



المدرسة الوطنية للعلوم التطبيقية - أكادير
+٢١٢ ٥ ٣٥ ٤٥ ٠ ١ ٢ ٣ ٤ ٥ ٦ ٧ ٨ ٩ ٠ ١ ٢ ٣ ٤ ٥ ٦ ٧ ٨ ٩ ٠
ÉCOLE NATIONALE DES SCIENCES APPLIQUÉES - AGADIR



N° d'ordre: *DCED 4/2013*

CENTRE DES ETUDES DOCTORALES IBN ZOHR

Formation doctorale

Sciences et Techniques de l'Ingénieur

ECOLE NATIONALE DES SCIENCES APPLIQUEES D'AGADIR

MEMOIRE

Présenté par

Lahcen EL YOUSSEFI

pour l'obtention de grade de

DOCTEUR de l'Université Ibn Zohr

Spécialité : **Environnement**

**Durabilité d'un système de cultures non conventionnel
irrigué par les eaux usées traitées dans la région d'Agadir**

Travail conduit dans la cadre du Projet SWUPMed Financé par le programme cadre de l'UE 7

Soutenue le 02 Mars 2013

Devant la commission d'examen composée de :

Redouane CHOUKR-ALLAH	:	Professeur de l'enseignement supérieur à l'IAV Hassan II d'Agadir (Co-Directeur de Thèse, Président)
Saida TAHROUCH	:	Professeur à la faculté de Science d'Agadir (Rapporteur)
Abderrahim HORMATALLAH	:	Professeur de l'enseignement supérieur à l'IAV Hassan II d'Agadir (Rapporteur)
Rachid SALGHI	:	Professeur Habilité à l'ENSA d'Agadir (Rapporteur)
Touria MEDIOUNI	:	Professeur à l'ENSA d'Agadir (Examineur)

Bouchra CHEBLI : Professeur Habilité à l'ENSA d'Agadir (Examineur)
Mina ZAAFRANI : Professeur Habilité à la faculté des sciences d'Agadir (Directeur de Thèse)

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents, pour les peines et les sacrifices consentis pour mon éducation. Mon amour et ma profonde reconnaissance ne sauraient être exprimés en ce modeste travail. Puisse dieu vous accorder santé et longue vie.

A mes sœurs Bouchra, Hanan et mon frère Fouad, en témoignage de mon grand amour fraternel. Que dieu leur accorde succès et bonheur.

A toute ma famille paternelle et maternelle, en témoignage de mon affection et respect et en particulier Rachid El youssfi et sa petite famille et mon oncle Mohamed et sa petite famille et spécialement à mes deux grandes mères et pleinement à l'âme de Mon inoubliable grand père, Mhamed Zantar.

A tous mes amis, en témoignage de mon grand amour et de l'amitié que je porte pour vous et en particulier Badr, Mohammed, Kamal, Abdeallah, Adil, Imad, Mouhssine, Khalil, Reda, Fatima, Khaoula, Najat, Wafa, Natasa, Ihssan, Aziz, Bahssine, Lahcen, Youssef B., Lahoussine, Youssef E. et Ahmed avec qui j'ai partagé les bons et les mauvais moments de ces années de thèse.

Lahcen EL YOUSSEFI
Agadir, Maroc
Mars 2013

Remerciements

Le travail d'une thèse représente effectivement des heures de travail difficile, solitaire avec pleine de rigueur. Néanmoins, le doctorat en soi est loin d'être sans interactions humaines. En effet, Il est toujours difficile de remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail de recherche. Que ceux qui ne sont pas mentionnés ne m'en tiennent pas rigueur.

J'ai beaucoup de reconnaissance, de gratitude et d'admiration à témoigner d'abord à mes directeurs de thèses :

Prof. Redouane Choukr-Allah, chef du Laboratoire de Salinité et de Nutrition des Plantes au Complexe Horticole d'Agadir de l'IAV Hassan II, qui est un modèle professionnel pour sa gestion et sa maîtrise remarquable de notre domaine, à la fois comme ingénieur et comme professeur, pédagogue et aussi chercheur. Je le remercie pour son encadrement pendant les années du cycle ingénieur, en Master et maintenant pour l'accueil dans son laboratoire du doctorat dans le cadre du projet SWUP-MED.

Prof. Mina Zaafrani, Professeur à la Faculté des Sciences d'Agadir et à l'ENSA d'Agadir, sans son encadrement et son aide, je ne serais pas arrivé jusque là. Je la remercie pour la qualité de ses conseils, pour sa disponibilité et pour son investissement constant.

Mes remerciements profonds vont à tous les membres du jury ayant accepté d'examiner ce travail.

Je remercie le Mr. le Directeur et tout le staff administratif de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir pour leur accueil et leur aide. Ainsi, je remercie vivement les membres du Laboratoire de Mécanique, Procédés, Energie et Environnement (LMPEE), plus particulièrement le chef du laboratoire Prof. Touria Mediouni et Prof. Bouchra Chebli pour leur aide pour l'accomplissement de ce travail.

Mes sincères remerciements vont aussi à l'équipe du Centre Doctorale Ibn Zohr (CED) particulièrement en la personne de sa directrice Prof. Mina Idrissi Hassani pour ses efforts, sa disponibilité et son esprit communicatif performant.

Je remercie également toute l'équipe du Laboratoire de Salinité et de Nutrition des Plantes au Complexe Horticole d'Agadir de l'IAV Hassan II, en particulier Mr. Abdelaziz Hirich, Mle Halima Elomari et tous les étudiants mémorisant du laboratoire en particulier : Sar Fatou, Ba Samba Maladou, Hasna

Fahmi, Abdellatif Rami, khadija Laajaj, pour leur aide sans oublié de remercier Ba Tayeb.

