

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Hassiba Benbouali de Chlef
Faculté des Sciences de la nature et de la vie.
Département : Eau et Environnement et Développement Durable



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Sciences de l'eau et protection de l'environnement-Gestion de l'eau et
développement durable.

Spécialité : Eau et Environnement.

Par

Moussa KOUADRI SAMEUT

Thème :

**Modélisation du bilan hydrique dans une parcelle d'artichaut
irriguée et drainée (Wilaya de Relizane).**

Soutenue le 15/01/2019 , devant le jury composé de :

Djamel SAIDI	Professeur	Université de Chlef	Président
Tarik HARTANI	Professeur	Centre universitaire de Tipaza	Directeur de thèse
Abdelkader BOUTHIBA	Professeur	Université de Chlef	Examineur
Mohamed Nacer CHABACA	Professeur	Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie	Examineur
Saci NEDJAI	Maitre de conférences A	Université de Chlef	Examineur

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah le Tout Puissant qui m'a donné la foi, la patience et la volonté pour achever ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de ce travail de recherche. Merci à mon directeur de thèse Professeur Tarik HARTANI, de m'avoir fait confiance et de m'avoir accompagné et encadré au cours de mon parcours de Doctorat.

Je le remercie infiniment pour ses orientations, sa patience, sa disponibilité permanente, ses précieux conseils et remarques, sans oublier son suivi régulier lors de la réalisation de ce travail. C'est un honneur de travailler avec ce grand professeur.

J'exprime aussi mes remerciements et ma gratitude au Professeur Abdelkader DOUAOUI, surtout pour ses conseils, son orientation et son soutien.

Je remercie chaleureusement M. Jean Claude MAILHOL, Professeur émérite à l'IRSTEA de Montpellier, pour avoir mis à notre disposition le modèle « PILOTE » ainsi que pour ses précieuses explications et orientations relatives à l'usage de ce modèle.

Un grand merci à monsieur Djamel SAIDI, Professeur à l'université Hassiba Ben-bouali de Chlef, qui nous a honoré en acceptant de présider ce jury, mais surtout pour l'opportunité qu'il nous a donnée en ouvrant cette formation doctorale à l'université de Chlef.

Mes remerciements vont également à tous les membres du Jury qui ont accepté de lire et enrichir ce travail par leurs précieuses remarques :

- Pr. Abdelkader BOUTHIBA

- Pr. Mohamed Nacer CHABACA

- Dr. Saci NEDJAI

Un grand merci à l'équipe du laboratoire de recherche « maîtrise de l'eau en agriculture » à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie d'El Harrache, l'équipe de Laboratoire de pédologie de l'université de Chlef, l'équipe de l'INSID de Relizane, l'équipe de DSA de Relizane, l'ANRH d'Alger ainsi que le Service des Statistiques au niveau du Ministère d'Agriculture d'Algérie.

J'adresse également mes plus vifs remerciements à M. Ahmed BELOUAZNI, M. Hamid BRADAI, M. Khalil LAIB et M. Aziz ZEMOURI pour leur aide considérable et leurs encouragements.

Mes vifs remerciements vont à tous les agriculteurs du Bas Chélif surtout M. FODHIL qui nous a vraiment aidé et facilité l'accès à ses parcelles, sans oublier son équipe agréable.

Je tiens à exprimer mon extrême gratitude à l'égard de tous mes enseignants qui ont contribué tous à mon parcours d'étude.

Mes sincères remerciements à l'ensemble des doctorants en Sciences de l'Eau et Environnement à l'université de Chlef, en particulier mes chers amis Abderrahmen AKKACHA, Nouredine ABDELKRIM et Sbaa BOUBEKEUR pour les agréables moments que nous avons passés ensemble.

Dédicaces

Je dédie ce travail, à mes chers parents, pour leurs sacrifices, leur soutien moral et leur amour
qui m'accompagnent durant toute ma vie,

A mes frères et ma sœur,

A tous mes oncles, mes tantes, mes cousins et cousines,

A toute la famille: KOUADRI SAMEUT,

A mes amis:

Noureddine ABDELKRIM, Abderrahmen AKKACHA, Sbaa BOUBEKEUR,

Zouheyr HADRI,

A tous les doctorants de l'université de Chlef, Spécialement les doctorants du département
« Eau, Environnement et développement durable »,

Enfin et surtout à tous ceux qui m'ont enseigné durant toute ma vie scolaire et universitaire.

Moussa

Résumé

Dans le contexte de la plaine agricole du Bas-Cheliff, caractérisé par un déficit pédoclimatique quasi-annuel et une salinité primaire et secondaire, la modélisation est un des meilleurs moyens de gérer l'eau.

L'objectif principal de notre travail de recherche est d'adapter le modèle de simulation PILOTE dans le Bas-Cheliff et contribuer à améliorer la production végétale locale illustrée dans notre cas par l'artichaut dans ses différentes variétés.

Ce modèle simule le bilan hydrique et le rendement, à partir de la simulation de l'indice de surface foliaire "LAI" (indice foliaire) à partir des températures de base, il peut nous donner une estimation sur le calcul du rendement, matière sèche et quantité d'eau drainée "lessivée".

L'originalité de notre travail de recherche réside dans l'utilisation du modèle PILOTE dans un contexte particulier, caractérisé par un climat semi-aride et dans son application, pour la première fois, sur la culture d'artichaut.

Afin de valider cette version du modèle, les tests ont été réalisés sur la variété d'artichaut "Violet de Provence" au cours des saisons 2011/2012 et 2012/2013 dans une parcelle irriguée et drainée où on applique le système d'irrigation par goutte à goutte.

Les résultats montrent que le modèle simule de façon satisfaisante le LAI, la réserve de l'eau dans le sol et la biomasse totale avec un coefficient d'efficacité minimum de 0,9. On observe une très bonne corrélation entre les valeurs mesurées et celles simulées par le modèle.

Nos résultats peuvent être extrapolés à la prévision des rendements selon différentes scénarii climatiques, et peuvent être extrapolés à d'autres cultures du même type. Ils contribuent par la même à conseiller la profession agricole sur les meilleures pratiques à adopter.

Mots clés: Parcelle d'artichaut, Irrigation, Bas-Cheliff, Modèle PILOTE, bilan hydrique.

Abstract

In the context of the Lower Cheliff agricultural plain, characterized by an almost annual rainfall deficit, a primary and secondary salinity, the modeling is one best ways for water management.

The main objective of our research work is to adapt PILOTE simulation model in Lower Cheliff, and contribute to improve the local crop production illustrated in our case by the artichoke in its different varieties.

This model simulates the water balance and yield, it is based on a simulation of the leaf area index "LAI" (leaf area index) from the sums temperatures basis, it may give us an estimate of the calculation of yield, dry matter and the amount of water drained "leached".

The originality of our contribution is to have used the PILOTE model in a particular context characterized by a semi-arid climate and applied for the first time on the artichoke crops.

The tests were performed on the artichoke crop variety "Violet de Provence" during the two seasons between 2011/2012 and 2012/2013 on a plot irrigation system comprising as the "drip irrigation" to validate this version.

The results show that the model satisfactorily simulates LAI, SWR, and total biomass with a minimum coefficient of efficiency of 0.9. When there's a very good correlation between the measured and simulated values by the model.

Our results can be extrapolated to forecast yields according to different climate scenarios, and can be extrapolated to other crops of the same type. They also help to advise the farming profession on the best practices to adopt.

Keywords: Artichoke plot, Irrigation, Lower Cheliff, Model PILOTE, water balance.

ملخص

يتميز الحوض الزراعي الأدنى للشلف خاصة بقساوة مناخه و تدهور تربته التي تعاني في معظمها من مشكل الملوحة بنوعيتها الأولية و الثانوية، لذا تعتبر النمذجة واحدة من أنجع الوسائل التي تستعمل لتسيير الموارد المائية.

يكن الهدف الرئيسي من هذه الرسالة العلمية في تجريب النموذج "PILOTE" على حقل لزراعة نبات الخرشوف أو ما يعرف بالقرنون بالسهل الأدنى للشلف، و المساهمة في تحسين مردود و انتاجية هذا النوع من النبات الذي يعتبر من أهم المحاصيل المحلية و المميزة للمنطقة.

يعمل هذا النموذج على تقدير وإعطاء نظرة حول المردود المائي و كذا الإنتاج الفلاحي للمحصول معتمداً بذلك على تقدير مؤشر مساحة الأوراق من خلال درجات الحرارة القاعدية، كما يسمح لنا كذلك بإعطاء نظرة تقديرية حول حساب العائد الفلاحي من الإنتاج، مقدار المواد الجافة بالإضافة إلى كمية المياه التي تتوجه نحو الصرف.

تكن مساهمتنا بهذه الدراسة بإعطاء عمل أصلي و جديد لم يتم التطرق له من قبل و ذلك من خلال تطبيق النموذج "PILOTE" في منطقة تتميز بمناخ شبه جاف، وكذا تطبيقه لأول مرة على نبات الخرشوف.

أجريت التجارب حول حقل من نوعية من الخرشوف تعرف بالقرنون البنفسجي Violet de Provence لفترة تمتد من 2012/2011 إلى 2013/2012، معتمدين بذلك على نظام سقي يعرف بالري بالتقطير و هذا من أجل تأكيد تطبيق و تماشي هذا النموذج مع هذه النوعية من النبات و مدى تناسبه مع هذا النوع من المناخ.

أظهرت نتائج النموذج الخاصة بدراسة مؤشر مساحة الأوراق، و كذا المتعلقة بمخزون المياه بالتربة، و كذلك المتعلقة بالكثلة الحيوية الكاملة أنها تحاكي و بشكل مرضي لنتائج المحصل عليها على أرضية الميدان بمعامل كفاءة لا يقل عن 0,9، إذ سجلنا أنه هناك علاقة ارتباط جيدة بين القيم المقاسة و القيم المقدرة المحصل عليها بالنموذج.

أخيراً يمكننا القيام بإستقراء للنتائج المحصل عليها و الاستعانة بها في استخلاص و تقدير مردود المحاصيل الفلاحية حسب سيناريوهات مناخية مختلفة، كما يمكن إستقراءها كذلك على محاصيل زراعية أخرى من نفس النوع. و تساهم أيضاً في تقديم الاعانة للفلاحين المختصين ونصحهم و إرشادهم و توجيههم نحو استغلال أمثل و زراعة مثلى.

الكلمات المفتاحية: حقل لنبات الخرشوف، السقي، السهل الأدنى للشلف، نموذج "PILOTE"، الميزان المائي أو المردود المائي.

LISTE DES FIGURES :

Figure 01. Les différents systèmes d'irrigation	7
Figure 02. Système d'irrigation de surface (irrigation à la raie).....	8
Figure 03. Système d'irrigation par aspersion (aspersion classique).....	8
Figure 04. Système d'irrigation localisée (le goutte-à-goutte)	9
Figure 05. Relation pF-Humidité du sol (vilian, 1997)	29
Figure 06. Schéma du bilan hydrique d'une zone racinaire	34
Figure 07. Schéma de fonctionnement du module sol de PILOTE	39
Figure 08. Simulation du l'indice du surface foliaire LAI (a) et de la réserve d'eau en sol (SWR) (b).....	46
Figure 09. Simulation du l'indice du surface foliaire LAI (a) et de la réserve d'eau en sol (SWR) (b)	46
Figure 10. Variation du rendement en grain de maïs et en matière sèche totale	47
Figure 11. Localisation géographique de la région d'étude	49
Figure 12. Variation des précipitations annuelles en fonction du temps	51
Figure 13. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson de la station de Hmadna de la période (1985/2014)	52
Figure 14. Position de la station de Hmadena sur le climagramme d'Emberger	53
Figure 15. Variation de l'évapotranspiration annuelle en fonction du temps	54
Figure 16. Système théorique des vents ascendant et descendant dans la vallée du Chélif (Yacono, 1955).....	55
Figure 17. Evolution de la salinité des sols de la plaine entre 1990 et 2006.....	57
Figure 18. Carte d'occupation des sols de la plaine du Bas-Chélif établie par Ghérina (2008)	59
Figure 19. Qualité des eaux des barrages de Gargar et de Merdjet Sidi Abed	60
Figure 20. Les principaux périmètres irrigués de la plaine du Bas-Chélif (Douaouiet al 2006)...	61
Figure 21. Variété d'artichaut de notre parcelle d'étude.....	64
Figure 22. Schéma récapitulatif de la méthode de Le Bissonnais.....	71
Figure 23. Installation du système d'irrigation goutte à goutte à la parcelle	74
Figure 24. Matériel utilisé pour mesurer les débits des goutteurs	75
Figure 25. Mesure des débits des goutteurs	76
Figure 26. Evolution des superficies de plantation de la culture d'artichaut en Algérie	81
Figure 27. Evolution de la production de la culture d'artichaut en Algérie	82
Figure 28. Evolution des superficies de plantation de la culture d'artichaut à Relizane	83
Figure 29. Evolution de la production de la culture d'artichaut à Relizane	83

Figure 30. Variation des températures moyennes mensuelles	84
Figure 31. Variation des précipitations en fonction du temps	85
Figure 32. Variation des cumules des précipitations en fonction du temps	86
Figure 33. Variation des évapotranspirations en fonction du temps	86
Figure 34. Variation des cumules des évapotranspirations en fonction du temps	87
Figure 35. Variation de l'humidité de l'air en fonction du temps	88
Figure 36. Variation des durées d'insolation en fonction du temps.....	89
Figure 37. Variation des vitesses du vent en fonction du temps	89
Figure 38. Triangle textural du sol	94
Figure 39. Variation de l'indice de surface foliaire pour l'année 2011/2012.....	97
Figure 40. Variation de la réserve de l'eau en sol pour l'année 2011/2012.....	98
Figure 41. Variation de la biomasse totale pour l'année 2011/2012.....	98
Figure 42. Variation de LAI pour l'année 2012/2013	99
Figure 43. Variation de la réserve de l'eau en sol pour l'année 2012/2013.....	100
Figure 44. Variation de la biomasse totale pour l'année 2012/2013.....	100
Figure 45. Simulation de la réserve de l'eau en sol	103
Figure 46. Simulation du drainage pour l'année 2012/2013.....	104
Figure 47. Simulation du drainage pour l'année 2010/2011	104

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01. Avantages et inconvénients des principaux systèmes d'irrigation	10
Tableau 02. Comparaison entre les apports en eau dans trois systèmes d'irrigation pour des besoins identiques	14
Tableau 03. Outils de contrôle de l'état hydrique de la plante	30
Tableau 04. Moyennes mensuelles des précipitations et des températures de la station de Hmadna (1985-2014).	50
Tableau 05. Evolution de la salinité des sols de la plaine entre 1990 et 2006	56
Tableau 06. Évolution des coefficients culturaux « Kc » pendant le cycle végétatif de l'artichaut	65
Tableau 07. groupes granulométriques des échantillons du sol.....	69
Tableau 08. Critères d'identification du Coefficient d'uniformité	77
Tableau 09. guide pour l'interprétation des eaux d'irrigation.(Bulletin FAO N°29,1976)	90
Tableau 10. Analyses de l'eau d'irrigation.....	91
Tableau 11. Calendrier de l'irrigation de l'année 2012/2013	92
Tableau 12. Analyse physicochimique du sol	93
Tableau 13. Classe de la salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait de saturation à 25 °C	95
Tableau 14. Classification des sols selon la matière organique	95
Tableau 15. Classe de la stabilité, battance et érosion en fonction de valeurs du diamètre moyenne pondéral après désagrégation (MWD)	96
Tableau 16. Estimation de la biomasse totale	102

SOMMAIRE

Remerciements	<i>i</i>
Dédicace	<i>ii</i>
Résumé	<i>iii</i>
Liste des figures	<i>iv</i>
Liste des tableaux	<i>v</i>
Sommaire	<i>vi</i>
Introduction	<i>2</i>

Chapitre I : l'irrigation et le pilotage de l'irrigation

I. L'irrigation	<i>05</i>
I.1. Définition de l'irrigation	<i>05</i>
I.2. Principaux systèmes d'irrigation	<i>05</i>
I.2.1. Irrigation de surface.....	<i>05</i>
I.2.2. Irrigation par aspersion.....	<i>05</i>
I.2.3. Irrigation localisée	<i>06</i>
I.3. Avantages et inconvénients des principaux systèmes d'irrigation	<i>09</i>
I.4. Notion d'irrigation localisée	<i>11</i>
I.4.1. Schéma descriptif d'un réseau d'irrigation localisée	<i>11</i>
I.4.2. Systèmes d'irrigation localisée existants en Algérie	<i>13</i>
I.4.2.1. Gains souples posées en surface du sol ou enterrées	<i>13</i>
I.4.2.2. Rampes	<i>14</i>
I.4.3. Avantages et inconvénients de l'irrigation localisée	<i>14</i>
I.4.3.1. Avantages du système d'irrigation Goutte à goutte	<i>14</i>
I.4.3.2. Inconvénients du système d'irrigation goutte-à-goutte	<i>17</i>
II. Pilotage de l'irrigation	<i>20</i>
II.1. Définition et objectif du pilotage de l'irrigation	<i>20</i>
II.2. Méthodes de pilotage de l'irrigation	<i>21</i>
II.2.1. Méthodes indicatrices de l'état hydrique de la plante	<i>21</i>

II.2.1.1. Teneur en eau du végétal	21
II.2.1.2. Potentiel foliaire.....	22
II.2.1.3. Résistance stomatique « Rs »	23
II.2.1.4. Température foliaire	24
II.2.1.5. Etat de développement du couvert foliaire	24
II.2.1.6. Micro variation de diamètre d'un organe	25
II.2.1.7. Flux de sève	25
II.2.2. Méthodes indicatrices de l'état hydrique du sol	26
II.2.2.1. Teneur en eau du sol	26
II.2.2.2. Potentiel hydrique	27
II.2.2.3. Relation pF humidité	28
II.2.3. Méthodes liées à l'atmosphère	30

Chapitre II : Aperçu général sur la modélisation du Bilan Hydrique

1-Définition du bilan hydrique	32
2- But du bilan hydrique.....	32
3- Principe du bilan hydrique... ..	33
4- Equation du bilan hydrique.....	33
5- Evaluation et estimation des composants du bilan hydrique	35
6- But de la modélisation du bilan hydrique	36
7- Principe de la modélisation du bilan hydrique	36
8- Présentation du modèle du bilan hydrique « PILOTE ».....	37
8-1- Principes du modèle.....	37
•Module sol.....	44
•Module plante (calcul du rendement)	42
•Calcul du rendement en matière sèche.....	44
• Calcul du rendement en grain.....	45

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

I. Présentation de la zone d'étude.....	49
I.1. Localisation	49
I.2 Climat	50
I.2.1. Températures	50

I.2.2. Précipitations	51
I.2.2.1. Précipitations mensuelles	51
I.2.2.2. Précipitations annuelles	51
I.2.3. Diagramme Ombrothermique et quotient d'Emberger	52
I. 2.4. Indice d'aridité annuelle (Ia) de De Martonne	54
I. 2.5. Evapotranspiration (ETP)	54
I. 2.6. Humidité	55
I. 2.7. Vent	55
I.3 Salinité des sols	56
I.4 Occupation du sol	58
I.5. Ressources en eau	59
I.5.1. Ressources en eaux superficielles	59
I.5.2. Ressources en eaux souterraines	60
I.6. L'irrigation	61
II. Présentation du Matériel végétal.....	62
II.1. Présentation de la Culture	62
II.1.1. Violet de Provence	62
II.1.2. Variétés de blanc	63
II.2. Caractères botaniques	64
II.3. Exigences en eau des cultures	64
III. Protocoles Expérimentaux	65
III.1. Collecte et Calcul des données climatiques	65
III.2. Données agronomiques	66
• Indice de surface foliaire « LAI »	66
• Mesure de l'évolution de l'enracinement	66
• Mesure du rendement en grain	67
• Mesure de la matière sèche : (Biomasse)	67
III.3. Données pédologiques	67
• Extraction de la solution du sol (extrait de la pâte saturée)	68
• Mesure de la salinité du sol	68
• Mesure du pH du sol	69
• Granulométrie	69
• Mesure de la réserve de l'eau dans le sol	70

•	Mesure de la densité apparente du sol	71
•	Mesure de la stabilité structurale par la méthode de Le Bissonnais 1996	71
•	Dosage de la matière organique du sol	73
•	Dosage des cations et anions du sol	73
•	Détermination du coefficient d'adsorption du sodium (SAR)	73
III.4.	Données hydrauliques	74
•	Système d'irrigation	74
•	Protocole de mesure des débits des goutteurs	74
	a- Coefficient d'uniformité de l'application	76
	b- Coefficient d'Uniformité de distribution en % ou de Christiansen (1942)	77
	c- Taux de colmatage au niveau des goutteurs	78
	d- Dose d'irrigation ramenée à la parcelle	78
•	Analyses physicochimiques de l'eau d'irrigation	79

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

I.	La pratique de la culture d'artichaut	81
	• En Algérie.....	81
	1. Evolution des superficies de plantation de la culture d'artichaut en Algérie.....	81
	2. Evolution de la production de la culture d'artichaut en Algérie.....	81
	• Dans la wilaya de Relizane	82
	1. Evolution des superficies de plantation de la culture d'artichaut à Relizane	82
	2. Evolution de la production de la culture d'artichaut à Relizane	83
II.	Caractéristiques climatiques expérimentales	84
	1. Température de l'air	84
	2. Variation des précipitations	84
	3. Variation des évapotranspirations de référence (ET0)	86
	4. Variation des humidités relatives	88
	5. Variation des durées d'insolation	88

6. Variation des vitesses du vent	89
III. Caractéristiques du réseau d'irrigation.....	90
1. Qualité de l'eau d'irrigation.....	90
2. Mesure de débit.....	91
IV. Caractéristiques du sol de la parcelle	92
• Texture du sol	93
• Mesure de pH du sol	94
• Conductivité électrique	94
• Valeurs de Pf	95
• Matière organique	95
• Stabilité structurale	96
V. Calibration du modèle PILOTE.....	97
1. Variation de l'indice de la surface foliaire LAI.....	97
2. Variation de la réserve de l'eau dans le sol.....	98
3. variation de la biomasse totale.....	98
VI. Validation du modèle PILOTE.....	99
1. Variation de l'indice de la surface foliaire LAI	99
2. Variation de la réserve de l'eau dans le sol	100
3. Variation de la biomasse totale.....	100
VII. Applications du modèle PILOTE	101
• simulation de la biomasse totale.....	101
• simulation de la réserve de l'eau en sol	103
• simulation du drainage	104
VIII. Discussion générale	105
IX. Conclusion générale et perspectives.	108
X. Références bibliographiques.	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

I. Introduction générale

L'agriculture irriguée joue un rôle essentiel dans l'approvisionnement alimentaire et dans le développement rural dans les zones arides et semi-arides du monde. Dans de nombreux pays, la mise en œuvre par l'État de grands périmètres d'irrigation était une option de développement majeure au XX^e siècle pour compenser les pluies rares et irrégulières, en vue d'intensifier l'agriculture par l'irrigation (Molle et al., 2009; Kuper, 2011).

La plaine agricole du Bas Cheliff est située dans la partie ouest aval du bassin de Cheliff et s'étend sur plus de 60 000 ha, dont 40 000 ha d'irrigation sont autour des localités de Ouarizane, Djdiouia, Hmadna, Guerouaou et Gaa. Le climat est semi-aride avec une pluviométrie annuelle moyenne de 250 mm. Les études de sols ont révélé deux principaux types de sols (Boulaine, 1957). Les sols à texture légère que l'on trouve habituellement sur la partie supérieure de la pente ne sont généralement pas salins et sont principalement cultivés avec des arbres fruitiers. Dans la partie inférieure de la rivière Cheliff, la texture argileuse du sol, l'exploitation de l'eau et la salinité sont les principales contraintes qui ont conduit à l'adoption de cultures tolérantes au sel. Les périmètres irrigués ont déjà dû faire face à plusieurs périodes de pénurie d'eau (Bouarfa et al, 2011). La crise a été quelque peu atténuée par l'augmentation des puits et forages publics et privés exploitant des eaux souterraines de qualité plutôt médiocre.

La commune d'Oued Rhiau située dans la wilaya de Relizane a été sélectionnée pour explorer les stratégies d'irrigation des agriculteurs pendant trois saisons agricoles de 2010/2011 à 2012/2013. Les systèmes de culture sont composés de cultures d'agrumes et de légumes, en particulier d'oliviers et d'artichauts, et nous nous concentrons dans ce travail sur l'artichaut qui couvre plus de 3200 ha. Les eaux souterraines ont été acheminées au site d'étude par un système d'irrigation par goutte-à-goutte en tube flexible perforé.

Un modèle de bilan hydrique appelé PILOTE a été utilisé pour comprendre la stratégie d'irrigation. Ce modèle simule le bilan hydrique et calcule le rendement de la matière sèche totale et des fruits (Mailhol et al, 2004). Les données requises sont les précipitations quotidiennes, la température, l'évapotranspiration de référence ET_0 calculée par la formule Penman-Monteith en plus de l'humidité du sol à la capacité au champ et au point de flétrissement ainsi que certaines caractéristiques agronomiques de la culture (profondeur des racines et surface foliaire).

De nombreuses recherches ont souligné l'exactitude, la robustesse et la simplicité de PILOTE, cas du maïs et du blé dur dans un contexte méditerranéen par Khaledian et al en

Introduction générale

2008, et aussi dans le cas de la betterave à sucre par Zhongping Li et al en 2011. Cependant, il n'a jamais été testé dans des conditions semi-arides pour la culture d'artichaut.

Ce travail de recherche devrait fournir des informations pertinentes aux gestionnaires de l'eau pour améliorer la conservation de l'eau dans le sol en proposant de meilleures pratiques d'irrigation. En effet, nous avons posé comme question centrale la suivante :

- Comment peut-on gérer l'irrigation de notre parcelle afin d'avoir un bon rendement et sans provoquer des risques relatifs à la dégradation du sol?

Afin de répondre à cette question, nous avons établi un protocole de recherche qui cible plusieurs objectifs : la validation du modèle de simulation PILOTE sur une parcelle d'artichauts dans le Bas Cheliff, l'adéquation entre les irrigations réelles et celles simulées, l'estimation du rendement agronomique en artichauts, l'estimation du drainage au niveau de la parcelle à la suite des pluies et des irrigations.

Afin d'atteindre ces objectifs, nous avons structuré ce travail de recherche comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à la partie bibliographique relative à la modélisation du bilan hydrique.
- Le deuxième chapitre est une mise au point sur les méthodes de Pilotage de l'Irrigation.
- Le troisième chapitre expose le matériel et les méthodes utilisés pour réaliser ce travail durant toutes les campagnes de suivi.
- Enfin, le quatrième chapitre qui représente la partie la plus importante du travail porte sur les résultats et discussions concernant les différents aspects abordés complétés par une analyse prospective sur les possibilités d'accroître la production végétale localement.

CHAPITRE .I

*l'irrigation et le pilotage de
l'irrigation*

Chapitre I : l'irrigation et le pilotage de l'irrigation**I. L'irrigation****I.1. Définition de l'irrigation**

L'agriculture a connu, dès son début, le recours à « l'irrigation ». On entend par le terme « irrigation »: « l'apport artificiel d'eau à des plantes cultivées, qui a pour but de compenser l'insuffisance des précipitations naturelles et de permettre le développement harmonieux de ces plantes » (Aubineau, 2002).

Cette technique comprend deux étapes principales : « la mobilisation des ressources en eau (cours d'eau, lacs, nappes souterraines, sources, etc.), la distribution de l'eau collectée aux plantes cultivées. L'irrigation présente surtout de l'intérêt dans les zones arides ou semi-arides dans lesquelles les besoins en eau des plantes sont toujours supérieurs aux ressources, mais elle est aussi pratiquée dans des zones plus humides pour régulariser la production et éviter des déficits en eau à des moments critiques du cycle de croissance. On utilise aussi les apports d'eau pour pratiquer une fertilisation simultanée (irrigation fertilisante) et pour lutter contre le gel » (Aubineau, 2002).

I. 2. Les principaux systèmes d'irrigation

Il existe plusieurs systèmes d'irrigation dont les principaux sont les suivants :

I.2.1. L'irrigation de surface

La pratique de l'irrigation de surface est très ancienne et c'était la méthode la plus utilisée sur les terres agricoles. Il s'agit d'une « méthode d'irrigation dans laquelle l'eau est appliquée au terrain par simple écoulement gravitaire avant l'infiltration. Elle inclut divers systèmes selon la relative importance de la phase d'inondation de la surface et de celle d'infiltration après accumulation » (Phocaidès, 2008).

Le système d'irrigation de surface regroupe plusieurs sous-systèmes ou méthodes dont la plus importante est l'irrigation à la raie qui est la plus utilisée aux Etats-Unis. Les chercheurs s'intéressent aussi à l'irrigation par planche et l'irrigation par bassin qui sont des méthodes plus modernes.

I.2.2. L'irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion est une « irrigation qui projette l'eau en l'air pour tomber à la surface du sol sous forme de fines gouttelettes » (Phocaidès, 2008). Elle désigne donc les techniques qui visent à reproduire artificiellement la pluie naturelle en distribuant des pluies

fines sur les cultures. Elle demande peu de temps pour sa mise en place et son déplacement et semble la méthode la plus utilisée en plein champ. On préconise ce moyen d'irrigation pour les plantes peu sensibles aux maladies cryptogamiques (navet, carotte, radis, betterave, haricot...) ainsi que les légumes semés.

Il existe différents modèles dont les plus importants sont : rampe oscillante (un système qui permet un arrosage très homogène mais semble le plus couteux), asperseurs ou micro-asperseurs (ils permettent de distribuer des pluies fines à faible débit et sont les plus légers), enrouleurs (dont ceux de petites tailles sont bien adaptés au maraîchage diversifié)... (Carole Calcet et al. 2016).

Il y a trois critères essentiels qui définissent la qualité de l'arrosage obtenu par l'aspersion : l'efficacité, l'uniformité d'arrosage et l'intensité pluviométrique. Cette technique entraîne une perte d'eau spécifique liée à l'évaporation à partir des gouttes. L'efficacité observée dépend donc de plusieurs facteurs qui sont :

- le pouvoir évaporant de l'atmosphère.
- la portée du jet d'aspersion.
- la finesse des gouttes.
- l'entraînement éventuel des gouttes les plus fines hors de la zone irriguée.

On note aussi que l'arrosage de nuit est plus efficace que l'arrosage de jour.

I.2.3. L'irrigation localisée

L'irrigation localisée est un système dans lequel l'eau est amenée, avec de faibles débits et à des intervalles rapprochés (doses réduites mais à fréquences élevées), au voisinage ou au pied des plantes. L'eau est apportée directement à la surface ou à l'intérieur du sol en utilisant un réseau dense de canalisations (un réseau de tuyaux munis de capillaires ou de tuyaux microperforés). L'apport se fait sous forme de gouttes, de minces filets d'eau ou de mini-jets à travers des dispositifs de distribution variés. Cette eau est filtrée et éventuellement enrichie en fertilisants et n'arrose que la zone explorée par les racines des plantes (Compaoré, 2003).

En effet, cette technique semble économe en eau du fait qu'elle n'humidifie que la portion de sol située au voisinage immédiat des racines des plantes et qu'elle limite les pertes par évaporation, ruissellement ou infiltration profonde (Azougagh, 2001).

Compte tenu des différentes caractéristiques de cette technique d'irrigation, plusieurs termes sont utilisés pour la désigner sur le plan international. Si l'organisation mondiale pour l'alimentation et l'agriculture l'appelle « Irrigation localisée » compte tenu des apports d'eau effectués au voisinage immédiat des plantes, la commission internationale des irrigations et du drainage (CIID), préfère le terme « Micro-irrigation », alors que certains auteurs en référence choisissent le terme « Irrigation goutte à goutte » prenant en compte l'utilisation d'un type particulier de goutteurs dans ce type d'irrigation.

Le schéma ci-dessous expose les différents systèmes d'irrigation les plus utilisés.

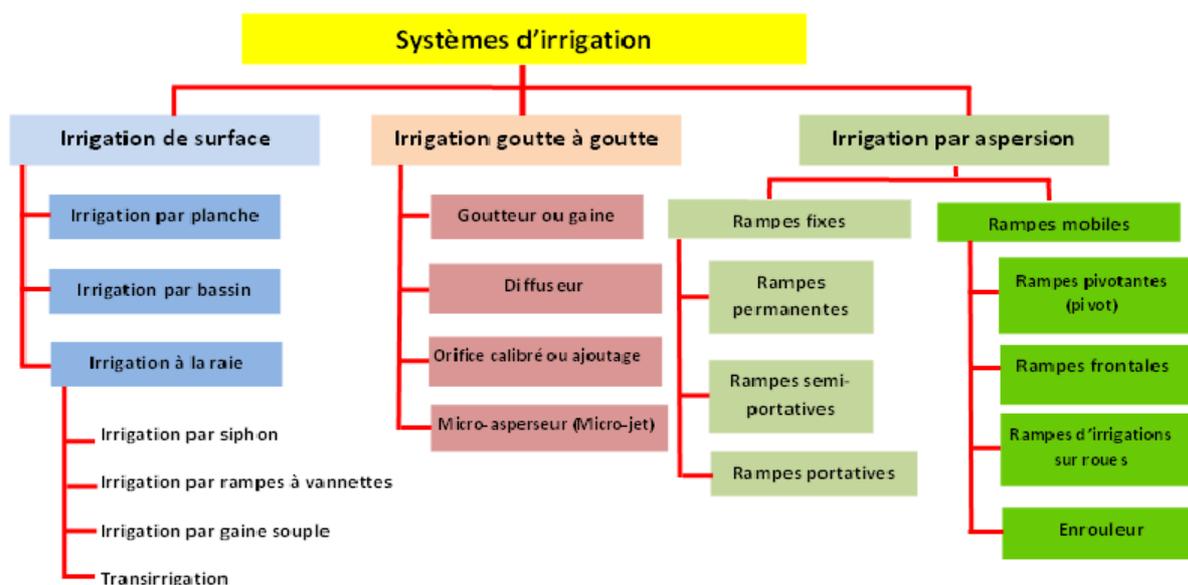


Figure 01. Les différents systèmes d'irrigation

Les figures ci-dessous illustrent quelques exemples de systèmes d'irrigation.



