

50376
2007
147

Laboratoire de Mécanique de Lille (UMR 8107 du CNRS)
Ecole Polytechnique Universitaire de Lille 1



LABORATOIRE
de MÉCANIQUE
de LILLE
UMR CNRS 8107



**UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE
LILLE**

N° d'ordre : 4151

THESE DE DOCTORAT

Préparée au :

**Laboratoire de Mécanique de Lille (UMR 8107 du CNRS)
Ecole Polytechnique Universitaire de Lille**

Spécialité : Génie Civil

Titre :

***Gestion optimale de l'utilisation de l'eau douce et salée pour l'irrigation
du coton dans le bassin de l'Euphrate en zone semi-aride***

Par :

Bassel HAJ NAJIB

Soutenue le 21 décembre 2007 devant le jury composé de :

SHAHROUR Isam, Président – Professeur – Univ. de Lille 1 (France);
ZAOUI Ali, Directeur de thèse – Professeur – Univ. de Lille 1 (France);
MANIA Jacky, Co-Encadrant – Professeur – Univ. de Lille 1 (France);
BANTON Olivier, Rapporteur – Professeur – Univ. d'Avignon et des Pays du Vaucluse (France);
RAGAB Ragab, Rapporteur – Professeur – Centre for Ecology & Hydrology Oxfordshire (UK);
VANCLOOSTER Marnik, Rapporteur – Professeur – Univ. catho. de Louvain-la-Neuve (Belgique).





AVANT-PROPOS

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du laboratoire de mécanique de Lille (LML), département Géotechnique Génie Civil (GTGC) à l'école polytechnique universitaire de Lille 1. Ce travail de recherche n'aurait pas été possible sans le soutien et la participation de plusieurs personnes auxquelles je souhaite également exprimer toute ma gratitude :

J'ai eu l'honneur d'avoir comme directeur de thèse Professeur Ali ZAOUÏ. Je lui suis très reconnaissant d'avoir partagé avec moi son énorme expérience, ses conseils et son soutien.

Professeur Jacky MANIA, qui a encadré aussi ma thèse, été un directeur d'une grande écoute et d'une grande vigilance.

Je tiens à les remercier d'avoir anticipé et provoqué les réajustements nécessaires avec la préoccupation constante de me donner les moyens de poursuivre mes travaux dans les meilleures conditions et en toute liberté. Leur soutien tout au long des travaux a été, pour moi, une aide précieuse et irremplaçable.

J'exprime mes sincères remerciements à Professeur Isam SHAHROUR pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de cette thèse. Je lui adresse ma profonde reconnaissance pour tous ses conseils, scientifiques et amicaux.

Je tiens à remercier également Monsieur Olivier BANTON, professeur à l'université d'Artois, qui m'a fait l'honneur de rapporter ce travail ainsi que pour toutes ses remarques et ses conseils.

J'exprime mes vifs sentiments à Monsieur Ragab RAGAB, professeur au Centre for Ecology & Hydrology (GB), qui m'a accueilli plusieurs jours et m'a fait profiter de ces connaissances en modélisation. Je tiens à le remercier également d'avoir accepté de rapporter ce travail.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur Marnik VANCLOOSTER, Professeur à l'Université catholique de Louvain (Belgique), pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse ainsi que pour toutes ses remarques et ses conseils.

Mes sincères remerciements s'adresse également à Dr. Awadis Arslan et ingénieur Younès HAJ GHARIB, des Ministère d'Agriculture et de la Réforme Agraire en Syrie, de m'avoir consacré beaucoup de leur temps.

Je ne peux oublier les thésards et les stagiaires du labo avec qui j'ai partagé une tranche de ma vie ; merci et bonne chance à tous.

Je remercie mes parents, auxquels je dédie mon mémoire de thèse, pour tout ce qu'ils ont fait pour moi et l'éducation que j'ai reçue de leur part.

Je tiens à remercier tout spécialement ma femme, pour son soutien et sa compréhension, si importants pour moi.

Si par mégarde j'ai oublié quelqu'un, qu'il me pardonne et qu'il soit remercié pour tout.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	4
LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES TABLEAUX	9
RESUME	10
ABSTRACT	12
INTRODUCTION GENERALE	14
CHAPITRE I: Etude bibliographique	20
1.1. Introduction	21
1.2. Salinité des sols: définition, distribution, causes et remédiation	22
1.3. Réutilisation de l'eau de drainage	27
1.3.1. Qualité de l'eau agricole de drainage	27
1.3.2. Salinité de l'eau agricole de drainage	28
1.3.3. Impact de l'irrigation avec de l'eau de drainage sur le rendement de la récolte	29
1.3.4. Détérioration du sol due à l'irrigation de l'eau de drainage	31
1.4. Tolérance au sel de quelques végétaux sur le terrain	32
1.5. Facteurs de champs affectant la réponse de salinité de récolte	33
1.5.1. Conditions climatiques	33
1.5.2. Méthode d'irrigation	35
1.5.3. Intervalle d'irrigation	35
1.5.4. Fraction de lessivage	36
1.5.5. Utilisation de l'eau saline pendant la germination et les étapes préliminaires de croissance de la plante	37
1.5.6. Texture du sol	40
1.5.7. Salinité initiale dans la ligne de graine	41
CHAPITRE II: Région d'étude	43
2.1. Cadre géographique	44
2.2. Climat	45
2.3. Sol	45
2.4. Système d'irrigation et de drainage	47
2.5. Conditions expérimentales	47
2.5.1. Taille et topographie de champ	47
2.5.2. Gestion de récolte et de champ	48

2.5.3. Gestion de l'eau d'irrigation	49
2.5.3.1. Expérimentation en 1999, en 2003 et en 2004 pour l'irrigation par l'eau de rivière de l'Euphrate	49
2.5.3.2. Expérimentation en 1999 de l'irrigation par l'eau de drainage (Rendement et Salinité de l'eau d'irrigation)	59
2.5.3.3. Expérimentation de 1994 à 1996 de l'irrigation par l'eau de rivière de l'Euphrate (Rendement et quantité de l'eau : efficacité de l'irrigation)	69
CHAPITRE III: Matériel et méthode	75
3.1. Introduction	76
3.2. Brève description du logiciel SALTMED / Les équations de base du logiciel SALTMED	80
3.2.1. Evapotranspiration	80
3.2.2. Précipitations efficaces	81
3.2.3. Absorption de l'eau par plante en cas d'une irrigation par une eau salée	81
3.2.3.1. Le taux réel de l'absorption d'eau et l'absorption potentielle maximum	81
3.2.3.2. La profondeur racinaire	83
3.2.3.3. La largeur racinaire	83
3.2.4. Rendement de récolte relatif et réel	83
3.2.4.1. Le rendement de récolte relatif, RY	84
3.2.4.2. Le rendement réel, AY	84
3.2.5. Écoulement de l'eau et de soluté	84
3.2.5.1. Écoulement de l'eau	84
3.2.5.2. Écoulement de soluté	84
3.2.5.3. Paramètres hydrauliques du sol	87
3.2.6. Drainage	88
3.2.7 Conditions de lessivage	88
3.3. Données nécessaires	89
3.4. Données de défaut dans les bases de données	89
CHAPITRE IV: Résultats et discussion	91
4. Modèle de simulation	92
4.1. Calibrage du modèle SALTMED	92
4.1.1. Le processus du calibrage	92
4.1.2. Résultats des calibrages du modèle	101
4.2. Validation du modèle SALTMED	117
4.2.1. Résultats des modèles de validation en utilisant l'eau du Fleuve Euphrate	117
4.2.1.1. Rendements en 2003 et 2004	117
4.2.1.2. Salinité du sol en 2004	119
4.2.2. Résultats des modèles de validation en utilisant l'eau saline	123
4.2.3. Résultats des modèles de validation en utilisant différentes quantités d'eau	127
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE	134
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	138

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Distribution globale des secteurs affectés en sel	25
Figure 2.	Situation du centre de recherches d'Almria dans la région de Deir AlZoor en Syrie orientale	44
Figure 3.	Photographie du centre de recherches d'Almria dans la région de Deir Al Zoor en Syrie orientale	48
Figure 4.	Diagramme schématique de la conception expérimentale avec l'utilisation de l'eau de l'Euphrate pour l'irrigation au cours de la saison 1999	49
Figure 5.	Rendement observé sous différents méthodes d'irrigation, saisons 1999 - 2003 - 2004	51
Figure 6.	Évolution de profil d'humidité du sol en fonction du temps selon l'irrigation par sillon.	53
Figure 7.	Consommation d'eau et rendement observés selon différentes méthodes d'irrigation pour 100% d'eau douce pendant la saison 1999	53
Figure 8.	Efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation pour différentes méthodes d'irrigation avec 100% d'eau douce pendant la saison 1999	55
Figure 9.	Augmentation du rendement de récolte comparée à l'irrigation par bassin avec 100% d'eau douce pendant la saison 1999	55
Figure 10-a.	Profils de salinité sous une irrigation en sillon	57
Figure 10-b.	Profils de salinité sous une irrigation en bassin	58
Figure 10-c.	Profils de salinité sous une irrigation par aspersion	58
Figure 10-d.	Profils de salinité sous une irrigation par goutte à goutte	59
Figure 11.	Diagramme schématique de la conception expérimentale sous cinq niveaux d'irrigation avec de l'eau salée pendant la saison 1999	62
Figure 12.	Rendement observé sous différents traitements d'irrigation par goutte à goutte, 1999	64
Figure 13.	Diagramme schématique de la conception expérimentale sous quatre quantités d'irrigation pour l'irrigation saisonnière de sillon et de bassin de 1994 à 1996	70
Figure 14.	Diagramme schématique de la conception expérimentale selon quatre quantités d'irrigation pour l'irrigation saisonnière par aspersion de 1994 à 1996	71
Figure 15-a.	Rendement observé selon différents traitements d'irrigation du sillon, saisons 1994-1995-1996	73
Figure 15-b.	Rendement observé selon différents traitements d'irrigation en bassin, saisons 1994-1995-1996	73
Figure 15-c.	Rendement observé selon différents traitements d'irrigation d'aspersion, saisons 1994-1995-1996	74
Figure 16.	Fichier d'entrée des données météorologiques utilisées dans le calibrage pour toutes les méthodes d'irrigation, saison 1999	93
Figure 17.	Fichier d'entrée des données d'irrigation utilisées dans le calibrage selon l'irrigation du sillon, saison 1999	95
Figure 18.	Menu d'entrée des paramètres de récolte utilisés dans le calibrage pour toutes les méthodes d'irrigation, saison 1999	96

Figure 19.	Menu d'entrée des paramètres du sol utilisés dans le calibrage de toutes les méthodes d'irrigation, saison 1999	97
Figure 20.	Fichier d'entrée et options des données du sol, du drainage et des précipitations efficaces utilisées dans le calibrage selon toutes les méthodes d'irrigation, saison 1999	98
Figure 21.	Menu des paramètres du modèle utilisés dans le calibrage dans l'irrigation du sillon ou du goutte à goutte, saison 1999	99
Figure 22.	Menu d'option de rendement utilisé dans le calibrage selon toutes les méthodes d'irrigation, saison 1999	100
Figure 23.	Rendement simulé et observé selon différentes méthodes d'irrigation obtenue par le calibrage avec 100% d'eau douce, saison 1999	101
Figure 24-a.	Rendement de récolte suite au calibrage du traitement en sillon avec 100% d'eau douce, saison 1999	102
Figure 24-b.	Rendement de récolte suite au calibrage du traitement en bassin avec 100% d'eau douce, saison 1999	103
Figure 24-c.	Rendement de récolte suite au calibrage du traitement par asperseur avec 100% d'eau douce, saison 1999	103
Figure 24-d.	Rendement de récolte suite au calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, saison 1999	104
Figure 25.	Évolution de profil d'humidité du sol en fonction du temps après le calibrage du traitement en sillon et de 100% d'eau douce, saison 1999	105
Figure 26.	Évolution du profil de la salinité du sol en fonction du temps après le calibrage du traitement en bassin avec 100% d'eau douce, saison 1999	106
Figure 27.	Évolution de profil relatif de salinité du sol en fonction du temps après le calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, saison 1999	107
Figure 28.	Distribution verticale et horizontale de l'humidité du sol après le calibrage du traitement par aspersion avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999	108
Figure 29.	Distribution verticale et horizontale de salinité après le calibrage du traitement par aspersion avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999	109
Figure 30.	Évolution des paramètres de la récolte K_c , K_{cb} et la profondeur des racines, en fonction du temps après le calibrage du traitement par aspersion avec 100% d'eau douce, saison 1999	110
Figure 31-a.	Quantité d'eau, partielle et cumulée, utilisée pour l'irrigation, en fonction du temps après le calibrage du traitement sur sillon avec 100% d'eau douce, saison 1999	111
Figure 31-b.	Quantité d'eau, partielle et cumulée, utilisée pour l'irrigation, en fonction du temps après le calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, saison 1999	112
Figure 32.	Évapotranspiration totale, transpiration de récolte et évaporation du sol, en fonction du temps après le calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, saison 1999	112
Figure 33.	Évolution de profil de la salinité du sol en fonction du temps après le calibrage du traitement en bassin avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999	113
Figure 34.	Distribution verticale et horizontale de salinité après le calibrage du traitement en bassin avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999	113
Figure 35.	Conditions de lessivage avec le temps après le calibrage du traitement en bassin avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999	114

Figure 36.	Évolution de profil de la salinité du sol en fonction du temps après le calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999	115
Figure 37.	Distribution verticale et horizontale de salinité après le calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999	116
Figure 38.	Conditions de lessivage avec le temps après le calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999	117
Figure 39.	Rendement simulé et observé selon les différentes méthodes d'irrigation pour 100% d'eau douce pendant les saisons 2003 et 2004	118
Figure 40.	Comparaison entre tout le rendement simulé et observé selon quatre méthodes d'irrigation en 2003-2004	119
Figure 41-a.	Profils de salinité sous une irrigation du sillon de 100% d'eau douce le 20/10/2004	120
Figure 41-b.	Profils de salinité sous une irrigation en bassin avec 100% d'eau douce le 20/10/2004	120
Figure 41-c.	Profils de salinité sous une irrigation par aspersion avec 100% d'eau douce le 20/10/2004	121
Figure 41-d.	Profils de salinité sous une irrigation par goutte à goutte avec 100% d'eau douce le 20/10/2004	121
Figure 42.	Profils de l'humidité sous une irrigation par aspersion avec 100% d'eau douce le 05/10/2004	123
Figure 43.	Rendement de récolte obtenu avec 100% d'eau de drainage par le traitement le goutte à goutte, saison 1999	124
Figure 44.	Rendement simulé et observé selon différents traitements d'irrigation de goutte à goutte, saison 1999	124
Figure 45.	Comparaison entre tous les rendements simulé et observé par l'irrigation de goutte à goutte, saison 1999	125
Figure 46.	Le rendement absolu évalue la salinité de l'eau par l'irrigation de goutte à goutte, saison 1999	126
Figure 47.	Le rendement mesuré évalue la salinité de l'eau par l'irrigation de goutte à goutte, saison 1999	127
Figure 48-a.	Rendement simulé et observé selon différents traitements d'irrigation du sillon, saisons 1994-1995-1996	130
Figure 48-b.	Rendement simulé et observé selon différents traitements d'irrigation en bassin, saisons 1994-1995-1996	130
Figure 48-c.	Rendement simulé et observé selon différents traitements d'irrigation avec aspersion, saisons 1994-1995-1996	131
Figure 49.	Comparaison entre tous les rendements simulé et observé selon irrigation du sillon, en bassin et avec aspersion, 1994-1995-1996	131
Figure 50-a.	Efficacité simulée et observée d'utilisation de l'eau selon des traitements d'irrigation des sillons, saisons 1994-1995-1996	132
Figure 50-b.	Efficacité simulée et observée d'utilisation de l'eau selon des traitements d'irrigation du bassin, saisons 1994-1995-1996	132
Figure 50-c.	Efficacité simulée et observée d'utilisation de l'eau selon des traitements d'irrigation avec aspersion, saisons 1994-1995-1996	133

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Gammes générales pour la tolérance de plante pour salinité de sol	23
Tableau 2.	Tolérance de salinité de quelques types de récoltes	23
Tableau 3.	Ampleur des sols sel affectés	24
Tableau 4.	Lignes directrices pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation	30
Tableau 5.	Valeurs- seuil typiques de salinité "(a)" trouvées dans la littérature	34
Tableau 6.	Propriétés physiques du sol du champ expérimental au centre de recherches d'Almria pendant la saison 1999	46
Tableau 7.	Propriétés chimiques du sol avant l'ensemencement, au centre de recherches d'Almria en Syrie pendant la saison 1999	46
Tableau 8.	Rendement observé sous différentes méthodes d'irrigation en 1999, en 2003 et en 2004	50
Tableau 9.	Rendement de récolte, quantité d'irrigation, consommation d'eau et accumulation de sel, au centre de recherches d'Almria en Syrie pendant la saison 1999	52
Tableau 10.	Données sur le rendement de coton, gaspillage d'eau, consommation de l'eau et efficacité d'utilisation de l'eau selon les traitements	65
Tableau 11.	Les données de Salinité du sol et de pH pour les traitements	66
Tableau 12.	Analyse de la rivière de l'Euphrate et de l'eau de drainage, 1999	68
Tableau 13.	Salinité de l'eau de l'irrigation et de drainage, au centre de recherches d'Almria en Syrie pendant la saison 1999	68
Tableau 14.	Différences de pourcentage entre le rendement observé lors de l'irrigation du sillon, en bassin et par aspersion, 1994-1995-1996	72
Tableau 15.	Types de sols, des eaux et solutés, de modèles de circulation	79
Tableau 16.	Ampleur horizontale, nombre de compartiment dans le plan horizontal et position de la culture	100
Tableau 17.	Paramètres de culture (cv de variété - coton D22) comme K_c , K_{cb} , F_c et π_{50} après le calibrage pendant la saison 1999	102
Tableau 18.	Différence de pourcentage entre le rendement observé et simulé sous irrigation pour quatre méthodes, période 2003-2004	118
Tableau 19.	Différence de pourcentage entre le rendement observé et simulé selon une irrigation de goutte à goutte, 1999	126
Tableau 20-a.	Différence de pourcentage entre le rendement observé et simulé dans l'irrigation du sillon, 1994-1995-1996	128
Tableau 20-b.	Différence de pourcentage entre le rendement observé et simulé dans l'irrigation en bassin, 1994-1995-1996	129
Tableau 20-c.	Différence de pourcentage entre le rendement observé et simulé dans l'irrigation avec aspersion, 1994-1995-1996	129

RESUME:

Le manque d'eau devient un facteur important gênant le développement économique de la Syrie et en particulier dans sa région orientale. Le secteur agricole syrien est le principal utilisateur de cette ressource limitée. L'agriculture joue un rôle important dans l'économie nationale. Environ 9 Mha de la terre est arable. Le barrage de l'Euphrate couvre maintenant 80% des besoins en eau d'irrigation. La salinité du sol augmente avec la distance à la rivière et devient plus élevée sur les terrasses secondaires. Les causes de la salinité sont liées aux méthodes d'irrigation, à l'évaporation et à la qualité d'irrigation de l'eau. Les eaux souterraines sont touchées par la salinisation en raison de la forte hauteur d'ascension capillaire dans les sols à texture compacte. Dans des secteurs non cultivés du plateau, les niveaux d'eau souterraine oscillent entre 15 et 20 m de profondeur.

Le coton est l'une des fibres les plus importantes des plantes produites. Le coton fournit non seulement la matière première pour l'industrie textile mais aussi pour les industries d'huile pour la cuisine et le fourrage car sa graine est riche en huile (18-24%) et en protéine (20-40%) (Kassem, 2003). Au cours des 15 dernières années, des expériences avec l'irrigation du coton (cv de variété - coton D22, géotypes de *G. hirsutum* L) ont été effectuées dans le centre de recherches d'Almria dans la région de Deir AlZoor en Syrie orientale sur la rivière de l'Euphrate.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de l'eau douce utilisée pour l'irrigation sur la productivité de la variété cv - coton D22, et les changements de rendement et de salinité des sols. La partie I décrit l'expérience et la collecte de données en 1999. La partie II décrit le calibrage du modèle SALTMED et les validations en utilisant des données d'expérience de terrain de 1999, de 2003 et de 2004. La partie III est consacrée à appliquer le modèle et sa capacité à prévoir le rendement final pour 1999, sous différents niveaux de salinité de l'eau par des systèmes d'irrigation par goutte à goutte, et de 1994 à 1996 pour une quantité différente d'irrigation.

Partie une: les effets de quatre méthodes d'irrigation (sillon, bassin, aspersion et goutte à goutte) sur le rendement de graine coton (cv de variété - coton D22) ont été étudiés. L'impact des méthodes d'irrigation sur la salinité du sol et sur la qualité de l'eau de drainage a été également analysé. La conductivité électrique (EC) de l'eau de rivière de l'Euphrate utilisée pour l'irrigation oscille entre 0.73 et 1.55 dS m⁻¹. L'EC moyenne de l'extrait saturé de sol de l'eau était de 4 dS m⁻¹. Cette valeur est située dans les limites permises et appropriées de la plupart des récoltes tolérantes au sel, particulièrement pour le coton. Le rendement de la récolte est de 2.84, 2.3, 2.83 et 4.44 tons ha⁻¹ sous respectivement, une irrigation par sillon, par bassin, par aspersion et par goutte à goutte. L'accumulation de sel dans le profil de sol exige son lessivage avant la culture suivante, et probablement pendant la saison de croissance, pour éviter l'accumulation des sels dans le sol.

Partie deux: le modèle SALTMED a été calibré sur les données de l'année 1999, en utilisant quatre méthodes d'irrigation. Le calibrage s'est principalement concentré sur la prévision de rendement. Après un calibrage réussi, le même ensemble de paramètres de récolte (coefficient de récolte (K_c), coefficient basique de récolte (K_{cb}), fraction de couverture(F_c), le potentiel osmotique (π_{50}) auquel l'absorption d'eau potentielle est réduite de 50%) aussi bien que les paramètres calibrés de sol ont été employés pour le modèle appliqué au centre de recherches d'Almria en 2003 et 2004. La différence de pourcentage entre les rendements simulés et observés a été calculée selon la différence entre observé et simulé divisée par l'observé étendu entre -1.6 et 1.6% pour 2003 et entre -1.2 et 2.6% pour 2004. Les résultats obtenus à partir des données observées et simulées ont indiqué que le coton (cv de variété - coton D22) est tolérant au sel et approprié pour se développer dans la région méditerranéenne dans les conditions climatiques semi-arides. Le modèle SALTMED a simulé la salinité de sol des quatre méthodes d'irrigation de 2004. Les résultats illustrent la bonne concordance trouvée entre les valeurs observées et les valeurs simulées pour les quatre méthodes d'irrigation en 2004.

Partie trois: après son calibrage et une validation réussis avec une irrigation d'eau douce, le modèle SALTMED a été soumis à une confrontation avec des données de terrain de plusieurs saisons de croissance au centre de recherches d'Almria. Le coton, de variété cv - coton D22, appartient aux géotypes du *G. hirsutum* L, et a été cultivé selon diverses stratégies de gestion de l'eau. Le modèle a prévu, avec succès, l'impact de la salinité sur le rendement, l'absorption d'eau, la distribution de l'humidité et la distribution de la salinité du sol. Les résultats ont indiqué que l'eau d'irrigation de 6 dS m^{-1} a seulement réduit le rendement de 20%. Les résultats prouvent que la relation entre le rendement et la salinité de l'eau d'irrigation est non linéaire et est mieux décrite par une fonction polynôme. L'utilisation du rendement normal, obtenue en divisant simplement les valeurs données par les valeurs équivalentes obtenues sous 100% d'eau douce, élimine l'effet des facteurs externes (saisons, climat, sol, etc.) et produit des résultats plus conformes et plus fiables. Aucune différence significative n'a été enregistrée entre les rendements selon les différentes méthodes d'irrigation bien qu'ils aient reçu différentes quantités d'eau. Ceci signifie qu'il y avait de la sur-irrigation, ce qui a eu comme conséquence une basse efficacité d'irrigation.

Mots clés : coton, sol, rendement agricole, méthodes d'irrigation, salinité de l'eau, zone aride, bassin de l'Euphrate en Syrie, modèle SALTMED, milieu non-saturé, eau drainage.

ABSTRACT:

Water shortage is becoming a major factor hindering economic development in the Middle Eastern Region in general, and in Syria in particular. The Syrian agricultural sector is the main sector using this limited resource. Agriculture plays an important role in the national economy. About 9 Mha of the land is arable. The Euphrates dam now covers 80% of irrigation requirements. The soil salinity increases with distance from the river and becomes highest at the sub-terraces. The causes of salinity are irrigation methods, evaporation and quality of irrigation water. Ground water table causes salinity because of capillary rise in heavy textured soils. In uncultivated areas of the plateau, the ground water levels are 15-20 m deep.

Cotton is one of the most important fibre-producing plants. Cotton not only provides raw material for the textile industry but also the cooking oil and fodder industries with its seed, rich in both oil (18–24%) and protein (20–40%). Over the last 15 years, experiments with cotton (variety cv - cotton D22, genotypes of *G. hirsutum* L) irrigation have been carried out in Almiria research station in Deir AlZoor governorate in eastern Syria on the Euphrates River.

The objective of this work is to increase productivity and sustainability of irrigation Cotton crop in eastern part of Syria which have intrinsically or potentially, saline water supplies. Part one describes the experiment and the data collection in 1999, the effect of four irrigation methods (furrow, basin, sprinkler and drip). Part two describes the SALTMED model calibration and validations using field experiment data of 1999, 2003 and 2004. Part three tests the model performance and its ability to predict the final yield for 1999 under different water salinity levels by drip irrigation systems and from 1994 to 1996 for different amount of irrigation.

Part one : the effects of four irrigation methods (furrow, basin, sprinkler and drip) on seed-cotton yield (variety cv - cotton D22) were investigated. The effects of the irrigation methods on soil salinity and on the quality of the drainage water were also investigated. The research was carried out in 1999 at the Almiria research station in Deir AlZoor governorate in eastern Syria on the Euphrates River. The electrical conductivity (EC_w) of the Euphrates river water used for irrigation ranged between 0.73 and 1.55 $dS\ m^{-1}$. The average EC of the saturated water soil extract was 5 $dS\ m^{-1}$. This value is within the allowable limits and suitable for most of salt-tolerant crops, especially for cotton. The crop yield was, 2.84, 2.3, 2.83 and 4.44 $t\ ha^{-1}$ under furrow, basin, sprinkler and drip irrigation, respectively. Salt accumulation in the soil profile would require leaching before the next crop, and possibly during the growing season, to avoid build up of salts in the soil.

Part two: the SALTMED model has been calibrated during 1999, using four irrigation methods. The calibration primarily focused on yield prediction. Following successful

calibration, the same set of crop parameters: crop coefficient (K_c), basal crop coefficient (K_{cb}), fraction cover (F_c), osmotic potential (π_{50}) at which the potential water uptake is reduced by 50%, as well as the calibrated soil parameters were used for model testing at the Almiria Research Station (Eastern part of Syria) in 2003 and 2004. The SALTMED model was able to successfully simulate yield, water uptake, soil moisture and salinity profiles. The percentage difference between simulated and observed yield calculated as a difference between observed and simulated divided by the observed ranged between -1.6 and 1.6% for 2003 and between -1.2 and 2.6% for 2004. The results obtained from the observed and simulated data indicated that the cotton (variety cv - cotton D22) is salt tolerant and suitable to grow in the Mediterranean region under semi-arid climatic conditions. The SALTMED model simulated the soil salinity of the four irrigation methods of 2004; the results illustrate the good agreement that was found between observed and simulated values for the four irrigation methods in 2004.

Part three: following its successful calibration and validation under irrigation with fresh water, the SALTMED model was subjected to testing against field data from of several growing seasons at Almiria Research Station. Cotton, (variety cv - cotton D22), was planted in the field under various strategies of water management. The model successfully predicted the impact of salinity on yield, water uptake, soil moisture and salinity distribution. The observed and simulated data indicate that cotton (variety cv - cotton D22) is salt tolerant and suitable to be grown in the Mediterranean region. The results indicated that irrigation water of 6 dS m^{-1} only reduced the yield by 20%. Results show that the relation between yield and irrigation water salinity is non-linear and is better described by a polynomial function. The use of normalized yield, obtained by simply dividing the given values by the equivalent values obtained under 100% fresh water, eliminates the effect of external factors (seasons, climate, soil, etc.) and produces more consistent and reliable results. No significant difference was registered between yields under the different irrigation methods although they received different amounts of water. This means that there was over-irrigation taking place, which resulted in low irrigation efficiency.

Key words: cotton, soil, agricultural yield, irrigation methods, water salinity, arid zone, Euphrates catchment of Syria, SALTMED model, unsaturated medium, water drainage.

Introduction générale

En Syrie 1.35Mha de terres agricoles sont irriguées annuellement, consommant 85% des ressources d'eau disponibles. Cette ressource représente 16.6 milliards de m³ par an, correspondant à approximativement 900 m³ par habitant, quantité sont considérés à la limite de pénurie. Les prévisions de l'accroissement de la population en Syrie pendant l'année 2025 impliquent une augmentation à court terme de 140% du taux actuel des besoins en eau, exigeant une augmentation équivalente de production de nourriture. Ainsi n'importe quelle augmentation de production de nourriture exigera une optimisation de l'utilisation de l'eau.

Le rendement national de la consommation de l'eau a été considérée globalement proche de 45% pour l'année 2001. Les rendements ont été estimés à 70 jusqu'à 90% avec l'aspersion (12% de superficie) ou la micro-irrigation (4% de superficie), et les rendements correspondants ont augmenté de 20% pour le blé, de 25% pour la betterave à sucre et de 42% pour le coton. L'efficacité réelle de l'irrigation superficielle est considérée plus inférieure à 40%. Ces valeurs peuvent raisonnablement atteindre 70% au niveau du pays, par la modernisation des pratiques en matière d'irrigation ainsi qu'au niveau des équipements. En plus d'une économie d'eau, ceci permettrait de limiter les risques de lessivage du sel.

L'eau de surface fournit 66% des ressources, venant des fleuves et de 165 barrages (11Bm³), à 35% de la superficie irriguée, la ressource d'eau restante soit 34%, vient des usines de pompage privées (5.6Bm³) et assure environ 65% de la superficie irriguée. Le nombre de puits privés est approximativement de 180.000, dont un tiers seulement est autorisé. La quantité de l'eau est pompée dans les couches aquifères et excède le renouvellement de la ressource approximativement de 30%, conduisant à la recherche progressive des couches aquifères plus profondes. Cette tendance a été soulignée lors de la période très sèche en 1998 et 1999. Dans la région rurale de Damas, le niveau des couches aquifères est passé de 15 à 50m par rapport à la surface, asséchant complètement le ¼ des puits de ce secteur. En conclusion, au vu du rendement réel de l'application, approximativement une superficie excédante de 200 kha est irriguée par des couches aquifères profondes (ANRR, 2006).

Vu l'anomalie entre les ressources d'eau souterraines et la superficie irriguée, la modernisation devrait être concentrée sur approximativement 2/3 du secteur irrigué à partir des puits. Si toute extension du secteur irrigué est prévue, elle devrait l'être sur le secteur irrigué des ressources d'eau de surface avec des techniques modernisées. Une telle modernisation pourrait seulement avoir lieu si les possibilités du réseau d'approvisionnement en eau correspondent aux besoins. Les fermiers ne payent pas l'eau, mais payent seulement la participation proportionnelle à la partie irriguée couvrant approximativement 25% de secteur des dépenses mais ne payent rien pour l'entretien des réseaux de pompage privé des puits. Le comptage de l'eau n'est pas réalisé dans le pays au niveau de la ferme. La mesure des volumes est prévue dans les nouveaux projets collectifs des puits contrôlés par le ministère de l'irrigation en Syrie.

L'agriculture fournit près de 32% du produit brut domestique, représentant 31% de l'emploi. L'activité du maintien de l'irrigation dans les secteurs ruraux contribue à éviter

l'exode rural et à conserver l'emploi agricole, et plus généralement dans la campagne. Si le rendement de l'utilisation de l'eau peut être augmenté comme prévu précédemment, la Syrie pourra bénéficier de sa position géographique auprès de la Communauté européenne et exporter une partie de sa production.

Quelques récoltes considérées comme stratégiques font l'objet de contrats avec le gouvernement qui paye les graines, l'engrais et achète la production à un prix fixé, généralement plus haut que sur celui du marché international. Les problèmes restants sont dus au fait que la plupart de ces récoltes ne sont pas transformées mais vendues brutes à d'autres pays, ce qui constitue une perte de potentiel à la valeur ajoutée. Le problème de la salinité apparaît seulement dans le secteur du nord-est du pays.

Le coton est l'exportation agricole principale et le deuxième plus grand pourvoyeur net de devise étrangère. Le coton est une recette financière importante pour la Syrie et est également développée sur les sols salins tolérants où son rendement et sa qualité sont nettement inférieurs à ceux des sols normaux. Il a joué un rôle significatif dans le développement industriel et la génération d'emploi. Son impact sur le développement économique du pays est bien établi et on le connaît correctement sous l'appellation « d'or blanc » de la Syrie. Seulement environ 30% de la terre en Syrie sont cultivés. Une grande partie de la terre doit être irriguée, parce que la pluie tombe habituellement pendant l'hiver, plutôt que dans la saison de croissance végétale. La Syrie néanmoins parvient à produire une grande variété de récoltes. Le coton était la plus grande exportation de la Syrie et reste toujours importante pour l'économie. L'agriculture utilise 23% de la main d'œuvre. En 2005, la production de coton a atteint 900 000 tonnes.

Le coton croissant en conditions climatiques semi-arides et sur les sols salins exige une irrigation intensive. Suite à l'irrigation intensive, les rendements de récolte réalisés sont relativement hauts.

L'objectif général de cette recherche est de tenter d'améliorer la productivité agricole et la durabilité de l'irrigation de la culture du coton, dans le bassin de l'Euphrate en Syrie, intrinsèquement ou potentiellement approvisionnée en eau salée.

Les trois axes principaux de cette étude se résument à :

1. Evaluer les méthodes d'irrigation et déterminer la méthode optimale d'irrigation pour une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau ;
2. Utiliser l'eau de drainage pour sauvegarder les eaux douces et éviter la sur exploitation des eaux souterraines, sur la culture du coton, dans le bassin de l'Euphrate en Syrie,
3. Utiliser un modèle pour prédire le rendement de la récolte, l'humidité du sol et la distribution de la salinité du sol.

Selon le centre de recherches d'Almria dans la région de Deir AlZoor en Syrie orientale sur la rivière de l'Euphrate le rendement moyen du coton de 1990 à 2005 était de 2.8, 2.1, 2.7 et 4 tonnes ha⁻¹, sous, respectivement une irrigation par sillon, par bassin, par aspersion et par goutte à goutte.

Bien que les plantes de coton mûres soient tolérantes au sel, elles sont très sensibles à la salinité du sol pendant la germination et à l'étape juvénile. Par conséquent, afin de laver les sels des horizons extérieurs, des quantités élevées d'eau sont appliquées pendant ou après la saison de la période de lixiviation.

Beaucoup d'études entreprises par les organismes nationaux et internationaux et des chercheurs du centre de recherches d'Almria, ce qui conduit à opter pour un développement régional basé sur l'utilisation durable et efficace de la terre et de l'eau.

Des études sur le terrain sont incluses pour améliorer la compréhension sur la façon dont les fermiers traitent et contrôlent l'eau d'irrigation, les déficits d'eau et la salinité du sol pendant et en dehors des périodes de végétation. Cependant, les seules études sur le terrain sont insuffisantes pour gagner en perspicacité dans la façon dont interagissent les différentes parties du système sol-plante-eau-atmosphère. Ici l'application du modèle est l'une des options de la recherche.

Le niveau généralement peu profond des eaux souterraines est d'une part la conséquence de l'utilisation excessive de l'eau d'irrigation et d'autre part, un résultat de drainage imparfait, qui dans la région de Deir AlZoor est provoqué par plusieurs facteurs. Puisque, en raison des imperfections institutionnelles, l'eau d'irrigation n'est parfois pas disponible pour leurs besoins, les fermiers dans la région de Deir AlZoor tendent en de telles occasions à bloquer manuellement des drains et des canaux d'irrigation et à maintenir la haute humidité de sol avant et après la plantation du coton. En outre, la canalisation générale est également en dysfonctionnement et par conséquent la région de Deir AlZoor montre une nappe phréatique saline et peu profonde entre 1.5 et 2 mètre du niveau de surface. Les eaux souterraines peu profondes font progresser non seulement la salinité secondaire, mais contribuent également de manière significative à la demande d'eau des cultures.

On estime que les ressources d'eau non conventionnelles syriennes sont d'environ 1.2 milliard de m³, correspondant au retour des eaux de drainage selon Ragab (2004c). On est peu renseigné sur la quantification de la contribution de l'eau de drainage à satisfaire les demandes d'eau de récolte, principalement parce qu'une quantification précise de l'eau de drainage dans la zone racinaire des cultures in situ implique des installations expérimentales coûteuses comme la construction de lysimètres. La modélisation égard fournit une alternative efficace, car cela peut aider à comprendre le temporel aussi bien que des aspects spatiaux des flux de l'eau et des corps dissous dans le sol. C'est également une alternative bon marché, puisqu'elle n'exige pas l'installation chère et laborieuse des lysimètres.

Des expériences à court terme (moins de 10 ans) sont considérées appropriées pour examiner et paramétrer les modèles de simulation, qui en outre peuvent être appliqués pour des études de bilan d'eau, basées sur des données à long terme du climat Keating et al., (2002). Pereira et al. (2003) ont argué du fait que les expériences en combinaison avec des modèles de simulation offrent la possibilité de gagner en perspicacité détaillée sur le comportement du système, dans l'espace et dans le temps. Une telle combinaison éviterait également la contrainte que les expériences sur le terrain prennent souvent des emplacements spécifiques et du temps pour les conduire. Malgré le fait qu'à ce jour de nombreux modèles existent, la nécessité de les examiner et de les améliorer est encore forte Xu et Singh, (1996).

Un des modèles existants, le modèle SALTMED Ragab (2002), a été choisi et appliqué dans l'étude courante et adapté aux conditions locales. Le modèle SALTMED inclut les modules principaux suivants : évapotranspiration, absorption d'eau par la plante, transport de l'eau et de corps dissous sous différents systèmes d'irrigation, drainage et le rapport entre rendement de récolte et utilisation de l'eau. En fait, SALTMED est le seul modèle qui évalue quotidiennement les paramètres de la récolte K_c , K_{cb} et la profondeur des racines, en fonction du temps simulé, l'irrigation par goutte à goutte et en même temps se focalise sur la salinité du sol. Ragab et al. (2005a et 2005b) avaient avec succès examiné ce modèle, en utilisant des données de champ d'Egypte et de Syrie pour la tomate. Uzun (2004) avait évalué les données de terrain utilisées pour des modèles de SALTMED en Turquie pour le maïs.

Beaucoup d'études en Syrie ont été effectuées pour établir des équilibres eau sel pour différentes récoltes. Cependant, les rapports des résultats de la modélisation sont mal présentés dans la littérature. Dans certains cas, les différentes implications générales de ces modèles ne peuvent pas être évaluées en raison des paramètres de système et des variables d'entrée différentes, et par conséquent les divers instituts de recherche ont travaillé avec leurs propres modèles ou ont modifié les modèles existants.

Pour ces raisons, les modèles existants n'ont pas été employés couramment, aussi en raison de l'existence d'interfaces utilisateurs peu conviviaux. Par conséquent, le modèle bien connu SALTMED a été appliqué sur le coton au centre de recherches d'Almria.

En plus de l'application du modèle, la gestion agricole effectuée par les fermiers sur les champs de coton a été contrôlée pour évaluer les conséquences en ce qui concerne les équilibres eau sel établis et les flux de l'eau du sous-sol.

Ainsi, cette étude a été entreprise pour :

- établir un équilibre eau sel des champs de coton irrigués;
- évaluer la gestion agricole de la croissance de coton.

La définition, la distribution et les causes de la salinité du sol est passée en revue avec l'eau agricole de drainage, son impact sur le rendement des récoltes et la détérioration du sol due à l'irrigation par l'eau de drainage. On analysera les divers rapports des études de terrain concernant la tolérance au sel par la culture et l'évaluation des effets des différents facteurs pratiques, liés à la gestion de champ et aux conditions de champ. La tolérance au

sel par la culture, comme l'état du système sol - eau et la modélisation du sel sont détaillés et discutés au chapitre 1.

Le chapitre 2 est consacré à l'introduction générale à la région d'étude détaillée, le chapitre 2 est consacré à la description de la méthodologie de collecte des données au champ. Au chapitre 3, est décrit le modèle utilisé dans l'étude, Le chapitre 4, le calibrage du modèle en 1999 et la validation du modèle en 2003 et en 2004 en employant de l'eau douce. Le modèle sera encore examiné pour son exécution quand on utilise l'eau saline sous l'irrigation par le goutte à goutte en 1999 et de 1994 à 1996 pour une quantité différente d'irrigation, discute les résultats de l'étude, compare les résultats aux études précédemment entreprises dans la région, alors que le chapitre 5 apporte les conclusions.

En décrivant et en mesurant les flux réels de l'eau et des corps dissous aussi bien que la dynamique saisonnière du sel dans le sol, les résultats de la modélisation contribuent à identifier les problèmes de la gestion de l'eau. D'ailleurs, le modèle peut être employé en combinaison avec des modèles sur l'établissement du programme et de la gestion de l'irrigation aussi bien que l'analyse de la croissance de la culture dans le cadre du modèle et des systèmes interactifs d'aide intégrés à la décision.

Etude bibliographique

1.1. Introduction

L'introduction de l'irrigation dans les régions arides de beaucoup de pays a provoqué la perte de grands secteurs des terres autrefois productives en raison du type d'eau employé et de son taux de salinité (Afghanistan, Pakistan, Syrie et Chine). Cette dégradation est provoquée non pas par le processus de l'irrigation lui-même, mais par son application incorrecte ou négligente, et des mesures sont maintenant appliquées avec succès pour la récupération de quelques secteurs (Pakistan, Chine).

En fait le développement de l'irrigation en zone aride doit presque toujours se soucier du taux de salinité non seulement secondaire mais également primaire et fossile. Cette mobilisation primaire et fossile du sel s'est avéré l'une des principales causes de la salinisation du fleuve dans les bassins irrigués en zone aride Smedema et Shiati, (2002).

Le manque d'eau devient un facteur important gênant pour le développement économique généralement dans la Région du Moyen Orient et en particulier en Syrie. Le secteur agricole syrien est le principal secteur utilisant cette ressource limitée. L'agriculture joue un rôle important dans l'économie nationale. Environ 9 Mha de la terre est arable. Le barrage de l'Euphrate couvre maintenant 80% des besoins de l'irrigation. La salinité du sol augmente avec la distance au fleuve et devient forte dans les terrasses secondaires. Les causes de la salinité résultent des méthodes d'irrigation, d'évaporation et de la qualité d'irrigation de l'eau. Le niveau des eaux souterraines (environ 2 à 5 m de profondeur) influe sur cause la salinité en raison de la hauteur d'ascension capillaire dans les sols à textures lourdes. Dans des secteurs non cultivés du plateau, les niveaux d'eau atteignent 15-20 m de profondeur.

La Syrie couvre une superficie de 185,000 km², dont environ 65% reçoit moins de 200 mm de précipitations annuelles. Il y a environ 8.3 millions d'hectares de steppe et de pâture (45% de la surface totale de terre), 3.5 millions d'hectares (19% de la surface totale de terre) de terre non cultivée (roches, sable et marais) et 0.5 million d'hectares de forêt (2.5% de la surface totale de terre). Des 6.2 millions d'hectares de terres arables (33.5% de la surface totale de terre), 4.21 millions d'hectares sont cultivés annuellement et 1.8 millions d'hectares sont consacrés en rotation à la jachère annuelle. La production agricole est principalement implantée dans les secteurs de pluie, là où les précipitations fluctuent fortement d'année en année. La production de récoltes industrielles telles que le coton, la betterave à sucre et le tabac est moins affectée par les précipitations erratiques que les récoltes principalement produites sous l'irrigation. Environ 50% de la valeur de la production végétale est issue des 0.6 million d'hectares de secteurs irrigués. Le coton est un secteur d'exportation agricole principal et le deuxième plus grand pourvoyeur net de devise étrangère. L'agriculture pourrait apporter une plus grande contribution à l'économie si elle était plus efficace dans la gestion de son eau. Le secteur agricole contribuant à 20% de la valeur ajoutée à l'économie, utilise 30% de la main-d'œuvre du pays et participe environ aux deux tiers des exportations des produits non huileux. Il fournit les matières premières pour les industries de nourriture, de tabac, de textile et de cuir, utilisant la moitié de la main d'œuvre industrielle Thomson et al. (2000). On estime que la réserve des ressources d'eau non conventionnelles syriennes est d'environ 1.2 milliard de m³, mesurés comme des retours d'eau de drainage d'après Ragab (2004c).

L'importance de la terre dans la République Arabe Syrienne est évidente du fait que le revenu brut national dépend de la production agricole. Plus de 65% de la population syrienne dépend de l'exploitation de la terre et de production agricole pour gagner leur vie.

Se rendant compte de ce fait, le gouvernement syrien pendant les trois dernières décennies a fourni les moyens de moderniser la technologie agricole afin de mieux exploiter les ressources de terre et d'eau. En attendant, quelques problèmes sont survenus tels que la détérioration de l'environnement.

Dans les années 1950, le coton en croissance s'est largement étendu en Syrie en raison d'un bénéfice élevé, les fermiers syriens se sont précipités pour exploiter au maximum la terre sans considérer la durabilité de la production agricole des terres, ni le potentiel d'application des systèmes de drainage pour les maintenir en état. Les secteurs affectés par le sel ont maintenant gagné une grande partie des bassins de l'Euphrate, du Khabor et du Balikh.

La salinité est devenue le problème le plus menaçant qui se pose à l'agriculture en Syrie car elle a commencé à s'étendre dans quelques secteurs depuis les années 1970, et elle affectera la vie des personnes en zones rurales.

L'objectif de ce chapitre est de définir la distribution et les causes de la salinité du sol en passant en revue l'eau agricole de drainage, son impact sur le rendement des récoltes et la détérioration du sol due à l'irrigation par l'eau de drainage. Finalement, on passera en revue les divers rapports sur des études de terrain concernant la tolérance au sel de la récolte et d'évaluation des effets des différents facteurs pratiques, liés à la gestion de champ et aux conditions de champ sur la tolérance en sel de la récolte. Ces facteurs incluent : les conditions climatiques, la méthode d'irrigation, l'intervalle d'irrigation, la fraction de lessivage, l'utilisation de l'eau saline pendant la germination et les étapes de croissance préliminaire de la plante, la texture du sol et la salinité de la ligne de la graine initiale.

1.2. Salinité du sol: définition, distribution et causes

La salinité du sol est une limite qui se rapporte à l'état d'accumulation des sels solubles dans le sol. La salinité du sol peut être déterminée en mesurant la conductivité électrique d'une solution extraite à partir d'une pâte saturée en eau du sol. La conductivité électrique comme EC_e (conductivité électrique de l'extrait) avec des unités de deci-Siemens par mètre ($dS.m^{-1}$) ou du milli Mhos par centimètre ($mMhos.cm^{-1}$) exprime la mesure d'anions et de cations dans le sol.

Du point de vue agricole, les sols salins sont ceux, qui contiennent des quantités de sels solubles neutres suffisantes pour compromettre dans la zone de racine la croissance de la plupart des plantes (voir le tableau 1.). Par définition, les sols salins ont dans les

prélèvements de saturation une conductivité électrique de plus de 4 dS.m⁻¹ à 25°C (Richards, 1954).

Tableau 1. Gammes générales pour la tolérance de plante pour salinité de sol

Salinité (ECe, dS.m ⁻¹)	Réponse de la plante
De 0 à 2	La plupart du temps négligeable
De 2 à 4	La croissance des plantes sensibles peut être restreinte
De 4 à 8	La croissance de beaucoup de plantes usines est restreinte
De 8 à 16	Seulement les plantes de tolérance se développent de manière satisfaisante
Plus de 16	Seuls quelques, très tolérante plantes poussent de manière satisfaisante

À mesure que les niveaux de salinité augmentent, les plantes pompent moins facilement l'eau du sol, aggravant les conditions de stress hydrique. La salinité élevée du sol peut également causer des déséquilibres nutritifs, qui ont alors comme conséquence l'accumulation d'éléments toxiques dans les plantes, et elle réduit l'infiltration de l'eau si la teneur d'un élément minéral (comme le sodium) est élevée. Dans beaucoup de secteurs, la salinité du sol est le facteur limitant de la croissance des plantes. Le tableau 2. montre la tolérance de salinité de quelques types de récoltes.

Tableau 2. Tolérance de salinité de quelques types de récoltes.

Récoltes	valeur- seuil	Perte de rendement de 10%	Perte de rendement de 25%	Perte de rendement de 50%	Perte de rendement de 100%
	ECe, dS.m ⁻¹	ECe, dS.m ⁻¹	ECe, dS.m ⁻¹	ECe, dS.m ⁻¹	ECe, Ds.m ⁻¹
Haricots (champ)	1.0	1.5	2.3	3.6	6.5
Coton	7.7	9.6	13.0	17.0	27.0
Maïs	1.7	2.5	3.8	5.9	10.0
Sorgho	4.0	5.1	7.2	11.0	18.0
Betteraves à sucre	7.0	8.7	11.0	15.0	24.0
Blé	6.0	7.4	9.5	13.0	20.0

Source : Adapté du Doorenbos et Kassam (1979)

Il y a de larges secteurs de sols affectés par le sel sur tous les continents, mais leur ampleur et leur distribution n'ont pas été étudiées en détail (FAO, 1988). Malgré la disponibilité de beaucoup de sources d'information, les données précises au sujet des terres affectées par le sel dans le monde sont plutôt rares Gupta et Abrol, (1990).