Je tiens à remercier tout le corps professoral de l'IAV Hassan II et de l'ENSA d'Agadir pour leur précieuse formation qu'ils m'ont donné.

Mes remerciements vont à toute personne ayant participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Lahcen EL YOUSSEFI

Agadir, Maroc

Mars 2013

Résumé

Le présent travail s'inscrit dans le contexte de recherche d'alternatives de ressources en eau pour l'irrigation et de cultures alternatives capables de s'adapter dans les conditions défavorables. Dans ce cadre, une série de travaux ont été conduits à la station expérimentale de l'IAV Hassan II-CHA-Agadir au sud ouest du Maroc entre 2010 et 2012. Ainsi, les objectifs se sont focalisés sur l'évaluation de la possibilité d'utilisation des eaux usées traitées comme source d'eau non-conventionnelle pour l'irrigation de nouvelles cultures, à haute valeur nutritive, comme le Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) et l'Amarante (*Amaranthus* spp.) dans la région du Souss Massa à climat semi-aride. Les deux premiers travaux visaient d'étudier l'effet de l'irrigation avec des eaux usées traitées avec des conductivités électriques divers (Témoin (1dS/m), CE3 (3dS/m) et CE6 (6dS/m) sur trois variétés de quinoa et trois variétés d'amarante. Alors que le troisième travail, étalé sur trois saisons de culture, a été mené pour évaluer les effets de l'utilisation des eaux usées traitées sur les propriétés du sol et les paramètres agronomiques en adoptant une rotation de cultures introduisant le quinoa comme nouvelle culture dans la région. En effet, plusieurs paramètres agronomiques et pédologiques ont été testés pour les différentes cultures.

Les résultats ont montré que pour le quinoa, l'augmentation du niveau de salinité a mené à la diminution de la hauteur de la plante et a réduit le poids frais et sec dans les différentes parties des plantes pour les trois variétés. Toutefois, cette augmentation de la CE de l'eau d'irrigation n'a pas influencé le rendement pour les trois variétés. Dans le cas de l'amarante, l'augmentation du niveau de salinité appliquée réduit significativement la croissance pour toutes les variétés. Cependant, Même avec l'application de l'eau saline de 6dS/m, les rendements étaient relativement élevés par rapport à ceux obtenus dans des conditions normales de culture. Néanmoins, une accumulation importante de nitrates, de chlorure et de sodium dans la zone racinaire a été remarquée durant le cycle de culture de l'amarante par rapport au quinoa. D'autre part, l'essai de rotation a révélé que le quinoa avait un comportement performant quand il est précédé par la culture de la fève en matière d'efficacité d'utilisation d'eau et aussi l'enregistrement du niveau le plus bas d'accumulation de sels dans le sol en comparaison avec les combinaisons pois chiche>quinoa et jachère>quinoa. Concernant la croissance et la production, il s'est avéré que la culture du quinoa après le pois chiche était plus bénéfique en termes de productivité en biomasse et en rendement.

Une meilleure adaptation aux conditions de stress salin et d'utilisation des eaux usées traitées, fait du quinoa une culture prometteuse dans la région du Souss Massa.

Mots-clés —Quinoa, Amarante, salinité, rotation des cultures, sol, croissance, rendement, climat semi-aride et eaux usées traitées.

Abstract

The present study is undertaken within the context of searching non conventional water resources for irrigation and alternative crops that can adapt in adverse conditions. In this context, a series of studies were conducted at the experimental station of the IAV Hassan II-CHA-Agadir in southwest of Morocco between 2010 and 2012. Thus, the objectives focused on assessing the possibility of using treated wastewater as a source of non-conventional water for irrigation of new crops, with high nutritional value, such as quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and Amaranth (*Amaranthus* spp.) in Souss Massa region characterized with a semi-arid climate. The first two works aimed to study the effect of irrigation with treated wastewater with different electrical conductivities (Control (1dS/m), CE3 (3dS/m) and CE6 (6dS / m) on three varieties of quinoa and three varieties of amaranth. Whereas the third work spread over three growing seasons, was conducted to evaluate the effects of the use of treated wastewater on soil properties and agronomic parameters by adopting crop rotation aiming the introduction of quinoa as new crop in the region.

The results showed that for quinoa, increasing the salinity level has led to the decrease in plant height and reduced the fresh and dry weight in different parts of plants for the three varieties. However, this increase in the EC of the irrigation water did not affect the yield for the three varieties. In the case of amaranth, increasing the salinity level of the irrigation water reduced significantly growth for all varieties. However, even with the application of water salinity of 6 dS/m, yields were relatively high compared to those obtained in normal cropping system conditions. However, a significant accumulation of nitrate, chloride and sodium in the root zone of soil during the crop cycle compared to quinoa. On the other hand, the rotation test revealed that the quinoa had a great impact when it is preceded by the culture of fabae bean in terms of water use efficiency and also recording the lowest accumulation of salts in the soil compared with combinations chickpea>quinoa and fallow>quinoa. Concerning growth and production, it turned out that the cultivation of quinoa after chickpea was more profitable in terms of biomass productivity and yield.

Quinoa can be a promising crop for the Souss Massa region considering its Better adaptation to salt stress conditions and treated wastewater use.

Keywords-Quinoa, Amaranth, salinity, crop rotation, soil, growth, yield, semi-arid and treated wastewater.