Figure 02. Système d'irrigation de surface (irrigation à la raie)



Figure 03. Système d'irrigation par aspersion (aspersion classique)



Figure 04. Système d'irrigation localisée (le goutte-à-goutte)

Par ailleurs, le terrain connaît aussi d'autres systèmes et méthodes d'irrigation dont l'efficacité et les caractéristiques diffèrent d'un type à un autre. On peut citer, à titre d'exemple, le système d'irrigation souterraine qu'on présente ci-dessous.

*** L'irrigation souterraine**

L'irrigation souterraine, appelée également sous-irrigation ou irrigation par ruissellement est une technique qui « consiste à amener de l'eau jusqu'à la zone racinaire des plantes en régularisant, par des moyens artificiels, la hauteur de la nappe souterraine. Cette méthode peut être appliquée dans les endroits où la nappe est naturellement haute, ce qui est souvent le cas le long des vallées fluviales ou dans les zones arides où l'intérêt est de remonter la nappe phréatique vers les racines ». (Saiyouri, 2012).

Il s'agit donc d'un système d'irrigation qui s'applique à des sols hydro-morphes, caractérisés par la présence d'une nappe souterraine quasi-permanente et qui permet l'humidification du sol de par-dessous la zone des racines des plantes en augmentant artificiellement le niveau hydrostatique.

I. 3. Avantages et inconvénients des principaux systèmes d'irrigation

Il est évident que chacun de ces systèmes d'irrigation compte des avantages qui poussent les agriculteurs à le choisir mais chacun d'entre eux présente aussi des inconvénients et des contraintes qui défavorisent son utilisation. Le tableau ci-dessous résume ces points en ce qui concerne les principaux systèmes d'irrigation.

Tableau 1. Avantages et inconvénients des principaux systèmes d'irrigation

Système d'irrigation	Avantages	Inconvénients
Gravitaire	<ul style="list-style-type: none"> - Ne mouille pas les parties aériennes des plantes. - Limite la poussée des adventices. - Méthode empirique, mais présentant de bons résultats. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite des parcelles nivelées. - Débit d'eau important nécessaire (pour compenser l'évaporation et les infiltrations de l'eau dans le sol). - Temps d'arrosage long. - Risque d'apports d'adventices et de pollutions par les canaux.
Goutte-à-goutte	<ul style="list-style-type: none"> - Répartition uniforme de l'eau dans la parcelle. - Basse pression et économie d'énergie. - Economie en eau. - Ne mouille pas le feuillage des plantes et réduit ainsi certaines maladies cryptogamiques. - Limite l'évaporation et le refroidissement du sol. - Est compatible avec l'utilisation de paillage. - Défavorise la poussée des mauvaises herbes entre les rangs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Temps d'installation long au départ. - Complique le sarclage des cultures. - Nécessite une eau de bonne qualité et un système de filtration performant. - Présente un débit irrégulier sur les terrains en pente (sauf si goutteur auto-régulant). - Nécessite de fractionner les apports. - Risque de rupture de capillarité dans le sol. - Risque d'obturation nécessitant un entretien et un nettoyage réguliers.
Aspersion	<ul style="list-style-type: none"> - Facile et rapide à installer. - Facile à déplacer d'une culture à l'autre. - Limite la présence des acariens qui sont gênés par une ambiance humide. - Peut servir de protection contre le gel des cultures. 	<ul style="list-style-type: none"> - Investissement de départ important. - Favorise le développement des adventices. - Mouille le feuillage (risque de maladies). - Sensible au vent. - Pertes en eau importantes par évaporation. - Débit et pression plus importants que dans un système de goutte-à-goutte. - Nécessite un système de filtration.

Source : Calcet et al., 2016.

I.4. Notion d'irrigation localisée

Comme la partie pratique de notre travail de recherche tourne autour du système d'irrigation goutte à goutte, on choisit d'aborder en détail cette notion d'irrigation localisée dans les lignes qui suivent.

On a montré, ci-haut, que cette méthode d'irrigation sous pression est appelée ainsi (irrigation localisée) car l'application de l'eau est localisée de façon à ce que l'infiltration ne se produise que sur une fraction réduite de la surface du sol, en l'occurrence la zone racinaire. L'eau est donc appliquée séparément à chaque plante en quantités réduites, précises et fréquentes au moyen d'un distributeur appelé goutteur. Toute installation d'irrigation localisée comporte plusieurs éléments que nous montrons ci-dessous.

I.4.1. Schéma descriptif d'un réseau d'irrigation localisée

Selon la FAO, un système intégral d'irrigation « par goutte à goutte » se compose des éléments suivants : « un ouvrage de tête, des conduites principales et secondaires, des bornes, des adducteurs et des conduites latérales équipées de goutteurs » (FAO, 2008).

-L'ouvrage de tête (contrôle/commande)

Son rôle est de mesurer ou de régulariser le débit ou la pression et d'améliorer la qualité physique de l'eau par filtration et parfois la qualité chimique par incorporation d'éléments fertilisants. Les équipements de l'ouvrage de tête dépendent des besoins du système. Il contient, habituellement, une vanne de sectionnement, des vannes de contrôle, une unité de filtrage, un injecteur d'engrais et d'autres petits accessoires.

-Les conduites principales et secondaires

Ce sont des tubes à paroi poreuse ou des gaines, soit des conduites étanches munies d'ajutages. Leur rôle est de conduire l'eau en tête des rampes, avec, s'il y a lieu, des organes de régulation de la pression. Ces conduites sont souvent enterrées, surtout si elles sont en polyvinyl-chlorure (PVC) rigide. Les conduites et les ajutages, qu'on peut trouver sur le marché, sont souvent en PVC ou en polyéthylène (PE). Il existe aussi des ajutages en acrylonitrilbutadiène-styrène (ABS).

-Les bornes

Les bornes sont branchées sur les conduites principales et secondaires et placées dans des boîtes de soupapes afin de les protéger. Elles sont munies de vannes de sectionnement de 2 ou 3 pouces, et peuvent fournir tout ou partie du débit alimentant les adducteurs.

-Les adducteurs

Les adducteurs sont généralement des conduites de 50, 63 ou 75 mm de diamètre. Au cas où les adducteurs sont en polyéthylène résine à haute densité (PEHD), on les laisse en surface et on les relie à la borne par des raccords de compression en polypropylène (PP).

-Les conduites latérales à goutteurs

Les conduites latérales à goutteurs sont branchées sur l'adducteur, à des positions fixes, avec de petits raccords en PP, et posées le long des rangées de cultures. Elles sont équipées de goutteurs ou d'autres distributeurs espacés régulièrement. Elles sont toujours en polyéthylène résine à faible densité (PEFD) noir flexible de 12–20 mm, PN 3 à 4 bars.

-Les goutteurs

Les goutteurs sont de petits distributeurs en plastique de haute qualité. Ils sont montés à intervalle régulier sur une rampe de polyéthylène, en ligne (en tranchant le tube pour insérer le goutteur manuellement ou à l'aide d'un instrument), ou en dérivation (par insertion dans la paroi du tube à l'aide d'un poinçon). L'eau pénètre dans les goutteurs sous une pression d'environ 1 bar et ressort sans pression sous forme de gouttelettes continues avec un faible débit de 1 à 24 litres/heure. Selon la manière dont ils dissipent l'énergie (pression), on distingue deux catégories de goutteurs :

- type à orifice, avec une section d'écoulement de 0,2 à 0,35 mm²;
- type à circuit long avec une section d'écoulement plus grande de 1 à 4,5 mm².

Il est à noter que les mécanismes et principes de fonctionnement des deux types sont différents. Par ailleurs, si certains types de goutteurs sont montés sur le tuyau en usine, d'autres peuvent être achetés séparément et montés sur le tuyau en fonction des besoins.

I.4.2. Les systèmes d'irrigation localisée existants en Algérie

A l'échelle mondiale, après les premiers travaux de recherche ciblant la création des systèmes d'irrigation à la goutte à goutte qui ont été effectués aux USA, en 1918, à l'université du COLORADO, d'autres essais de cette technique, entre 1927 et 1930, ont connu un échec sur le plan économique et technique pour plusieurs causes telles que la difficulté de vérification du bon fonctionnement du système. C'est en Palestine, vers 1960, que l'irrigation localisée a vu le jour grâce aux travaux du professeur C. S. BLASS qui développe la technique par la suite en France, à partir de 1970. (M. Messahel, 1988)

Les systèmes d'irrigation à la goutte à goutte ont été introduits pour la première fois en Algérie à partir de 1973, au niveau de la région de Lakhdaria avant d'être généralisés sur les différentes régions du pays.

En général, il existe deux grands systèmes d'irrigation localisée en Algérie qui sont :

I.4.2.1. Les gaines souples posées en surface du sol ou enterrées

A/ Les gaines poreuses

La paroi des gaines est constituée de polyéthylène fibreux ou poreux (porosité de quelques microns) l'eau s'échappe de toute la surface de la paroi.

Ce type de gaines est utilisé en surface ou dans certains cas enterrés à une profondeur variable selon le type de culture et de terrain. Il s'agit de gaines introduites en Algérie à des fins d'expérimentation mais leur utilisation n'est pas généralisée.

B/ Les gaines perforées

Ce sont des gaines en polyéthylène noir, mince à perforation latérale. On trouve :

- les gaines à simple paroi
- les gaines perforées à double paroi

Ces divers gaines sont relativement bon marché mais fragiles, d'où nécessitant de les remplacer assez fréquemment (par rapport aux rampes)

I.4.2.2. Les rampes

Elles peuvent être en surface ou enterrées. Ce sont des rampes en polyéthylène résistantes à des pressions de 2 à 4 bars, sur les quelles sont fixées par vissage ou par serrage des organes de distribution de l'eau, par points, par lignes ou par petites zones.

I.4.3. Avantages et inconvénients de l'irrigation localisée

I.4.3.1. Avantages du système d'irrigation Goutte à goutte

1. Économie d'eau

L'avantage principal de l'irrigation goutte à goutte est l'économie d'eau. En effet, l'eau d'irrigation est mieux utilisée en cette technique par rapport aux autres méthodes d'irrigation car la superficie plantée est partiellement humidifiée, mais précisément et avec une quantité d'eau contrôlée. L'eau étant transportée le long des tuyaux, on ne note pas de pertes par suintement. L'eau est distribuée de façon uniforme le long des rangées de culture. Ainsi, de grandes quantités d'eau d'irrigation sont économisées et la superficie irriguée peut être accrue avec le même volume mobilisé, ce qui permet un revenu supérieur par unité de volume d'eau.

On voit clairement cet avantage si on fait une comparaison entre ce type d'irrigation à l'irrigation par gravité où la dose reçue à l'amont du terrain est généralement différente de celle reçue à l'aval ou encore avec l'irrigation par aspersion qui fournit une bonne distribution de l'eau au champ irrigué et par conséquent le terrain se trouve arrosé en totalité. Le tableau ci-dessous extrait d'une étude publiée par l'INSID et élaborée par M. Kessira montre clairement ces écarts.

Tableau 02: Comparaison entre les apports en eau dans trois systèmes d'irrigation pour des besoins identiques

Pour les besoins identiques, des apports différents		
Irrigation traditionnelle	Irrigation sous pression	
100 litres	70 litres	40 litres
Gravitaire	Aspersion	Goutte à Goutte

On remarque donc que parmi ces trois types d'irrigation c'est le système goutte à goutte qui permet de faire les économies d'eau les plus significatives car il présente beaucoup moins de perte d'eau par évaporation ou par percolation.

2. Meilleures conditions pour la croissance des cultures

L'irrigation goutte à goutte favorise une meilleure réaction des cultures sur plusieurs niveaux. En effet, ce système d'irrigation caractérisé par un arrosage très fréquent et une diminution des pertes d'eau par évaporation ou par l'effet du vent assure une meilleure nutrition des plantes même dans les climats arides. Par ailleurs, l'irrigation par le goutte à goutte, qui ne mouille pas le feuillage des plantes, permet de contrôler les agents pathogènes qui se développent dans des sols totalement saturés. Elle permet par conséquent de réduire la fréquence des maladies des feuilles et des tiges, dues à l'excès d'humidité et d'éviter la nécrose des feuilles par le sel et les engrais contenus dans l'eau d'irrigation (éliminer les brûlures des feuilles).

3. Possibilité d'utiliser des ressources en eau salée

Le système goutte à goutte permet d'utiliser des eaux salées ou saumâtres dans l'irrigation sans risque de nuire aux plantes. Il permet de « maintenir de faibles tensions d'humidité du sol dans la zone racinaire de manière continue avec des applications faibles mais fréquentes. Les sels dissous s'accumulent à la périphérie de la masse de sol humide et les plantes peuvent facilement puiser l'eau dont elles ont besoin. Ceci permet l'utilisation d'eaux contenant plus de 3 000 mg/l de quantité totale de matière dissoute, ce qui serait impossible avec d'autres méthodes ». (FAO, 2008)

Il est certain que l'utilisation des eaux salées que favorise cette technique ne provoque pas de dangers sur la zone racinaire où la concentration en sel reste acceptable mais les sels accumulés autour de cette zone racinaire peuvent nuire aux plantes au cas de pluies faibles si la saison sèche est caractérisée par des températures élevée car la forte évaporation cause la formation d'une grande concentration de sels à la surface du sol. Par ailleurs, l'ajout des engrais à l'eau salée peut influencer négativement sur certaines cultures particulières car la concentration des sels augmente et peut atteindre des taux alarmants d'où la nécessité de prendre certaines précautions d'adaptation de la fréquence et du taux d'application des engrais.

4. Meilleure utilisation des engrais

Dans l'irrigation au goutte à goutte, les engrais sont apportés directement au bulbe humidifié en même temps que l'eau d'irrigation et cela permet de profiter le maximum des éléments nutritifs en diminuant leurs pertes et améliorant leur rentabilité car la totalité de l'engrais fourni est localisée au voisinage immédiat des racines. Le niveau élevé d'humidité

permanent dans la zone radiculaire, crée en plus des conditions favorables de dissociation et d'activité ionique. (F.A.O .1973)

L'expérience de BERNSTEIN & FRANCOIS (1973) explique clairement cet avantage à travers une comparaison qui révèle que la parcelle arrosée par aspersion recevait 30% d'engrais en plus et celle irriguée par gravité 51% d'engrais en plus que la parcelle irriguée par la méthode goutte à goutte.

Il est à noter que l'addition d'engrais à l'eau d'irrigation est une bonne chose pour des zones arides. La pluie ne suffit pas pour lessiver les engrais disposés au champ, dans le sol.

Par ailleurs, la technique de goutte à goutte permet et facilite d'ajuster les quantités d'engrais et d'eau apportées aux besoins variables des cultures au cours de la saison agricole.

5. Limitation du développement des mauvaises herbes

Les mauvaises herbes et les plantes adventices, en utilisant l'eau et les éléments nutritifs destinés à la culture, influent négativement sur cette culture et empêchent son développement. L'irrigation au goutte-à-goutte, en livrant l'eau directement aux plantes, laisse les interlignes secs et réduit la zone arrosée. C'est cet état de sécheresse du sol qui diminue le développement des mauvaises herbes au niveau des parcelles cultivées.

6. Exploitation des sols marginaux et difficiles:

La technique de goutte-à-goutte permet d'exploiter les sols marginaux, éloignées à cause du morcellement des terres, très caillouteux ainsi que ceux qui présentent des topographies variables grâce à son principe de fonctionnement qui consiste à livrer l'eau directement aux plantes. En général, le goutte-à goutte s'adapte facilement aux conditions topographiques et pédologiques sévères (terrains en pente raide, sols à faible capacité de rétention d'eau,..).

7. Economie d'énergie et de main d'œuvre

La technique de goutte-à-goutte est économique en énergie et en main d'œuvre. En effet, contrairement aux autres techniques d'irrigation sous pression comme l'aspersion, par exemple, le goutte-à-goutte demande une faible pression ce qui fait que sa consommation en énergie reste faible. Ses besoins en main-d'œuvre sont aussi faibles pour plusieurs raisons telles que l'installation fixe du système qui ne nécessite pas de changer les arroseurs ou les tuyaux après chaque application, l'automatisation du système qui est facile à gérer par des

contrôleurs automatiques, la surveillance restreinte de la culture ainsi que la lutte réduite contre les mauvaises herbes, etc.

Tous ces aspects positifs de la technique du goutte-à-goutte sont des preuves de l'efficacité de ce type d'irrigation et de son rôle important dans le développement des cultures et l'augmentation de leur rendement même si cette technique présente aussi quelques limites.

I.4.3.2. Les inconvénients du système d'irrigation goutte-à-goutte

Malgré ses nombreux avantages, le système d'irrigation goutte-à-goutte connaît certaines limites dont les principales sont les suivantes.

1. Colmatage et obturation des goutteurs

Le principal défaut des systèmes d'irrigation goutte-à-goutte est le colmatage mécanique ou l'engorgement des goutteurs. En effet, comme les passages des émetteurs sont très étroits (environ 1 mm), ils risquent d'être obturés à cause de plusieurs facteurs tels que les particules solides transportées par l'eau d'irrigation, les eaux calcaires (risque d'obturation par dépôt) ou celles contenant du fer (obturation par précipitation ou développement des algues de fer), des matériaux organiques en suspension (algues ou excréments visqueux de bactéries), les engrais imparfaitement solubles, ou encore à cause de la dégradation intérieure dans les réseaux anciens.

Pour éviter ce risque d'obstruction, il faut filtrer l'eau destinée à l'irrigation à l'aide d'un ou de plusieurs filtres afin de la rendre plus propre. Il est recommandé aussi d'ouvrir régulièrement (toutes les deux ou trois semaines) toutes les extrémités des tuyaux des rampes d'alimentation pendant 5 à 10 minutes. Le débit suffit souvent à entraîner les dépôts de particules solides ou de calcaire qui se seraient formés à faible débit ou pendant un arrêt à température extérieure élevée (MAILIARD, 1973).

Selon la F.A.O. (1973), dans le cas d'obturation organique, la pratique d'un excès de pression est très efficace pour déboucher les goutteurs. Cette pratique semblerait être inefficace et peut engendrer des dommages si l'obstruction résulte de dépôts calcaires (ROLAND, 1974). Un traitement chimique suivi d'une filtration suffit pour éloigner les algues.

Cependant, au cas où il est impossible de déboucher ou remplacer facilement les goutteurs obstrués par des dépôts calcaires, il est recommandé de nettoyer le réseau pendant une dizaine de minutes avec une solution acide (0,5 à 2 % de volume d'acide hydrochlorique 36%). (F.A.O.1973).

Par ailleurs, le nettoyage du réseau à l'aide de l'eau propre après la fertilisation, pendant 10 à 20 minutes, permet d'éviter la formation de dépôts d'engrais. Pour l'obturation causée par les bactéries, elle peut être évitée par l'utilisation de chlore (concentrations de chlore de 1 à 5 ppm) qui permet de détruire ces bactéries.

2. Coût élevé de l'installation du système

Le coût initial de l'installation d'un système goutte-à-goutte est assez élevé compte tenu de plusieurs paramètres tels que la multiplication des systèmes en fonction du nombre des parcelles à irriguer car les installations sont souvent fixes et difficiles à être déplacées, les charges annuelles compte tenu de la main d'œuvre nécessaire à la mise en œuvre de l'installation, le type d'installation (automatisée ou non), ainsi que le type de culture (l'irrigation goutte à goutte est très coûteuse pour les cultures maraîchères).

3. Accumulation de sel à la surface du sol

Le goutte-à-goutte favorisant l'utilisation des eaux salées provoque ainsi l'accumulation des sels autour de la zone racinaire ainsi qu'à la surface du sol sous l'effet de l'évaporation de la surface. Ces sels peuvent endommager les cultures, d'où la nécessité d'effectuer un lessivage du sol avant l'implantation de la culture suivante.

4. Exposition de l'installation aux dégâts causés par les animaux

Dans une installation goutte-à-goutte, les canalisations latérales et les goutteurs, qu'ils soient souterrains ou en surface, sont exposés aux dégâts causés par les animaux tels que les sangliers, les taupes, les rats ou les rongeurs qui peuvent détruire essentiellement les composantes minuscules du système. Ce qui s'ajoute aux aspects négatifs de cette technique d'irrigation.

5. Nécessité d'une gestion rationnelle de l'irrigation

Le goutte-à-goutte nécessite une gestion rationnelle de l'irrigation afin d'assurer un bon fonctionnement du système, l'application de la fertilisation et l'entretien de l'équipement de l'ouvrage de tête (filtres, injecteurs, etc.). (FAO, 2008).

II. Le pilotage de l'irrigation

II.1. Définition et objectif du pilotage de l'irrigation

On entend par « pilotage de l'irrigation » la gestion et la maîtrise de l'irrigation. Il permet, en effet, de régulariser la production en améliorant sa qualité, diversifiant les cultures et accroissant les rendements à un meilleur coût. L'agriculteur doit « maîtriser son irrigation » afin de satisfaire ces objectifs techniques (de meilleurs rendements) et économiques (à un coût optimal).

Cette maîtrise ou pilotage de l'irrigation nécessite donc de répondre préalablement à trois questions importantes : Quand irriguer ? Quelle est la dose d'irrigation à apporter ? Et comment apporter cette dose ?

La première question prend en charge le facteur « temps » pour savoir les moments appropriés à l'irrigation tout en tenant compte des :

- besoins en eau des plantes.
- réserves en eau dont les plantes peuvent disposer.
- incidences du déficit en eau.

Quant à la deuxième question, il s'agit de la notion de « dose » ou « quantité ». Cela permet par conséquent de déterminer les doses d'irrigation qu'il faut apporter en complément.

Pour la troisième question, il s'agit de « la manière » d'irriguer. Comment apporter la dose d'irrigation appropriée dépend bien évidemment du mode d'irrigation, du type de sol et de la nature des cultures à irriguer.

Par ailleurs, si cette dernière question « Comment » concerne la manière de réaliser les apports avec un matériel bien déterminé constituant le mode d'irrigation, le couple « dose – fréquence » répond aux deux premières questions « quand et combien ».

L'objectif de répondre avec précision à ces questions consiste à garantir un potentiel de production quantitatif et qualitatif à moindre coût en évitant tout apport d'eau inutile ou encore nuisible.

Il est clair donc que les réponses à ces trois questions nécessitent la combinaison de multiples facteurs qui, selon leurs propriétés et les objectifs fixés (coût, confort, précision), donnent lieu à des solutions différentes. (Chol et Tron ,1999).

L'objectif principal du pilotage de l'irrigation, lorsque la production maximale est obtenue sans contrainte d'alimentation en eau, est d'éviter les stress hydriques au long du cycle végétatif de la plante. Il faut donc répartir les irrigations sur l'ensemble du cycle de culture en respectant le niveau de stress admissible (Ruelle et al, 1995).

II.2. Les méthodes de pilotage de l'irrigation

A travers le temps, plusieurs techniques et méthodes de pilotage de l'irrigation ont été élaborées et développées en vue d'assurer une meilleure gestion des irrigations surtout dans les climats arides et semi-arides. Trois grandes catégories de méthodes sont utilisées pour le pilotage de l'irrigation dont l'une est liée aux plantes, l'autre au sol et la troisième à l'atmosphère.

II.2.1. Les méthodes indicatrices de l'état hydrique de la plante

Plusieurs études concernant l'alimentation en eau des cultures et ses conséquences sur le fonctionnement des végétaux, requièrent le contrôle et le suivi de l'état hydrique de celles-ci au moyen d'indicateurs appropriés. Ces indicateurs constituent des outils intéressants et essentiels pour contrôler et piloter les irrigations dans le but d'une meilleure gestion de l'eau.

Le bilan d'eau dans la plante dépend de son environnement (climat, sol). Le climat détermine la demande instantanée en eau, le sol évolue à une vitesse beaucoup plus faible mais il limite la disponibilité en eau. L'état hydrique d'une plante évolue donc en fonction du climat et du sol.

Il existe plusieurs méthodes de contrôle et de suivi de l'état hydrique de la plante, les plus utilisées sont :

II.2.1.1. La teneur en eau du végétal

La teneur en eau relative mesure l'état d'hydratation de la plante par rapport à la teneur en eau à la saturation hydrique considérée comme l'optimum fonctionnel. Ce dernier est obtenu en réhydratant l'échantillon afin qu'il atteigne la saturation hydrique. Cet indicateur est

bien relié à l'état physiologique de la plante notamment à la photosynthèse. Chez de nombreuses espèces, la teneur en eau relative à des stades clés du développement a pu être reliée au rendement. Cette technique est simple et ne nécessite pas d'équipements spécifiques. On peut mesurer cette teneur à partir de l'une des deux grandeurs suivantes :

a- Le contenu en eau (AWC) ou l'humidité pondérale et la teneur relative en eau ou humidité spécifique (HS) :

$$AWC = \frac{MF-MS}{MS} \dots\dots\dots(1)$$

Avec :

$$HS = \frac{MF-MS}{MS} \dots\dots\dots(2)$$

MF : masse de la matière fraîche

MS : masse de la matière sèche

b- Le contenu relatif en eau :

$$RWC = \frac{MF-MS}{Msat-MS} \dots\dots\dots(3)$$

MF : masse de la matière fraîche

MS : masse de la matière sèche

Msat : est la masse fraîche totale à pleine turgescence.

La meilleure référence est la teneur en eau à la turgescence et on préconise donc l'utilisation de la teneur relative en eau « RWC » comme indicateur de déficit hydrique. Afin de déterminer le « RWC », on mesure les masses humides puis on détermine les masses sèches, après passage à l'étuve. Pour obtenir la masse à la turgescence, on laisse s'imbiber le morceau de feuille étudié dans de l'eau. Cela permet d'obtenir la teneur en eau maximale.

II.2.1.2. Le potentiel foliaire

Comme la teneur en eau relative, le potentiel hydrique foliaire est une méthode destructive. Il indique l'état énergétique de l'eau dans la plante. Il peut être mesuré par la méthode de « la chambre de pression » appelée « chambre de Scholander, 1964 ». En effet, il

suffit de mettre sous pression une feuille dans une chambre étanche en ne laissant sortir que le pétiole pour pouvoir déterminer la pression dans la chambre pour laquelle on voit apparaître un ménisque à l'extrémité du pétiole, on estime alors que la pression dans la chambre est égale au potentiel de l'eau dans la feuille exprimé en « Bar » ou en « MPa ».

Le potentiel hydrique foliaire se mesure souvent à deux moments de la journée :

- à l'aube, le potentiel hydrique foliaire atteint sa valeur maximale, la plante est alors à turgescence maximale, il est un indicateur de l'équilibre entre le sol et la plante,
- au zénith solaire, le potentiel hydrique foliaire atteint sa valeur minimale, il est un indicateur de l'état hydrique de la feuille et dépend notamment de la transpiration du végétal.

Quelle que soit l'heure de la mesure, une chute de ces potentiels est révélatrice d'une diminution de la quantité d'eau au sein du végétal (Dutremée 1995, in Foucher 2003).

Le potentiel foliaire est traduit donc par l'état de liaison de l'eau à l'intérieur des tissus végétaux. Quand sa valeur absolue est faible (de 1 à 5 bars) la plante transpire sans difficulté, mais quand sa valeur augmente (au-delà de 10 bars) des mécanismes de régulation provoquent la fermeture des stomates.

II.2.1.3. La résistance stomatique « R_s »

La résistance stomatique varie en fonction de très nombreux facteurs externes (lumière, état hydrique de l'air, température...) et interne (acide abscissique, état hydrique de la feuille, historique de la plante...). Lors d'un déficit hydrique, les stomates se ferment en recevant un signal d'origine racinaire (Davies et Zhang, 1991) ou à cause d'une trop faible pression de turgescence (Collatz et al. 1991). Lorsque l'absorption en eau est trop faible, l'accroissement de la résistance stomatique est le plus souvent le seul moyen rapide que le végétal possède pour réduire sa transpiration. Cette grandeur pourrait donc apparaître comme un indicateur de stress hydrique de référence si sa mesure était aisée. En pratique, un poromètre compare la diffusion de l'eau à la surface de la feuille à celle obtenue sur une surface dont les caractéristiques sont connues (plaque d'étalonnage). L'utilisation du poromètre à diffusion pose plusieurs problèmes. (Nicolas, 1986) évoque non seulement des erreurs d'ordre biologique dues à la variabilité dans l'espace et dans le temps (éclairage du couvert, âge de la feuille) de la résistance stomatique, mais aussi les erreurs d'ordre technique

(étalonnage). D'une manière plus originale, (Jones, 1999) arrive à mesurer la conductance stomatique d'une feuille par thermométrie infrarouge.

II.2.1.4. La température foliaire

La température foliaire se trouve liée à de très nombreux phénomènes fondamentaux : réactions chimiques, croissance et développement, échanges sous différents modes d'évaporation, ... etc.

Une mesure de la température du couvert pendant toute une journée bien ensoleillée donne une courbe convexe commençant par un minimum aux premières heures de la journée (l'aube) et finissant aussi après le coucher du soleil. Le maximum est atteint au midi solaire.

Cette température n'est que les radiations émises par le couvert dans l'infrarouge thermique, captée avec un radio-thermomètre qui la traduit en terme de température est un indicateur intéressant, compte tenu du rôle central joué par les stomates dans le contrôle de la perte en eau.

L'évaporation de l'eau au niveau des feuilles refroidit ces dernières, mais quand, en réponse à une sécheresse les stomates se ferment, la transpiration baisse et la température de la feuille augmente. Ce changement de température étant associé à une variation de l'émission de rayons infrarouges peut être mesuré à distance à l'aide d'un radio – thermomètre portable.

II.2.1.5. Etat de développement du couvert foliaire

La croissance et/ou la régression des surfaces foliaires de certaines espèces évolue de façon marquée en fonction de l'état hydrique des plantes.

Dans la phase d'établissement du couvert végétal, il est possible d'appréhender le développement foliaire par l'évolution de l'interception de l'énergie lumineuse; elle est obtenue par la différence entre le rayonnement mesuré, dans une bande de longueurs d'ondes donnée, par un capteur placé au sommet de la végétation et un autre au sol, au sein de la culture, l'efficacité d'interception « E_i » est calculée en faisant le rapport entre cette différence et l'énergie incidente au sommet du couvert (Merrien et al, 1995).

II.2.1.6. Micro variation de diamètre d'un organe

La mesure du diamètre des tiges est un outil efficace d'aide à la décision pour le déclenchement de l'irrigation, car le stress hydrique a un effet sur l'évolution du diamètre des tiges ; les variations sont de l'ordre du micron (Lecoeur, 1994; in Abbadi et al., 1997)

L'évolution en continu des gains ou des pertes en eau peut être réalisée in situ en mesurant avec précision, par micrométrie, à l'aide de capteurs enregistrant les variations de leur diamètre, les contractions d'organes comme la tige ou le fruit. Le traitement informatique des données recueillies permet de déterminer à quel moment la plante subit une contrainte pouvant affecter la production et de déclencher alors un apport d'eau.

L'avantage de cette méthode est qu'elle s'appuie sur des mesures automatisables non destructives. L'inconvénient est que son application nécessite une détermination préalable de la valeur seuil correspondant à l'apparition de la contrainte hydrique.

II.2.1.7. Flux de sève

Les méthodes thermiques de mesure du débit de sève brute sont basées sur l'interaction entre la circulation d'eau et la diffusion de chaleur, afin d'évaluer la consommation d'eau des couverts végétaux. La mesure du flux de sève est délicate. Plusieurs méthodes existent, la première consiste à déterminer la vitesse de la sève en observant la variation de température d'une aiguille chauffante insérée dans la tige. Une relation, indépendante de l'espèce, est établie entre la température de l'aiguille et la vitesse de la sève (Closs 1958). Une autre méthode, plus récente, calcule le débit de sève directement à partir des bilans des flux de chaleur issus d'un ruban chauffant entourant le tronc (Valancogne et Nasr 1989). Ce système doit être très bien isolé des éléments extérieurs pour éviter des perturbations. Lorsque la plante est en déficit hydrique, on observe une diminution du flux de sève. (Cohen et al. 1993) montrent ainsi expérimentalement sur les noyers que le flux de sève des sujets soumis à un déficit hydrique est significativement plus faible que celui des sujets en confort hydrique. La mesure des flux de sève nécessite une grande précision technique, l'installation des capteurs est souvent délicate lorsque les diamètres de tige sont petits, cas souvent rencontrés pour les plantes en pots. Pour certaines espèces comme le forsythia, dont les tiges sont creuses, cette technique est inadaptée. Par ailleurs, l'étalonnage des capteurs est difficile et cette mesure n'est qu'une approche qualitative de l'évolution du flux de sève.

II.2.2. Les méthodes indicatrices de l'état hydrique du sol

Au champs, deux mesures permettent d'évaluer la disponibilité de l'eau dans le sol : La teneur en eau volumique « θ_v », et l'énergie avec laquelle l'eau est retenue dans le sol : Le potentiel ou tension « ψ_s ».

Ces mesures sont, généralement, faciles à réaliser et suffisamment fiables pour une conduite efficace de l'irrigation. Selon l'appareil utilisé, elles peuvent compléter et même remplacer la méthode du bilan hydrique qui basée essentiellement sur les données météorologiques.

II.2.2.1. La teneur en eau du sol

Pour mesurer la teneur eau d'un sol, il faut mesurer son humidité à plusieurs profondeur et en répétant les mesures à différentes dates, ce qui permet le suivi de l'évolution de l'état hydrique du sol au cours du temps.

Cette grandeur donne la quantité d'eau présente dans un volume unitaire (généralement, m³) de sol. Elle est accessible par différentes mesures :

- a. Mesure destructrice (ou directe) : Gravimétrie.
- b. Mesure non destructrice (ou indirecte) : Sonde à neutron, TDR....

a. Mesure destructrice (ou directe)

Cette méthode de mesure permet l'obtention des teneurs en eau pondérales, la méthode la plus utilisée est la méthode « gravimétrique ». Elle consiste à prélever des échantillons de sol à l'aide d'une Tarière ou Cylindre, à peser une première fois ces échantillons à l'état humide et une seconde fois après passage à l'étuve pendant vingt-quatre heures à une température de 105°C.

