Évaluation de la qualité des eaux de drainage simulée pour l'irrigation.

Tableau 19 : la qualité de l'eau de drainage simulée.

Drain	sodium / mM	potassium / mM	calcium / mM	magnésium / mM	chlorure / mM	sulfate / mM	alcalinité / mM	pH	EC ₂₅ / dSm
D1	10,71	0,12	18,99	4,06	12,69	16,18	1,54	7,40	3,71
D2	216,37	0,64	13,75	169,01	230,37	135,72	6,53	7,87	30,73

Tableau 20 : Matrice de corrélation de la qualité des eaux de drainage simulée pour l'irrigation :

Variabes	sodium / mM	potassium / mM	calcium / mM	magnésium / mM	chlorure / mM	sulfate / mM	alcalinité / mN	pH	EC ₂₅ / dSm
sodium / mM	1	0,977	0,094	0,977	0,977	0,477	0,531	0,523	0,680
potassium / mM	0,977	1	0,094	0,977	0,977	0,477	0,531	0,523	0,680
calcium / mM	0,094	0,094	1	0,094	0,094	0,698	0,565	0,628	0,586
magnésium / mM	0,977	0,977	0,094	1	0,977	0,477	0,531	0,523	0,680
chlorure / mM	0,977	0,977	0,094	0,977	1	0,477	0,531	0,523	0,680
sulfate / mM	0,477	0,477	0,698	0,477	0,477	1	0,979	0,993	0,039
alcalinité / mN	0,531	0,531	0,565	0,531	0,531	0,979	1	0,993	0,032
pH	0,523	0,523	0,628	0,523	0,523	0,993	0,993	1	0,025
EC ₂₅ / dSm	0,680	0,680	0,586	0,680	0,680	0,039	0,032	0,025	1

IV.2.5. a. Interrelation ionique

Cl contre Na, Ca, Mg et K : Les données du tableau illustrent la relation entre Cl et les cations majeurs. La relation entre Cl et Na, Mg et K est très forte comme le montre la valeur élevée du coefficient de détermination ($R^2 = 0,977$) suivie d'une faible relation entre Cl contre Ca ($R^2 = 0,094$), dans l'eau de drainage simulée. Cela indique que l'ordre des principaux sels dans l'eau de drainage est un indice des constantes de solubilité du sel. Les constantes de solubilité du sel de Na, Mg et K sont très élevées par rapport au Ca.

SO₄ contre Na, Ca, Mg et K : Une matrice de corrélation a été effectuée pour déterminer la relation entre SO₄ et d'autres cations majeurs (Na, Ca, Mg et K) dans l'eau de drainage simulée du drain D1 (tableau). L'ion SO₄ a une forte relation avec Ca ($R^2 = 0,698$) par rapport aux ions Mg, Na et K ($R^2 = 0,477$). Cela indique que SO₄ est fortement associé à l'ion Ca ce qui rend l'ion de sel CaSO₄ comparables aux sels MgSO₄ et Na₂SO₄. En d'autres termes, l'eau de drainage du drain D-1 est dominée par le sel CaSO₄, suivis des sels de MgSO₄ et Na₂SO₄. Cela peut être dû à la différence dans les constantes de solubilité de différents sels en association avec différents cations majeurs.

EC contre Cl et SO₄ : Les données du tableau ont indiqué une augmentation linéaire de la teneur en Cl ($R^2 = 0,680$) par rapport à la teneur en SO₄ ($R^2 = 0,039$) et il y avait une augmentation de la salinité totale de l'eau de drainage dans la vidange de drain D1 (tableau). Cette variation peut être due à l'ajout de sel dominant Na (NaCl) dans l'eau de drainage, car l'eau d'infiltration est collectée à partir de terres adjacentes à forte teneur en sel avec des sels élevés de NaCl. Les données indiquent également que la majeure partie de la salinité de l'eau de drain est dominée par l'ion Cl comparé à l'ion sulfate en raison de la différence de constante de solubilité. (Plus élevée pour l'ion Cl que pour l'ion SO₄).

Alcalinité contre Ca : Relation forte entre Ca et l'alcalinité ($R^2 = 0,565$). Le résultat montre que l'alcalinité est fortement associée au cation Ca par rapport aux autres cations.