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	ii
Résumé	iv
Abstract.....	v
Table des matières.....	vi
Avant propos.....	1
Introduction générale.....	2
Chapitre I –Contexte et problématique.....	7
Problématique de l’eau dans les régions arides et semi-arides.....	7
Changement climatique.....	7
Disponibilité des ressources en eau	7
Stratégies de gestion de l’eau.....	8
Réutilisation des eaux usées traitées en agriculture.....	10
Traitement des eaux usées comme une ressource d'eau supplémentaire.....	10
Les eaux usées : définitions et concepts.....	11
Composition des eaux usées.....	12
Traitement des eaux usées	12
Intérêts liées au traitement des eaux usées.....	13
Contraintes liées à l’utilisation des eaux usées épurées	13
Réutilisation des eaux usées en agriculture au Maroc.....	15
Effets de la salinité sur les plantes et le sol.....	25
Origines de la salinisation des sols.....	25
Effets de la salinité sur les plantes.....	26
Tolérance des plantes à la salinité.....	27
Présentation de l’Amarante :.....	28
Origine et systématique.....	28

Description de la plante.....	29
Types d'amarante	30
Variétés.....	31
Utilisation et importance nutritionnelle	31
Comparaison entre l'amarante et d'autres céréales.....	32
Tolérance de l'amarante à la salinité	33
Condition de culture et rendement.....	33
Maladies et parasites.....	34
Présentation du Quinoa	34
Origine et systématique.....	34
Culture du quinoa au niveau mondial.....	35
Description de la plante.....	36
Variétés.....	36
Importance nutritionnelle du quinoa.....	37
Tolérance du quinoa à la salinité	38
Condition de culture et rendement.....	39
Chapitre II - Effet de la salinité et de la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de l'Amarante.....	43
INTRODUCTION.....	44
Matériel et méthodes.....	45
Lieu	45
Matériel végétal et plantation.....	45
Dispositif expérimental	46
Sol.....	47
Irrigation	47
Paramètres suivis.....	50
Analyses statistiques.....	51
Résultats et discussion.....	52

Paramètres de croissance des plantes.....	52
Paramètres édaphiques.....	65
Analyses foliaires.....	73
Rendement.....	81
Discussion.....	81
Conclusion	83
Chapitre III – Effet de la réutilisation des eaux usées traitées pour l’irrigation du Quinoa.....	87
INTRODUCTION.....	88
Matériel et méthodes.....	90
Matériel végétal et plantation.....	90
Lieu, dispositif expérimental et mesures	90
Résultats et discussion.....	90
Paramètres de croissance des plantes.....	90
Paramètres édaphiques.....	97
Analyses foliaires.....	102
Rendement.....	107
Conclusion	108
Chapitre IV- Introduction du Quinoa comme nouvelle culture dans le système de rotation avec l’utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation	110
INTRODUCTION.....	111
Présentation des cultures.....	112
Maïs doux (Zea mays sacharata).....	112
Pois chiche (Cicer arietinum).....	114
Fève (Vicia fabae L.).....	116
Petit pois (Pisum sativum L.).....	118
Matériel et méthodes.....	120
Lieu	120
Matériel végétal et plantation.....	121

<u>Dispositif expérimental</u>	<u>121</u>
<u>Conditions de cultures.....</u>	<u>122</u>
<u>Paramètres suivis.....</u>	<u>123</u>
<u>Résultats et discussion.....</u>	<u>125</u>
<u>Paramètres de croissance des plantes.....</u>	<u>125</u>
<u>Paramètres édaphiques.....</u>	<u>127</u>
<u>Analyses foliaires.....</u>	<u>131</u>
<u>Rendement.....</u>	<u>133</u>
<u>Efficience d'utilisation de l'eau par culture.....</u>	<u>134</u>
<u>Conclusion.....</u>	<u>135</u>
<u>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS GENERALES</u>	<u>138</u>
<u>REFERENCES.....</u>	<u>142</u>
<u>ANNEXES.....</u>	<u>155</u>

Liste des tableaux

Tableau 1: Constituants majeurs des eaux usées domestiques.....	12
Tableau 2: Situation des principaux projets d'épuration réutilisation des eaux usées au Maroc. .	16
Tableau 3: Typologie des eaux usées au Maroc.....	17
Tableau 4: Caractéristiques microbiologiques des eaux usées à Agadir.....	17
Tableau 5: comparaison entre le rendement obtenu par l'irrigation par les EUT et celui obtenu par l'eau fraîche.....	21
Tableau 6: Classes de qualité de l'eau d'irrigation (Richards, 1969 in PERIGAUD J., 1977).....	25
Tableau 7: Composition approximative des graines et des feuilles d'amarante non cuits (Cole, 1979).....	31
Tableau 8: Composition des graines de quinoa et de blé (g/100g de matière sèche) (Tapia, 2000).	37
Tableau 9: Caractéristiques des eaux usées traitées utilisées (Analyses du laboratoire du CHA).	48
Tableau 10. Effet de la salinité sur le rendement.....	81
Tableau 11: surface cultivée et production du maïs pour les pays producteurs majeurs (FAOSTAT, 2007).....	112
Tableau 12 : Biomasse totale fraîche des plantes durant les trois saisons de cultures (g/plante)	126
Tableau 13 : Biomasse totale sèche des plantes durant les trois saisons de cultures (g/plante)..	126
Tableau 14 : Evolution de la CE et des Nitrates du sol pendant les trois saisons de culture.....	131
Tableau 15 : Evolution de la teneur foliaire en N, P, K et Na pendant les trois saisons de culture.	132
Tableau 16 : Rendement pour les trois saisons de culture (g/plante)	134
Tableau 17 : Efficience d'utilisation de l'eau par les plantes pour les trois saisons de culture (kg/m ³)	135