C'est une méthode simple par le matériel qu'elle exige (Tarière ou Cylindre, Boîte, Étuve), mais elle est longue et destructrice. On peut prélever des échantillons de sol qu'une seule fois à un endroit donné, de plus elle impose de mesurer la densité apparente pour avoir l'humidité volumique, cette dernière reste une opération délicate par le risque de compression du sol lors de l'échantillonnage d'où l'estimation de la densité.

Cependant, la méthode gravimétrique reste une méthode de référence par rapport à laquelle, toutes les autres sont calées.

b. Mesure non destructrice (ou indirecte)

Pour réaliser ces mesures dans le sol en place, il existe plusieurs méthodes qui nécessitent un étalonnage au préalable pour établir la relation propriété–humidité. Ces mesures permettent d'obtenir la teneur en eau du sol à des horizons profonds, parmi ces méthodes :

La méthode neutronique de profondeur « sonde à neutrons ».

Les mesures capacitives ou, plus récemment, la méthode 'TDR' : Time Domain Reflectometry (Réflectométrie dans le domaine temporel).

Remarque : Pour mettre en œuvre la mesure neutronique, il faut d'abord étalonner la sonde à neutron dans le sol étudié, c'est-à-dire, établir la relation de référence entre comptage neutronique et humidité volumique. La mesure neutronique est fiable pour des profondeurs supérieures à 20 cm. Les mesures de surface ne sont pas effectuées dans une zone homogène.

II.2.2.2. Le potentiel hydrique

Le potentiel hydrique « ψ » utilisé par les Agronomes et les physiologistes traduit les faits des différentes forces de liaison (osmotiques, capillaires ...) existant entre les molécules d'eau et les constituants du sol ou de la plante. Il peut être défini de façon schématique comme le travail qu'il faudrait fournir à une unité de masse d'eau située en un plan du système pour la faire passer de l'état d'eau liée à un état de référence correspondant à celui de l'eau libre à la même température et à la même pression atmosphérique. Si l'on adopte la valeur « 0 » pour l'état de référence tous les autres potentiels caractérisant l'eau liée seront négatifs, l'eau circulera alors dans le sens des potentiels décroissant.

A une même teneur en eau dans les sols, ces derniers présentent des comportements hydriques différents, et ceci est dû à la constitution de chaque type de sol, un sable à 10 % d'humidité paraît humide au toucher alors qu'une tourbe semble très sèche, des végétaux présents sur cette tourbe à 30 % d'humidité seraient incapables d'en extraire l'eau très fortement retenue.

La notion d'humidité est insuffisante pour traduire le comportement hydrique, il faut faire intervenir la succion exercée par le sol, ceci conduit à introduire une autre notion : le potentiel matriciel (Vilain, 1997).

Les forces de liaison de l'eau et du sol sont donc caractérisées par une variable appelée communément tension ou succion, exprimée en unité de pression (pascal, bars, cbars, hauteur d'eau équivalente 'h' en centimètre...).

Le potentiel du sol est approché par mesure, au moyen de « tensiomètre », de la pression de succion exercée sur l'eau par le sol. Cet instrument permet la mesure de la charge totale à une profondeur donnée. L'observation d'un profil de charge permet d'estimer le sens du flux d'eau dans le sol.

Cependant, les tensiomètres ne peuvent permettre des mesures au-delà de -0.1 MPa, alors que théoriquement on peut observer des charges inférieures à -1.0 MPa.

La mesure de cette tension peut être réalisée par des appareils composés d'un organe de mesure qui traduit la tension de l'eau dans le sol, comme : les tensiomètres, et les sondes 'WATERMARK'.

II.2.2.3. Relation pF humidité

Le potentiel de l'eau varie de 0 en sol saturé, à 10 000 000 cm en sol sec, vu les valeurs élevées possibles, par analogie avec le pH, on a convenu de l'exprimer par son logarithme décimal appelé pF.

Le pF se définit comme le logarithme décimal de la valeur absolue du potentiel de l'eau du sol, celui-ci étant mesuré en cm d'eau, on a donc :

$$pF = \log_{10} h \dots \dots \dots (4)$$

Il n'existe pas de relation générale entre le pF et l'humidité du sol, on peut obtenir qu'une relation expérimentale.

Les courbes « PF-humidité » (Figure 05) dépendent de la constitution des sols, elles présentent cependant une forme analogue, elles sont d'une importance fondamentale car elles expriment l'influence de la structure, de la porosité, de la distribution des pores et de l'absorption sur l'état hydrique du sol, à leur tour, cet état et ses variations dans le

profil déterminent la direction et influencent le régime du mouvement de l'humidité du sol et du prélèvement en eau par les plantes.

Ces courbes diffèrent selon que l'on soumet le sol à un dessèchement ou une humectation, à un même pF (même rétention), l'humidité est plus faible lors de ré-humectation que du dessèchement (Vilain, 1997).

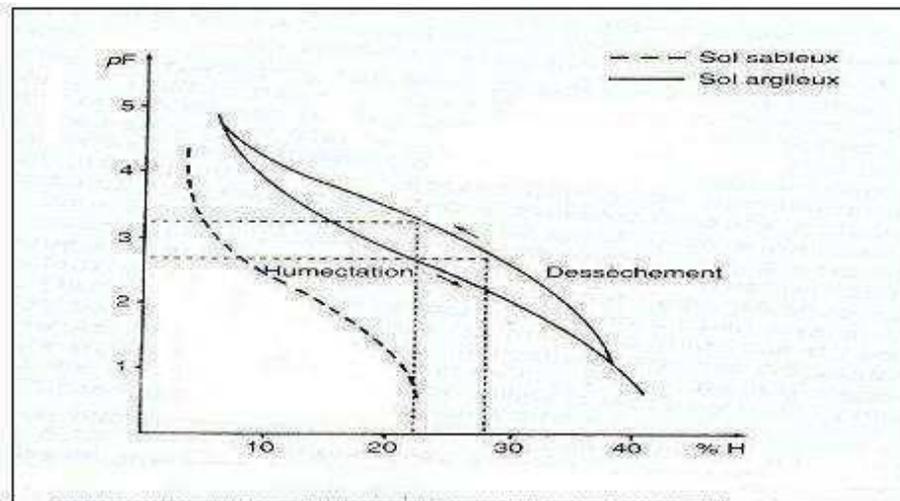


Figure 05. Relation pF-Humidité du sol (vilain, 1997)

II.2.3. Méthodes liées à l'atmosphère

On peut tirer plusieurs données et informations à partir du bilan radiatif et du bilan d'énergie. Par exemple, on peut avoir un indicateur « H/Rn » qui serait utilisé pour l'avertissement dans le pilotage des irrigations à partir de la détermination du flux de chaleur convective (H) et le rayonnement net « Rn ».

Tableau 03 : Outils de contrôle de l'état hydrique de la plante

Indicateurs (Méthodes)	Avantages et inconvénients	Développement actuel	Appareil de mesure	perspectives
Potentiel hydrique foliaire	- Bon indicateur de l'état hydrique. - Contrainte de mise en œuvre.	-Outil très utilisé au niveau de la recherche (contrôle de l'état hydrique des plantes).	-Chambre à pression.	-Outil de diagnostic agronomique. -Possibilité de mettre au point un matériel moins onéreux.
Température foliaire	-Mesure simple et intégratrice de l'état du couvert. -Conditions météorologique contraignantes et périodicité.	-Les seuils des écarts de température cumulés sont établis pour plusieurs cultures (Maïs, Soja, Blé...)	-Radio-thermomètre.	-Meilleure prise en compte des fluctuations du climat. - Etablissement de nouveaux indices thermiques.
Micro-variation de diamètre d'un organe	-Système automatisé facilite la mise en œuvre sur espèces ligneuses. -Nécessite de compléter le diagnostic.	-Sur arbres fruitiers pour piloter l'irrigation dans un but de régularisation de la qualité de la récolte	- Bio-programmateur.	-Diagnostic d'autres limitations que celles liées à l'eau. (par ex : Nutrition minérale)
Etat du développement du couvert végétal	-Mesure simple et rapide, renouvelable au cours du cycle. -Outil de diagnostic, plus que de conduite.	-proposée sur tournesol et en cours d'établissement sur d'autres cultures.		-Définition des états optimaux de croissance pour différentes espèces génotypes.
Flux de sève	-Délicate à mettre en œuvre.	-Possible sur espèces ligneuses.		Automatisation possible.

Source : Merrien et al., 1995.

CHAPITRE .II

*Aperçu général sur la
modélisation du Bilan Hydrique*

Chapitre II : Aperçu général sur la modélisation du Bilan Hydrique**1- Définition du bilan hydrique**

Selon Perrier (2002), le bilan hydrique consiste en une comparaison entre les réserves, les apports et les pertes en eau d'un système. Il signifie l'analyse de la variation de stock d'eau d'un système (ΔS), résultant de la somme algébrique des flux d'eau ($\Delta \Phi$) entrant (positif pour le système) ou sortant (négatif pour le système) ; il s'écrit :

$$(\Delta S) = \sum \Delta \Phi_i \dots\dots\dots(5)$$

En agronomie, il s'applique principalement à un sol, ramené à l'unité de surface et de profondeur donnée ; ainsi, le bilan hydrique du sol s'exprime en stock d'eau (kilo ou mètre cube d'eau/m² de sol) ou, ce qui est équivalent, en hauteur d'eau classiquement exprimée en millimètres (1 mm d'eau équivalant à 1 kg/m² d'eau, unité utilisée pour les pluies).

Le bilan hydrique du sol permet donc d'évaluer les variations des réserves d'eau disponibles dans le sol pour les plantes et dépend essentiellement du climat qui détermine à la fois les apports (pluies et autres précipitations) et les pertes par évaporation, dites « évapotranspiration » (cumul de la transpiration des plantes et de l'évaporation du sol).

Le suivi de ce bilan donne l'évolution du stock d'eau de la couche de sol exploitée par la culture, qui dépend aussi des propriétés du sol ; celles-ci modulent la capacité de stockage, en surface le ruissellement, et en profondeur les échanges vers les nappes. Les échanges profonds se font soit dans un sol plus ou moins saturé - écoulement d'eau vers la profondeur (drainage) ou réalimentation à partir de la nappe (remontées capillaires) -, soit en sol non saturé (diffusion de l'eau vers la zone racinaire ou vers les zones plus profondes du sol). La capacité au champ d'un sol représente la valeur limite entre sol saturé et non saturé.

2- But du bilan hydrique

Le but principal du bilan hydrique est de déterminer l'état des réserves en eau du sol. Il est donc essentiel pour définir à chaque instant les réserves disponibles pour les plantes par unité de surface au sol et pour une profondeur donnée. En effet, l'estimation de l'ETR sera possible et par conséquent on peut comparer l'état de satisfaction des besoins en eau de la plante.

Il est évident que le bilan hydrique du sol influe sur l'état hydrique des plantes. Il permet de déterminer les apports par irrigation nécessaires afin de ramener l'eau utile pour les plantes

à la valeur de la réserve utile maximale, situation qui conduit en général à la meilleure production (Larousse Agricole, 2002). Autrement dit, c'est en agissant sur les différents termes du bilan hydrique qu'il est possible d'influer sur l'état hydrique, l'arrosage vise à éviter que la dégradation du bilan hydrique n'affecte l'état hydrique au point de pénaliser la production, il s'agit là d'une conception traditionnelle du rôle de l'arrosage (Urban, 1997).

3- Principe du bilan hydrique

Le bilan hydrique résulte de la loi de la conservation de la matière appliquée à l'eau contenue dans le sol. En effet, l'application de cette loi, qui confirme que la matière ne peut être détruite ni créée pendant une transformation, sur l'eau contenue dans le sol donne que la teneur en eau d'un volume de sol donné ne peut diminuer à moins que l'eau ne soit transportée vers l'atmosphère par évapotranspiration ou en profondeur par drainage et ne peut augmenter sans un apport venant de l'extérieur tels que l'infiltration ou la remontée capillaire (Hillel, 1980).

4- Equation du bilan hydrique

Selon la loi de conservation expliquée ci-dessus, entre deux dates quelconques, la masse d'eau présente dans le système sol-plante-atmosphère reste conservée. En effet, cette eau est répartie entre l'eau réservée dans le sol et la plante d'une part, et les flux entrant et sortant de cette réserve d'autre part. Autrement dit, dans un volume donné de sol, la variation du stock d'eau du sol (ΔS) entre deux dates est égale au bilan de ces flux ou la différence entre la quantité d'eau ajoutée et la quantité d'eau extraite, au cours de la même période. La figure 06 présente l'ensemble des composantes du bilan hydrique.

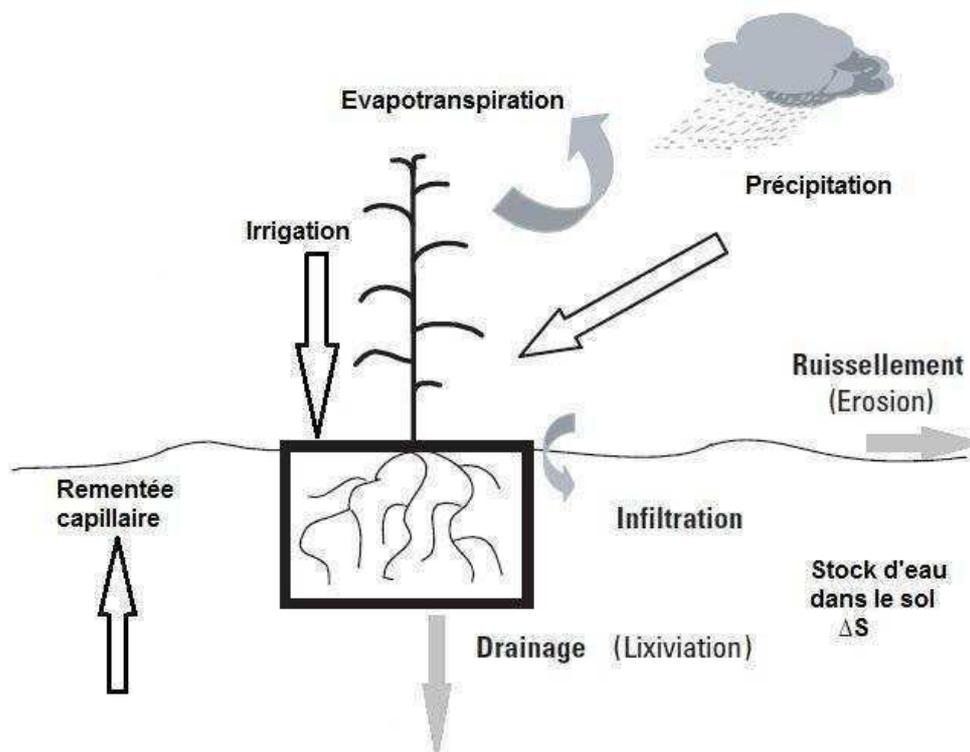


Figure 06. Schéma du bilan hydrique d'une zone racinaire.

En effet, l'équation du bilan hydrique s'écrit donc comme suit :

$$\Delta S = P + I - ETR - D + R_c \pm R \quad \dots\dots\dots(6)$$

Avec,

P : précipitations reçues entre les deux dates ;

I : irrigations ;

ETR : évapotranspiration réelle ;

D : drainage sous la zone de sol exploitée par la culture ;

R_c : remontée capillaire

R : pertes en eau par ruissellement de surface ;

ΔS : variation du stock d'eau du sol pendant la période considérée (aux échelles pertinentes pour l'analyse des systèmes de culture, les variations de stock dans les plantes sont négligeables).

Il est à noter que les transferts latéraux dans le sol (dans une pente par exemple) sont négligés pour ne considérer que des transferts verticaux. Le volume de sol sur lequel est fait le bilan est défini par la profondeur du système racinaire.

Par ailleurs, une formule simplifiée de l'équation du bilan hydrique est préférée en pratique. Dans cette formule simplifiée, les termes d'écoulement latéral et de remontées capillaires « Rc » sont négligés. Elle est écrite comme suit :

$$\Delta S = P + I - ETR - D \quad \dots\dots\dots(7)$$

Dans ce bilan, « D » représente un terme résiduel qui permet de ramener le stock d'eau à la réserve utile « RU », quand « ΔS » conduirait à dépasser cette valeur ; dans le cas contraire, le terme « D » est nul.

On néglige souvent les faibles pluies et on se contente de comptabiliser en pertes les apports qui excèdent la capacité du réservoir sol car il est difficile d'évaluer la pluie efficace compte tenu des pertes par ruissellement ou par drainage.

5- Evaluation et estimation des composants du bilan hydrique

En surface, les apports en eau au sol viennent des précipitations « P » ou de l'irrigation « I ». Les quantités de ces deux composantes sont relativement faciles à mesurer, bien qu'il faille tenir en compte la variabilité spatiale de distribution. Une partie de ces apports s'infiltré dans le sol alors qu'une autre partie ruisselle à la surface du sol. La quantité qui ruisselle ou le ruissellement « R » est souvent (ou devrait être) faible sur les terres de cultures, surtout sous irrigation de sorte qu'elle est souvent négligeable en comparaison avec les composants principaux du bilan hydrique (Hillel, 1980).

Pour estimer les flux sous la zone racinaire (drainage, remontées capillaires), on utilise généralement des tensiomètres placés en profondeur. Cette technique est relativement complexe et délicate. Si on ne possède pas cette technologie, on peut plus opter pour une autre méthode plus simple qui consiste à utiliser une tarière pour prélever du sol et mesurer son humidité pondérale après séchage à l'étuve. On ne mesure alors que des variations d'humidité dans le profil.

Par ailleurs, la composante du bilan hydrique la plus difficile à mesurer directement est l'évapotranspiration « ETR ». Pour obtenir « ETR » à partir du bilan hydrique, il faut être en possession des mesures précises de tous les autres termes de l'équation (Hillel, 1980).

Il existe plusieurs méthodes qui permettent l'estimation de l'évapotranspiration de référence « ET₀ » dont certaines se basent sur des formules empiriques (à partir du rayonnement ou des températures) alors que d'autres ont une base physique et se fondent sur le bilan de masse telles que les formules de « Penman » et « Penman – Monteith » (1965).

Pour les formules empiriques fondées sur la température on peut citer les formules de Thornthwaite (1948) et de Blaney et Criddle (1950) au moment où la formule de Jensen (1974) est la fameuse formule empiriques fondée sur le rayonnement.

6- Modélisation du bilan hydrique

Le bilan hydrique est fortement dépendant des conditions pédo-climatiques. Un recours à la modélisation est donc nécessaire pour pouvoir extrapoler des résultats expérimentaux obtenus dans une situation donnée, et appréhender les risques liés aux aléas climatiques.

La modélisation a un but principal qui base essentiellement sur la gestion de la réserve en eau dans la zone racinaire du sol en fonction des précipitations (offre) et de l'évapotranspiration des cultures (demande). En premier lieu elle assure une gestion de la réserve en eau du sol en fonction du temps, d'autre part, une régulation de l'ETR par rapport à son niveau maximal (cité par Delli., 2001).

7- Principe de la modélisation du bilan hydrique

L'estimation de l'évapotranspiration réelle « ETR » par modélisation du bilan hydrique, demeure un des moyens les plus utilisés pour évaluer la demande eau des cultures à différentes échelles d'espace et de temps. Face à la nécessité d'avoir à gérer un volume d'eau limité, les chercheurs ont été amenés à proposer des modèles qui simulent le développement de la plante et son utilisation de l'eau. Un compartiment (Module) hydrique et un compartiment croissance et développement ont été défini (in Fillali, 2003). Le module « Sol » de ces modèles est de complexité variable, il peut reposer sur des bases mécanistes, dans ce cas l'équation de Richards (1930) est utilisée pour simuler les transferts d'eau. La complexité d'une telle approche, en outre exigeante en paramètres, trouve une bien meilleure justification

pour simuler des phénomènes de type événementiel. Les données utilisées étant conformes (pluie horaire par exemple) à l'usage de l'outil numérique. Notons toutefois que le modèle d'extraction racinaire repose sur l'analogie électrique (Antonino, 1992 in Filali., 2003) ou une réduction « seuillée » de l'ETM (Feddes, 1978 in Filali 2003), il demeure hélas encore empreint d'empirisme. Quant au ruissellement « R » il n'est généralement pas pris en compte (Mailhol, 2001). L'intérêt d'utiliser l'équation de Richards est de pouvoir simuler les remontées capillaires. Ce dernier point est le reproche majeur formulé à l'encontre de cette catégorie de modèles dits « capacitifs » (Mailhol, 2001). Les modules « sol » de type capacitif se fondent sur le concept de réservoir, le sol est décomposé en un ou plusieurs réservoirs de capacité fixe ou variable avec le pas de temps. Ce dernier étant généralement journalier, les transferts d'eau en profondeur s'effectuent par débordement successif des différents réservoirs, la capacité maximale d'un réservoir est régie par un paramètre caractérisant le sol à la profondeur considérée, les racines prélèvent l'eau dans le (s) réservoir (s), selon un modèle de répartition pré - défini (Feddes et al, 1978, cité par Mailhol, 2001). Ces modèles se distinguent, par ailleurs, dans la façon de traiter le problème relatif aux changements à l'interface avec l'atmosphère notamment concernant l'évaporation du sol.

8- Présentation du modèle du bilan hydrique « PILOTE »

Le modèle PILOTE permet de simuler le bilan hydrique, l'indice foliaire (LAI) et, de calculer le rendement en matière sèche totale (MST) et en fruit (ou grain) et ce, pour un calendrier d'arrosage prés défini ou selon une stratégie d'irrigation. Cette stratégie repose sur l'adoption d'un seuil d'épuisement de la réserve en eau du sol, de dates de début et de fin des apports d'eau et de doses (mm). PILOTE permet ainsi d'associer un volume d'eau à un niveau de rendement dans un contexte pédoclimatique donné. Il requiert des données climatiques au pas de temps journalier: Pluie, évapotranspiration de référence (ET_0), rayonnement global et température moyenne. Il nécessite aussi des informations relatives à la plante (date de semis, croissance racinaire, stades physiologiques, efficacité de conversion) et au sol (réserve hydrique initiale, teneur en eau volumique à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent). Ci-dessous le principe et les différents modules du modèle PILOTE selon la notice du modèle PILOTE d'après Mailhol, 2001.

8-1- Principes du modèle

- **Le module sol**

Le module sol régit les transferts d'eau au pas de temps journalier (j) au moyen de 3 réservoirs (Figure 07). Le paramètre fondamental de ce modèle est la réserve utile RU exprimée en mm/m. On définit la réserve utile comme la différence entre le stock en eau du sol à la capacité au champ (état du sol après arrêt du drainage) et le stock en eau au point de flétrissement permanent. Le point de flétrissement permanent correspond au stade à partir duquel l'eau n'est plus extractible par la plante. Il est fréquemment assimilé à la teneur en eau à pF 4.2: ($pF = \log_{10}|h|$).

Un réservoir superficiel (R1) à profondeur fixe P_s ($P_s = 0.1$ m) gère l'évapotranspiration après un apport d'eau. Il a une capacité maximale $R1_{max} = RU P_s$. Le réservoir superficiel alimente par drainage (d1) le réservoir sous-jacent R2

$$d1(j) = \text{Max} \{0 ; R1(j) - R1_{max}\} \quad (7)$$

Evolutif avec l'enracinement dont la profondeur est simulée selon l'expression:

$$Pr(j) = Pr(j-1) + V_r \quad (8)$$

où V_r est la croissance racinaire en m/jour. Dans un certain nombre des modèles la croissance racinaire est rattachée à la thermique. Dans PILOTE l'accroissement racinaire du jour considéré est calculé sur la base du minimum entre l'accroissement thermique (m/d°jour) et l'accroissement imposé (en m/jour). En système conventionnel le modèle fait en sorte que l'atteinte de la profondeur maximale coïncide avec celle du développement foliaire maximal, la plante à ce stade mobilisant l'énergie disponible à développer de la matière sèche aérienne. Cependant, compte tenu que les conditions de sol (degré de compaction) agissent également sur la progression racinaire il apparaît souhaitable dans certains cas de privilégier l'option permettant de favoriser V_r en m/J (cas de sols très compactés, densité apparente très élevée).

L'enracinement peut atteindre la profondeur maximale P_x . Le paramètre P_x est une caractéristique propre de la culture dans l'hypothèse où le contexte de sol n'impose pas de limitation physique à l'enracinement (ex: enrochement, nappe, couche très compactée etc.). La croissance racinaire est de type linéaire au-delà d'une période de mise en place du système racinaire fixée sur la base d'un cumul thermique. Durant cette période de mise en place, les racines exploitent une profondeur de sol maximale de 0.3 m. Au-delà de cette période, l'enracinement évolue de façon plus ou moins linéaire (en fonction de l'option choisie) de 0.3 m à P_x (ou $< P_x$ selon les conditions thermiques).

La progression de l'enracinement peut être stoppée lorsque la teneur en eau du réservoir racinaire passe en dessous d'un certain seuil exprimé en % de la RU. Lorsque les conditions de teneur en eau le permettent, l'enracinement peut se poursuivre à condition de n'avoir pas atteint le début de sénescence. Ce paramètre seuil n'est pas facile à caler sous nos conditions climatiques. Une valeur de 20% de la RU peut être proposée sur la base de simulations effectuées sur le cas du blé dur en Tunisie où il est assez fréquent que les pluies de la saison i n'assurent pas la recharge en profondeur du profil asséché durant la saison $i-1$. (Mailhol et al, 2004).

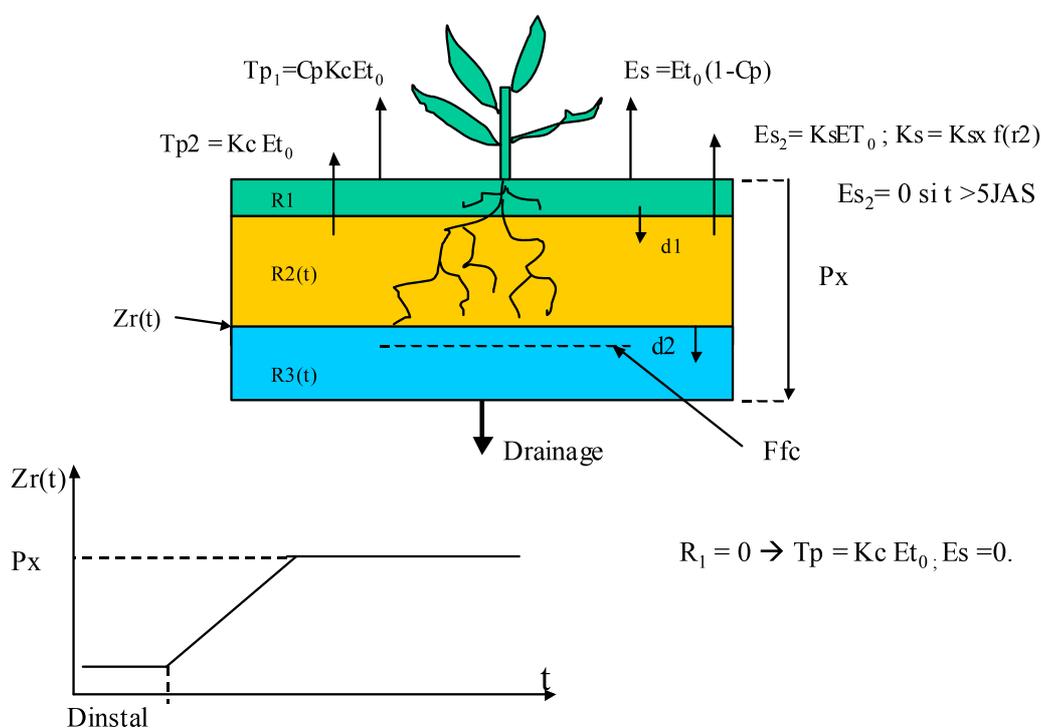


Figure 07. Schéma de fonctionnement du module sol de PILOTE (Mailhol et al, 2004).

La plante et l'évaporation du sol sollicitent d'abord le premier réservoir qui évolue selon:

$$R_1(t) = R_1(t-1) + P(t) + \text{Irrig}(t) - T_{p1}(t) - E_s(t) - d_1(t) \quad (9)$$

où T_{p1} la transpiration est déterminée à partir de la relation $T_{p1} = C_p \text{ETM}$ avec, l'évapotranspiration maximale : $\text{ETM} = K_c \text{ET}_0$, K_c étant le coefficient cultural. On considère que dans cette couche superficielle, la plante en concurrence avec l'évaporation du sol, peut y prélever sans restriction jusqu'à épuisement de la réserve utile. Le coefficient C_p de partage est fonction du LAI selon : $C_p = 1 - \exp(-0.7\text{LAI})$, l'évaporation du sol E_s devenant alors égale à $(1 - C_p)\text{ET}_0$. Le coefficient cultural K_c est calculé à partir du LAI selon $K_c = K_{c\max}[1 - \exp(-\text{LAI})]$, où $K_{c\max}$ est le coefficient cultural maximal du couvert végétal considéré. Sa valeur peut être accessible dans le bulletin FAO (34) mais peut être modifiée selon les conditions locales (effets d'advection plus ou moins prononcés).

A chaque pas de temps, R_2 alimenté par le drainage d_1 du réservoir R_1 ($d_1 = \max\{0, (P_{\text{SRU}} - R_1)\}$), s'accroît de la valeur ΘV_r où V_r est la vitesse de progression racinaire (m/j) et Θ la teneur eau de la couche sous le front racinaire, c'est-à-dire l'humidité volumique moyenne exprimée en mm/m du réservoir R_3 . Le bilan hydrique relatif à ce réservoir s'exprime par la relation :

$$R_2(t) = R_2(t-1) + \Theta V_r - \text{Reste}(t) + d_1(t) - d_2(t) \quad (10)$$

Le terme Reste est le complément à prélever (dans R_2) sur le pas de temps considéré pour satisfaire ETM. Lorsque R_1 est vide ($\theta = \theta_{pf}$) la plante puise uniquement dans R_2 selon $T_{p2} = K_c \text{ET}_0$. Quant au bilan du réservoir R_3 (durant la phase de croissance racinaire) il s'exprime selon:

$$R_3(t) = R_3(t-1) - \Theta V_r + d_2(t) - D(t) \quad (11)$$

Le drainage D définitivement perdu est quant à lui calculé selon:

$$D = \text{Max} \{0 ; R_{3\text{max}} - R_3\} \quad (12)$$

, où $R_3 \text{ max} = RU [P_x - Pr(j)]$. On suppose que l'ETR égale l'ETM (évapotranspiration maximale) tant que le premier réservoir R_1 contient de l'eau ou/et que la RFU du réservoir R_2 n'est pas épuisée. Le calcul de l'ETR est fondé sur la réduction linéaire de l'ETM en fonction de la teneur en eau de R_2 . La réduction prend effet lorsque $R_2(t)$ passe en dessous de la valeur seuil $R_s(t) = (1 - K_{ru}) \cdot P_r(j) \cdot Ru$. Le prélèvement dans le deuxième réservoir s'exprime alors selon :

$$ETR_2 = Tp_2 = TpKcET_0 \min [1., R_2(t)/R_s(t)] \quad (13)$$

, où K_{ru} le paramètre de Doorenbos et Kassam (1979) égal au rapport RFU/RU.

La profondeur $Ps = 10$ cm a permis, dans différents cas de figures répondant aux conditions précédemment décrites, de simuler de façon satisfaisante la durée de confort hydrique. L'observation de cette durée de confort hydrique précédemment évoquée est basée sur la mesure de la température de surface T_s au moyen du thermomètre infra-rouge dans des conditions d'indice foliaire (LAI) supérieur à $3 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Des mesures d'humidité effectuées par la méthode TDR dans la couche superficielle montrent que la teneur en eau de cette couche chute à une valeur critique au bout de 6 jours après apport. On constate le bon accord des différents indicateurs de stress hydrique, méthode aérodynamique, SDD, avec la réponse du modèle PILOTE 1.2 (Mailhol et al., 1996).

L'évaporation du sol est modélisée selon une approche très simplifiée. Elle n'en est cependant pas moins robuste et est en accord avec des théories plus élaborées (Hillel, 1980 chap. 5; in Campbell, 1985, chap.9). Tant que R_1 n'est pas épuisé, le régime d'évaporation est celui imposé par la demande climatique ET_0 , (notons au passage qu'un sol nu peut être plus ou moins enherbé durant l'inter culture). En l'absence de culture ce premier réservoir est donc soumis à ET_0 jusqu'à épuisement. Le réservoir superficiel protège en quelque sorte les

couches profondes vis à vis de l'évaporation produisant un effet de mulch. En présence de culture, c'est le premier réservoir qui est sollicité par la plante. En dehors du cycle de culture on considère que l'évaporation peut affecter les couches au-delà de 10 cm lorsque R_1 est épuisé mais de façon limitée. La couche sous-jacente contribue selon $Es_2 = K_{sol}.exp(-(1-\theta_{R2}))ET_0$. Dans cette formulation empirique qui exprime la résistance du sol à évaporer, K_{sol} est un paramètre de calage (voisin de 0.3 pour la plupart des sols), l'équivalent d'un coefficient cultural maximal sur sol nu, θ_{R2} est un fonction témoignant du niveau de remplissage de R_2 : $\theta_{R2} = \text{Min}[1, R_2/RU_2]$, Es_2 peut s'annuler lorsque R_2 est épuisé (atteint θ_{pf}) paramètre.

L'humidité du sol a fait l'objet d'un suivi par la méthode TDR également sur sol nu. Le régime d'évaporation du sol nu demeure proche de celui de l' ET_0 durant les 2 ou 3 premiers jours (pour des sols de RU moyenne) faisant suite à une pluie (selon l'importance de celle-ci), atteint des valeurs beaucoup plus faibles 6 jours après pour tendre enfin vers des valeurs négligeables beaucoup plus tard. La modélisation ici est en accord avec les différents stades du processus d'évaporation que propose la littérature (in Hillel, 1980 chap. 5; in Campbell, 1985, chap.9) avec ce phénomène. Durant le cycle de culture l'ETR totale est égale à $Tp_1 + Es + Tp_2$, considérant que l'évaporation du sol Es se limite durant cette période à celle de la couche de surface (R_1).

Le module plante (calcul du rendement)

L'indice foliaire LAI, est un témoin visible des potentialités productives (quantité de matière sèche) de la plante au cours de sa croissance. Un stress hydrique (ou azoté) momentané induit chez certaines cultures, comme le maïs ou le sorgho, un enroulement des feuilles, ou un arrêt de son évolution (Olufayo, 1994). Celle-ci est peut être décelée lorsque l'on réalise un suivi au moyen d'un appareillage adapté tel que le Pihélios, qui mesure le rayonnement intercepté. La prédiction fiable du rendement requiert nécessairement une simulation satisfaisante du LAI.