Les statistiques concernant l'ampleur des secteurs affectés par le sel changent selon les auteurs, mais les évaluations sont en général de près de 1 milliard d'hectares (voir le tableau 3.), ce qui représentent une amplitude d'environ 7% des terres continentales Ghassemi, Jakeman, et Nix, (1995). En plus de ces secteurs naturellement affectés par le sel, environ 77 Mha ont été salinisés par une intervention humaine, dans 58% de ces derniers concentrés dans les secteurs irrigués. En moyenne, les sels affectent 20% des terres irriguées du monde, mais ils concernent plus de 30% dans des pays tels que l'Egypte, l'Iran et l'Argentine Ghassemi, Jakeman, et Nix, (1995).

Tableau 3. Ampleur des sols sel affectés (Szabolcs, 1979).

Région	Million d'hectares
L'Amérique du Nord	15.7
Le Mexique et l'Amérique Centrale	2
L'Amérique du Sud	129.2
L'Afrique	80.5
Asie du sud	84.8
L'Asie centrale et du nord	211.7
Sud-est asiatique	20
L'Australie	357.3
L'Europe	50.8
Total	952

Selon les évaluations de la FAO et de l'UNESCO, la moitié des schémas d'irrigation existants dans le monde est plus ou moins sous l'influence secondaire de la salinisation par envahissement de l'eau. Environ 10 millions d'hectares de terres irriguées sont abandonnés tous les ans en raison des effets nuisibles de l'irrigation, principalement la salinisation et l'alcalinisation secondaires Szabolcs, (1987). Le Figure 1 montre une évaluation de la distribution globale des secteurs affectés en sel.

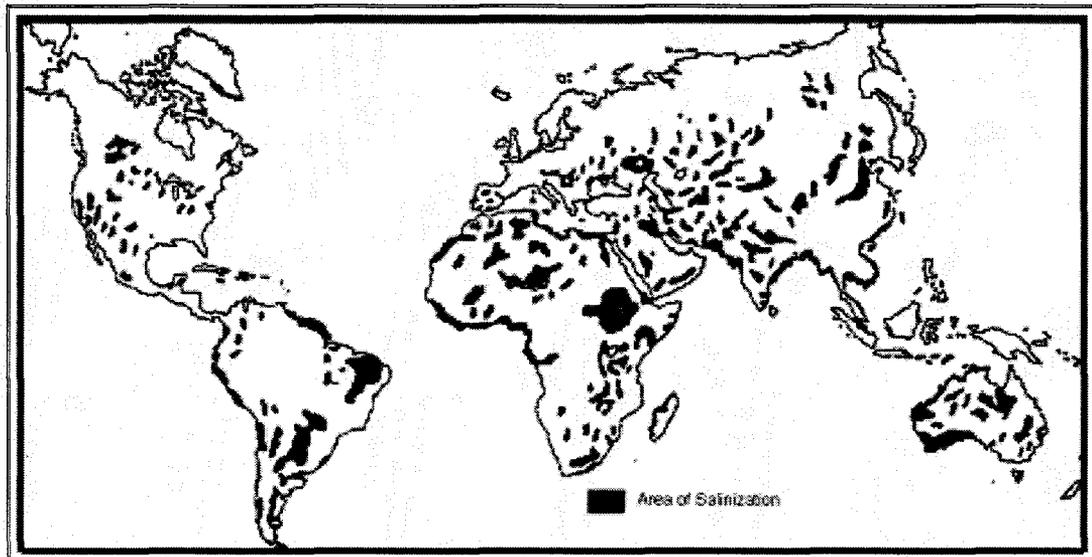


Figure 1. Distribution globale des secteurs affectés en sel Szabolcs, (1985).

Malgré la conscience générale de ces problèmes et après de tristes expériences, la salinisation et l'inondation d'eau de la terre irriguée continuent à augmenter. Dans quelques pays, la salinisation de la terre peut même menacer l'économie nationale. C'est particulièrement le cas en Argentine, en Egypte, en Inde, en Irak, au Pakistan, en Syrie et en Iran (Rhoades, 1990).

Les sols salins peuvent apparaître dans n'importe quelle région et n'importe quel climat dans le monde. Cependant, ces sols sont la plupart du temps concentrés dans les régions semi-arides et arides. Une des conditions pour la présence ou la formation des sols salins est une évaporation, dépassant considérablement la précipitation.

Les sources du sel dans le sol peuvent changer :

1. Le sel peut être présent dans le matériel parent, par exemple, dans des couches de sel, accumulées dans des périodes antérieures. Cette forme peut être présente dans le bassin de Balikh dans quelques dépôts gypsifères, et dans des formations plus profondes, originaires de la surface où la prolongation du Golfe Arabe a émergé dans la dépression mésopotamienne.
2. Le sel peut s'être formé pendant la désagrégation de la roche parent. Des sels sont généralement rendus libres par la désagrégation de la roche mais ils seront lixiviés, car ce processus est très lent. Cependant, quelques types de roche ont une composition chimique et une texture poreuse de telle sorte que sous des climats plus chauds des proportions de sels relativement élevées soient formées.
3. Le sel peut être aéroporté. Dans ce cas il est transporté dans l'air sous forme de poussière ou par l'eau de pluie. Dans la vallée de l'Euphrate le transport du sel par la poussière est un phénomène commun, mais il a une importance locale.

4. Les eaux souterraines peuvent être salines. Ceci peut provenir des raisons mentionnées ci-dessus. Dans ce cas si le niveau de l'eau est près de la surface, le sel s'accumulera dans la terre végétale en raison de l'évaporation. Quand le niveau de l'eau se situe plus profondément dans le sol, la couche saline peut être formée en profondeur, ce qui peut influencer le sol après utilisation, particulièrement avec une irrigation non contrôlée et une pratique insatisfaisante de drainage. Dans la vallée de l'Euphrate et d'autres secteurs de Balikh, la nappe des eaux souterraines est près de la surface pendant une partie de l'année là où l'accumulation du sel présente forme des croûtes de sel. En particulier l'eau de drainage dans des secteurs gypsifères contribue à la salinisation des sols.
5. Le sel apporté par l'eau d'irrigation. L'eau d'irrigation contient toujours une certaine quantité de sel et des méthodes incorrectes d'irrigation peuvent mener à l'accumulation de ce sel. Pendant l'envahissement par l'eau s'évapore encore en profondeur et le sel transporté se précipite.

En principe, il n'est pas difficile de contrôler la salinité du sol. La première chose nécessaire pour gérer la salinité est le drainage proportionné, normal ou synthétique. Si le niveau de salinité est trop élevé pour la végétation désirée, la suppression des sels est réalisée en lixiviant le sol avec de l'eau douce (à basse teneur en sels minéraux). L'application de 6 pouces d'eau réduira les niveaux de salinité d'approximativement 50%, 12 pouces d'eau réduiront la salinité d'environ 80%, et 24 pouces d'environ 90%.

La façon dont l'eau est appliquée est importante. L'eau doit s'écouler dans le sol plutôt que de couler en surface. Le drainage interne est impératif et peut exiger un labourage profond afin de casser vers le haut n'importe quelle couche étanche empêchant le mouvement de l'eau. Les systèmes d'irrigation par aspersion permettent généralement une meilleure gestion des taux d'application de l'eau. Cependant, l'irrigation d'inondation peut être employée si les emplacements sont à niveau et que l'application de l'eau est contrôlée.

Cependant, la détermination de quand, de où et comment la salinité peut se produire est essentielle pour déterminer la durabilité de n'importe quel système de production irriguée. Les actions de réhabilitation exigent une information fiable pour établir les priorités et choisir le type d'action le plus approprié dans chaque cas. Les décideurs et les agriculteurs ont besoin d'être assurés que toutes les évaluations et données techniques qui leur sont fournies soient fiables et robustes, autant que les effets économiques et sociaux de l'excédent. En sous-estimer ou non l'ampleur, l'importance, rend la distribution spatiale de la salinité néfaste (Metternicht et Zinck, 2003).

Maintenir des changements de salinité et prévoir une future dégradation nécessitent une surveillance afin que des décisions appropriées et opportunes puissent être prises pour modifier les procédures de gestion ou entreprendre la récupération et la réadaptation. La surveillance de la salinité signifie identifier d'abord les endroits où les sels se concentrent et, deuxièmement, détecter les changements temporels et spatiaux de cette occurrence. Tous les deux dépendent en grande partie du chemin particulier que les sels empruntent à

la surface et dans le manteau du sol, et des possibilités qu'offrent les outils de télédétection pour identifier le sel (Zinck, 2001).

Méthodes de remédiation de la salinité des eaux d'irrigation :

1. sur le plan hydraulique c'est surtout le lessivage et le drainage des eaux souterraines par le rabattement de la nappe par mise en place des drains ou des tranchées avec exportation des eaux souterraines salées de l'amont vers l'aval (méthode ASTRAN: Accelerated Salt TRANsport);
2. sur le plan agricole c'est de choisir des plantes de culture tolérantes à l'eau salée;
3. sur le plan de la ressource on peut faire appel à des eaux saumâtres ou à des eaux usées retraitées (lagunage près des zones urbaines comme à Marrakech au Maroc).

1.3. Réutilisation de l'eau de drainage.

La pression croissante sur les ressources d'eau douce disponibles dans beaucoup de secteurs du monde a incité l'usage de l'eau de qualité marginale pour l'irrigation. La réutilisation de l'eau agricole de drainage est déjà pratiquée à grande échelle dans plusieurs pays.

La réutilisation de l'eau de drainage pour l'irrigation peut être dangereuse pour l'environnement, puisque l'eau d'irrigation contient des polluants tels que la salinité, les microbes pathogènes, les métaux lourds et métaux en traces, les engrais et les pesticides. En outre, l'utilisation de l'eau de qualité marginale contribue à poser de sérieux problèmes de dégradation et de réduction de la productivité des végétaux du sol en raison de la basse qualité de l'eau résultant de l'irrigation. D'autres problèmes tels que des risques sanitaires humains et la dégradation de la qualité des eaux souterraines sont également possibles.

L'utilisation fiable d'eau de drainage dans l'irrigation doit respecter une gestion appropriée afin de réduire les impacts négatifs. L'objectif des procédures de gestion recommandées impliquent de contrôler, limiter, ou enlever des polluants tels que la salinité, les nitrates, les phosphates, les matières en suspension, les pesticides, les microbes pathogènes, les métaux lourds et d'autres produits chimiques.

1.3.1. Qualité de l'eau agricole de drainage.

Les impacts de la réutilisation de l'eau de drainage dépendent principalement de sa qualité, la qualité de l'eau de drainage utilisée dans l'irrigation en déterminant les impacts prévus. En comparant la qualité de l'eau d'irrigation aux normes internationales, l'impact peut être évalué. L'eau agricole de drainage représente l'eau d'une région agricole issue de l'excédent d'écoulement ou du sol ou, généralement, du mélange des deux. Une telle eau contient une variété de substances dissoutes et en suspension comprenant des sels, les composés organiques, et les particules du sol qui en déterminent sa qualité. Bower (1974)

a énuméré ainsi sept facteurs déterminant la qualité des eaux agricoles de drainage: (1) le rapport entre les eaux de surface et de l'eau filtrée, (2) la qualité de l'eau appliquée, (3) les amendements chimiques appliqués au sol, (4) la fraction de drainage, (5) la solution et la précipitation de sels minéraux, (6) l'adsorption ou la capacité d'échange cationique (CEC), et la réaction d'oxydation/réduction dans le sol, et (7) l'exportation par les récoltes des éléments dissous dans le sol. Les paramètres de qualité de l'eau d'irrigation incluent un certain nombre de propriétés spécifiques de l'eau liées au rendement et à la qualité des récoltes, à l'entretien de la productivité du sol, et de la protection de l'environnement. Ces paramètres représentent les caractéristiques chimiques et physiques de l'eau. Les directives évaluant la qualité de l'eau utilisée dans l'irrigation sont récapitulées dans le tableau 4.

L'approvisionnement conventionnel des ressources en eau de bonne qualité devient de plus en plus rare. Les eaux souterraines salines, l'eau de drainage et l'eau usagée sont de bonnes alternatives pour l'irrigation. Shalhevet et Kamburov (1976) ont rapporté que des eaux d'une salinité, aussi élevée que 6000 mg.l^{-1} , ont été employées pour irriguer les récoltes tolérantes au sel. Mass (1990) a mentionné des récoltes cultivées avec succès avec de l'eau ayant des salinités de 1.3 à 9.4 dS.m^{-1} . Rhoades (1998) a souligné l'utilisation de l'eau saline et la réutilisation d'eau de drainage pour la production de nourriture afin de répondre aux demandes croissantes d'eau. Kandiah (1998) s'est concentré sur l'importance de l'eau saline utilisée dans l'agriculture, les problèmes potentiels de la salinité, la sodicité, la toxicité spécifique d'ion et le déséquilibre d'éléments nutritifs. Pour une information supplémentaire on consultera les travaux de Flowers et al., (2005), Malash et al., (2005), Ragab (2004a, 2004b, 2005a et 2005b) et Ragab et al., (2005a et 2005b).

1.3.2. Salinité de l'eau agricole de drainage.

L'eau d'irrigation contient toujours une certaine quantité de sels, qui détermine principalement sa qualité. Les sels avec une solubilité plus élevée restent dans la solution du sol, avec filtration possible vers le système de drainage. La teneur en sel du sol modifie considérablement la composition de l'eau d'irrigation. Comme les sels normaux présents dans le sol et l'eau d'irrigation possèdent différentes solubilités, certains d'entre eux peuvent précipiter dans le sol à mesure que la concentration augmente tandis que des sels plus solubles restent dans la solution et se déplacent vers les drains. Ceci explique la différence de composition des sels entre l'eau d'irrigation et l'eau de drainage. En raison de la nature variable des différents effluents déchargés dans les collecteurs, la quantité et la qualité de leur écoulement montrent un éventail de variabilité spatiale et temporelle de la salinité. La salinité de l'eau de drainage augmente toujours dans les secteurs lors de l'étape de récupération quand dans ces secteurs l'eau atteint un état d'équilibre. Elle augmente également quand la salinité de l'eau d'irrigation est haute et les eaux souterraines, relativement salines (Abdel-Dayem, 1994).

1.3.3. Impact de l'irrigation avec de l'eau de drainage sur le rendement de la récolte.

L'utilisation de l'eau d'irrigation de mauvaise qualité dans l'irrigation a comme conséquence un problème de salinité du sol sur les sels de l'eau d'irrigation accumulés dans la zone racinaire des végétaux et des rendements (FAO, 1976). La plupart des sels supplémentaires par irrigation subsistent dans le sol pendant la consommation d'eau par la récolte. Les sels s'accumulent et réduisent la disponibilité de l'eau du sol à la récolte. L'eau saline d'irrigation exerce une variété d'effets sur le développement de la plante et la qualité du rendement dépend de la concentration en sel soluble, de la variété de plante et sa tolérance à la salinité lors des différentes étapes de développement, les conditions atmosphériques et la gestion d'irrigation (Bower, 1974). La germination ou l'ensemencement est l'étape la plus sensible à l'irrigation saline de l'eau. La germination pourrait être retardée et réduite avec l'augmentation de salinité ou du rapport d'adsorption de sodium (SAR), ou les deux. La réduction de la germination dans des conditions salines pourrait être due à la plus grande pression osmotique de la solution du sol, réduisant par conséquent ainsi le taux d'absorption et, causant un stress d'humidité dans la graine. Elle pourrait également être due à l'afflux des ions en quantités assez grandes pour les rendre toxiques à l'embryon de la graine.

Les directives conventionnelles pour l'évaluation de la tolérance en sel des végétaux données par Ayers et Westcot (1976 et 1985) et ASCE (1993), sont basées sur deux paramètres :

- « salinité de seuil »^(a). Cette valeur représente la salinité maximale permise à la zone racinaire du sol pour qu'il n'y ait aucune réduction de rendement de récolte ; et
- les « pour cents au champ » rapportent le déclin par unité d'augmentation de salinité au delà de la valeur- seuil^(b).

Le rendement de récolte relatif (Y_r) pour les salinités du sol (conductivité électrique de l'extrait du sol saturé) au delà de la valeur- seuil de ^(a) ($EC_e > a$), peut être estimé en utilisant « le modèle de la fonction de production », (le schéma 2.1), comme présenté par Maas et Hoffman (1977) :

$$Y_r = 100 - b(EC_e - a)$$

Où EC_e est la conductivité électrique moyenne ($dS.m^{-1}$) d'un extrait saturé pris de la zone de racine.

Les données de tolérance en sel (^(b) et ^(a)), pour différentes récoltes, sont indiquées dans les directives conventionnelles Maas et Hoffman, (1977). Ces données ont été généralement obtenues à partir de techniques sur une parcelle de terrain artificiellement salinisée. La plantation dans ces parcelles de terrain est effectuée dans des conditions non-salines comprenant des couches granulaires non-salines (le sol des parcelles de terrain expérimentales a été lixivié avec l'eau douce avant l'ensemencement) et l'irrigation

avec l'eau douce pendant les étapes préliminaires de croissance (germination et étapes précoces du développement des plantes).

Tableau 4. Lignes directrices pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation

Problème potentiel d'irrigation	Unités	Degré de restriction à l'utilisation		
		Aucun	Léger pour modérer	Grave
Salinité				
Ecw or	dS/m	<0.7	0.7-3.0	>3.0
TDS	mg/l	<450	450-2000	>2000
Infiltration				
SAR=0-3 and Ecw		>0.7	0.7-0.2	<0.2
3-6		>1.2	1.2-0.3	<0.3
6-12		>1.9	1.9-0.5	<0.5
12-20		>2.9	2.9-1.3	<1.3
20-40		>5.0	5.0-2.9	<2.9
Toxicité spécifique d'ion				
Sodium (Na)				
Irrigation superficielle	SAR	<3	3-9	>9
Irrigation par aspiration		<3	>3	
Chlorure (Cl)				
Irrigation superficielle	meq/l	<4	4-10	>10
Irrigation par aspiration	meq/l	<3	>3	
Bore (B)				
	meq/l	<0.7	0.7-3	>3
Effets divers				
Azote (NO ₃ -N) ³	meq/l	<5	5-30	>30
Bicarbonate (HCO ₃)	meq/l	<1.5	1.5-8.5	>8.5
pH			Gamme normale 6.5-8.4	

Source : Adapté d'Ayers et de Westcot (1985)

Des traitements différentiels de salinité (avec de l'eau à une concentration donnée en sel) ont été graduellement mis en application après établissement d'une culture François et al., (1986). En outre, afin d'éliminer le stress de l'eau comme facteur expérimental et afin de maintenir la salinité du sol et la teneur en eau du sol relativement uniforme dans le profil de sol, de fréquentes irrigations avec une haute fraction de lixiviation d'environ 0.5 ont été appliquées. Des rendements de récolte ont été alors corrélés avec une salinité moyenne (EC_e) de la zone racinaire à la fin de la saison de croissance végétale. Dans la pratique, dans des conditions réalistes de champ, l'uniformité est l'exception plutôt que la règle, et la salinité peut être présente avant que la végétation ne soit établie. En outre, les plantes peuvent avoir différentes sensibilités à la salinité lors des différentes étapes du développement.

Les rapports disponibles d'une variété de régions agro climatiques dans le monde indiquent que cela ne montre pas le degré de tolérance au sel pour les récoltes locales rapporté par les directives conventionnelles. En raison des facteurs de champ comprenant des pratiques agricole et d'irrigation s'ajoutant aux caractéristiques de sol, les récoltes semblent avoir une tolérance beaucoup plus basse vis à vis du sel que le suggèrent les données présentées par Ayers et Westcot (1985) et Maas et Hoffman (1977) en tant que « directives universelles ».

1.3.4. Détérioration du sol due à l'irrigation de l'eau de drainage

La salinité de l'eau affecte les caractéristiques du sol telles que la capacité d'infiltration, la capacité de conservation de l'eau, la perméabilité, et les états d'aération, et l'évapotranspiration Willardson et al., (1997). Les problèmes physiques de sol sont en général provoqués par des ions excessifs de sodium dans l'eau d'irrigation. Le rapport du contenu du sodium sur la somme du calcium et du magnésium contenus est une mesure indiciaire d'effet néfaste. Pour déterminer le degré d'absorption par lequel des ions de sodium par un sol, le rapport d'adsorption du sodium (SAR) peut employer suivant:

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca + Mg)}}$$

Où:

Na = sodium en meq. L⁻¹.

Ca + Mg = calcium et magnésium en meq. L⁻¹ pour un SAR plus grand que 6 à 9. L'eau d'irrigation pourrait poser un problème de perméabilité sur les types de sol soumis au gonflement. Une perméabilité améliorée devrait être obtenue par la réduction de sodium dans l'eau d'irrigation et l'augmentations de calcium et de magnésium. Le gypse, le soufre ou l'acide sulfurique sont les amendements du sol les plus généralement utilisés tandis que le gypse, l'anhydride acide et le dioxyde soufre sont employés comme amendements de l'eau.

1.4. Tolérance au sel de quelques végétaux sur le terrain

Les conditions dans lesquelles les données « des directives universelles » ont été obtenues étaient, comme décrit ci-dessus, très idéales. En plus du fait des traitements de salinisation lancés vers l'étape finale de plante, des irrigations fréquentes avec une haute fraction de lessivage ont été appliquées, créant un état d'équilibre des conditions à la fois pour l'eau et l'écoulement des solutions de sel du sol (aucun changement avec le temps dans la teneur en sel et en eau dans le sol et une distribution égale de la salinité de l'eau du sol dans la zone racinaire). Les conditions ci-dessus sont rarement réalisées dans des applications sur opérations pour terrains normaux.

Lors de conditions d'irrigation efficace, avec une faible fraction de lixiviation, et une application peu fréquente d'irrigation, et état d'équilibre n'est pas facilement réalisé. L'état de champ commun représente donc un module temporaire de salinisation progressive pendant la saison d'irrigation Rhoades, (1972) et de lixiviation pouvant se produire abruptement en dehors de la saison d'irrigation. Dans de telles conditions, de grandes variations spatiales et temporelles de salinité dans la zone racinaire peuvent être envisagées.

D'autres facteurs en plus de la variabilité spatiale et temporelle peuvent influencer la réponse de la récolte à la salinité comme les étapes de croissance Maas and Grieve, (1994); François et al., (1994); Van Hom, (1991), la salinité initiale de la couche Van Hom, (1991) ; François et al., (1986), la fraction de lessivage Bresler, (1982) ; Rhoades, (1972) ; Bower et al., (1969) et la texture du sol Van Hom et al., (1993) ; Bhumbla, (1976).

Par conséquent, sous des conditions de champ local (gestion d'agriculture et d'irrigation, du climat, de la texture et la structure du sol) la réponse à la salinité d'une récolte est en grande partie affectée par l'effet combiné de tout ou partie de ces facteurs. Les rapports sont disponibles dans la littérature montrent des récoltes, sur le terrain, beaucoup moins tolérantes à la salinité que celle présentées par Ayers et Westcot (1985).

Ballantyne (1962) a indiqué que le blé en Saskatchewan (Canada) a produit un bon rendement lors de valeurs de salinité de sol jusqu'à 3 dS.m^{-1} et un rendement réduit de 50% une fois exposé aux niveaux de la salinité de sol de 6.6 dS.m^{-1} . Ces valeurs sont de beaucoup inférieures à la valeur seuil rapportée dans les directives conventionnelles (de 6 dS.m^{-1} pour une valeur relative à un rendement de 100%). Une étude sur le terrain conduite dans le delta de l'Egypte a montré pour le blé une valeur seuil de salinité du sol de 2.5 dS.m^{-1} Abdel Dayem et autres. (1989). Les mesures en champs de blé et la salinité du sol de 86 fermes dans Haryana, en Inde, rapportent que la valeur seuil atteint la moyenne de 3.5 dS.m^{-1} Osterbaan et al. (1991). Les résultats d'autres régions agro-climatiques de l'Inde (Indore et Siniguppa) ont montré, même lors des pluies de mousson, une réduction de rendement de blé dans les sols à texture lourde lors que la salinité de l'eau d'irrigation a excédé 2 dS.m^{-1} Bhumbla, (1976). Dans une étude Minhas (1996) a établi dans les régions semi-arides de l'Inde, un seuil de salinité de l'eau d'irrigation à une valeur de 1 dS.m^{-1} dans un sol silteux de terre grasse d'argile. Au Pakistan, Hummadi et

al., (1980) et Makhdoom et al., (1986) les rendements maximum obtenus de blé sont limités à 4 dS.m^{-1} , valeur au delà de laquelle n'importe quelle augmentation de salinité a des effets nuisibles sur le rendement. Dans une région semi-aride de la Syrie (région d'Al-Khabur), Wakil et Bonnell (1996) ont rapporté que le blé d'une argile de sol glaiseux a une valeur de salinité au seuil limite de 1.8 dS.m^{-1} . Dans la région aride de l'Irak, Hardan (1977) a indiqué que le niveau seuil de salinité de l'eau d'irrigation du blé était de 4 dS.m^{-1} pour un sol arénacé de terre grasse.

McKenzie et al., (1983) prouvent que le rendement d'orge a été réduit en moyenne de 8.8% pour une unité d'augmentation EC_e , au-dessus d'une valeur initiale EC_e de 2.2 dS.m^{-1} . Fowler et Hamm (1980), dans une expérience en terre sèche au Saskatchewan (Canada), constatent que la réduction du rendement de l'orge atteint la moyenne de 10.1 % par augmentation d'unité EC_e au-dessus de valeur initiale de 3.6 dS.m^{-1} . Ce taux de changement de rendement sur les sols salins en Saskatchewan est semblable aux données de Holm (1978) corrélant un rendement de 50% d'orge à une EC_e de valeur 7.8 dS.m^{-1} . Wakil (1994) a rapporté que dans un sol de terre grasse arénacée d'une région semi-aride de la Syrie, le rendement d'orge a commencé à diminuer à une valeur de EC_e de 4.5 dS.m^{-1} . Ces valeurs sont de beaucoup inférieures à celles rapportées par les directives conventionnelles : "(a)" = 8 dS.m^{-1} et "(b)" = 5%.

Thomas, (1980) a indiqué que le coton dans le Texas, aux Etats-Unis, a produit de bons rendements avec des valeurs de salinité du sol jusqu'à 2 dS.m^{-1} . Ces valeurs sont de beaucoup inférieures à la valeur- seuil rapportée dans les directives conventionnelles (EC_e de 7.7 dS.m^{-1} pour une valeur relative de rendement de 100%). Une étude sur le terrain conduite en Chine a montré pour le coton une valeur seuil de salinité du sol de 5 dS.m^{-1} Fang et al., (1978). Les mesures sur champs de coton et de salinité du sol dans Ouzbékistan ont indiqué une valeur seuil moyenne de 5 dS.m^{-1} Bressler, (1979).

D'autres cultures présentent la même tendance à montrer des valeurs plus basses "(a)" dans plusieurs domaines, comparées aux valeurs universelles de directives citées dans la littérature. C'est le cas avec la moutarde en Inde, Minhas, (1996) ; le soja dans la vallée de Murrumbidgee, Australie Beecher, (1994); le pâturage perenniel dans la Gulburn Valeey, Australie Mehanni et Respys, (1986). Certains de ces résultats sont non corrélés dans le Tableau 5.

1.5. Facteurs de champ affectant la réponse à la salinité de récolte

1.5.1 Conditions climatiques

La température atmosphérique, l'humidité de l'atmosphère et les précipitations influencent de manière significative la tolérance des végétaux au sel. En général la plupart des récoltes sont plus sensibles à la salinité dans des conditions chaudes et sèches que lors de conditions fraîches et humides Hoffman et Rawlins, (1971). Les températures augmentent le niveau d'effort auquel une récolte est exposée, en raison du taux accru de transpiration ou en raison de l'effet de la température sur les transformations

biochimiques ayant lieu dans la feuille de la plante. L'augmentation du niveau d'effort a pour conséquence des changements dans la capacité de réponse à la salinité.

Tableau 5. Valeurs- seuil typiques de salinité "(a)" trouvées dans la littérature

Récolte	"(a)" (dS.m ⁻¹) (1)	"(a)" (dS.m ⁻¹) (2)	Référence
Blé	6	1.6	AICRP, 1994
		4	Bhumbla, 1976
		2.5	A.Dayem et al., 1989
		3	Ballantyne. 1962
		3.5	Iosterbaan et al., 1991
		4	Hummadi et al., 1980
		4	Makhdoorn et al., 1986
		1.8	Wakil and Bonnell, 1996
		4	Hardan, 1977
		Orge	8
3.5	Fowfer and Hamm, 1980		
Coton	7.7	2	Thomas, 1980
		5	Bresler et al., 1979
		5	Fang, 1978
Soja	5	2.1	Beecher, 1991
Pâturage	1.8	1.2	Mehanni and Repsys, 1986

(1) tels que donnés par Ayers et Westcot (1976) et publication de FAO (1985).

(2) tels qu'obtenus sur le terrain.

Les températures réduisent la tolérance des récoltes au sel. Ahi et Power (1938) et Minhas (1996) rapportent que le blé dans la région fraîche de l'Inde du Nord (Agra) a eu une tolérance plus élevée au sel (EC_e de 3.8 dS.m⁻¹) que dans les régions chaudes méridionales (Dhamard) où EC_e s'est avéré égal à 0.9 dS.m⁻¹. Les recherches de Pasternak et De Malach (1995) ont prouvé que le rendement d'un champ de tomates planté au printemps sous des conditions climatiques méditerranéennes (t = 17°C) était deux fois plus important que celui d'un champ de tomates plantés en été (t = 30°C) quelque soit l'usage d'une même eau d'irrigation de 6.2 dS.m⁻¹.

Seule une humidité atmosphérique élevée tend à augmenter la tolérance au sel de quelques plantes en diminuant leurs niveaux d'effort de récolte et de ce fait réduisant les dommages du sel Hoffman et Aawlinr (1971). Les récoltes sensibles au sel bénéficient plus d'une humidité élevée que les récoltes tolérantes au sel Hoffman et Jobs, (1983).

Les précipitations n'ont aucun effet direct sur la réponse en salinité, excepté lorsque des précipitations élevées peuvent augmenter la lixiviation et réduire la concentration en sel

du sol, permettant de ce fait l'utilisation d'une eau de salinité plus élevée quand d'autres conditions le rendaient possible. Dhir (1977) a rapporté que dans des secteurs soumis aux pluies de mousson en Inde, un blé irrigué en utilisant l'eau saline de 8 dS.m^{-1} ne subissant pas de réduction de rendement.

1.5.2 Méthode d'irrigation

Le profil de salinité du sol, d'eau transpirée ou évaporée, dépend dans une première phase du modèle de distribution de l'eau inhérente à la méthode de gestion d'irrigation employée, et dans une deuxième phase des propriétés hydrologiques du sol.

Dans des systèmes d'irrigation de sillon et de bassin (système traditionnel utilisé en Syrie) le profil de la teneur en eau développé dans le sol pendant l'infiltration est complètement saturé (Phillip, 1957). Dans la méthode d'irrigation par aspersion, tant que l'intensité du sprinkler (1) d'application de l'eau est moindre que la capacité d'infiltration du sol à la saturation ($I < K_s$), un profil uniforme non saturé de teneur en eau est habituellement développé dans le sol (Rubin et Steinhardt, 1964). La teneur en eau du sol dans ce cas-ci n'atteint pas la saturation à un point quelconque mais approche une valeur limite qui dépend de l'intensité du sprinkler. Par conséquent, le sel accumulé dans le profil du sol dans le système d'aspersion est moindre que la quantité de sel accumulé dans les systèmes d'irrigation superficielle (Bernstein et François, 1973a) menant à des rendements de récolte plus élevés. Cependant, l'irrigation par aspersion standard est inévitablement accompagnée du mouillage du feuillage de la plante. Puisque du sel peut être absorbé directement par les feuilles, certaines récoltes (principalement légumes, vergers, coton) éprouvent des dommages foliaires et subissent les réductions possibles en raison d'une irrigation avec de l'eau saline (Maas et al. 1982). L'irrigation par aspersion peut sans risque être employée pour d'autres récoltes telles que le blé et l'orge (Aggarwal et Khanna. 1983).

Les systèmes d'irrigation par le goutte à goutte ont l'avantage de pouvoir maintenir une teneur élevée en eau du sol dans la zone racinaire par des applications fréquentes mais faibles d'eau. Les racines des plantes tendent à proliférer dans la zone lixiviée avec un contenu élevé d'eau salée près des sources d'eau. Ainsi le modèle typique de distribution de sel est une concentration minimum en sel, sous les dispositifs d'écoulement, due à la lixiviation et à une accumulation marquée des sels en avant du mouillage et à la surface du sol entre les dispositifs d'écoulement Shalhevet et al., (1983). En outre l'irrigation par goutte à goutte évite des dommages foliaires. Une comparaison de l'irrigation par aspersion et par goutte à goutte sur des pommes de terre a montré un seuil de salinité inférieur à celle d'une irrigation par aspersion Meiri et Plaut, (1985).

1.5.3 Intervalle d'irrigation.

La recommandation commune pour faire face aux sols salins et aux eaux salines est d'augmenter la fréquence d'irrigation. Peu de preuves existent toutefois pour corroborer cette recommandation (Ayers et Westcott, 1976).

Pendant l'assèchement du sol entre les irrigations en raison de l'évapo-transpiration (ET), le potentiel de matrice tout autant que le potentiel osmotique diminuent. Le taux auquel ces processus se produisent dépend du taux de ET et du rapport entre le potentiel matriciel (Ψ) et la teneur en eau du sol (θ). Le taux de séchage du sol diminue. Cependant, au cours des diminutions du potentiel osmotique, ceci entraîne de ce fait une valeur plus élevée du potentiel de matrice à l'irrigation suivante. Par conséquent la prise d'eau par les récoltes est réduite et, on s'attend à ce que le rendement de récolte en souffre.

Par conséquent, on considère habituellement que l'irrigation des sols salins devrait être plus fréquente parce qu'elle réduit l'effet cumulatif sur la matrice et les potentiels osmotiques entre les cycles d'irrigation. Cependant une telle opinion est encore controversée car de petits intervalles d'irrigation induisent plus tard plus de mouillage des couches supérieures du sol et ainsi plus de pertes par l'ET et plus d'accumulation de sel dans les couches peu profondes du sol.

Ce processus a été mis en évidence par van Schilfgaarde et al., (1974) à partir de calculs types et de calculs expérimentaux par Bernstein et François (1973b). Leurs résultats indiquent que les résultats accrus de fréquence d'irrigation avec un décalage ascendant de la crête dans le profil de distribution du sel, augmentant de ce fait la concentration moyenne en sel dans la partie supérieure de la zone racinaire. En outre, l'irrigation suscite plus fréquemment l'évaporation du sol, liée aux applications additionnelles de l'eau, et une augmentation de la quantité de sel appliqué. En conséquence, raccourcir l'intervalle entre les irrigations pour surmonter les effets de concentration du sel dans le séchage du sol peut avoir comme conséquence une augmentation globale de la salinité du sol.

De même, des intervalles prolongés d'irrigation induisent habituellement en conséquence des racines plus profondes et une plus grande extraction de l'eau d'une plus grande zone de sol, ayant pour résultat une meilleure distribution de salinité dans le profil du sol (Minhas, 1996). Globalement la littérature montre soit aucun avantage à une fréquence croissante de l'irrigation avec de l'eau saline Shalhevet et al., (1983); Hoffman et al., (1983); Bernstein and François, (1973 b) ou soit des dommages accrus Wagenet et al., (1980); Ayoub, (1977); Goldberg and Shmueli, (1971).

1.5.4 Fraction de lessivage.

La fraction de lessivage (LF) peut être définie par le rapport entre la somme de l'eau d'irrigation appliquée (D_i) et de la pluie efficace (P_e), et tous les besoins en eau de la récolte (ET_c) :

$$LF = [(D_i + P_e) / ET_c] - 1$$

La valeur de fraction de lessivage appliquée influence la distribution de sel dans le profil du sol. Selon la valeur de LF utilisée, les profils de salinité peuvent être corrélés de manière uniforme avec la profondeur, ou être fortement non uniformes, corrélés avec des salinités changeantes d'une concentration approximative de celle de l'eau d'irrigation près

de la surface du sol et souvent vers la base de la zone racinaire. En raison de l'évapotranspiration et du drainage, la concentration en sel dans le profil du sol change dans les intervalles entre les irrigations.

Bower et al. (1969) indiquent que l'interaction entre la concentration en sel de l'eau d'irrigation, la fréquence d'irrigation et la fraction de lessivage, détermine la concentration et la distribution en salinité du sol dans la zone racinaire. Ils ont prouvé que la salinité du sol de la zone racinaire s'accroît brusquement à mesure que la salinité de l'eau d'irrigation augmente et que la fraction de lixiviation diminue. Bernstein et François (1973b) rapportent pour une valeur donnée de salinité de l'eau une diminution, des rendements de récolte lors de valeurs décroissantes de la fraction de lessivage. Les effets de fraction de lessivage sont majorés par l'augmentation de la salinité de l'eau d'irrigation. La même tendance a été confirmée par Van Hom et al. (1993).

La valeur de fraction de lixiviation appliquée a été établie pour affaiblir la valeur-seuil. Les rapports prouvent que la valeur-seuil diminue brusquement lors d'une diminution de fraction de lessivage Prendergast, (1993) ; Bresler et al., 1982 et Hoffman et al., 1979). Van Hom et autres. (1993) montrent pour une fraction de lessivage de 0.25 une valeur-seuil de blé de moins de 3 dS.m⁻¹. Les résultats de Bresler et al., (1982), attestent cela pour une quantité de fraction de lessivage plus haute de 0.5, un rapport constaté entre le rendement relatif et la salinité du sol tel que ce qui est décrit par Mass et Hoffman (1977) pour approvisionnement en eau d'irrigation a été limité à une fraction de lessivage avec moins de 0.5. Le modèle de Mass et Hoffman était imprécis. Prendergast (1993), a présenté un rapport linéaire entre les valeurs de salinité seuil et les fractions de lixiviation. Il a prouvé que l'équation de fonction de production entre la salinité de l'eau d'irrigation et le rendement relatif dépendait de la valeur de fraction de lessivage.

Dans des secteurs semi-arides, à pénurie d'eau, l'eau d'irrigation est généralement appliquée selon une basse fraction de lixiviation (LF est en général de moins de 0.3). En outre, dans quelques secteurs, la basse capacité normale de drain du sous-sol limite la valeur de la fraction de lixiviation qui pourrait être appliquée (Beecher, 1991). Ceci peut être lié à une augmentation du pourcentage d'argile en relation avec la profondeur ou l'existence d'un horizon d'argile de la partie inférieure du profil du sol.

1.5.5 Utilisation de l'eau saline pendant la germination et les étapes préliminaires de croissance de la plante.

La germination, l'apparition de la croissance précoce de la plante sont des périodes très critiques pour une récolte afin d'obtenir une bonne tenue. Des pertes de la densité des plantes pendant cette période ne peuvent être compensées et causeront une perte équivalente dans la production. Dans des conditions salines d'irrigation, avec de l'eau saline ou sur un sol salin, la plante rencontre généralement plus de problèmes pendant la germination, l'apparition et la croissance précoce que pendant les étapes postérieures de croissance et peut même ne pas être établie de manière stable. En fait, l'impossibilité d'obtenir un bon standard des plantes est souvent le facteur limite de production végétale dans la plupart des secteurs salins. Une fois la bonne tenue atteinte, les risques de gestion

sont généralement sensiblement réduits Rhoades et Loveday, (1990). La difficulté essentielle est la salinité élevée dans la couche supérieure du profil du sol. Ceci expose la graine et la plante en cours de germination à une concentration beaucoup plus élevée en sel qu'aux étapes postérieures de croissance. La concentration élevée en sel dans la couche supérieure se produit pendant la germination et l'apparition de la plante lorsque presque toute la perte d'eau est provoquée par l'évaporation du sol nu et cela pendant l'étape de plantule où le système racinaire est encore peu profond et l'absorption d'eau par la plante principalement limitée à cette couche supérieure. La perte d'eau de la couche supérieure cause des concentrations élevées en sel, en partie en raison du contenu d'humidité brusquement réduit et en partie par une augmentation de la teneur en sel due au transport capillaire de la solution de sel des couches fondamentales.

Une étude poussée sur le terrain de la distribution de sel dans le sol résultant de l'utilisation de l'eau saline d'irrigation a été faite par Bernstein et al., (1955), Bernstein et François (1973a), Miyamoto et al., (1985.1989) et van Hom (1991). Ils ont montré la formation d'une salinité excessive localisée dans la ligne de graine (couche supérieure de sol) excédant de plus de vingt fois la salinité de l'eau d'irrigation appliquée sur la surface du sol. Bernstein et François (1973 a) indiquent cela même si l'on utilise une eau de faible salinité ($= 0.6 \text{ dS.m}^{-1}$). La concentration en sel, sur champs, avec des sillons irrigués peut atteindre un seuil supérieur à $10\text{-}25 \text{ dS.m}^{-1}$ dans la couche supérieure du sol (0 - 10 centimètres).

Van Hom (1991) prouve que la concentration en sel pendant la germination et lors des premières étapes de la plante dans une couche de sol supérieure arénacée (0-5 centimètre) peut atteindre une valeur dix fois plus importante que la concentration initiale en sel. Son étude a également prouvé que ce problème a été amplifié par l'augmentation de la salinité de la ligne de graine initiale.

L'accumulation de sel dans la couche supérieure du sol pendant la germination et les premières étapes influencent défavorablement sur les résultats de la récolte. En fait, l'obtention d'une bonne tenue des plantes est souvent le facteur principal qui limite la production végétale dans des secteurs salins. Le problème d'un établissement réduit de plantes est également dû en partie à la tolérance généralement inférieure en sel de la plante comparée aux plantes établies Miyamoto et al., (1985.1989). Le problème est majoré parce que les graines ou les petites plantes sont exposées à la salinité localisée excessive dans la couche de la graine.

Maas et Poss (1989) ainsi que Maas et Grieve (1994) indiquent que le blé est très sensible au sel pendant la germination et la croissance précoce de la plante. Son rendement est nettement réduit par l'effort de sel imposé pendant ces étapes. Une valeur seuil de salinité de l'eau de 2.2 dS.m^{-1} pendant l'étape végétative de croissance a été suggérée.

L'utilisation de l'eau saline pour l'irrigation est une nécessité essentielle dans des secteurs arides et semi-arides. Des technologies sont possibles pour adopter une approche holistique de gestion incluant l'interception, l'isolement et la réutilisation de l'eau saline de drainage pour l'irrigation.

Les effets nocifs de l'irrigation avec de l'eau saline sont principalement associés à l'accumulation des sels dans le profil du sol et discernables dans la disponibilité réduite de l'eau aux plantes, appauvrissant une germination retardée et ralentissant le taux de croissance Shalhevet (1994), Mass (1990), Dhir (1998), Feizi (1998), Manchanda (1998), Tyagi (1998) et Murtaza et al., (2006). Si l'eau d'irrigation est salée, la plante doit faire plus d'effort pour absorber l'eau du sol. Les sels excessifs dans le sol induisent tôt le fanage et les effets sont presque semblables à ceux de la sécheresse. Certains des symptômes visuels de l'irrigation saline de l'eau révèlent des plantes qui semblent arrêtées, les feuilles plus petites et plus épaisses, avec souvent une couleur vert foncé contrairement aux plantes poussant dans un sol sans sel, irrigué avec de l'eau de bonne qualité (Bernstein (1964), Van Hoorn (1971) et Minhas (1998)).

L'eau saline de concentration élevée en sel, ayant une EC_w de 12 dS.m^{-1} , peut être employée pour accroître des récoltes tolérantes et semi tolérantes dans des sables glaiseux à texture grossière et des sols arénacés sous des précipitations normales de plus de 400 millimètres. Mais, dans des sols à fines textures de la nature d'une argile et de terre grasse d'argile, l'arrosage avec une EC_w à plus de 2 dS.m^{-1} créerait souvent des problèmes de salinité Tyagi (1998) et Kandiah (1990). L'eau saline d'une EC_w de 0 à plus de 4 dS.m^{-1} cause une toxicité par le sel dans la plupart des récoltes dans des secteurs où les précipitations annuelles atteignent moins de 250 millimètres.

Ragab (1998) a rapporté que l'utilisation de l'eau de drainage est amenée à prendre plus de place et a lieu déjà dans beaucoup de régions du monde, et que les demandes croissantes d'eau pour l'irrigation mènera finalement à utiliser et réutiliser les ressources d'eau disponibles.

La réutilisation de l'eau de drainage pour l'irrigation est une solution essentielle dans la gestion saline de l'eau. Baker et Johnson (1977), Rolston et al., (1988), Lee (1991) et Boumans et al., (1988) ont identifié diverses méthodes pour la réutilisation des eaux de drainage dans l'irrigation. Rhoades (1998) s'est fortement concentré sur la réutilisation des eaux de drainage.

L'utilisation fiable l'eau de drainage dans l'irrigation nécessite d'appliquer une gestion appropriée pour réduire les impacts négatifs. L'objectif des procédures de gestion recommandées implique de contrôler, limiter, ou enlever des polluants tels que les sels, les nitrates, les phosphates, les sédiments, les pesticides, les microbes pathogènes, les métaux lourds et d'autres produits chimiques.

Le développement de la technologie de gestion de l'eau saline pour l'agriculture durable est un processus continu. Plus de détails sont donnés par Hoffman et al., (1990), Oster (1994), Maas (1986), Shalhevet (1994), Yeo et al., (1997), Ragab (1997, 1998, 2004a, 2004b, 2004c et 2004d), Flowers et al., (2005), Malash (2005), Ragab (2005a et 2005b) et Ragab et al., (2005a et 2005b).

1.5.6 Texture du sol

Les propriétés du sol, notamment sa texture et sa structure, en plus des caractéristiques de capacité de drainage du profil du sol, jouent un rôle, modifiant la réponse de la récolte à la salinité par leur influence sur la capacité d'infiltration et la capacité de stockage de l'eau. La capacité de stockage d'eau d'un sol dépend de la texture et de la structure du sol. Elle augmente lorsque le sol devient plus lourd ; la capacité de retenue d'eau d'un inter-lit arénacé est inférieure à celle d'un lit à texture moyenne, est lui-même inférieur à un sol de texture fine. La capacité d'infiltration et les propriétés internes de drainage ont des effets opposés sur les concentrations des solutions salines du sol. Tous les deux peuvent diminuer à mesure que la proportion d'argile augmente dans un sol.

Bhumbla (1976) et Wakil (1993) rapportent que le manque de drainage interne parce que comme conséquence la saturation rapide en sels du sol argileux même avec l'utilisation d'une eau de basse salinité. Singh et Bhumbla (1968) indiquent que l'accumulation de sel dans le profil du sol dépend de la teneur en argile du sol, et augmente à mesure que le contenu en argile du sol augmente. Ils ont trouvé, dans des domaines irrigués avec de l'eau saline pendant une période de 5 à 20 ans dans l'Hissar (Inde), une salinité du sol moindre de la moitié à la salinité de l'eau d'irrigation des sols à la texture légère (10 % d'argile :), mais, plus importante de 1.5 fois que l'eau d'irrigation, dans des sols plus lourds (argile de 20%).

Sous des conditions identiques de climats et de gestion d'irrigation d'eau, la réponse de la récolte à la salinité est en grande partie affectée par les caractéristiques du sol (Meiri, 1990). Les rapports de l'effet de la texture du sol sur la tolérance du blé à la salinité de l'eau sont contradictoires. Les résultats d'Amimelech et Eden's (1970) indiquent que le blé est plus tolérant à la salinité de l'eau dans des sols argileux que dans les sols arénacés de terre grasse. Shahlavet (1994) démontrent qu'en raison de la faible capacité de stockage de l'eau des sols à texture moyenne comparés à des sols à textures fines (argile), pour le même taux d'évapo-transpiration, un sol arénacé perdra proportionnellement plus d'eau qu'un sol argileux, avec pour résultat une augmentation plus rapide de concentration de la solution soil et par conséquent plus de dommages aux récoltes. Les études de laboratoire de Van Hom's (1991) indiquent que l'apparition et le développement des plants de blé dans un sol arénacé sont plus grands que dans un sol argileux. Les rapports dans la littérature spécifient d'autres récoltes plus sensibles à la salinité dans des sols de textures moyennes que dans des sols à textures fines. Dans une étude de laboratoire, Kateji et al., (1994) indiquent que le développement du tournesol et de maïs pendant la croissance de la plante sont davantage affectés par la salinité de l'eau en terre grasse arénacée que dans des sols de terre grasse argileuse. Pasternak et De Malach (1995) ont prouvé que les rendements des tomates (initialement plantés au début dans des parcelles de terrain dans des conditions non salines) dans les sols arénacés sont inférieurs à ceux cultivés dans les sols glaiseux. Ces résultats contredisent les résultats de terrain obtenus en Inde indiquant un blé plus tolérant à la salinité de l'eau dans les sols à fine texture plus que dans des sols à texture lourde Abrol, (1990) ; Pal et Tripathi, (1979) ; Bhumbla, (1976) et Vemia, (1973).

1.5.7 Salinité initiale de la couche de graine

Dans des secteurs arides et semi-arides, où l'eau saline est employée pour l'irrigation, une couche initiale saline de graines constitue habituellement l'effort d'accumulation de sel lors des saisons précédentes d'irrigation. La quantité et l'ampleur du sel accumulé dans le profil du sol sont liées à la salinité de l'eau d'irrigation et à la texture du sol ainsi qu'à sa structure. L'accumulation de sel dans le profil du sol augmente à mesure que la salinité de l'eau d'irrigation augmente (Hoffman et al., 1983, 1989). En outre, pour une même valeur de salinité de l'eau, l'accumulation du sel dans le sol augmente à mesure que le composant d'argile dans le sol augmente Bhumbra, (1976). Les rapports dans la littérature indiquent qu'une couche saline de graines influence défavorablement le pourcentage de germination, l'établissement de la récolte et finalement son rendement.

Van Horn (1991) a montré que la salinité de la couche de graines retarde la germination. Dans le cas d'un sol arénacé, le pourcentage de germination du blé diminue graduellement à mesure qu'augmente la salinité de la couche de graines (le pourcentage de germination était 68%, 54% et 34% pour des EC_e respectifs de 3.3, 6.6 et 10 $dS.m^{-1}$). En outre, il a indiqué que la croissance et l'activité racinaire de la plante est nettement affectée par la salinité de la couche de graine. L'évapotranspiration réelle, ET_r , de la plante a été considérablement diminuée en augmentant les niveaux de salinité initiale du sol. En conséquence, la croissance des plantes pendant l'étape préliminaire a été considérablement réduite : la croissance relative du blé et du sorgho (récoltes tolérantes au sel) a diminué de 32% et de 47% respectivement une fois plantée dans une couche saline arénacée de graine avec une EC_e de 3.3 $dS.m^{-1}$. Globalement son étude conclut une tolérance moindre du blé et du sorgho pendant la croissance précoce de la plante, que pendant les étapes postérieures de croissance.