Liste des figures

Figure 1 : Composantes d'eaux résiduaires urbaines.....	11
Figure 2 : Evolution du volume des eaux usées brutes urbaines au Maroc entre 1960 et 2020.....	15
Figure 3: Schéma de système Sheaffer adopté dans la station du traitement des eaux usées au Complexe Horticole d'Agadir.....	19
Figure 4: Dispositif expérimental des trois variétés d'Amarante.....	47
Figure 5: Evolution de la hauteur de la tige principale de la variété A0020.....	53
Figure 6: Evolution de la hauteur de la tige principale de la variété A211.....	53
Figure 7: Evolution de la hauteur de la tige principale de la variété A0057.....	53
Figure 8: Evolution de la surface foliaire (A0020).....	54
Figure 9: Evolution de la surface foliaire (A0057).....	54
Figure 10: Evolution de la surface foliaire (A211).....	54
Figure 11: Evolution poids frais de la racine (A211).....	56
Figure 12: Evolution du poids frais de la racine(A0020).....	56
Figure 13: Evolution du poids frais de la racine(A0057).....	57
Figure 14: Evolution du poids frais des feuilles (A0020).....	57
Figure 15: Evolution du poids frais des feuilles (A0057).....	58
Figure 16: Evolution du poids frais des feuilles (A211).....	58
Figure 17: Evolution du poids frais de la tige (A0020).....	59
Figure 18: Evolution du poids frais de la tige(A0057).....	60
Figure 19: Evolution du poids frais de la tige (A211).....	60
Figure 20: Evolution du poids sec de la racine (A0020).....	61
Figure 21: Evolution du poids sec de la racine (A0057).....	61
Figure 22: Evolution du poids sec de la racine (A211).....	62

Figure 23: Evolution du poids sec des feuilles(A0020).....	62
Figure 24: Evolution du poids sec des feuilles(A0057).....	63
Figure 25: Evolution du poids sec des feuilles(A211).....	63
Figure 26: Evolution du poids sec de la tige(A0020).....	64
Figure 27: Evolution du poids sec de la tige (A0057).....	64
Figure 28: Evolution du poids sec de la tige (A211).....	65
Figure 29: Teneur en sodium au niveau du sol (A211).....	66
Figure 30: Teneur en sodium au niveau du sol (A0020).....	66
Figure 31: Teneur en sodium au niveau du sol (A0057).....	66
Figure 32: Teneur en chlore du sol (A0020).....	68
Figure 33: Teneur en chlore du sol (A0057).....	68
Figure 34: Teneur en chlore du sol (A211).	68
Figure 35: Concentration en nitrate du sol (A211).....	69
Figure 36: Concentration en nitrate du sol (A0020).....	69
Figure 37: Concentration en nitrate du sol (A0057).....	69
Figure 38: Evolution de la CE de la solution du sol pour la variété (A211).....	70
Figure 39: Evolution de la CE de la solution du sol pour la variété (A0020).....	70
Figure 40: Evolution de la CE de la solution du sol pour la variété (A0057).....	71
Figure 41: Evolution de la CE de la solution du sol à différentes profondeurs du sol.....	71
Figure 42: Evolution du pH du sol (A211).....	72
Figure 43: Evolution du pH du sol (A0020).....	73
Figure 44: Evolution du pH du sol (A0057).....	73
Figure 45: Teneur en potassium au niveau des feuilles en % de matière sèche (A0020).	74
Figure 46: Teneur en potassium au niveau des feuilles en % de matière sèche (A0057).....	74
Figure 47: Teneur en potassium au niveau des feuilles en % de matière sèche (A211).....	74
Figure 48: Teneur en sodium de la feuille (A0020).....	75
Figure 49: Teneur en sodium de la feuille (A0057).....	75

Figure 50: Teneur en sodium au niveau de la feuille (A211).....	76
Figure 51: Concentration du chlore au niveau de la feuille (A0020).....	77
Figure 52: Concentration du chlore au niveau de la feuille (A0057).....	77
Figure 53: Teneur en chlore au niveau de la feuille (A211).....	78
Figure 54: Teneur en phosphore au niveau de la feuille (A211).....	78
Figure 55: Teneur en phosphore au niveau de la feuille (A0020).....	79
Figure 56: Teneur en phosphore au niveau de la feuille (A0057).....	79
Figure 57: Concentration de l'azote des feuilles (A0020).....	80
Figure 58: Concentration de l'azote des feuilles (A0057).....	80
Figure 59: Concentration de l'azote au niveau de la feuille (A211).....	80
Figure 60: Evolution de la hauteur des tiges pour la variété QS0938 (1).....	91
Figure 61: Evolution de la hauteur des tiges pour la variété D0708 (2).....	91
Figure 62: Evolution de la hauteur des tiges pour la variété QM1113 (3).....	92
Figure 63: Evolution de la surface foliaire pour la variété QS0938 (1).....	93
Figure 64: Evolution de la surface foliaire pour la variété D0708 (2).....	93
Figure 65: Evolution de la surface foliaire pour la variété QM1113 (3).....	93
Figure 66: Evolution du poids frais total pour la variété QS0938 (1).....	94
Figure 67: Evolution du poids frais total pour la variété D0708 (2).....	95
Figure 68: Evolution du poids frais total pour la variété QM1113 (3).....	95
Figure 69: Evolution du poids sec total pour la variété QS0938 (1).....	96
Figure 70: Evolution du poids sec total pour la variété D0708 (2).....	96
Figure 71: Evolution du poids sec total pour la variété QM1113 (3).....	96
Figure 72: Evolution de la CE du sol pour la variété QS0938 (1).....	98
Figure 73: Evolution de la CE du sol pour la variété D0708 (2).....	98
Figure 74: Evolution de la CE du sol pour la variété QM1113 (3).....	98
Figure 75: Evolution du pH du sol pour la variété QS0938 (1).....	99
Figure 76: Evolution du pH du sol pour la variété D0708 (2).....	99