La simulation du LAI

PILOTE simule les effets du stress hydrique sur l'indice foliaire. On suppose en outre que tous les facteurs de production autres que l'eau sont à leur optimum. La formulation adoptée pour le LAI intègre la disponibilité en eau pour la plante par le biais d'un indice de stress fonction de l'évapotranspiration relative. Le LAI croît lorsqu'un le seuil d'indice thermique

$TT_{(j)}$ est dépassé. Ce seuil correspond à la température de levée. Pour la plus part des grandes cultures il est fixé à 100 ° jours. L'indice thermique est calculé selon l'expression:

$$TT_{(j)} = \sum_{k=1}^{k=j} (T_{moy} - T_b) \quad (14)$$

où T_{moy} est la température moyenne journalière et T_b la température de base (6° pour la plus part des grandes cultures). L'expression du LAI est donnée par:

$$LAI_{(j)} = LAI_{max} \left[\left(\frac{\sum_{k=1}^j TT - ts}{t_m} \right)^{\beta} \exp \left\{ \frac{\beta}{\alpha} \left(1 - \left(\frac{\sum_{k=1}^j TT - ts}{t_m} \right)^{\alpha} \right) \right\} - (1 - stress^{\lambda}) \right] \quad (15)$$

Où LAI_{max_x} est la valeur maximale du LAI pour une culture croissant sous conditions non "limitantes" (déductible de la littérature ou par la mesure), ts , le cumul de température requis pour l'émergence. Le paramètre t_m représente la somme des températures nécessaire pour atteindre le LAI_{max} . Sa valeur pour la plupart des cultures, et en particulier pour le maïs, correspond au cumul de températures entre semis et floraison. Pour tenir compte de l'effet densité, la valeur considérée du LAI_{max} est corrigée selon :

$$LAI_{max} = LAI_{MAX} (DensR\u00e9elle / DensStandard)^{0.6} \quad (16)$$

, où, $DensStandard$ est la densité de plantation correspondant à la valeur maximale du LAI (LAI_{MAX}) adoptée dans le fichier paramètre. Au cas où celle-ci aurait été mesurée pour la densité réelle du traitement à simuler, il convient évidemment de faire en sorte que le rapport des densités soit égal à 1. Les paramètres α et β sont des paramètres de calage. Le

paramètre α permet à la fois de simuler croissance et sénescence. Le modèle assure le passage de $\alpha = \alpha_1$ à $\alpha = \alpha_2 (= \beta)$ lorsque TT dépasse t_m . On a donc en fait 3 paramètres à caler le dernier α_2 , pouvant l'être séparément de α_1 et de γ . Une valeur faible de α_2 ($\alpha_2 < \alpha_1 / 30$) permet par exemple de simuler une sénescence lente (cas du maïs). Une procédure de calage automatique a été développée à cet effet. Le paramètre λ est un paramètre empirique traduisant l'aversion de la plante au stress hydrique. La pratique du modèle tend à montrer qu'une valeur constante de 1.25 pour λ peut être adoptée pour les grandes cultures (blé, maïs, soja, tournesol, sorgho,..), alors que des valeurs de 2 à 2.5 peuvent être proposées pour des cultures dont les fruits ont une teneur importante en eau (Tomates, pomme de terre, betterave, etc..).

L'indice de stress est formulé selon l'expression:

$$stress = \frac{\sum_{j=10}^j T_p}{\sum_{j=10}^j T_{pm}} \quad (17)$$

Où $T_p (= T_{p1} + T_{p2})$ est la transpiration réelle et T_{pm} est la transpiration maximale :

Le calcul du Rendement en matière sèche

Le modèle calcule le rendement en Matière sèche Totale (MST) du jour J selon l'expression Formulation dernière version de PILOTE:

$$MST(j) = MST(j-1) + RUE \cdot WSI^\lambda \cdot PAR(j) (1 - \exp(-kLAI(j))) \quad (18)$$

, où k est le coefficient d'extinction ($k = \min(1.0, 1.43 LAI^{-0.5})$), WSI un indice de stress calculé par le module sol affectant l'efficacité de conversion (RUE , en g/m^2MJ^{-1}), où $PAR =$ Potential active Radiation $\approx 0.5R_g(j)$, R_g étant le rayonnement global mesuré à la station

météorologique. En fin de cycle (à maturité quand $SOM (T^{\circ}) = T_{mature}$), le rendement en grain est ci-après calculé selon :

Le calcul du Rendement en grain

$$R_{\text{grain}} = IR.MST(T_{\text{mat}}) \quad (19)$$

où IR est l'indice de récolte. La prédiction de l'indice de récolte semble poser des problèmes aux modèles de cultures dont la plupart se fondent sur une évolution de type degrés/jour pour modéliser l'évolution de ce facteur. Cette difficulté est souvent contournée en lui assignant une valeur moyenne souvent proche du IRpot, indice de récolte potentiel, voisin de 0.5 pour bon nombre de grandes cultures. Si cela s'avère satisfaisant pour des cultures dont l'indice de récolte est peu sensible au stress hydrique comme le sorgho et le tournesol (Mailhol et al. 1997c, Cox et Joliff, 1986) il en est tout autrement pour des cultures comme le maïs ou le blé surtout lorsque surviennent des stress hydriques sévères en phase de remplissage du grain. Dans une logique de conformité avec la démarche fondée sur le LAI, on se propose de modéliser HI selon l'expression suivante:

$$IR = \text{Min} [IR_{\text{pot}} ; (IR_{\text{pot}} - a_r (LAIST - LAImoy))] \quad (20)$$

où LAIST est la valeur seuil de LAI (moyen calculé sur la période critique) en dessous de laquelle l'indice de récolte décroît linéairement (paramètre a_r) depuis sa valeur potentielle. Il s'agit d'un paramètre de calage pour la variété considérée.

Dans cette équation, IRpot est l'indice de récolte potentiel, une donnée de la culture pour une densité de plantation standard, celle correspondant au LAImax. Une petite correction lui est apportée par la relation :

$$IR_{\text{pot}} = IR_{\text{potStand}} (\text{densStandard}/\text{densréelle})^{0.15} \quad (21)$$

, afin de rendre compte d'un phénomène assez souvent constaté, à savoir un sensible accroissement de l'indice de récolte lorsque la densité diminue.

LAImoy est le LAI moyen calculé sur une période critique (liée à l'impact du stress hydrique sur le rendement) dont les bornes correspondent à des stades phénologiques définis en somme de températures (T_{s1} , T_{s2}). T_{s1} pour être par exemple le début de l'épiaison et T_{s2} correspondre au stade grain pâteux. Ce LAImoy mémorise en quelque sorte le trajet de la

plante au cours d'éventuelles périodes de stress qui se solderont par un impact sur IRpot (Figure 04).

$$LAI_{moy} = \frac{1}{N_j} \sum_{Ts1}^{Ts2} LAI(j) \quad (22)$$

Les figures 8, 9 et 10 représentent des exemples de simulation de l'indice de la surface foliaire (LAI), la réserve de l'eau en sol (SWR) et du rendement sous différents régimes d'irrigation et de précipitation.

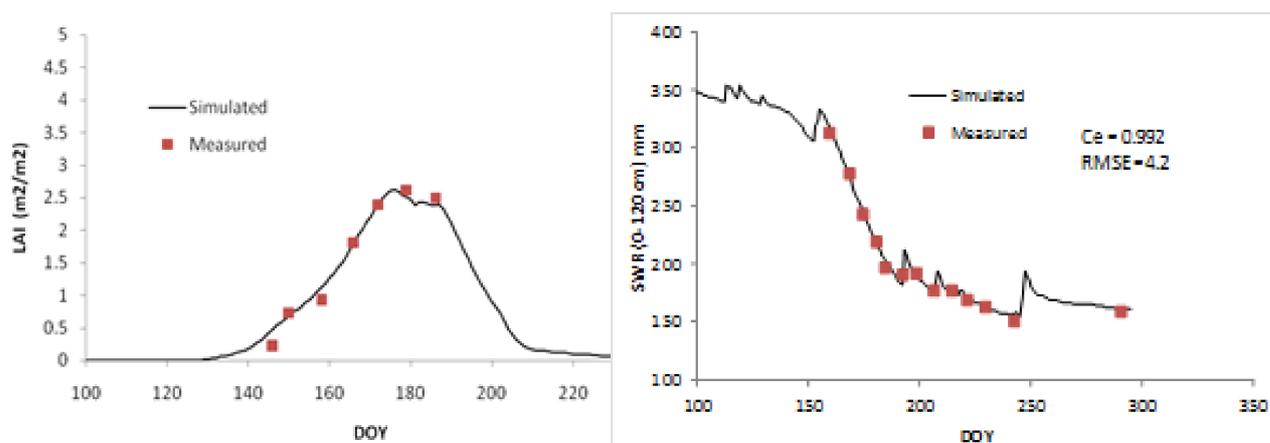


Figure 08. Simulation de l'indice du surface foliaire LAI (a) et de la réserve d'eau en sol (SWR) (b) pour la culture de maïs traité par la pluie dans le site expérimental de Lavalette en 2011. (Mailhol, 1997).

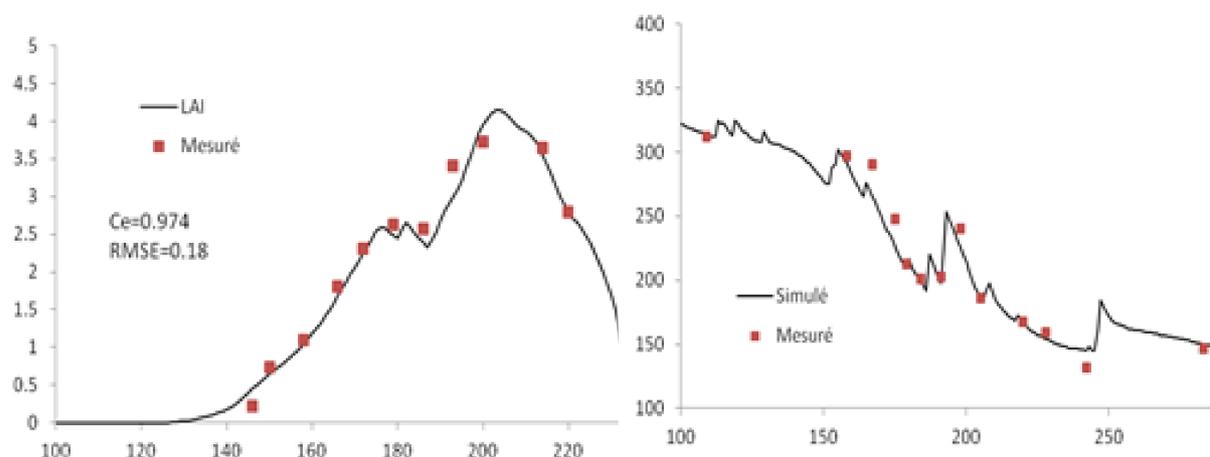


Figure 09. Simulation de l'indice du surface foliaire LAI (a) et de la réserve d'eau en sol (SWR) (b) pour la culture de maïs par un traitement limité d'irrigation (50% MET) dans le site expérimental de Lavalette en 2011 (Mailhol, 1997).

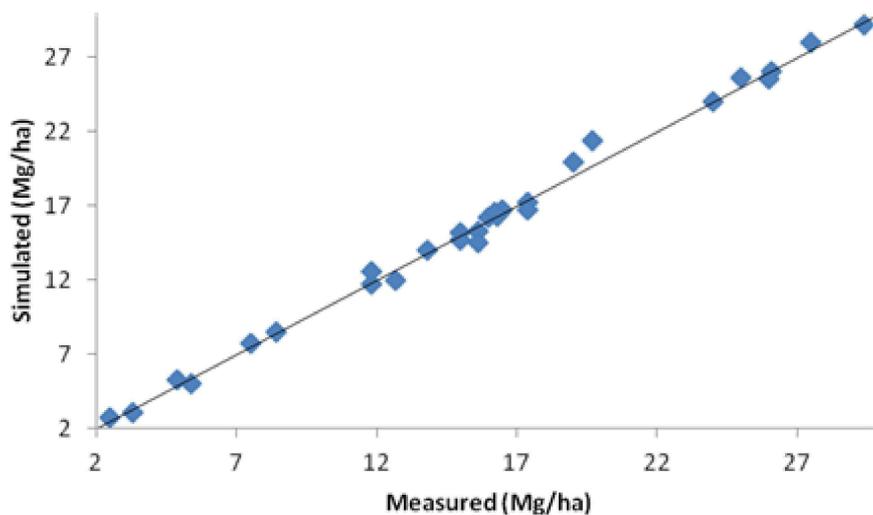


Figure 10. Variation du rendement en grain de maïs et en matière sèche totale depuis 2007 jusqu'à 2011 sous des systèmes d'irrigation goutte-à-goutte, en surface et sub-surface. (Mailhol, 1997)

CHAPITRE .III

Matériels et méthodes

Chapitre III: Matériels et méthodes

I. Présentation de la zone d'étude

I.1 Localisation

La zone de réalisation de notre étude appartient à la plaine du Bas-Cheliff. Cette plaine est localisée au nord-ouest de l'Algérie, à environ 250 Km de l'ouest d'Alger et à 35 Km à vol d'oiseau de la méditerranée. C'est dans son centre, la ville d'Oued Rhiau (wilaya de Relizane), que se trouve la parcelle qui représente le cadre de notre étude (figure 11).

La plaine du Bas-Cheliff fait partie du grand bassin versant de Cheliff –Zahrez et occupe sa partie nord. Les massifs du Dahra et de l'Ouarsenis limitent cette plaine au nord et au sud respectivement. A l'est, elle est limitée par le périmètre du Moyen Cheliff et à l'ouest par le périmètre de la Mina. Ses principales villes situées dans le périmètre allant d'Est en Ouest sont Oued Rhiau, Djediouia, Hmadna, Ouarizane.

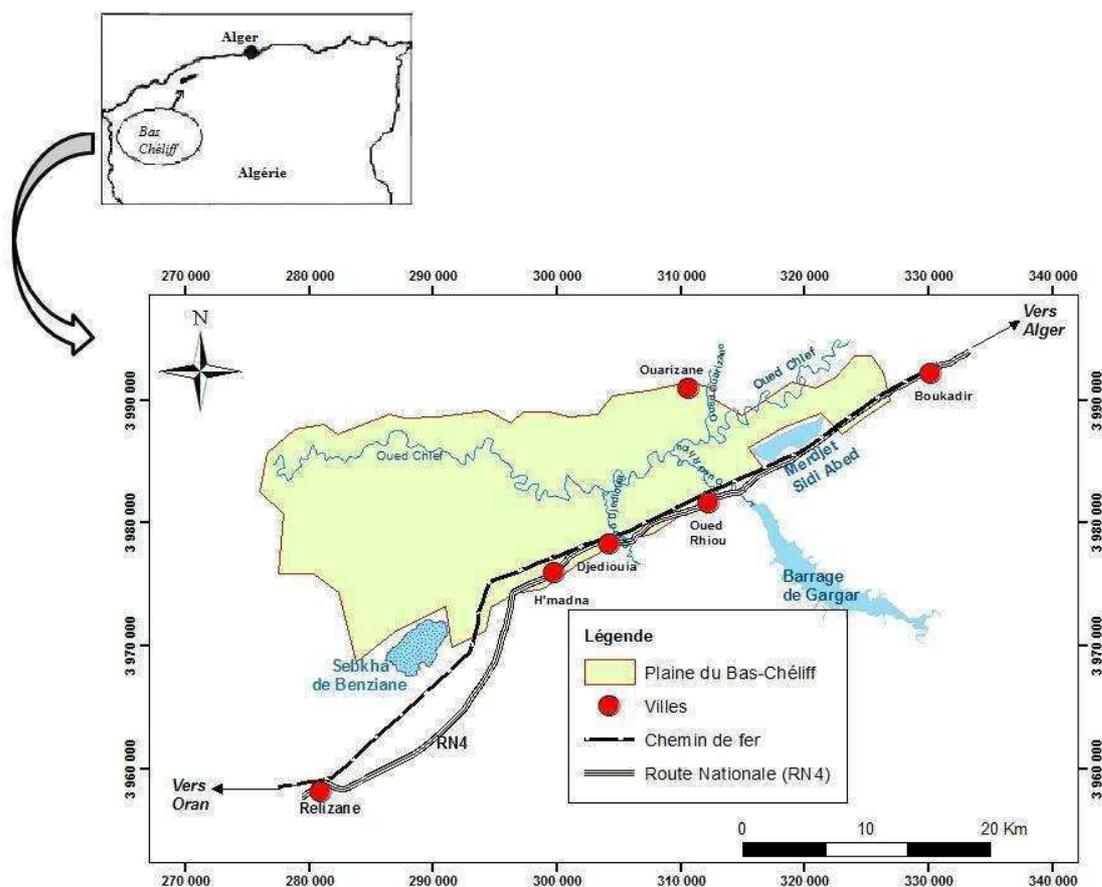


Figure 11. Localisation géographique de la région d'étude.

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

$$X = 275\,649 \text{ et } 328\,533 \text{ m} \qquad Y = 3\,968\,469 \text{ et } 3\,996\,812 \text{ m.}$$

La plaine fait environ 50 km de longueur sur une largeur variant de 6 à l'est à plus de 20 Km à l'ouest et une altitude moyenne de 70m. La superficie totale de la plaine (si on prend comme limite ouest l'oued Mina) est estimée à 65 000 ha (Douaoui, 2005). Ce qui correspond à une vaste étendue d'orientation Est-ouest.

I.2 Climat

I.2.1. Températures

La moyenne des températures moyennes mensuelles sur une période de 29 ans a montré que le régime thermique de la région est caractérisé par des températures élevées en été et relativement basses en hiver. Les températures les plus élevées sont enregistrées durant les mois de juillet et août, où elles atteignent un maximum de $29,75^{\circ}\text{C}$ en moyenne, ce qui correspond à une forte évaporation et une remontée capillaire de la nappe qui se trouve parfois à un mètre de profondeur. Par ailleurs, le mois de janvier est le plus froid avec une température moyenne de $10,44^{\circ}\text{C}$ (Tab.4)

Tableau 04: Moyennes mensuelles des précipitations et des températures de la station de Hmadna (1985-2014).

1985-2014		
Mois	Tmoy	P en mm
Jan	10,44	41,76
Fév	11,57	37,11
Mars	14,22	29,35
Avr	16,81	34,49
Mai	21,27	21,98
Juin	25,71	5,05
Juill	29,32	1,27
Août	29,75	2,02
Sept	25,17	13,29
Oct	20,96	28,60
Nov	14,79	49,96
Déc	11,77	32,70
Max	29,75	49,96
Min	10,44	1,27
Moy	19,32	297,59

(Source : INRAA, 2014)

I.2.2. Précipitations

I.2.2.1. Précipitations mensuelles

L'ouest algérien, y compris la plaine du Bas-Chéliff, a connu, ces dernières décennies, des cycles de sécheresse dont les plus marquants s'étalent de 1987 à 1990 et de 1992 à 1995. L'analyse des données pluviométriques de cette zone d'étude relatives à la période de 1985 à 2014 montre que la moyenne des précipitations moyennes annuelles en pluviométrie est de 297,59 mm avec une pluviosité moyenne maximale de 49,96 mm durant le mois de novembre et une pluviosité moyenne minimale de 1,27 mm durant le mois de juillet.

I.2.2.2. Précipitations annuelles

Si nous avons signalé ci-dessus que notre zone d'étude a connu des périodes de sécheresse pendant les deux dernières décennies du siècle passé, nous signalons ici que la période (2004-2013) enregistre aussi quelques années de sécheresse telles que l'an 2005 et l'an 2008 où les précipitations annuelles en pluviométrie sont très faibles (figure 12).

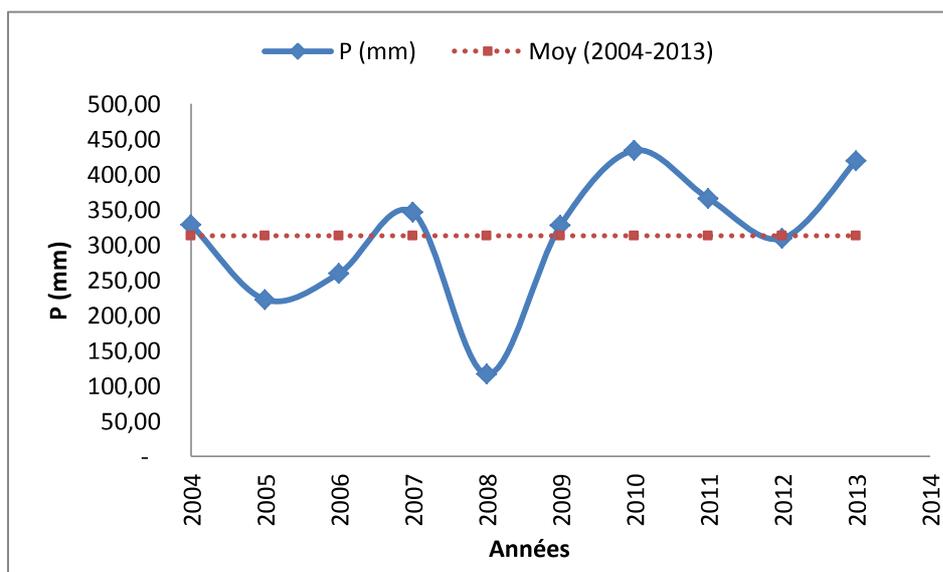


Figure 12. Variation des précipitations annuelles en fonction du temps.

On constate aussi que la moyenne des précipitations annuelles en pluviométrie pendant la période (2004-2013) est de 313.02mm. Les années 2010 et 2013 ont connu des précipitations importantes avec des moyennes annuelles de 434.08mm et 419.66mm respectivement.

I.2.3. Diagramme ombrothermique et quotient d'Emberger

Il est évident que les éléments climatiques n'agissent jamais indépendamment les uns des autres c'est pourquoi les formules les plus utilisées pour faire une synthèse climatique combinent généralement entre les précipitations et les températures. Nous retiendrons le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1953), qui exprime la durée de la période sèche de l'année, et l'indice pluviothermique d'Emberger qui demeure l'indice le plus efficace dans la description du climat méditerranéen.

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

Le diagramme ombrothermique de la station climatique de Hmadna correspondant à la période 1985 et 2014 (Figure 13) montre que le climat est de type méditerranéen avec une longue période de sécheresse, qui s'étale sur environ 7 mois, allant du début du mois d'avril jusqu'à la fin du mois d'octobre.

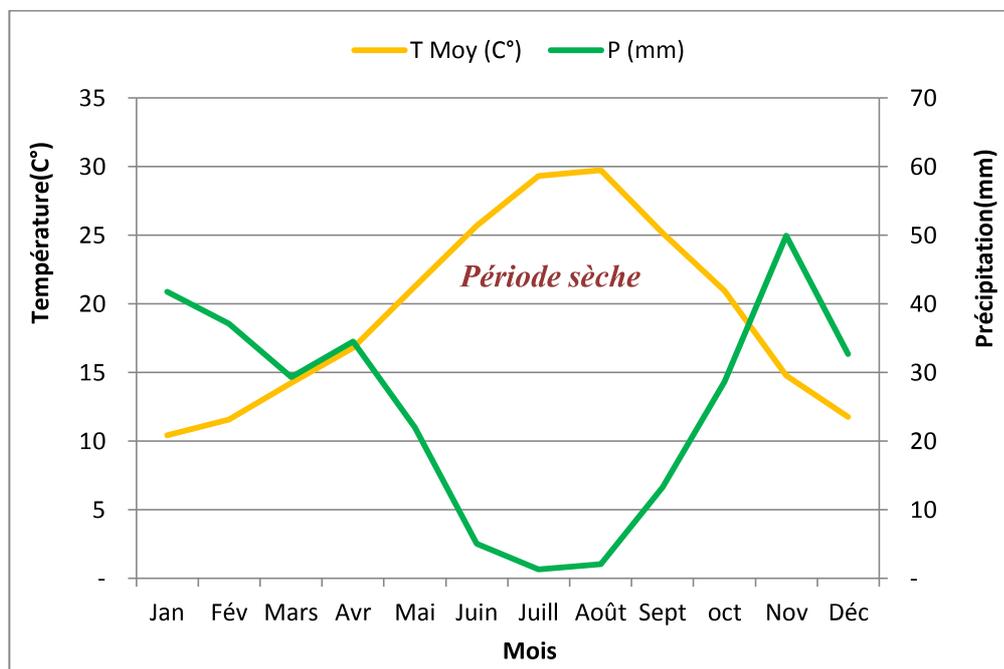


Figure 13. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen de la station de Hmadna de la période (1985/2014).

L'indice pluviothermique d'Emberger appelé (Q_2) est ainsi formulé :

$$Q_2 = \frac{1000 * P}{\frac{(M+m)*(M-m)}{2}} \dots\dots\dots(23)$$

P : Précipitation moyenne annuelle en mm.

M : Température moyenne mensuelle du mois le plus chaud exprimée en degré Kelvin.

m : Température moyenne mensuelle du mois le plus froid exprimée en degré Kelvin.

M-m : Amplitude thermique extrême moyenne.

La valeur du quotient pluviométrique varie en fonction inverse du caractère xérique du milieu. Plus la sécheresse annuelle globale est grande, moins la valeur du quotient est élevée.

Pour la zone méditerranéenne, la combinaison des valeurs de m (°C) en abscisses et celles du Q_2 en ordonnées nous permet le positionnement de notre station en fonction de divers étages climatiques. Il est à signaler que les limites de séparation entre les différents étages climatiques ne sont que des bandes de transition mixtes où des changements de végétation ont été observés. (Emberger, 1955).

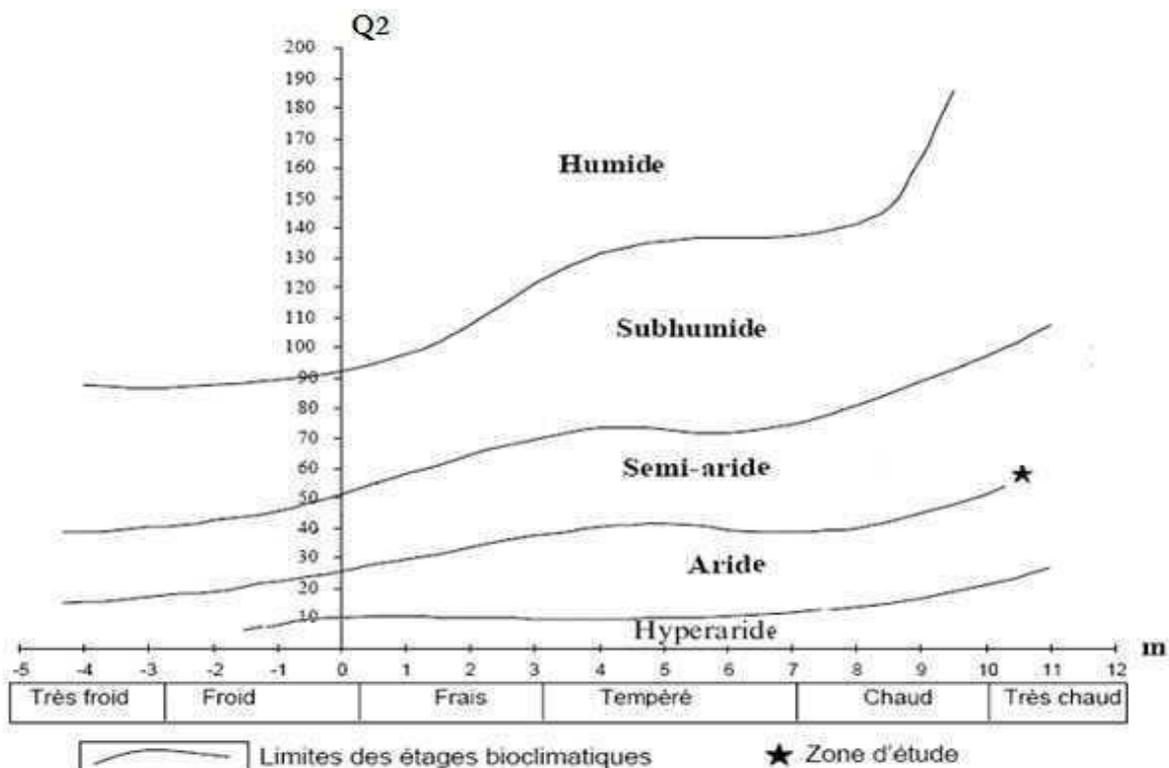


Figure 14. Position de la station de Hmadena sur le climagramme d'Emberger.

Selon le climatogramme d'Emberger, la station du Bas-Cheliff se trouve dans l'étage bioclimatique semi-aride vers l'aride et un été très chaud, avec un Q_2 moyen de 52.58 et une température minimale moyenne de 10,44 c°. (Figure 14).

I. 2.4. Indice d'aridité annuelle (Ia) de De Martonne

A partir de l'analyse des différents éléments du climat, on peut donner une classification de la région du Bas-Cheliff, par l'indice d'aridité annuelle (Ia) de De Martonne qui est donnée par la formule :

$$Ia = \frac{P}{T+10} \quad (24)$$

Dans cette formule, P représente la pluviométrie annuelle en (mm) et T la température moyenne annuelle en (C°). L'indice baisse lorsque l'aridité croit. (Lehouérou, 2004).

La valeur de l'indice Ia est de 10,67. Elle classe donc la région du Bas-Chélif dans l'étage bioclimatique aride.

I. 2.5. Evapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle est la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée sous un climat donné par un couvert végétal continu bien alimenté en eau. Elle comprend donc l'évaporation du sol/substrat et la transpiration de la végétation d'une région donnée pendant le temps considéré. Elle s'exprime en hauteur d'eau.

L'évapotranspiration potentielle correspondant à la période (2000-2012), estimée selon la formule de Penman, varie entre 1636.8 et 1115.3 mm/an, avec une valeur moyenne d'environ 1500 mm/an.

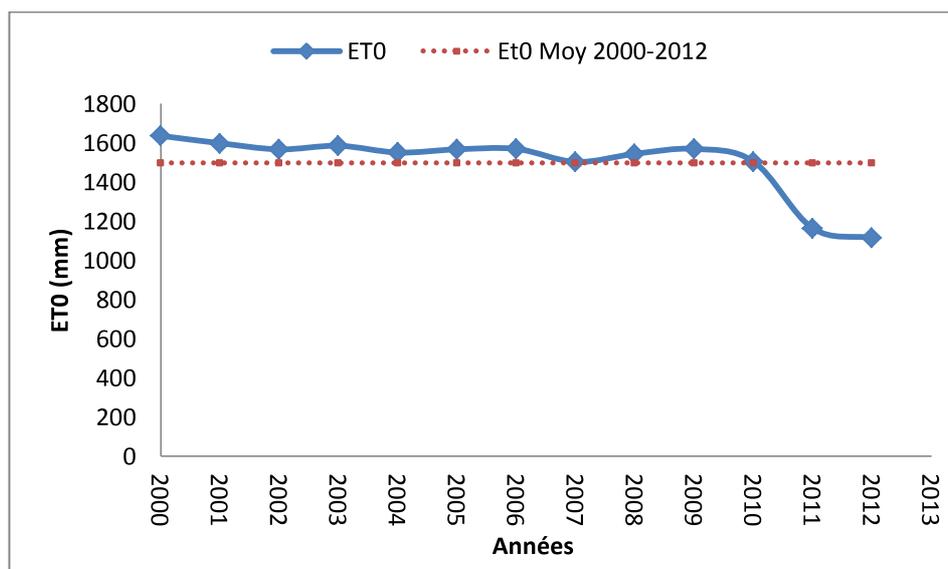


Figure 15. Variation de l'évapotranspiration annuelle en fonction du temps

I. 2.6. Humidité

Dans notre zone d'étude, l'humidité relative de l'air est de l'ordre de 65 à 75 % en hiver et près de 35 % en été. Elle est généralement plus élevée le matin pour tous les mois et elle peut compenser, en un certain degré, l'absence ou la rareté des précipitations en favorisant le développement des plantes. Le mois le plus humide est le mois de décembre alors que le plus sec est le mois de juillet. (Douaoui, 2005).

I. 2.7. Vent

Le vent est un facteur climatique très important qui peut agir soit directement par une action mécanique sur le sol et les végétaux, soit indirectement en modifiant l'humidité et la température (Ozenda, 1982). Il est le facteur prépondérant (50%) dans l'évaluation de l'ETP et sa connaissance précise permet de mieux gérer l'irrigation.

D'après les observations effectuées à la station de Hmadena, il ressort que le vent dominant est le vent d'Ouest. Sa vitesse moyenne varie de 13 à 33 Km/h (Douaoui, 2005). La figure ci-dessous représente le système théorique des vents ascendant et descendant dans la vallée du Chélif (Yacono, 1955) (figure 16).

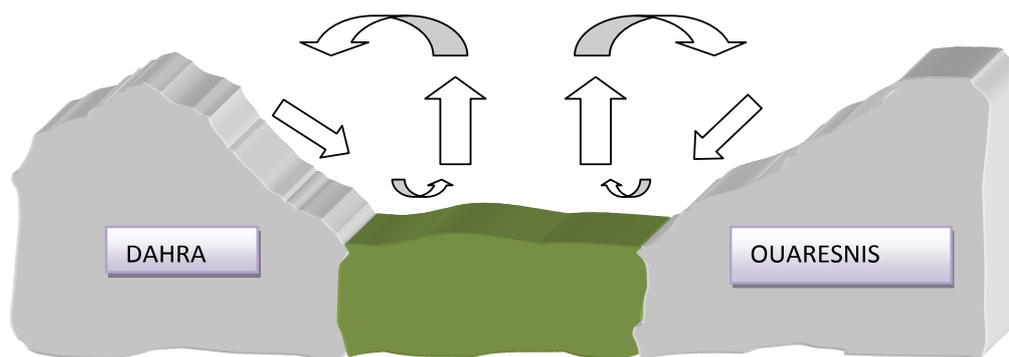


Figure 16. Système théorique des vents ascendant et descendant dans la vallée du Chélif (Yacono, 1955)

I.3. Salinité des sols

La salinité des sols qui semble le problème écologique le plus remarquable de notre zone d'étude a fait l'objet de plusieurs études dont celle réalisée par Douaoui et Hartani (2007). Il s'agit d'une étude basée principalement sur l'évolution des sols salés sur une période de seize (16) ans. Les résultats montrent une diminution des superficies à faible salinité avec, en parallèle, une augmentation des superficies à salinité élevée (tableau 5). Ainsi, la classe des sols dont la CE est inférieure à 4 dS/m en 1990 (sans danger) ont perdu 1 056 ha qui sont passés dans la catégorie des sols plus touchés par le problème de la salinité.