Des résultats semblables ont été obtenus par François et al. (1986). Leurs résultats ont montré une réduction moyenne de germination de la graine de blé d'environ 50% pour une valeur de salinité de couche de graine de 8.8 $dS.m^{-1}$, alors qu'à 12.9 $dS.m^{-1}$, le pourcentage de germination diminue à seulement 8%.

Les conditions de la salinité de la couche de graine influencent défavorablement la productivité de la récolte Minhas et Gupta, (1993); Naresh et al., (1993); Beecher, (1991); Rains et al., (1987) ; et Bernstein et al., (1974). Minhas et Gupta (1993) ont montré une diminution de 30% du rendement du blé quand la salinité de la couche de graine s'accroît entre 3 et 8 $dS.m^{-1}$.

Meiri (1990) rapporte que la fonction de production du coton en réponse à la salinité dépend de la salinité initiale de la couche de semence. Son étude établit des fonctions spécifiques de rendement pour chaque couche de grain et chaque valeur de salinité. Le rendement le plus bas correspond à la plus haute valeur de salinité de la couche de grain. En outre, l'étude de Meiri a indiqué que la valeur-seuil de salinité du coton (a) dépend du niveau initial de salinité de la couche de grain.

A la lumière des résultats de l'analyse bibliographique, les objectifs spécifiques de cette recherche sont les suivants :

- (1) classer la récolte de coton étudiée selon son degré de tolérance au sel dans les conditions semi-arides;
- (2) établir des paramètres de croissance des plantes en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation;
- (3) évaluer les méthodes d'irrigation et déterminer la méthode optimale d'irrigation pour une efficacité la meilleure possible d'utilisation;
- (4) évaluer le rendement de la récolte, la quantité de l'eau d'irrigation supplémentaire, la consommation d'eau selon les différentes stratégies d'irrigation;
- (5) déterminer la distribution du sel selon les différentes stratégies d'irrigation;
- (6) étudier de nouvelles manières d'employer l'eau saline pour la production de coton dans les conditions semi-arides;
- (7) évaluer le rendement sur la production et pour rapporter la perte par rapport au niveau de concentration en sel de l'eau d'irrigation;
- (8) déterminer la fraction appropriée de lixiviation;
- (9) déterminer l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) sous les conditions d'eau douce ou d'eau saline, qui est un paramètre principal dans un programme d'économie d'eau;
- (10) utilisation d'un modèle pour prédire le rendement de la récolte, l'humidité du sol et la distribution de salinité.

Région d'étude

2.1. Cadre géographique

Deir ez Zor également écrit sous le nom Dayr az-Zawr, Deir al-Zur et d'autres variantes (l'arabe : دير الزور; Arménien Դեր Չոր ou Der Zor), est une ville en Syrie orientale sur le fleuve d'Euphrate. Elle est capitale de la région de Deir ez-Zor, située à 450 kilomètres de la capitale Damas. Sa population s'éleve à 133 000 habitants (évaluation de 1994). La région est un secteur agricole prospère, d'élevage, et de cultures de céréales et de coton. Depuis la découverte du pétrole brut léger dans le désert syrien, la ville est devenue un centre pour l'industrie de l'extraction de l'huile du pays. Ainsi qu'également un centre mineur doté de nombreux équipements touristiques pour le tourisme.

Les expériences sur le terrain sont effectuées dans le centre de recherches d'Almria (à 10 km au sud de la ville de Deir ez-Zor) (Fig.2) sur la rivièrre de l'Euphrate. L'emplacement expérimental se situe latitude 35.2 N, longitude 42.09 E, à une altitude de 203 m au-dessus du niveau moyen de la mer ; le terrain est presque plat.

Le centre de recherches d'Almria est doté d'un réseau d'irrigation et de drainage. L'eau pour l'irrigation de la terre fertile provient du fleuve Euphrate.

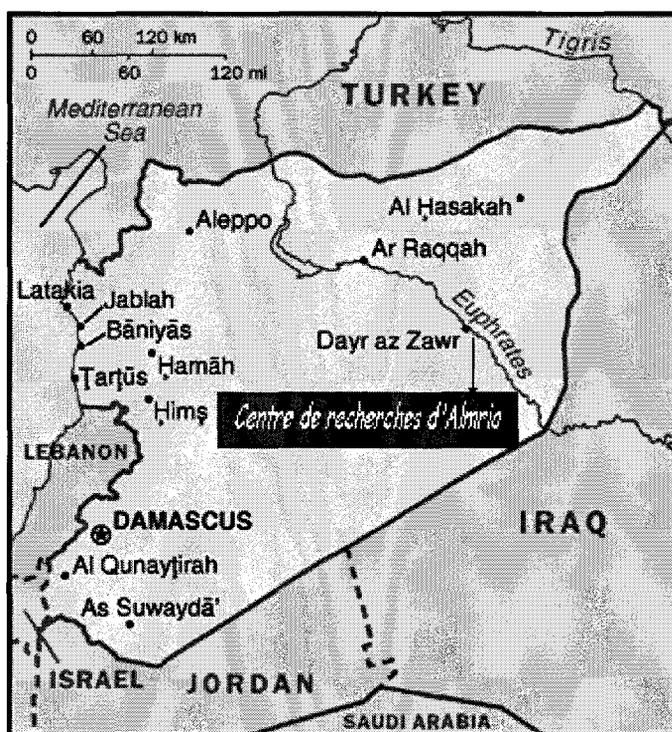


Figure 2. Situation du centre de recherches d'Almria dans la région de Deir AlZoor en Syrie orientale.

2.2 Climat

Selon le système de classification du climat de Koeppen Koeppen, (1936), la région de Deir AlZoor est caractérisée par le paramètre BWh, ce qui correspond à un climat sec : l'évaporation et la transpiration potentielles excèdent la précipitation pendant la majeure partie de l'année. La région d'étude appartient à la zone climatique semi-désertique.

La région de Deir AlZoor est caractérisée par de faibles précipitations et de fortes températures relatives de l'air, du rayonnement et de la vitesse élevée du vent.

La saison des pluies dans cette région a une durée de 5 à 6 mois. Elle commence généralement à la mi-octobre, atteint sa précipitation maximum en décembre et janvier et se termine en avril. Habituellement, il n'y a aucune précipitation pendant l'été. Les précipitations moyennes annuelles dans le centre de recherches d'Almria ne sont que de 150-200 millimètres par an, ni la précipitation d'hiver ni celle de l'été ne jouent de rôle dans le bilan de l'eau de la région.

Le secteur a des étés secs toujours très chauds. La température quotidienne moyenne mensuelle dans la région est à sa valeur maximale en août 48°C, diminue autour de 22°C en octobre, avec des fluctuations de 7°C en valeur minimale en décembre- janvier pour s'élever ver 25°C en juin.

L'évaporation potentielle moyenne mensuelle dans la région est maximale en août (11 mm/jour), diminue à 9 mm/jour) en octobre, atteint une valeur minimale de 7 mm/jour en Décembre-Janvier et des élévations soutenues (8 mm/jour) en juin.

2.3 Sol

Les sols du centre de recherches d'Almria sont composés d'une terre grasse d'argile de 90 centimètres d'épaisseur. Une couche contenant du gypse apparaît 120 centimètres au-dessous de la surface du sol. Ces sols se sont développés dans les anciennes vallées et plaines d'inondation du fleuve Euphrate. Les propriétés chimiques et physiques principales des sols sur le site d'étude sont présentées dans le tableau 6 et le tableau 7.

Dans le tableau 6 sont donnés les pourcentages des constituants tels que le sable (de 28 à 40%), la vase (de 20 à 32%) et l'argile (de 38 à 44%), mesurés sur des échantillons de sol non remanié en utilisant la méthode à charge constante. La vitesse d'infiltration dans le domaine est comprise entre 0.23 et 0.3 m/jour. Les propriétés physiques et chimiques du sol sont présentées dans le tableau 7. Selon les indications du tableau 7, le contenu du sol est pauvre en matière organique (0.2 à 1.5%). Une teneur moyenne en calcium (18 à 19%) et des niveaux élevés en sulfate (38 à 40 %). La concentration en sodium constitue (14 à 16%) de toute la concentration minérale soluble. Tous les constituants minéraux solubles donnent une EC d'environ 2.8 dS m⁻¹. La concentration des ions en extrait saturé, pH et EC est déterminée à partir d'échantillons de sol.

La salinité du sol est une question importante dans les secteurs irrigués de la région de Deir AlZoor, et ce secteur d'étude n'est pas une exception. Selon des données officielles du gouvernement, le secteur irrigué entier (100 %) dans la région de Deir AlZoor montre des problèmes secondaires de salinisation, ainsi que des problèmes d'inondation. Les processus régissant la salinisation secondaire et l'envahissement par l'eau du sol sont provoqués par une nappe peu profonde des eaux souterraines (entre 1 m et 2 m).

Pour laver le sol de ses sels, des quantités énormes d'eau d'irrigation sont généralement appliquées à tous les champs. Cette eau est employée pour le lessivage des sels du terrain végétal, et cette eau filtre rapidement en faisant remonter le niveau des eaux souterraines. Les hautes eaux souterraines subsistent, car un système de drains efficaces n'est pas en place ou artificiellement bloqué par les fermiers afin d'augmenter la contribution d'eaux souterraines pour répondre aux exigences en eau des cultures, particulièrement dans les secteurs et/ou périodes où la disponibilité de l'eau est insuffisante dans le système d'irrigation. Cette stratégie augmente le risque de re-salinisation dans la zone racinaire. En conséquence, le processus de lixiviation doit être répété à chaque saison d'emblavage afin d'éviter la reconstitution des concentrations élevées de sel.

Tableau 6. Propriétés physiques du sol du champ expérimental au centre de recherches d'Almria pendant la saison 1999.

Profondeur (cm)	Sable (%)	Silt (%)	Argile (%)	Texture	Ks (cm min ⁻¹)
0-30	28	28	44	Argile sable	0.003
30-60	30	32	38	Argile sable	0.01
60-90	40	20	40	Argile sable	0.091

Tableau 7. Propriétés chimiques du sol avant l'ensemencement, au centre de recherches d'Almria en Syrie pendant la saison 1999.

Profondeur (cm)	OM (%)	pH	ECe (dS m ⁻¹)	Soluble des ions mmolc/100 g de sol							
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ²⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
0-30	1.51	7.97	3.05	19.23	8.67	14.87	-	0	0.35	3.87	38.55
30-60	0.25	8.04	3.15	19.47	9.33	15.85	-	0	0.43	4.17	40.05
60-90	0.29	7.89	3.11	17.97	9.2	16.15	-	0	0.4	3.93	38.98

2.4 Système d'irrigation et de drainage

Un réseau intensif et compliqué de systèmes d'irrigation avec différents équipements de collecte de l'eau de drainage existe au centre de recherches d'Almria. L'infrastructure d'irrigation au centre de recherches d'Almria comporte un système reliant l'ensemble des canaux d'irrigation et des collecteurs de drainage. L'eau pour l'irrigation de la terre fertile dans le centre de recherches d'Almria vient du fleuve Euphrate. Dans le centre de recherches d'Almria, la méthode la plus commune d'irrigation est l'irrigation par sillon, par bassin, par aspersion et par la goutte à goutte. La collecte de l'eau de drainage comporte des équipements tels que les tuiles de drainage installées à la profondeur de 140 cm avec un espacement de 60 m; et des collecteurs de drainage, le terrain est presque plat.

2.5. Conditions expérimentales

La recherche a été menée sur des champs de coton constitués de terre grasse d'argile de 90 cm au sommet. Une couche contenant du gypse apparaît à 120 cm au-dessous de la surface du sol. Des informations sur des activités précédentes de culture ont été rassemblées par le personnel de gestion et de soutien de la ferme de recherche. La culture du coton, cependant, a été contrôlée par les fermiers locaux. Ils ont décidé du choix de la quantité et de la synchronisation de l'irrigation et de toutes autres activités de culture allant de la préparation de la terre à la moisson. Les objectifs de ces expérimentations sont :

- (1) classifier la récolte de coton étudiée selon son degré de tolérance au sel dans les conditions semi-arides;
- (2) évaluer le rendement de la récolte, la quantité de l'eau d'irrigation supplémentaire, la consommation d'eau selon les différentes stratégies d'irrigation;
- (3) déterminer le bilan du sel selon les différents stratégies d'irrigation;
- (4) étudier de nouvelles manières d'employer l'eau saline pour la production de coton dans les conditions semi-arides;
- (4) évaluer la production de rendement et pour rapporter la perte par rapport au niveau de concentration en sel de l'eau d'irrigation;
- (6) déterminer la fraction de lixiviation appropriée;
- (7) déterminer l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) sous les conditions d'eau douce ou d'eau saline, qui est un paramètre principal dans un programme d'économie d'eau.

2.5.1. Taille et topographie du champ

La taille et la microtopographie du champ ont été étudiées pendant 15 années. Le secteur s'étend sur une superficie de 10 ha. Un aperçu géodésique a été conduit pour déterminer le micro-relief et la pente des champs à l'aide d'un instrument de mesure de niveau. Pour pouvoir être en mesure de surveiller exactement l'eau et la distribution de sel pendant les événements d'irrigation, on a décidé de concentrer l'étude sur un sous-ensemble choisi dans le domaine. Dans cet endroit du secteur (figure 3) a été observée en détail la végétation au cours des saisons. En conséquence, l'aperçu géodésique ne s'adresse

seulement qu'à ces sous-domaines. La figure 3 montre une photographie du centre de recherches d'Almria dans la région de Deir Al Zoor.



Figure 3. Photographie du centre de recherches d'Almria dans la région de Deir Al Zoor en Syrie orientale.

2.5.2. Gestion de récolte et de champ

Des graines de coton (*hirsutum* de *Gossypium*) de la variété locale (coton D22) ont été semées en début d'avril sur des rangées de 0.75 à 0.8 m de large. Des graines ont été placées à 15-17 cm entre elles pour toutes les méthodes d'irrigation. Des engrais d'azote et de phosphore ont été ajoutés en début avril avant la sortie de germination, aux taux de 60 kg. ha⁻¹ pour N et de 100 kg.ha⁻¹ pour P₂O₅. Les deuxième et troisième demandes en engrais azoté, aux taux de 60 kilogrammes ha⁻¹ N, ont été faites en début et en fin juin. Les récoltes ont été moissonnées à la main, deux fois chaque saison. La première moisson a eu lieu quand approximativement 10% des capsules étaient ouvertes, à fin septembre. La deuxième moisson a été faite 3 semaines plus tard, mi octobre.

Le rendement de récolte maximum obtenu dans des conditions recommandées optimales était de 5 t. ha⁻¹ pour l'irrigation en sillon, de 6 t. ha⁻¹ pour l'irrigation en bassin et l'irrigation par aspersion et pour l'irrigation par goutte à goutte.

2.5.3. Gestion de l'eau d'irrigation

2.5.3.1. Expérimentation en 1999, en 2003 et en 2004 pour l'irrigation par l'eau de rivière de l'Euphrate

La superficie du champ expérimental est de 5571 m². La conception de l'expérience est montrée en Fig. 4. Quatre méthodes d'irrigation ont été appliquées. L'expérience est basée sur une conception de blocs (sections aléatoires) avec trois répliques, avec un total de 12 parcelles de terrain.

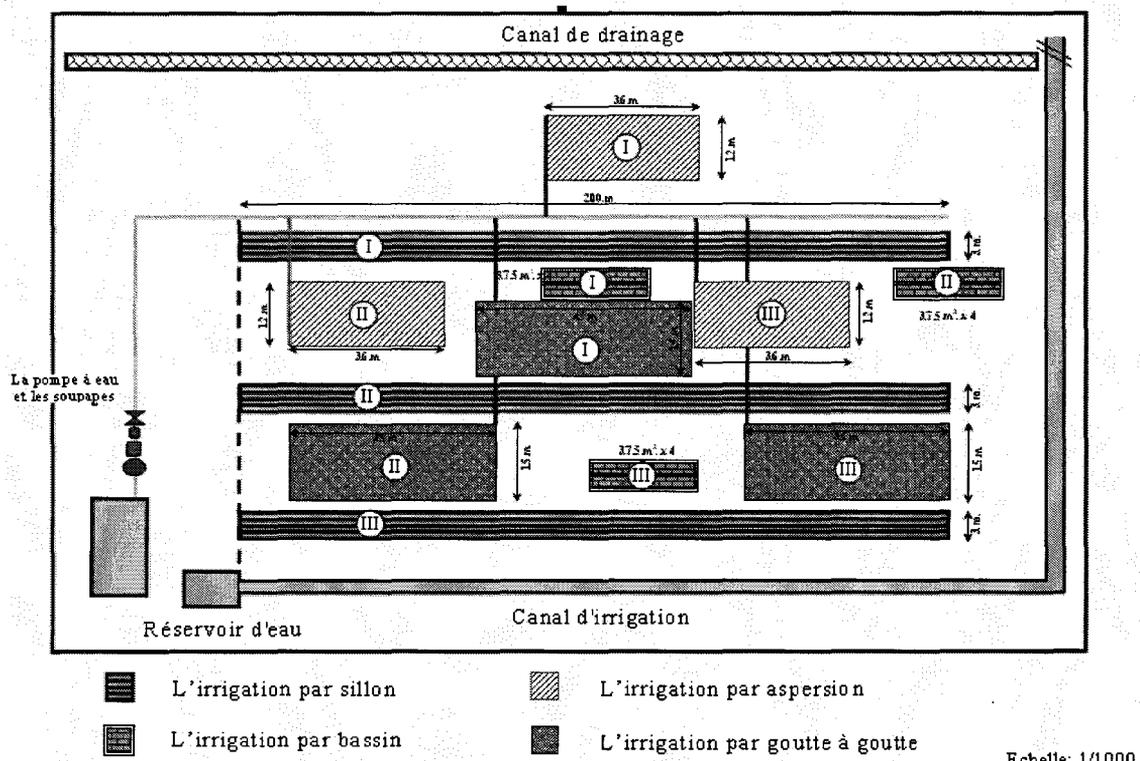


Figure 4. Diagramme schématique de la conception expérimentale avec l'utilisation de l'eau de l'Euphrate pour l'irrigation au cours de la saison 1999.

Les traitements d'irrigation utilisés dans ce travail sont pour :

(1) L'irrigation en sillon, avec trois répliques; chaque parcelle de terrain est composée de 4 lignes. La longueur de chaque ligne est de 200 m et sa largeur approximativement de 0.75 à 0.8 m. L'eau d'irrigation est distribuée aux parcelles des terrains irrigués en sillon par des tubes, le taux d'irrigation dans chaque sillon étant de 1 L.s⁻¹. Le secteur de chaque

parcelle de terrain correspond à 600 m², et toute la surface de ce traitement est de 1800 m².

(2) L'irrigation en bassin, avec trois répliques. Le débit est de 896 m³ ha⁻¹ hr⁻¹. Chaque parcelle de terrain est composée de 4 bassins. Le secteur pour chaque bassin atteint 37.3 m². Chacun des bassins atteint 150 m², ce qui donne une superficie totale de 450 m² pour ce traitement.

(3) L'irrigation par aspersion, avec trois répliques. Chaque parcelle de terrain est composée de 8 asperseurs, et le secteur pour chaque parcelle de terrain est de 432 m². L'espacement entre les asperseurs est de 9 m x 12 m, la surface de ce traitement de 1296 m².

(4) L'irrigation par goutte à goutte, avec trois répliques. Chaque parcelle de terrain est composée de 20 lignes. Le secteur pour chaque parcelle de terrain est de 45 m x 15m. L'espacement entre les lignes d'égouttement est de 0.75 à 0.8 m. L'espacement entre les dispositifs d'écoulement est de 0,40 m ; et les dispositifs d'écoulement ont fourni 1.1 L.s⁻¹ avec une pression de 10⁻⁵ Pa, la surface totale extérieure de ce traitement est de 2025 m². Le rendement observé sous différentes méthodes d'irrigation en 1999, en 2003 et en 2004 saisons est présenté dans le tableau 8.

Tableau 8. Rendement observé sous différentes méthodes d'irrigation en 1999, en 2003 et en 2004.

	Sillon (tonne)	Bassin (tonne)	Aspersion (tonne)	Goutte à goutte (tonne)
1999	2.84	2.3	2.83	4.44
2003	2.58	1.85	2.72	4.58
2004	2.54	2.13	3.37	4.24

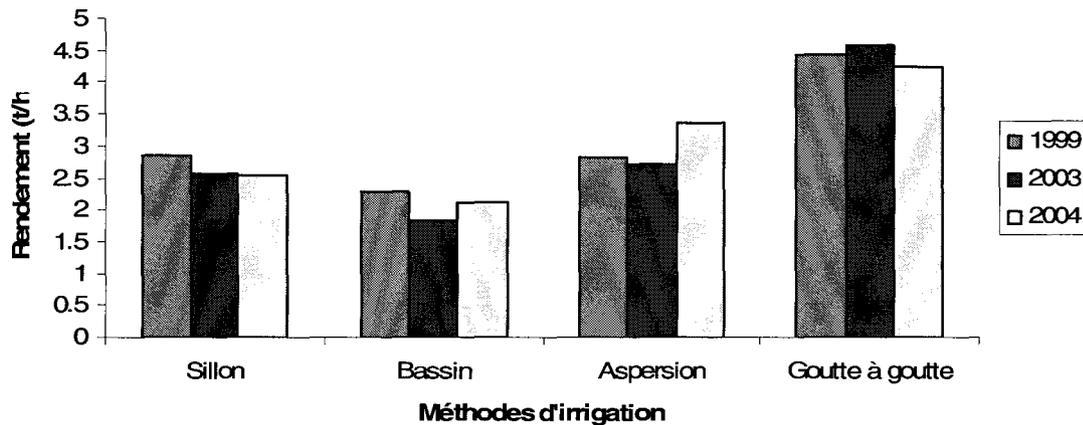


Figure 5. Rendement observé selon différents méthodes d'irrigation, saisons 1999 - 2003 -2004.

Nos résultats de recherche sur champ dans le tableau 9 comprennent le rendement de la récolte, la quantité de l'eau d'irrigation supplémentaire, la consommation d'eau (calculée comme : irrigation + précipitations + humidité initiale - la teneur en humidité finale de la zone de racine) et l'accumulation de sel. La quantité de l'eau appliquée à chaque parcelle de terrain de traitement comprend le volume d'eau avec une fraction de 50 % supplémentaire pour le lessivage. Les conditions d'irrigation ont été estimées à partir des mesures par sonde à neutron. L'emplacement de la sonde à neutrons pour l'irrigation par sillon : l'écart entre deux sites neutron est approximativement de 70 m dans chaque parcelle et pour l'irrigation par bassin, l'irrigation par aspersion et l'irrigation par goutte à goutte la sonde est placée au milieu des parcelles. Nous discuterons les expériences en 1999 : Les quantités de l'eau d'irrigation supplémentaires étaient de $17410 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $17513 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $13805 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ et $8411 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ pour respectivement le sillon, le bassin, l'aspersion et le goutte à goutte. Figure 6. Evolution du profil d'humidité du sol en fonction du temps selon l'irrigation par sillon.

Les rendements de récolte sous irrigation du sillon, en bassin, par aspersion et par goutte à goutte étaient respectivement de 2.84 , 2.3 , 2.83 et 4.44 t. ha^{-1} en 1999 (Fig.5). Comme Yuksek et Taskin (1974), nous n'avons trouvé aucune différence dans les rendements des méthodes d'irrigation par aspersion et en sillon. McConnell et al. (1989) ont examiné les méthodes d'irrigation en sillon et par aspersion pour l'irrigation du coton. Selon leurs résultats, la méthode d'irrigation du sillon a produit 338 t ha^{-1} donc un rendement de fibre supérieur à celui de l'irrigation par aspersion ; dans notre cas le sillon a seulement davantage produit (10 kg ha^{-1}) que l'irrigation par aspersion. L'irrigation par aspersion a également eu comme conséquence la maturité retardée des capsules. Mateos et al. (1992) ont obtenu respectivement 5 et 3 t ha^{-1} de rendement de coton pour les méthodes d'irrigation par goutte à goutte et par sillon. Pour notre variété de coton les rendements étaient respectivement de 4.44 et 2.84 t ha^{-1} pour le goutte à goutte et le sillon. Cetin (1997) a rapporté que l'irrigation par aspersion a eu comme conséquence des rendements de coton inférieurs à ceux de l'irrigation du sillon et par goutte à goutte.

Tableau 9. Rendement de récolte, quantité d'irrigation, consommation d'eau et accumulation de sel, au centre de recherches d'Almria en Syrie pendant la saison 1999.

Méthode d'irrigation	Sillon	Bassin	Aspersion	Goutte à goutte
Consommation d'eau ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	10623	10392	10370	8072
Rendement de récolte (kg ha^{-1})	2840	2300	2830	4440
Quantité d'eau d'irrigation supplémentaire ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	17410	17513	13805	8411
Nombre d'irrigations	13	13	14	18
Quantité moyenne d'eau /irrigation ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	1339	1347	986	467
Efficacité d'utilisation d'eau d'irrigation (kg m^{-3})	0.16	0.13	0.2	0.52
L'augmentation du rendement de récolte comparée avec l'irrigation en bassin (%)	23	0	23	91
L'eau d'irrigation économisée comparée à l'irrigation en bassin (%)	0.5	0	21	52
Humidité initiale moyenne pour les 90 cm supérieurs ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0.40	0.48	0.35	0.40
Salinité initiale moyenne du sol pour les 90 cm supérieurs (dS m^{-1})	2.69	2.58	2.88	3.10
Salinité finale moyenne du sol pour les 90 cm supérieurs (dS m^{-1})	4.47	3.72	5.82	5.45
Accumulation moyenne du sel pour les 90 cm supérieurs (%)	0.7	0.4	1.02	0.8

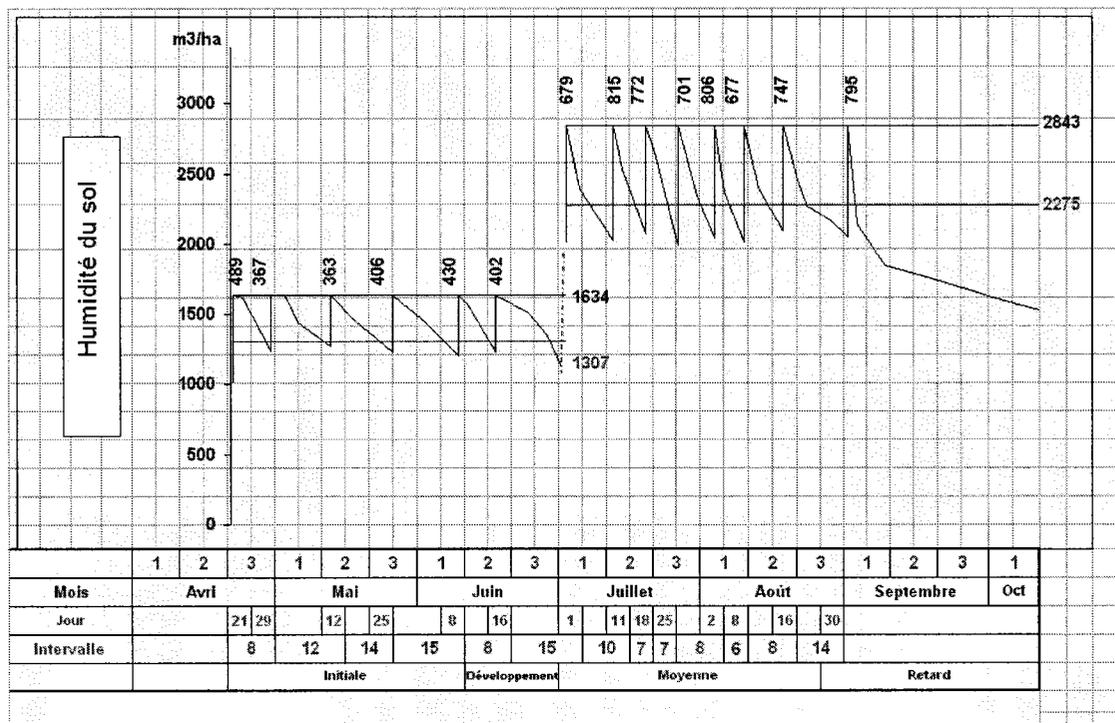


Figure 6. Évolution de profil d'humidité du sol en fonction du temps selon l'irrigation par sillon.

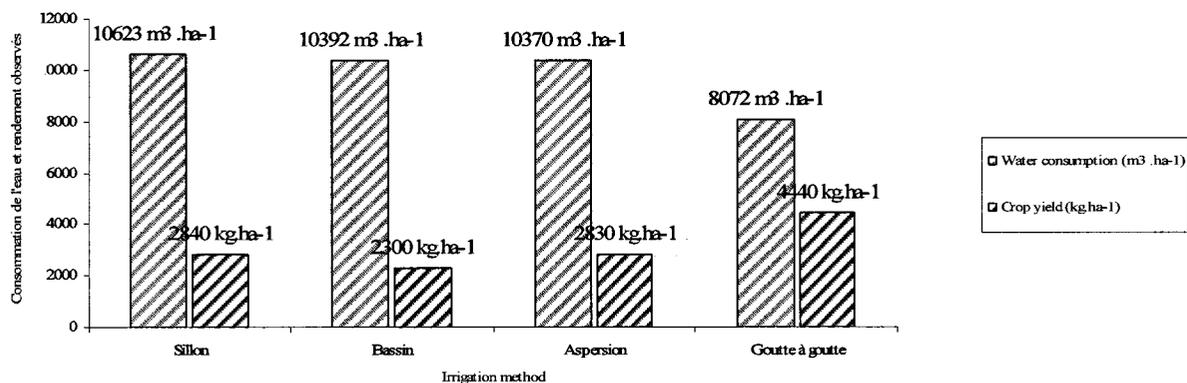


Figure 7. Consommation d'eau et rendement observés selon différentes méthodes d'irrigation pour 100% d'eau douce pendant la saison 1999.

Pour le calcul de l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE), des rendements de graine-coton par hectare ont été divisés par la quantité d'eau appliquée. L'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation a été déterminée selon le rapport du rendement pour un traitement particulier à l'eau appliquée pour ce traitement Howell et al., (1983). Les WUEs étaient

respectivement de 0.16, 0.13, 0.20 et 0.52 kg m⁻³ pour une irrigation du sillon, en bassin, à l'asperseur et au goutte à goutte. Bucks et al., (1987) ont comparé le niveau des méthodes d'irrigation de goutte à goutte et de bassin pour la production du coton. Un rendement de fibre de plus de 2000 kg ha⁻¹ a été obtenu pour l'irrigation par goutte à goutte et le WUE était de 0.21 kg m⁻³. Un plus grand rendement de 10-15% pour la fibre a résulté de l'irrigation par goutte à goutte comparée à l'irrigation de bassin. Howell et al., (1989) comparent les méthodes de sillon et de goutte à goutte pour l'irrigation du coton. Ils ont constaté qu'il n'y avait aucune différence de rendement entre l'irrigation par sillon et l'irrigation par goutte à goutte, dans notre cas la différence était de 36%. Ils ont également rapporté que 650 mm de l'eau d'irrigation étaient nécessaires afin d'obtenir un rendement maximum. Hodgson et al., (1992) ont étudié les méthodes d'irrigation par sillon et par goutte à goutte pour le coton. Les WUEs étaient respectivement de 0.223 et 0.189 kg m⁻³ pour les méthodes d'irrigation de goutte à goutte et de sillon; dans notre cas les WUEs pour l'irrigation du goutte à goutte et de sillon étaient respectivement de 0.52 et 0.16 kg m⁻³. Hodgson et al., (1992) ont attribué un WUE inférieur pour l'irrigation du sillon à l'écoulement et les pertes du champ. Cetin et Bilgel (2002) ont trouvé que les rendements maximum de coton étaient respectivement de 4380, 3630 et 3380 kg ha⁻¹ pour le goutte à goutte, le sillon et l'irrigation par aspersion; nous avons obtenu des rendements de 4440, 2840 et 2830 kg ha⁻¹ pour le goutte à goutte, le sillon et l'aspersion alors que pour Cetin et Bilgel ils étaient respectivement de 0.487, 0.387 et 0.236 kg m⁻³ pour le goutte à goutte, le sillon et l'aspersion; dans notre cas ils étaient respectivement de 0.52, 0.16 et 0.2 kg m⁻³ pour le goutte à goutte, le sillon et l'aspersion. Horst et al. (2007) ont trouvé que la meilleure productivité de l'eau d'irrigation (0.61 kg m⁻³) a été réalisée avec une montée alternative d'écoulement sur les sillons. Les valeurs de WUE obtenues à partir des expériences sont données en figure 8.

Le rendement de récolte par bassin d'irrigation était moindre par rapport à celui du sillon et de l'aspersion, avec une signification statistique au niveau de 23%, et également moindre comparé à celui de l'irrigation par goutte à goutte avec un seuil de confiance statistique de 91%. L'économie d'eau d'irrigation a rivalisé avec l'irrigation par bassin avec respectivement 0.5%, 21% et 52% dans le cas d'une irrigation par sillon, par aspersion et par goutte à goutte (figure 9).

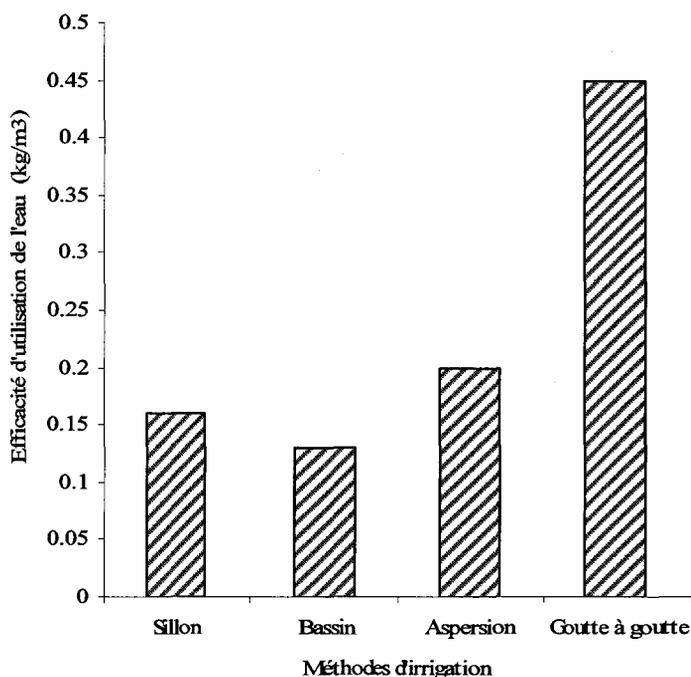


Figure 8. Efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation pour différentes méthodes d'irrigation avec 100% d'eau douce pendant la saison 1999.

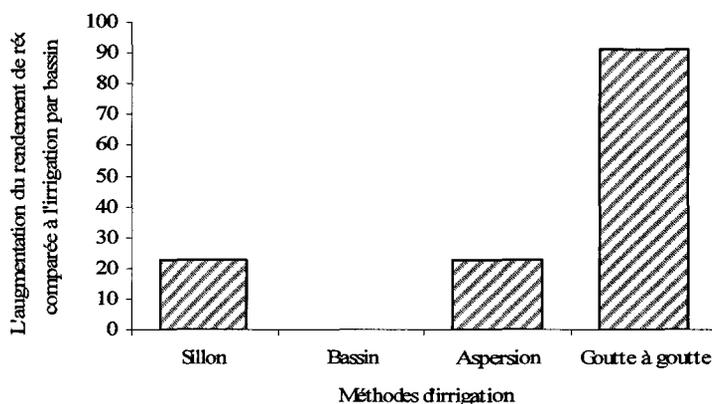


Figure 9. Augmentation du rendement de récolte comparée à l'irrigation par bassin avec 100% d'eau douce pendant la saison 1999.

Dans le contexte du nombre d'irrigations, les traitements d'irrigation par goutte à goutte ont reçu 18 irrigations pendant la saison de croissance, les traitements d'irrigation par

sillon et par bassin ont reçu 13 irrigations, et le traitement d'irrigation par aspersion a reçu 14 applications.

La hauteur maximum de la plante était de 1.35 m, la profondeur d'enracinement de 0.75 m, les longueurs de chaque étape de croissance conformes, avec 43, 19, 51 et 67 jours respectivement pour l'étape initiale, de développement, l'étape moyenne et celle en retard de croissance.

Le sol est de texture compacte de terre grasse argileuse (40.67% d'argile, 26.67% de silt et 32.67% de sable) ; la vitesse d'infiltration était élevée à $0.005 \text{ cm min}^{-1}$. Etant données les propriétés physiques du sol et la nature de l'irrigation par goutte à goutte, où l'eau d'irrigation est appliquée lentement et fréquemment, la teneur en eau de sol dans une partie de la zone racinaire demeure assez constante comparée aux autres méthodes.

Les résultats obtenus à partir des données observées montrent que le coton D22 est propice à se développer dans la région méditerranéenne.

Les rendements de récoltes irriguées par sillon, par bassin, par aspersion et par goutte à goutte étaient respectivement de 2.84, 2.3, 2.83 et 4.44 tonne.ha^{-1} . La salinité par accumulation, particulièrement dans les couches superficielles du sol (zone racinaire), s'est étendue entre 0.4 et 1.02 % ; aussi pour empêcher la salinisation, un lessivage (par inondation) sera exigé avant la récolte suivante et probablement pendant la saison de croissance elle-même. Un EC de 4 dSm^{-1} dans l'extrait saturé du sol était toujours dans les limites permises et appropriées à toutes les récoltes tolérantes au sel, particulièrement le coton.

L'irrigation par aspersion a eu comme conséquence un rendement inférieur aux autres méthodes d'irrigation. Une raison possible de ce rendement inférieur est l'évaporation élevée, les fortes températures atmosphériques et la basse humidité relative estivale. En outre, des feuilles et des fleurs des plantes ont été endommagées lors de l'irrigation par aspersion, en particulier en irriguant pendant la journée. Pour cette raison, l'irrigation du coton par l'aspersion devrait être pratiquée pendant la nuit.

Les raisons d'un rendement inférieur de coton avec l'irrigation par aspersion dans cette région pourraient être attribuées à l'évaporation élevée (jusqu'à 9.2 mm/ jour), aux fortes températures (jusqu'à $41.2 \text{ }^\circ\text{C}$), à l'irrigation diurne, une humidité relative très basse (27% en été), lorsque l'impact de l'aspersion chute à la fois sur les fleurs et les feuilles des plantes. Ces derniers dommages expliqueraient la raison d'un WUE inférieur pour l'irrigation par aspersion.

Des profils de salinité du sol de quatre méthodes d'irrigation (sillon, bassin, aspersion et goutte à goutte) pour 1999 sont dessinés sur les figures 10-a à 10-d. Des profils de salinité de sol ont été établis à la plantation, à la croissance, et à la moisson pour chacune des méthodes d'irrigation étudiées. On a observé une salinité de sol plus élevée dans la couche de sol de 0 à 30 cm, alors que la salinité du sol à la moisson a diminué avec l'augmentation de la profondeur dans le profil. Il y avait une différence significative de la

salinité du sol lors de ces quatre traitements. La salinité du sol pendant la période de croissance du coton n'a pas atteint le seuil de salinité de 7.7 dS m^{-1} (Ayers et Westcot, 1985) excepté pour la méthode d'irrigation par aspersion avec 8.55 dS m^{-1} parce que le maximum de la température ($41.2 \text{ }^\circ\text{C}$) et le maximum d'évaporation (9.2 mm/jour), sont très élevés.

Selon les indications des figures 10 la salinité du sol de la plantation passe de 2.59 dS m^{-1} en surface du sol à 3.36 dS m^{-1} dans les couches plus profondes. Ainsi la salinité s'accroît dans la couche supérieure avec 7.34 dS m^{-1} sous irrigation par sillon en 1999. Le traitement sous irrigation de bassin a eu comme conséquence une salinité du sol de 4.55 dS m^{-1} dans la couche supérieure (0 à 30 cm) et de 3.49 dS m^{-1} dans la couche de 30 à 60 cm. Donc la salinité du sol a diminué avec l'augmentation de la profondeur. On a observé la plus basse salinité dans le profil du sol dans la couche du sol de 30 à 60 cm avec 1.88 dS m^{-1} . La salinité de sol pendant l'étape croissante de croissance était très semblable et a eu des salinités plus basses que 3.27 dS m^{-1} dans tout le profil.

Le traitement irrigué selon l'irrigation par aspersion a eu comme conséquence une salinité du sol de 8.55 dS m^{-1} dans la couche supérieure de 30 à 60 cm et de 4.6 dS m^{-1} dans la couche de 60 à 90 cm. Aussi la salinité du sol a diminué avec l'augmentation de la profondeur. On a observé la plus basse salinité dans le profil de sol dans la couche du sol de 30 à 60 cm avec 2.3 dS m^{-1} .

Le traitement irrigué selon l'irrigation de goutte à goutte a eu comme conséquence une salinité du sol de 5.95 dS m^{-1} dans la couche supérieure de 0 à 30 cm et de 5.71 dS m^{-1} dans la couche de 30 à 60 cm. Donc la salinité du sol a diminué avec l'augmentation de la profondeur. La salinité du sol pendant l'étape de croissance des plantes était très semblable et a eu des salinités plus basses que 3.15 dS m^{-1} dans tout le profil.

Les expériences ont indiqué l'accumulation des sels dans les couches superficielles du sol (zone des racines). Vers la fin de la saison de croissance, la salinité de l'eau du sol est devenue supérieure à celle de l'eau d'irrigation, particulièrement pour les sols superficiels.

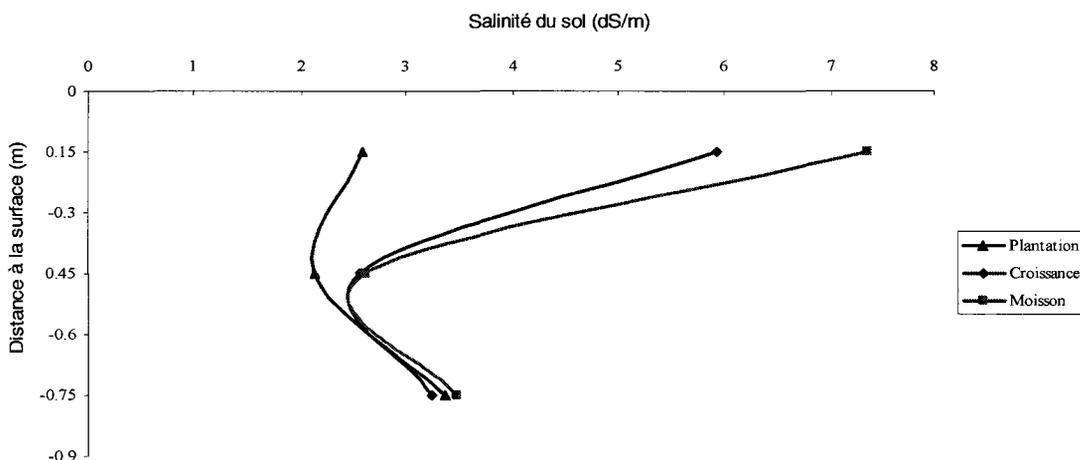


Figure 10-a. Profils de salinité sous une irrigation en sillon.

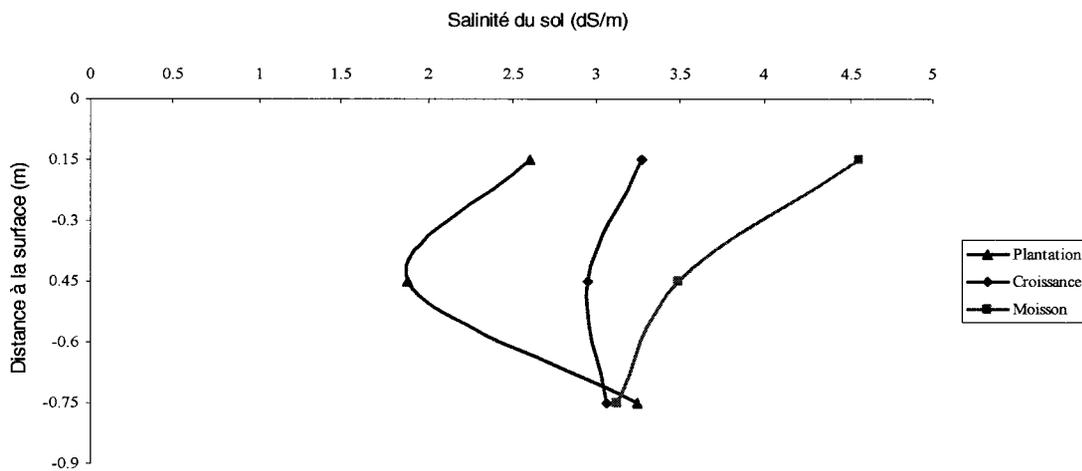


Figure 10-b. Profils de salinité sous une irrigation en bassin.

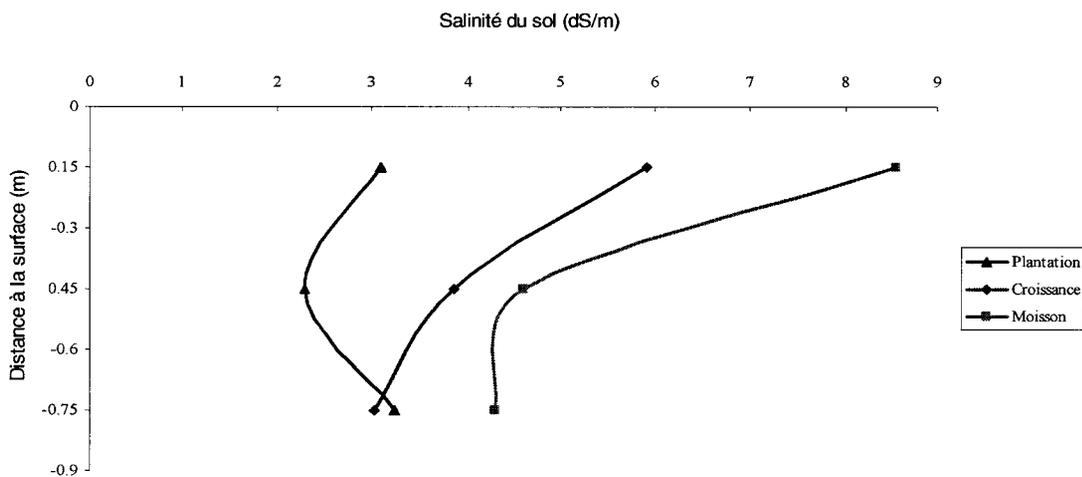


Figure 10-c. Profils de salinité sous une irrigation par aspersion.

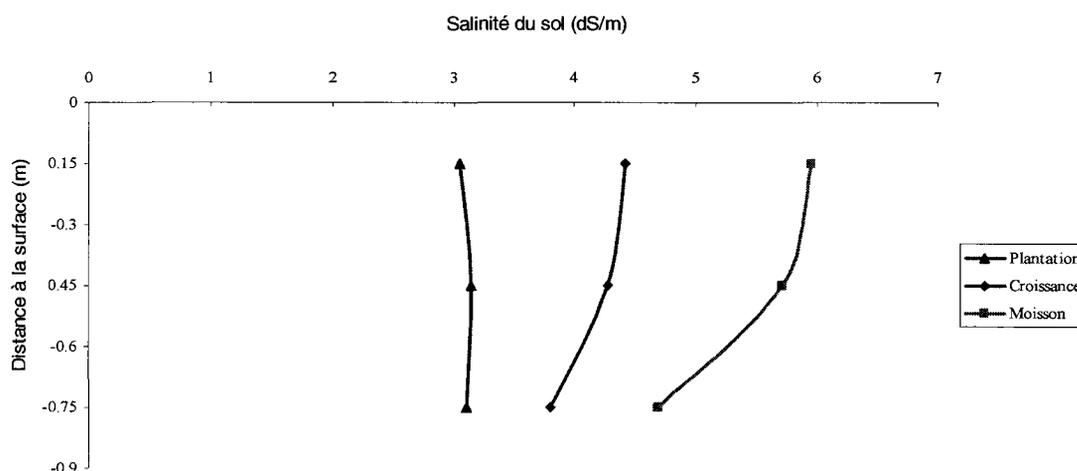


Figure 10-d. Profils de salinité sous une irrigation par goutte à goutte.

2.5.3.2. Expérimentation en 1999 de l'irrigation par l'eau de drainage (Rendement et Salinité de l'eau d'irrigation)

L'approvisionnement en eau de bonne qualité devient de plus en plus rare. Les eaux souterraines salines, l'eau de drainage et l'eau usagée sont de bonnes solutions alternatives pour l'irrigation. Shalhevel et Kamburov (1976) ont rapporté que les eaux à la salinité atteignant 6000 mg l^{-1} , ont été employées pour irriguer les récoltes tolérantes en sel. Mass (1990) a observé que des récoltes ont été menées avec succès avec une eau de salinité variant de 1.3 à 9.4 dS m^{-1} . Rhoades (1992) a souligné l'utilisation d'eau saline et la réutilisation d'eau de drainage pour que la production de nourriture soit croissante. Kandiah (1998) s'est concentré sur l'importance d'eau saline utilisée dans l'agriculture, les problèmes potentiels de salinité, sodicité, toxicité spécifique d'ion et déséquilibre d'éléments nutritifs. Pour une information supplémentaire, voir les travaux de Flowers et al. (2005), Malash et al. (2005), Ragab (2004a, 2004b, 2005a and 2005b), Ragab et al., (2005a and 2005b), Hamdy (1991, 1993, 1994, 1995, 1996 and 2002), Hamdy and Lacirignola (1991), Rhoades (1977) and Beltran, (1999).