Figure 77: Evolution du pH du sol pour la variété QM1113 (3).....	99
Figure 78: Evolution de la concentration du sodium dans le sol pour la variété QS0938 (1).....	100
Figure 79: Evolution de la concentration du sodium dans le sol pour la variété D0708 (2).....	100
Figure 80: Evolution de la concentration du sodium dans le sol pour la variété QM1113 (3).....	101
Figure 81: Evolution de la concentration du chlore dans le sol pour la variété QS0938 (1).....	101
Figure 82: Evolution de la concentration du chlore dans le sol pour la variété D0708 (2).....	102
Figure 83: Evolution de la concentration du chlore dans le sol pour la variété QM1113 (3).....	102
Figure 84: Evolution de la concentration du sodium foliaire pour la variété QS0938 (1).....	103
Figure 85: Evolution de la concentration du sodium foliaire pour la variété D0708 (2).....	103
Figure 86: Evolution de la concentration du sodium foliaire pour la variété QM1113 (3).....	103
Figure 87: Evolution de la concentration du chlore foliaire pour la variété QS0938 (1).....	104
Figure 88: Evolution de la concentration du chlore foliaire pour la variété D0708 (2).....	104
Figure 89: Evolution de la concentration du chlore foliaire pour la variété QM1113 (3).....	105
Figure 90: Evolution de la concentration du phosphore foliaire pour la variété D0708 (2).....	106
Figure 91: Evolution de la concentration du phosphore foliaire pour la variété D0708 (2).....	106
Figure 92: Evolution de la concentration du phosphore foliaire pour la variété QM1113 (3).....	106
Figure 93: Evolution du rendement en graines par traitement et par variété.	107
Figure 94 : Disposition temporaire de l'installation des cultures pendant la saison 2010	121
Figure 95 : Disposition temporaire de l'installation des cultures pendant la saison 2011.....	121
Figure 96 : Disposition temporaire de l'installation des cultures pendant la saison 2012.....	121
Figure 97 : Dispositif expérimental et disposition temporaire de l'installation des cultures pendant les trois saisons 2010, 2011 et 2012.....	122
Figure 98 : Evolution de la CE du sol (extrait 1/5) durant les trois saisons pour la combinaison de rotation Quinoa-Maïs-Petit pois.....	128
Figure 99 : Evolution de la CE du sol (extrait 1/5) durant les trois saisons pour la combinaison de rotation Pois chiche-Quinoa-Maïs.....	128
Figure 100 : Evolution de la CE du sol (extrait 1/5) durant les trois saisons pour la combinaison de rotation Maïs-Pois chiche-Quinoa.....	128

Figure 101 : Evolution du nitrate du sol (en ppm) durant les trois saisons pour la combinaison de rotation Quinoa-Maïs-Petit pois.....130

Figure 102 : Evolution du nitrate du sol (en ppm) durant les trois saisons pour la combinaison de rotation Pois chiche-Quinoa-Maïs.....130

Figure 103 : Evolution du nitrate du sol (en ppm) durant les trois saisons pour la combinaison de rotation Maïs-Pois chiche-Quinoa.....130

Liste des abréviations

ABHSM	Agence du bassin hydraulique de Souss Massa
Al	Aluminium
ANOVA	Analyse de variances
Ca	Calcium
CE	Conductivité électrique
CHA	Complexe horticole d'Agadir (IAV Hassan II)
Cl	Chlore
DBO5	Demande biochimique en oxygène en 5 jours
DCO	Demande chimique en oxygène
DNM	Dose nette maximale
Eff	Efficience du système d'irrigation
ETM	Evapotranspiration maximale
Eto	Evapotranspiration de référence
ETR	Evatranspiration relative
EUE	Efficience d'utilisation de l'eau
EUT	Eaux usées traitées
FAO	Food and agriculture organisation
Fe	Fer
Hcc	Humidité à la capacité au champ
Hpfp	Humidité au point de flétrissement permanent
IYQ	International year of quinoa
K	Potassium
Kc	Coefficient cultural
MES	Matière en suspension
Mg	Magnésium
MO	Matière organique
MOS	Matière organique sèche
N	Azote
Na	Sodium
NaCl	Chlorure du sodium
NIR	Besoin net en irrigation
OMS	Organisation mondiale de la santé
P	Phosphore
PH	Pluviométrie horaire
SAU	Surface agricole utile
SF	Stade floraison
SM	Stade maturité
SV	Stade végétatif
UE	Union européenne
WUE	Water use efficiency
Zn	Zinc

Avant propos

Cette thèse est présentée dans le cadre de la formation doctorale en « Sciences et Techniques de l'Ingénieur » de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir, relevant du Centre d'Etude Doctoral de l'Université Ibn Zohr Agadir.

Le projet de thèse consiste en un ensemble de travaux menés au niveau de la station expérimentale du complexe Horticole d'Agadir avec la collaboration de deux laboratoires : Le Laboratoire de Nutrition des Plantes et de la Salinité de l'IAV Hassan II-CHA et le Laboratoire de Mécanique, Procédés, de l'Energie et de l'Environnement (LMP2E) de l'ENSA d'Agadir.

La thèse fait partie du projet SWUP-MED (Sustainable Water Use Securing Food Production In Dry Areas Of The Mediterranean Region) piloté par l'IAV Hassan II au niveau national et financé par le programme cadre de l'UE 7.