IV.2.5.b. Classification des eaux de drainage

On peut voir sur le diagramme de piper (Fig.27) que l'eau de drainage de drain D1 était dominée par les ions calcium et sulfate, suivi par l'ion chlorure, et l'eau de drainage D2 était dominée par les ions chlorure et sodium, suivi par l'ion magnésium. Il est bien connu que les cuvettes ioniques formées dans les eaux de drainage sont dues aux constantes de solubilité du sel.

Les résultats de l'étude ont indiqué que l'eau de drainage de D2 appartient à la catégorie C4S4 de très haute salinité et eau très élevée en sodium, tandis que l'eau de drainage de D1 appartient à la catégorie de C3S1 médiocre a utilisé avec précaution nécessite un drainage. Les résultats de l'étude de l'eau de drainage de drain D2 concordent avec les conclusions de nombreux chercheurs qui ont signalé l'effet de la qualité des eaux souterraines sur la détérioration de la qualité des eaux de drainage en raison d'une utilisation excessive des eaux souterraines pour l'irrigation (Raveendran et Madany, 1991 ; Madany et Akhter, 1990).

Diagramme de Piper

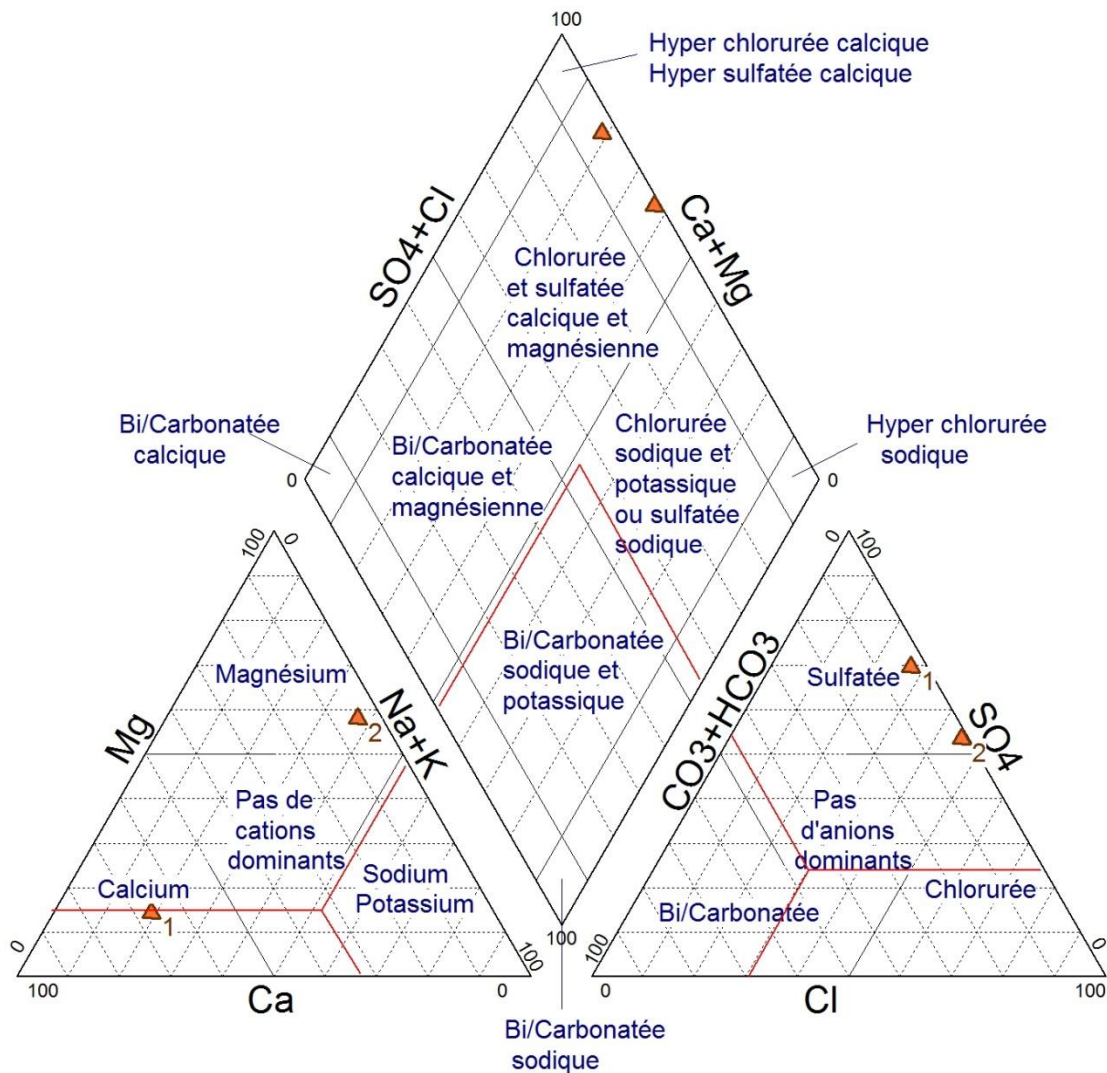


Figure 27 : le diagramme de Piper

Sur la base de la chimie, l'eau de drainage de drain D1 est adaptée à l'irrigation en raison de la salinité totale faible par contre l'eau de drainage de drain D2 n'est pas adaptée à l'irrigation en raison de la salinité totale élevée de l'eau qui pourrait détériorer les caractéristiques physico-chimiques du sol après irrigation. En conclusion, si les eaux de drainage sont destinées à être réutilisées, certaines mesures de précaution, telles que les exigences de lessivage, la sélection de plantes cultivées tolérantes au sel et l'irrigation avancée (irrigation goutte à goutte), doivent être envisagées pour éviter la perte de productivité des terres. .

Conclusion générale

Conclusion

Nous avons appliqué une méthodologie visant à caractériser la dégradation biologique et physique des sols par le phénomène de la salinisation dans la plaine agricole du Bas Cheliff puis nous avons associé cette caractérisation avec la qualité des eaux d'irrigation. Pour traiter cette problématique, deux parcelles ont été sélectionnées : l'une occupée par de l'artichaut et l'autre par du melon. Cette différenciation permet d'analyser l'effet des irrigations dans des conditions réelles avec des degrés de dégradation variables