La capacité de rendement d'une variété est le résultat de son interaction avec l'environnement régnant, des facteurs environnementaux tels que les caractéristiques et les types de sol, l'humidité, le semis selon le temps, la fertilité, la température et la variation de la longueur du jour selon les années et les endroits. Ces facteurs environnementaux ont une forte influence sur les diverses étapes de croissance de la culture. Bull, *et al.*, (1992),

Il n'y a habituellement pas de technique sûre pour l'utilisation d'eau saline dans l'irrigation. Beaucoup d'approches et de pratiques peuvent être combinées pour satisfaire

les systèmes d'irrigation par l'eau saline; la combinaison appropriée dépend de l'économie, du climat, du social, aussi bien que des situations géologiques édaphiques et hydrauliques (Rhoades et al., (1992)).

La salinité des sols agricoles irrigués peut être contrôlée de manière satisfaisante pour des récoltes sel-tolérantes et modérément sel-tolérantes en utilisant de l'eau saline pour l'irrigation. L'irrigation avec de l'eau saline cause habituellement une salinisation progressive du sol, plus ou moins grave selon la disponibilité en sel, des propriétés du sol (si argile ou sable), la lixiviation provoquée par des précipitations lors de la technique appliquée d'irrigation. Pendant que la salinité du sol augmente, le potentiel osmotique en eau du sol diminue ayant pour résultat une disponibilité réduite de l'eau et des maladies physiologiques.

Le coton (cv de variété - coton D22.) est une culture importante bien développée sur les sols salins où son rendement et sa qualité sont de beaucoup inférieurs par rapport aux sols normaux. Il a joué un rôle significatif dans le développement industriel et la génération d'emplois. Seulement 30% de la terre en Syrie est cultivé. Une grande partie de la terre doit être irriguée, en raison de pluies tombant habituellement en hiver, plutôt que pendant la saison de croissance. La Syrie néanmoins parvient à produire une grande variété de récoltes. On estime qu'une bonne réserve des ressources d'eau non conventionnelles syriennes s'élèverait à environ 1.2 milliard de m³, résultant des eaux de drainage selon Ragab (2004c).

Un choix rigoureux de culture et de variété plus adaptés à un environnement donné est d'une importance primordiale afin d'obtenir une production efficace élevée. Généralement les récoltes tolèrent une salinité jusqu'au niveau de seuil au-dessus duquel les rendements diminuent approximativement linéairement à mesure que les concentrations en sel augmentent (Mass et Hoffman, 1977). L'emploi d'un modèle linéaire (Mass et Hoffman, 1977), conduit à une salinité maximale admissible sans diminution de rendement par augmentation d'unité de salinité au delà du seuil limite.

Le coton est considéré comme étant assez tolérant à la salinité Maas et Hoffman, (1977) ; Maas, (1986) pourtant son rendement est rigoureusement réduit car dû à une germination pauvre et au développement anormal de la plante dans des conditions salines (Khan, 1987). Une diminution d'environ 41% du rendement de la semence des sols affectés par le sel a été rapportée Qayyum et Malik, (1988).

Le coton est tout à fait sensible à la salinité lors des étapes de germination et de la montée de graine mais ensuite comparativement tolérant Bhatti et Rashid, (1980). Thomas (1980) a indiqué que le coton au Texas (Etats-Unis) a produit un bon rendement avec des valeurs de salinité du sol oscillant jusqu'à 2 dS m⁻¹. Ces valeurs sont de beaucoup inférieures à la valeur- seuil rapportée dans les directives conventionnelles (de 7.7 dS m⁻¹ pour une valeur relative de rendement de 100%). Une étude sur le terrain conduite en Chine a montré une valeur seuil de salinité du sol pour le coton de 5 dS m⁻¹ Fang et al., (1978). Les mesures rapportées au coton et la salinité du sol en Ouzbékistan ont indiqué que la valeur- seuil est en moyenne de 5 dS m⁻¹ Bressler, (1979). Pour des informations

complémentaires sur les effets des méthodes d'irrigation sur le rendement et l'efficacité d'utilisation de l'eau du coton on se rapportera à Bucks et al., (1987), Cetin (1997), Cetin et Bilgel (2002) ; Hodgson et al., (1992). Horst et al (2007), Howell et al (1989), Kassem (2003), Mateos et al (1992).

La réduction du rendement de récolte due à l'utilisation d'eau saline est largement rapportée dans la littérature, par exemple Beltrao et Ben Asher (1997), Rhodes et al. (1992), Hoffman et al. (1990), Ragab (2002), Ragab (2004a), Ragab (2004b), Ragab (2004c), Ragab (2004d), Ragab (2005a), Ragab (2005b), Flowers et al. (2005), Malash et al. (2005), Ragab et al. (2005a et 2005b). Cependant, le niveau de réduction dépend infiniment plus de multiples facteurs tels que le niveau de tolérance de la culture, la salinité du sol, les conditions initiales, les conditions climatiques, la stratégie de gestion de l'eau, et la salinité de l'eau.

Les objectifs principaux de cette expérimentation ont pour but (1) d'étudier de nouvelles manières d'employer l'eau saline pour la production de coton dans les conditions semi-arides ; (2) établir des paramètres de croissance des plantes en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation (3) d'évaluer la production de rendement et pour rapporter la perte par rapport au niveau de concentration en sel de l'eau d'irrigation ; (4) de déterminer le bilan du sel selon les différents programmes d'irrigation; (5) classer la récolte de coton étudiée en fonction de son degré de tolérance au sel ; et (6) déterminer la fraction de lixiviation appropriée; (7) et déterminer le WUE sous les conditions d'eau saline, qui est un paramètre principal dans un programme d'économie d'eau.

5 traitements différents de qualité d'eau d'irrigation étaient représentés dans l'étude. À savoir, I1, I2, I3, I4, et I5 pour le niveau moyen de salinité avec une conductivité de 1.1, 2.7, 4.3, 5.7 et 7.5 dS m⁻¹. Une conception de bloc complètement aléatoire avec quatre répliques a été utilisée pour l'expérience sur le coton. Il y a un total de 20 parcelles de terrain dans l'étude. Chaque parcelle de terrain mesurait 15 m de long et 14 m de large. La superficie totale du champ expérimental est de 4200 m² (Fig.11).

L'eau douce a été transportée par le canal du fleuve de l'Euphrate à 5 kilomètres du champ expérimental. Des drains en terre cuite ont été installés à la profondeur de 120 centimètres avec un espacement de 60 m ; ils ont été employés pour recueillir l'eau de drainage. L'eau saline a été préparée en mélangeant de l'eau douce (EC moyen de 1.1 dS m⁻¹) avec de l'eau drainage (EC moyen 7.5 dS m⁻¹) afin d'obtenir les niveaux moyens de salinité de 2.7, 4.3 et 5.9 dS m⁻¹ dans des piscines en béton de 10m x 10m x 2.5 m de dimension sur l'emplacement du site expérimental.

L'eau saline d'irrigation a été préparée en mélangeant de l'eau douce avec de l'eau drainage. Des tubes à déclenchements périodiques ont été utilisés pour distribuer l'eau aux parcelles de terrain. Pour mélanger l'eau saline et l'eau douce au niveau indiqué de salinité, des réservoirs ont été utilisés en tête de chaque parcelle de terrain. Des compteurs de débit ont été utilisés pour déterminer le volume de l'eau distribué à chaque parcelle de terrain.

Le traitement (méthodes) utilisé était le suivant :

(I1) premier traitement: eau douce à 100% (EC moyen 1.1 dS m^{-1}).

(I2) seconde traitement: eau douce à 75% + l'eau de drainage à 25% (EC moyen 2.7 dS m^{-1}).

(I3) troisième traitement: eau douce à 50% + l'eau de drainage à 50% (EC moyen 4.3 dS m^{-1}).

(I4) quatrième traitement: eau douce à 25% + l'eau de drainage à 75% (EC moyen 5.9 dS m^{-1}).

(I5) cinquième traitement: 100% d'eau de drainage (EC moyen 7.5 dS m^{-1}).

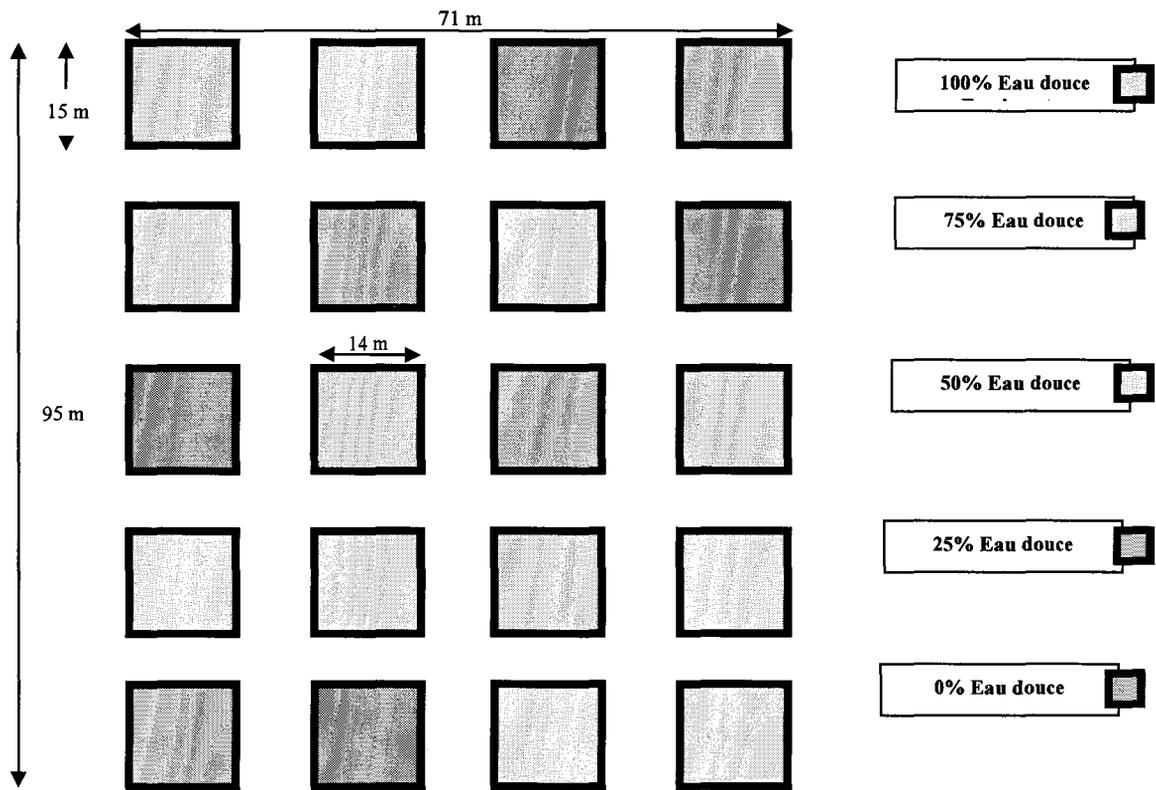


Figure 11. Diagramme schématisé de la conception expérimentale selon cinq niveaux d'irrigation avec de l'eau salée pendant la saison 1999.

Pendant la saison de croissance, l'EC de l'eau de rivière de l'Euphrate a varié entre 0.73 et 1.55 dS m^{-1} , et celui de l'eau de drainage entre 1.15 et 12.7 dS m^{-1} . Les dispositifs d'écoulement ont fourni 1.1 L s^{-1} à la pression de 0.1 MPa .

Mesures

Rendement

On a observé chaque semaine le rendement pour toute l'étude. À cette fin, les plantes dans chaque réplique du traitement ont été aléatoirement choisies pour représenter toutes

les caractéristiques du traitement. Des occurrences de différentes étapes de croissance ont été surveillées sur ces plantes. La hauteur de la plante et les mesures de profondeur d'enracinement ont été également effectuées sur ces plantes choisies et calculées pour chaque traitement. La hauteur de la plante maximum était de 1.35 m, la profondeur d'enracinement de 0.75 m.

Le développement de la partie aérienne de la plante a été observé par un prélèvement destructif pendant la saison. Les longueurs de chaque étape de croissance étaient de 43, 19, 51 et 67 jours respectivement pour les étapes initiales, de développement, de mi - croissance et de croissance finale.

L'eau du sol

L'eau du sol dans chaque parcelle de terrain expérimental a été mesurée avec une sonde à neutrons par prélèvement gravimétrique aux profondeurs de 0-30, 30-60, 60-90 cm tous les 10 jours et avant chaque application d'irrigation. Une sonde à neutrons de calibrage a été installée sur l'emplacement expérimental et employée pour calculer la teneur en eau du sol dans le profil avant chaque application d'irrigation. L'irrigation a été effectuée quand l'humidité arrivait à 80 % de la capacité au champ. La sonde est placée au milieu des parcelles.

Utilisation de l'eau de récolte (évapotranspiration)

Nos résultats de la recherche au champ établissent la quantité de l'eau d'irrigation supplémentaire et de consommation de l'eau (calculée ainsi: irrigation + précipitations + humidité initiale - teneur en humidité finale de la zone de racine).

Efficacité d'utilisation de l'eau (WUE)

L'efficacité d'utilisation de l'eau (kg m^{-3}) a été calculée selon le rapport du rendement (kg m^{-2}) à l'utilisation de l'eau (m). Howell et al., (1993).

$$\text{WUE} = Y/ET$$

WUE est l'efficacité d'utilisation de l'eau (kg m^{-3}) ; Y est le rendement (kg m^{-2}) ; et ET est l'utilisation de l'eau (m).

Salinité du sol

Aux étapes initiales, de développement, de mi - croissance et de croissance finale toutes les parcelles de terrain de traitement étaient sondées à des intervalles de profondeur de 0-30, 30-60, 60-90 centimètre à l'aide d'une tarière. Des échantillons de sol ont été séchés à l'air puis broyés et passé à travers un tamis de 2 millimètres. La conductivité électrique des échantillons de sol a été mesurée sur les extraits de saturation (ECe).

Le rendement du coton, la moyenne des irrigations, le nombre des irrigations, la consommation de l'eau et les valeurs d'efficacité d'utilisation de l'eau obtenues à partir des traitements irrigués avec de l'eau avec différents niveaux de salinité sont lisibles dans le tableau 10 et la Fig. 12. Les rendements moyens sont compris entre 2.956 et 4.443 t ha⁻¹ selon les différents traitements. Le désaccord de l'analyse des données de rendement a prouvé que l'effet des niveaux de salinité de l'eau d'irrigation utilisés dans l'étude sur des rendements était significativement différent (tableau 10).

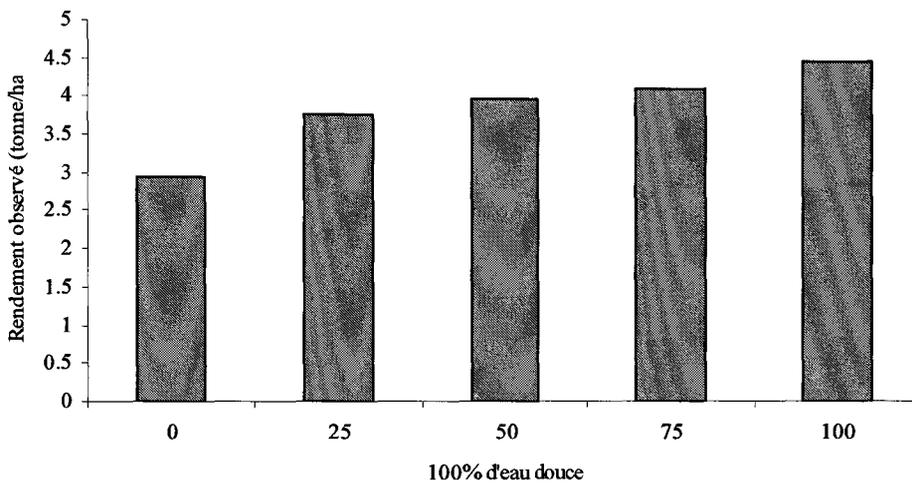


Figure 12. Rendement observé sous différents traitements d'irrigation par goutte à goutte, 1999.

Tel que l'indique dans le tableau 11, le traitement de la récolte I4 (5.7 dS m⁻¹) était moins bon que celui du traitement I1 (1.1 dS m⁻¹), avec une signification statistique au niveau de 18 %.

Le traitement de la récolte de l'irrigation du I5 était moins bon que ceux des traitements I1, I2, I3 et I4 avec une signification statistique respectivement de 0.3%, 38.2%, 33.8% et 27.5%.

L'analyse de la variance des données de rendement a prouvé que l'effet des niveaux de salinité de l'eau d'irrigation utilisés dans l'étude du rendement I2 et I3 n'étaient pas sensiblement différent de I1 (tableau 11).

La quantité d'eau appliquée à chaque traitement consiste à fournir une fraction de lixiviation supplémentaire de 50 %. Les conditions d'irrigation ont été estimées à partir des mesures de sonde à neutrons. La quantité d'eau d'irrigation supplémentaire était de 8411 m³ ha⁻¹. Du coton a été irrigué 18 fois pendant la saison de croissance. L'intervalle d'irrigation était d'environ 10 jours. La consommation d'eau était de 8072 m³ ha⁻¹ (1494 m³ ha⁻¹, 1099 m³ ha⁻¹, 3690 m³ ha⁻¹ and 1789 m³ ha⁻¹ respectivement aux étapes initiale, de développement, de mi-croissance et de croissance finale).

Tableau 10. Données sur le rendement de coton, gaspillage d'eau, consommation de l'eau et efficacité d'utilisation de l'eau selon les traitements

Trématent	I1	I2	I3	I4	I5
ECw moyen (ds m ⁻¹)	1.1	2.7	4.3	5.7	7.5
Rendement de récolte (kg ha ⁻¹)	4443	4084	3955	3768	2956
Quantité d'irrigation (m ³ ha ⁻¹)	8411	8411	8411	8411	8411
Efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation (kg m ⁻³)	0.52	0.36	0.35	0.33	0.26
L'augmentation du rendement de récolte comparée avec I5 (%)	50.3	38.2	33.8	27.5	

Traitement de l'eau
LSD à 1% = 672
LSD à 5% = 479

Selon les indications du tableau 10, les valeurs de l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE) des traitements étalement de 0.52 à 0.26 kg m⁻³. À mesure que le niveau de salinité de l'eau d'irrigation augmentait les valeurs de WUE diminuaient légèrement. Cependant, les valeurs de WUE n'étaient pas sensiblement différentes parmi les traitements étudiés excepté le traitement I5.

Dans le contexte de la salinité du sol, cette dernière résulte des différents traitements de salinité comme montré dans le tableau 11. La salinité du sol a été établie lors des étapes initiales, de développement, de mi-croissance et de croissance finale pour chaque traitement étudié. La salinité du sol a varié de 4.18 dS m⁻¹ à 7.46 dS m⁻¹ pour les 90 cm supérieurs.

Cependant, la salinité du sol a augmenté légèrement dans la couche supérieure (ECe = 5 dS m⁻¹) lors du traitement irrigué avec de l'eau douce. Mais elle atteint une ECe=12 dS m⁻¹ lors du traitement irrigué avec de l'eau de drainage.

Au mi étape de croissance, les expériences ont souligné l'accumulation des sels dans les couches à fleur de terre (zone de racine) pour I1, I2, I3 et I4, dans une proportion de 9 et 62 %. Vers le milieu de la saison de croissance, la salinité de l'eau du sol est devenue plus grande que celle de l'eau d'irrigation (1.11 dS m⁻¹ pour I1, 2.7 dS m⁻¹ pour I2, 4.3 dS m⁻¹ pour I3 et 4.56 dS m⁻¹ pour I4), particulièrement pour les couches à fleur de terre.

D'une part, la lixiviation des sels dans les couches à fleur de terre (zone de racine) s'est produite pour I5 à environ 18%, la lixiviation des sels vient de la décroissance de la salinité de l'eau d'irrigation laquelle arrive (4 dS m⁻¹) au milieu de la saison.

À l'étape de fin de croissance pour I1 et I3, la lixiviation des sels dans les couches à fleur de terre (zone de racine) apparaît à environ 2 % et -1% à comparer avec l'étape initiale de croissance.

Tableau 11. Les données de Salinité du sol et de pH pour les traitements

Traitements	I1		I2		I3		I4		I5	
Ecw moyen (Ds m ⁻¹)	1.1		2.7		4.3		5.7		7.5	
	Ece (dS m ⁻¹)	pH								
Salinité initiale moyenne du sol pour les 90 cm supérieurs (dS m ⁻¹) (c ₀)	3.9	8.13	3.67	8.3	4.61	8.12	4.66	8.28	6.62	8.24
Salinité midi moyenne du sol pour les 90 cm supérieurs (dS m ⁻¹) (c ₁)	4.82	7.82	5.93	7.86	5.03	7.85	5.72	7.95	5.42	7.86
Salinité finale moyenne du sol pour les 90 cm supérieurs (dS m ⁻¹) (c ₂)	3.83	8.14	5.13	8.16	4.65	8.2	6.99	8.16	10.34	8.13
Salinité moyenne du sol pour les 90 cm supérieurs (dS m ⁻¹)	4.18	8.03	4.91	8.11	4.76	8.06	5.79	8.13	7.46	8.08
C ₁ /c ₀	1.24		1.62		1.09		1.23		0.82	
C ₂ /c ₀	0.98		1.39		1.01		1.5		1.56	
Accumulation moyenne de sel pour les 90 cm supérieurs (%) à midi stage	0.24		0.62		0.09		0.23		-0.18	
Accumulation moyenne de sel pour les 90 cm supérieurs (%) à finale stage	-0.02		0.39		0.01		0.5		0.56	

À l'étape de fin de croissance, les expériences ont indiqué l'accumulation de sels dans les couches à fleur de terre (zone de racine) pour I2, I4 et I5 ; environ 39 % pour I3, 50 % pour I4 et 56 % pour I5, la salinité de l'eau du sol est devenue supérieure à celle de l'eau de drainage. La salinité du sol pendant la période de croissance du coton n'a pas atteint le niveau seuil de salinité de 7.7 dS m⁻¹ Ayers et Westcot, (1985).

Pour I1, I2, I3 et I4, l'EC de 7.7 dS m⁻¹ dans l'extrait saturé de sol était toujours dans les limites permises et appropriées à toutes les récoltes sel-tolérantes, particulièrement le coton Ayers et Westcot, (1985). Mais pour I5 elle était supérieure à 10 dS m⁻¹. Aussi

pour empêcher la salinisation le lessivage (par inondation) sera exigé avant la prochaine récolte et probablement pendant la saison de croissance elle-même.

Les index de résultats montrent un rapport significatif au niveau de 5% entre le rendement et l'eau d'irrigation induits par l'expérience. Il y a un rapport significatif (de 5% et 1%) entre le rendement et la salinité du sol à l'étape initiale et un rapport significatif (5% et 1%) au niveau de la salinité de l'eau d'irrigation et la salinité du sol à l'étape en fin de croissance, induites par l'expérience.

Généralement la salinité du sol a augmenté avec la teneur en sel de l'eau d'irrigation utilisée dans l'étude. On a observé une salinité du sol la plus élevée dans la couche de sol de 0-10 cm dans I5 irrigué avec ECw de 7.5 dS m^{-1} . Alors que la salinité du sol a diminué presque linéairement avec l'augmentation de la profondeur dans le profil. La salinité du sol dans la couche de sol de 80-90 cm était d'environ 4 dS m^{-1} dans ces deux parcelles de terrain de traitement les plus salines.

Les précipitations moyennes (1.3 mm/jour) reçues pendant la saison de croissance n'ont pas supprimé les sels du profil dans tous les traitements étudiés. L'application d'irrigation après l'étape de fin de croissance a augmenté les salinités du sol lors des traitements d'eau saline. Ainsi, l'eau saline d'irrigation peut sans risque être employée pour l'irrigation de la culture de coton dans des conditions semi-arides si nous lessivons le sel accumulé en appliquant une fraction de lixiviation additionnelle tant qu'un système de drainage efficace est fourni.

La variation du pH des extraits de saturation, sous différents traitements, est donnée dans le tableau 11. Comme l'indique la table, les valeurs moyennes du pH stagnent entre 7.82 et 8.28 dans toutes les parcelles de terrain. Il n'y avait aucune différence significative parmi les traitements en ce qui concerne des valeurs du pH des extraits de saturation. Ainsi, le pH n'est pas affecté par les applications d'eau saline d'irrigation.

La réponse du coton (cv de variété - génotypes de coton de coton D22 de hirsutum L de G.) à différents niveaux de salinité de l'eau d'irrigation dans les conditions semi-arides a été étudiée dans une étude sur le terrain au centre de recherches d'Almria de la région de Deir AlZoor, pendant la saison 1999 de croissance. Les eaux salines avec des valeurs de conductivité électrique ECw de 1.1 dS m^{-1} (eau douce), 2.7, 4.3, 5.9, et 7.5 dS m^{-1} (l'eau de drainage) ont été employées pour l'irrigation du coton.

Les rendements moyens se sont étendus de 2.956 à 4.443 t ha^{-1} dans différents traitements. L'analyse de la variance des données de rendement a prouvé que l'effet des niveaux de salinité de l'eau d'irrigation utilisé dans l'étude sur des rendements était sensiblement différent.

Généralement l'accroissement de la salinité suit la teneur en sel de l'eau d'irrigation utilisée dans l'étude. On a observé la salinité de sol la plus élevée dans la couche de sol de 0-10 cm dans les traitements irrigués avec une ECw de 7.5 dS m^{-1} .

Tableau 12. Analyse de la rivière de l'Euphrate et de l'eau de drainage, 1999

Source d'eau	pH	EC (dSm ⁻¹)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	B ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺
		(Meq l ⁻¹)									(ppm)		
Douce	7.4	1.12	4.4	3.5	5.5	-	2.6	0	0.2	9.7	1.3	1.9	Trace
Drainage	7.56	7.51	19.4	22	53.8	-	22.8	0	0.6	69.2	8.03	23.34	Trace

Pendant la saison de croissance, l'ECw de l'eau de rivière de l'Euphrate s'est dilatée entre 0.73 et 1.55 dS m⁻¹, et celle de l'eau de drainage entre 1.15 et 12.7 dS m⁻¹. La salinité de l'eau d'irrigation et de l'eau de drainage sont lisibles dans les tableaux 12 et 13.

Tableau 13. Salinité de l'eau de l'irrigation et de drainage, au centre de recherches d'Almria en Syrie pendant la saison 1999.

Date	Salinité d'eau douce (dS m ⁻¹)	Salinité de l'eau de drainage (dS m ⁻¹)
09/04/1999	0.73	12.7
18/04/1999	0.92	12.7
27/04/1999	1.1	12.7
05/05/1999	1.19	9.77
11/05/1999	1.2	4.55
21/05/1999	1.08	8.18
27/05/1999	1.21	1.15
07/06/1999	1.49	8.95
13/06/1999	1.55	5.76
18/06/1999	0.82	4.2
24/06/1999	0.82	4.7
30/06/1999	1.34	4.7
07/07/1999	1.31	6.06
14/07/1999	0.86	6.06
20/07/1999	0.93	10.1
25/07/1999	0.91	9.03
29/07/1999	1.22	9.03
15/08/1999	1.25	4.82

Ainsi, l'eau saline d'irrigation peut sans risque être employée pour l'irrigation de la culture de coton dans les conditions semi-arides si nous lixivions les sels hors de la zone racinaire tant qu'un drainage efficace est fourni.

Les valeurs d'efficacité d'utilisation (WUE) des traitements évolués de 0.52 à 0.26 kg m⁻³. À mesure que le niveau de salinité de l'eau d'irrigation augmente les valeurs de WUE diminuent légèrement.

Il y avait un rapport significatif au niveau de 5% entre le rendement et l'eau d'irrigation induits par l'expérience. Il y avait un rapport significatif de 5% et de 1% entre le rendement et la salinité du sol à l'étape initiale induite par l'expérience.

Il y avait un rapport significatif au niveau de 5% et 1% entre la salinité de l'irrigation de l'eau et la salinité du sol lors de l'étape de fin de croissance induite par l'expérience.

2.5.3.3. Expérimentation de 1994 à 1996 irrigation par l'eau de rivière de l'Euphrate (Rendement et quantité d'eau : efficacité de l'irrigation)

Une superficie totale de 8484 m² a été employée. Les modalités de l'expérience sont représentées dans les figures 13 et 14. Il y avait trois méthodes d'irrigation et l'expérience était une conception aléatoire de blocs avec trois répliques. Elle donne un total de 12 parcelles de terrain. Les détails de traitement (méthode) sont :

(1) l'irrigation du sillon avec quatre quantités d'eau d'irrigation, chaque quantité a eu trois répliques, chaque parcelle de terrain est composée de 4 lignes, la longueur de chaque ligne de 200 m et sa largeur approximativement de 0.75 à 0.8 m. L'eau d'irrigation a été achèves dans les parcelles de terrain irriguées en sillon par des tubes et le taux d'irrigation dans chaque sillon était de 1 L s⁻¹. La surface pour chaque parcelle de terrain était de 600 m², et la surface total pour ce traitement de 7200 m².

(2) l'irrigation en bassin avec quatre quantités d'eau d'irrigation, avec trois répliques pour chaque quantité ; le secteur pour chaque bassin était de 10 m x 8 m, donnant une superficie totale pour ce traitement de 960 m².

(3) l'irrigation par aspersion avec quatre quantités d'eau d'irrigation, chaque quantité a eu trois répliques, le secteur pour chaque bassin était de 9 m x 3 m, alors que l'espacement entre les asperseurs était de 9 m dans une direction et de 12 m dans l'autre direction, toute la surface de ce traitement était de 324m².

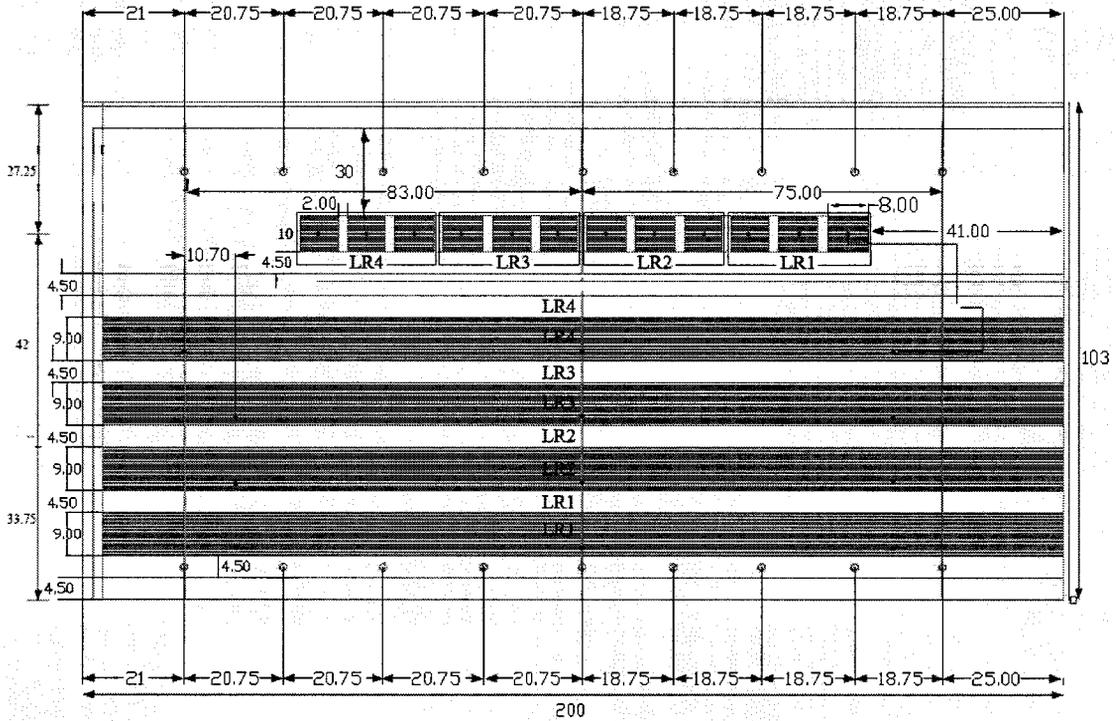


Figure 13. Diagramme schématique de la conception expérimentale sous quatre quantités d'irrigation pour l'irrigation saisonnière de sillon et de bassin de 1994 à 1996.

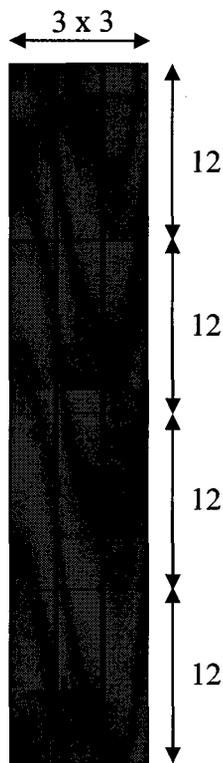


Figure 14. Diagramme schématisé de la conception expérimentale selon quatre quantités d'irrigation pour l'irrigation saisonnière par aspersion de 1994 à 1996.

Yukse et Taskin (1974) n'ont trouvé aucune différence dans les rendements des méthodes d'irrigation par aspersion et en sillons. McConnell et al. (1989) a examiné les méthodes d'irrigation en sillons et par aspersion pour l'irrigation du coton. Selon leurs résultats, la méthode d'irrigation en sillons a produit 338 kg ha^{-1} de rendement de fibre supérieur à l'irrigation par aspersion. L'irrigation par aspersion a également eu comme conséquence la maturité retardée des capsules.

Pour le calcul de l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE), des rendements de graine de coton par hectare ont été divisés par la quantité de l'eau appliquée. L'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation a été déterminée selon le rapport du rendement pour un traitement particulier à l'eau appliquée pour ce traitement. Selon Howell et al. (1983), WUEs étaient de 0.17 kg m^{-3} , de 0.13 kg m^{-3} et de 0.37 kg m^{-3} en sillon, en bassin et par aspersion, respectivement. Cetin et Bilgel (2002) ont trouvé que les rendements maximum de coton étaient de 4380, 3630 et 3380 kg m^{-3} pour l'irrigation par le goutte à goutte, en sillon et par aspersion, respectivement. Les efficacités d'utilisation de l'eau de nos expériences (1994-1996) étaient respectivement dans la gamme 0.151-0.184, 0.118-0.131, 0.344-0.397 pour l'irrigation du sillon, en bassin et par aspersion.

Les Figs. 15-a, 15-b et 15-c présentent le rendement observé selon différents traitements d'irrigation, pendant les années 1994-1995-1996. Les figures prouvent qu'il n'y a aucune différence significative entre les rendements bien qu'elles aient reçu différentes quantités d'eau. Ceci indique qu'il y a eu une sur-irrigation inutile.

Tableau 14. Différences de pourcentage entre le rendement observé lors de l'irrigation du sillon, en bassin et par aspersion, 1994-1995-1996.

Irrigation du sillon				
Temps d'irrigation (minutes)	181	192	202	223
Quantité d'irrigation (m³)	12833	13833	14558	15802
Rendement observé en moyenne, Y_o (kg)	2390	2430	2392	2390
Efficacité observée d'utilisation de l'eau (kg m⁻³)	0.184	0.176	0.164	0.151

Irrigation par bassin				
Temps d'irrigation (minutes)	120	127	136	148
Quantité d'irrigation (m³)	13107	13957	14989	16300
Rendement observé en moyenne, Y_o (kg)	1717	1691	1950	1930
Efficacité observée d'utilisation de l'eau (kg m⁻³)	0.131	0.121	0.130	0.118

Irrigation par aspersion				
Temps d'irrigation (minutes)	316	325	341	372
Quantité d'irrigation (m³)	8574	8814	9245	10086
Rendement observé en moyenne, Y_o (kg)	3400	3293	3420	3472
Efficacité observée d'utilisation de l'eau (kg m⁻³)	0.397	0.374	0.370	0.344

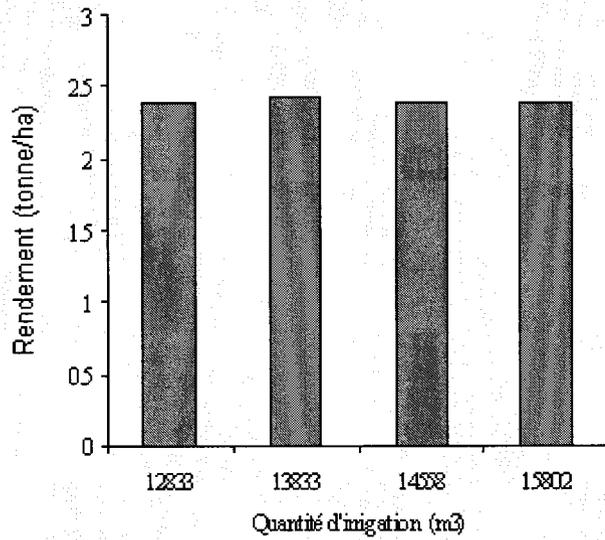


Figure 15-a. Rendement observé selon différents traitements d'irrigation du sillon, saisons 1994-1995-1996.

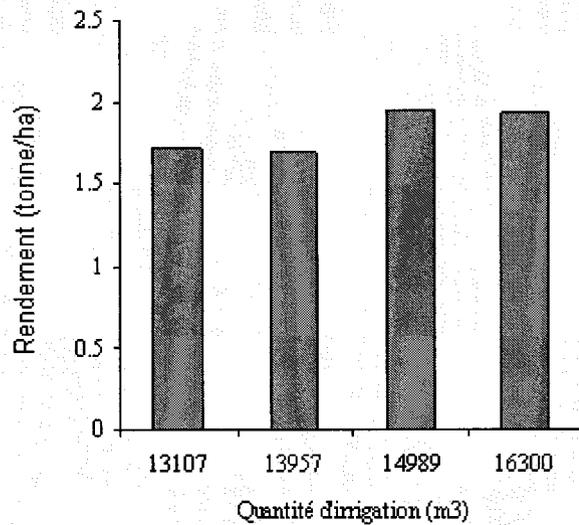


Figure 15-b. Rendement observé selon différents traitements d'irrigation en bassin, saisons 1994-1995-1996.

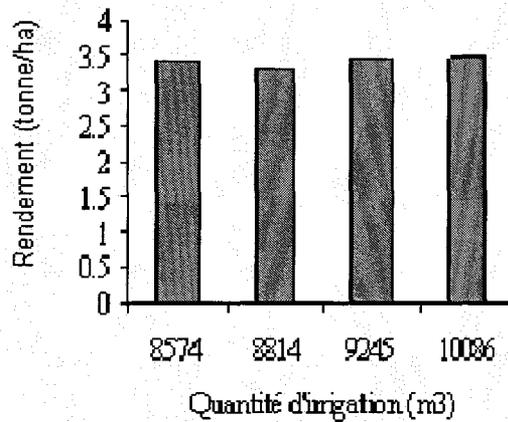


Figure 15-c. Rendement observé selon différents traitements d'irrigation d'aspersion, saisons 1994-1995-1996.

Le tableau 14 prouve que les efficacités d'irrigation ont diminué avec l'augmentation des quantités d'eau d'irrigation. Il n'y avait aucune différence significative dans les rendements quand différentes quantités d'eau ont été appliquées. Ceci signifie qu'avait lieu une sur-irrigation menant à une diminution d'efficacité d'irrigation.

Pour faire des analyses statistiques avec des données expérimentales il faut des centaines de valeurs sinon cela n'a pas d'intérêt et dans nos expérimentations, on n'a pas des centaines de valeurs.

Matériel et méthode

3.1. Introduction

La gestion de l'eau est une composante cruciale dans la stratégie de l'utilisation de l'eau pour l'agriculture irriguée. Pour maintenir une agriculture irriguée viable et permanente il est impératif : (1) de protéger la qualité de l'eau, (2) d'adopter un lessivage proportionné et des mesures de drainage empêchant la salinisation du sol et une charge de sels excessifs à la surface et dans les eaux souterraines, (3) d'optimiser l'irrigation pour augmenter l'efficacité et l'uniformité des applications d'eau, de diminuer la charge de sel et utiliser l'avantage des nappes d'eau peu profondes, (4) d'intercepter, isoler et réutiliser l'eau de drainage pour l'irrigation.

Au cours des 25 dernières années, la réutilisation de l'eau de drainage pour l'irrigation a été étudiée dans de nombreux projets de démonstration et expériences. Les questions scientifiques et économiques s'attachent à la convenance de différentes eaux, sols, et cultures pour des objectifs de réutilisation; les procédures de gestion optimale sont toujours en grande partie incertaines. Bien que modéliser offre des moyens rentables de développer les procédures de gestion optimales, les questions subsistent quant à l'exactitude des simulations pour les environnements dynamiques et fortement salins pouvant exister dans des opérations de réutilisation.

Les modèles peuvent être des outils très utiles dans la gestion agricole de l'eau, non seulement dans l'établissement du programme d'irrigation et le calcul des conditions d'utilisation de l'eau des cultures mais également, dans la prévision des rendements et la salinisation du sol. Ce dernier, processus lent particulièrement à long terme, dépasse la détection à court terme traditionnelle des expériences. Une stratégie réussie de gestion de l'eau pour les récoltes irriguées exige une approche intégrée spécifiant la gestion de l'eau, de la culture, du sol et du champ.

Dans l'application de l'eau saline/saumâtre pour l'irrigation, on adopte une approche intégrée détaillant qui devrait expliquer la gestion du sol, de la culture et de l'eau au même moment. L'approche devrait considérer: (i) l'hydraulique du sol et propriétés/infiltration, qui affectent l'eau et le corps dissous en mouvement; (ii) les niveaux de tolérance de sel de la culture lors des diverses étapes, le choix d'une culture la plus tolérante et l'application cruciale de l'eau fortement saline pendant l'étape la moins sensible; (iii) l'application d'une stratégie appropriée de gestion de l'eau, en mélange avec de l'eau douce ou alternativement en utilisant de l'eau douce lors de l'étape la plus sensible et de l'eau saline lors des étapes moins sensibles (Rhodes et al., 1992) ; (iv) le choix du système d'irrigation le plus approprié Ragab, (1983, 1997) et (v) permettant un calcul approprié de la culture et des conditions de lixiviation de l'eau essentiels pour l'économie de l'eau, un contrôle du niveau de la nappe phréatique, du volume de drainage, et naturellement du rendement final. Un certain nombre de questions se pose une telle approche intégrée. Ces questions sont liées à la gestion, l'environnement et à terme aux effets sur les sols. Plus de détails sont donnés par Hoffman et al. (1990), Oster (1994), Maas (1986), Shalhevet (1994), Yeo et al. (1997), Ragab (1997, 1998, 2004a, 2004b, 2004c et 2004d), Flowers et al. (2005), Malash (2005), Ragab (2005a et 2005b) et Ragab et al. (2005a et 2005b).

Clairement des modèles génériques complets sont nécessaires pour expliquer les différentes procédures de gestion des cultures, de l'eau et de champ. Des modèles qui peuvent être employés pour une variété de systèmes d'irrigation, de types de sol, de stratifications de sol, de cultures et d'arboriculture, de stratégies de gestion de l'eau, de lessivage des conditions et de qualité de l'eau.

La plupart des modèles existants suivent processus simple orienté, par exemple : (i) des modèles pour l'infiltration (Bresler, 1975 ; Vogel et Hopmans, 1992 ; Ragab et al., 1984 ; Fletcher Armstrong et Wilson, 1983) ; (ii) des modèles pour l'absorption d'eau par les racines Cardon et Letey, (1992) ; Coelho et Ou, (1996) ; (iii) des modèles pour le lessivage ou le transport de l'eau et des corps dissous Addiscott et Whitemore, (1991); Wagenet et Hutson, (1989); Kamra et al., (1991); Logan, (1996) ou (iv) des modèles pour des applications spécifiques, c.-à-d. certains systèmes d'irrigation, de sols, de région ou de récolte (Šimůnek and Suarez, 1994; Magnusson and Ben Asher, 1990; Ragab et al., 1990; Noborio et al., 1996; Minhas and Gupta, 1993; Nour El-Din et al., 1987; Beltrao and Ben Asher, 1997; Šimůnek et al., 1998a, b).

Les modèles existants (tableau 15) sont appliqués à des problèmes pratiques dans l'évaluation du bilan de l'eau et le transport de soluté (Costantini et al., 2002; Hammel et al., 2000; Mandal et al., 2002; Srinivasulu et al., 2004; Vanderborght et al., 2005; Vrugt and Bouten, 2002), les infiltrations d'eau (Hermsmeyer et al., 2002; Hernandez, 2001; van Dam and Feddes, 2000), le lessivage du sol (Logsdon et al., 2002), l'absorption d'eau par les racines (Li et al., 2001; Vrugt et al., 2001), des systèmes d'irrigation (Horst et al., 2004; Liu, 1999; Pereira et al., 2003; Ragab, 2002) ou une combinaison de ces procédés (Abbasi et al., 2004; Dorji, 2001; Ma et al., 2000; Nielsen et al., 2002; Sarwar and Feddes, 2000; Wu et al., 1999).

Un module réussi de gestion de l'eau pour les récoltes irriguées exige une approche intégrée détaillant la gestion de l'eau, de la culture, du sol et de champ. La plupart des modèles existants sont conçus pour un système d'irrigation spécifique, tel que le mouvement de l'eau et de corps dissous, une infiltration, de lixiviation ou une prise d'eau par des racines des plantes ou une combinaison des deux. Le modèle de SALTMED a été développé pour de telles applications génériques.

Le modèle a illustré avec succès l'effet du système d'irrigation, du type de sol et du niveau de salinité d'irrigation sur l'humidité du sol et la distribution de salinité, des conditions de lessivage, et le rendement de la culture dans tous les cas. Il a avec succès prévu l'impact de la salinité sur le rendement, l'absorption d'eau, l'humidité du sol et la distribution de la salinité. C'est pour des universitaires un outil de recherches et pour des directeurs de champ un outil puissant pour gérer leur eau, la récolte et le sol d'une manière efficace afin de sauvegarder l'eau et protéger l'environnement.

Les premiers résultats sur l'eau douce ont montré que le modèle SALTMED peut être considéré comme un outil utile dans la gestion de l'eau, des cultures et des sols sur le terrain. Le modèle a été développé pour être standard, facile et convivial. C'est un modèle

physique avec trois bases de données intégrées pour des sols, des cultures et des systèmes d'irrigation. Il peut être appliqué selon n'importe quel système d'irrigation, sur n'importe quel type de sol, avec n'importe quelle qualité d'eau et n'importe quelle culture. Il explique l'hétérogénéité du sol. Il calcule l'évapotranspiration, l'évaporation du sol, l'absorption d'eau par les plantes, les conditions de lessivage, les profils de salinité du sol, les profils d'humidité du sol ainsi que le rendement.

Le modèle utilisé évalue le transport de l'eau et de corps dissous, l'évapotranspiration et les équations de la prise d'eau par la culture.

Le modèle SALTMED de Ragab (2002) et Ragab (2004b) était le premier offrant un projet intégré de la gestion de l'eau, des cultures, l'eau et du terrain de culture en utilisant l'eau saline.

Les modèles prévisionnels permettent d'avance un aperçu du futur. Le modèle de Ragab (2002), Ragab (2004a), Ragab (2004b), Ragab (2004c), Ragab (2004d), Ragab (2005a), Ragab (2005b), Flowers et al. (2005), Malash et al. (2005) and Ragab et al. (2005a and 2005b), offre un projet intégré de la gestion de l'eau pour la culture, l'eau et le terrain en utilisant de l'eau saline.

Des modèles de simulation traditionnellement employés permettent de pour réduire le délai et les coûts d'essai de travaux sur le terrain. Ils sont habilités pour évaluer les procédures de gestion proposées mais peu aisés pour estimer des études sur un terrain de petite taille à court terme. Basé sur des données d'entrée de modèles élaborées par les chercheurs, son plan est conçu pour la collecte de données lors d'expériences sur le terrain. Le modèle de simulation, modèle SALTMED de Ragab (2002), a été développé pour des applications génériques. Le modèle utilise des équations bien connues de l'eau, du transport de corps dissous, d'évapo-transpiration et de l'absorption de l'eau par les cultures. En fait, SALTMED est le seul modèle qui évalue quotidiennement les paramètres de la récolte K_c , K_{cb} et la profondeur des racines, en fonction du temps simulé, l'irrigation par goutte à goutte et en même temps se focalise sur la salinité du sol. Ragab et al. (2005a et 2005b) avaient avec succès examiné ce modèle, en utilisant des données de champ d'Egypte et de Syrie pour la tomate. Uzun (2004) avait évalué les données de terrain utilisées pour des modèles de SALTMED en Turquie pour le maïs. Plusieurs expériences ont eu lieu sur le site Almría en Syrie où est planté le coton (cv de variété - coton D22) entre 1994 et 2004. La culture du coton D22 dans les champs selon différentes stratégies de gestion de l'eau a permis de collecter des données et ainsi permis d'effectuer le calibrage du modèle SALTMED en 1999, puis de valider ce dernier en 2003 et 2004 et enfin d'application ce modèle en 1999 et de 1994 à 1996. On a appliqué le modèle SALTMED développé lors des applications générales en utilisant les données de plein champ à partir de l'expérience menée à la station.

En conclusion, l'accord entre les résultats simulés et mesurés du rendement de la culture et les valeurs de salinité suggère fortement de calibrer le modèle pour les cultures de plein champ dans les conditions climatiques méditerranéennes. Toutefois, il faut également s'assurer d'entrées fiables.