Cette thèse est basée sur trois manuscrits intitulés:

I. Effet de l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de trois variétés d'Amaranthe (*Amaranthus spp.*) sous un climat semi-aride (Publié).

II. Effet de l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de trois variétés de Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd.*) sous un climat semi-aride (Publié).

III. Introduction du Quinoa comme nouvelle culture dans le système de rotation de culture sous l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation au niveau de la région du Souss Massa (publication en cours).

Ces travaux ont fait l'objet de communications au niveau de deux conférences internationales.

La thèse est composée de quatre chapitres, le premier définit le contexte général du travail, sa méthodologie et ses objectifs et les trois autres présentent les travaux et les résultats qui ont fait l'objet des trois manuscrits suscités.

Introduction générale

Les ressources en eau dans la région méditerranéenne, sont limitées et très mal réparties dans l'espace et dans le temps. Cependant, la demande en eau s'est augmentée au cours de la seconde moitié du 20^{ième} siècle. Dans certains pays méditerranéens, l'utilisation de l'eau est proche du niveau limite des ressources disponibles. L'approvisionnement en eau est menacé par la surexploitation d'une partie de la nappe phréatique (générant l'intrusion marine) et des ressources non renouvelables (y compris l'eau fossile). L'agriculture, l'industrie et les eaux usées domestiques augmentent le risque de manque d'eau et la pollution des ressources en eau, des eaux de surface et des eaux souterraines (Nations Unies, 2007). En effet, suite à la demande croissante, la gestion des ressources en eau implique l'application de techniques qui augmentent l'approvisionnement en eau naturelle limitée, tels que le dessalement, la réutilisation de l'eau, la collecte des eaux pluviales, la recharge de la nappe phréatique et le transfert inter-bassins, (ONU, 2006).

Les eaux usées traitées peuvent être considérées comme une «nouvelle» ressource en eau qui peut être ajoutée au bilan général des ressources en eau d'une région. Cette technique peut remplacer l'utilisation d'eau potable pour l'irrigation ou d'autres fins plutôt que de boire, ce qui permettra de réduire la pression sur les ressources naturelles en eau. Par conséquent, les avantages découlant de l'utilisation des eaux usées traitées sont multiples en particulier pour les pays qui sont confrontés à des crises chroniques d'approvisionnement en eau et où l'économie est essentiellement basée sur l'agriculture (Sipala *et al.*, 2003). Toutefois, la faisabilité de l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation peut varier en fonction de la concentration totale des sels dissous dans l'eau, et des sels spécifiques (tels que le sodium, le phosphate et les nitrates), le type de sol (perméabilité, drainage,..) et le type de culture (tolérance au sel par exemple de certaines espèces). En fait, les problèmes de salinité doivent être atténués en travaillant sur ces trois facteurs.

Comme le problème de salinité devient de plus en plus sévère, la production des plantes et des cultures alternatives adaptées aux conditions de salinité modérée est

requis en les introduisant avec les cultures moins tolérantes à la salinité. Ces cultures tolérantes peuvent fournir une alternative logique pour de nombreux pays en développement comme le Maroc.

Les graines de Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) sont consommées dans de nombreuses régions du monde. Vu sa haute valeur nutritive et sa grande adaptation à différentes conditions environnementales, cette plante a été considérée comme une culture prometteuse pour les terres marginales et les régions semi-arides. Les perspectives pour la culture de quinoa sont très encourageantes, vu qu'il s'agit d'une culture tolérante au sel et ayant des génotypes de rendement élevé. Cette culture est une pseudo-céréale qui a été cultivée dans la région andine depuis des milliers d'années (Bhargava *et al.*, 2006). En fait, le quinoa est considéré comme une culture prometteuse pour l'introduire dans le système de rotation et de diversification culturale avec d'autres cultures comme les céréales et les légumineuses.

L'amarante est une autre culture qui s'ajoute au quinoa en termes de performance. Cette culture est utilisée pour ses graines et elle est aussi consommée comme légume vert de cuisine dans plusieurs parties du Monde. D'autre part, elle est aussi caractérisée par une haute valeur nutritive et une bonne adaptation à différents environnements, elle est considérée comme une culture prometteuse pour les sols marginaux et les régions semi-arides (Cunningham *et al.*, 1992 et Allemann *et al.*, 1996).

La diversification des cultures est considérée comme une partie intégrante des stratégies de la production alimentaire mondiale dans la lutte contre les carences en micronutriments et en protéines. Il a également un rôle important dans l'amélioration de la fertilité des sols et de la productivité de l'eau (Ali *et al.*, 2000).

La faisabilité d'un système de rotation des cultures ou des systèmes recommandés pour une région est étroitement liée à la rentabilité des cultures impliquées dans ce système. Par conséquent, les systèmes de rotation des cultures prévus afin d'obtenir une production élevée dans une longue période ne peuvent pas répondre à la demande des producteurs qui donnent la priorité à leur gain annuel. C'est pour cela les systèmes de rotation des cultures appropriés ne peuvent pas être largement utilisés dans les zones à cultures diversifiées (Dogan *et al.*, 2008).