Le modèle SALTIRSOIL_M développé par Visconti et al (2013) a été testé dans ce travail pour la première fois dans des conditions de salinité et de sécheresse élevées pour prévoir le bilan hydrique et la composition inorganique du sol à l'échelle de la parcelle.

Les valeurs simulées et observées étaient concordantes. Dans la parcelle d'artichaut, ni le stress hydrique, ni le stress de salinité n'ont été révélés. Un programme d'irrigation optimal a donc été recherché en simulant la CE qui aurait résulté de l'irrigation avec moins d'eau. L'utilisation de 280 mm par an pourrait avoir « économisé » l'eau d'irrigation et réduit les pertes d'eau et la lixiviation du sel. Dans la parcelle de melon, la culture a été soumise à un stress notable de l'eau et de la salinité. Un calendrier optimal d'irrigation a donc été recherché d'abord en rééchelonnant l'irrigation pour éviter le stress hydrique et ensuite en simulant les effets de l'utilisation de taux d'irrigation plus élevés sur le déficit hydrique et la salinité du sol. L'utilisation de 480 mm par an aurait pu éviter le déficit hydrique, mais ne pas complètement éliminer le stress de salinité.

Nos résultats sont illustrés par des cartes montrant la dégradation biologique et physique des sols. Ces cartes facilitent l'identification des zones correspondant aux sols les plus dégradés et permettent de connaître l'effet de l'eau d'irrigation sur la dégradation des sols.

La modélisation permet de planifier l'irrigation et de proposer pratiques adaptées à tels contextes environnementaux. En fait, de nombreux auteurs ont exprimé leur intérêt pour déterminer combien d'irrigation est nécessaire pour permettre le lessivage des sels sans gaspiller de l'eau (Wichelns et Qadir 2014). Les résultats obtenus sont une extension des travaux de *Visconti et al.* (2014) appliquées aux conditions de salinité élevées dans le cas des parcelles irriguées

L'eau en excès doit pouvoir être drainée à partir de la surface et de la zone des racines. Un excès d'eau peut endommager les végétaux et accroître la salinité du sol. Un bon drainage est particulièrement important dans les zones arides et semi arides. Si le drainage du terrain est insuffisant, la nappe phréatique peut s'élever. Lorsque la nappe phréatique est trop proche de la surface (2 m et moins), l'eau peut remonter par capillarité en surface pendant la saison sèche, s'évaporer et laisser derrière elle des sels dissous. .