Tableau. 15. Types de sols, des eaux et solutés, de modèles de circulation

Modèle	But
ISAREG (Teixeira and Pereira, 1992)	ISAREG est un modèle de simulation de l'équilibre de sol-eau visant à établir la planification des programmes d'irrigation pour une combinaison des sols cultivés, ou à l'évaluation de certains calendriers d'irrigation.
CROPWAT (Smith, 1992)	CROPWAT, se veut un outil pratique pour aider les agro-industries des météorologues, des ingénieurs agronomes et de l'irrigation d'effectuer des calculs norme pour l'évapotranspiration et l'utilisation de l'eau des cultures études, et plus particulièrement la conception et la gestion des réseaux d'irrigation. Il permet l'élaboration de recommandations en vue d'améliorer les pratiques d'irrigation, de la planification des horaires d'irrigation dans diverses conditions d'approvisionnement en eau et l'évaluation de la production pluviale sous conditions ou déficit de l'irrigation.
UNSATCHEM (Simunek et al., 1996)	UNSATCHEM est un logiciel de simulation de l'eau, de chaleur, de gaz carbonique et de solutés dans le mouvement unidimensionnel variablement saturés médias.
HYDRUS-1D (Simunek et al., 1998a)	Le HYDRUS - 1D programme est un modèle par éléments finis pour la simulation de l'unidimensionnel mouvement de l'eau, de chaleur et de solutés dans plusieurs variablement saturés médias.
SWAP (van Dam et al., 1997)	SWAP est un modèle informatique qui simule le transport de l'eau, de solutés et de chaleur dans les sols variablement saturés haut. Le programme est conçu pour la modélisation intégrée de l'atmosphère - sol - Plant System.
VLEACH (Ravi and Johnson, 1997)	Le Vadose zone de LEACHing modèle (VLEACH) est une unidimensionnelle différence finie modèle de simulation de la mobilisation et de la migration verticale de contaminants organiques dissous à travers la zone vadose.
LEACHM (Hutson and Wagenet, 1992)	LEACHM (Leaching Estimation et chimie Model), se réfère à une gamme de modèles de simulation décrivant le régime de l'eau et des produits chimiques dans le sol zone racinaire.
CHAIN-2D (Simunek and van Genuchten, 1994)	CHAIN-2D est un programme informatique pour la simulation en deux dimensions variablement saturés débit d'eau, de transport de chaleur, et le mouvement des solutés séquentiels impliqués dans la dégradation du premier ordre réactions.
HYDRUS-2D (Rassam et al., 2003)	HYDRUS - 2D est un environnement de modélisation numérique pour la simulation d'un à deux dimensions et variablement saturés des écoulements et de la chaleur, et de multiples soluté de transport en milieu poreux.
SWMS-2D (Simunek et al., 1994)	SWMS - 2D est un programme informatique de simulation de mouvement de l'eau et de solutés dans les deux dimensions variablement saturés médias.
RZWQM (Ahuja et al., 1999)	Le RZWQM (Root Zone Water Quality Model) est un processus orienté modèle de simulation. L'objectif de ce modèle est de simuler l'eau, chimique et biologique dans les processus et sur le dessus de la zone racinaire. Le modèle examine également soluté mouvement de bas de la zone des racines de la nappe phréatique. Il comprend aussi des cultures de la croissance routines pour certaines grandes cultures.

Le but de ce chapitre est : de résumer la structure de SALTMED, le programme de collecte de données, le calibrage du modèle en 1999 et la validation du modèle en 2003 et en 2004 en employant de l'eau douce, d'examiner la réalisation du modèle et sa capacité à prévoir le rendement final pour 1999. Différents niveaux de salinité de l'eau par des systèmes d'irrigation par goutte à goutte de 1994 à 1996 ont été appliqués pour des quantités d'eau d'irrigation variables, et cela pour plusieurs types de sol et de conditions climatiques saisonnières.

3.2. Brève description du logiciel SALTMED / Les équations de base du logiciel SALTMED

Le code de ce modèle a été écrit en C/C++ avec le système d'opération Windows 95 /98. La sortie du modèle est donnée sous la forme d'un fichier texte et d'un fichier graphique. Ceux-ci incluent la distribution horizontale et verticale de l'humidité du sol, la salinité du sol, la concentration relative, les profils du potentiel matriciel du sol et la série chronologique de référence, la transpiration de la culture, l'évaporation du sol, les conditions du lessivage, des demandes d'irrigation, K_c , K_{cb} , la profondeur des racines et le rendement final.

Le modèle SALTMED a été décrit en détail dans les travaux de Ragab (2002) avec quelques exemples d'application. Le modèle SALTMED inclut les modules principaux suivants : évapotranspiration, absorption de l'eau par la plante, transport de l'eau et de corps dissous selon les différents systèmes d'irrigation, drainage et rapport entre rendement de culture et utilisation de l'eau. Une brève description de l'ensemble des modules mentionnés ci-dessus à travers les équations de base est donnée dans ce qui suit.

3.2.1. Evapotranspiration

L'évapotranspiration a été calculée en utilisant l'équation de Penman-Monteith selon la version modifiée de la FAO-56 (1998) :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

Avec :

ET_0 : évapotranspiration de référence [mm d^{-1}] ;

R_n : radiation nette (rayonnement net) à la surface de la culture [$\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$] ;

G : flux de chaleur échangé avec le sol [$\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$] ;

T : température moyenne journalière à une hauteur de 2 m [$^{\circ}\text{C}$] ;

u_2 : vitesse du vent à 2 m [m s^{-1}] ;

e_a : pression de vapeur saturante à la température T (kPa)

e_d : pression de vapeur d'eau dans l'air (kPa)

$(e_a - e_d)$: déficit pression de vapeur (kPa)

Δ : pente de la courbe de pression de vapeur saturante pour la température T [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] ;

γ : constante psychrométrique [$66 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$];

0.34: coefficient de vent pour la culture de référence [$\text{kJ}^{-1} \text{kg K}$].

La valeur calculée (ET_0) est donnée pour une pelouse verte bien arrosée de faible hauteur. L'évapotranspiration de référence (ET_0) est représentée le degré d'évapotranspiration d'une culture de référence ayant une hauteur de 0.12 m, une résistance de couvert à 70 m/s (252 km/h) et un albedo de 0.23 identique à l'évapotranspiration d'une surface recouverte d'herbe verte, d'une hauteur uniforme en pleine croissance, recouvrant totalement le sol et ayant de l'eau en suffisance (Smith et al. 1991).

En l'absence des données météorologiques (la température, la radiation, la vitesse du vent, ...) et si les données d'évaporation de la 'classe A pan' sont disponibles, le logiciel SALTMED peut employer ces données pour calculer l' ET_0 selon le procédé de la FAO-56 (1998). Le logiciel peut également calculer la radiation nette du rayonnement solaire si les données de la radiation nette ne sont pas disponibles. L'évapotranspiration de récolte ET_c est calculée suivant la formule:

$$ET_c = ET_0 (K_{cb} + K_c) \quad (2)$$

K_{cb} est le coefficient de transpiration de la culture (connu également en tant que coefficient basique de récolte).

K_c est le coefficient d'évaporation du sol.

Les valeurs de K_{cb} et de K_c (le coefficient de la culture) pour chaque étape de croissance et sa durée pour différentes récoltes sont disponibles dans la base de données du modèle. Ces données peuvent être employées en l'absence de valeurs mesurées. K_{cb} et K_c sont estimés en fonction de la vitesse de vent (2 m/s) et de l'humidité relative (45%). Le calcul de K_c est issu des travaux d'Allen et al., (FAO-56 (1998)). Le logiciel SALTMED fonctionne avec un pas de temps journalier et utilise K_{cb} et K_c . Ces derniers varient en fonction des conditions climatiques et d'autres facteurs.

3.2.2. Précipitations efficaces

Les précipitations efficaces, c.-à-d. la quantité des précipitations disponibles pour l'infiltration dans le sol, sont estimées dans le modèle de trois manières :

1. comme pourcentage des précipitations totales ;
2. calculées selon les procédés de la FAO-56 (1998)
3. considérées égales aux précipitations totales.

3.2.3. Absorption de l'eau par de la plante en cas d'une irrigation par une eau salée

3.2.3.1. Le taux réel de l'absorption d'eau et l'absorption potentielle maximum

Différentes approches ont été suggérées par un certain nombre d'auteurs, par exemple Šimůnek et Suarez (1994), Van Genuchten et Hoffman (1984), et Van Genuchten (1987). La formule adoptée dans le logiciel SALTMED est celle suggérée par Cardon et Letey (1992a), déterminant ainsi l'absorption de l'eau S (d^{-1}):

$$S(z, t) = \left[\frac{S_{\max}(t)}{1 + \left(\frac{\alpha(t)h + \pi}{\pi_{50}(t)} \right)^3} \right] \lambda(z, t) \quad (3)$$

Où

$$\lambda(z) = 5/3 L \text{ pour } z \leq 0.21 \quad (4-a)$$

$$\lambda(z) = 25/12 L (1-z/L) \text{ pour } 0.2 L < z < L \quad (4-b)$$

$$\lambda(z) = 0.0 \text{ pour } z > L \quad (4-c)$$

$S_{\max}(t)$: l'absorption potentielle maximum de racine au temps t ;

z : la profondeur verticale qui est positive vers le bas;

$\lambda(z, t)$ fraction de la masse totale de la racine dépendant de la profondeur et du temps;

L : profondeur racinaire maximale;

h : pression matricielle;

π : pression osmotique;

$\pi_{50}(t)$ valeur dépendant du temps de la pression osmotique à laquelle $S_{\max}(t)$ est réduite de 50%;

$\alpha(t)$: coefficient poids qui explique la réponse différentielle d'une récolte et la pression du soluté;

Le coefficient $\alpha(t)$ égale $\pi_{50}(t) / h_{50}(t)$ où $h_{50}(t)$ est la pression matricielle à laquelle $S_{\max}(t)$ est réduite de 50%. L'absorption potentielle maximum $S_{\max}(t)$ est calculée selon la formule suivante:

$$S_{\max}(t) = ET_0(t) * K_{cb}(t) \quad (5)$$

Avec :

ET_0 : évapotranspiration de référence [$mm \text{ jour}^{-1}$];

K_c : le coefficient d'évaporation du sol.

Les valeurs de h_{50} et de π_{50} peuvent être obtenues à partir des expériences ou à partir de la bibliographie. A titre d'exemple on peut citer les travaux de Rhoads et al., 1999.

3.2.3.2. La profondeur racinaire

La profondeur racinaire a été supposée poursuivre le même cours que le coefficient de la culture K_c . Par conséquent, elle a été décrite par l'équation suivante :

$$\text{Profondeur de racine (t)} = [\text{Profondeur}_{\text{min}} \text{ de racine} - (\text{Profondeur}_{\text{max}} \text{ de racine} - \text{Profondeur}_{\text{min}} \text{ de racine})] * K_c(t) / K_{c\text{max}} \quad (6)$$

La profondeur maximum de racine est obtenue par des mesures directes in – situ ou donnée par la bibliographie.

3.2.3.3. La largeur racinaire

Comparée à la profondeur racinaire, il y a très peu d'information dans la littérature actuelle sur l'ampleur latérale des systèmes racinaires des cultures de plein champ au cours du temps. Par conséquent, une équation simple a été proposée :

$$\text{Largeur racinaire (t)} = \text{ratio}[\text{largeur racinaire} / \text{Profondeur de racine}] * \text{Profondeur de racine (t)} \quad (7)$$

Le rapport de [largeur racinaire / Profondeur de racine] dépend du type de récolte, du sol et d'autres facteurs. Il peut être obtenu à partir de données expérimentales ou à partir de la littérature. Pendant la croissance, les nouvelles racines entrent dans de nouvelles cellules de grille.

Le modèle calcule ensuite l'absorption de l'eau par ces seuls cellules avec les racines. Les cellules de grille modélisées sont identifiées par 0, 1 ou 2. La valeur de 0 est associée aux cellules sans racine et 1 pour des cellules entièrement occupées par les racines et 2 pour des cellules où la présence de racine est partielle. Le modèle produit un fichier de données décrivant une distribution bidimensionnelle de racine pour tous les jours de simulation.

3.2.4. Rendement de récolte relatif et réel

3.2.4.1. Le rendement de récolte relatif, RY

En raison du rapport unique et fort entre l'absorption de l'eau et la production de biomasse, et par conséquent le rendement final, le rendement de récolte relatif RY est estimé comme la somme de l'absorption d'eau réelle au cours de la saison divisée par la somme de l'absorption d'eau maximum (sous aucune condition d'effort) selon la relation :

$$RY = \frac{\sum S(x, z, t)}{\sum S_{\text{mas}}(x, z, t)} \quad (8)$$

Où x, z sont respectivement les coordonnées horizontales et verticales de chaque cellule de la grille qui contient les racines.

3.2.4.2. Le rendement réel, AY

Le rendement réel, AY s'obtient simplement par la formule :

$$AY = RY * Y_{\max} \quad \text{Où: } Y_{\max} \text{ est le rendement maximum obtenu dans une région donnée dans des conditions optimales et sans contraintes.} \quad (9)$$

3.2.5. Écoulement de l'eau et de soluté

3.2.5.1. Écoulement de l'eau

L'écoulement d'eau dans les sols peut être décrit mathématiquement par l'équation bien connue de Richard. C'est une équation partielle non linéaire, partielle par rapport au temps et l'espace. Elle est basée sur deux principes physiques de sol : la loi de Darcy et la continuité de la masse. État de la loi de Darcy décrite par :

$$q = -K(h) \frac{\delta H}{\delta Z} \quad (10)$$

Où :

q: le flux d'eau

K (h): la conductivité hydraulique en fonction de la pression de l'eau du sol ;

Z: la coordonnée verticale dirigée vers le bas avec son origine à la surface du sol ;

H: la charge hydraulique qui est égale à la somme du potentiel gravitaire Z et du potentiel de pression hydrostatique, Ψ , ainsi :

$$H = Z + \Psi \quad (11)$$

L'écoulement vertical d'eau et le changement d'état dans un segment stable et uniforme de la zone racinaire peuvent être décrits par l'équation type de Richard suivante :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial(\Psi + Z)}{\partial z} \right] - S_w \quad (12)$$

Où

θ : la teneur en eau volumique;

t: le temps ;

Z: la profondeur;

K(θ) : la conductivité hydraulique (en fonction de l'humidité);

Ψ : la succion matricielle ;

et S_w : la limite fixe (effet de peau) représentant l'extraction par les racines de la plante.

3.2.5.2. Écoulement de soluté

Le mouvement d'un soluté dans le système du sol, son taux et sa direction, dépendent considérablement du chemin du mouvement de l'eau, mais également déterminé par la

diffusion et la dispersion hydrodynamique. Si ces derniers effets sont négligeables, l'écoulement de corps dissous par la convection peut être décrit par l'équation formulée par Hillel (1977) :

$$J_c = qc = v\theta c \quad (13)$$

Où:

J_c : la densité de flux de corps dissous;

q : la densité de flux de l'eau de l'eau;

C : la concentration du corps dissous dans l'eau en écoulement;

v est la vitesse moyenne de l'écoulement;

Le taux de diffusion d'un corps dissous (J_d) dans un volume d'eau au repos est lié, par la loi de Fick, au gradient de concentration selon :

$$J_d = D_0 \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (14)$$

Où:

D_0 : le coefficient de diffusion dans l'eau.

Dans le sol le coefficient de diffusion, D_s : diminue du fait que la phase liquide occupe seulement une fraction de volume du sol, et aussi en raison de la nature tortueuse du cheminement dans les pores du sol. Il peut donc être exprimé selon l'équation suivante :

$$D_s = D_0 \theta \xi \quad (15)$$

$$\xi = \frac{\theta^{7/3}}{\theta_s^2} \quad (16)$$

Où le ξ est la tortuosité, un facteur empirique plus petit que l'unité, qui diminue avec un θ décroissant suivant les indications de l'équation (16) Šimůnek et Suarez, (1994). Le flux de convection entraîne généralement une dispersion hydrodynamique, effet qui dépend de l'irrégularité microscopique de la vitesse d'écoulement dans les divers pores. Ainsi, une frontière nette entre deux solutions miscibles devient de plus en plus diffuse au niveau de la position moyenne du front de convection. Pour un tel cas, Bresler (1975) a montré que le coefficient de diffusion dépendait linéairement de la vitesse moyenne d'écoulement :

$$D_h = \alpha \bar{v} \quad (17)$$

Où:

α : coefficient empirique;

Par la combinaison de la diffusion, de la dispersion et de la convection le flux global du corps dissous peut être obtenu par:

$$J = -(D_h + D_s) \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) + \bar{v} \theta_c \quad (18)$$

Si on prend en compte l'équation de continuité, le mouvement transitoire unidimensionnel du soluté non-interactif dans le sol peut être exprimé par :

$$\frac{\partial(\theta_c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_a \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial(qc)}{\partial z} - S_s \quad (19)$$

Où:

c: la concentration du corps dissous dans la solution du sol;

q: le flux en convection de la solution;

Da: un coefficient combiné de diffusion et de dispersion des solides solubles;

Ss: limite sortante fixe pour le corps dissous représentant l'adsorption racinaire.

Sous l'irrigation goutte - à- goutte d'une ligne source, l'eau et le transport de corps dissous peuvent être évalués comme écoulement bidimensionnel et simulés par un des modèles suivants :

-Un modèle « d'écoulement plan » impliquant les coordonnées cartésiennes x et z. L'écoulement plan a lieu si l'on considère un ensemble de sources de tubes de courant à distance égale, assez proches les unes des autres de sorte que leurs fronts de mouillage se recouvrent peu après le début de l'irrigation;

-Un modèle « d'écoulement cylindrique » décrit par les coordonnées cylindriques r et z.

L'écoulement cylindrique a lieu si on considère le cas d'une lance de goutte-à-goutte unique ou un certain nombre de lances sont suffisamment espacées de sorte que le chevauchement des fronts de mouillage des sources adjacentes n'ait pas lieu. Pour un milieu stable, isotrope et de porosité homogène, l'écoulement bidimensionnel de l'eau dans le sol peut être décrit selon Bresler (1975) par :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial (\psi + z)}{\partial z} \right] \quad (20)$$

Où:

x la coordonnée horizontale;

z: l'ordonnée verticale (considérée comme positive du haut vers le bas);

K(θ): la conductivité hydraulique du sol;

En considérant des milieux isotropes et porosité homogène dont les axes principaux de dispersion sont orientés parallèlement et perpendiculairement à la direction principale de l'écoulement, le coefficient hydrodynamique D_{ij} de dispersion peut être défini ainsi:

$$D_{ij} = \lambda |V| \delta_{ij} + \frac{(\lambda_L - \lambda_T) V_i V_j}{|V| + D_s(\theta)} \quad (21)$$

Où:

λ_L : la dispersion longitudinale du milieu;

λ_T : la dispersion transversale du milieu ; δ_{ij} est le delta de Kronecker (c.-à-d., $\delta_{ij} = 1$ si $i = j$ et $\delta_{ij} = 0$ si $j \neq i$);

V_i et V_j respectivement les composantes selon i et j de la vitesse moyenne d'écoulement interstitielle ;

$D_s(\theta)$ le coefficient de diffusion du sol comme défini dans l'équation (15).

Si on considère seulement deux dimensions et par substitution de D_{ij} , l'équation d'écoulement du soluté devient :

$$\frac{\partial(C\theta)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} - q_x C) + \frac{\partial}{\partial z} (D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} + D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} - q_z C) \quad (22)$$

Dans ce modèle, l'irrigation par arrosage, par inondation et par bassin sont décrites par des équations d'écoulement unidimensionnelles (par exemple Eqs. (12) et (19)). Le sillon et la ligne source au goutte-à-goutte sont décrits par des équations bidimensionnelles (par exemple Eqs. (20) et (22)). Le point source au goutte-à-goutte est décrit par des équations cylindriques d'écoulement obtenues en remplaçant x par le rayon « r » et en modifiant réarrangeant les équations (20) et (22) comme montré par Bresler (1975) et Fletcher Armstrong et Wilson (1983). Les équations d'écoulement de l'eau et de corps dissous ont été résolues numériquement en utilisant un arrangement explicite par la méthode des différences finies Ragab et al., (1984).

Les conditions de frontière sont celles données par Ragab et al., (1984), Bresler (1975) et Brandt et al., (1971). En conséquence, le modèle peut produire des valeurs distribuées de série chronologique :

1. du contenu d'humidité de sol, θ ;
2. de la concentration en sel, C ;
3. de toute la teneur en sel, $C*\theta$;
4. de la concentration relative comme :

$$C(z, t) = C_{irrigation\ water} / C_{initial}(z, t) \quad (23)$$

3.2.5.3. Paramètres hydrauliques du sol

Résoudre les équations de transport de l'eau et des solutés exige deux relations entre le sol et l'eau, notamment la relation du potentiel d'humidité du sol et la relation de

conductivité hydraulique potentielle de l'eau du sol. Ils ont été démontrés par Van Genuchten (1980) ainsi:

$$\theta(h) = \theta_r + \left[(\theta_s - \theta_r) / (1 + |\alpha h|^n)^m \right] \quad (24)$$

$$K(h) = K_s K_r(h) = K_s S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (25)$$

$K(h)$: la fonction de la conductivité hydraulique en non saturé;

K_s : la conductivité hydraulique à saturation;

K_r : la conductivité hydraulique relative;

θ_r : teneur en eau résiduelle;

θ_s : teneur en eau à saturation ;

α et n : les paramètres de forme empiriques, $m = 1 - 1/n$;

S_e : la saturation efficace ou teneur en eau volumétrique normalisée du sol.

Les Eqs. (24) et (25) ont été employées après avoir été modifié afin d'obtenir le potentiel de l'eau du sol et la conductivité hydraulique comme fonctions de saturation efficace par van Dam et al. (1994) ainsi:

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (26)$$

$$h(S_e) = \left[(S_e^{-1/m} - 1)^{1/n} \right] / \alpha \quad (27)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^{1/2} \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (28)$$

Ces équations sont basées sur les fonctions de pédo-transfert, Rawls et le Brakensiek (1989). θ_r , θ_s , θ , K_s , la teneur en eau à la capacité de champ et au point de flétrissement, pression de bulle et n et m (avec $n = \lambda + 1$ et $m = \lambda / n$) sont les valeurs produites pour plusieurs types de sol où λ est l'index de distribution de la dimension de pore. Ces valeurs et d'autres valeurs obtenues à partir de différentes sources sont incluses dans la base de données du modèle et peuvent être employées comme valeurs par défaut en l'absence de mesures. Le modèle peut également employer des paires de valeurs sous forme de tableaux de potentiel d'humidité du sol et de conductivité hydraulique d'humidité du sol et les interpoler pour obtenir des valeurs intermédiaires par classes.

3.2.6. Drainage

Le drainage libre au bas de la zone racinaire est possible. Sinon une couche imperméable peut être imposée en bas de la zone racinaire.

3.2.7. Conditions de lessivage

Les résultats expérimentaux ont montré que la salinité du sol ne réduit pas le rendement de la récolte de manière significative jusqu'à ce qu'un niveau de seuil soit dépassé. Pour

éviter la perte de rendement lorsque les concentrations en sel dépassent leurs limites de tolérance, les sels excessifs doivent être lessivés au-dessous de la zone de racine. Ainsi, quand la profondeur maximale d'eau appliquée est calculée lors de la programmation, une tranche additionnelle d'eau basée sur le niveau de salinité doit être ajoutée pour le lessivage. La condition de lessivage (LR) est habituellement calculée par :

$$LR = D_d / D_i = C_i / C_d \quad (29)$$

Où:

D_d : la profondeur de l'eau passant sous la zone racinaire comme eau de drainage, D_i est la profondeur d'eau de pluie et d'irrigation appliquée;

C_d : la concentration en sel de l'eau de drainage au-dessus de laquelle la réduction de rendement se produit;

C_i : la concentration en sel de l'eau d'irrigation.

Le LR est simplement calculé par le logiciel de SALTMED comme un rapport de concentration en sel de l'eau d'irrigation avec celle de l'eau de drainage ou du niveau moyen de salinité de la zone de racine donné dans l'équation (29). La concentration relative en sel donnée dans l'équation (27) pourrait être employée comme indicateur de la nécessité de lessiver les sels accumulés dans la zone de racine.

3.3. Données nécessaires

1-Données météorologiques: inclure les valeurs quotidiennes de la température maximale, de la température minimale, de l'humidité relative, du rayonnement net, de la vitesse de vent, et des précipitations quotidiennes.

2-Données de gestion de l'eau: inclure la date et la quantité de l'eau d'irrigation appliquée et le niveau de salinité de chaque irrigation appliquée

3-Caractéristiques de la plante: celles-ci incluent, pour chaque étape de croissance; le coefficient de récolte, le K_c , le K_{cb} , la profondeur de racine et l'expansion latérale, la taille de récolte et le rendement final maximum/ potentiel observé dans la région dans des conditions optimales.

4-Caractéristiques du sol: inclure la profondeur de chaque horizon de sol, la conductivité hydraulique saturée, la teneur en eau de sol saturée, le coefficient de diffusion de sel, les coefficients longitudinal et transversal de dispersion, l'humidité du sol initiale, les profils de salinité, et les données sous forme de tableaux de l'humidité du sol selon le potentiel hydrique du sol et de l'humidité du sol selon la conductivité hydraulique.

5-Paramètres du modèle: inclure le nombre de compartiments dans la direction verticale et horizontale, les paramètres de tortuosité, les paramètres de diffusion, les paramètres de l'absorption, la position relative des plantes par rapport à la source d'irrigation et l'intervalle de temps maximum pour le calcul.

3.4. Données de défaut dans les bases de données.

Le modèle a trois bases de données intégrées :

1-La base de données des systèmes d'irrigation : elle contient l'information sur la fraction de mouillage et la fréquence d'application de 10 systèmes d'irrigation.

2-La base de données des cultures (basée en grande partie sur les travaux de Rhodes et al., 1992 et Allen et al., 1998), contient les différentes cultures, arbres et arbustes (>200) de différentes régions, la durée de chaque étape de croissance, les dates d'ensemencement et de récolte, les valeurs de K_c et de K_{cb} pour chaque étape de croissance, la hauteur maximale et la profondeur maximale d'enracinement. Le modèle utilise K_{cb} pendant qu'il fonctionne sur un intervalle de temps quotidien.

3-la base de données des sols: contient les caractéristiques et les paramètres hydrauliques du transport de corps dissous dans plus de 40 types différents de sol.

Résultats et discussion

4. Modèle de simulation

Des études sur le terrain du centre de recherches d'Almria ont été conduites pendant 15 années sur le coton, (cv de variété - coton D22) afin de déterminer le rôle de l'eau douce et saumâtre, dans utilisation efficace de l'arrosage, sur le rendement et sur la salinité du sol. Du coton a été développé dans le domaine selon différentes stratégies de gestion de l'eau dont les données ont été rassemblées pour examiner le modèle SALTMED.

4.1. Calibrage du modèle SALTMED

En 1999, une variété de coton tolérante au sel (cv de variété - coton D22) a été testée dans le domaine du centre de recherches d'Almria selon quatre méthodes différentes d'irrigation (traitements) : sillon, bassin, aspersion et goutte à goutte. Chaque traitement a été répété trois fois (voir chapitre 1). Des données rassemblées sur ces traitements, ont été employées pour le calibrage du modèle SALTMED.

Les données météorologiques, comprenant des valeurs quotidiennes de la température maximum et minimum, d'humidité relative, de rayonnement net, de vitesse de vent, et de précipitations quotidiennes, ont été mesurées sur l'emplacement du champ expérimental (station météorologique d'Almria) à partir du 1er avril 1999 jusqu'au 31 octobre 1999. Les dossiers d'irrigation contiennent des mesures de débit sur le terrain, la durée de chaque irrigation et la salinité de l'eau d'irrigation.

Les paramètres végétaux (cv de variété - coton D22) comme la hauteur maximum de la plante et la profondeur de racine, la durée de chaque étape de croissance, la date de semis et la date de la récolte ont été évalués par des mesures sur le terrain et des enregistrements.

Des coefficients de récolte tels que K_c , K_{cb} , et F_c ont été fixés sur la base de données intégrées de culture de SALTMED. Le rendement normal de culture a été obtenu à partir d'expériences commandées à la station d'Almria et il était de 5 t ha^{-1} pour l'irrigation du sillon, en bassin et par aspersion et de 6 t ha^{-1} pour l'irrigation au goutte à goutte.

Les caractéristiques du sol comprenant l'épaisseur de chaque horizon de sol, la conductivité hydraulique saturée et la teneur en eau saturée de sol ont été étudiées (Voir chapitre 1).

4.1.1. Le processus du calibrage

L'utilisateur peut calibrer le modèle en utilisant un ou plusieurs des paramètres suivants : l'humidité du sol, la salinité du sol, l'évapotranspiration réelle, l'évaporation du sol, l'absorption d'eau et le rendement. Le rendement dépendant de l'absorption d'eau et celle-ci alternativement du contenu d'humidité et de salinité du sol, on a décidé de le comparer au rendement final. Ce dernier englobe implicitement le calibrage selon le contenu de

salinité du sol. Le modèle a été calibré en utilisant le traitement par l'eau douce à 100% en 1999 selon quatre différents traitements de gestion de l'eau, en l'occurrence : sillon, bassin, arrosage et goutte à goutte. L'information et les données suivantes ont été utilisées dans le calibrage :

1-Les données météorologiques, à partir du 1^{er} avril 1999 jusqu'au 31 octobre 1999 (Figure 16), ont été mesurées sur le lieu du champ (station météorologique d'Almria).

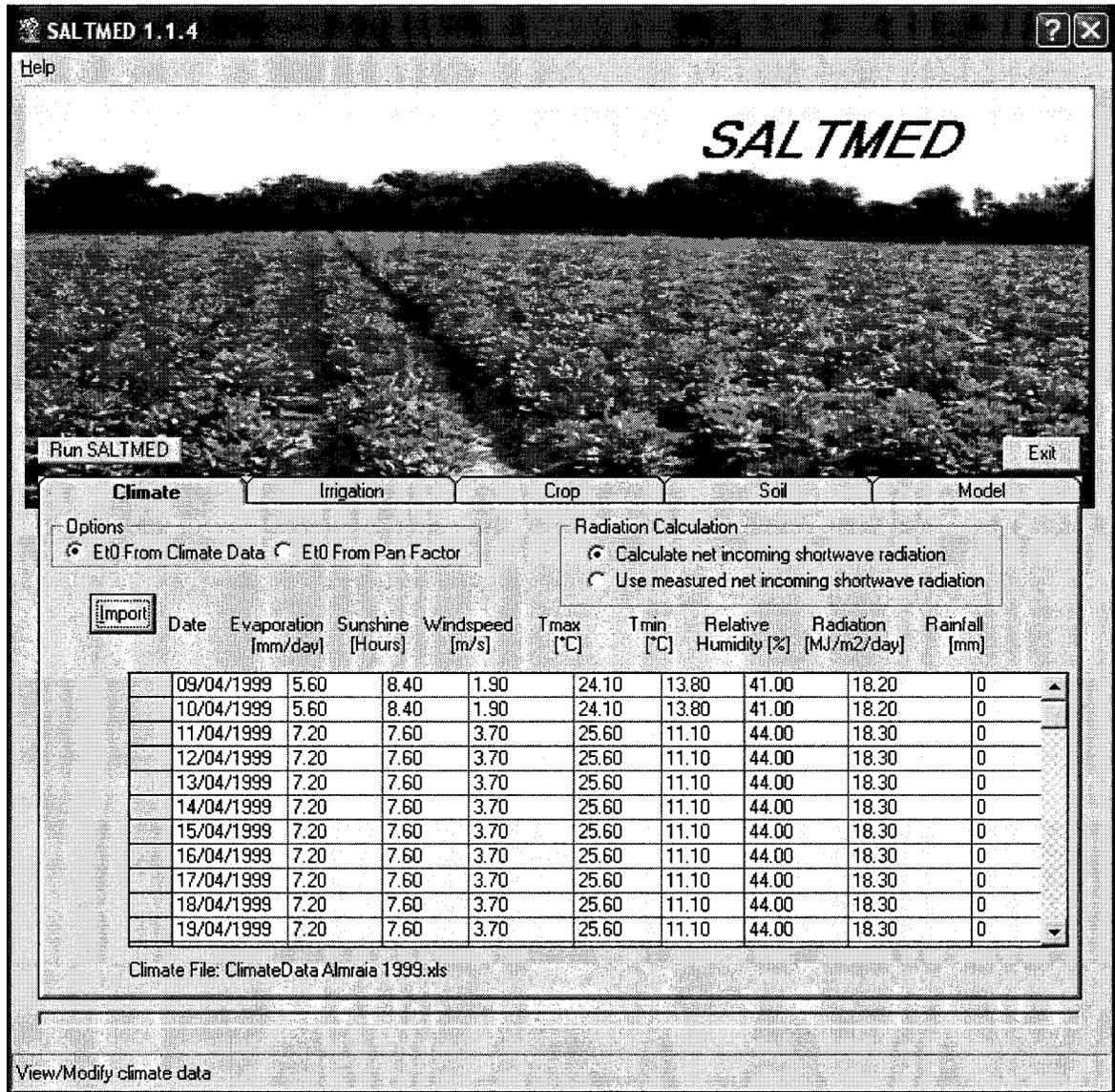


Figure 16. Fichier d'entrée des données météorologiques utilisées dans le calibrage pour toutes les méthodes d'irrigation, saison 1999.

2- Les dossiers d'irrigation contiennent les mesures effectuées dans le champ : une vitesse de débit, temps de chaque irrigation et taux de salinité de l'eau d'irrigation.

Le calcul du débit d'irrigation sous sillon, bassin, d'asperseur et de goutte à goutte est donné ci-après. Pour plus de détails (Fig. 17 pour l'irrigation du sillon).

- **Calcul du taux de décharge d'irrigation du sillon:**

Les mesures sur le terrain du débit étaient de $1339 \text{ m}^3/\text{ha}$ et la durée d'irrigation de 181 minutes. L'espacement entre 2 rangées est de $50 + 30 = 80$ centimètres. La longueur du sillon est de 200 m. On a 4 sillons. Ainsi la surface de l'irrigation est de $0.8 \cdot 200 \cdot 4 = 640 \text{ m}^2$.

Le débit pour 640 m^2 s'élève à $85.72 \text{ m}^3/\text{ha}$. Pour un sillon le débit est de $85.72 / 4 = 15.28 \text{ m}^3$. Ainsi le débit sous le sillon d'irrigation est de $21.43 \cdot 10^6 / (181 \cdot 20000) = 5.92 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Moitié vers la droite et moitié vers la gauche soit $5.92/2 = 2.96 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

Date	le taux de décharge ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	heure de départ	heure de fin	l'EC de l'eau d'irrigation
09/04/1999	2.96	13:30	16:31	0.73
10/04/1999				

- **Calcul du taux de décharge d'irrigation par bassin :**

Les mesures sur le terrain du débit étaient de $896 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{hr}$ et la durée de l'irrigation était de 2h00. Ainsi : $0.0896 / 120 \text{ minute} / (100 \cdot 1) = 11.225 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ pendant 2 heures. Nous calculons le débit du bassin dans un plan.

Date	le taux de décharge ($\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	heure de départ	heure de fin	l'EC de l'eau d'irrigation
09/04/1999	11.225	13:30	15:30	0.73
10/04/1999				

- **Calcul du taux de décharge d'irrigation de l'asperseur :**

Dans le catalogue de l'asperseur et les mesures sur le terrain du débit étaient de $1.25 \text{ m}^3/\text{hr}$ et la durée de l'irrigation était de 5h16. Ainsi : $1.25 \text{ m}^3/\text{hr} = 1.25 \cdot 10^6 / 60 / (100 \cdot 1) = 208.333 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Nous calculons la décharge dans un plan.

Date	le taux de décharge ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	heure de départ	heure de fin	l'EC de l'eau d'irrigation
09/04/1999	208.333	10:00	15:16	0.73
10/04/1999				

- **Calcul du taux de décharge d'irrigation par le goutte à goutte:**

Les mesures sur le terrain du débit étaient de $462 \text{ m}^3/\text{ha}$ et la durée de l'irrigation de 300

minutes. L'espacement entre 2 rangées est de $50 + 30 = 80$ centimètres. La ligne longueur est de 200 m avec 4 lignes. Ainsi la surface de l'irrigation représente $0.8 * 200 * 4 = 640 \text{ m}^2$. Le débit pour 640 m^2 s'élève à 29.59 m^3 . Pour une ligne, le débit est $29.59 / 4 = 7.4 \text{ m}^3$.

Ainsi le taux de décharge selon l'irrigation du sillon est de $7.4 * 10^6 / (300 * 20000) / 2 = 1.23288 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Moitié vers la droite et moitié vers la gauche $1.23288 / 2 = 0.61644 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

Date	le taux de décharge ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	heure de départ	heure de fin	l'EC de l'eau d'irrigation
09/04/1999	0.61644	13:30	18:30	0.73
10/04/1999				

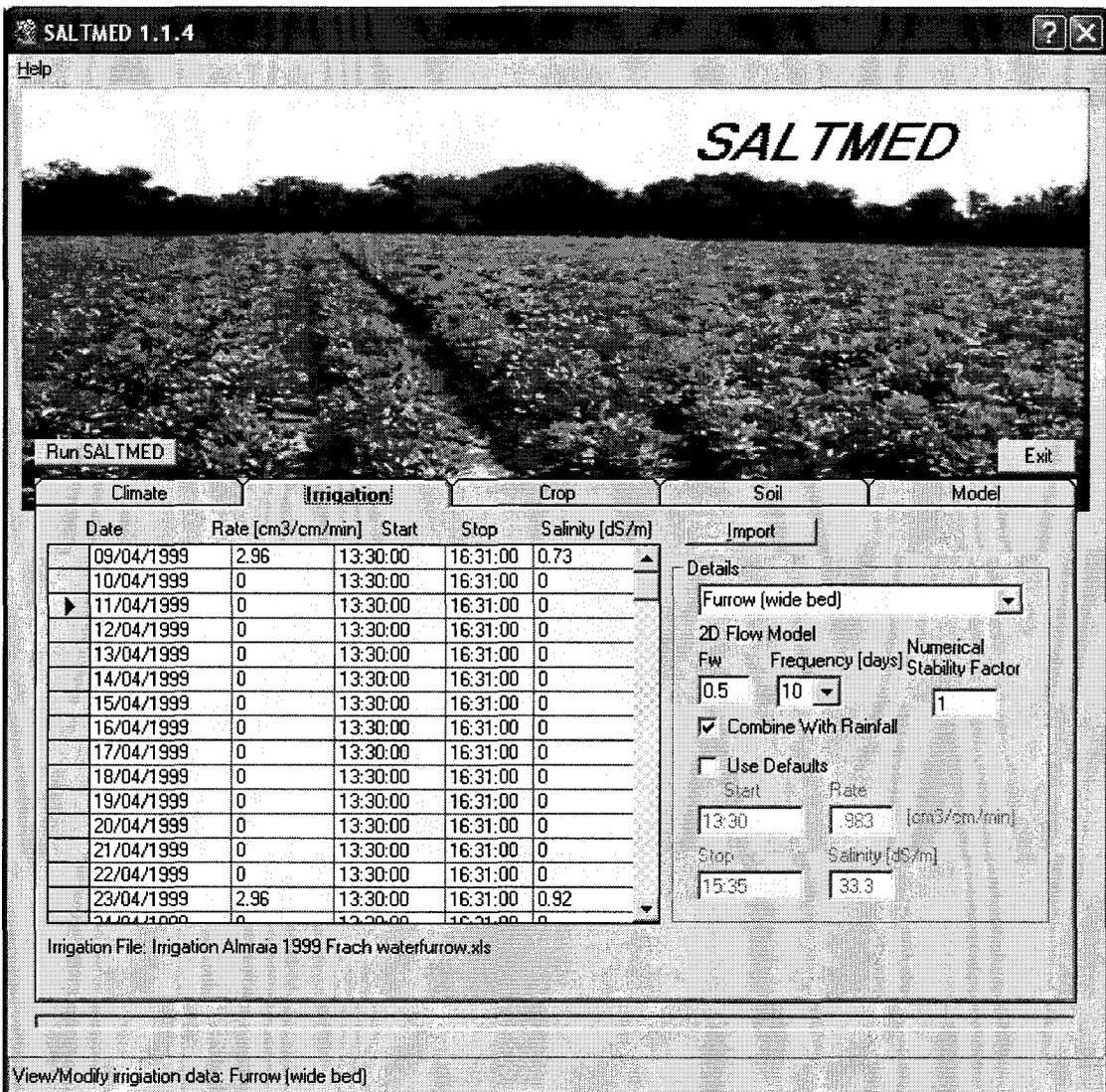


Figure 17. Fichier d'entrée des données d'irrigation utilisées dans le calibrage selon l'irrigation du sillon, saison 1999.

Les paramètres de la plante (Coton D22) (Figure 18) tels que la hauteur maximum de la plante et la profondeur d'enracinement, la durée de chaque étape de croissance, la date de semis et la date de la récolte ont été déterminés par des mesures sur le terrain et des enregistrements. Les coefficients des cultures comme K_c , K_{cb} , F_c ont été évalués selon les indications du rapport de la FAO (Irrigation & Drainage paper no. 56 Allen et al. (1998)) cantinant une partie de la base des données de la culture intégrée à SALTMED. Le rendement normal de récolte a été obtenu à partir des mesures de contrôle en serre chaude (5 t ha⁻¹ pour l'irrigation du sillon, en bassin et d'arrosage et 6 t ha⁻¹ pour l'irrigation en goutte à goutte). Les paramètres H50 et π 50 ont été obtenus à partir des mesures de contrôle en serre chaude et les valeurs confirmées et quantifiées par le calibrage.

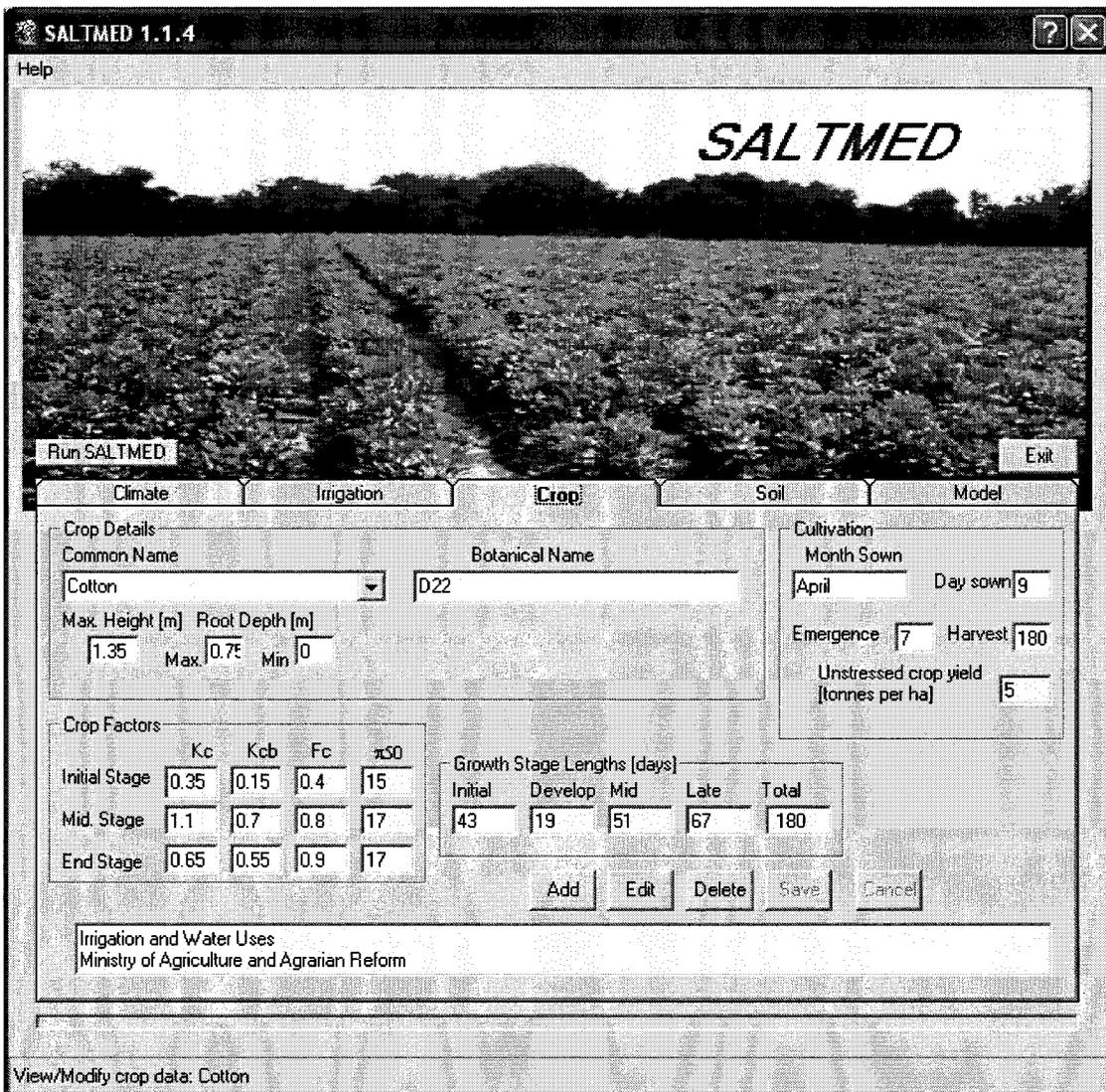


Figure 18. Menu d'entrée des paramètres de récolte utilisés dans le calibrage pour toutes les méthodes d'irrigation, saison 1999.

4. Les paramètres du sol tels que la conductivité hydraulique en conditions saturée et non-saturée, ont été en grande partie déterminés par des mesures sur le terrain tandis que des courbes de rétention de l'eau étaient réalisées selon des mesures de laboratoire. Les profondeurs de couche de sol, l'humidité initiale et la salinité du sol ont été évaluées grâce à des mesures au laboratoire ou des mesures in situ données en Figure 19 (Irrigation and Water Uses-Ministry of Agriculture and Agrarian Reform).

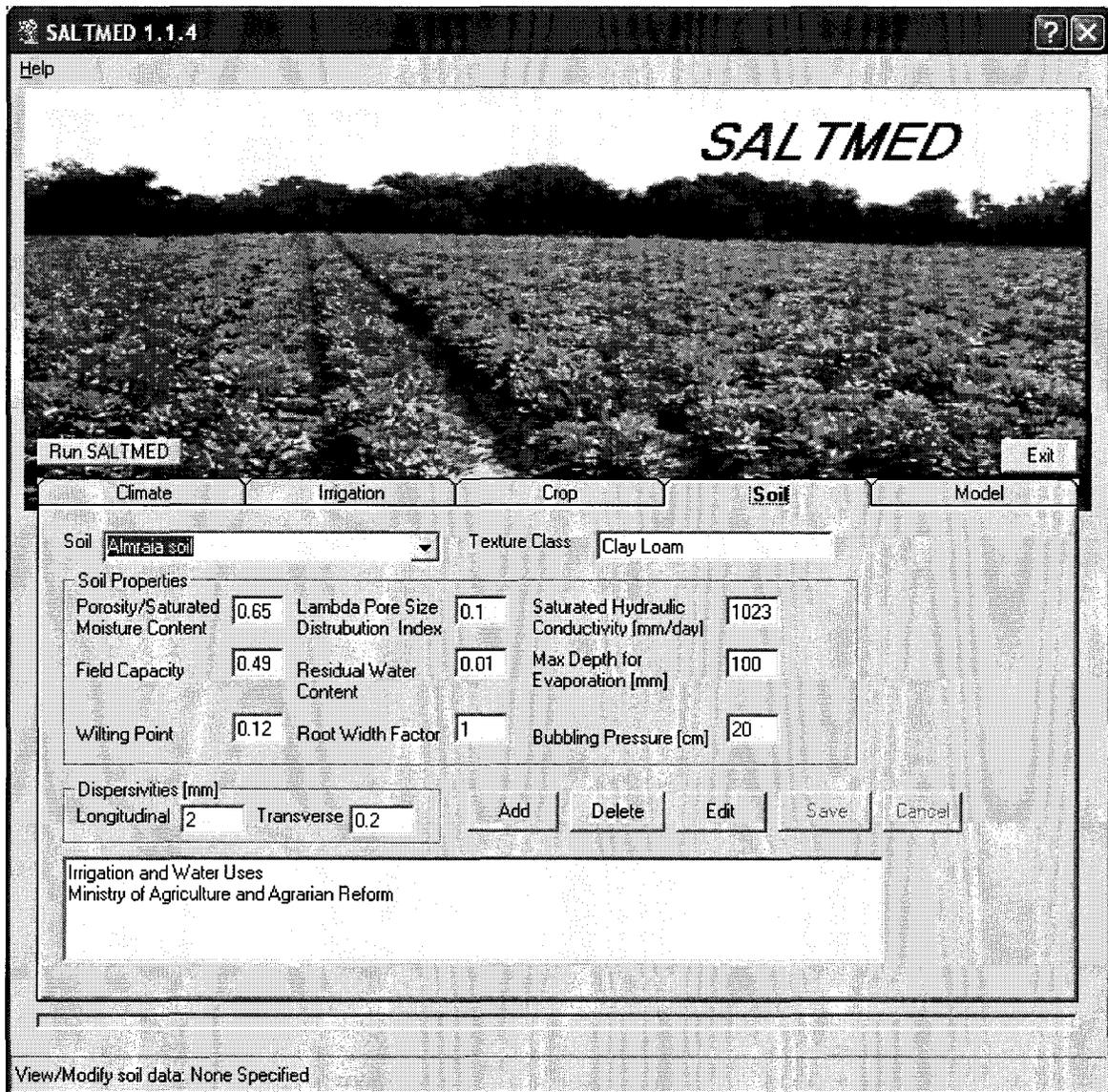


Figure 19. Menu d'entrée des paramètres du sol utilisés dans le calibrage de toutes les méthodes d'irrigation, saison 1999.

5. Les paramètres du modèle tels que les précipitations efficaces, la latitude, la longitude

et l'altitude de l'emplacement au-dessus du niveau de la mer, l'humidité initiale et la salinité initiale, l'absorption d'eau, l'évaporation du sol, le coefficient de diffusion, la tortuosité, la position de la plante par rapport à la source d'irrigation, l'intervalle de temps et le nombre des cellules disposées horizontalement et verticalement ont été déterminés par Ragab (2002) et sont représentées dans les Figure 20 et 21.