Tableau 05. Evolution de la salinité des sols de la plaine entre 1990 et 2006

Classe de salinité (dS/m)	% des superficies	
	1990	2006
< 4	86,52	83,00
4 – 8	7,90	9,37
8 – 16	4,14	5,76
> 16	1,44	1,88
Superficie totale = 30 000 ha		

(Source : Douaoui et Hartani, 2007)

La figure 17 montre que cette tendance se localise exclusivement dans les terrains irrigués. Les sols du plateau de Benziane et de la colline de partage, située à l'extrême de la plaine n'ont pas subi d'évolution de leurs salinité, elle est restée inférieure à 4 dS/m car ils ne sont pas irrigués, (Douaoui et Hartani, 2007).

Comme pour la plupart des sols d'Afrique du Nord, la salinité dans la plaine est d'abord primaire, c'est-à-dire que les sols sont des alluvions dont le matériau originel était lui-même

plus ou moins salé. Les formations salifères (Trias, Miocène, Helvétien, Sahélien) qui affleurent dans l'Ouarsenis en sont les principaux pourvoyeurs. Par la suite, les pratiques de l'irrigation ont joué un rôle très important dans l'accentuation du processus de la salinisation des sols de la région. (Douaoui, 2005 ; Bradai et al., 2008).

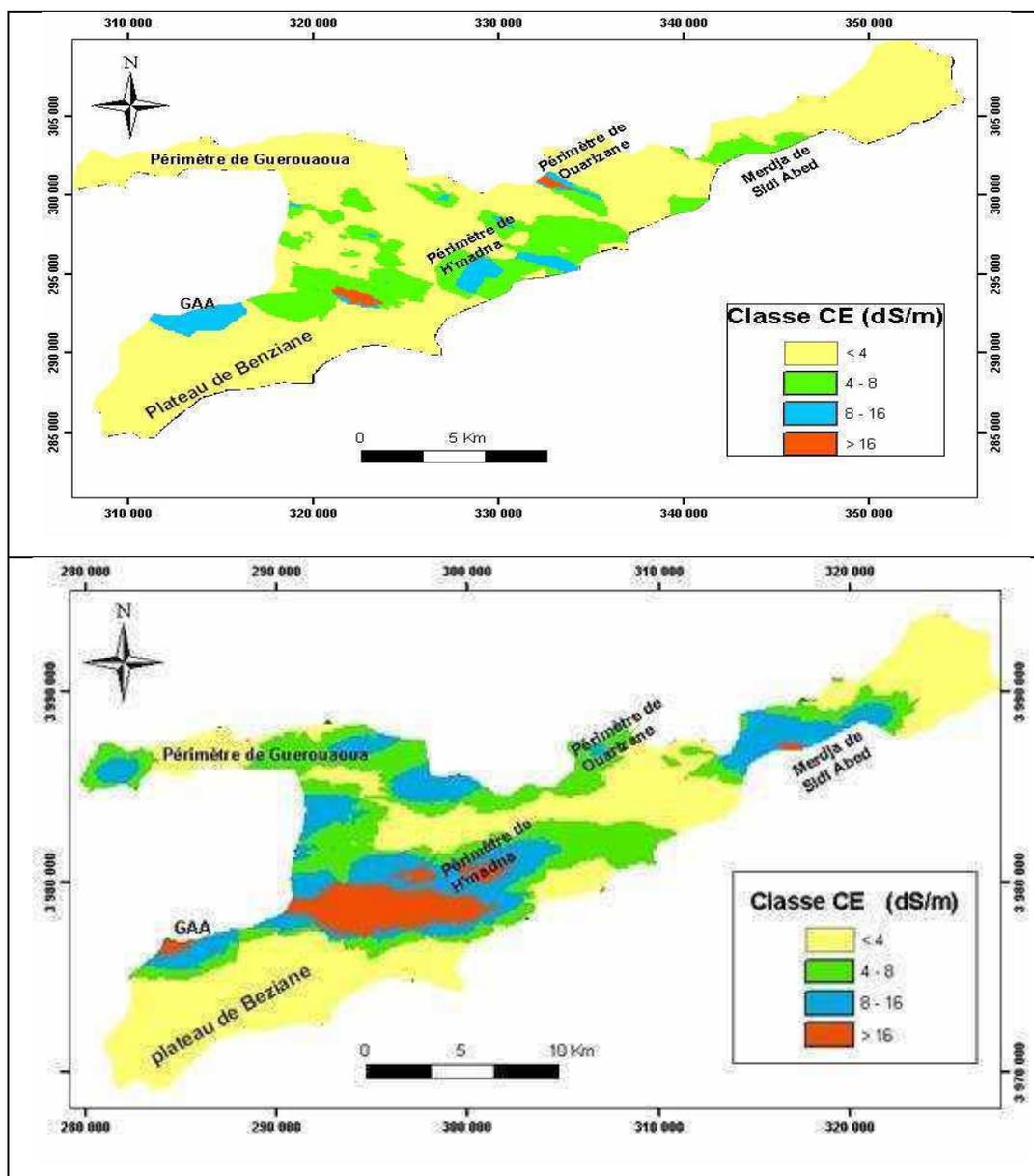


Figure 17. Evolution de la salinité des sols de la plaine entre 1990 et 2006
(Douaoui et Hartani, 2007)

1.4. Occupation du sol

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

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

- Les cultures maraîchères irriguées (melon, pastèque, artichaut, oignon ...) sont cultivées dans les périmètres irrigués et se concentrent au bord des lits d'oueds.

- Les cultures céréalières installées principalement sur les sols calcimagnésiques du plateau de Benziane. On les retrouve également dans les périmètres irrigués. L'étude de McDonald et BNEDER (1990) montre que ces types de cultures occupent en S.A.U. : l'orge 20%, le blé 8,5 %.

Les sols très salés sont abandonnés et souvent couverts par une végétation halophyte dont la densité de recouvrement est très variable dans l'espace et dans le temps. En été, certains types de sols, tels que ceux de la Gaa sont totalement dépourvus de végétation (Ghérina, 2008).

La carte d'occupation du sol (figure 18), établie par Ghérina (2008), à partir des données recueillies sur le terrain lors de l'échantillonnage de juin-août 2006, montre une occupation de 14 % par les cultures maraîchères, 32 % par les céréales, 5 % par la jachère, 25 % par la végétation halophyte et 7 % sont des sols labourés. Le reste du pourcentage est réparti entre l'arboriculture, la culture fourragère et les sols nus.

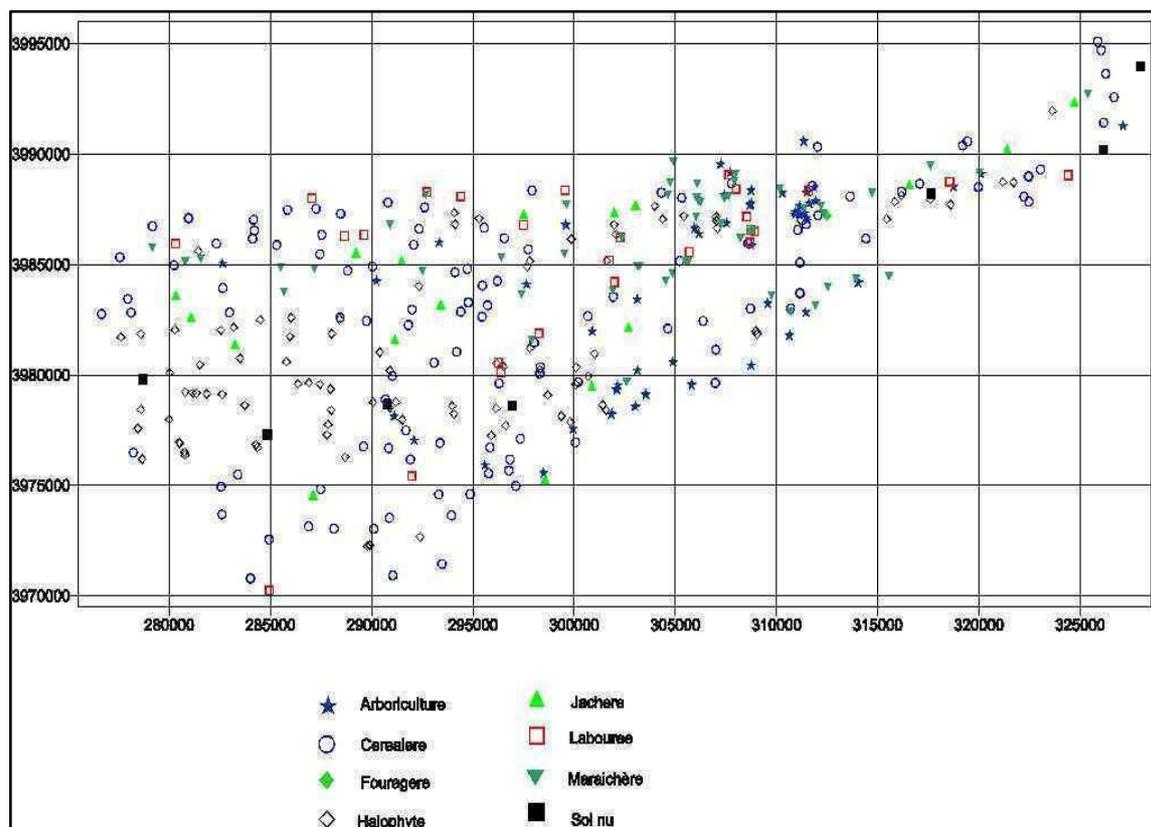


Figure 18. Carte d'occupation des sols de la plaine du Bas-Chélif établie par Ghérina (2008).

I.5. Ressources en eau

La plaine du Bas-Chélif comporte des potentialités importantes en eau. Beaucoup d'efforts ont été consentis par l'Etat pour en profiter mais une politique d'aménagement et de gestion rationnelle reste indispensable pour une exploitation convenable de ces ressources.

I.5.1. Ressources en eaux superficielles

Les deux principales ressources en eau sont constituées par deux retenues :

- Le barrage de Gargar sur l'oued Rhiou : d'une capacité de 450 millions de m³, il est l'un des plus importants barrages d'Algérie.
- La retenue de la Merdjjet Sidi Abed, un réservoir hors cours d'eau d'une capacité de 50 millions de m³, située à l'amont du périmètre existant, qui est remplie pendant l'hiver essentiellement par dérivation des eaux de l'oued Chlef. (Douaoui et al, 2006).

En plus de ces deux ressources, le Bas-Chélif pourrait aussi être alimenté à partir des autres ressources en eau superficielles du bassin du Chélif, telles que les eaux non-régularisées excédentaires du Chélif.

La qualité de l'eau des cours d'eau du bassin de Chélif est aussi variable, mais elle est en général plutôt médiocre. La salinité de l'eau dans l'oued Rhiou varie entre 0,5 g/l environ pour les débits les plus forts et 2 g/l pour les débits d'été. La figure 19 montre la qualité des eaux du barrage de Gargar et de Merdjet Sidi Abed pour l'année 2002.

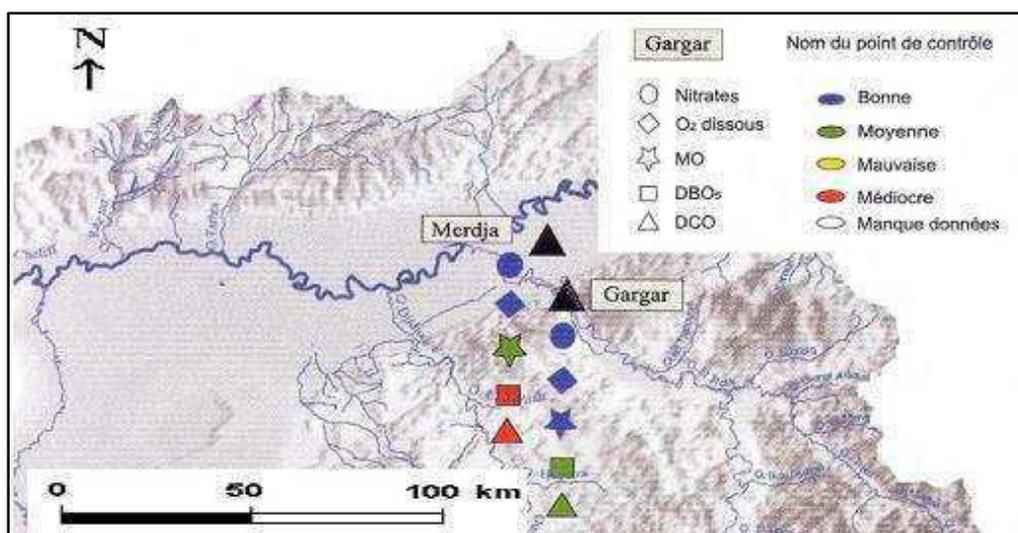


Figure 19. Qualité des eaux des barrages de Gargar et de Merdjet Sidi Abed
(Source : Agence des bassins hydrographiques, Chlef-Zahrez (ABH-CZ), 2002)

I.5.2. Ressources en eaux souterraines

Les principaux aquifères du Bas-Chélif sont :

- **Le Miocène calcaire** : il affleure le long de la limite sud de la plaine. Les descriptions lithologiques ont montré l'existence de zones de fracture productives entre 37 et 60 m.
- **Le Pliocène marin** : c'est une suite d'argiles et de marnes avec des couches minces de grès qui affleurent au nord de la plaine. On le retrouve dans la région de Ouarizane à plus de 55 m de profondeur et dans la région de Sebket Benziane à plus de 400 m de profondeur.
- **Le Quaternaire-Pliocène continental** : il est constitué de sédiments à base d'argile, de marnes et des lits de sable, de graviers et de conglomérats. La profondeur de ces forages est très variable selon les régions où elle peut aller jusqu'à 300 m alors que la moyenne est de 70 m. (Douaoui et al, 2006).

I.6. Irrigation

La région du Bas-Cheliff comporte plusieurs périmètres où l'irrigation est fréquente, dont les plus importants sont : le périmètre de Oued Rhiou, le périmètre de Ouarizane, le périmètre de Djidiouia, le périmètre Hmadna et le périmètre de Guerouaou (figure 20).

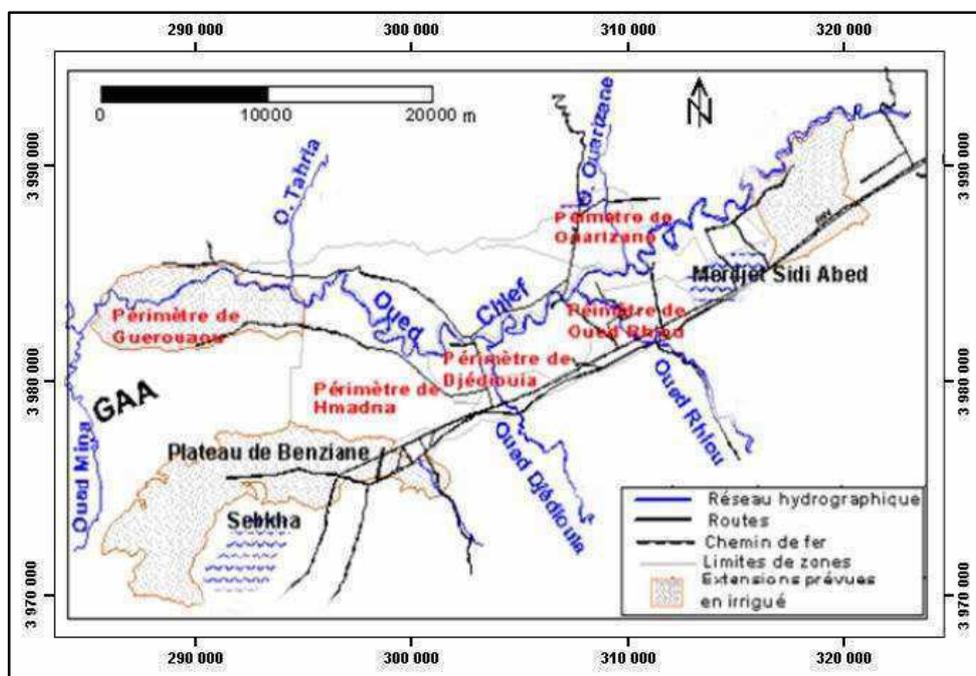


Figure 20. Les principaux périmètres irrigués de la plaine du Bas-Chéiff (Douaoui et al, 2006).

II. Présentation du matériel végétal :

L'artichaut (*Cynara scolymus L*) est une plante pérenne originaire du bassin méditerranéen et de la zone allant de l'Irak jusqu'en Afrique du Nord de la Méditerranée. [1]

Elle appartient à la famille botanique des Astéracées. C'est une culture très ancienne : en 1855, les artichauts d'Hussein Dey étaient consommés à Paris en plein hiver. La partie consommée est le réceptacle floral et une partie du pédoncule floral. Le légume est nutritif, il est riche en vitamines, Calcium, potassium, Phosphore, fer et sodium.

En Algérie, les principales régions de production de cette culture sont Oran, Relizane, Sidi Bel Abbes, Chlef, Blida, Tlemcen....

Dans la plaine du Bas-Chéliff, l'artichaut (*Cynara scolymus*), qui constitue le principal produit du terroir, est aujourd'hui au centre des préoccupations de la chambre d'agriculture. Les variétés dominantes sont le « violet d'Alger et le blanc d'Oran ». Considérant son effet limitant le processus de la salinisation des sols, l'artichaut est utilisé comme précédent cultural. (Hartani et al. 2007)

II.1. Présentation de la culture

Les variétés se différencient par la coloration violette ou blanche, la forme du capitule et le caractère plus ou moins épineux des bractées. Les principales variétés cultivées en Algérie sont les suivantes.

II.1.1. Violet de Provence

C'est une variété productive et très précoce qui est cultivée dans tout le bassin méditerranéen. Le capitule est de couleur verte violacée avec des écailles bien serrées et légèrement épineuses à leur extrémité.

Il existe trois (03) types de Violet en Algérie :

- **Le violet d'Hyères** : Capitule à forme ovale avec des bractées serrées qui ne s'ouvrent que lorsque sa pleine maturité est atteinte. Le capitule a un très bel aspect et cette variété semble la plus précoce.
- **Le violet d'Alger** : Probablement c'est le violet d'Hyères acclimaté en Algérie. La forme du capitule est ovale, teinté de violet avec des bractées ouvertes et assez

épineuses. C'est la variété la plus productive mais elle est moins précoce : le début de production est la fin du mois de novembre.

- **Le violet de Gapeau:** Capitules plus grosses avec une forme très allongée et pointue. Il est caractérisé aussi par une production groupée mais très faible ainsi qu'une précocité moins grande.

II.1.2. Variétés de Blanc

- **Blanc d'Oran ou quarantin :** originaire d'Espagne (TUDELA), cette variété se caractérise par des capitules qui sont petits, arrondis, fermes, de couleur vert clair et dont les bractées sont bien serrées. Il s'agit d'une variété productive, résistante à la sécheresse et très précoce dont le début de production est estimé par la fin du mois d'octobre.
- **Blanc d'Hyères:** cette variété se caractérise par des capitules gros, arrondis et de couleur vert clair. Il s'agit d'une variété productive mais très tardive avec un début de production estimé par la fin mars et le début avril.
- **Camus de Bretagne :** c'est une variété du blanc qui se caractérise par de gros capitules arrondis, fermes et serrés de couleur vert gris pâle et violacé sur les bords et dont les bractées sont très charnues à la base. Il s'agit d'une variété productive mais tardive avec un début de production estimé par la première moitié du mois d'avril.
- **Vert de Laon :** c'est une variété du blanc dont les capitules sont très gros et de couleur vert brunâtre. Elle est aussi tardive avec un début de production estimé par le début du mois d'avril.

(Institut Technique des Cultures Maraîchères et Industrielles, 2015)

- Nous signalons ici que la variété sur laquelle on a travaillé dans notre étude est le *Violet de Provence*. La figure ci-dessous la présente.



Figure 21. Variété d'artichaut de notre parcelle d'étude.

II.2. Caractères botaniques

L'artichaut est une plante vivace de la famille des Astéracées qui est cultivée pour ses capitules. Elle se caractérise par des feuilles longues (parfois de plus d'un mètre de longueur) et plus ou moins découpées selon les cultivars, de couleur vert grisâtre en dessus et garnies en dessous de filaments cotonneux et une tige cannelée (haute de 1,5 mètre) qui se termine par un capitule. D'autres capitules naissent sur les rameaux secondaires. Les fleurs sont bleues, fort nombreuses et implantées sur un réceptacle épais et charnu entouré de bractées refermant de petites semences appelées akène de couleur grise foncée ; l'ensemble est appelé capitule pomme ou tête.

II.3. Exigences en eau des cultures

Les exigences en eau correspondant à de bons rendements pour la culture de l'artichaut, sont en moyenne de l'ordre de 1144 mm. (Hartani et al. 2007).

Le coefficient cultural « Kc » qui met en relation l'évapotranspiration maximale «ETM» et l'évapotranspiration de référence « ETo » varie en fonction des différents stades physiologiques de la culture. Le Tableau 06 suivant résume les différentes valeurs du coefficient cultural de la culture d'artichaut, conseillées par la FAO (FAO 56).

Tableau 06: Évolution des coefficients culturaux « Kc » pendant le cycle végétatif de l'artichaut:

Type de culture	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Somme
Artichaut 1 ^{ère} Année	1,00	1,00	0,97	0,50	0,59	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	10,98
Artichaut 2 ^{ème} Année	1,00	0,97		0,54	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	10,43

Source : (FAO 56)

III. Protocoles expérimentaux

Nous rappelons que les différentes campagnes d'études ont pour but l'étude de la réserve de l'eau dans le sol et la croissance de la culture de l'artichaut dans le contexte du Bas-Chéliff. Les suivis sur terrain sont réalisés au niveau d'une parcelle d'artichaut située dans la région d'Oued Rhiou durant les saisons 2011/2012 et 2012/2013 afin de tester et valider le modèle PILOTE, puis l'appliquer sur d'autres saisons, à savoir 2006/2007, 2009/2010 et 2010/2011.

III.1. Collecte et Calcul des données climatiques

Les données climatiques qui correspondent à la période de notre étude ont été recueillies de la Station INRAA de Hmadna (Relizane). Ces données sont les paramètres journaliers suivants :

- La température de l'air (Max et min).
- Les précipitations.
- L'humidité de l'air.
- La vitesse du vent.
- La durée d'insolation.
- Le Rayonnement Global.

Pour les valeurs d'« ET₀ », nous les avons calculées à l'aide du logiciel ET₀ de la FAO.

III.2. Données agronomiques

Durant toute la période d'étude et pour chaque campagne de suivi sur terrain, nous avons mesuré les paramètres suivants qui sont liés à la croissance de la culture d'artichaut:

- L'indice de surface foliaire « LAI ».
- L'enracinement.
- La teneur en eau relative.
- Les rendements en grains.
- La matière sèche.

- **L'indice de surface foliaire « LAI »**

Le suivi de l'évolution de l'indice de surface foliaire a été effectué tout au long du cycle végétatif de l'artichaut. Pour ce faire, nous avons effectué des prélèvements au niveau de la parcelle qui nous permettent de déterminer la surface foliaire par la méthode planimétrique.

L'indice de surface foliaire « LAI » est calculé en appliquant la formule suivante :

$$LAI = S / s \quad (25)$$

Avec :

- S : Surface foliaire en m².
- s : Surface de la placette échantillonnée en m².

- **Mesure de l'évolution de l'enracinement**

Le suivi de l'évolution du système racinaire a été réalisé pour les campagnes 2011/2012 et 2012/2013 durant tout le cycle de développement du végétal. Les mesures se sont effectuées par un curvimètre après l'arrachage total de la plante.

- **Mesure du rendement en grain**

Pour le calcul du rendement en grain on a utilisé l'équation suivante :

$$Rdt (T/ha) = Rdt(gr/m^2)/100 \quad (26)$$

Dont : $Rdt (gr/m^2) = (\text{nombre de pieds}/m^2) \times (\text{nombre de tête}/\text{pied}) \times \text{poids de grains (gr)}$.

- **Mesure de la matière sèche : (Biomasse)**

Pour le calcul de la matière sèche on a utilisé la méthode gravimétrique indexée par ISO 11465, où la teneur en matière sèche est calculée par la formule suivante :

$$\text{La teneur en matière sèche : } W_{dm} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (27)$$

Avec :

- m_2 : c'est la masse du récipient et de l'échantillon à l'état sec.
- m_1 : c'est la masse du récipient et de l'échantillon à l'état humide.
- m_0 : c'est la masse du récipient.

III.3. Données pédologiques

Les analyses physicochimiques du sol sont effectuées au niveau de quatre laboratoires du sol : laboratoire de pédologie à l'université de Chlef, l'INSID de Relizane, l'ANRH d'Alger et Fertiel d'Annaba.

Les principaux tests effectués sont :

- L'extraction de la solution du sol.
- Mesure de la salinité du sol.
- Mesure de pH du sol.
- La granulométrie.
- La réserve de l'eau dans le sol.
- Mesure de la densité apparente du sol.
- La stabilité structurale.
- Mesure de la matière organique du sol.
- Dosage des cations et anions.

- **Extraction de la solution du sol (extrait de la pâte saturée)**

Cette méthode a été mise au point par des chercheurs de l'U.S. Salinity Laboratory. Pour extraire les sels, on ramène le sol préalablement séché à saturation, c'est-à-dire à sa limite de liquidité d'Atterberg par malaxage avec de l'eau distillée. Elle permet des analyses de série standardisées. La confection de la pâte nécessite au moins 300 g de sol afin d'obtenir 50 cm³ de solution d'extraction.

Dans notre étude, une quantité de sol de 300 g tamisée à 2 mm est placée dans un bécher de 500 ml de volume. On ajoute de l'eau distillée à la terre tout en remuant avec une spatule. Les volumes pédologiques utilisés varient d'un échantillon à l'autre de même que la nature des sols. De ce fait, les volumes d'eau utilisés pour obtenir la pâte saturée varient également d'un échantillon à l'autre (Baize, 1988). L'eau distillée est ajoutée à la terre jusqu'à saturation c'est-à-dire jusqu'à sa limite de liquidité d'Atterberg. On crée ainsi un rapport terre/eau variable selon la texture. Selon Pelven, (1955), à saturation la pâte brille à la lumière et glisse librement le long de la spatule. Ainsi faite, on laisse la préparation reposer librement à la température ambiante.

Pour que les deux phases solide et liquide soient en équilibre, il faut attendre au moins 12 à 24 heures de temps. Au bout de cette période, la plupart des sels sont dissout (Mathieu et Pieltain, 2003).

L'extraction de la solution du sol est faite par centrifugation à 3000 tours/minutes pendant 10 minutes. La solution ainsi récupérée est mise dans des bouteilles après l'avoir filtrée jusqu'à sa limpidité. La solution liquide récupérée est déterminée par la mesure de la conductivité électrique (CE) et de réaliser le dosage des anions et des cations solubles : carbonates, bicarbonates, chlorures, sulfates ainsi que Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ et Na⁺. Les teneurs en anions et cation sont exprimés en milliéquivalent par litre.

- **Mesure de la salinité du sol**

La salinité du sol est la teneur de tous les sels solubles d'un sol. Elle a été mesurée sur l'extrait de la pâte saturée pour tous les échantillons prélevés parce qu'il

reflète les conditions de la solution du sol en plein champ. La mesure a été effectuée à l'aide d'un conductimètre de la marque Hanna.

- **Mesure de pH du sol**

Par définition, le pH (Potentiel en Hydrogène) est le logarithme de l'inverse de la concentration des ions H⁺ dans une solution.

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+] = \log 1/[\text{H}^+] \quad (28)$$

Le pH d'un sol est très important du point de vue alimentation des plantes car la disponibilité des éléments nutritifs y dépend. Autrement dit, c'est à cause du pH que les éléments nutritifs sont assimilables ou pas assimilables par les plantes, ce qui influe directement sur leur croissance. Selon son pH, un sol peut être qualifié comme suit: très fortement acide (pH <4,0), fortement acide (4,0 <pH <4,9), acide (5,0 <pH <5,9), légèrement acide (6,0 <pH <6,9), neutre (pH=7,0), légèrement alcalin (7,1 <pH < 8,0), alcalin (8,1 <pH < 9,0), fortement alcalin (9,1 <pH < 10,0) et très fortement alcalin (pH >10,0).

La mesure du pH du sol s'effectue à l'aide d'un pH mètre sur l'extrait dilué d'un rapport sol/eau (M/V) de 1/2.5 (20g du sol pour 50ml de l'eau distillée).

- **Granulométrie**

Afin de déterminer la texture du sol de la parcelle sur laquelle nous avons travaillé, une analyse granulométrique a été faite au niveau du laboratoire de l'INSID de Relizane. Cette analyse granulométrique nous donne les pourcentages des différents groupes granulométriques pour chaque échantillon du sol. On discerne ces groupes selon le diamètre des particules :

Tableau 07 : groupes granulométriques des échantillons du sol.

Elément	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	Cailloux	Pierres
diamètre	< 2 µm	2–20 µm	20-50 µm	50-200 µm	200µm – 2mm	2-20 mm	>20 mm

L'analyse du sol ne prend en compte que les éléments inférieurs à 2mm.

- **Mesure de la réserve de l'eau dans le sol**

Pour déterminer la teneur en eau du sol, nous avons effectué une série de mesures durant chaque saison expérimentale au cours du cycle végétatif, suivant la méthode gravimétrique. La méthode gravimétrique consiste à effectuer des prélèvements du sol à l'aide d'une tarière à différents profondeurs (généralement dans la zone racinaire 0 à 90 cm), et ensuite les peser avant et après un passage à l'étuve pendant 24 heures à une température de 105°C. L'humidité pondérale « Hp » est donc calculée en utilisant l'équation suivante :

$$Hp = \frac{PH-PS}{PS} * 100 \quad \dots\dots\dots (29)$$

Où :

Hp : humidité pondérale en (%).

PH : poids frais de l'échantillon (g).

PS : poids sec de l'échantillon (g).

A partir des valeurs de cette humidité pondérale nous pouvons estimer l'humidité volumique « θ_v » comme suit :

$$\theta_v = Hp * da \quad \dots\dots\dots(30)$$

Avec : « da » c'est la valeur de la densité apparente.

Donc, on peut déterminer le stock d'eau à différentes profondeurs en utilisant la formule suivante :

$$S = \int_0^z \theta_v \cdot dz \quad \dots\dots\dots (31)$$

Où :

S : Stock d'eau (mm).

z : Profondeur de l'horizon envisagé (mm).

θ_v : teneur en eau volumique.

Concernant les valeurs de l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement, les mesures sont effectuées au niveau du laboratoire de l'ANRH d'ALGER.

- **Mesure de la densité apparente du sol**

Pour déterminer la densité apparente, nous avons appliqué la méthode de la paraffine sur des agrégats de 1-2 cm de diamètres.

- **Mesure de la stabilité structurale**

Afin de mesurer la stabilité structurale du sol, nous avons opté pour la méthode de Le Bissonais (1996), qui vient dans la continuité de la méthode de Hénin et al. (1958). Grâce à cette méthode, on peut, d'une part, bien contrôler la désagrégation et d'autre part, limiter la réagrégation des particules durant le séchage (Le Bissonais, 1996). L'application de cette méthode passe par trois phases principales dont chacune reflète un aspect bien défini de l'effet de la pluie sur les agrégats (Saidi, 1993).

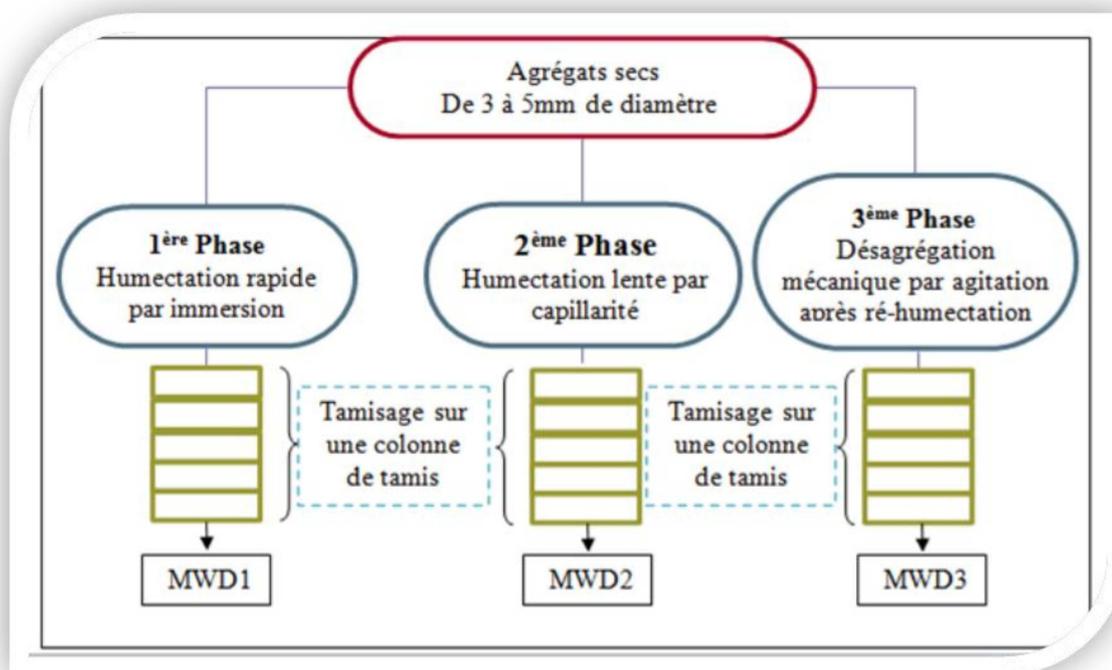


Figure 22. Schéma récapitulatif de la méthode de Le Bissonais (1996).