Perspectives

- L'utilisation de SALTIRSOIL_M dans des parcelles d'essai où il y a d'autres cultures, l'intégration de ce dernier dans un Système d'Information Géographique (SIG) pour cartographier la salinisation des sols et sa combinaison avec d'autres Modèles de même catégorie est très importants pour aider à la décision pour la gestion de l'eau d'irrigation et du sol dans les zones irriguées menacées par la salinisation et la sodisation.
- Quantifier l'influence des variables d'entrée du modèle dans le calcul de la conductivité électrique et du taux d'adsorption de sodium de la solution de sol.
- Développer le modèle SALSOLCHEMEC qui est intégré dans le modèle SALTIRSOIL-M pour faire
 - L'équilibre chimique dans la solution de la pâte saturée des calcites et gypse,
 - L'équilibre chimique avec le complexe d'échange du sol

Les retombées scientifiques et économiques de notre travail

- Réduction des pertes des productions et du gaspillage de l'eau
- Amélioration de la productivité et des revenus des agriculteurs
- Evaluation de la performance du modèle de gestion de l'irrigation et de prédiction de la salinité du sol

Références bibliographiques.

Références Bibliographiques

- Abbe F., Ruelle P., Garin P., Leroy P., Mallhol J.C., Deumier J.M., 1997 : Irrigation practices farm level and analysis of water management during water shortages: cases study in Chartente (SW France). ICID Workshop on «Sustainable irrigation in areas of water scarcity and drought» 11-12 septembre, Oxford, Grande-Bretagne (England), pages 63-72.
- ABH–CZ., 2001 : Bulletin de la qualité des eaux souterraines des nappes du Chélif Zahrez. Ministère des ressources en eau.19P.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M 1998: Crop Evapotranspiration: Guide-lines for Computing Crop Water Requirements. FAO, Rome <<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>>.
- Aragüés, R. & Cerdá, A. 2001. Salinidad de aguas y riegos en la agricultura de regadío. En: Agricultura Sostenible (eds R.M.Jiménez & J.Lamo de Espinosa), pp. 249-274. Mundi-Prensa, Madrid.
- Ayers R.S et Westcot D.W, (1985) : La qualité de l'eau en irrigation. Bulletin de la FAO d'irrigation et de drainage.29 Rév. 1, 165p.
- Badraoui M., Soudi B., Merzouk A., Farhat A., M'hamdi A. 1998 : Changes of soil
- Barbiéro L., 1995 : Les sols alcalinisés sur socle dans la vallée du fleuve Niger. Origine
- Barbiero L., Vallès V. et Cheverry C., 2004: Reply to J.W. Van Hoorn “Some observations with respect to sodicity hazard of irrigation waters”. Letter to the Editor / Agricultural Water Management 68 : 177–184.
- Barbiéro L., Valles V. et Régeard A., 1995 : Contribution de la fluorine au contrôle géochimique du calcium sur un bas fond sahélien du Niger. Conséquences pour une estimation quantitative de l'évolution des sols. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris 321, série II, pp. 1147–1154.
- Benbi, D. y R. Nieder. 2003. Handbook of processes and modeling in the soil-plant system. The Haworth Press, Nueva York. 762 p.
- Bernstein, L. 1967. Quantitative Assessment of Irrigation Water Quality. American Society of Testing and Materials Special Technical Publication 416. 51-65.