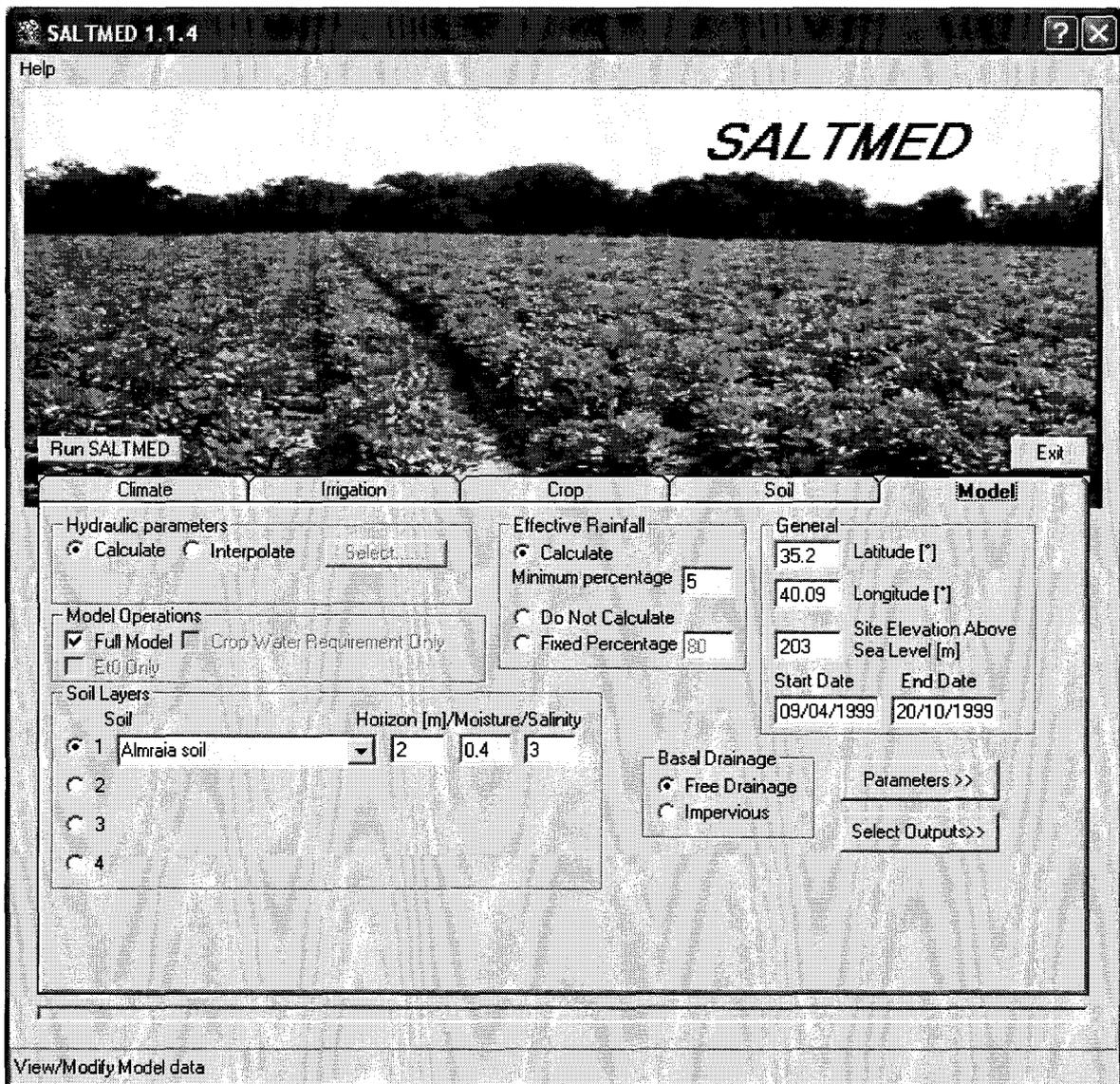


Figure 20. Fichier d'entrée et options des données du sol, du drainage et des précipitations efficaces utilisées dans le calibrage selon toutes les méthodes d'irrigation, saison 1999.

Figure 21. Menu des paramètres du modèle utilisés dans le calibrage dans l'irrigation du sillon ou du goutte à goutte, saison 1999.

Actuellement les calculs sont réalisés sur 10 cellules selon l'irrigation du sillon et goutte à goutte, 25 cellules pour l'irrigation par aspersion et en bassin et sont disposées horizontalement avec 50 cellules disposées verticalement. Chaque cellule mesure 4 cm x 4 cm (c.-à-d. le domaine d'écoulement est de 0.4 m x 2 m, celles pour l'irrigation du sillon et goutte à goutte, 1 m x 2 m pour l'irrigation par arrosage et en bassin) voir tableau 16. L'intervalle de temps est de 200 s et le modèle résume le total des valeurs quotidiennes après 86.400 s (Figure 21).

Tableau 16. Ampleur horizontale, nombre de compartiment dans le plan horizontal et position de la culture

	Sillon	Bassin	Aspersion	Goutte à goutte
Ampleur horizontale	0.4	-	-	0.4
Nombre de compartiments dans le plan horizontal	10	25	25	10
Position de la culture	Plante placée à la source d'irrigation	-	-	Plante placée loin de la source d'irrigation

6. Le modèle produit un certain nombre de résultats de rendement quotidien choisis selon la Fig. 22 ou utilisés comme fichiers de données et/ou figures.

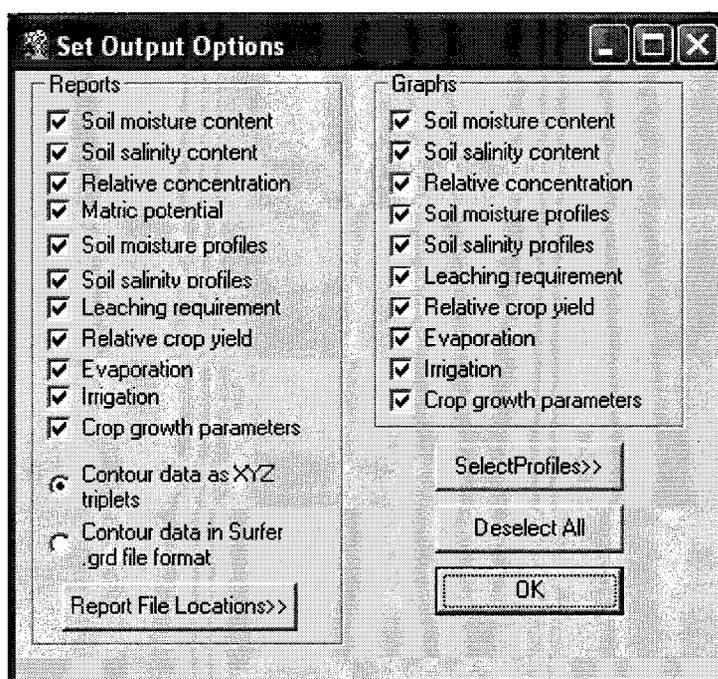


Figure 22. Menu d'option de rendement utilisé dans le calibrage selon toutes les méthodes d'irrigation, saison 1999.

Le calibrage a été réalisé en utilisant les mêmes paramètres de culture pour les quatre méthodes d'irrigation quand la même variété a été employée.

Une fois toutes les données d'entrée de météorologie, d'irrigation, de culture, du sol et des paramètres de modèle saisies, le procédé de calibrage peut être réalisé.

Le modèle a été calibré en utilisant le traitement par 100% d'eau douce en 1999 dans le centre de recherches d'Almria. Le procédé de calibrage a été suivi d'abord en utilisant les valeurs mesurées/estimées initiales des paramètres de culture et de sol, puis en modifiant graduellement ces valeurs des paramètres (de culture et de sol) un par un jusqu'à ce que le rendement calibré soit égal ou presque identique (2 % d'écart admissible) à celui observé. Le calibrage a été consigné en utilisant les mêmes paramètres de récolte pour les quatre méthodes d'irrigation lorsque la même variété de coton a été employée.

4.1.2. Résultats des calibrages du modèle

Le modèle a été exécuté avec succès avec des données de 1999, et représente les sorties du modèle sous forme de textes et dossiers graphiques. Ceux-ci incluent la distribution horizontale et verticale de l'humidité du sol, de la salinité du sol, de la concentration relative, des profils du potentiel matriciel du sol et de la série chronologique des potentiels de référence, de la transpiration des cultures, l'évaporation nue du sol, les conditions de lessivage et le rendement final. La Fig. 23 montre le rendement simulé et observé sous l'irrigation du sillon, en bassin, par aspersion et par le goutte à goutte.

Le rendement modélisé de la récolte sous l'irrigation du sillon, en bassin, par aspersion et par goutte à goutte était respectivement de 2848, 2250, 2853 et 4435 kg ha⁻¹. Ces valeurs sont proches des rendements observés.

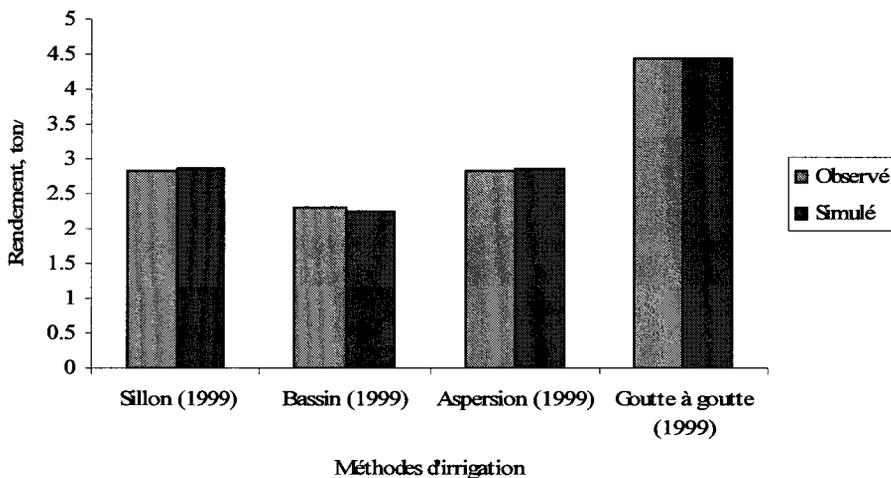


Figure 23. Rendement simulé et observé selon différentes méthodes d'irrigation obtenue par le calibrage avec 100% d'eau douce, saison 1999

Les résultats issus de l'expérimentation du coton D22 planté, en 1999, sont injectés dans le module de simulation SALTMED. Ils nous ont permis de connaître les paramètres des cultures, à savoir, K_c , K_{cb} , F_c , π_{50} , la hauteur maximum et la profondeur maximum d'enracinement. Ces résultats sont consignés dans le tableau 17 suivant.

Tableau 17. Paramètres de culture (cv de variété - coton D22) comme K_c , K_{cb} , F_c et π_{50} après le calibrage pendant la saison 1999.

Paramètre	Étape initiale	Étape moyenne	Étape finale
K_c	0.35	1.10	0.65
K_{cb}	0.15	0.70	0.55
F_c	0.4	0.8	0.9
π_{50} (dS m ⁻¹)	15	17	17

L'absorption d'eau potentielle maximum (sous aucune tension) et l'absorption d'eau réelle, comme le rendement de récolte prévu sont indiqués dans les Figure 24-a, Figure 24-b, Figure 24-c et Figure 24-d respectivement selon l'irrigation du sillon, en bassin, par aspersion et par goutte à goutte. Le fort décalage occasionnel entre l'absorption maximum d'eau calculée et réelle reflète l'effet de la tension de l'eau sur le prélèvement d'eau, et par conséquent le rendement.

La courbe noire représente le rapport entre la prise réelle d'eau et la prise potentielle. Le jour de la moisson, le rapport cumulatif est employé comme facteur de réduction. En le multipliant par le rendement maximum observé dans la région, on peut obtenir le rendement réel avec les équations (5) et (6).

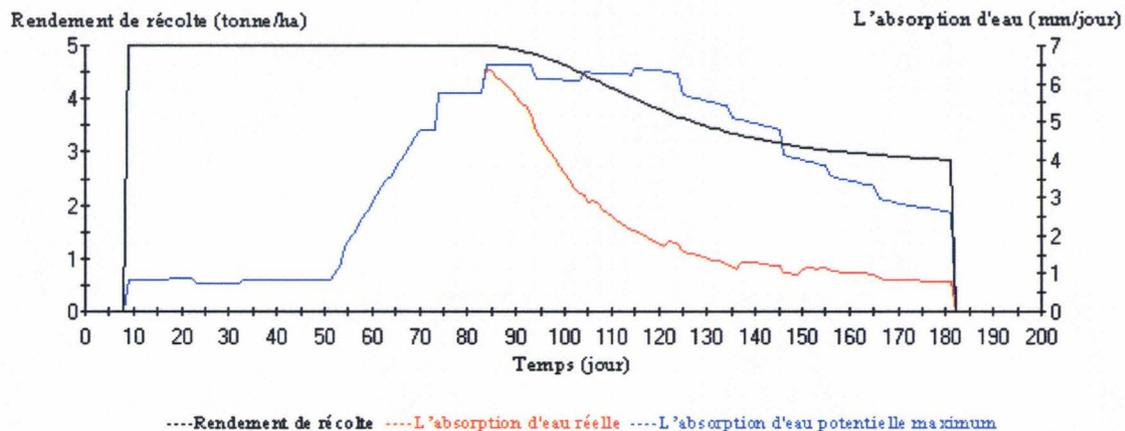


Figure 24-a. Rendement de récolte suite au calibrage du traitement en sillon avec 100% d'eau douce, saison 1999.

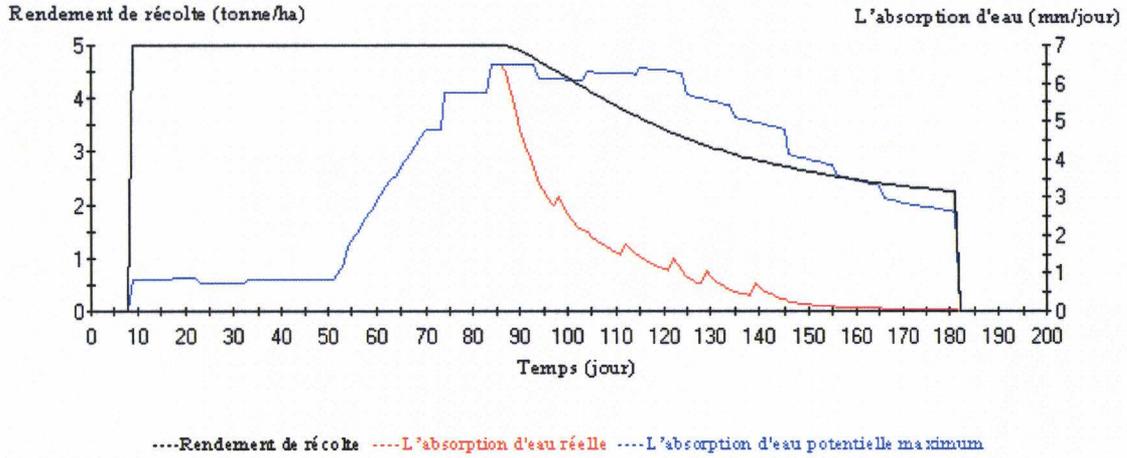


Figure 24-b. Rendement de récolte suite au calibrage du traitement en bassin avec 100% d'eau douce, saison 1999.

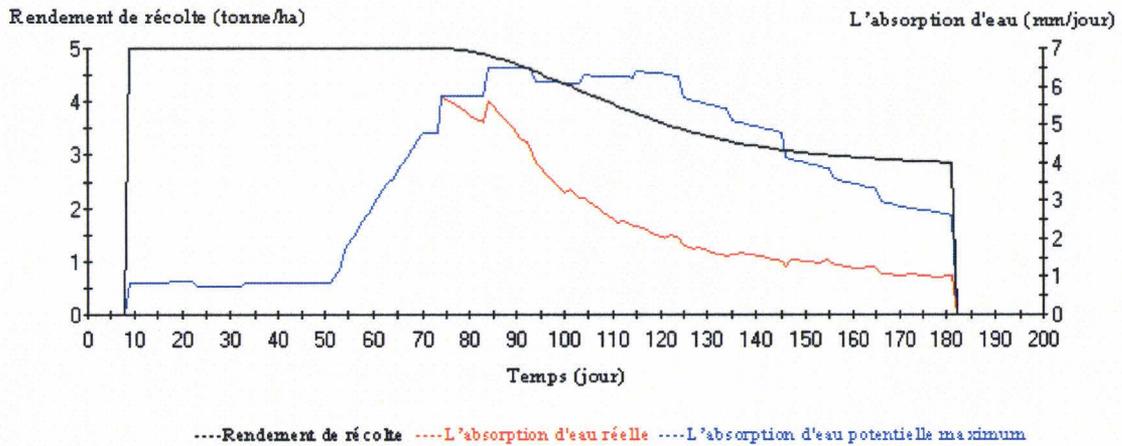


Figure 24-c. Rendement de récolte suite au calibrage du traitement par asperseur avec 100% d'eau douce, saison 1999.

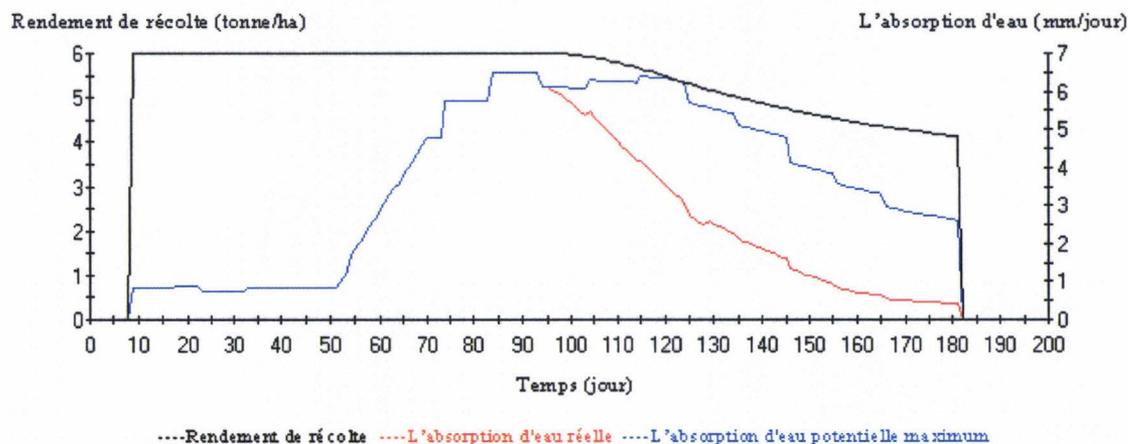


Figure 24-d. Rendement de récolte suite au calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, saison 1999.

Les profils d'humidité du sol (traitement par sillon), la salinité (traitement par bassin) et relatifs de salinité (traitement par goutte à goutte) pendant seulement trois jours choisis les 17 avril, 11 juillet et 20 octobre, 1999 sont détaillés respectivement dans les Figures 25-26-27.

La distribution verticale et horizontale de l'humidité du sol pour le 20 octobre à la moisson (traitement par aspersion) est exposée à la Fig. 28. Ces figures montrent l'évolution de l'humidité du sol et le changement de la taille du bulbe humide au cours d'une période de six mois.

La distribution verticale et horizontale de la salinité du sol pour le 20 octobre à la moisson (traitement par aspersion) est exposée à la Fig. 29. On peut noter qu'il y a une légère augmentation de la valeur initiale de salinité du sol de 3 dS m^{-1} le 9 avril et à 9 dS m^{-1} le 20 octobre.

Cette valeur de 9 dS m^{-1} est principalement associée aux couches supérieures.

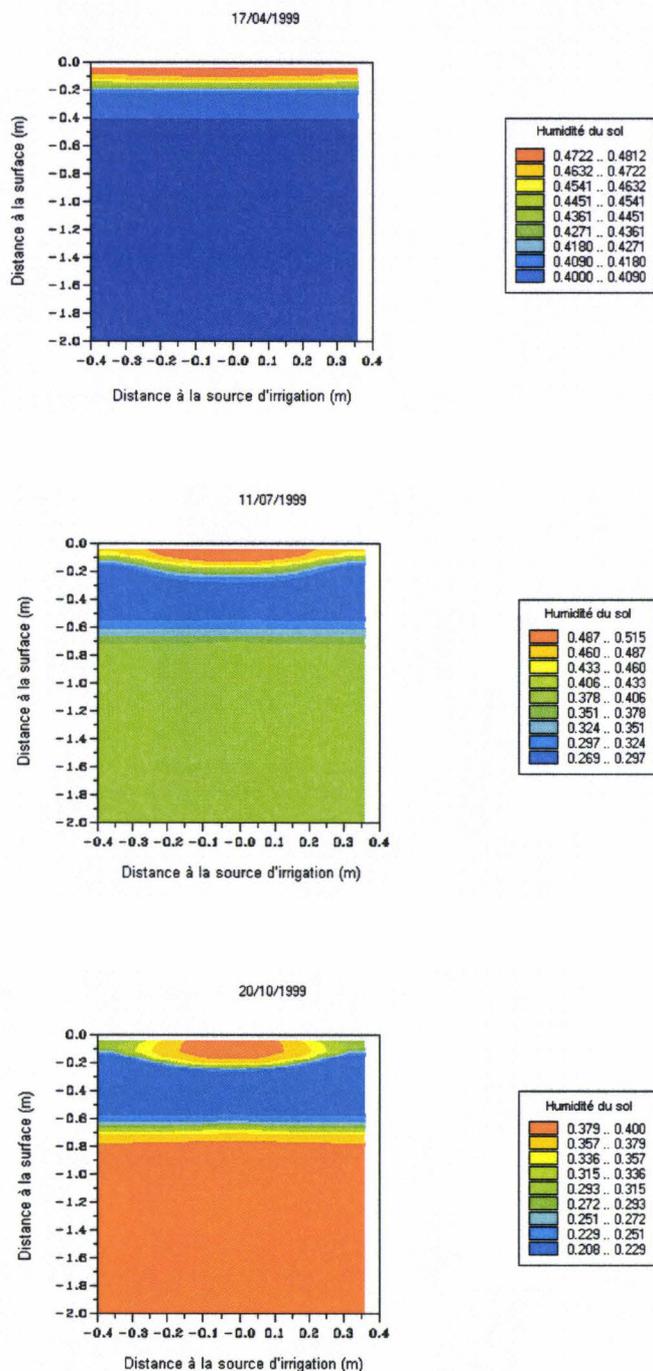


Figure 25. Évolution de profil d'humidité du sol en fonction du temps après le calibrage du traitement en sillon et de 100% d'eau douce, saison 1999.

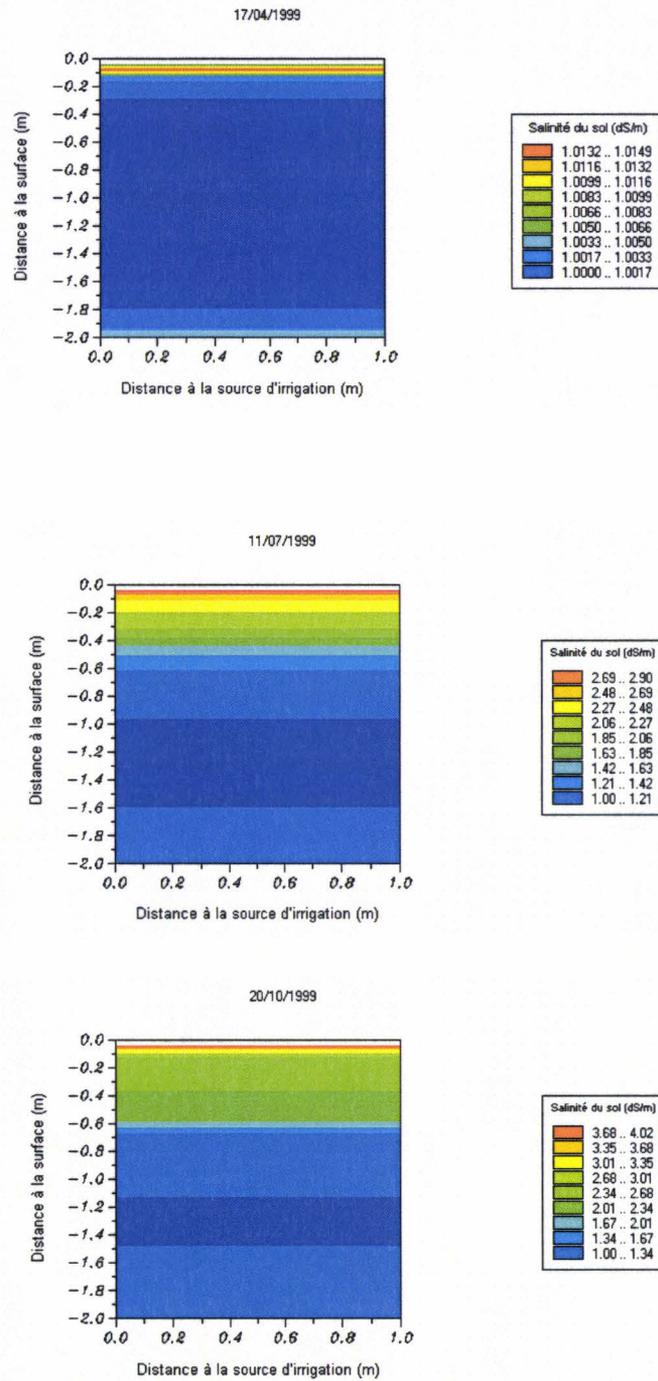


Figure 26. Évolution du profil de la salinité du sol en fonction du temps après le calibrage du traitement en bassin avec 100% d'eau douce, saison 1999.

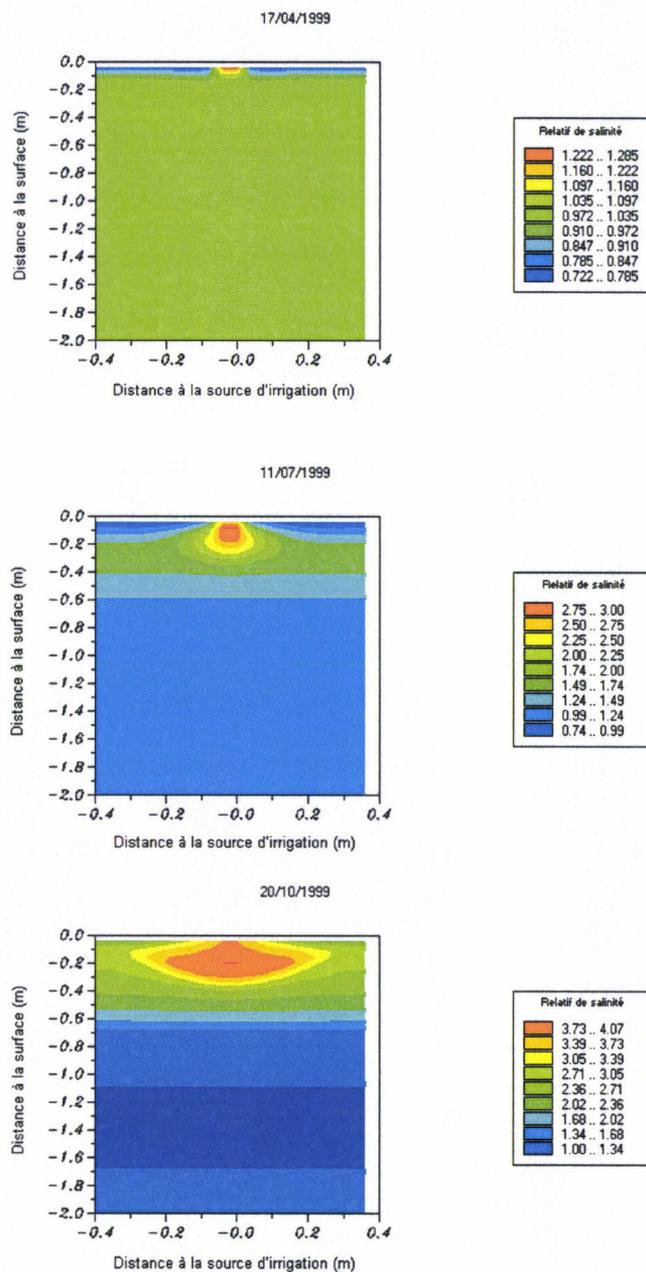


Figure 27. Évolution de profil relatif de salinité du sol en fonction du temps après le calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, saison 1999.

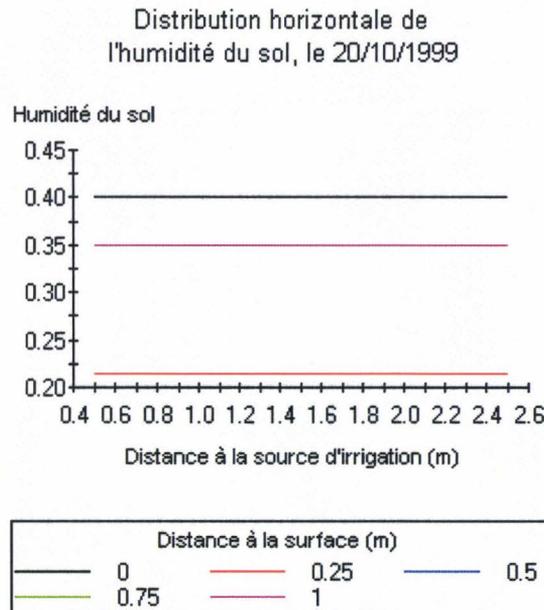
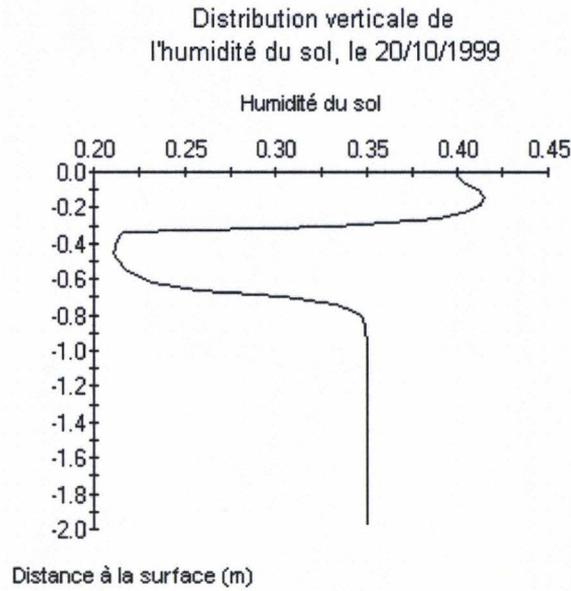
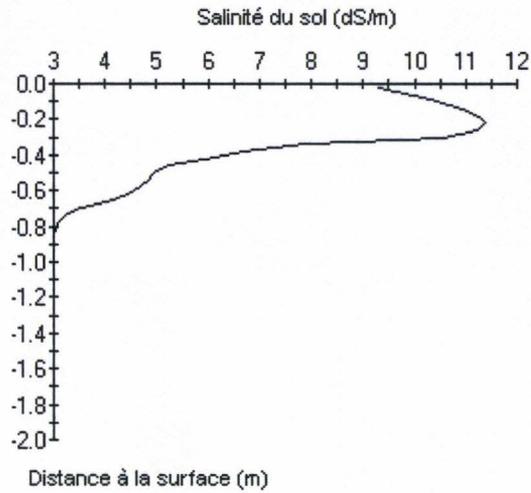


Figure 28. Distribution verticale et horizontale de l'humidité du sol après le calibrage du traitement par aspersion avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999.

Distribution verticale de salinité du sol, le 20/10/1999



Distribution horizontale de salinité du sol, le 20/10/1999

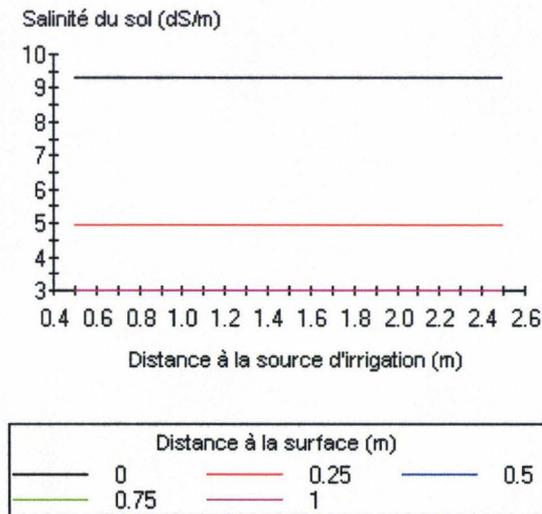


Figure 29. Distribution verticale et horizontale de salinité après le calibrage du traitement par aspersion avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999.

Pour le calibrage, le modèle exige des valeurs quotidiennes des paramètres végétaux tels que les coefficients de récolte, K_c et K_{cb} , profondeur de racine. Ces paramètres ne sont

pas disponibles quotidiennement. Le modèle, cependant, produit des valeurs quotidiennes par interpolation entre les valeurs données pour chaque étape. Un exemple des coefficients de récolte calibrés interpolés de K_c , de K_{cb} et de la profondeur et de racine est expliqué, en figure 30 ainsi que l'évolution des paramètres de culture utilisés dans le calibrage.

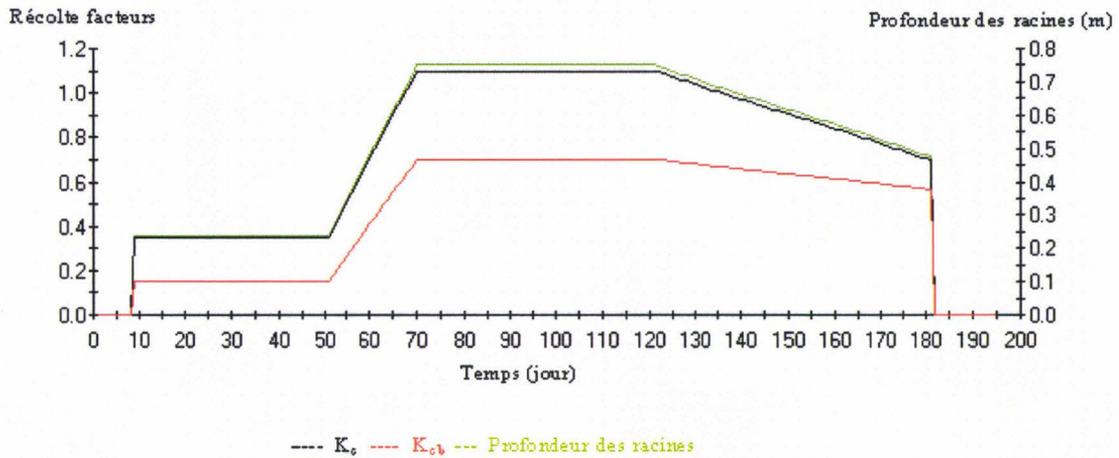


Figure 30. Évolution des paramètres de la récolte K_c , K_{cb} et la profondeur des racines, en fonction du temps après le calibrage du traitement par aspersion avec 100% d'eau douce, saison 1999.

La quantité quotidienne d'irrigation ainsi que l'ensemble de la quantité saisonnière, pour l'irrigation du sillon et celle par goutte à goutte, sont montrées respectivement sur les figures 31-a et 31-b.

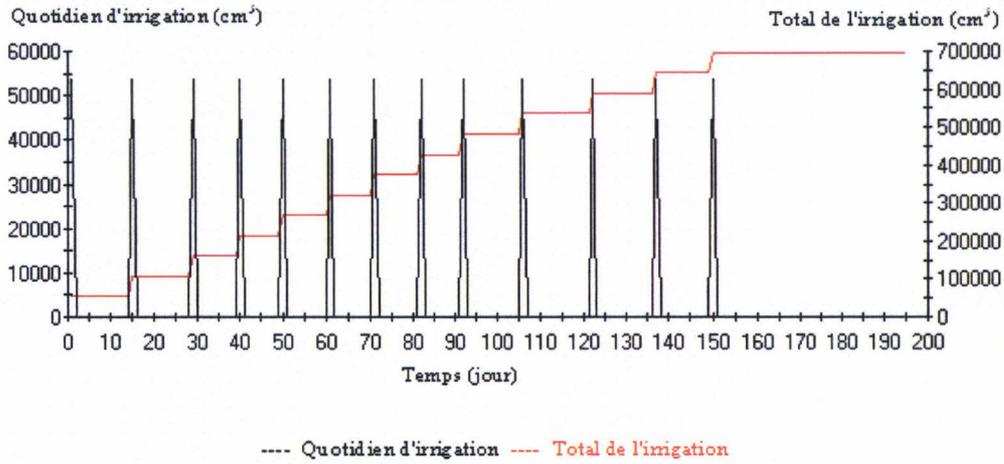


Figure 31-a. Quantité d'eau, partielle et cumulée, utilisée pour l'irrigation, en fonction du temps après le calibrage du traitement sur sillon avec 100% d'eau douce, saison 1999.

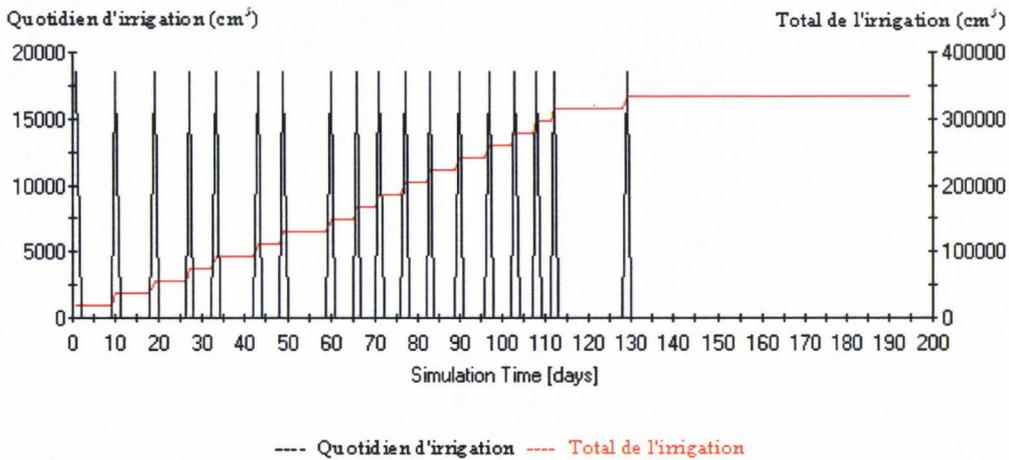


Figure 31-b. Quantité d'eau, partielle et cumulée, utilisée pour l'irrigation, en fonction du temps après le calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, saison 1999.

On peut voir, dans la Figure 32 l'évapo-transpiration de récolte E_t et ses composantes : transpiration de culture et évaporation du sol, au début de la saison de croissance

l'évaporation du sol est plus intense que la transpiration de la culture mais elle devient négligeable quand la culture atteint sa couverture maximum (80 jours après la plantation). A ce moment le point K_{cb} atteint sa valeur maximum et la transpiration de la culture prédomine jusqu'à ce que débute l'étape de la fin de croissance. Puis vient un déclin dans la transpiration de la culture (à 125 jours) et de l'élévation de l'évaporation du sol jusqu'au jour de la moisson (180 jours après plantation). Lorsque la transpiration approche de la valeur nulle l'évaporation du sol devient alors la composante principale de E_{tc} .

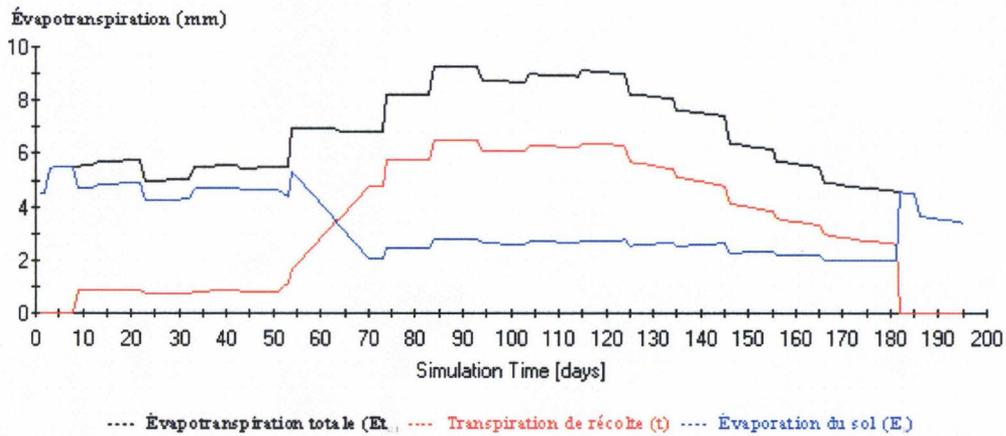


Figure 32. Évapotranspiration totale, transpiration de récolte et évaporation du sol, en fonction du temps après le calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, saison 1999.

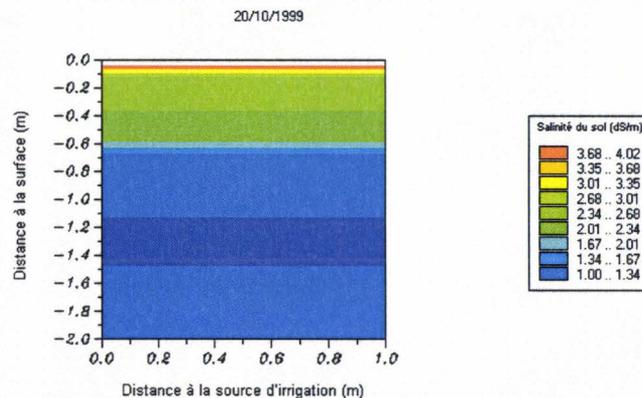


Figure 33. Évolution de profil de la salinité du sol après le calibrage du traitement en bassin avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999

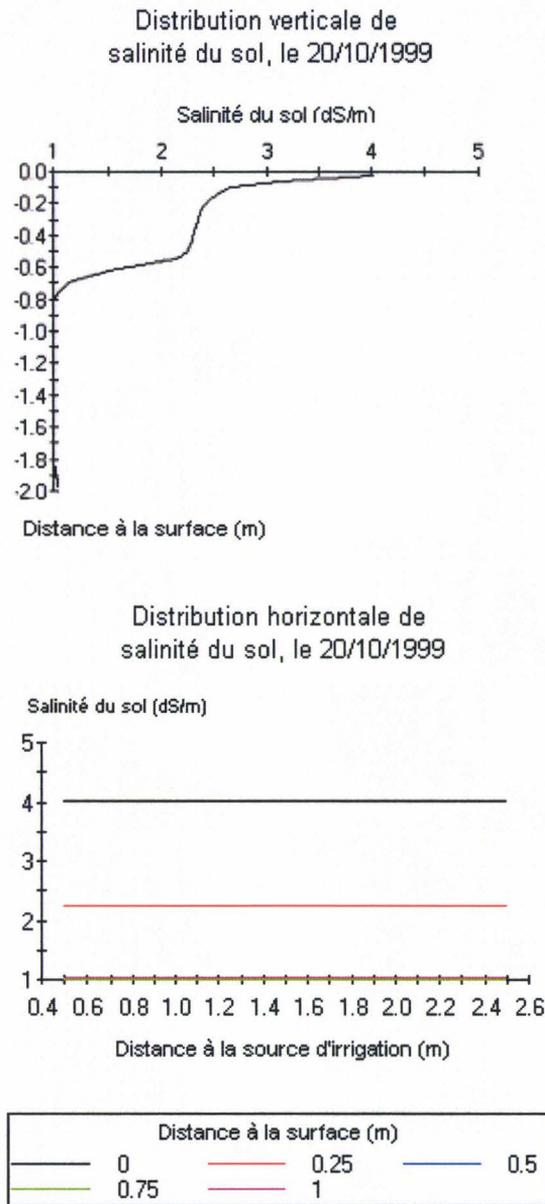


Figure 34. Distribution verticale et horizontale de salinité après le calibrage du traitement en bassin avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999

L'eau d'irrigation a été appliquée avec un taux proche de $11.225 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$. On peut voir sur les figures 33 et 34 une légère accumulation des sels particulièrement dans les couches supérieures. Les conditions de lessivage décrites dans la figure 35 indiquent que la valeur est proche de 1. Ceci signifie que la salinité de l'eau d'irrigation est presque égale au niveau moyen de salinité de la zone racinaire ou de l'eau drainée. Par

conséquent appliquer une irrigation d'eau douce avant la récolte suivante permet le lessivage des sels accumulés dans la zone des racines, ce qui est souhaitable particulièrement si la culture suivante a une valeur- seuil plus basse que celle du coton (cv de variété - coton D22).

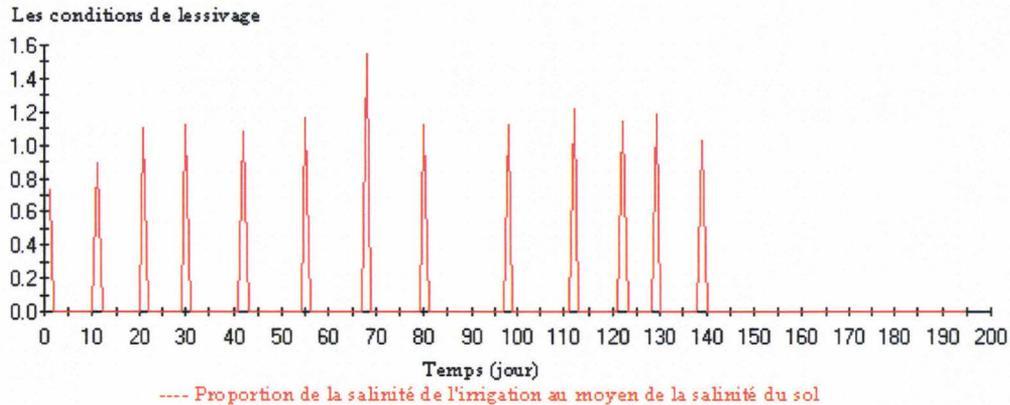


Figure 35. Conditions de lessivage avec le temps après le calibrage du traitement en bassin avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999

L'utilisation d'un goutte à goutte pour irriguer à un taux de $0.61644 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-1} \text{ min}^{-1}$ avec les mêmes données d'entrée du sol, de culture et de climat montrent sur les Figures 36 et 37 la distribution de salinité sous le point source. La figure montre l'accumulation des sels dans les couches à fleur de terre (zone de racine). Pendant que la salinité de l'eau de sol atteint une salinité plus grande que celle de l'eau d'irrigation particulièrement dans les couches à fleur de terre, les conditions de lixiviation diminuent en dessous de 1 et approchent 0.6 (Fig. 38) vers la fin de la saison de croissance. Dans un tel cas un grand lessivage (par inondation) sera exigé avant la prochaine récolte et probablement pendant la saison de croissance. Le lessivage des conditions pourrait être appliqué pendant la saison si le niveau de salinité du sol dépassait la valeur- critique seuil de la récolte telle que le coton dont la valeur- seuil est de 17 dS m^{-1} .

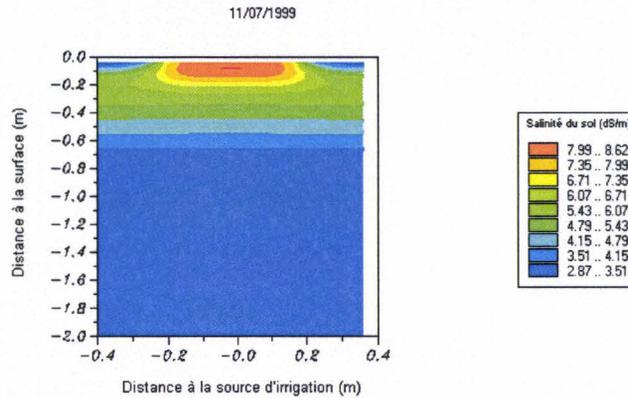
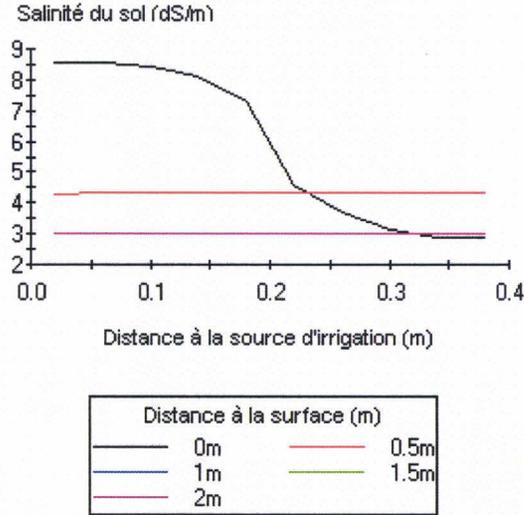


Figure 36. Évolution de profil de la salinité du sol après le calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999

Les validations de SALTMED concernant d'autres méthodes d'irrigation ont été effectuées avec un calibrage réussi. Les mêmes ensembles de paramètres de culture tels que K_c , K_{cb} , F_c , $\pi 50$, la taille maximum et la profondeur maximum d'enracinement (voir le tableau 18) ont été employés à chaque saison. Les paramètres calibrés du sol de chaque emplacement étaient fixes pour toutes les autres méthodes et toutes les années. Les résultats sont lisibles dans la partie suivante du travail.

Distribution horizontale de
salinité du sol, le 20/10/1999



Distribution verticale de
salinité du sol, le 20/10/1999

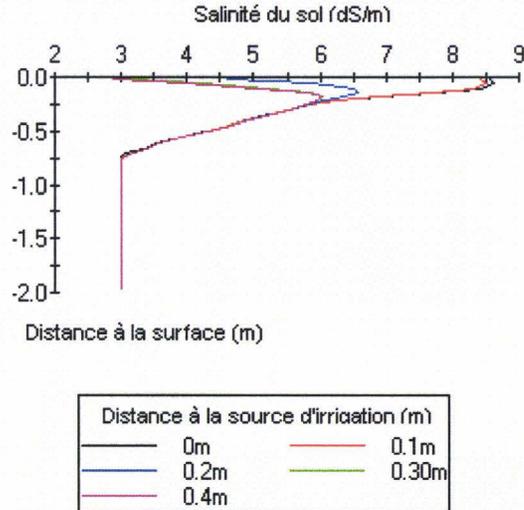


Figure 37. Distribution verticale et horizontale de salinité après le calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999

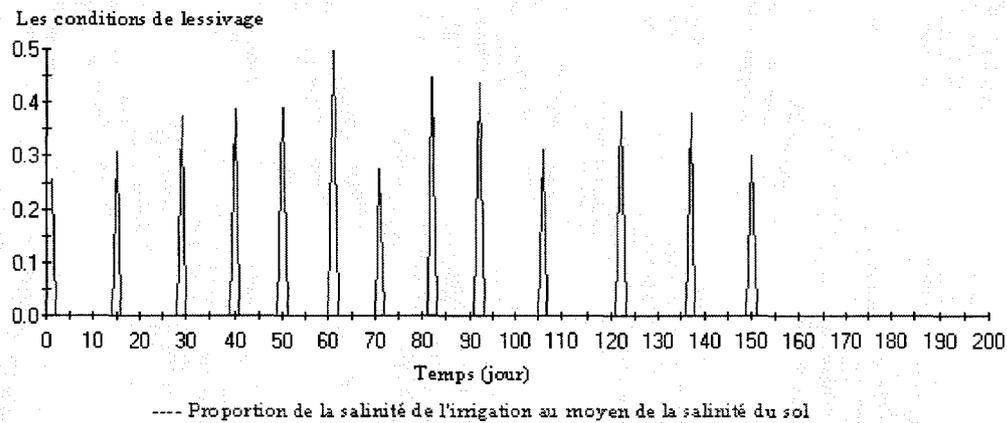


Figure 38. Conditions de lessivage avec le temps après le calibrage du traitement par goutte à goutte avec 100% d'eau douce, le 20/10/1999

4.2. Validation du modèle SALTMED

Après le calibrage réussi du traitement par 100% d'eau douce pour les quatre méthodes d'irrigation (sillon, bassin, aspersion et goutte à goutte) pour 1999, le modèle a été réalisé avec les mêmes paramètres de calibrage pour les quatre traitements d'irrigation en 2003 et 2004 sur le site du centre de recherches d'Almria. Le modèle a été évalué sur le rendement et la distribution de salinité du sol.