En effet, nous prenons, au début, des échantillons constitués d'agrégats calibrés, de 3 à 5 mm qui sont dans les mêmes conditions (état hydrique et structural, séchage à l'air). Ensuite, nous passons à la première phase de la méthode qui consiste en l'humectation rapide par immersion ou la désagrégation par l'éclatement total. Il s'agit de mettre les agrégats en contact avec l'eau distillée (immersion dans l'eau), et les tamiser par la suite dans l'éthanol pour fixer l'état de désagrégation. Cette opération permet de tester le comportement des matériaux secs soumis à des humectations brutales.

La deuxième phase de cette méthode consiste en l'humectation lente par capillarité. Il s'agit de disposer les agrégats sur un papier filtre (type Kleenex) et laisser la ré-humectation se faire par capillarité pour passer par la suite au tamisage dans l'éthanol. Cette humectation est lente, moins destructive et permet de distinguer entre les sols très peu stables.

La phase finale de cette méthode est celle de la désagrégation mécanique par agitation après ré-humectation. Il s'agit de mettre les agrégats en contact avec l'éthanol afin d'éliminer l'air contenu à l'intérieur de ces derniers (donc sans causer l'éclatement) qui seront par la suite sujets à des agitations et tamisages. Cette opération caractérise l'effet de l'énergie cinétique des gouttes de pluie sur le sol.

Pour chaque phase, les résultats des tests permettent de déterminer le diamètre moyen pondéré ou MWD (Mean Weight Diameter). On le calcule comme suit :

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n P_i * d_{mi}}{P_t} \quad \dots\dots\dots(32); \quad d_{mi} = \frac{d_i + d_{(i+1)}}{2} \quad \dots(33)$$

Avec :

n : nombre de tamis ;

P_i : poids sec de la fraction recueillie sur le tamis de diamètre de mailles d_i ;

P_t : somme des poids secs ;

d_{mi} : diamètre moyen des particules trouvées sur le tamis ;

$d_{(i+1)}$: diamètre des mailles du tamis supérieur à d_i .

- **Dosage de la matière organique du sol**

Afin de déterminer le taux de la matière organique dans un sol, on réalise le dosage du carbone organique total qui est l'un des principaux constituants de cette dernière. Comme le carbone organique représente 58% de la matière organique, le taux de M.O d'un sol est donné par la formule suivante :

$$\text{Matières Organiques} = \text{Carbone organique total} \times 1,724 \dots\dots\dots(34)$$

- **Dosage des cations et anions du sol**

A. Dosage des anions

Nous avons procédé au dosage des anions de nos échantillons du sol au niveau du laboratoire de pédologie de la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie à l'université de Chlef. Pour déterminer le dosage des ions Cl^- , CO_3^{2-} et HCO_3^- nous avons opté pour les méthodes tétrimétriques classiques décrites par Mathieu et Pieltain, (2003). En ce qui concerne le dosage de l'ion SO_4^{2-} , nous l'avons effectué par spectrométrie ultra-violet selon la méthode Rodier, (1996).

B. Dosage des cations

Le dosage des cations de nos échantillons du sol a été effectué au niveau du laboratoire régional de l'Institut National des Sols Irrigués et Drainés (INSID) à Relizane. Pour procéder au dosage des cations Na^+ , K^+ , Ca^{+2} et Mg^{+2} nous avons opté pour la spectrophotométrie d'absorption atomique.

- **Détermination du coefficient d'adsorption du sodium (SAR)**

L'équation ci-dessous (USSS Staff, 1954) permet de calculer le SAR (sodium adsorption ratio).

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}} \text{ mmol/l} \quad (35)$$

III.4. Mesures hydrauliques

- **Le système d'irrigation**

La parcelle sur laquelle nous avons travaillé a connu, durant toute la période expérimentale (2011/2012 et 2012/2013), l'application d'un seul système d'irrigation, à savoir l'irrigation par goutte à goutte (figure 23).



Figure 23. Installation du système d'irrigation goutte à goutte à la parcelle

- **Protocole de mesure des débits des goutteurs**

En vue de procéder aux mesures des débits des goutteurs, nous avons appliqué la méthode classique volumétrique en utilisant une éprouvette graduée et un chronomètre (figure 24). Nous avons effectué cette opération au début, au milieu et à la fin du cycle végétatif de la culture.



00:00:02,99



Figure 24. Matériel utilisé pour mesurer les débits des goutteurs

Afin de mesurer les débits, nous avons suivi un échantillonnage systématique en choisissant des goutteurs d'une manière qui permet de couvrir toute la surface de la parcelle comme l'indique le schéma ci-dessous :

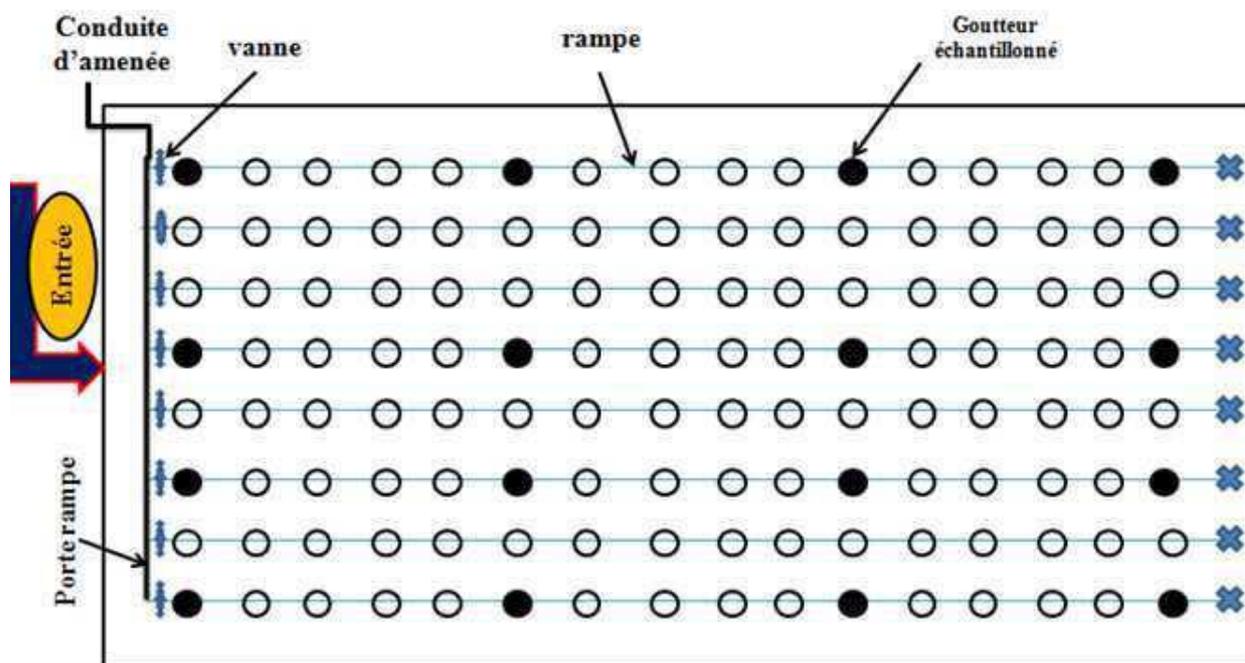


Figure 25. Mesure des débits des goutteurs

L'objectif de ces mesures réalisés ainsi est d'évaluer l'efficacité du système goutte à goutte mis en place du point de vue uniformité et efficacité des irrigations. Pour ce faire, nous avons calculé certains coefficients :

a- Coefficient d'uniformité de l'application

Ce coefficient est un indice qui décrit la variabilité entre goutteurs dans un réseau d'irrigation. Afin de calculer ce coefficient pour 16 goutteurs échantillonnés (Comme le montre la figure 25), on procède comme suit (Keller et al,1974) :

1. Classer les 16 débits mesurés par ordre croissant.
2. Calculer la moyenne (Q_{moy}) des 16 débits mesurés :

$$Q_{moy} = \frac{\sum_{1}^{16} q_u}{16} \quad (36)$$

Avec : q_u : le débit unitaire d'un goutteur.

3. Calculer la moyenne des 04 mesures de débit les plus faibles :

$$Q_{min} = \frac{\sum_{1}^4 q_u \text{ faibles}}{4} \quad (37)$$

Avec : q_u faibles sont les quatre débits unitaires les plus faibles.

4. Le coefficient d'uniformité d'application (C_u) est calculé par la formule suivante :

$$C_u(\%) = 100 \times \frac{Q_{\min}}{Q_{\text{moy}}} \quad (38)$$

Comme le montre le tableau ci-dessous, plus le coefficient d'uniformité est élevé, plus la répartition est meilleure.

Tableau 08. Critères d'identification du Coefficient d'uniformité

coefficient d'uniformité	Fonctionnement du réseau
$C_u > 90 \%$	Réseau en bon état
$70 \% < C_u < 90 \%$	Réseau à nettoyer
$C_u < 70 \%$	Réseau colmaté

Source : (Tiercelin, 1998).

b- Coefficient d'Uniformité de distribution en % ou de Christiansen (1942)

Ce coefficient proposé par Christiansen (1942) et permettant de déduire l'uniformité de distribution est basé sur la somme des écarts absolus à la moyenne des diverses mesures. L'équation ci-dessous permet de le calculer :

$$CU (\%) = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - Q_{\text{moy}}|}{n Q_{\text{moy}}} \right) \quad (39)$$

Avec :

n : nombre d'observations ($n = 16$) ;

q_i : quantité d'eau mesurée (mm) pour l'observation i ;

Q_{moy} : quantité d'eau moyenne de n observations (mm).

Le réseau goutte à goutte est jugé acceptable en matière d'uniformité quand le CU dépasse 80 %. (Mekki et al ; 2001).

c- Taux de colmatage au niveau des goutteurs

Pour les gaines utilisées, le débit fourni par goutteur est de 1,3 l/h. Afin de calculer le taux de colmatage au niveau des goutteurs, nous avons appliqué la formule suivante :

$$T_{col} = 100 \times \left(\frac{Q_u - Q_{moy}}{Q_{us}} \right) \quad (40)$$

Avec :

T_{col} : taux d'obstruction (%) ;

Q_{us} : débit nominal donné par le fabriquant (l/h) ;

Q_{moy} : débit moyen d'un goutteur mesuré (l/h).

d- Dose d'irrigation ramenée à la parcelle

La détermination de la dose d'irrigation se fait en fonction de la durée d'arrosage pour une irrigation, le débit moyen des goutteurs et le nombre de goutteurs. La formule suivante nous permet de calculer la dose brute d'irrigation :

$$D = \frac{N_g \times Q_{moy} \times T}{S} \quad (41)$$

Avec :

D : dose d'irrigation (mm) ;

N_g : nombre de goutteurs ;

Q_{moy} : débit moyen d'un goutteur (l/h) ;

T : durée d'arrosage (h) ;

S : surface de la parcelle (m²).

- **Analyses physicochimiques de l'eau d'irrigation**

Afin de réaliser les analyses physico-chimiques de l'eau d'irrigation, nous avons procédé comme suit :

- La conductivité électrique est déterminée in situ à l'aide d'un conductimètre électrique qui donne directement la valeur de la conductivité électrique de l'échantillon mesuré à une température de (25°) en mS/Cm ou en $\mu\text{S}/\text{Cm}$.
- Le pH est mesuré in situ à l'aide d'un pH-mètre par lecture directe.
- Les chlorures sont déterminés par la méthode de Mohr (Rodier, 1984).
- Les sulfates sont déterminés par spectrométrie ultra-violet par lecture de l'absorbance à $\lambda = 420 \text{ nm}$ pour une suspension obtenue par réaction des sulfates avec le chlorure de baryum.
- Les ions de CO_3^{2-} et HCO_3^- ont été déterminés par les méthodes tétrimétriques classiques décrites par Mathieu et Pieltain, (2003).
- La dureté totale et calcique des échantillons est déterminée par complexométrie, par titrage avec l'acide éthylène-diamine-tétracétique (EDTA).
- Les ions de Na^+ , K^+ , Ca^{++} et Mg^{++} sont dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique.

Nous avons effectué ces analyses au niveau du laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques d'Alger ainsi que dans celui de l'Eau et l'Environnement de la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie à l'université de Chlef.

CHAPITRE .IV

Résultats et discussions

Chapitre IV: Résultats et discussions

Dans ce chapitre nous exposons les principaux résultats obtenus dans cette étude. Il s'agit principalement des résultats du suivi de différents paramètres du bilan hydrique durant les années de simulation et validation du modèle PILOTE sous un climat semi-aride (cas du Bas Chélif) et par la suite de son application sur d'autres années.

I-La pratique de la culture d'artichaut

- **En Algérie**

1- Evolution des superficies de plantation de la culture d'artichaut en Algérie

Ces dernières années, la pratique de la culture d'artichaut évolue de plus en plus en Algérie. La figure 26 montre l'évolution des terres occupées par cette culture.

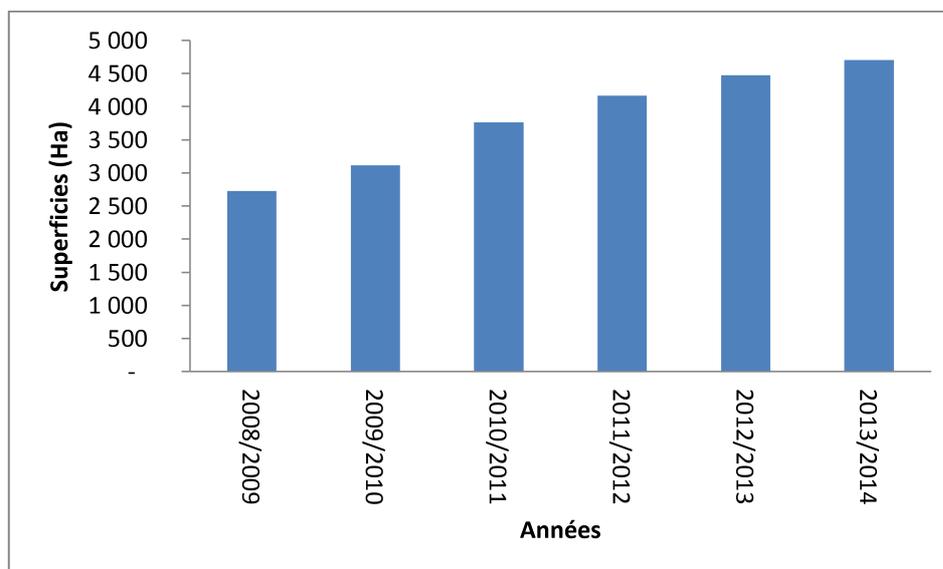


Figure 26. Evolution des superficies de plantation de la culture d'artichaut en Algérie.

On remarque que les superficies cultivées en artichaut estimées par 2724 ha en 2008/2009 progressent chaque année pour atteindre le taux de 4705 ha en 2013/2014, ce qui exprime une évolution remarquable.

2- Evolution de la production de la culture d'artichaut en Algérie

La production de la culture d'artichaut en Algérie évolue à un rythme croissant. Elle part d'une production totale de 395354 Qx en 2008/2009 à 811060 Qx en

2013/2014. La figure ci-dessous représente cette évolution. On enregistre aussi une production totale maximale égale à 833736 Qx en 2012/2013 (figure.27).

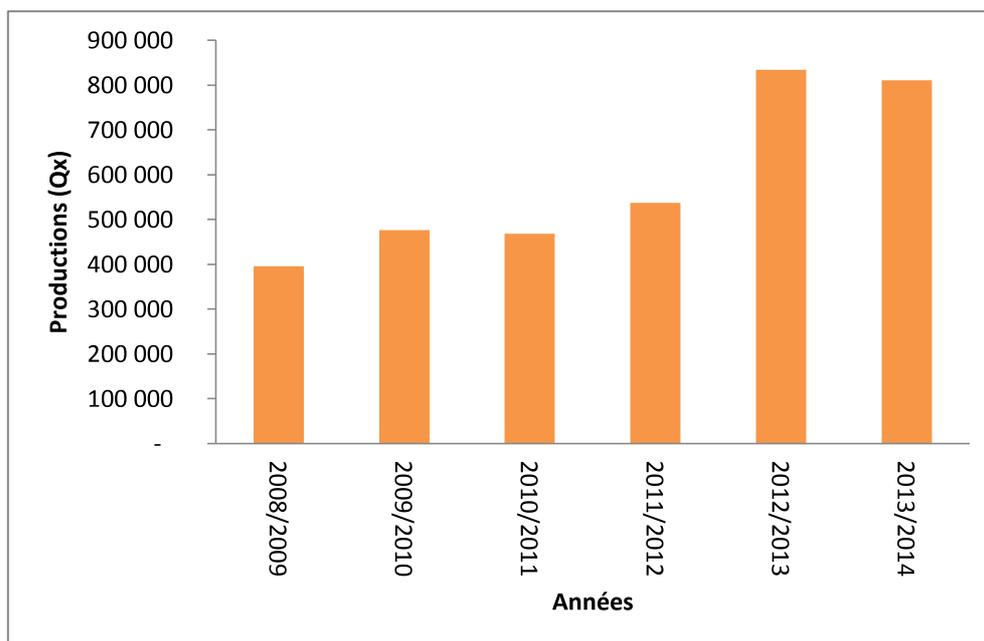


Figure 27. Evolution de la production de la culture d'artichaut en Algérie

- **A la wilaya de Relizane**

- 1- **Evolution des superficies de plantation de la culture d'artichaut à Relizane**

Dans la wilaya de Relizane, la culture d'artichaut est devenue l'une des principales cultures maraichères plantées par les agriculteurs de la région. Cette pratique est en croissance depuis 2008/2009 où la superficie totale des terres plantées par l'artichaut est estimée par 1985 ha, jusqu'en 2013/2014 où on arrive à une superficie de 3200 ha (figure. 28).

Il est à noter que la wilaya de Relizane est devenue la principale wilaya en Algérie qui s'intéresse à la culture d'artichaut. La superficie des terres consacrées à cette culture dans cette wilaya représente un pourcentage très important qui a atteint 68,01% de la superficie totale cultivée en artichaut en Algérie en 2013/2014.

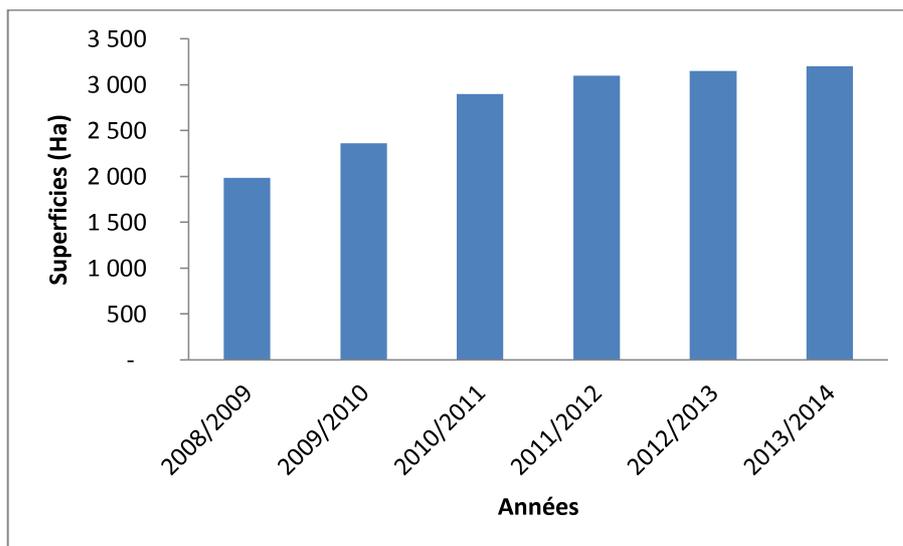


Figure 28. Evolution des superficies de plantation de la culture d'artichaut à Relizane.

2- Evolution de la production de la culture d'artichaut à Relizane

La production de la culture d'artichaut à Relizane est toujours en progression depuis 2008/2009 jusqu'à 2013/2014. On part d'une production totale de 317600 Qx en 2008/2009 à 545000 Qx en 2013/2014. Cette évolution atteint sa valeur maximale en 2013/2014 comme l'indique la figure ci-dessous (figure 29).

Il est à noter qu'en 2013/2014, la production de la culture d'artichaut dans la wilaya de Relizane a représenté 67,19 % de la production totale de la culture d'artichaut en Algérie.

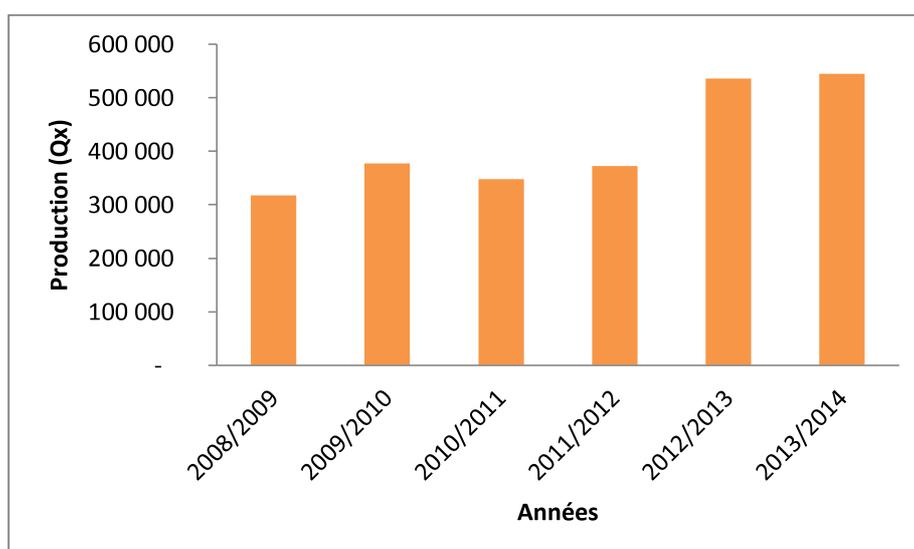


Figure 29. Evolution de la production de la culture d'artichaut à Relizane

II- Caractéristiques climatiques expérimentales

1- La température de l'air

La variation des températures moyennes mensuelles relatives à la période expérimentale est représentée par la figure 30.

Les valeurs les plus élevées des températures moyennes mensuelles correspondent au mois de septembre avec une moyenne égale à 25,59°C. Par contre, le mois de février représente le mois le plus froid avec une moyenne des températures moyennes mensuelles égale à 8,99°C.

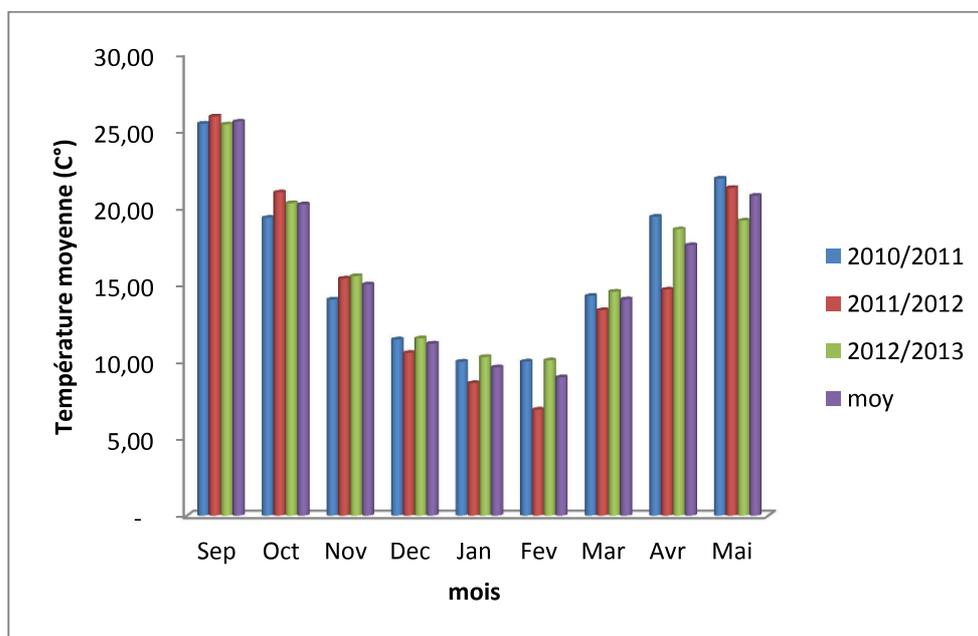


Figure 30. Variation des températures moyennes mensuelles.

2- Variation des précipitations

Les précipitations représentent l'une des composantes principales du bilan hydrique. Nous avons suivi la variation des précipitations durant toute la période expérimentale équivalente au cycle végétatif de la culture d'artichaut afin de déterminer les valeurs des précipitations mensuelles moyennes (figure 31).

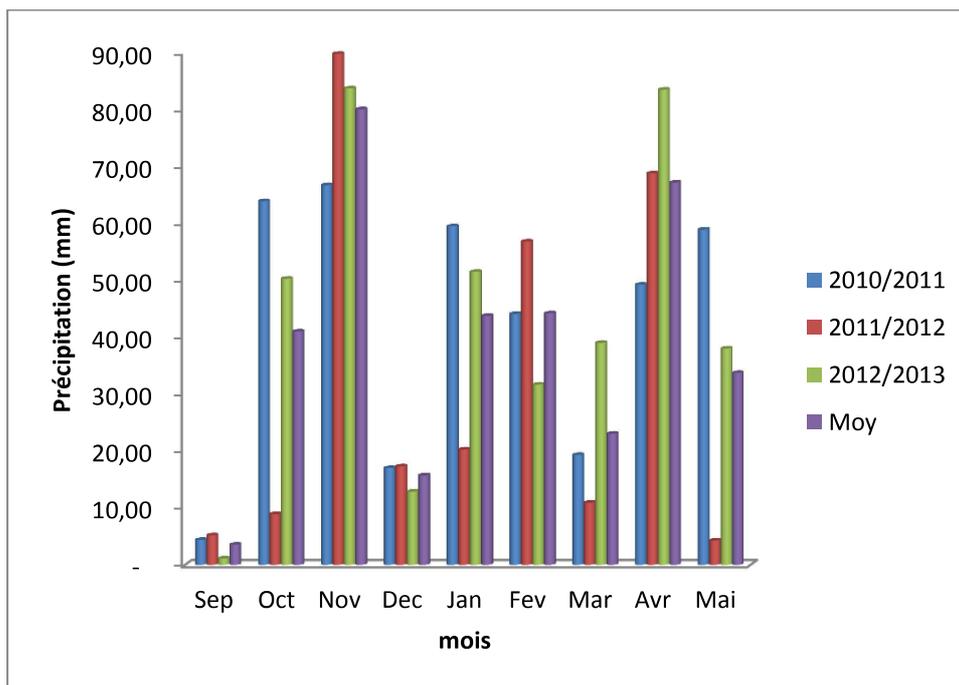


Figure 31. Variation des précipitations en fonction du temps.

On note que les valeurs des précipitations mensuelles équivalentes aux périodes du suivi se rapprochent plus ou moins de celles correspondant à la moyenne mensuelle de la série climatique. On constate aussi que les valeurs les plus faibles sont celles du mois de septembre, avec une précipitation mensuelle moyenne de 03.57 mm alors que les valeurs les plus élevées sont celles du mois de novembre où on a enregistré des quantités importantes de précipitations, avec une précipitation mensuelle moyenne de 80,07 mm.

La figure ci-dessous représente le cumul des précipitations mensuelles qui correspondent à la période de tout le cycle végétatif de la culture d'artichaut.

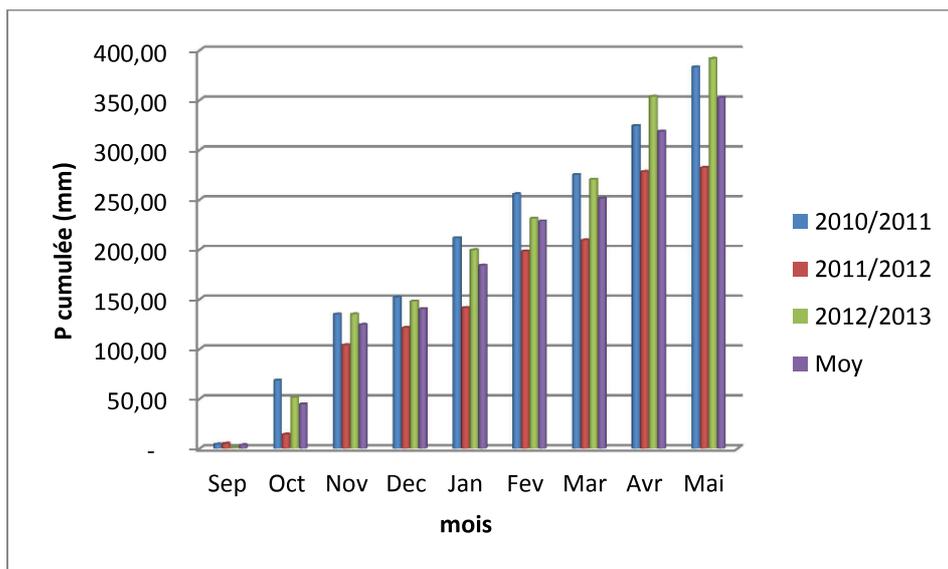


Figure 32. Variation des cumuls des précipitations en fonction du temps

D’après la figure 32, on constate que la saison 2012/2013 a connu un cumul des précipitations important qui est estimé par 391.7 mm alors que la saison la plus faible est celle de 2011/2012 où on a enregistré un cumul des précipitations égale à 282.26 mm.

3- Variation des évapotranspirations de référence (ET0)

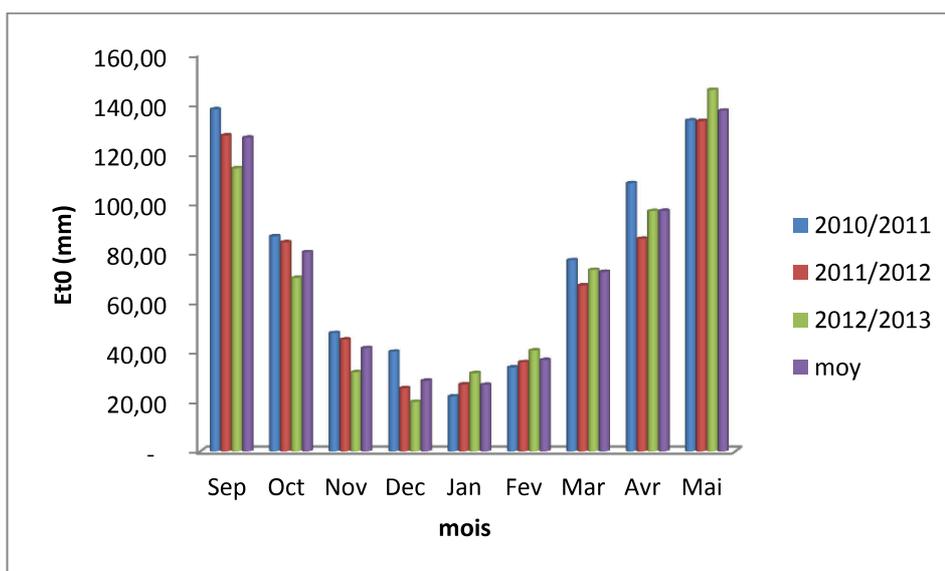


Figure 33. Variation des évapotranspirations en fonction du temps

La figure 33 montre bien la variation des évapotranspirations mensuelles « ET0 » durant la période expérimentale (calibration et validation du modèle) où les valeurs d'ET0 se confondent avec celle des ET0 moyennes. On remarque aussi une chute des valeurs d' ET0 dans les 04 premiers mois de plantation pour atteindre une valeur moyenne minimale de 28,87 mm en janvier, puis il y a un renversement vers l'augmentation des ET0 qui se déclenche à partir du mois de janvier jusqu'au moins de mai où on enregistre une valeur moyenne maximale de 137,37 mm. Cette période correspond au stade de développement de la plante jusqu'à la récolte.

Les valeurs de l'ET0 cumulées qui correspondent au cycle végétatif de la culture d'artichaut durant toutes les campagnes de suivi sont présentées dans la figure 34.

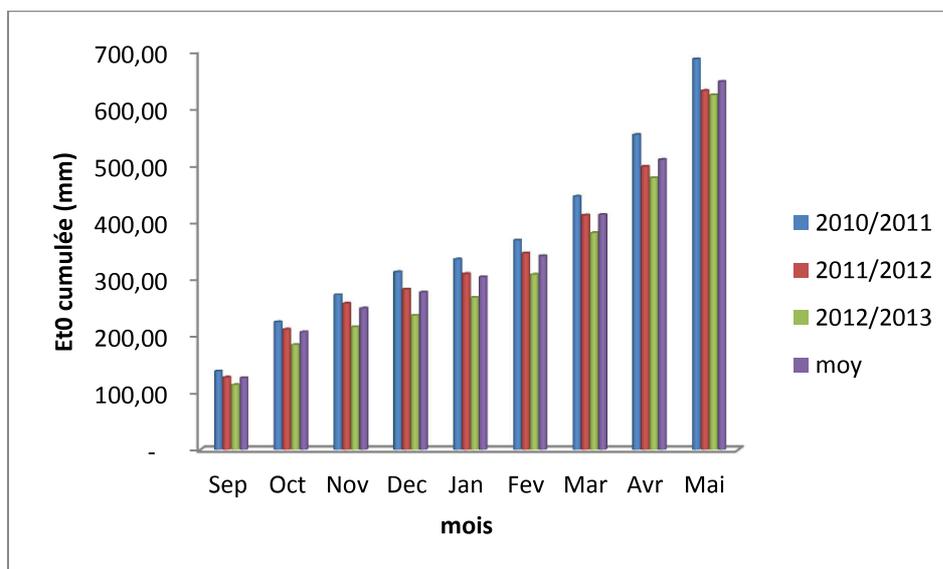


Figure 34. Variation des cumuls des évapotranspirations en fonction du temps.

Durant la période expérimentale relative au cycle végétatif de la culture d'artichaut nous avons enregistré un cumul de la moyenne maximal de l'Et0 égale à 647 mm, à la fin du cycle.