- Brabant P. 2010 : Une méthode d'évaluation et de cartographie de la dégradation des terres. Proposition de directives normalisées. Les dossiers thématiques du CSFD N°8. CSFD/Agropolis International, Montpellier, France, 52 p.
- Bradaï A. H. et Douaoui et Marlet S., 2008 : Qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risque de dégradation des sols dans la plaine du Bas-Chélif. 4^{ème} colloque international SIRMA : Economie d'eau dans les systèmes irrigués. Mostaganem 26-29 Mai 2008. 8p.
- Bradaï, Douaoui, Marlet S, Hartani T, Bouarfa S 2011. La reconversion à l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation et ses risques dans la plaine du Bas-Cheliff (Nord-Ouest d'Algérie). Hommes et terres du Nord 04/2011; 148:43-44.
- Bradai. A, Douaoui A., T. Hartani, 2012: Some problems of irrigation water management in lower Cheliff plain (Algeria), Journal of Environmental Science and Engineering 271-278
- Bresler, E., McNeal, B.L. & Carter, D.L. 1982. Saline and Sodic Soils. Springer-Verlag, New York.
- Bustan A, Cohen S, De Malach Y, Zimmermann P, Golan R, Sagi M, Pasternak D 2005: Effects of timing and duration of brackish irrigation water on fruit yield and quality of late summer melons. Agricultural Water Management, 74, 123-134.
- Cheverry C., 1974 : Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans les sédiments argileux et organiques. Thèse. Science, U.L.P. Strasbourg, 257 p.
- Cheverry J. C. et Bourrie G., 1995 : La salinisation des sols. "Sols C2 : interfaces fragiles". 3^o Partie : Conséquences de l'utilisation des sols par l'homme. Coédition INRA/Nathan, 24 p.
- Conacher, Arthur J. SALA, Maria, 1998: Land degradation in Mediterranean environments of the world: Nature and extent, causes and solutions-New York-Wiley-491 p.
- Condom N., 2000 : Analyse et modélisation couplée des processus hydrogéochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali). Thèse Doctorat Ecole National Supérieur d'Agronomie de Montpellier. 240p
- de l'alcalinisation et évolution des sols sous irrigation. Travaux et Documents Microfichés Orstom 138, 209 pp.

- Dellal. A, Halitim A, 1992 : Activités microbiologiques en conditions salines : cas de quelques sols salés de la région de Relizane (Algérie) p 336.
- Döll P 2002: Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Climatic Change*, 54, 269–293.
- Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994: Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Defining soil quality for sustainable environment*. Soil Sci.Soc. Am.Special publication N. 35, Madison, Wisconsin, US, pp. 3–21.
- 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. Tunis, Juin 2007.
- 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. 225p.
- Douaoui A., Gascuel-Oudou C., Walter Ch., 2004 : Infiltrabilité et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas Chélif (Algérie). Mesures au laboratoire sous simulation de pluie. *EGS*, Vol. 11, N°4, 2004, 379-392
- Douaoui A., Herve N., Walter Ch., 2006: Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil remote-sensing data. *GEODERMA*, 134, 1-2. pp 217 – 230.
- Douaoui AEK., Lepinard P. (2010). Télédétection et salinité : Cartographie de la salinité des sols de la plaine algérienne du Bas-Chélif. *Geomatique Expert*,76: 36-41.
- EEAA (Egyptian Environmental Affairs Agency)-The environment in Egypt 1996- Cairo-EEAA-1997-88 p.
- El Mahi, T, 2002 : Contribution à l’étude des contraintes de gestion de l’eau à usage agricole, cas du périmètre du Moyen-Cheliff.Colloque International sur l’eau Chlef, février 2002.P165
- F.O Nachtergaele, M. Petri, R. Biancalani, G. van Lynden, H. van Velthuizen, 2010 : Global Land Degradation Information Systeem (GLADIS) version 0.5. An Information database for land degradation Assessment at Global Level.
- FAO 2015 : AQUASTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
<<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html;jsessionid=9CAC78C800069F5BC3C0F1FCC682D295>>.