4.2.1. Résultats des modèles de validation en utilisant l'eau du Fleuve Euphrate

5.2.1.1. Rendements en 2003 et 2004

Des rendements simulés et observés pour 2003 et 2004 pour les quatre méthodes d'irrigation ont été comparés et illustrés dans le tableau 19 et la Figure 39. Généralement, il y a bonne concordance entre le rendement simulé et observé pendant les 2 années ; avec une différence de -0.03 à 0.04 tonne pour 2003 et -0.03 à 0.11 tonne pour 2004. Les rendements simulés et observés pour l'irrigation par le goutte à goutte étaient les plus hauts, suivis de l'irrigation par aspersion, puis sur sillon et finalement en bassin.

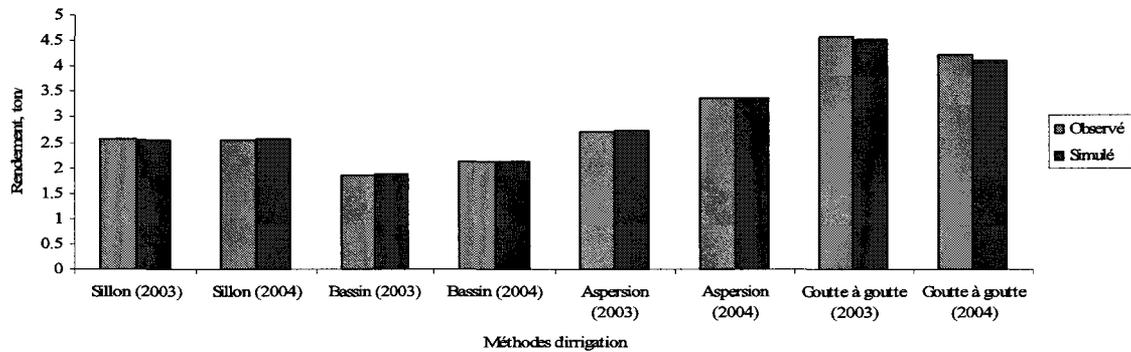


Figure 39. Rendement simulé et observé selon les différentes méthodes d'irrigation pour 100% d'eau douce pendant les saisons 2003 et 2004.

Tableau 18. Différence de pourcentage entre le rendement observé et simulé sous irrigation pour quatre méthodes, période 2003-2004.

Année		Sillon	Bassin	Aspersions	Goutte à goutte
2003	Rendement observé, Y_o (ton)	2.58	1.85	2.72	4.58
	Rendement simulé, Y_s (ton)	2.54	1.88	2.74	4.54
	$Y_o - Y_s$ (ton)	0.04	-0.03	-0.02	0.04
	$[(Y_o - Y_s)/ Y_o] * 100$ (%)	1.6	-1.6	-0.7	0.8
2004	Rendement observé, Y_o (ton)	2.54	2.13	3.37	4.24
	Rendement simulé, Y_s (ton)	2.57	2.12	3.36	4.13
	$Y_o - Y_s$ (ton)	-0.03	0.01	0.01	0.11
	$[(Y_o - Y_s)/ Y_o] * 100$ (%)	-1.2	0.5	0.3	2.6

Le tableau 19 prouve que la différence de pourcentage entre le rendement simulé et observé calculé comme une différence entre l'observé et le simulé divisé par le rendement observé est comprise entre -1.6 et 1.6% pour 2003 et -1.2 et 2.6% pour 2004.

La Figure 40 expose la corrélation statistique entre le rendement simulé et observé selon quatre méthodes d'irrigation pour 2003 et 2004. Les valeurs sont raisonnablement près de la ligne 1:1 indiquant une bonne concordance entre le rendement prévu et observé.

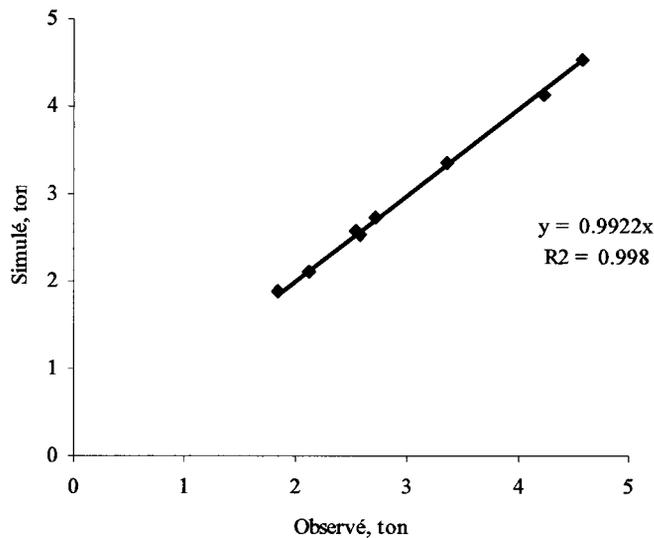


Figure 40. Comparaison entre tout le rendement simulé et observé selon quatre méthodes d'irrigation en 2003-2004.

4.2.1.2. Salinité du sol en 2004

Dans l'expérience sur le terrain de 2004, des mesures moyennes de salinité du sol ont été prises entre la source d'irrigation et les plantes aux profondeurs de 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm. Le modèle SALTMED a simulé :

- la salinité du sol selon les quatre méthodes d'irrigation de 2004 ;
- les profils de salinité à la source d'irrigation et à l'irrigation des sillons;
- les profils de salinité à la source d'irrigation et à 0.4 m de la source d'irrigation pour l'irrigation par goutte à goutte.

Des exemples des profils simulés et observés de salinité de sol sont illustrés dans les fig. 41-a, 41-b, 41-c et 41-d. Les profils de salinité montrent l'accumulation de sel dans le profil du sol là où :

- (1) il n'y a aucune précipitation pendant l'été,
- (2) la moyenne de la température (33°C), et l'évaporation (9 mm jour^{-1}) sont très hautes
- (3) l'humidité relative est très basse pendant la saison de croissance. Les résultats illustrent la bonne concordance trouvée entre les valeurs observées et simulées lors des quatre méthodes d'irrigation en 2004.

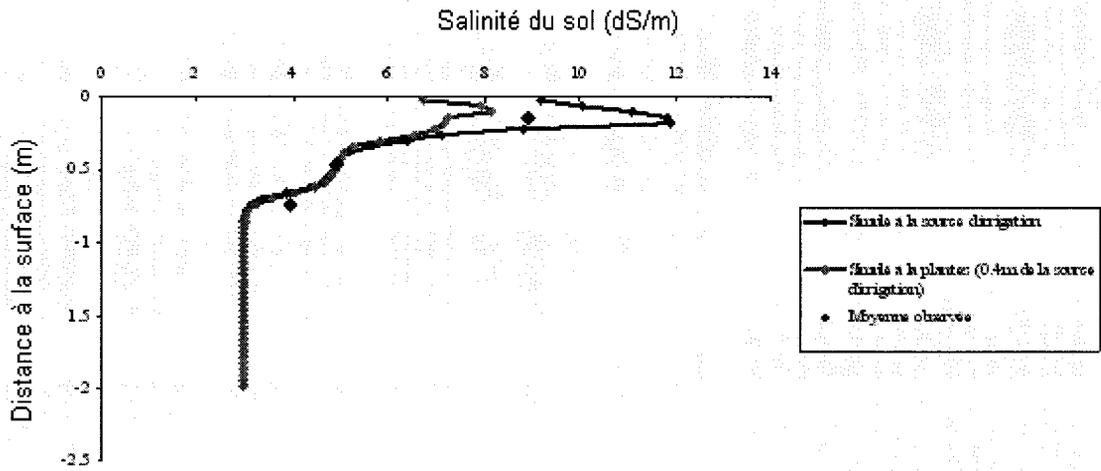


Figure 41-a. Profils de salinité sous une irrigation du sillon de 100% d'eau douce le 20/10/2004.

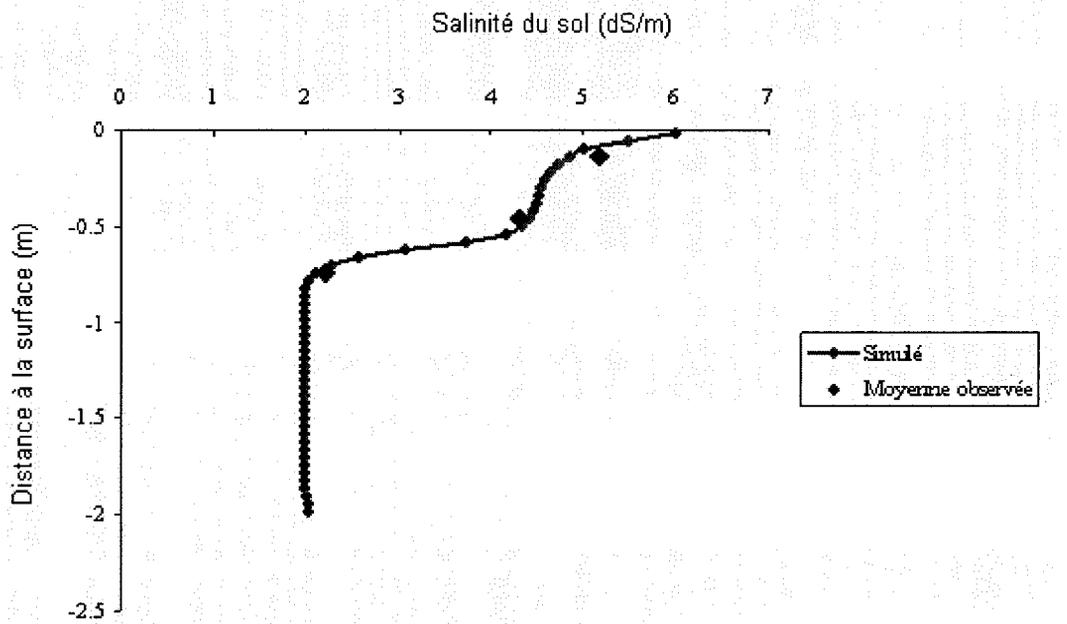


Figure 41-b. Profils de salinité sous une irrigation en bassin avec 100% d'eau douce le 20/10/2004.

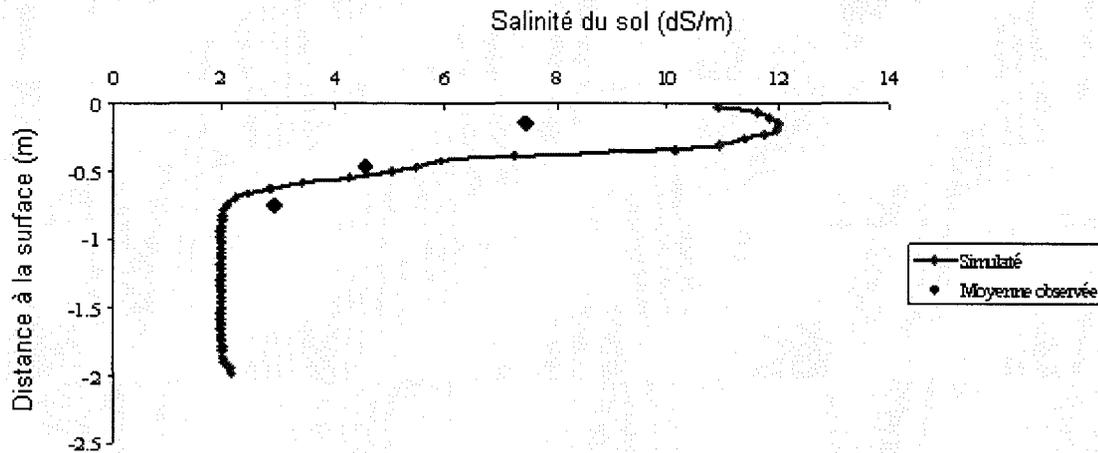


Figure 41-c. Profils de salinité sous une irrigation par aspersion avec 100% d'eau douce le 20/10/2004.

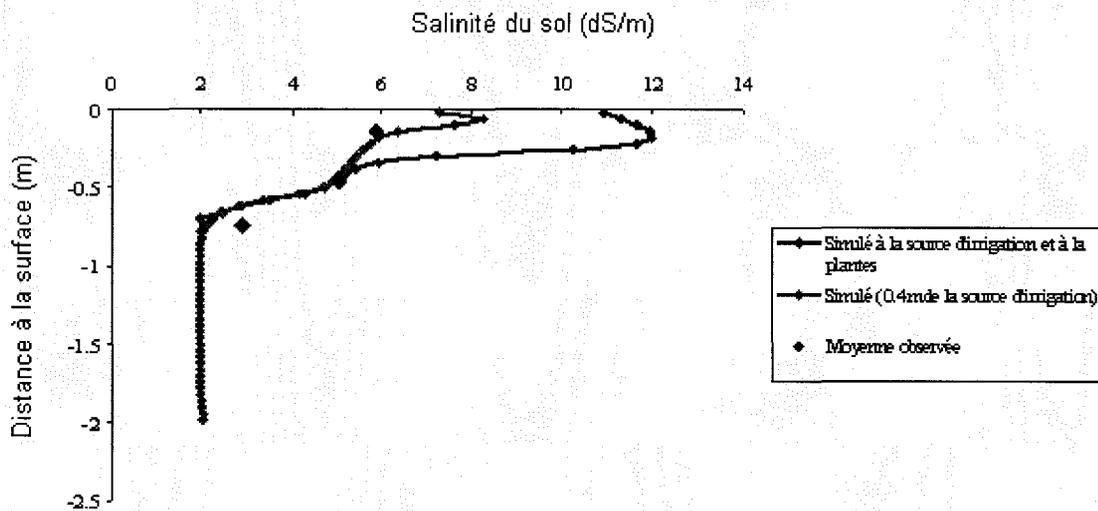


Figure 41-d. Profils de salinité sous une irrigation par goutte à goutte avec 100% d'eau douce le 20/10/2004.

La salinité initiale du sol avant le début de la saison d'irrigation était comprise entre 2 et 3 dS m^{-1} , après la saison d'irrigation la salinité du sol était plus haute que la salinité initiale pour chacune des quatre méthodes d'irrigation. Cette augmentation est due à l'application continue de l'eau d'irrigation ($\text{EC} = 1.14 \text{ dS m}^{-1}$) et du taux élevé d'évapotranspiration. Le lessivage pourrait être appliqué à la fin de la saison si le niveau de salinité du sol

dépassait la valeur- critique seuil de la culture. Le rendement du coton (cv de variété-coton D22) a été réduit de 50% une fois exposé aux niveaux de la salinité du sol de 17 dS m^{-1} .

Les résultats de calibrage sont bons, en utilisant le même sol et les mêmes propriétés de sol, la même récolte et les mêmes paramètres de récolte, corroborant de bons résultats de simulation si les autres conditions demeuraient les mêmes (c.-à-d., aucune maladie, aucunes conditions atmosphériques extrêmes comme les vagues chaudes, etc.).

Sur un autre plan, le succès du modèle de SALTMED, manipulant différents systèmes, est dû au fait que le modèle n'emploie pas une équation générale pour tous les systèmes d'irrigation. Il traite chaque système d'irrigation différemment et les décrit plus spécifiquement. L'irrigation du sillon est déterminée par des équations bidimensionnelles pour l'eau et le transport de corps dissous, l'irrigation en bassin et par aspiration par des équations unidimensionnelles pour l'eau et le transport de corps dissous et l'irrigation par un point- goutte par des équations tridimensionnelles pour le transport de l'eau et de corps dissous. De cette façon, le modèle peut produire des résultats précis pour différents systèmes d'irrigation. D'ailleurs, le modèle est établi physiquement et les modèles d'un tel type sont bien adaptés pour donner les meilleures prévisions.

Les principes et l'approche intégrée de gestion du modèle SALTMED ont été accentués. Le modèle a été calibré pour le coton (cv de variété – coton D22) en employant quatre méthodes d'irrigation : de sillon, de bassin, d'aspersion et de goutte à goutte en 1999, au centre de recherches d'Almria dans la région de Deir Al Zoor en Syrie orientale sur le fleuve de l'Euphrate. Les paramètres initiaux des modèles ont été accordés finement pour obtenir un rendement simulé proche du rendement observé. Après le calibrage réussi, le même ensemble de paramètres de culture tels que K_c , K_{cb} , F_c , π_{50} , aussi bien que les paramètres calibrés de sol, ont été employés pour le modèle appliqué pendant les saisons 2003 et 2004.

Le modèle SALTMED pouvait simuler avec succès le rendement, l'absorption d'eau, l'humidité du sol et les profils de salinité.

La différence de pourcentage entre le rendement simulé et observé a été calculé comme la différence entre observé et simulé divisé par observé étendu entre -1.6 et 1.6% pour 2003 et entre -1.2 et 2.6% pour 2004. Les résultats obtenus à partir des données observées et simulées ont indiqué que le coton (cv de variété - coton D22) est tolérant au sel et approprié pour se développer dans la région méditerranéenne dans les conditions climatiques semi-arides.

Distribution verticale de l'humidité du sol, le 05.10.2004

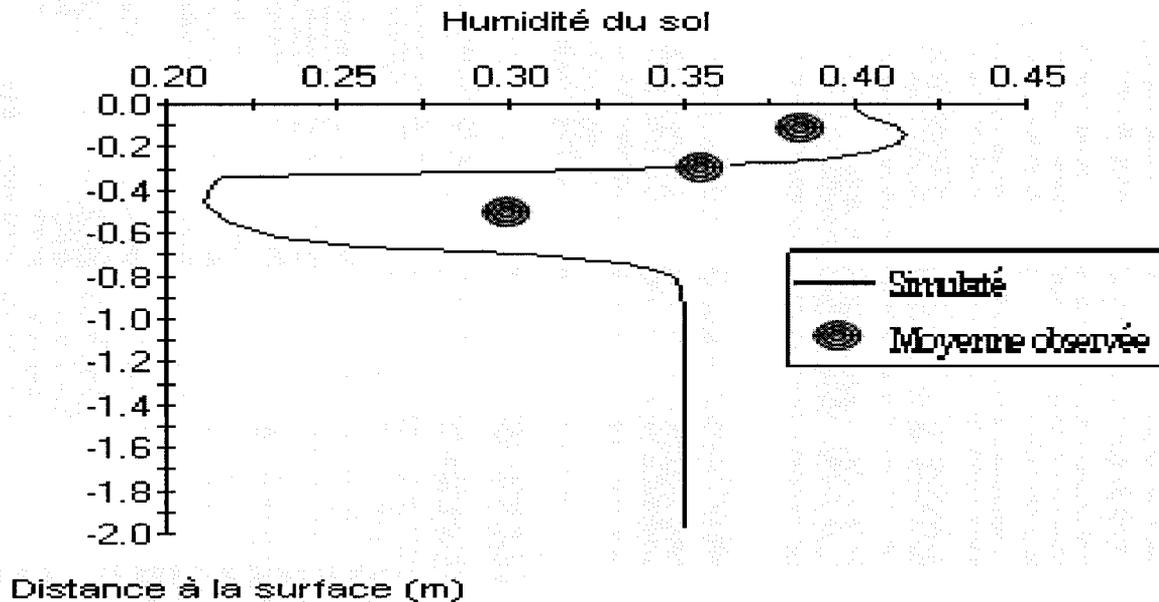


Figure 42. Profils de l'humidité sous une irrigation par aspersion avec 100% d'eau douce le 05/10/2004

4.2.2. Résultats des modèles de validation en utilisant l'eau saline

La réduction du rendement de récolte due à l'utilisation de l'eau saline est rapportée largement dans la littérature, par exemple Beltrao et Ben Asher (1997), Rhodes et al. (1992), Hoffman et al. (1990), Ragab (2002), Ragab (2004a), Ragab (2004b), Ragab (2004c), Ragab (2004d), Ragab (2005a), Ragab (2005b), Flowers et al. (2005), Malash et al. (2005), Ragab et al. (2005a et 2005b). Cependant, le niveau de réduction dépend infiniment de différents facteurs tels que le niveau de tolérance de la culture, la salinité du sol, les conditions initiales, les conditions climatiques, la stratégie de gestion de l'eau, et la salinité de l'eau.

Le modèle SALTMED a été examiné avec les mêmes paramètres de calibrage pour des traitements d'irrigation à l'eau douce en 2003 et 2004. Le modèle sera encore examiné lors de sa réalisation quand on utilisera l'eau saline dans l'irrigation par le goutte à goutte en 1999.

L'absorption maximum d'eau (sans aucune contrainte) et l'absorption réelle d'eau aussi bien que le rendement de récolte prévu par l'irrigation de goutte à goutte sont lisibles dans la Figure 42. L'écart entre le besoin d'eau maximum et réel reflète l'effet de la contrainte de salinité sur l'absorption, dont par conséquent le rendement était de 2962 kg ha⁻¹ au cours de la saison 1999.

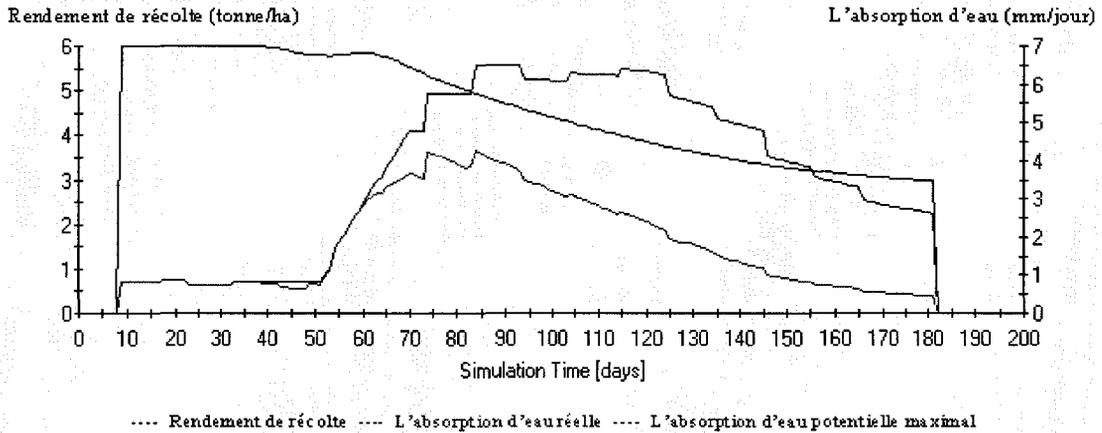


Figure 43. Rendement de récolte obtenu avec 100% d'eau de drainage par le traitement le goutte à goutte, saison 1999.

La Fig. 44 expose le rendement simulé et observé par l'irrigation de goutte à goutte en 1999. Comme prévu, en diminuant le rapport de l'eau douce par rapport à l'eau saline on obtient une diminution du rendement. La figure 45 montre une relation de 1:1 entre le rendement simulé et observé pour tous les traitements par l'irrigation de goutte à goutte. Le rapport de 1:1 indique que les rendements prévus sous des systèmes d'irrigation de goutte à goutte et tous les traitements étaient raisonnablement proches des observés. La figure montre une bonne concordance entre le rendement simulé et observé. En outre, les points dans la figure 45 sont plus près de la ligne de 1:1 .

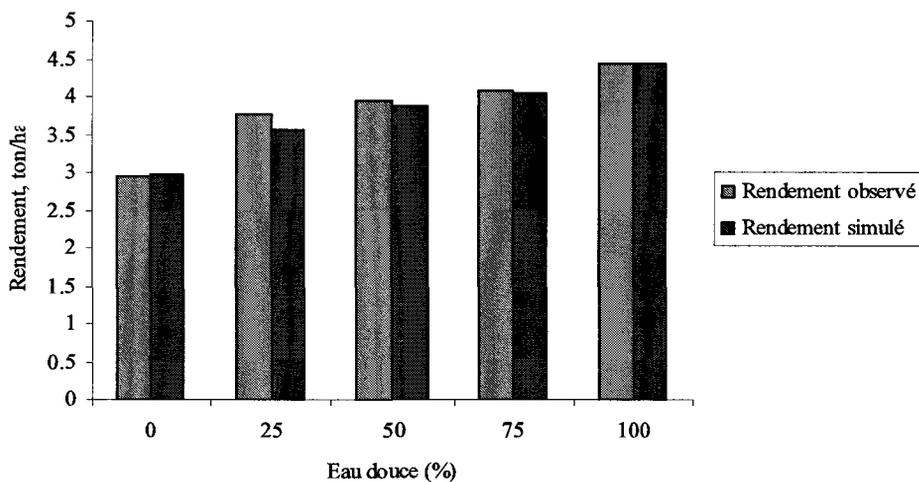


Figure 44. Rendement simulé et observé selon différents traitements d'irrigation de goutte à goutte, saison 1999.

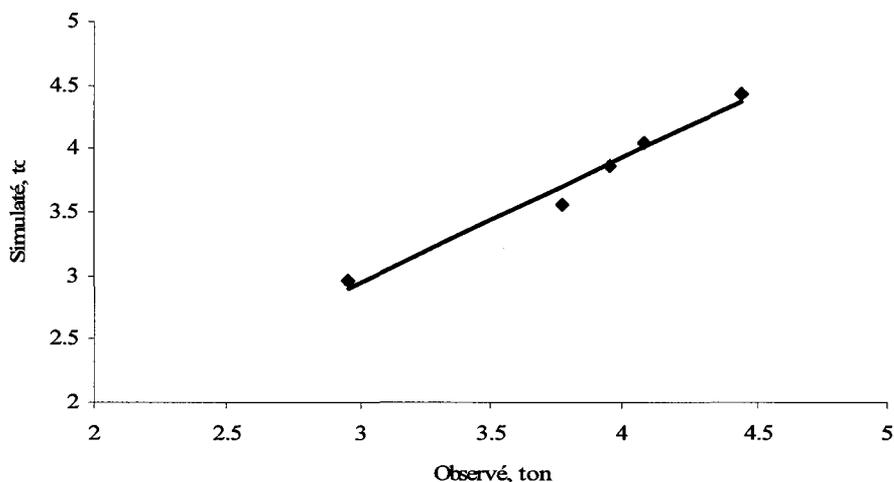


Figure 45. Comparaison entre tous les rendements simulé et observé par l'irrigation de goutte à goutte, saison 1999.

Le tableau 19 prouve que la différence de pourcentage entre le rendement simulé et observé, calculé comme différence entre l'observé et le simulé divisé par le rendement observé, est compris entre -0.2 et 5.2% pour le goutte à goutte en 1999. Cependant, une différence positive jusqu'à 5.7% a été relevée lors du traitement d'irrigation d'eau douce à 25%, indiquant une sous-estimation du rendement par le modèle. Ceci pourrait être attribué à la charge nutritive de l'eau de drainage (tableau 12). Cette charge nutritive relativement élevée est principalement due à l'application excessive d'irrigation et d'engrais dans les domaines environnants desquels l'eau de drainage a été produite. Le tableau 12 montre l'analyse de l'eau douce et de l'eau de drainage. Le NO_3 soluble dans l'eau douce en 1999 était de 1.9 mg L^{-1} , comparé aux 23.34 mg L^{-1} , dans l'eau de drainage. Le niveau élevé d'azote dans l'eau à salinité modérée pourrait avoir contribué à l'augmentation inattendue et peu commune du rendement observé. C'est semblable aux résultats obtenus par Ragab et al., (2005b) et Malash et al., (2005). Bien que les données disponibles ne couvrent pas la gamme entière des éléments nutritifs, on s'attend à ce que la concentration élevée d'azote augmente la croissance et la biomasse de la végétation aux niveaux modérés de salinité (au-dessous des niveaux critiques).

Sous des traitements d'irrigation de goutte à goutte, les différences de pourcentage entre le rendement observé et simulé étaient -0.2%, 5.7%, 2.2%, 0.7% et 0.2% liés à l'eau douce respectivement de 0, de 25, de 50, de 75 et de 100%. L'exactitude des mesures faites est de l'ordre de $\pm 0.05 \text{ kg}$, donc les résultats sont appréciables et cohérents. La différence de pourcentage atteint 5.7%, pour l'irrigation à 25 % eau douce, car le niveau élevé d'azote dans l'eau à salinité modérée peut avoir contribué à l'augmentation inattendue et peu commune du rendement observé.

Tableau 19. Différence de pourcentage entre le rendement observé et simulé selon une irrigation de goutte à goutte, 1999.

Paramètre	Irrigation par goutte à goutte, 1999				
	0	25	50	75	100
Eau douce (%)	0	25	50	75	100
Humidité initiale du sol ($m^3 m^{-3}$)	0.45	0.48	0.48	0.46	0.46
Salinité initiale du sol ($dS m^{-1}$)	2	1	1	2	2
Ecw ($dS m^{-1}$)	7.51	5.91	4.31	2.71	1.11
Rendement observé, Y_o (ton)	2.956	3.768	3.955	4.084	4.443
Rendement simulé, Y_s (ton)	2.962	3.555	3.869	4.056	4.436
$Y_o - Y_s$ (ton)	-0.006	0.213	0.086	0.028	0.007
$(Y_o - [Y_s]) / Y_o * 100$ (%)	-0.2	5.7	2.2	0.7	0.2

La figure 46 expose un rapport fort entre le rendement et la salinité de l'eau d'irrigation. L'avantage d'employer le relatif, en d'autres termes le rendement « calibré », permet l'élimination de l'effet d'autres facteurs tels que la condition climatique et les systèmes d'irrigation. Pour l'irrigation de goutte à goutte, la relation du rendement calibré- salinité de l'eau (figure 47) est mieux rendue par une fonction polynôme, trouvée par Ragab et al., (2005b).

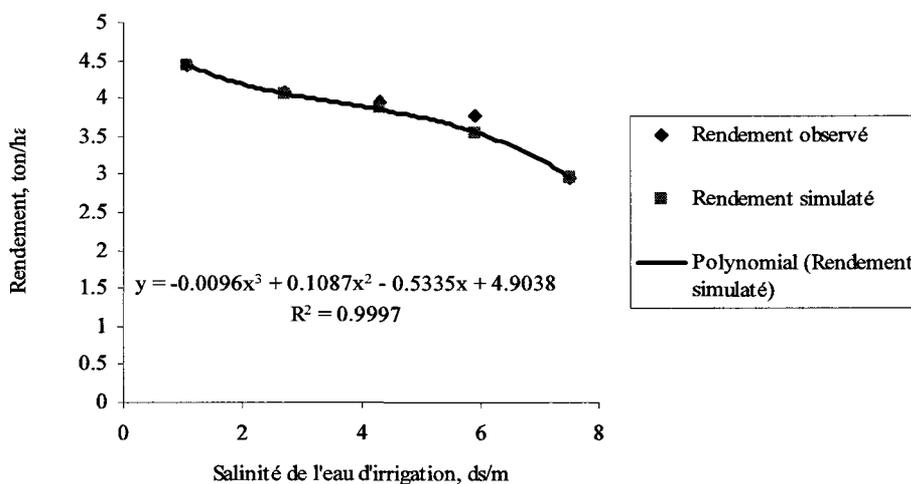


Figure 46. Le rendement absolu évalue la salinité de l'eau par l'irrigation de goutte à goutte, saison 1999.

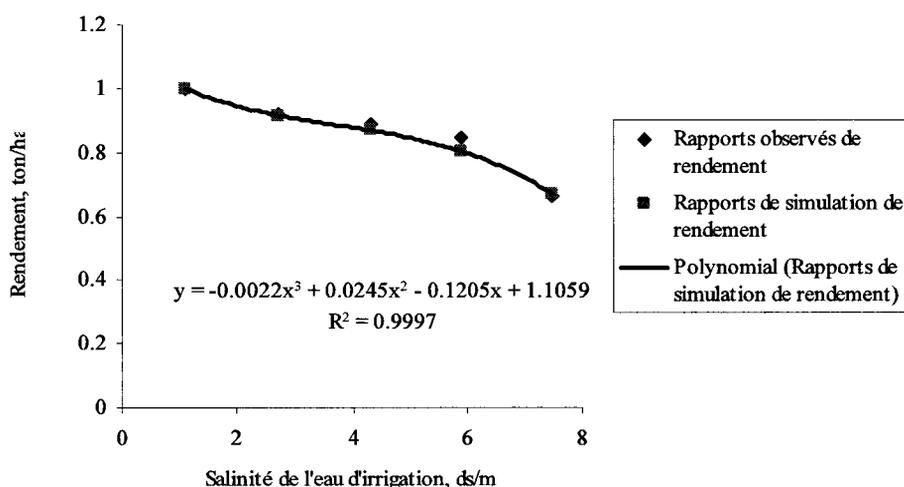


Figure 47. Le rendement mesuré évalué la salinité de l'eau par l'irrigation de goutte à goutte, saison 1999.

En outre, les résultats obtenus à partir des données observées et simulées, ont indiqué que le coton (cv de variété - le coton D22) est tolérant au sel et approprié pour être développé dans la région méditerranéenne. Les résultats ont indiqué que l'eau d'irrigation avec une EC de 6 dS m^{-1} a seulement réduit le rendement de 20%.

4.2.3. Résultats des modèles de validation en utilisant différentes quantités d'eau

Yukse et Taskin (1974) n'ont trouvé aucune différence dans les rendements des méthodes d'irrigation par aspersion et par sillons. McConnell et al. (1989) a examiné les méthodes d'irrigation par le sillon et l'aspersion pour l'irrigation du coton. Selon leurs résultats, la méthode d'irrigation par sillon a produit 338 kg ha^{-1} de rendement de fibre supérieur au rendement par l'irrigation avec aspersion. L'irrigation avec aspersion a également eu comme conséquence la maturité retardée des capsules.

Pour le calcul de l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE), des rendements de graine de coton par hectare ont été divisés par la quantité de l'eau appliquée. L'efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation a été déterminée comme le rapport du rendement pour un traitement particulier à l'eau appliquée pour ce traitement. Selon Howell et al. (1983), WUEs étaient de 0.17 kg m^{-3} , de 0.13 kg m^{-3} et de 0.37 kg m^{-3} respectivement pour le sillon, le bassin et l'aspersion. Cetin et Bilgel (2002) ont trouvé que les rendements maximum de coton étaient respectivement de 4380 , 3630 et 3380 kg ha^{-1} selon l'irrigation de goutte à goutte, par sillon et par aspersion. Les efficacités d'utilisation de l'eau de nos expériences (1994-1996) étaient respectivement dans la gamme 0.151 - 0.184 , 0.118 - 0.131 , 0.344 - 0.397 pour l'irrigation par sillon, par bassin et par aspersion.

Le modèle SALTMED a été examiné avec les mêmes paramètres de calibrage pour des traitements d'irrigation à l'eau douce en 2003 et 2004. Le modèle sera encore examiné lors de sa réalisation quand on utilisera l'eau saline dans l'irrigation de goutte à goutte en 1999 et de 1994 à 1996 pour des quantités différentes d'irrigation.

Les figures 48-a, 48-b et 48-c présentent le rendement simulé et observé selon différents traitements d'irrigation, pendant les années 1994-1995-1996. Les figures prouvent qu'il n'y a aucune différence significative entre les rendements pour les différents traitements d'irrigation, bien qu'elles aient reçu différentes quantités d'eau. Ceci indique qu'il y a eu une sur-irrigation inutile. La figure 49 indique une relation de 1:1 entre le rendement simulé et observé pour tous les traitements pendant les années 1994-1995-1996. Les points sur la figure 49 sont proches de la ligne de pente 1:1, indiquant une bonne concordance entre le rendement simulé et observé sous tous les traitements.

Le tableau 20-a, 20-b et 20-c prouve que la différence de pourcentage entre le rendement simulé et observé, calculé comme différence entre l'observé et le simulé divisé par le rendement observé, était respectivement de l'ordre de de -1.0 à 0.9%, -6.6 à 7.0% et -3.6 à 0.7% pour l'irrigation par sillon, par bassin et par aspersion. L'exactitude des mesures faites était de l'ordre de ± 0.05 kg.

Les résultats ne sont pas appréciables et cohérents par rapport aux simulations précédentes, parce que le module est très sensible à l'humidité initiale et à la salinité initiale du sol. Dans notre cas, l'explication est due à une des erreurs de mesure de l'humidité et de la salinité initiale du sol.

Tableau 20-a. Différence de pourcentage entre le rendement observé et simulé dans l'irrigation du sillon, 1994-1995-1996.

Irrigation du sillon				
Temps d'irrigation (minutes)	181	192	202	223
Quantité d'irrigation (m³)	12833	13833	14558	15802
Rendement observé en moyenne, Y_o (kg/ha)	2390	2430	2392	2390
Rendement simulé en moyenne, Y_s (kg/ha)	2415	2408	2391	2383
Y_o - Y_s (kg)	-25	22	1	7
[(Y_o - Y_s) / Y_o] * 100, %	-0.10	0.9	0.0	0.3
L'efficacité observée d'utilisation de l'eau (kg m⁻³)	0.184	0.176	0.164	0.151
Efficacité simulée d'utilisation de l'eau (kg m⁻³)	0.188	0.174	0.164	0.151

Tableau 20-b. Différence de pourcentage entre le rendement observé et simulé dans l'irrigation en bassin, 1994-1995-1996.

irrigation en bassin				
Temps d'irrigation (minutes)	120	127	136	148
Quantité d'irrigation (m³)	13107	13957	14989	16300
Rendement observé en moyenne, Y_o (kg/ha)	1717	1691	1950	1930
Rendement simulé en moyenne, Y_s (kg/ha)	1795	1803	1813	1825
Y_o - Y_s (kg)	-78	-112	137	105
[(Y_o - Y_s) / Y_o] * 100, %	-4.5	-6.6	7.0	5.4
L'efficacité observée d'utilisation de l'eau (kg m⁻³)	0.131	0.121	0.130	0.118
Efficacité simulée d'utilisation de l'eau (kg m⁻³)	0.137	0.129	0.121	0.112

Tableau 20-c. Différence de pourcentage entre le rendement observé et simulé dans l'irrigation avec aspersion, 1994-1995-1996.

irrigation par aspersion				
Temps d'irrigation (minutes)	316	325	341	372
Quantité d'irrigation (m³)	8574	8814	9245	10086
Rendement observé en moyenne, Y_o (kg/ha)	3400	3293	3420	3472
Rendement simulé en moyenne, Y_s (kg/ha)	3376	3413	3418	3453
Y_o - Y_s (kg)	24	-120	2	19
[(Y_o - Y_s) / Y_o] * 100, %	0.7	-3.6	0.0	0.5
L'efficacité observée d'utilisation de l'eau (kg m⁻³)	0.397	0.374	0.370	0.344
Efficacité simulée d'utilisation de l'eau (kg m⁻³)	0.394	0.387	0.370	0.342

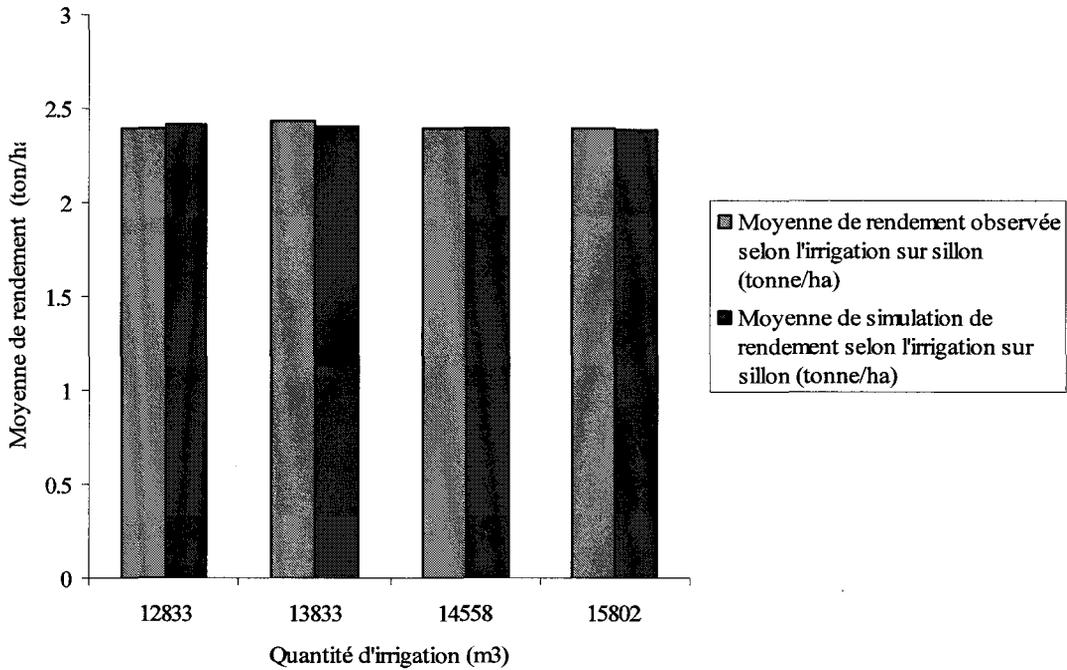


Figure 48-a. Rendement simulé et observé selon différents traitements d'irrigation du sillon, saisons 1994-1995-1996.

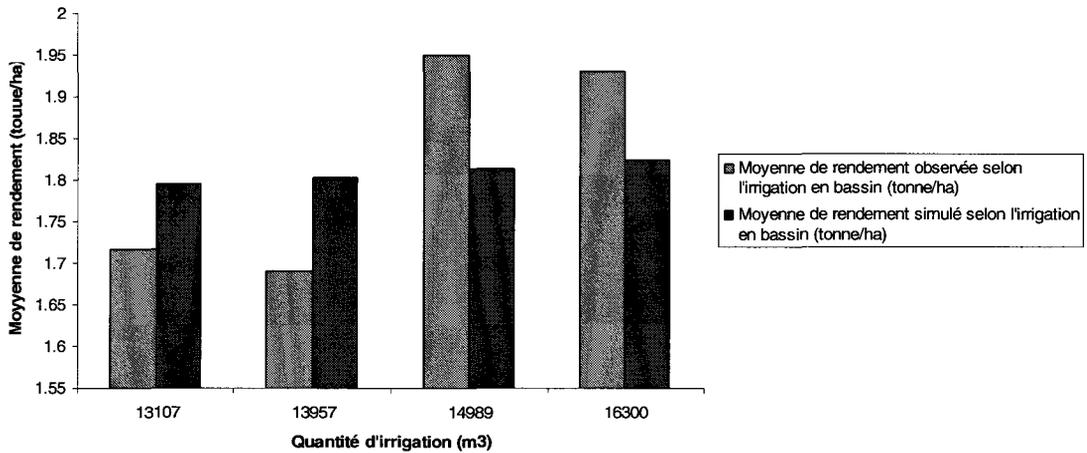


Figure 48-b. Rendement simulé et observé selon différents traitements d'irrigation en bassin, saisons 1994-1995-1996.

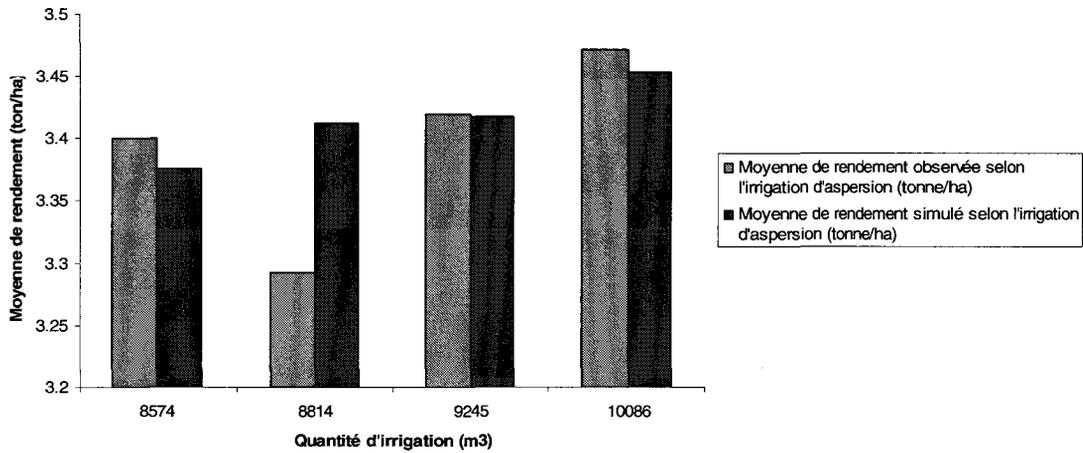


Figure 48-c. Rendement simulé et observé selon différents traitements d'irrigation avec aspersion, saisons 1994-1995-1996.

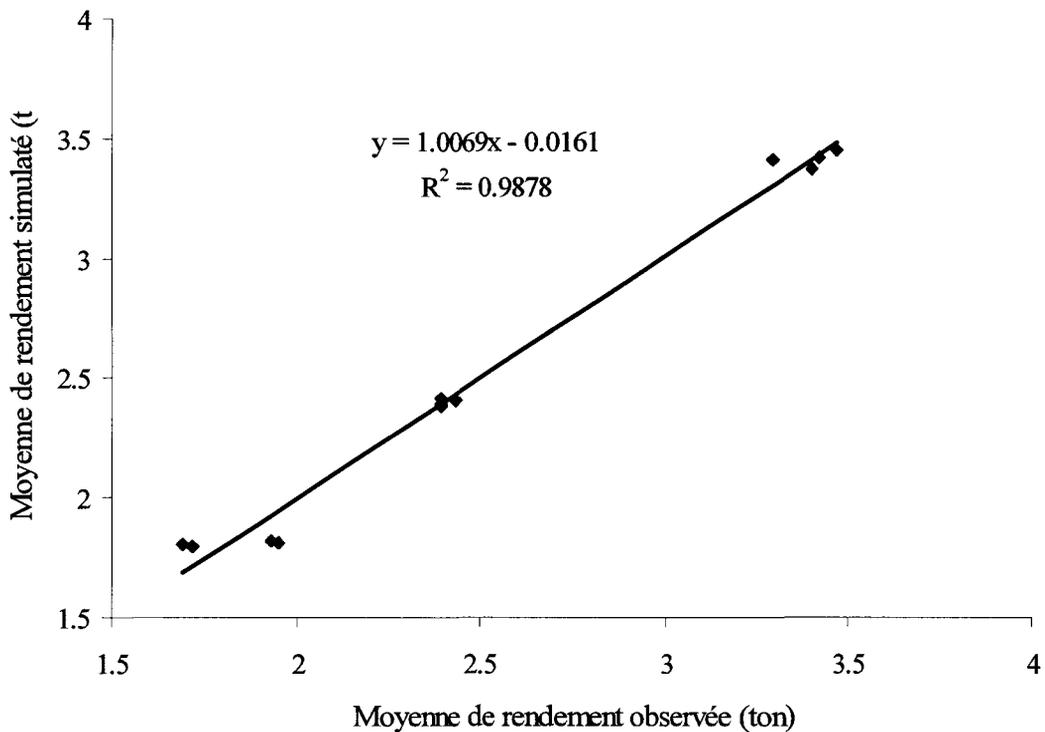


Figure 49. Comparaison entre tous les rendements simulé et observé selon irrigation du sillon, en bassin et avec aspersion, 1994-1995-1996.

Les figures 50-a, 50-b and 50-c prouvent que les efficacités d'irrigation ont diminué avec l'augmentation des quantités de l'eau d'irrigation.

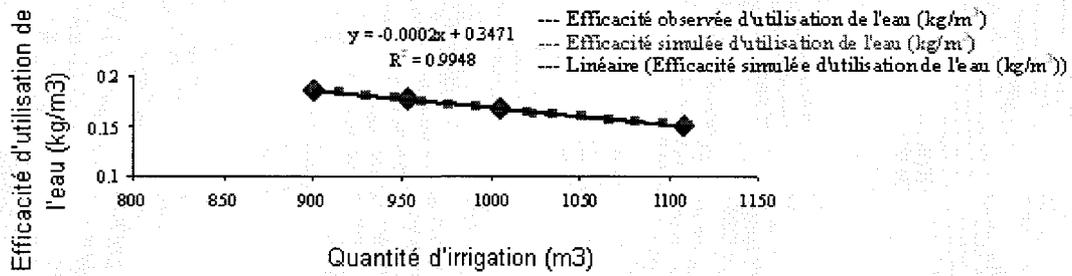


Figure 50-a. Efficacité simulée et observée d'utilisation de l'eau selon des traitements d'irrigation des sillons, saisons 1994-1995-1996.

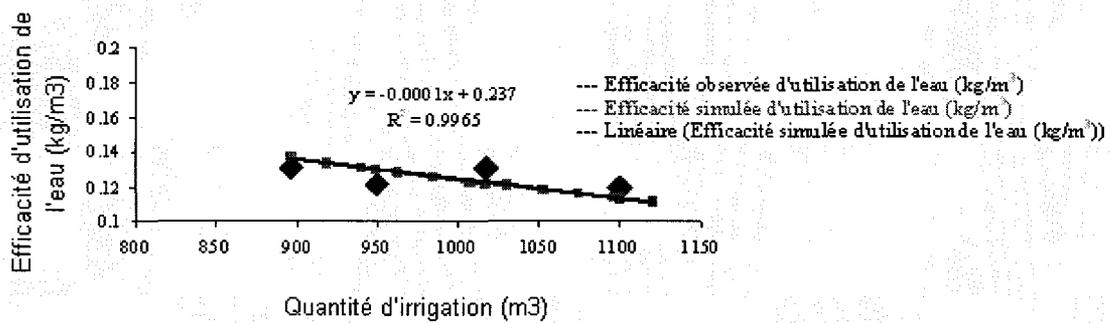


Figure 50-b. Efficacité simulée et observée d'utilisation de l'eau selon des traitements d'irrigation du bassin, saisons 1994-1995-1996.