4- Variation des Humidités relatives

Les valeurs moyennes mensuelles de l'humidité de l'air qui correspondent à la période expérimentale sont présentées dans la figure suivante.

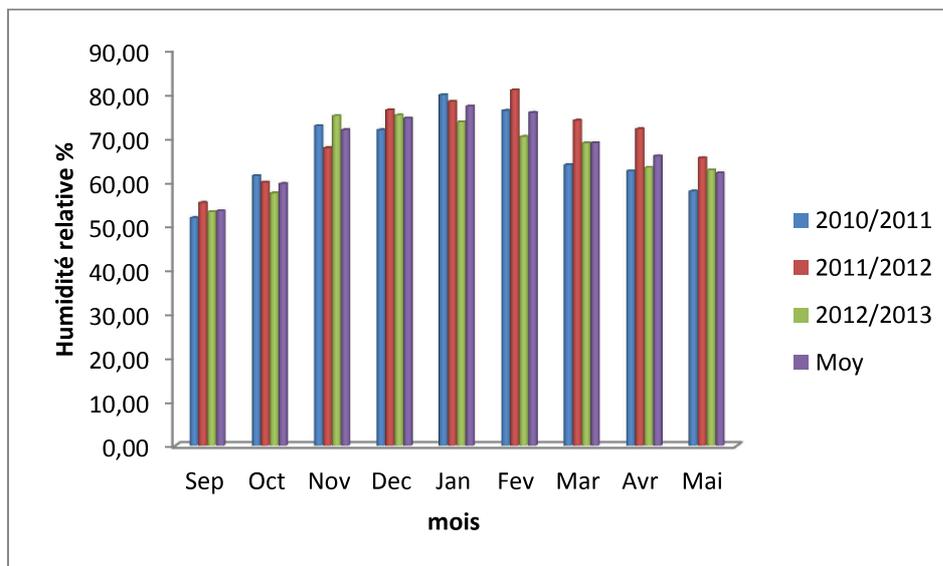


Figure 35. Variation de l'humidité de l'air en fonction du temps.

On constate que les valeurs les plus élevées de l'humidité de l'air sont les valeurs des mois de janvier et février, avec des moyennes de (77.12 % et 75.70 %) respectivement. Par contre, les valeurs les plus faibles sont celles enregistrées en septembre, avec une moyenne égale à 53.37% (Figure 35).

5- Variation des durées d'insolation

La figure 36 représente la variation des durées d'insolation moyennes mensuelles pendant la période expérimentale. Les valeurs les plus faibles sont celles des mois de novembre, décembre et janvier (3.64, 3.18 et 3.74 h/j respectivement). A l'opposé, les valeurs les plus élevées sont celles des mois de mai et septembre avec des moyennes de (7.92 et 7.41 h/j).

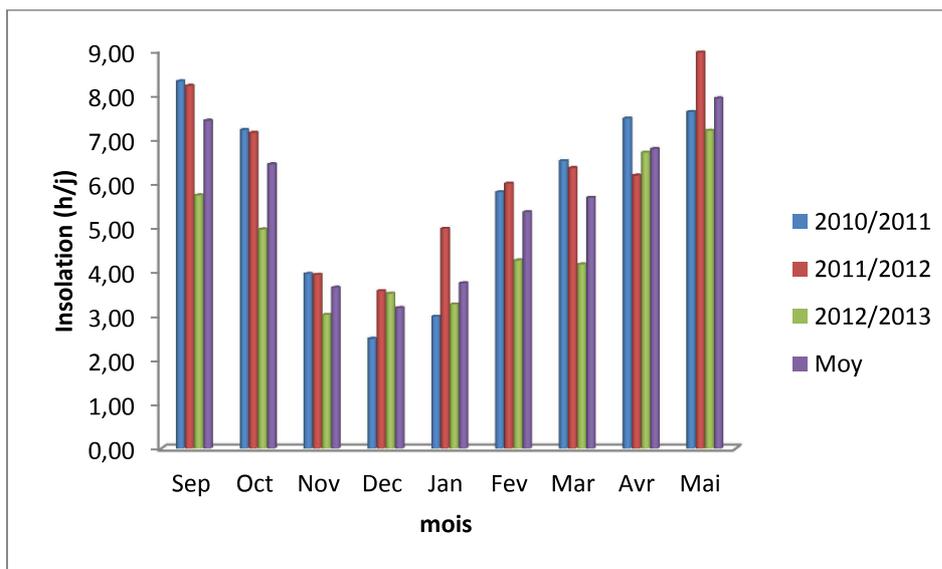


Figure 36. Variation des durées d'insolation en fonction du temps.

6- Variation des vitesses du vent

L'évolution des valeurs des vitesses du vent durant les saisons du travail est représentée sur la figure 37.

On remarque une grande variabilité de la vitesse du vent avec des écarts importants entre les saisons de suivi. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées pendant le mois de janvier où la vitesse moyenne mensuelle du vent est de 47.19 km/j alors que les plus importantes sont celles du mois de septembre, avec une vitesse moyenne mensuelle du vent égale à 142.01km/j.

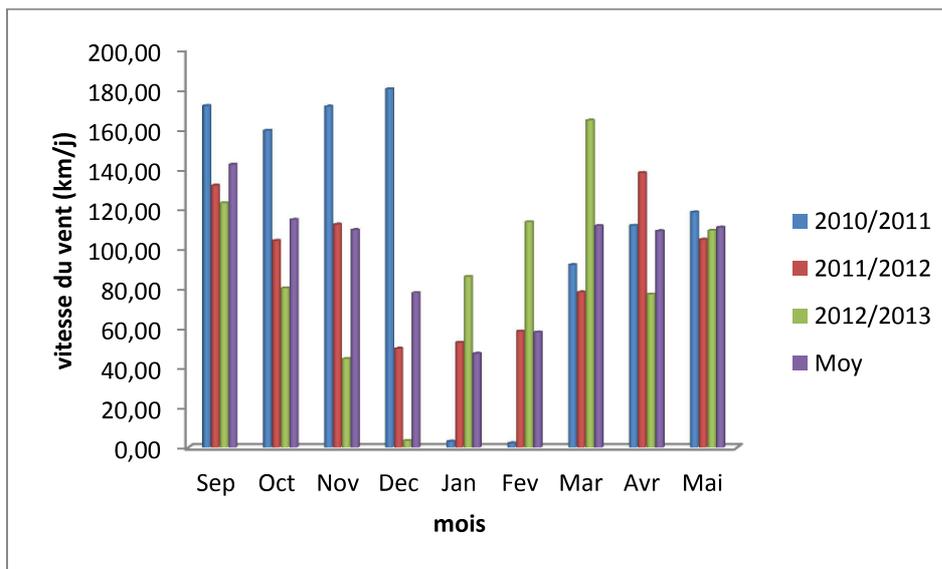


Figure 37. Variation des vitesses du vent en fonction du temps.

Caractéristiques du réseau d'irrigation

Dans la wilaya de Relizane, caractérisée par un déficit pédoclimatique quasi annuel (salinité primaire, rareté et irrégularité des pluies), le recours aux irrigations est devenu une solution incontournable pour les agriculteurs de la région notamment pour la pratique du maraichage.

L'agriculteur propriétaire de la parcelle où nous avons effectué notre étude utilise une eau de forage pour l'irriguer.

1- Qualité de l'eau d'irrigation

Afin d'évaluer la qualité de l'eau utilisée en irrigation, il est indispensable de se référer à une grille de qualité pour voir si cette eau convient à l'irrigation ou non. Nous avons opté pour la grille établie par la FAO (1976).

Tableau 09. Guide pour l'interprétation des eaux d'irrigation. (Bulletin FAO N° 29, 1976).

Problème de l'irrigation	Unité de mesure	Degré de problème		
		Pas de problème	Problème croissant	Problème grave
Salinité (CE)	mmhos/Cm	< 0.75	0.75 – 3.0	> 3.0
SAR	/	< 6.0	6.0 – 9.0	> 9.0
Toxicité spécifique de certains ions Na ⁺	(adj.SAR)	< 3.0	3.0 – 9.0	> 9.0
Cl ⁻	meq/l	< 4.0	4.0 – 10.0	> 10.0
Effets divers NO ₃ ⁻	mg/l	< 5	5 – 30	> 30
HCO ₃ ⁻	meq/l	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
pH	/	[gamme normale 6.5 – 8.4]		

Les analyses de l'eau d'irrigation utilisée dans la parcelle sur laquelle nous avons travaillé figurent dans le tableau suivant :

Tableau 10. Analyses de l'eau d'irrigation.

pH	CE μS/cm	meq/L							SAR
		Calcium	Magnésium	Sodium	Potassium	Chlorures	Sulfates	Bicarbonates	
7,20	1,85	5,41	2,22	5,85	0,07	6,93	3,57	5,12	2,99

- La valeur du pH de l'eau d'irrigation est neutre, ce qui permet de l'utiliser en irrigation sans aucun risque.
- La conductivité électrique est de 1,85 μS/Cm, cette valeur montre que l'utilisation de cette eau en irrigation peut provoquer un problème de salinisation à long terme.
- La valeur de SAR est de 2,99. Elle est inférieure à 6, ce qui montre qu'il n'y a aucun risque de sodisation.

Ces résultats montrent que notre échantillon d'eau d'irrigation est admissible par rapport au pourcentage de Sodium, comme il est faible en pouvoir alcalinisant, ce qui implique qu'il n'y a aucun risque d'alcalinité lors de son utilisation en irrigation.

2- Mesure de débit

Le coefficient d'uniformité d'application (Cu) calculé au niveau de la parcelle d'Oued Rhio est de 73,04%, avec un Qmoy égal à 0,83 l/h et un Qmin égal à 0,61 l/h. D'après les critères d'identification du Coefficient d'uniformité de Tiercelin, 1998, le réseau nécessite un nettoyage.

Le calcul du Coefficient d'Uniformité de distribution ou de Christiansen (1942) donne un CU(%) égal à 93,39 %. D'après Mekki et al. 2001, le réseau d'irrigation goutte à goutte utilisé dans notre parcelle est acceptable en matière d'uniformité car le CU dépasse 80 %.

Quand nous avons calculé le taux de colmatage au niveau des goutteurs, les résultats ont montré un pourcentage de colmatage (T col) égal à 6,13%.

Un exemple de la dose d'irrigation apportée à la parcelle sur laquelle nous avons travaillé est montré dans le calendrier d'irrigation ci-dessous.

Tableau11. Calendrier d'irrigation des saisons 2012/2013.

Saison 2012/2013	
Jour de l'année	dose (mm)
223	37
226	30
231	7,5
232	7,5
233	40
243	40
256	45
260	45
266	42
273	42
280	42
287	42
294	42
301	5
319	5
331	2,5
340	2,5
14	5
31	17,4
46	15
54	7,5
62	10

III- Caractéristiques du sol de la parcelle

Afin de déterminer la nature du sol de la parcelle sur laquelle nous avons travaillé, nous avons effectué des analyses physico-chimiques du sol dont certains paramètres sont nécessaires pour l'utilisation du modèle PILOTE. Les prélèvements ont été effectués à l'aide d'une tarière d'un mètre vingt de longueur pour prélever les échantillons à trois profondeurs différentes : 0-30 cm, 30-60 cm et 60 à 90 cm, ce qui correspond à la zone de croissance racinaire de la culture d'artichaut. Les principaux résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 12 : Analyse physicochimique du sol

Paramètres	Profondeurs du sol (cm)		
	0-30	30-60	60-90
Argile (%)	52	47	48
Limon (%)	28	31	35
Sable (%)	20	22	17
pH	7.64	7.42	7.37
CE (dS/m)	1.36	1.41	1.73
Humidité à la capacité au champ FC (%)	36	35	36
Humidité au point de flétrissement WP (%)	18	19	18
La densité apparente	1.75	1.61	1.72
Matière organique	1.8	0.9	0.8
N (%)	0.12	0.09	0.07

Les résultats du tableau 12 montrent que le sol de notre parcelle est dominé par l'argile, ce qui lui donne une texture argileuse. Il a un pH neutre, une faible salinité et un faible taux de matière organique au niveau des différents horizons.

Par ailleurs, les valeurs de l'humidité à la capacité au champ montrent que notre sol retient facilement l'eau, ce qui permet aux cultures de puiser dans le réservoir sol après irrigation ou précipitations.

-Texture du sol : une analyse granulométrique nous donne les pourcentages des différents groupes granulométriques du sol de notre parcelle. Ces pourcentages des différentes fractions nous permettent de déterminer la classe texturale de ce sol (figure 38).

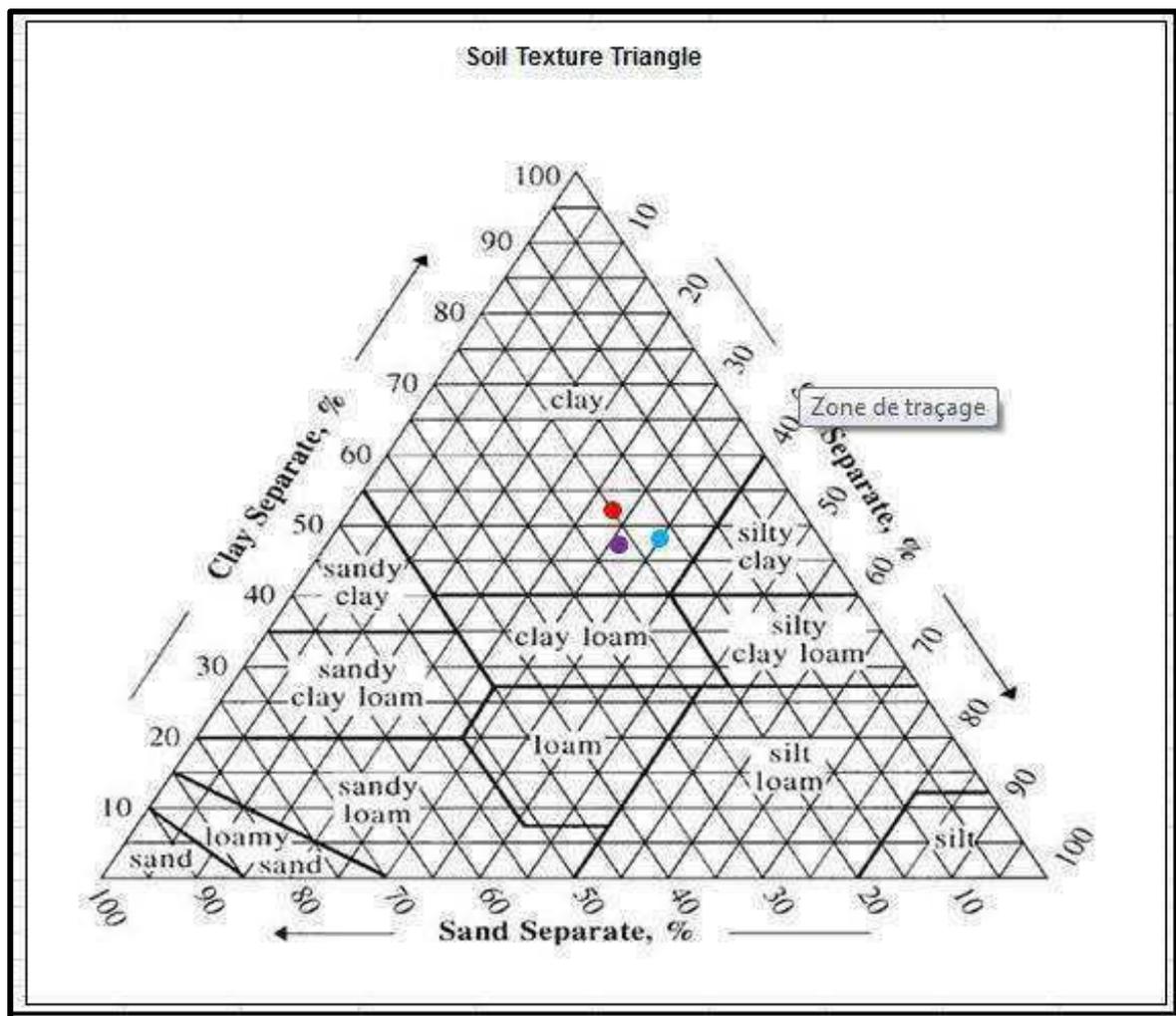


Figure 38. Triangle textural du sol

Selon le triangle textural (figure 38), notre sol a une texture argileuse (Argile lourde) pour les trois horizons prélevés « 0-30 cm », « 30-60 cm » et « 60-90 », ce qui signifie qu'il se caractérise par une densité élevée et une faible perméabilité.

- **Mesure de pH du sol :** les valeurs du pH dans les trois profondeurs montrent que notre sol a un pH neutre, ce qui implique qu'il n'y a aucun risque d'alcalinisation des sols.

- **Conductivité électrique :** d'après Mathieu et Pieltain, 2003, les valeurs des conductivités électriques mesurées dans les trois profondeurs montrent que notre sol est considéré comme non salé ($CE < 2$ dS/m). Aussi, nous avons constaté qu'il y a des précipitations des sels de la surface vers les profondeurs, ce qui montre bien le bon fonctionnement du système du drainage. Néanmoins, il n'y a aucun risque de salinisation

des sols où presque toutes les plantes donnent un bon rendement dans cette classe de salinité.

Tableau 13. Classe de la salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait de saturation à 25 °C

mmhos·cm ⁻¹ dS·m ⁻¹	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	
Riverside USA	non salé	légèrement salé	salé		très salé			extrêmement salé			
Servant 1975	non salé	faiblement salé	moyennement salé		salé		fortement salé		très fortement salé		
CPCS 1987	non salé	phase saline		sol salin							
R.P 1995	non salé				horizon salique (1)			horizon salique (2)			
FAO 1989	non salé		(1) phase saline ou (2) caractères saliques si $pH_{Ca} 1/1 > 8,5$					caractères saliques			
BRM 1999	non salé				horizon salique si $pH_{Ca} > 8,5$ ou $< 3,5$			horizon salique			

(1) Sels de la série alcaline (bicarbonates et carbonates) et $pH_{Ca} > 8,5$.
 (2) Sels de la série neutre (chlorures, sulfates ou nitrates) et $pH_{Ca} > 8,5$.

Source : (Mathieu et Pieltain, 2003).

- **Valeurs de pF** : les valeurs de l'humidité au point de flétrissement WP (%) et à la capacité au champ FC(%) dans les trois profondeurs sont entre 18% et 36% respectivement.
- **Matière organique** : d'après la classification de Schaefer, 1975 ; (tableau 14), les sols sont classés selon le taux de la matière organique comme suit :

Tableau 14. Classification des sols selon la matière organique

Classes	Taux de la matière organique	Qualification du sol
1	< 1%	Très pauvre
2	1% à 2%	Pauvre
3	2% à 4%	Moyenne
4	> 4%	Riche

Source : Schaefer, 1975

Selon Schaefer, 1975 ; notre sol est pauvre en matière organique au niveau de la couche superficielle « 0-30 cm », et très pauvre en matière organique dans les deux

autres profondeurs « 30-60 cm » et « 60-90cm ». On constate donc une diminution de la richesse du sol en matière organique de la couche superficielle vers les couches les plus profondes.

- **Stabilité structurale** : La mesure de la stabilité structurale a pour objectif de connaître la sensibilité du sol à la battance et à l'érosion hydrique. La parcelle qui fait l'objet de notre étude a montré une structure de sol stable avec un MWD égal à 1,84 mm, ce qui implique une battance occasionnelle sous la pluie et un risque limité du ruissellement et de l'érosion (Le Bissonnais, 1995).

Tableau 15. Classe de la stabilité, battance et érosion en fonction des valeurs du diamètre moyen pondéré après désagrégation (MWD).

MWD	Stabilité	Battance	Ruissellement et érosion diffuse
< 0,4 mm	Très instable	Systematique	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques
0,4 – 0,8 mm	Instable	Très fréquente	Risque fréquent en toute situation
0,8 - 1,3 mm	Moyennement stable	Fréquente	Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques
1,3 – 2,0 mm	Stable	Occasionnelle	Risque limité
> 2,0 mm	Très stable	Très rare	Risque très faible

Source : (Le Bissonnais, 1995).

IV- Calibration du modèle PILOTE

Dans cette partie, nous avons utilisé les données climatiques collectées, les paramètres d'initialisation mesurés sur terrain, les paramètres plantes mesurés et les paramètres irrigation équivalents à l'année de plantation 2011/2012 afin de calibrer le modèle PILOTE sur la parcelle sur laquelle nous avons travaillé.

Lors de la calibration du modèle PILOTE nous avons basé sur plusieurs paramètres qui ont une relation avec la croissance de la plante, la réserve de l'eau dans le sol, le rendement ...etc.

Le calage du modèle nécessite des critères d'évaluation pour la comparaison entre les valeurs estimées par le modèle et les valeurs mesurées ; pour cela nous avons choisi deux paramètres nécessaires qui sont : le critère Nash (C_e) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

1- Variation de l'indice de la surface foliaire LAI

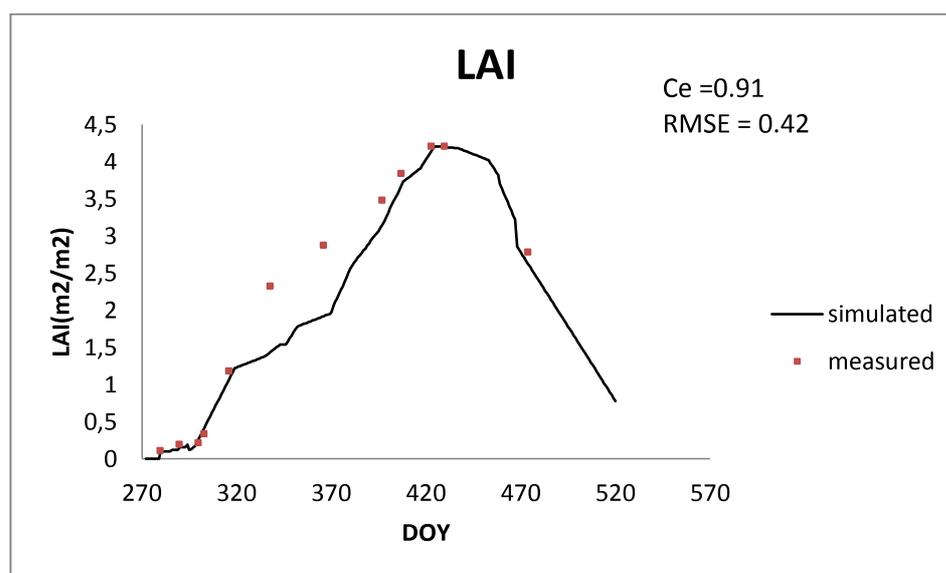


Figure 39. Variation de l'indice de surface foliaire pour l'année 2011/2012

L'étude de la variation de l'indice de la surface foliaire est très importante car cet indice a une relation intime avec la croissance de la plante.

On remarque que les valeurs de LAI mesurées sont rapprochées aux valeurs de LAI simulées par le modèle PILOTE, avec un coefficient de Nash égale à 0.91 et un RMSE égale à 0.42.

On note aussi que la valeur de LAI max simulée par le modèle PILOTE reflète la valeur de LAI max 4.2 prise comme donnée input du modèle.

2- Variation de la réserve de l'eau dans le sol

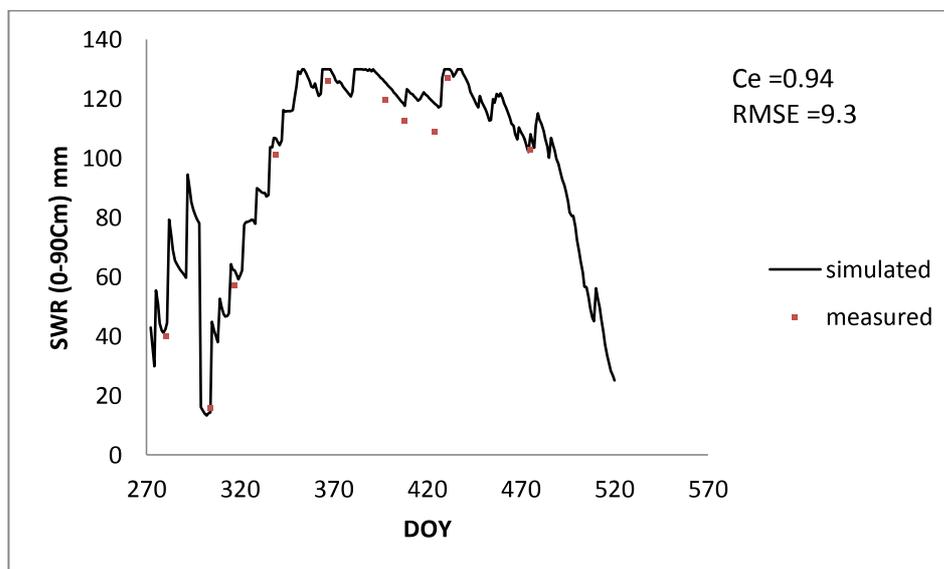


Figure 40. Variation de la réserve de l'eau en sol pour l'année 2011/2012

Dans cette partie nous avons fait la comparaison entre les valeurs de la réserve de l'eau en sol mesurées sur terrain et celles simulées par le modèle PILOTE où nous avons enregistré un calage important des valeurs mesurées avec les valeurs simulées par le modèle avec un coefficient Nash égal à 0,94 et un RMSE égal à 9.3 mm.

3- Variation de la biomasse totale

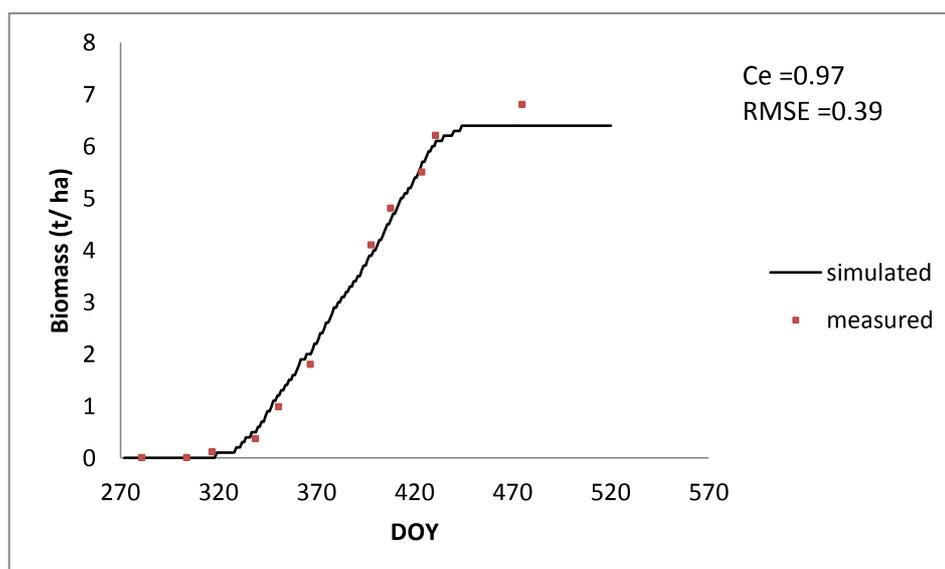


Figure 41. Variation de la biomasse totale pour l'année 2011/2012

La variation de la biomasse totale est importante du fait qu'elle a une relation directe avec le rendement. On remarque que les résultats obtenus par le modèle PILOTE correspondent pratiquement à ce que nous avons mesuré sur terrain où nous avons enregistré un C_e égal à 0,97 et un RMSE égal à 0.39 t/ha, avec une valeur maximale de 6.4 t/ha.

V- Validation du modèle PILOTE

Pour la validation du modèle PILOTE on a suivi les mêmes procédures ainsi les paramètres de la calibration mais pour une deuxième année de plantation « 2012/2013 », pour cela on a simulé et mesuré les paramètres nécessaires pour la validation, comme on a gardé les mêmes critères d'évaluation pour la comparaison entre les valeurs estimées par le modèle et les valeurs mesurées qui sont le critère Nash (C_e) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

1- Variation de l'indice de la surface foliaire LAI

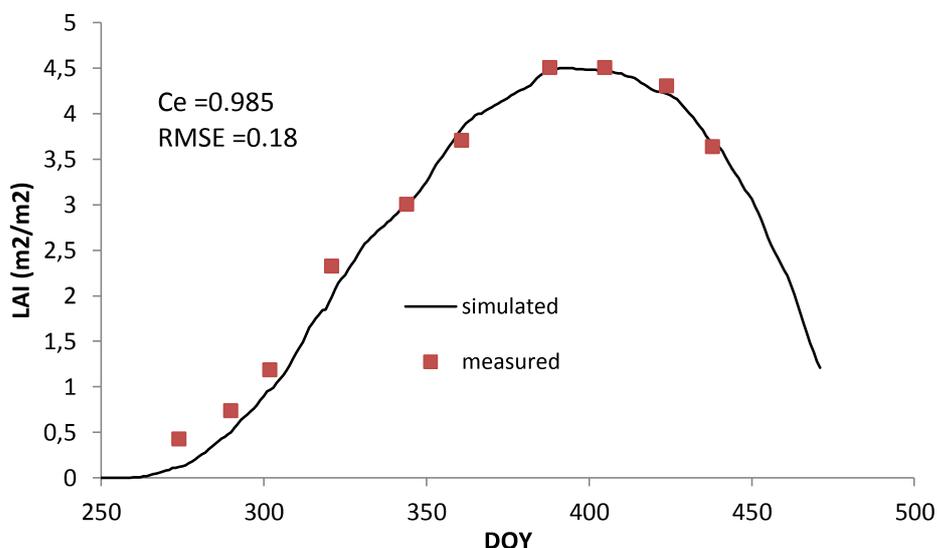


Figure 42. Variation du LAI de la culture de l'artichaut, année 2012/2013.

Pour la variation du LAI durant l'année de suivi 2012/2013, nous avons remarqué que les valeurs simulées par le modèle PILOTE sont plus proches à celles mesurées sur terrain où on enregistre un coefficient de Nash égal à 0.98 et une valeur très faible de RMSE égale à 0.18 m^2/m^2 .

On remarque aussi que la valeur de LAI max simulée par le modèle PILOTE reflète la valeur de LAI max 4.5 prise comme donnée input du modèle. Aussi, la

valeur de LAI max mesurée pour l'année de validation est supérieure à celle de l'année de la calibration.

2- Variation de la réserve de l'eau dans le sol

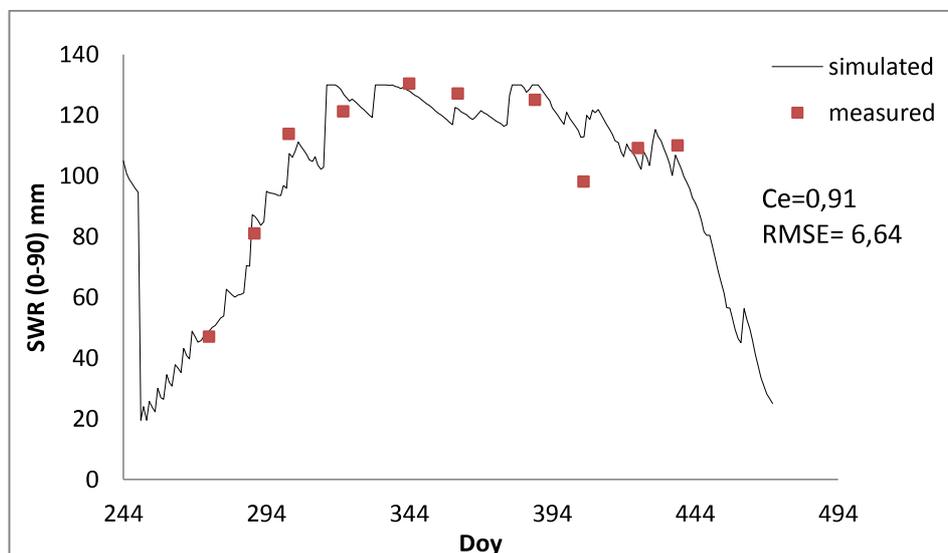


Figure 43. Variation de la réserve de l'eau en sol pour l'année 2012/2013.

Comme le montre la figure 43 nous avons comparé entre les valeurs mesurées sur terrain de la réserve de l'eau dans le sol et les valeurs simulées par le modèle PILOTE. Nous avons constaté qu'il y a une amélioration de la valeur de RMSE, ce qui signifie qu'il y a une minimisation de l'erreur. On remarque aussi qu'il y a un bon calage des valeurs mesurées avec celles simulées par le modèle où le coefficient Nash C_e enregistré est de 0,91.

3- Variation de la biomasse totale

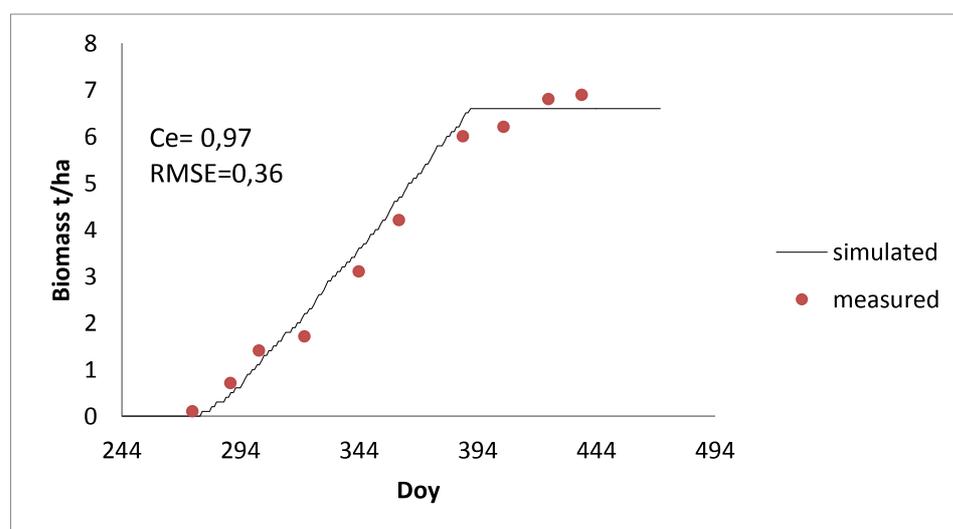


Figure 44. Variation de la biomasse totale pour l'année 2012/2013.