- FAO, PNUMA, UNESCO, Anon., 1980 : Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. FAO, Rome.
- Fuentes, J.L. 2003. Técnicas de Riego. Mundi-Prensa, Madrid. *GeoEcology*, 31:503-508.
- Gonzalez Barrios, J.L., 1992 : Eau d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine. Exemple de la Comarca Lagunera. Ph.D. Thesis. USTL, Montpellier II, 316pp
- Gran G 1952: Determination of the equivalence point in potentiometric titrations. *Analyst*, 77, 661–671.
- Gueye I., 2013 : Application de la Télédétection aérospatiale pour l'évaluation de la dégradation des ressources naturelles : cas des sols de la région de Kaolack située dans le Bassin arachidier du Sénégal.
- Hachicha M, Abdelgawed G 2003 : Aspects of salt-affected soils in the Arab World. In: Sustainable strategies for irrigation in salt-prone Mediterranean Region: a system approach. Proceedings of an International Workshop, Cairo, Egypt, 295-309.
- Helmke PA, Sparks DL, 1996: Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. In: Methods of Soil Analysis, Part 3—Chemical Methods; Sparks DL (eds).SSSA Book Series No. 5. pp: 551–574. SSSA and ASA, Madison, WI.
- Hess, G.R., Lee, C., Fiscus, D.A., Hellkamp, A.S., McQuaid, B.F., Munster, M.J., Peck, S.L., Shafer, S.R., 2000 : A conceptual model and indicators for assessing the ecological condition of agricultural lands.*J. Environ. Qual.* 29, 728–737.
- Hoffman, G.J. & van Genuchten, M.T. 1983. Soil properties and efficient water use: water management for salinity control. En: Limitations to efficient water use in crop production (eds H.M.Taylor et al.), pp. 73-85. American Society of Agronomy, Madison (Wisconsin).
- Hsiao TC, Steduto P, Fereres E 2007: A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture.*Irrigation Science*, 25, 209–231.
- Hutson, J.L. and Wagenet, R.J. LEACHM. Leaching Estimation and Chemistry Model: A process based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in the unsaturated zone. Version 3. 1992. Ithaca (New York), Dep. of Agronomy, Cornell University. in a Spanish Mediterranean region.
- James, D.W., Hanks, R.J. & Jurinak, J.J. 1982. Modern Irrigated Soils. John Wiley & Sons, New York.

- José-Miguel de Paz, Juan Sánchez, Fernando Visconti, 2006: Combined use of GIS and environmental indicators for assessment of chemical, physical and biological soil degradation
- Kouadri sameut M.,(2019). Modélisation du bilan hydrique dans une parcelle d'artichaut irriguée et drainée (Wilaya de Relizane), thèse de doctorat, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- Kuper M, Faysse N, Hammani A, Hartani T, Hamamouche MF, Ameer F. 2016. Liberation or Anarchy ? The Janus Nature of Groundwater Use on North Africa's New Irrigation Frontiers. In: Integrated Groundwater Management, Tony Jakeman, Olivier Barreteau, Randall Hunt, Jean-Daniel Rinaudo, Andrew Ross (sc. Ed.). Springer open..
- Lal, R. 1997: Advances in Soil Science; Methods for assessment of soil degradation, 407-422p.
- Lal, R., 2000: Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21st century. Soil Sci. 165, 191–207.
- Leffelaar PA and Ferrari TJ (1989) Some elements of dynamic simulation. In: Simulation and systems management in crop protection (pp 19-45) PUDOC Wageningen
- Lopez-Bermudez, F., Barbera, G.G., 1998: Indicators of degradation in semiarid mediterranean agroecosystem of southeastern Spain, Proceedings of the International Seminar of Indicators for Assessing Desertification in the Mediterranean. Porto Torres, Italy.
- Madany,I.M and M.S.Akhter, 1990. Assessment of the chemical and physical properties of Adari spring in Bahrain. Environ.Int., 16: 297-300.
- Marlet S., 2004 : Evolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées. Projet INCO-WADMED, Acte du séminaire de l'Agriculture Irriguée. Rabat du 19 au 23 Avril 2004. 11p.
- Marlet S., et Job J.O., 2006 : Processus et gestion de la salinité des sols. In : Tiercelin, J.R.
- Mathieu C, Pieltain F 2003 : Analyse chimique des sols, méthodes choisies. Edition Lavoisier/ Tec et Doc, France.
- Ministero dell' Ambiente-Relazione sullo stato dell' ambiente-1997 :446 p. Italy
- Ndour T. 2000 : La Dégradation des Sols au Sénégal. Exemple des CR de Montrouland et Thyssé – Kaymor, Thèse, 3ème cycle UCAD.