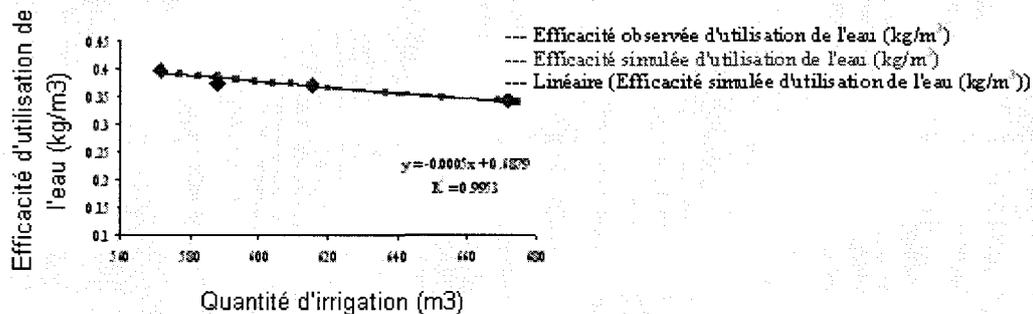


Figure 50-c. Efficacité simulée et observée d'utilisation de l'eau selon des traitements d'irrigation avec aspersion, saisons 1994-1995-1996.

Les résultats obtenus à partir des données observées et simulées ont indiqué que le coton D22 est tolérant au sel et approprié pour se développer dans la région méditerranéenne. L'eau d'irrigation, au niveau de salinité de 6 dS m^{-1} , a seulement réduit le rendement de 20%.

Les résultats montrent que le rapport entre le rendement et la salinité de l'eau d'irrigation est non linéaire et mieux décrit par une fonction polynôme. La relation entre le rendement et l'absorption d'eau, obtenue en divisant les valeurs mesurées par les valeurs équivalentes obtenues avec l'eau douce à 100%, élimine l'effet des facteurs externes et produit des résultats plus conformes et plus fiables.

Une relation entre la salinité du sol et la salinité de l'eau peut être établie. Les résultats obtenus ont pu être employés au niveau de la gestion pour estimer le rendement relatif selon un système d'irrigation donné avec de l'eau d'un niveau donné de salinité. Pour obtenir le rendement absolu, on peut simplement multiplier le rendement relatif par le maximum de rendement sous 100% d'eau douce.

Il n'y avait aucune différence significative dans les rendements lorsque différentes quantités de l'eau ont été appliquées. Ceci signifie qu'avait lieu une sur-irrigation menant à une diminution d'efficacité d'irrigation augmentant la quantité de l'eau d'irrigation appliquée.

Conclusion générale et perspective

Dans la plupart des zones arides et semi-arides des pays de la région, la lenteur des progrès dans le développement de l'agriculture ainsi que le déclin de la production alimentaire n'est pas seulement limitée par la pénurie d'eau, mais aussi, de façon rapide par la salinisation des sols, ce qui porte près de 30% des sols productifs hors de la production. De nos jours, faire face à la pénurie d'eau et à la salinité sont des problèmes prioritaires pour les techniciens et les décideurs pour le bien-être et le développement durable dans la région.

Le coton est l'une des fibres les plus importantes des plantes produites. Le coton fournit non seulement la matière première pour l'industrie textile mais aussi pour les industries d'huile, pour la cuisine et le fourrage.

L'objectif de cette recherche est de tenter d'améliorer la productivité agricole et la durabilité, l'irrigation sur la culture du coton, dans le bassin de l'Euphrate en Syrie, intrinsèquement ou potentiellement approvisionnée en eau salée.

A partir de ce travail de recherche nous avons essayé de mettre en évidence l'influence du changement des pratiques agricoles ainsi que d'une gestion optimale de l'utilisation de l'eau salée pour l'irrigation du coton dans le bassin de rivière de l'Euphrate en Syrie à la suite de plusieurs expériences ayant eu lieu au centre de recherches d'Almria dans le bassin de l'Euphrate où est planté le coton (cv de variété - coton D22) entre 1994 et 2004.

Parallèlement, nous avons appliqué le modèle SALTMED développé pour des applications générales en utilisant les données de plein champ à partir de l'expérience menée à la station.

Le modèle utilise des équations bien connues du mouvement de l'eau, du transport de corps dissous, d'évapo-transpiration et de l'absorption de l'eau par les cultures. Le code SALTMED a déjà été validé, Ragab et al. (2005a et 2005b) avaient avec succès examiné ce modèle, en utilisant des données au champ recueillies en Egypte et en Syrie pour la tomate. Uzun (2004) avait évalué les données de terrain avec le modèle SALTMED en Turquie pour le maïs.

Le coton a été cultivé dans les champs sous différentes stratégies de gestion de l'eau permettant de collecter des données et ainsi d'effectuer le calibrage du modèle en 1999 et la validation du modèle en 2003 et en 2004. L'utilisation d'eau douce permet d'examiner la réalisation du modèle et sa capacité à prévoir le rendement final selon 1999 pour différents niveaux de salinité de l'eau par des systèmes d'irrigation de goutte à goutte, grâce à l'application de 1994 à 1996 de quantités d'eau d'irrigation variables, et cela pour plusieurs types de sol et de conditions climatiques saisonnières.

L'accord entre les résultats simulés et mesurés du rendement de la culture et les valeurs de salinité suggère fortement de calibrer le modèle pour les cultures de plein champ dans les conditions climatiques méditerranéennes. Toutefois, il faut également s'assurer des entrées de données fiables.

Les principaux résultats de cette recherche permettent d'une part de confirmer d'anciens résultats, et d'autre part de tirer les conclusions suivantes:

(1) L'irrigation par l'eau de l'Euphrate:

1. Les résultats obtenus à partir des données observées et simulées ont indiqué que le coton (coton D22 - variété cv) est tolérant au sel et approprié pour se développer dans la région méditerranéenne.

2. L'irrigation par le goutte à goutte montre une efficacité d'utilisation de l'eau la plus élevée, le rendement le plus élevé et la plus basse consommation de l'eau.

3. L'irrigation par la méthode en bassins a le plus bas rendement.

4. Le modèle SALTMED est capable de simuler avec succès le rendement, l'absorption d'eau et les profils de salinité dans le sol.

5. Ont pu être estimés les paramètres de culture de coton (coton D22 - variété cv) en région méditerranéenne comme K_c , K_{cb} , F_c et π_{50} .

(2) Rendement et la Salinité de l'eau d'irrigation:

1. L'eau d'irrigation au niveau d'une salinité moyenne de 6 dS m^{-1} , n'a réduit le rendement de la récolte de coton que de 20%.

2. Les résultats ont indiqué que le rapport entre le rendement et la salinité de l'eau d'irrigation est non linéaire et mieux décrit par une fonction polynôme. La relation entre le rendement et l'absorption d'eau, obtenue en divisant les valeurs mesurées par les valeurs équivalentes obtenues avec l'eau douce à 100%, élimine l'effet des facteurs externes et produit des résultats plus conformes à la réalité et plus fiables.

3. Une relation entre la salinité du sol et la salinité de l'eau peut être établie. Les résultats obtenus ont pu être employés au niveau de la gestion agricole pour estimer le rendement relatif sous un système d'irrigation imposé avec de l'eau d'un niveau de salinité donné. Pour obtenir le rendement absolu, on peut simplement multiplier le rendement relatif par le maximum de rendement agricole obtenu avec 100% d'eau douce.

(3) Rendement et la quantité de l'eau : efficacité de l'irrigation:

Il n'y a aucune différence significative dans les rendements lorsque différentes quantités d'eau ont été appliquées. Ceci signifie qu'avait lieu une sur-irrigation menant à une diminution d'efficacité de l'irrigation.

Les principales perspectives futures de recherche qui apparaissent à l'issue de cette thèse concernent les points suivants :

(1) Perspectives générales

Pour améliorer les recherches futures avec le code SALTMED :

1. Intégrer le processus de l'ascension capillaire à partir de la nappe souterraine dans les calculs;
2. Possibilité de choisir un système de drainage souterrain ou des drainages ouverts;
3. Rotation de plusieurs cultures pendant la saison de croissance
4. Intégration de systèmes agro forestiers;
5. Prise en compte des interactions entre solutés différents (Kcl, Azote, phosphates...).

Pour améliorer les recherches futures au niveau des paramètres :

Simuler les paramètres de récolte (coton) avec d'autres outils pour comparer les résultats (dans la région de Deir ez-Zor ou dans une autre région semi aride).

Pour améliorer les recherches futures au niveau des données :

Des mesures d'humidité du sol et d'absorption d'eau pendant la saison de croissance permettraient d'améliorer les simulations des rendements de culture.

(1) Perspectives de développement des recherches

1. Analyser la sensibilité des paramètres de récolte (coton) et des paramètres du sol avec des scénarios de changement du climat en utilisant SALTMED
2. Comparer les effets des stratégies d'irrigation sur le rendement du coton avec d'autres modèles (Hydrus, Unsat, Leachm, Przm, Pearl,...)
3. Répéter l'étude et la simulation avec d'autres récoltes (blé, betteraves à sucre) avec SALTMED (dans la région de Deir ez-Zor ou dans une autre région semi aride)

(3) Perspectives pour le monde agricole

1. Aider les agriculteurs à développer l'irrigation du goutte à goutte;
2. Lessivage (par inondation) automatique avant la récolte suivante et probablement pendant la saison de croissance elle-même;
3. Utiliser l'eau de drainage (ou des eaux usées traitées) pour sauvegarder les eaux douces et éviter la sur exploitation des eaux souterraines.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abbasi F., J. Feyen and M.T. van Genuchten. 2004. Two-dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: model calibration and validation. *Journal of Hydrology* 290:63-79.

Abdel-Dayem, S. M., 1994. Reuse of drainage water in irrigation: Assessment and conditions, VIIIth IWRA world congress on water resources - special session : Irrigation network activities "Unconventional water resources practices and management", Cairo, Egypt.

Abdel-Daysm SD., H.P. Ritwema, H.E. El-Atfy, and M.H. Amer.1989. Pilot areas and drainage technology. In: Land drainage in Egypt. Chap.5. Drainage Research Institute, Cairo. pp. 103-161.

Abrol, I.P.1990. Strategies for saline water reuse for crop production in India. In: Water, Soil and Crop Management Relating to the Use of Saline Water, FAO Agriculture Miscellaneous Paper 16, pp. 165-177.

Addiscott, T.M. and A.P. Whitmore, (1991). Simulation of solute leaching in soils of differing permeabilities, *Soil Use Manage.* 7 (1991), pp. 94-102.

Administration of Natural Resources Research (ANRR) - The General Commission for Scientific Agricultural Research (GCSAR) - Ministry of Agriculture and Agrarian Reform in Syria – Rapport 2006.

Aggarwal, M.C. and S.S. Khanna. 1983. Efficient soil and water management in Haryana. Bull. Haryana Agricultural University, Hisar, p.118.

Ahi, S.M. and W.L. Power. 1938. Salt tolerance of plants at various temperatures. *Plant Physiol.*, 13:767-789.

Ahuja L.R., J.D. Hanson, K.W. Rojas and M.J. Shaffer. 1999. The Root Zone Water Quality Model. Water Resources Publications LLC. Highlands Ranch, CO.

Allen G.R., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. *Crop evapotranspiration, Irrigation and Drainage paper no. 56. FAO*, Rome, Italy, 300 pp

Amimelech, Y. and I. Eden. 1970. The effect of soil:water ratios on the agronomic significance of the electrical conductivity of saturated paste extracts. *Soil Sci. Plant Anal.*, 1 :221 -226.

ASCE. 1993. Agricultural Salinity Assessment and Management. Kenneth K. Tanji, Editor. p. 608.

- Ayoub, A.T., 1977. Some primary features of salt tolerance in senna (*Cassia acutifolia*). *J. Exp. Bot.*, 28: 484-492.
- Ayers R.S. and D.W. Westcot. 1976. Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage Paper 29, FAO, Rome, Italy. 97p.
- Ayers, R.S. and D.W. Westcot. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 (Rev. 1), Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. Rome, Italy.
- Baker JL, Johnson HP. (1977) Impact of subsurface drainage on water quality. In: Proc 3rd National Drainage Symp, Chicago, ASAE Publ. 7-1, 2950 Niles RD, St Joseph, MI.
- Ballantyne, AK. 1962. Tolerance of cereal crops to saline soils in Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 42 : 61-67.
- Beecher, H.G. 1991. Effect of saline water on rice yields and soil properties in Murrumbidge Valley. *Australian J. Exp. Agr.*: 81 9- 823.
- Beecher, H.G. 1994. Effects of saline irrigation water on soybean yield and soil salinity in the Murrumbidge Valley. *Australian J. Exp. Agr.* 3335-91.
- Beltrao Y, Ben Asher Y. (1997) The effect of salinity on corn yield using the CERESmaize model, *Irrigat. Drain. Syst.* 11 (1997), pp. 15–28.
- Bernstein, L, Fireman, M. And R.C. Reeve, 1955. Control of salinity in the Imperial Valley, California. ARS- 41-4, United states Department of Agriculture-ARS, Washington, D,C.
- Bernstein L. (1964) Salt tolerance of plants. USDA Agricultural Information Bulletin 283, pp. 23.
- Bernstein L. and L.E. François. (1973a). Comparison of drip, furrow and sprinkler irrigation. *Soil Sci.* 115:73-86.
- Bernstein L. and L.E. François. (1973b). Leaching requirement studies: sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*37: 931 - 943.
- Bernstein L, L.E. François and R.A. Clark 1974. Interactive effect of salinity and fertility on yield of grain and vegetables. *Agron. J.* 66: 412- 421.
- Bhumbla, D.R. 1976. Chemical composition of irrigation water and its effect on crop growth and soil properties. In: *And Land Irrigation in Developing Countries*. Ed. E.B. Worthington, Pergamon Press, pp:279-287.

- Boumans JH, Van Hoorn JW, Kruseman GP and Tanwar BS. (1988). Water table control, reuse and disposal of drainage water in Haryana. *Agric Water Management* 14: 537- 545.
- Bower, C.A., G. Ogata and J.M. Tucker.1969. Root zone soil profile and alfalfa growth as influenced by irrigation water quality. *Agron. J.* 61 :783-785.
- Bower, C. A., 1974. Salinity of drainage waters, in *Drainage for Agriculture*, Jan van Schilfgaarde (Editor), Agronomy Series No. 17, Amer. Soc. of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Brandt, A., Bresler, E., Diner, N., Ben-Asher, Y., Heller, J., Goldberg, D., 1971. Infiltration from a trickle sources: I. Mathematical models. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35, 675–682.
- Bressler, M. B. 1979. The use of saline water for irrigation in the U.S.S.R. Joint Commission on Scientific and Technical Cooperation. *Water Resources*.
- Bresler,E., (1975) Two-dimensional transport of solute during non-steady infiltration for a trickle source, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39 (1975), pp. 604–613.
- Bresler, E.,B. McNeal and D.L. Carter.(1982). *Saline and sodic soils, principles, dynamics modelling* . Springer, New-York.
- Bucks D.A., Allen S.G., Roth R.L. and Garder B.R. (1987). Cotton under micro and level basin irrigation methods. *American Society of Agricultural Engineers*.
- Cardon, E.G., Letey, J., 1992a. Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1876–1880.
- Cardon, E.G., Letey, J., 1992b. Soil-based irrigation and salinity management models: II, water and solute movement calculations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1887–1892.
- Cetin O. (1997). The effects of furrow, sprinkler and drip irrigation methods on the yield and water use efficiency of cotton grown under Harran plain conditions. *In: Proceedings of the 6th Scientific Congress of National Society of Agricultural Engineering*. Bursa, Turkey, 5–8 June 1997.
- Cetin O. and Bilgel L. (2002). Effects of different irrigation methods on shedding and yield of cotton. *Agricultural Water Management* , Volume 54, Issue 1 , 4 March Pages 1-15.
- Coelho F.E. and D. Or, (1996). A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60 (1996), pp. 1039–1049.

- Costantini E.A.C., F. Castelli, S. Raimondi and P. Lorenzoni. 2002. Assessing soil moisture regimes with traditional and new methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1889-1896.
- Dhir, R.P.1977. Saline waters, their potentiality as sources of irrigation. In: *Desertification and its control*. ICAR, New Delhi, pp. 130-148.
- Dhir RP. (1998). Origin and accumulation of salts in soils and ground waters. In: *Agricultural Salinity Management in India*. Tyagi and Minhas (ed.), CSSRI (India), pp. 41-60.
- Doorenbos, J., and A.H. Kassam, (1979). Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33*, Rome, Italy.
- Dorji M. 2001. Integration of SWAP model and SEBAL for evaluation of on-farm irrigation scheduling with minimum field data. M.Sc. Thesis, International institute for geo-information science and earth observation, Enschede, The Netherlands.
- Fang, S., Y. Tian and D. Xin 1978. Comprehensive control of drought, water logging salinisation, and saline groundwater. *Selected Works of Symposium on the Reclamation of Salt-Affected Soil in China*. The Shandong Publishing House of Scientific Technology.
- FAO, 1976. Water quality for agriculture, *Irrigation and Drainage paper 29*. FAO, Rome.
- Ayers R.S. and D.W. Westcot 1976. Water quality for agriculture. *Irrigation and Drainage Paper 29*, FAO, Rome, Italy. 97p.
- FAO, 1988. Salt-affected soils and their management. *Bulletin No. 39*, FAO, Rome.
- Feizi M. (1998). Long term effect of using saline water on soil salinity and sodicity. In: *Proc 10th Afro-Asian Confr Bali, Indonesia*, pp. 89-95.
- Fletcher Armstrong C. and T.V. Wilson, (1983). Computer model for moisture distribution in stratified soils under trickle source, *Trans. ASAE* 26 (1983), pp. 1704–1709.
- Flowers T. J., Ragab R., Malash N., Abdel Gawad G., Cuartero J. and Arslan A. (2005). Sustainable strategies for irrigation in - salt prone Mediterranean: SALTMED. *International Journal of Agricultural Water Management*, 78 (1-2) 3-14.
- François, L.E. CM. Grieve , E.V. Maas and S.M. Lesch. 1994. Time of salt stress affects growth and yield components of irrigated wheat. *Agron. J.* 876:100 - 1 07.
- François, LE., E.V. Maas, Y. J. Donovan, and V.L. Youngs. 1986. Effect of salinity on grain yield and quality, vegetative growth and germination of semi-dwarf and durum wheat. *Agron. J.* 78:1053-1058.

Fowler, D.B. and I.H.Hamm.1980. Crop response to saline soil in the Parkland area of Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 60: 439-449.

Ghassemi, F., A. J. Jakeman and H.A. Nix, 1995. *Salinisation of land and water resources: human causes, extent, management and case studies*. Canberra, Australia: The Australian National University, Wallingford, Oxon, UK: CAB International.

Goldberg D. And M. Shumueli. 1971. Sprinkler and trickle irrigation of green papper in an arid zone. *Hortic Sci*, 6 559-564.

Gupta, R.K. and I.P. Abrol, 1990. Salt-affected soils: Their reclamation and management for crop production. In *Advances in Soil Science*, vol.11: 223-288.

Hamdy, A. 1991. Water, soil and crop management relating to the use of saline water. In: *European Mediterranean Conference on the Use of Saline Water in Irrigation*. CEC, CIHEAM-IAM, Bari, Italy, pp. 17-31

Hamdy, A., 1993. Saline irrigation practices and management. In *Towards the rational use of high salinity tolerant plants*. Edited by A. Almassom, Kluwer Academic Publisher, The Netherlands, Vol.2:553- 570.

Hamdy, A. 1994. Saline Irrigation Management for Sustainable Use. In: *Eighth World Conference on Water Resources*, IWRA, Cairo, 21-25 Nov., 1994. pp 43-48.

Hamdy, A., 1995. Saline water use and management for sustainable agriculture in the Mediterranean region. *Proc. Of Workshop on farm sustainable use of saline water in irrigation: Mediterranean experiences*. 5-8 October, Hammamet, Tunisia

Hamdy, A., 1996. Use of unconventional water resources as a fresh water saving practice *Proc. of 16 Congress on Irrigation and Drainage*, ICID and CHIEAM-IAM-B. Cairo, Egypt.

Hamdy, A., 2002. Sustainable use and management of non-conventional water resources in the arid regions. *Proceedings of the International Symposium on Techniques to Control Salination for Horticultural Productivity*, 7-10 November, 2000, Antalya-Turkey. *Acta Horticulturae* 573, ISHS, pp 159-174.

Hamdy, A., and Lacirignola, C., 1999. *Mediterranean Water Resources: Major Challenges Towards the st 21 Century*. CIHEAM-IAM, Bari, Italy, pp 369-399.

Hammel K., U. Weller and K. Stahr. 2000. Soil water balance in Southern Benin - characteristics and conclusions. In: F. Graef, et al., (eds.) *Adapted Farming in West Africa: Issues, Potentials and Perspectives*. Verlag Ulrich e.Grauer, Stuttgart, Germany, pp. 321-330.

Hardan, A. 1977. Irrigation with saline water under desert conditions. Proc. Int' salinity Conf. on managing saline water for irrigation. Texas Tech. Univ., Lubbock, TX, pp. 165-169.

Hermesmeier D., J. Ilsemann, J. Bachmann, R.R. van der Ploeg and R. Horton. 2002. Model calculations of water dynamics in lysimeters filled with granular industrial wastes. Journal Plant Nutr.Soil.Sci. 165:339-346.

Hernandez T.X. 2001. Rainfall-runoff modeling in humid shallow water table environments. M.Sc. Thesis, University of South Florida, South Florida.

Hillel, D. (1977). Computer simulation of soil-water dynamics; a compendium of recent work, IDRC, Ottawa, Canada (1977) 214pp.

Hodgson A.S., Constable G.A., Duddy G.R. and Daniele I.G. (1992). A comparison of drip and furrow irrigated cotton on a cracking clay soil. II. Water use efficiency, waterlogging, root distribution and soil structure. *Soil and Fertilizers* , 55, 2.

Hoffman G.J., Rhodes J.D., Letey J., Sheng F. 1990. Salinity management. In: Hoffman, G.J., Howell, T.A., Solomon, K.H. (Eds.), *Management of Farm Irrigation Systems, ASAE Monograph. ASME*, Michigan, pp. 667-715.

Hoffman G.J., J.A. Jobs and W.J. Alver. 1983. Response of tall-fescue to irrigation water salinity, leaching fraction and irrigation frequency. Agric. Water Manage. 7:430-456.

Hoffman, G.J., S.L. Rawlins, J.O. Oster, J.A. Jobs and S.P. Merrill. 1979. Leaching requirements for salinity control. I. Wheat, sorghum, and lettuce. Agric. Water Manage. 2: 177-192.

Hoffman, G.J., P.B. Catlin, R.M. Mead, R.S. Johnson, L.E. Frnaçois, and D.Goldhamer. 1989. Yield and foliar injury responses of mature plum trees to salinity. Irrig. Sci. 10: 215-229.

Hoffman G.J. and S.L. Rawlinc. 1971. Growth and water potentials of root crops as influenced by salinity and relative humidity. Agron. J. 63:877-880.

Holm, H.M. 1978. Soil salinity crop tolerance testing. Sask. Soil Salinity Program Progress Report. No. 2. 17 pp.

Horst M.G., Shamutalov S.S., Gonçalves J.M. and Pereira L.S., (2007), Assessing impacts of surge-flow irrigation on water saving and productivity of cotton. *Agricultural Water Management*. Volume 87, Issue 2, Pages 115-127.

Horst M.G., S.S. Shamutalov, L.S. Pereira and J.M. Goncalves. 2004. Field assessment of the potential for water saving furrow irrigation in Fergana, Aral Sea Basin. *Agricultural water management* 77:210-231.

Howell T. A., Davis K. R., McCormick R. L., Yamada H., Walhood V. T. and Meek D. W. (1983). Water use efficiency of narrow row cotton. *Irrigation Science*. Volume 5, Number 3, 195-214.

Howell T.A., Meron M., Davis K.R., Phene C.J., Yamada H. (1989). Water management of trickle and furrow irrigated narrow row cotton in the San Joaquin Valley. *Soils and Fertilizers* ,52, 4.

Hummadi, K.B.,M.A. Al-Najim and FE. Zein.1980. In reactive effects of soil salinity and Nitrogen Fertilizer on yield of wheat. *Zanco series A.*,6(3):39-46.

Hutson J.L. and R.J. Wagenet. 1992. 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 3.0. Department of soil, crop and atmospheric sciences, Research Series No. 93-3. Cornell University, Ithaca, New York.

Kamra, S.K., S.R. Singh, K.V.G. Rao and M.Th. Van Genuchten, (1991). A semidiscrete model for water and solute movement in tile-drained soils. I. Governing equations and solution, *Water Resour. Res.* 27 (1991), pp. 2439–2447.

Kandiah A. (1990). Water quality management for sustainable agriculture development. *Natural Resources Forum.* 14 (1): 22-32.

Kandiah A. (1998). Strategies to minimize adverse environmental impacts of saline water use in agriculture. *In: Proc of the International workshop on the Use of Saline and Brackish Water for irrigation – at 10th Afro-Asian Confr.* Bali, Indonesia, pp. 305-315.

Kassem A. (2003). Economic Importance of Cotton Plantation, Production and Industrialization in Syria. *Journal of the University of Damascus for Agricultural Sciences*, volume 19 Number 2.

Katerji, N., J.W. van Hom, A. F. Kamm and M. Mastrorilli, 1994. Effect of salinity on emergence and on water stress and early seedling growth of sunflower and maize, *Agric. Water Manage*, 26: 81 -91.

Karam F., Lahoud R., Masaad R., Daccache A., Mounzer O. and Roupael, Y. 2006. Water use and lint yield response of drip irrigated cotton to the length of irrigation season. *Agricultural Water Management* . 85(3): 287-295.

Keating B.A., D. Gaydon, N.I. Huth, M.E. Probert, K. Verburg, C.J. Smith and W. Bond. (2002). Use of modelling to explore the water balance of dryland farming systems in the Murray-Darling Basin, Australia. *European Journal of Agronomy* 18:159-169.

Koepfen, W. 1936. Das geographische System der Klimate In Handbuch der Klimatologie. Band I, Teil C; Berlin, Germany. 44 p.

Lee EW. (1991). Treatment, reuse and disposal of drain waters. *Water Sci Technol.* 24:183- 188.

Li K.Y., R. De Jong and J.B. Boisvert. 2001. Comparison of root-water-uptake models. Selected papers from the 10th International soil conservation organization meeting, pp. 1112-1117.

Liu Y. 1999. Improving irrigation scheduling in north China: modeling and application. Ph.D. Thesis, Lisbon.

Logan. J.D. (1996). Solute transport in porous media with scale-dependent dispersion and periodic boundary conditions, *J. Hydrol.* 184 (1996), pp. 261–276.

Logsdon S.D., K.E. Keller and T.B. Moorman. 2002. Measured and predicted solute leaching from multiple undisturbed soil columns. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:686-695.

Ma L., L.R. Ahuja, J.C. Ascough, M.J. Shaffer, K.W. Rojas, R.W. Malone and M.R. Cameira. 2000. Integrating system modeling with field research in agriculture: applications of the Root Zone Water Quality Model (RZWQM). *Advances in Agronomy* 71:234-292.

Maas, E.V. and G.J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance: current assessment. *J. Irrig. Sci.* 10 :29-40.

Maas EV, Hoffman GJ. (1977). Crop salt tolerance — current assessment. *J. Irrig. Drain, Division ASCE.* 103: 115–134.

Maas E.V. 1984 Salt tolerance of plants. In: *The Handbook of Plant Science in Agriculture.* B.R. Christie (ed). CRC Press, Boca Raton, Florida.

Maas E.V. 1986. Salt tolerance of plants. *Appl. Agric. Res.* 1, 12–26. Magnusson, D.A., Ben Asher, J., 1990. Simulated water and solute distribution from a crossed triple line-source. *Irrigation Sci.* 11: 31–36.

Mass E.V. (1990). Crop salt tolerance. In: Tanji KK (ed) *Agricultural Salinity Assessment and Management.* *ASCE Manu Rep Eng Practices* 71.

Maas, E.V. and G.J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. Drain Div., Am. Soc. Civ. Eng.* 103:115-134.

Maas, E.V. and J.A Poss 1989. Salt sensivity of wheat at various growth stages. *Irrig. Sei.* 10: 29-40.

Maas, E.V., and C.M. Grieve.1994. Salt tolerance of plants at different stages of growth. Proc. Int. Conf. on Current Development in Salinity and Drought Tolerance of Plants, Tandojarn Pakistan. Jan 7-11 .1990.

Mass EV. (1990). Crop salt tolerance. In: Tanji KK (ed) Agricultural Salinity Assessment and Management. ASCE Manu Rep Eng Practices 71.

Maas, E.V., and C.M. Grieve.1994. Salt tolerance of plants at different stages of growth. Proc. Int. Conf. on Current Development in Salinity and Drought Tolerance of Plants, Tandojarn Pakistan. Jan 7-11.1 990.

Maas, E.V. , S.R. Grettan and G. Ogata. 1982. Foliar salt accumulation and injury in crops sprinkled with saline water. *Img. Sci.* 3: 157-168.

Magnusson, D.A. and J. Ben Asher, (1990). Simulated water and solute distribution from a crossed triple line-source, *Irrigation Sci.* 11 (1990), pp. 31–36.

Makhdoom,M.U., M.A. Memon and S.R.Dero.1986. Germination and growth of wheat crop as affected by different salinity levels. *Sind Jr. Agri. Re.* 5(1):93- 102.

Malash N., Flowers T. J. and Ragab R. (2005). Effect of irrigation systems and water management practices using saline and non-saline water on tomato production. *International Journal of Agricultural Water Management*, 78 (1-2) 25- 38.

Manchanda HR. (1998). Management of saline irrigation. In: Agricultural Salinity Management in India. CSSRI, Karnal, pp. 407-430.

Mandal U.K., K.S. Sundara Sarma, U.S. Victor and N.H. Rao. 2002. Profile water balance model under irrigated and rainfed systems. *Agronomy Journal* 94:1204-1211.

Mateos L., Berengena J., Orgaz F., Diz J., Fereres E. (1992). Comparison between drip and furrow irrigation in cotton at two levels of water supply. *Irrigation and Drainage Abstracts* (018-04095).

McConnell J.S., Frezzell B.S., Maples R.L., Wilkerson M.H., Mitchell G.A. (1989). Relationships of irrigation methods and nitrogen fertilization rates in cotton production- *Report Series. Arkansas Agricultural Experiment Station No. 310, USA.*

McKenzie, R.C., C.H. Sprout and N.F. Clark. 1983. The relationship of the yield of irrigated barley to soil salinity as measured by several methods. *Can. J. Soil Sci.*63: 519-528.

Mehanni, A.H. and A.P. Reppsys. 1986. Perennial pasture production after irrigation with saline groundwater in the Goulbourn Valley ,Victoria. *Australian J. Exp. Agric.* 26: 319-324.

- Meiri, A. 1990. Management under saline water irrigation, FAO, AGUMISC/16/90 paper, p. 89-110.
- Meiri, A. And Z. Plaut. 1985. Crop production and management under saline conditions. *Olant and soil* 89: 253-271.
- Metternicht, G.I. and J.A. Zinck, 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, 5812 : 1-20, article in press.
- Minhas P.S. (1996). Saline water management for irrigation in India. *Agri. Water Manage.*, 30: 1-24.
- Minhas PS. (1998). Use of poor quality waters. In: 50 years of Natural Resources Management Research. Singh GB, Sharma BR (eds). Division of Natural Resource Management. ICAR, New Delhi, India, pp. 327-346.
- Minhas PS, Tyagi NK. (1998). Guidelines for irrigation with saline and alkali waters. Bull no. 1/98. CSSRI, Karnal, India, p. 36.
- Minhas, P.S. and R.K. Gupta, (1993). Conjunctive use of saline and non-saline waters. III. Validation and application of a transient model for wheat, *Agric. Water Manage.* 23 (1993), pp. 149–160.
- Miyamoto, S., G.R. Gobran and K. Piela. 1985. Salt effects on seedling growth and in uptake of three bean rootstock cultivars. *Agron. J.* 7: 383-388.
- Miyamoto, S. K. Piel;a, J. Petticrew. 1989. Salt effects on germination and seedling emergence of several vegetable crops and guayule,. *Irrig. Sci.* 6: 159-1 70.
- Murtaza G, Ghafoor A, Qadir M. (2006). Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cotton–wheat rotation. *Agricultural Water Management.* 81(1-2): 98-114.
- Naresh, B.K., P.S. Minhas, A.K. Goyal, C.P.S. Chauhan and R.K.Gupta. 1993. Conjunctive use of saline and non-saline waters. II. Field comparisons of cyclic uses and mixing for wheat production. *Agric. Water Manage.* 23: 139- 148.
- Nielsen D.C., L. Ma, L.R. Ahuja and G. Hoogenboom. 2002. Simulating soybean water stress effects with RZWQM and CROPGRO models. *Agronomy Journal* 94:1234-1243.
- Noborio,K. K.J. McInnes and J.L. Heilman, (1996). Two-dimensional model for water, heat, and solute transport in furrow–irrigated soil. I. Theory, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60 (1996), pp. 1001–1009.

- Nour El-Din, M.M. I.P. King and K.K. Tamji, (1987). Salinity management model. I. Development, *J. Irrigation Drainage Eng.* 113 (1987), pp. 440–453.
- Oster J.D. 1994. Irrigation with poor quality water. *Agric. Water Manag.* 25: 271–297.
- Ott L., Hildebrand D.K. (1983). *Statistical Thinking for Managers*. PWS Publishers, 20 Park Plaza, Boston, MA 02116, USA.
- Oosterbaan, R.J., D.P. Sharma. K.N., K.N. Singh and G.K. Rao.1991. Crop production and soil salinity: evaluation field data from India by segmented linear regression. roc. Int. Symp. on Land Drainage for Salinity Control in Arid and Semi-Arid Areas. Cairo, Egypt. Drainage Research Institute. Cairo.
- Pasternak, O., and De Malach Y. 1995. Irrigation with brackish water under desert conditions X. Irrigation management of tomatoes on desert sand dune. *Agric. Water Management*, 2: 121 -132.
- Pal, B. And R.K. Tripathi, 1979. Physico-chemical characteristics of soils of a semi-desert tract of UP as affected by irrigation water quality. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 27: 240-248.
- Pereira L.S., P.R. Teodoro, P.N. Rodrigues and J.L. Teixeira. (2003). Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In: G. Rossi, et al. Tools for drought mitigation in Mediterranean regions. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 161-180.
- Phillip J.R. 1957. The theory of infiltration:3. Moisture profiles and relation to experiment. *Soil Sci.* 84: 163-178.
- Prendergast, J.B.1993. A model of crop yield response to irrigation water salinity theory, testing, and application. *Irrig. Sci.* 13: 157-164.
- Ragab, R., J. Feyen and D. Hillel, (1984). Simulating two-dimensional infiltration into sand from a trickle line source using the matric flux potential concept, *Soil Sci.* 137 (1984), pp. 120–127.
- Ragab. R, F. Beese and W. Ehlers, (1990). A soil water balance and dry matter production model. I. Soil water balance of oats. II. Dry matter production of oats, *Agronomy J.* 82 (1990), pp. 152–161.
- Ragab R. 1997. Constraints and applicability of irrigation scheduling under limited water resources, variable rainfall and saline conditions. In: *Irrigation Scheduling From Theory To Practice*. Smith, M., Pereira, L.S., Berengena, J., Itier, B., Goussard, R., Ragab R., Tollefson, P., van Hofwegen, L. (Eds.), *FAO Water Reports*, 8. FAO, Rome, pp. 149–165.

Ragab R. 1998. The use of saline/brackish water for irrigation: possibilities and constraints. In: Ragab, R., Pearce, G. (Eds.), Proceedings of International Workshop on the Use of Saline and Brackish Water for Irrigation—Implication for the Management of Irrigation, *Drainage and Crops.*, pp. 12–41 (Bali, Indonesia, July 23-24, 1998. *Part of the 49th Annual ICID Conference*).

Ragab R. 2002. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model, *Environ. Modell. Software* 17: 345–361.

Ragab R. (2004a). Proceedings of the International workshop on "Management of poor quality water for irrigation: Institutional, health and environmental aspects", Moscow 9-10, 2004. International Commission on Irrigation and drainage, ICID. 276pp Ragab R. 2004a. (Editor) Proceedings of the International workshop on: Sustainable Strategies for Irrigation in Salt prone Mediterranean Region: A System Approach, Cairo, Egypt, December 8 10, 2003. ISBN: 1903741 07 6, CEH, Wallingford <http://www.ceh.wallingford.ac.uk/research/cairoworkshop>.

Ragab R. (2004b). Water management strategies to combat drought in the semi-arid regions. In Hamdy, 2004 (Editor), Proceedings of the International workshop on Water Management for Drought Mitigation in the Mediterranean, Cairo, April 12-16, 2004. CIHEAM-IAMB, Bari, Italy. pp37-101. Ragab R. 2004b. The SALTMED model. A Compact Disk contains the software, instruction and examples. ISBN: 1 903741 08 4, CEH, Wallingford. <http://www.ceh.wallingford.ac.uk/research/cairoworkshop>

Ragab R. (2004c). Proceedings of the International workshop on "Management of poor quality water for irrigation: Institutional, health and environmental aspects", Moscow 9-10, 2004. International Commission on Irrigation and drainage, ICID. 276pp. Available at <http://www.ICID.org> and at <http://www.cehwallingford.ac.uk/research/cairoworkshop>

Ragab R. 2004d. Water management strategies to combat drought in the semi-arid regions. In Hamdy, 2004 (Editor), Proceedings of the International workshop on Water Management for Drought Mitigation in the Mediterranean, Cairo, April 12-16, 2004. CIHEAM-IAMB, Bari, Italy. pp37-101

Ragab R. (Editor), (2005a). Advances in integrated management of fresh and saline water for sustainable crop production: Modelling and practical solutions. International Journal of Agricultural Water Management (Special Issue), volume 78- Issues 1-2, pages 1-164. Elsevier, Amsterdam. The Netherlands.

Ragab R. (2005b). Editorial: Advances in integrated Management of fresh and saline water for sustainable crop production: Modelling and practical solutions. International Journal of Agricultural Water Management. In R. Ragab, 2005. (Editor). Special Issue of International Journal of Agricultural Water Management, 78, (1-2).

Ragab R., Malash N., Abdel Gawad G., Arslan A. and Ghaibeh A. (2005a). A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: 1. The SALTMED

model and its application using field data from Egypt and Syria. *International Journal of Agricultural Water Management*, 78 (1-2) 67-88.

Ragab R., Malash N., Abdel Gawad G., Arslan A. and Ghaibeh A. (2005b). A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: 2. The SALTMED model validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria. *International Journal of Agricultural Water Management*, 78 (1-2) 89-107.

Rains, D.W., S. Goyal, R. Weyrauch and A Lauchli. 1987. Saline drainage water reuse in a cotton rotation system. *Calif. Agric.* 41 :24-27.

Rassam D., J. Simunek and M.T. van Genuchten. 2003. Modelling variably saturated flow with HYDRUS-2D, ver. 2.007. Brisbane, Australia.

Ravi V. and J.A. Johnson. 1997. VLEACH: A One-dimensional finite difference vadose zone leaching model, Version 2.2. Dynamac Corporation, USA, pp. 1-70.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: *Unsaturated Flow in Hydrological Modelling*. Morel-Seytoux, H. (Ed.), NATO ASI Series, 275. Kluwer Academic, London, pp. 275–300.

Rhoades. J.D., 1990. Soil salinity – causes and controls. In *Techniques for desert reclamation*, School of Geography University of Oxford.

Rhodes J, Kandiah A, Mashali AM. (1992). The use of saline waters for crop production. *Irrigation and Drainage Paper No. 48*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 133 pages

Rhoades, J.O. 1972. Quality of water for irrigation. *Soil Sci.* 113: 277-284.

Rhoades J.D. (1998). Use of saline and brackish water for irrigation: implications and role in increasing food production, consuming water, sustaining irrigation and controlling soil and water degradation. In: *Proc of the International Workshop on the use of saline and Brackish water for irrigation – at 10th Afro-Asian Confr.* Bali, Indonesia, pp. 261-304.

Rhoades J.D., Loveday J. Salinity in irrigated agriculture. In: Stewart B.A., Nielsen D.R., eds. *Irrigation of agricultural crops*. Madison, WI: ASA, CSSA, and SSSA, 1990:1089-1142 *Agron. Monogr.* 30.

Rhoades, J., Chauduvi, F., Lesh, S., (1999). Soil salinity assessment. *Irrigation and Drainage paper no. 48*, FAO, Rome, Italy, 300 pp.

Richards, L.A., (1954). Diagnosis and improvements of saline and alkali soils. U.S. Salinity Laboratory DA, US Dept. Agr. Hbk 60, 160 p.

Rolston DE, Rains DW, Biggar JW, Lauchli A. (1988). Reuse of saline drain water for irrigation. In: UCD/INIFAP Conf. Guadalajara, Mex, March 1988.

Rubin J. And R. Steinhardt. 1964. Soil : water relations during rain infiltration: III. Water uptake at incipient ponding. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28: 614-619.

Sarwar A., W.G.M. Bastiaanssen, T.M. Boers and J.C. van Dam. 2000. Evaluating drainage design parameters for the fourth drainage project, Pakistan by using SWAP model: Part I - calibration. *Irrigation and Drainage Systems* 14:257-280.

Shalhevet J., 1994. Using water of marginal quality for crop production: major issues. *Agric. Water Manag.* 25: 233–269.

Shalhevet, J., B. Heuer and A Meiri. 1983. Irrigation interval as a factor in the tolerance to salinity of eggplant. *Irrig. Sci.* 4:83-93.

Shalhevet J, Kamburovj (1976). Irrigation and salinity: a worldwide survey. *Int Commis Irig Drainage*, p. 106.

Shalhevet J, Shainberg I (eds) (1984). *Soil salinity under irrigation*. Springer. Berlin Heidelberg, New York, p. 349.

Simunek J. and M.T. van Genuchten. 1994. The CHAIN-2D Code for Simulating Two-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media, Version 1.1. Research Report No. 136. USDA-ARS U. S. Salinity Laboratory, Riverside, California.

Simunek J., T. Vogel and M.T. van Genuchten. 1994. The SWMS_2D Code for Simulating Water Flow and Solute Transport in Two-Dimensional Variably Saturated Media. Version 1.21. Research Report No. 132. USDA-ARS U. S. Salinity Laboratory, Riverside, California.

Šimůnek, J. and D.L. Suarez, (1994). Two-dimensional transport model for variably saturated porous media with major chemistry, *Water Resour. Res.* 30 (1994), pp. 1115–1133.

Šimůnek, J., Šejna, M., Van Genuchten, M.Th., (1998a). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in ariably saturated media. Version 2.0. IGWMC-TPS-70. International Ground Water Modelling Centre, Colorado School of Mines, Golden, CO, 186 pp.

Šimůnek, J., Šejna, M., Van Genuchten, M.Th., (1998b). The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0. IGWMC-TPS-56. International Ground Water Modelling Centre, Colorado School of Mines, Golden, CO, 251 pp.

Singh, B., and D.R. Bhumbla. 1968. Effect of quality of irrigation water on soil properties. *J. Res. (PAU)*: 166-171

Smedema, L.K. and K. Shiati, (2002). Irrigation and salinity: a perspective review of the salinity hazards of irrigation development in the arid zone. *Irrigation and Drainage System*, vol. 16(2).

Smith M. 1992. CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management. *FAO Irrigation and Drainage paper 46*. Rome.

Simunek J., D.L. Suarez and M. Sejna. 1996. The UNSATCHEM software package for simulating one-dimensional variably saturated water flow, heat transport, carbon dioxide production and transport, and solute transport with major ion equilibrium and kinetic chemistry, Version 2.0. Research Report No. 141. USDA-ARS U. S. Salinity Laboratory, Riverside, California.

Simunek J., M. Sejna and M.T. van Genuchten. 1998a. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media, Version 2.0. US Salinity Laboratory, Agricultural research service, US department of agriculture. Riverside, California, pp. 1-177.

Srinivasulu A., C.S. Rao, G.V. Lakshmi, T.V. Satyanarayana and J. Boonstra. 2004. Model studies on salt and water balances at Konanki pilot area, Andhra Pradesh, India. *Irrigation and Drainage Systems* 18:1-17.

Szabolcs, I., 1979. Review of research on salt-affected soils. *Nature Resource Res.*, vol. 15:137.

Szabolcs, I., 1985. Salt-affected soil as world problem. In 1st Symposium on Reclamation of Salt- Affected Soil, China, 8-12 May 1985:30-47.

Szabolcs, I., 1987. The global problems of salt-affected soils. *Acta Agronomica Hungarica*, vol 36:159-172.

Teixeira J.L. and L.C. Pereira. 1992. ISAREG, an irrigation scheduling simulation model, in crop-water models. In: L.C. Pereira, et al. Special issue of *ICID Bulletin*, pp. 29-48.

Thomas, J.R. 1980. Osmotic and specific salt effects on growth of cotton. *Agron. J.* 72 : 407-412.

Thomson EF, von Kaufmann R, Li Pun H, Treacher T and van Houten H. (eds). (2000). *Global Agenda for Livestock Research. Proceedings of a Consultation on Setting Livestock Research Priorities in West Asia and North Africa (WANA) Region, ICARDA, Aleppo, Syria, 12–16 November 1997. ILRI (International Livestock Research*

Institute), Nairobi, Kenya, and ICARDA (International Center for Agricultural Research in the Dry Areas), Aleppo, Syria. 172 pp.

Tyagi NK. (1998 Mana). Improvement of irrigation system for control of salinity. In: Agricultural Salinity gement in India, CSSRI, Karnal, pp. 309-324.

Uzun Ö. 2004. *Evaluation of SALTMED Model Using Field Data of Turkey. Collection master of Science no. 360*. Thesis of International Centre for Advanced Mediterranean Studies , Bari, Italy.

Vanderborght J., R. Kasteel, M. Herbst, M. Javaux, D. Thiery, M. Vanclooster, C. Mouvet and H. Vereecken. 2005. A set of analytical benchmarks to test numerical models of flow and transport in soils. *Vadose Zone Journal* 4:206-221.

Van Dam J.C. 2000. Field scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. Ph.D. Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.

Van Dam J.C., J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendjik and C.A. van Diepen. 1997. Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. Wageningen University and Alterra, Vol. 45. Wageningen University and Alterra, Netherlands.

Van Dam, J.C., Stricker, J.N.M., Droogers, P., 1994. Inverse method to determine soil hydraulic functions from multistep outflow experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 647–652.

Van Genuchten, M.Th, 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report, 121. USDA-ARS, US Salinity Laboratory, Riverside, CA.

Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.

Van Genuchten, M.Th., Hoffman, G.J., 1984. Analysis of crop salt tolerance data. In: *Soil Salinity under Irrigation Processes and Management*. Shainberg, I., Shalhevet, J. (Eds.), Ecological Studies, 51. Springer, New York, pp. 258–271.

Van Hom, J.W.1991. Development of soil salinity during germination and early seedling growth and its effect on several crops. *Agric. Water Manage.*20:17- 28.

Van Hom, J.W., N.Katerji, A. Hamdy and M. Mastrorilli. 1993. Effect of saline water on soil salinity and on water stress, growth and yield of wheat and potatoes. *Agric. Water Manage.* 23:246-265.

- Van Hoorn JW. (1971). Quality of irrigation water, limits of use and prediction of long term effects. In, Salinity Seminar Baghdad, FAO Irrigation and Drainage Paper 7, FAO, Rome. p. 117–135.
- Van Schilfgaarde J., L. Bernstein, J. D. Rhoades and S. L. Rawlins. 1974. Irrigation management for salt control. *J. Irrig. and Drainage Div.*, ASCE 100 (IR3). Proc. Paper 10822. pp. 321-338.
- Verma, S.L, 1973. Survey of the quality of some of the typical underground waters in Haryana and their effect on soil properties. Msc. Thesis. Haryana Agricultural University, Hisa, P. 147.
- Vogel T. and J.W. Hopmans, (1992) Two-dimensional analysis of furrow infiltration, *J. Irrigation Drainage Eng.* 118 (1992), pp. 791–806.
- Wagenet, R. J., W.P. Campbell, A.M. Bamatraff and D.L. Turner. 1980. Salinity, irrigation frequency, and fertilization effect on barley growth. *Agron. J.* 72: 969-974.
- Vrugt J.A. and W. Bouten. 2002. Validity of first-order approximations to describe parameter uncertainty in soil hydrologic models. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1740-1751.
- Vrugt J.A., J.W. Hopmans and J. Simunek. 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1027-1037.
- Wagenet, R.J., Hutson, J.L., 1989. LEACHM: leaching estimation and chemistry model—a process based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reaction in the unsaturated zone. Continuum vol. 2. Water Resources Institute. Cornell University, Ithaca, New York, 148 pp.
- Wakil, M. 1993. Underground water for supplemental irrigation in Syria: Quantity and quality. International Centre for Agriculture Research in Dry areas. FRMP annual report.
- Wakil, M. 1994. Supplemental irrigation in the Aleppo basin using ground water. international Centre for Agriculture Research in Dry Areas. FRMP annual report.
- Wakil, M., R. Bonnell, 1996. Salt tolerance of wheat in the semi-arid Khabur basin plains, Syria. *ICID journal.* 45(1). 1-10.
- Willardson, L.S., D. BOLS, and L. K. Smedema. 1997. Reuse of drainage water from irrigated areas. *Irrigation and Drainage Systems* 11:215-239.
- Wu J., R. Zhang and S. Gui. 1999. Modeling soil water movement with water uptake by roots. *Plant and Soil* 215:7-17.
- Xu C.Y. and V.P. Singh. (1996). A review on monthly water balance models for water resource investigations. *Water resource management* 12:31-50.

Yukse G., Taskin S., (1974). The search on the comparison of gravity and sprinkler methods. *The Research Report of Regional Soil and Water Research Inst.*, 1972–1973, Tarsus, Turkey, pp. 145–156.

Yeo A, Flowers. T.J., Ragab R., Pearce G.R. 1997. The role of crop salt tolerance in the development of an integrated management plan for irrigation with saline water. *Proceedings of International conference on Water management, salinity and pollution control towards sustainable irrigation in the Mediterranean region, September 22– 26, 1997, Bari, Italy, Vol. IV, pp. 19–35.*

Zinck, J. A. (2001). Monitoring salinity from remote sensing data. In *Proceedings of the 1st Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Remote Sensing for Developing Countries*, ed. R. Goossens, & B. M. De Vliegheer, 359– 368. Belgium: Ghent University.