Pour la variation de la biomasse totale de l'année de validation 2012/2013, les valeurs simulées par le modèle PILOTE sont adéquates à ce que nous avons mesuré sur terrain, avec un coefficient de Nash Ce égal à 0,97 et un RMSE égal à 0.36 t/ha.

On remarque aussi une amélioration de la valeur maximale de la biomasse totale mesurée (6.89 t/ha) par rapport à celle de l'année de calibration (Figure 44).

VI- Application du modèle PILOTE

Dans cette partie et après la calibration et la validation du modèle PILOTE, ce modèle est appliqué pour d'autres années afin de répondre aux questions des agriculteurs concernant la prédiction ,avec précision, des rendements agricoles et la réserve de l'eau dans le sol en présence d'un scénario climatique donné, mais aussi comment combler les lacunes d'une série statistique de données de rendement lorsque certaines données manquent.

Nous avons appliqué le modèle PILOTE afin d'estimer la biomasse totale pour trois saisons qui ont des quantités de précipitations différentes: faible (P = 160 mm), élevée (P = 383 mm) et moyenne (P = 319 mm) correspondant aux saisons 2009/2010, 2010/2011 et 2006/2007, respectivement. L'objectif est de vérifier l'impact des quantités de précipitations sur la croissance de la plante et la quantité de la biomasse totale de la culture de l'artichaut. La biomasse totale a été simulée en supposant la même teneur initiale en eau dans le sol, la profondeur maximale des racines et le LAI, et sur la base d'un calendrier type d'irrigation fixe. Les résultats de la simulation sont présentés dans le tableau 16.

• Simulation de la biomasse totale

Les valeurs de la biomasse totale simulée par le modèle PILOTE au cours des saisons concernées, qui ont des précipitations différentes, sont montrées comme suit :

Tableau 16. Estimation de la biomasse totale

Saison	P (mm)	biomasse totale (t/ha)
2006/2007	319.0	6.7
2009/2010	160.0	6.5
2010/2011	383.0	9.1
2011/2012	282.3	7.0
2012/2013	360.9	6.89
Moyenne	336.3	7.2
Coefficient de variation	0.30	0.1

On remarque que pendant la saison de simulation 2009/2010, caractérisée par une faible précipitation (160 mm) enregistrée tout au long du cycle de croissance des artichauts, la biomasse totale est d'une valeur minimale de (6,5 t.ha⁻¹). En revanche, la quantité de précipitations plus élevée de la saison 2010/2011 semble augmenter la production de la biomasse totale (9,1 t.ha⁻¹). L'analyse a indiqué une biomasse totale moyenne de 7,2 t.ha⁻¹ avec une légère variabilité (coefficient de variation égal à 0,1).

Ces résultats sont en accord avec les résultats de Saleh et al (2012), qui ont conclu que l'augmentation de la quantité d'eau affecte positivement les caractères de la croissance végétative de la plante d'artichaut, et augmente la productivité des artichauts.

• Simulation de la réserve de l'eau dans le sol

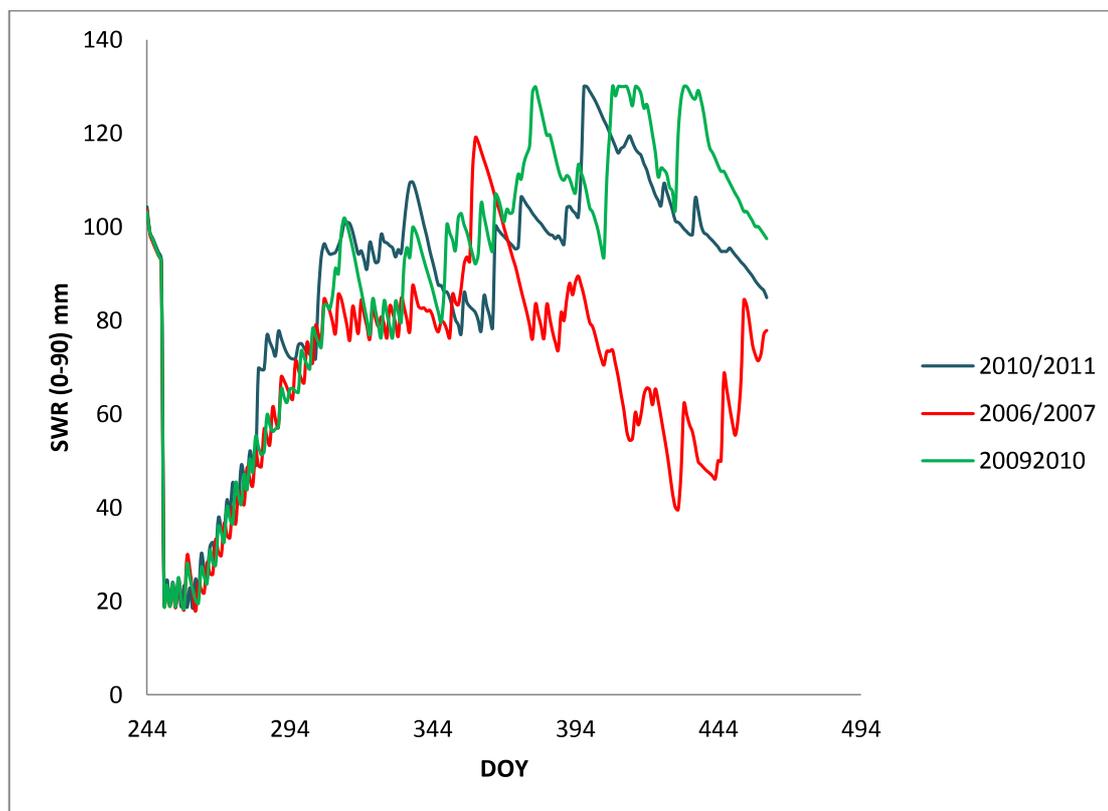


Figure 45. Simulation de la réserve de l'eau dans le sol pendant 3 campagnes à Relizane.

En ce qui concerne la réserve de l'eau dans le sol, on note que les trois courbes de la figure 45 sont proches les unes des autres, sauf ce qui concerne les cent derniers jours du cycle végétatif de l'artichaut (de la mi-février à la fin mai). Une pluviométrie a été enregistrée en 2006/2007 illustrée par un SWR faible durant les dernières phases de croissance. Cela peut affecter le rendement ($6,7 \text{ t ha}^{-1}$) même si la quantité de pluie ($P = 319 \text{ mm}$) était assez élevée par rapport à 2009/2010 ($P = 160 \text{ mm}$ et biomasse = 6.5 t ha^{-1}). Ce résultat souligne le rôle important de l'irrigation dans les conditions semi-arides.

• Simulation du drainage

Nous avons pu simuler le drainage en comparant entre les valeurs des apports en eau (pluie et irrigation) et les valeurs de la quantité d'eau drainée pour les saisons 2012/2013 et 2010/2011 (figures 46 et 47). On remarque qu'il y a une corrélation importante entre les valeurs de drainage et celles des apports, ce qui montre l'état de la saturation du sol en eau et l'efficacité du système de drainage.

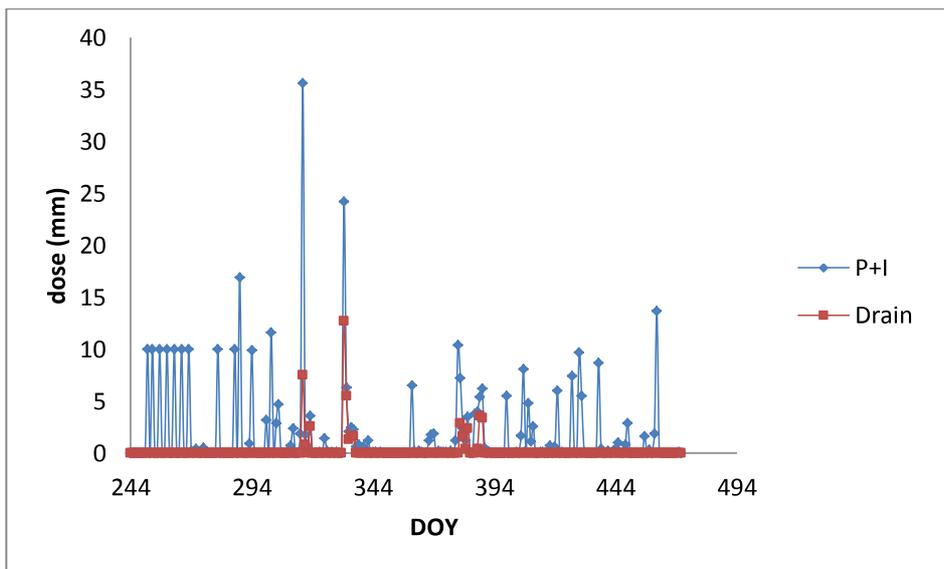


Figure 46. Simulation du drainage pour l'année 2012/2013

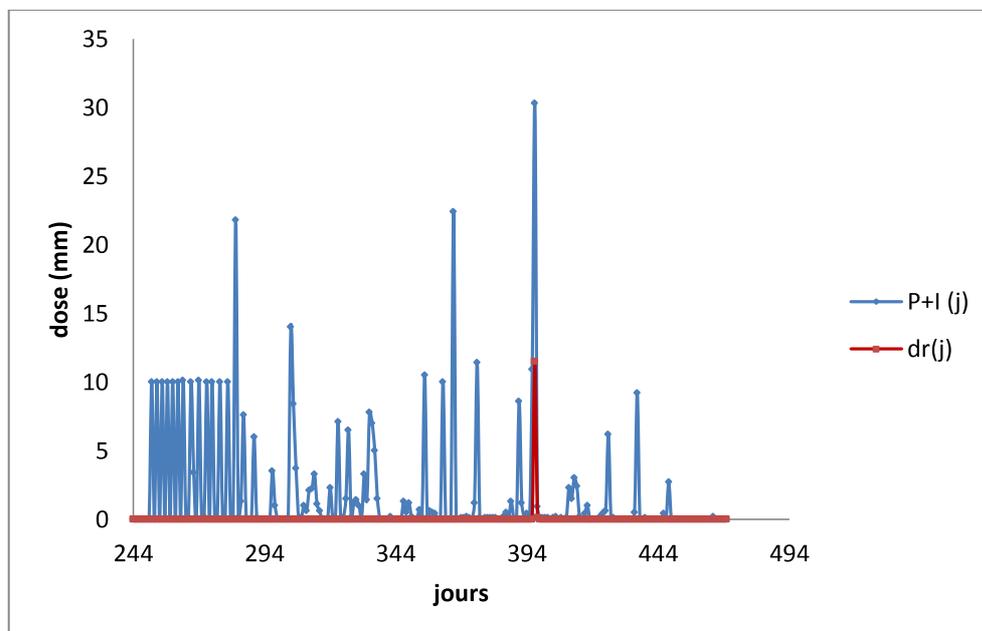


Figure 47. Simulation du drainage pour l'année 2010/2011

VIII. Discussion générale

Dans un contexte caractérisé par un déficit pédoclimatique quasi-annuel et une salinité primaire et secondaire, il est important de mieux valoriser l'usage de l'eau dans la production agricole.

L'utilisation de la modélisation est un des meilleurs moyens de gérer les stratégies d'irrigation et prédire le rendement des cultures. Il existe plusieurs modèles agrobioclimatiques qui étudient le bilan hydrique et qui prédisent le rendement (GreenLab, Bylina, PILOTE...). Nous avons choisi le modèle PILOTE parce que son utilisation nécessite relativement peu de données et fournit des résultats suffisamment précis pour comprendre les phénomènes auxquels nous nous intéressons et conduire à une bonne connaissance de la biomasse totale.

L'originalité de notre travail de recherche réside dans l'utilisation du modèle PILOTE dans un contexte particulier, caractérisé par un climat semi-aride et dans son application, pour la première fois, sur la culture d'artichaut. En effet, nous avons pu intégrer cette culture à la base de données du modèle PILOTE.

Nous avons tenté d'appliquer le modèle PILOTE en nous basant sur trois éléments essentiels qui ont une relation directe avec la croissance de la plante d'une part et la gestion de l'eau d'autre part. Ces paramètres sont la biomasse totale, l'indice de la surface foliaire et la réserve de l'eau dans le sol.

Le modèle Pilote et par son module sol simule le bilan hydrique du sol. Le module régit les transferts d'eau au pas de temps journalier, mais son expression discrète peut s'écrire facilement sous forme différentielle. Le bilan hydrique qui décrit l'évolution du stock dans le sol est unidimensionnel. Le sol est conceptualisé selon trois réservoirs. A partir de la surface, on a successivement le réservoir superficiel (R_1), le réservoir sous-jacent (R_2), et le réservoir profond (R_3). Ces trois réservoirs sont homogènes dans la façon de contenir l'eau, c'est-à-dire la teneur en eau volumique (mm / m) à un point donné varie toujours entre deux valeurs de seuil indépendamment de la profondeur et du réservoir où se situe le point. (Brisson et al. 2008). On introduit ainsi un paramètre clé du sol selon ce concept de réservoir, qui est la réserve utile (RU). Exprimée en millimètres d'eau par mètre de sol, la RU correspond à la quantité d'eau maximale que le sol peut retenir et restituer à la plante. La RU est donc la

quantité d'eau comprise entre l'humidité à la capacité au champ (θ max) et l'humidité au point de flétrissement (θ min). En dessous du point de flétrissement, l'eau n'est plus extractible par la plante. Et au-delà de cette capacité, l'eau est drainée vers la couche inférieure du sol. Ces paramètres dépendent essentiellement de la texture du sol sachant que les sols à forte proportion de particules fines (limons et argiles) emmagasinent davantage d'eau.

Notons qu'il faut mesurer la teneur en eau ou le potentiel hydraulique afin de calibrer ou vérifier l'adéquation du module sol. C'est pourquoi nous avons calculé la réserve en eau dans le sol dans notre étude.

Par ailleurs, nous avons calculé l'indice de la surface foliaire LAI qui a un rôle important dans le module plante du modèle PILOTE du fait qu'il témoigne de manière visible des potentialités productives (quantité de matière sèche) de la plante au cours de sa croissance.

Comme l'objectif majeur du modèle Pilote est de prédire le rendement, nous avons calculé la matière sèche totale produite tout au long du cycle de croissance. L'indice de récolte (IR) n'étant utilisé que pour estimer le rendement en grain final. Le modèle utilise la loi de Beer pour simuler la production de matière sèche totale, et la quantité de matière récoltée s'en déduit grâce à l'indice de récolte. Pour une variété donnée, l'indice de récolte potentiel est une référence qu'on peut trouver dans la littérature ou mesurer sur un traitement sans stress (Mailhol et al. 1997a) et (Khaledian et al. 2009b).

Le modèle Pilote simule le rendement, et après la calibration et la validation de ce modèle dans la région du Bas Chélif pour la culture d'artichaut, cela nous permet de proposer des méthodes de gestion des irrigations et une maîtrise des rendements. On peut aussi l'utiliser pour développer une démarche quantitative permettant de décrire l'interaction de la ressource en eau avec la production végétale, comme il peut représenter un outil d'aide à la décision pour les agriculteurs ou les gestionnaires agricoles de la région du Bas-Chélif.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

IX- Conclusion générale

Dans ce travail, le modèle PILOTE a été utilisé pour prédire la biomasse totale des artichauts et les teneurs en eau dans le sol en réponse aux précipitations et à l'irrigation. Le modèle original de Mailhol et al. (1997) a été adapté pour l'horticulture en introduisant les données correspondantes de la plante dans le modèle (LAI maximum, densité de plantation, profondeur des racines, etc.).

Les tests ont été réalisés sur la variété de culture d'artichaut "Violet de Provence" au cours des saisons 2011/2012 et 2012/2013 sur un système d'irrigation parcellaire relatif au "goutte à goutte" pour valider cette version.

Nous avons commencé par la simulation et la validation du modèle PILOTE pendant les deux années de suivi 2011/2012 et 2012/2013. Une fois le modèle validé, nous l'avons appliqué sur d'autres années afin de donner une estimation des paramètres de SWR, du rendement et de la biomasse totale.

Les résultats ont montré que le modèle simule de façon satisfaisante le LAI, la réserve de l'eau dans le sol et la biomasse totale avec un coefficient d'efficacité minimum de 0,9. Le modèle PILOTE nécessite un petit nombre de paramètres, dont la plupart peuvent être déduits de la littérature, confirmant que « PILOTE peut être facilement calibré dans de nouveaux environnements et pour d'autres cultures » (Khaledian et al 2009 Zhongping et al., 2011).

Dans cette étude, le modèle a été traité pour prédire la biomasse totale et la SWR dans trois années climatiques différentes. Les résultats ont montré une relation croissante entre la biomasse totale et la quantité de pluie au cours du cycle végétatif. Il confirme les conclusions de Mailhol et al. (2004) sur la production du blé dur en Tunisie. D'autres développements du modèle, y compris l'engrais azoté (N), devraient améliorer les performances du modèle.

Ce travail de recherche ouvre plusieurs perspectives qui pourraient consister en :

- L'extrapolation des résultats à d'autres années climatiques (adaptation du modèle sur différentes années climatiques où on peut donner des estimations et des prévisions des rendements dans une année x).

Conclusion générale

- Extrapolation du modèle sur d'autres cultures locales stratégiques (orge, melon,...), et par la suite développement d'une stratégie agricole sur la plantation de certaines cultures importantes.
- L'amélioration des performances du modèle par la prise en compte de l'azote dans le calcul du rendement et proposition d'une meilleure gestion des engrais azotés afin de réduire la pollution par azote et donner des produits consommables sans risque.
- L'amélioration des performances du modèle par la prise en compte de la salinité et son influence sur le rendement et aussi la possibilité d'établir une carte permettant de coupler une carte de la salinité avec une carte des rendements à l'échelle régionale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- **Abbadi N. et al., 1997.** Gestion des irrigations de complément sur la culture du blé dur (*Triticum durum* variété Vitron). Mémoire d'ingénieur, INA d'Alger.
- **ABH-CZ., 2002.** Bulletin de la qualité des eaux souterraines des nappes du Chélif Zahez. Ministère des ressources en eau, 19P.
- **Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998.** Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- **Aubinau, 2002.,** Irrigation, in Larousse agricole.
- **Azouggagh M., 2001** Transfert de technologie en agriculture bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA.MADREEF /DERD N 81, juin 2008
- **Bagnouls F., Gaussen H., 1953.** Saison sèche et indice xérothermique. Bull. Soc.Hist. Nat. Toulouse., 88, pp193-239.
- **Baize D., 1988.** Guide des analyses courantes en pédologie. Choix – Expression Présentation - Interprétation. Ed. INRA - Paris, 172P.
- **Bernstein, L. and L. E. Francois. 1973.** Comparison of drip, furrow, and sprinkler irrigation. Soil Sci. 115: 73-86.
- **Blaney, H.F. and Criddle, W.D. 1950.** Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conserv. Serv. SCS-TP96. 44 pp.
- **Bonn F., 2002.** L'eau dans le système sol – plante – atmosphère. (www.INRA.fr)
- **Boulaine J., 1956.** Carte des sols des plaines du Cheliff au 1/50.000e, feuilles 1 à 5. Inspection générale de l'Agriculture du Gouvernement Général de l'Algérie.
- **Boulaine J., 1957.** Etude des sols des plaines du Cheliff. Thèse d'état de l'Université d'Alger, 582 p.
- **Bradaï A. H. et Douaoui., 2008.** Aptitude des eaux souterraines de la plaine du Bas-Chélif à l'irrigation. Acte du premier séminaire national sur l'Agriculture, l'Environnement et Santé, Centre Universitaire Khemis Miliana 19 et 20 Avril 2008. 7p.

Références bibliographiques

- **Brisson .N, Launay. M, Mary. B and Beaudoin. N**, editors. Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model. Editions QUAE, Versailles, FRANCE, 2008.
- **Carole Calcet, Alain Arrufat . Catherine Mazollier.,** 2016. Maîtriser son irrigation en maraîchage biologique. Sud et bio.
- **Chol P., Tron G.,** 1999. Pilotage de l'irrigation.
- **Christiansen J.E.,** 1942. Irrigation by sprinkling. California Agric . Exp. Sta. Bulletin, 670. University of Clifornia, Berkeley, Etats -Unis.
- **Closs R.L.,** 1958. The heat pulse method for measuring rate of sap flow in a plant stem. New Zealand Journal of Sciences, vol. 1, pp. 281-288.
- **Cohen M., Girona J., Valancogne C.,**1993. Water consumption and optimisation of the irrigation in orchards. Acta Horticulturae, vol. 335, pp. 349-357.
- **Collatz G.R., Ball J.T., Grivet C., Berry J.A.,** 1991. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration : a model that includes a laminar boundary layer. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 54, pp 107-136.
- **Cox, W.J., Jolliff, G.D.** 1986. Growth and yield of sunflower and soybean under soil water deficits. Agron. J., 78: 226-230.
- **Dantas-Antonino, A.,** 1992. Modélisation des transferts de masse et de chaleur dans le système sol-plante-atmosphère. Influence de la variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques du sol. Thèse, l'Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 195 pp.
- **Davies W.J., Zhang J.,** 1991. Root signals regulation of growth and development of plants in drying soil. Annual Review of Plant Physiology, vol. 42, pp. 55-76
- **Delli R.,** 2001. Optimisation de l'irrigation en conditions de ressources en eau limitées. Application sur deux types de céréales : Blé dur (Var. Vitron) et Sorgho (Var. Argence). Thèse de Magister INA El-Harrach, 104p.
- **Doorenbos, J. and kassam, A.H.** 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, FAO.
- **Douaoui A. et Hartani. T.,** 2007. Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Actes de l'atelier régional SIRMA. Tunis, Juin 2007.

Références bibliographiques

- **Douaoui A., 2005.** Variabilité spatial de la salinité en relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Cheliff. Apport de la géostatistique et de la télédétection. Thèse Doctorat d'état, INA-Alger .225p Douaoui, 2005).
- **Douaoui A., Gascuel-Oudou C., Walter Ch. ; (2004) :** Infiltrabilité et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas Chélif (Algérie). Mesures au laboratoire sous simulation de pluie. EGS, Vol. 11, N°4, 2004, 379-392.
- **Douaoui A., Hartani T., Lakehal M., 2006.** La salinisation dans la plaine du Bas-Cheliff : acquis et perspectives. Economies d'eau en Systèmes IRrigués au Maghreb. Deuxième atelier régional du projet Sirma, Marrakech, Maroc, 29-31 mai 2006.
- **Douaoui A., Herve N., Walter Ch., 2006.** Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil remote-sensing data. GEODERMA, 134,1-2. pp 217 – 230.
- **Dutremée F., 1995.** Comparaison de deux modes de gestion de l'irrigation des cultures en conteneurs. Influence sur la croissance et la résistance au stress hydrique. Mémoire d'Ingénieur, ENITHP, Angers, France.
- **FAO .1973.** Trickle irrigation. Irrigation and Drainage Paper 14, FAO, Rome. 153p.
- **FAO. 1976.** Prognosis of salinity and alkalinity. Soils Bulletin 31, FAO, Rome.
- **FAO. 1976.** Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage Paper 29, FAO, Rome.
- **Feddes, R.A., Kowalik, P.J. and Zaradny H. 1978.** Simulation of field water use and crop yield. Halsted press, John Wiley & Sons (Eds), New York.188p.
- **Filali F., 2003.** Bilan hydrique à la parcelle. Pilotage d'un essai d'irrigation par le logiciel « PILOTE » dans ses versions 1.2 et 1.3 utilisant respectivement le « Kc » et le « LAI », Thèse magister, 167p.
- **Gherina S.A., 2008.** Impact de la qualité des eaux souterraines dans l'irrigation sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-chélif - Apport de la télédétection. Mémoire de Magister, Ressources en eaux – Centre universitaire Khemis Miliana. 126P.
- **Hartani T., Douaoui A., Kuper M., Hassani F. 2007.** Stratégies de gestion individuelle de la salinité dans le périmètre irrigué du Bas Cheliff cas du périmètre d'Ouarizane Actes du troisième atelier régional du projet Sirma, Nabeul, Tunisie, 4-7 juin 2007.
- **Hénin S., Monnier G., Combeau A., 1958.** Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. Ann. Agro., I. 71-90.

Références bibliographiques

- **Hillel D., 1980.** L'eau et le sol : Principes et processus physiques, 294p.
- **INRRA., 2009.** Institut Nationale de Recherches Agronomiques Algérienne, Hmadana,
- **Insaf Mekki, Jean-Paul Luc, M. Raoudha 2001.** Efficience de l'irrigation goutte-à-goutte du piment : cas particulier d'une parcelle "agriculteur" irriguée à partir du barrage collinaire de Kamech (Cap Bon, Tunisie)
- Institut Technique des Cultures Maraîchères et Industrielles, 2015
- **Jensen, M.E. 1974.** (ed.) Consumptive use of water and irrigation water requirements. Rep. Tech. Com. on Irrig. Water Requirements, Irrig. and Drain. Div., ASCE, 227 pp.
- **Jones H.G., 1999.** Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 95, pp. 139-149.
- **Katerji N., 1997.** Les indicateurs de l'état hydrique de la plante. L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau, INRA édition, Paris 1997, 169-177.
- **Keller J. et Karmeli D.1974.** Trickle irrigation design parameters. *ASAE Transactions*, 17(4): 678-684.
- **KESSIRA Mohamed.,** Conseils pratiques pour l'investissement en irrigation, INSID Algérie.
- **Khaledian, M.R, Mailhol, J.C, Ruelle, P., Rosique, P. , 2009,** Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system (DSM). The case of corn and durum wheat in mediterranean climate. *AGWAT*, (96), 757-770p; doi: 10.1016/jAgwat/2008.
- **Kuper M. 2011.** Destinies, eyes on 30 years of great hydraulic research. *Agricultural notebooks*. 20 (1-2): 16-23. doi: 10.1684/agr.2011.04.
- Larousse Agricole, 2002.
- **Le Bissonnais, Y.; (1996):** Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: 1. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*.
- **Lecoeur J., 1994.** Les indicateurs d'état hydrique du peuplement végétal, l'exemple du poids. In: *Bulletin semence*. N° 128 été 1994.
- **Lehouerou H.N., 2004.** An Agro-Bioclimatic Classification of Arid and Semiarid Lands in the Isoclimatic Mediterranean Zones. *Arid Land Research and Management* 18: 301-346
- **Mailhol J. C., Revol Ph., Ruelle P., 1996.** PILOTE: An operative Model to identify water stress occurrence dates: Application to a Sorghum crop. 16th International

Références bibliographiques

- Congress on Irrigation and Drainage (ICID-CIID). 47th International Executive Council Meeting. Workshop on Crop-water-Environment Models. Cairo International Conference Centre Cairo-Egypt, 15-22 Sept 1996, 209-222p.
- **Mailhol J.C., 2001.** Contribution à l'amélioration des pratiques d'irrigation à la raie par une modélisation simplifiée à l'échelle de la parcelle et de la saison. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, 264p. MAILLIARD, 1973).
 - **Mailhol J.C., Zaïri A., Slatni A., Ben Nouma B., El Amani H. 2004.** Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia. *Agricultural Water Management* 70(1): 19–37.
 - **Mailhol J.C., Ruelle P., 1998.** PILOTE 1.3 : un modèle de simulation du LAI et du rendement adapté à l'analyse de conduites déficitaires en eau. Journées scientifique de l'INRGREF : Gestion de l'eau en conditions de pénurie 29M30 Oct. 1998 Tunisie, 1M13.
 - **Mailhol, J.C, Ruelle, P., 1999.** Un outil opérationnel pour l'analyse des stratégies d'irrigation du maïs au moyen d'un canon enrouleur. ICID Grenade Sept 1999, 48, 87-99.
 - **Mailhol, J.C., A. Zaïri, A. Slatni, B. Ben Nouma, and H. El-Amani. 2004.** Analysis of irrigation systems and irrigation strategies for durum wheat in Tunisia. *Agricultural Water Management* 70(1):19–37.
 - **Mailhol, J.C., Olufayo A., Ruelle, P., 1997b.** Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated leafarea index. *Agri. Water Manag.* 35 167-182p
 - **Mailhol, J.C; Baqri, H., and Lachhab, M., 1997a.** Operative irrigation furrow modelling for real-time applications on closed-end furrows. *Irrig. and Drain. Syst.* 11: 347-366.
 - **Maillard J.C., 1973.** Un aspect mineur de la géographie australienne. La production bananière au Queensland, en Nouvelle-Galles du sud et en Australie occidentale. *Cahier d'Outre-Mer (Bordeaux)*, 26 (103), 314-322.
 - **Martin J. F., 2002.** Le sol et l'eau. La conduite de l'irrigation basée sur des données sol-potentiel hydrique et teneur en eau du sol.
 - **Martin J. F., 2002.** Relation eau-sol. Améliorez votre irrigation grâce à la conduite de l'irrigation.

Références bibliographiques

- **Mathieu C. et Pieltain F., 2003.** Analyse chimique des sols, méthodes choisies. Ed. Tec & Doc, Lavoisier. 388p.
- **MC.DONALD, BNEDER (Bureau National d'Etude pour le Développement Rural) ., 1990.** Étude de l'avant-projet détaillé des extensions de Guerouaou et de Sebkhate benziane et du réaménagement du Bas Cheliff.
- **Merrien A. et al., 1995.** Des capteurs pour demain : outils de contrôle de l'état hydrique du végétal, p.109-123.
- **Molle, F., P.P. Mollinga, and P. Wester. 2009.** Hydraulic bureaucracies and the hydraulic mission: Flows of water, flows of power. *Water Alternatives* 2(3):328–349.
- **Monteith, J.L. 1965.** Evaporation and environment. pp. 205-234. In G.E. Fogg (ed.) *Symposium of the Society for Experimental Biology, The State and Movement of Water in Living Organisms*, Vol. 19, Academic Press, Inc., NY.
- **Nadia Saiyouri et al., , 2012.** Méthodes d'irrigation en milieu aride.
- **Nicolas H., 1986.** Transferts hydriques dans le système substrat-plante-atmosphère, application au pilotage automatique de l'irrigation des cultures en conteneurs. Thèse de doctorat, ENSA, Rennes, France.
- **Olufayo A., 1994.** Caractérisation des réponses du Sorgho grain au déficit hydrique à l'aide d'indicateurs bioclimatiques. Thèse de Doctorat E.N.S.A.R de Renne, 93p.
- **Ozenda P, 1982.** les végétaux dans la biosphère. Ed: Edoine. Paris. 431p.
- **Perrier., 2002.** Le bilan hydrique, in Larousse agricole
- **Philippe FOUCHER ., 2003.** Etude d'indicateurs morphologiques pour la caractérisation de l'état hydrique de végétaux par analyse d'images. Thèse de doctorat, Université d'Angers, France.
- **Phocides A., 2008.** Manuel des techniques d'irrigation sous pression, 2^eed. FAO, Rome.
- **Pleven J., 1955.** Comparaison de l'extrait saturé d'un sol et de son extrait salin 1/10, Travaux des sections agrologie et pédologie, bulletin no 1, 4 p. Relizaine.
- **Richards, L. A. (1931).** Capillary conduction of liquids through porous mediums., *Physics* 1(5): 318-333.
- **Rodier J. (1984).** L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Edition Dunod Paris.
- **Rodier J.; (1996).** Analyse de l'eau. Ed DUMOND, Paris

Références bibliographiques

- **Rolland D. L., 1974.** Le développement des nouvelles techniques d'irrigation en FRANCE
- **Ruelle P., Specty R., Deumier J. M., Itier B., Lacroix B., Pérarnaud V., Peymorte P. 1995.** L'eau, la plante, le sol et le climat. La conduite de l'irrigation – de la stratégie au pilotage de l'irrigation, RNEDMHA, 21- 33.
- **Saidi D., 1993.** Etude expérimentale de la stabilité structurale des sols des plaines du Chélif. Thèse Magister, INA, Alger, 140 p.
- **Saleh, S.A., El-ShalZ, S., Fawzy, Z.F and El-Bassiony, A.M. 2012.** Effect of water amounts on artichoke productivity irrigated with brackish water. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 6(5): 54-61, 2012 ISSN 1991-8178.
- **Schaffer R., 1975.** La matière organique du sol 1er séminaire sur la croissance des sols du Maghreb, Institut National Agronomique El Harach. (Alger). Avril 1975.
- **Scholander P.F., Hammel H.T., Emmingsen E. A., Brandstreet H.D., 1964.** Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. Proc. Nat Acad. Sci., 52,119-125.
- **Tardieu F, Katerji N, Bethenod O, Zhang J, Davies WJ 1991.** Maize stomatal conductance in the field; its relationship with soil and plant water potentials, mechanical constraints and ABA content in the xylem sap. Plant Cell Environ (à paraître).
- **Tardieu F., Katerdji N., Bethenod O., 1990.** Relations entre l'état hydrique du sol, le potentiel de base et d'autres indicateurs de la contrainte hydrique chez le maïs. Agronomie 10, 617-626.
- **Thorntwaite, C.W. 1948.** An approach toward a rational classification of climate. Geograph. Rev., 38, 55.
- **Tiercelin J-R, Vidal A. (1998).** Traité d'irrigation, édition Lavoisier, France, 470-497.
- **U.S.S.L.S. (Unated State Salinity Laboratory Staff),1954.** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, US Department of Agriculture, Handbook n°60, U. S.Gov. Print. Office, Washington DC, 159p.
- **Urban L., 1997.** Introduction à la production sous serre - l'irrigation fertilisante en culture hors sol, Tome 2, Paris Lavoisier, 210p.
- **Valancogne C., Nasr Z., 1989.** Une méthode de mesure de débit de sève brute dans de petits arbres par bilan de chaleur. Agronomie, vol. 9, pp. 609-617.

Références bibliographiques

- **Vilain M., 1997.** La production végétale. Les composantes de la production, édition Lavoisier Paris, 478p.
- **Wilcox L.V. 1948.** The quality of water for agricultural use. US Dept Agriculture Tech. Bull. 1962, Washington DC, 19 p.
- **Zhongping, L., P.H. Cournède, and J.C. Mailhol. 2011.** Irrigation Optimization by Modeling of Plant-Soil Interaction. Proceedings of the IASTED International Conference, Applied Simulation and Modelling (AS-2011), June 22-24, 2011, Crete, Greece.

Site internet

- [1] www.egk.ch