- Nelson DW, Sommers L E 1982: Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Methods of Soil Analysis, Part 2 (second edition); Page AL (eds.). pp: 574-577. Soil Sci. Soc. Amer., Madison, Wisconsin, USA.
- Nelson, R E 1982: Carbonate and gypsum. In: Methods of Soil Analysis Part 2; Page AL (eds.). Chemical and Microbiological Properties. SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Oosterban, R.J. 1998. SALTMOD ver 1.1: Description of Principles and Applications. ILRI, Wageningen (The Netherlands).
- Oster JD, Shainberg I (2001) Soil responses to sodicity and salinity: challenges and opportunities. Soil Res 39:1219–1224
- Oster, J.D. & Rhoades, J.D. 1990. Steady-State Root Zone Salt Balance. En: Agricultural Salinity Assessment and Management (ed K.K.Tanki), pp. 469-481. American Society of Civil Engineers, New York.
- Pizarro, F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Editorial Agrícola Española, Madrid.
- Pla, I. 1997. Evaluación de los procesos de salinización de suelos bajo riego. Revista de la sociedad española de la ciencia del suelo. Edafología, 241-267.
- PNUE 1990 : Evaluation globale de la dégradation du sol dans le monde (GLASODISRIC/ PNUE/FAO)
- Raes, D. 2002. BUDGET. A soil water and salt balance model. K. U. Leuven, Leuven (Belgium).
- Ragab, R. 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model. *Environmental Modelling & Software*, 17, 345-361.
- Raveendran, E. and I.M. Mandany , 1991. Characteristics of agricultural drainage water in Bahrain. Sci. Total Environ., 104:239-247.
- Rawls WJ, Brakensiek CL, Saxton K.E 1982: Estimation of soil water properties. Transactions American Society of Agricultural Engineers, 25 (5), 1316-1320 and 1328
- Richards, L.A., Allison, L.E., Bernstein, L., Bower, C.A., Brown, J.W., Fireman, M., Hatcher, J.T., Hayward, H.E., Pearson, G.A., Reeve, R.C. & Wilcox, L.V. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils . United States Department of Agriculture, Washington.
- Ritzema, H.P.Ed. 2009. Drainage Principles and Applications. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen (The Netherlands).

- Robbins C W, Wiegand C L 1990: Field and laboratory measurements. In K.K. Tanji, Ed. Agricultural Salinity Assessment and Management. ASCE. pp: 201–219. New York, NY.
- Robert, M. 1996 : Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Dunod/Masson, Paris. 240 pp.
- Rodier J, Bernard L, Nicole M 2009: L'Analyse de l'eau. 9^e édition, Dunod, Paris. 1600 pp.
- RSMJ, 2002 : Rapport du Sommet mondial pour le développement durable.
- Samba R., 1998 : Riziculture et dégradation des sols en vallée du fleuve Sénégal: analyse comparée des fonctionnements hydro-salins des sols du delta et de la moyenne vallée en simple et double riziculture. Thèse Doc. Ing., Uni. Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal). 175
- Sánchez, J., Boluda, R., Morell, C., Colomer, J.C., Artiago, A., 1998: Degradation index of desertification threatened soils in the Mediterranean region. Application in Castilla-La Mancha (Spain), the soil as a strategic resource: degradation processes and conservation measures. *Geoforma ediciones, Logroño, Spain* pp. 441–448.
- Sánchez, J., Boluda, R., Morell, C., Colomer, J.C., Artiago, A., 1999: Assessment of soil degradation within the EFEDA area. In: Balabanis, P., Peter, D., Ghazi, A., Sogas, M.T. (Eds.), *Mediterranean Desertification: Research Results and Policy Implications*, pp. 387–396.
- Shannon MC, Grieve CM 1999: Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae*, 78, 5-38.
- Simunek, J. & D. L. Suarez, 1997. Sodic soil reclamation using multicomponent transport modeling. *J. Irrig. Drainage Div. ASCE* 123 [5], 367-376.
- Skaggs, R.W. & Van Schilfgaade, J.E. 1999. *Agricultural Drainage*. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison (Wisconsin).
- Snakin, V.V., Krechetov, P.P., Kuzovnikova, T.A., Alyabina, I.O., Gurov, A.F., Stepichev, A.V., 1996: The system of assessment of soil degradation. *Soil Techno.* 8, 331–343.
- Soil Survey Division Staff 1951: Soil survey manual. USDA/SCS. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