Sur la base de différentes citations ci-dessus, ce travail vise à évaluer les effets de l'utilisation de l'eau à qualité marginale (eaux usées traitées) sur les propriétés du sol (la salinité et la présence de constituants indésirables tels que les nitrates), et les paramètres agronomiques de la culture cultivée en suivant le système de la rotation culturale. Ainsi, ce travail est une partie d'une série de travaux et d'essais, réalisés dans la région d'Agadir au Sud Ouest du Maroc, impliqués dans la recherche de solutions pour la gestion de l'eau dans les conditions semi-aride en introduisant de nouvelles cultures prometteuses en termes de valeur nutritive et de tolérance à la salinité et à la sécheresse. Le contexte du travail s'inscrit dans le cadre du projet SWUP-Med qui a comme objectif stratégique l'amélioration de la production alimentaire dans la région méditerranéenne, influencé par de multiples stress abiotiques. Ainsi, le projet vise à trouver des solutions pour atténuer les conséquences du changement climatique marquée dans l'évolution des prévisions climatiques dus à la sécheresse et la hausse des températures.

La présente étude est un maillon d'une longue chaîne de recherches dont la philosophie est l'économie de l'eau et la préservation de l'environnement et ce dans une intention ultime d'élargir la voie vers une agriculture durable et assurer à court, moyen et long terme la sécurité alimentaire. Il a pour but d'identifier les éventuels atouts à profiter par le recours à l'utilisation des eaux non conventionnelles (eaux usées). En effet, l'objectif est de trouver de nouvelles cultures qui peuvent s'adapter et répondre positivement aux conditions d'irrigation avec des eaux usées traitées. Cette approche prendra en compte les cotés agronomiques et environnementaux.

Le travail est organisé en trois parties. Après avoir présenter le contexte de la problématique traitées dans le chapitre I, le Chapitre II décrit l'essai qui évalue l'impact de l'utilisation des eaux usées traitées par le système Shiffer combiné avec un stress salin comme source d'irrigation sur trois variétés d'Amarante et sur le sol. Le Chapitre III consiste en le même essai que celui de l'Amarante mais cette fois-ci pour évaluer la réponse de trois variétés de Quinoa. Ces deux cultures sont de nouvelles cultures dans le système de culture de la région et au Maroc.

Le Chapitre IV est une série d'essais de rotation étalée sur trois saisons culturales. Les cultures concernées par la rotation sont le quinoa, le maïs et une légumineuse (Fève ou

pois chiche ou petit pois). Il s'agit dans ce cas d'évaluer l'influence de l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de ces cultures dans un contexte de rotation, en termes de croissance, de rendement et de caractéristiques du sol. Le quinoa est évalué comme nouvelle culture dans le système de culture sous un climat semi-aride dans la région de Souss Massa.

CHAPITRE I

Chapitre I –Contexte et problématique

Problématique de l’eau dans les régions arides et semi-arides

Changement climatique

La mesure du changement climatique est estimée à représenter environ 20 % d'augmentation globale de la rareté de l'eau. Les pays qui souffrent déjà de pénuries d'eau seront ceux qui subissent des problèmes supplémentaires liés à la pénurie d'eau (IPCC, 2007, 2008). Il est attendu que même dans les zones où le changement climatique s'avère neutre ou même de faible amplitude leurs ressources hydrologiques, seront touchées par une augmentation de la rareté de l'eau (UN-water, 2007). Des températures moyennes plus élevées et des changements dans les limites de température et de précipitations sont susceptibles d'affecter la disponibilité des ressources par des changements dans la distribution des précipitations, l'humidité du sol, la fonte des glaces, les écoulements des rivières et les réserves en eaux souterraines (WWAP, 2009 ; IPCC, 2007, 2008).

Disponibilité des ressources en eau

Les ressources en eau ne sont pas distribuées d’une manière équilibrée sur la surface terrestre. Le manque de ressources en eau est un problème fréquent dans les régions semi-arides, où il n'y a pas assez d'eau pour soutenir la production agricole pour la population rurale (Mvungi, 2005). C'est le cas aussi pour la région méditerranéenne où le climat constitue un écosystème unique dans le monde. D'autre part, les régions méditerranéennes ont été identifiées parmi les deux principaux points chauds du changement climatique, ce qui signifie que le climat est particulièrement sensible aux changements mondiaux dans ce domaine (Rosado & Morais, 2010). Ainsi, les ressources en eau dans la région méditerranéenne sont limitées et très inégalement répartie dans le temps et dans l'espace. Au cours de la seconde moitié du XXe siècle, la demande en eau a augmenté (Vargas-Yáñez *et al.*, 2009). Dans certains pays méditerranéens, l'utilisation de l'eau s'approche du niveau limite des ressources disponibles. L'approvisionnement en eau est menacé par la surexploitation d'une partie de l'eau souterraine renouvelable

(génération de l'intrusion marine) et l'exploitation des ressources non renouvelables (y compris l'eau fossile) (Pereira & Paulo, 2004). L'inégalité entre l'offre et la demande croissante a conduit à des pénuries, la concurrence, l'augmentation de la pollution et d'autres pressions sur l'environnement (Rosado & Morais, 2010).

Le Maroc fait parti de ces pays qui souffrent de la problématique de l'eau. La région du Souss Massa, une région importante de production agricole notamment en cultures de primeurs, est parmi les régions où le problème des ressources en eau est très marqué. Selon l'Agence hydraulique du Souss Massa et Drâa, la situation hydraulique peut être résumée comme suit :

- Les ressources en eau sont rares et limitées. Elles sont aussi inégalement réparties dans l'espace ;
- Les ressources en eau subissent une forte dégradation de leur qualité à cause des différentes sources de pollution ;
- Les ressources en eau souterraine sont surexploitées, ce qui met en question leur durabilité ;
- La politique de l'offre pratiquée pendant des décennies a permis de disposer d'acquis indéniables qui ont permis à la région de dépasser les périodes difficiles des sécheresses. Une réorientation de cette politique devra s'opérer et devra se focaliser sur la gestion de la demande ;
- Les dispositions de la loi 10-95 devaient redresser la situation. Leur mise en œuvre était lente malgré les progrès accomplis ces dernières années.