- Soil Survey Staff 2014: Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual: Soil Survey Investigations. Soil Survey Investigations Report No. 42 Version 5.0 U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Lincoln USA.
- Somani, L.L. 1991. Crop Production with Saline Water. Agro Botannical Publishers, New Delhi (India).
- Stöckle, C.O. 2003. Agro-environmental and Cropping Systems Modeling with Visual Basic for Applications (VBA). 5^o Curso de Postgrado. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Universitat de Lleida, Lleida (Spain).
- Suarez, D.L. & Simunek, J. 1997. UNSATCHEM: Unsaturated water and solute transport model with equilibrium and kinetic chemistry. Soil Science Society of America Journal, 61, 1633-1646.
- Sumner M.E., 1993 : Sodic soils – new perspectives. Aust. J. of Soil Res., 31, 683-750.
- Tabet, D. H., 1999 : Intérêt d'une approche spatiale pour le suivi de la salinité des sols dans les systèmes irrigués. Cas de la subdivision de Christian dans le Punjab (Pakistan). Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 325 pp.
- Tanji, K.K. Ed. 1990. Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers, New York.
- Turini T 2011: Effects of salinity and water stress on vegetable crops. University of California, Fresno, California, USA.
http://ucanr.edu/sites/Vegetable_Crops/Soils_and_Irrigation/
- U.S.S.L.S. (United State Salinity Laboratory Staff), 1954: Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, US Department of Agriculture Handbook n°60, U. S. Gov. Print. Office, Washington DC.
- Vallès V., 1985 : Etude et modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux.
- Valles, V. N'Diaye M.K., Bernadac A. et Tardy Y., 1989 : Mali. Al, Si and Mg in water concentrated by evaporation: development of a model. Arid Soil Res. Rehabil. 3, pp 21–39
- Van Dam, J.C. 2000. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation, and case studies. Wageningen University, Wageningen (The Netherlands).

-
- Vanclooster, M., Viaene, P., Diels, J. & Feyen, J. 1995. A Deterministic Evaluation Analysis Applied to An Integrated Soil-Crop Model. *Ecological Modelling*, 81, 183-195.
 - Visconti F, De Paz J M. Rubio J L 2010: Calcite and gypsum solubility products in water-saturated salt-affected soil samples at 25 degrees C and at least up to 14 dS m⁻¹, *European Journal of Soil Science*, page 1-2. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2009.01214.x
 - Visconti F, Miguel de Paz J 2012 : Soil, Water and Crop Management for Agricultural Profitability and Natural Resources Protection in Salt-Threatened Irrigated Lands, Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. [.http://www.intechopen.com/books/problems-perspectives-and-challenges-of-agricultural-water-management](http://www.intechopen.com/books/problems-perspectives-and-challenges-of-agricultural-water-management).
 - Visconti F, Miguel de Paz J, Martinez D, Molina J 2014: Irrigation recommendation in a semi-arid drip-irrigated artichoke orchard using a one-dimensional monthly transient-state model. [Agricultural Water Management](#), [Volume 138](#), 31, Pages 26–36.
 - Wichelns D, Qadir M 2014: Achieving sustainable irrigation requires effective management of salts, soil salinity, and shallow groundwater. [Agricultural Water Management](#), [Volume 138](#), 31, Pages 26–36. DOI: 10.1016/j.agwat.2014.08.016
 - Willmott CJ 1982: Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of American Meteorological Society*, Volume 63, 11 Pages 1
 - Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. US Department of Agriculture, Washington.
 - Yahiaoui I, Bradai A, Douaoui A & Abdennour MA (2021) Performance of random forest and buffer analysis of Sentinel-2 data for modelling soil salinity in the Lower-Cheliff plain (Algeria), *International Journal of Remote Sensing*, 42:1, 128-151, DOI: 10.1080/01431161.2020.1823515
 - Yahiaoui I., Douaoui AEK., Zhang Q., Ziane A. (2015). “Soil salinity prediction in the Lower Cheliff plain (Algeria) based on remote sensing and topographie feature analysis”. *Journal of AridLand*,
 - Yaron, D.Ed. 1981. *Salinity in irrigation and water resources*. Marcel Dekker, New York.