Stratégies de gestion de l'eau

L'eau, comme une ressource limitée, peut seulement être utilisée efficacement grâce à une gestion proactive de la demande qui nécessite des voies de développement et des options politiques, liées à une évaluation de l'utilisation actuelle et future de l'eau (Hauschild & Döll, 2000).

Pour concevoir une nouvelle approche équilibrée de la gestion de l'eau dans les régions à climat semi-aride et méditerranéenne, il est essentiel d'éliminer les politiques de l'eau basées sur la gestion de l'approvisionnement en eau vers de nouvelles politiques qui prennent en charge la gestion de la demande en eau. Dans l'ensemble et compte tenu de l'économie d'eau, les stratégies de gestion de l'eau peuvent être appliquées dans différents secteurs. Les secteurs les plus importants à considérer sont : le secteur de l'eau potable, où au moins un tiers du volume d'eau distribué est perdu dans le réseau ou est gâchée par une mauvaise manipulation, le secteur de l'industrie, comme de nombreuses industries utilisent des volumes d'eau qui dépassent leurs besoins et le secteur de l'irrigation, depuis près de la moitié du volume d'eau pour l'irrigation n'est pas effectivement utilisée dans le champ (Rosado & Morais, 2010).

Les régions à climats secs ont des coutumes de conservation d'eau pour une longue durée, qui sont maintenues par des pratiques de gestion (ONU, 2006). La gestion des ressources hydriques appliquent des techniques, pour augmenter l'approvisionnement en eau naturelle limitée, par exemple, le dessalement, la réutilisation de l'eau, collecte de pluie, la réalimentation des nappes souterraines et les transferts entre bassins hydrographiques est nécessaire pour suivre la hausse de la demande (UN, 2006).

Plusieurs mesures ont été prises dans le but de faire face à cette rareté des ressources en eaux. Parmi elles l'utilisation des eaux non conventionnelles (eaux usées, eaux salines...). Cependant, la pleine utilisation et réutilisation des eaux usées est toujours loin de notre objectif final, c.-à-d. être employé comme source d'eau, malgré le rôle essentiel qu'elle pourrait jouer en réduisant la pression imposée sur l'eau douce disponible (Choukr-Allah et Hamdy, 2004).

Au niveau du Maroc plusieurs efforts sont fournis pour mieux gérer les ressources en eau mais la situation devient de plus en plus difficile. Dans le cas de la Région du Souss Massa, et dans les différentes régions du Maroc, de nouvelles politiques de gestion de l'eau sont adoptées. Ainsi, et à fin de réduire le déficit et de préserver les eaux, pour faire face au déséquilibre persistant entre la demande et les ressources en eau, un schéma d'aménagement de l'eau susceptible d'assurer la conservation et la préservation des ressources en eau et leur adéquation avec les besoins, est proposé, basé sur la

mobilisation maximum des eaux conventionnelles et non conventionnelles et sur la gestion de la demande. Ce schéma favorise une utilisation efficiente de l'eau pour atténuer d'une manière significative le déficit en eau au niveau des nappes d'eau souterraine, principales ressources d'eau de la région, en vue d'assurer leur durabilité (ABSHSMD, 2008). Il vise :

- La satisfaction des besoins en eau potable et industrielle ;
- La sauvegarde du patrimoine agricole de la région.

Les options de base du scénario proposé sont :

- La mobilisation des eaux de surface ;
- La recharge artificielle ;

L'économie de l'eau en irrigation (à titre indicatif l'eau d'irrigation représente 95 % de la consommation totale en eau dans la région du Souss Massa);

- La réutilisation des eaux usées traitées des grandes agglomérations.

Réutilisation des eaux usées traitées en agriculture

Traitement des eaux usées comme une ressource d'eau supplémentaire

Les eaux usées traitées pourraient être considérées comme une « nouvelle » ressource en eau, qui peut être ajouté au bilan général de l'eau d'une région. Elles peuvent remplacer l'utilisation de l'eau potable pour l'irrigation ou à d'autres fins, en même temps, en diminuant ainsi la pression sur les ressources en eau (Asano, 1998). Néanmoins, l'irrigation avec des eaux usées non traitées peut représenter un risque pour la santé publique, vue qu'elles peuvent contenir des bactéries pathogènes, des vers, des virus, des métaux lourds et des composés organiques anthropiques dangereux (UNEP, 2010). L'urbanisation croissante et l'intensification de l'agriculture produisent des quantités importantes d'eaux usées qui sont souvent utilisées pour l'irrigation dans les zones rurales-urbaines. Ces eaux sont souvent biologiquement ou chimiquement

contaminées, ce qui représente un risque pour la santé de l'Homme, l'animal et de l'environnement (Rosado & Morais, 2010).

La réutilisation des eaux usées traitées en agriculture présente un double avantage, d'une part, elle aidera à atténuer la pression sur les ressources en eau conventionnelles. D'autre part, elle contribuera à la protection de l'environnement et la lutte contre la pollution de l'eau en réduisant le volume des eaux usées déversées dans les fleuves, les lacs et le littoral (Choukr-Allah *et al.*, 2003).

Les eaux usées : définitions et concepts

Il est supposé que les eaux résiduaires peuvent être la combinaison de certains ou tous les éléments suivants (Fig. 1) (Hamdy & Ragab, 2005) :

- Effluents domestiques se composant de l'eau noire
- Eaux des établissements commerciaux et les institutions, incluant les hôpitaux.
- Effluents industriels
- Le drainage des précipitations et autres écoulements urbains.

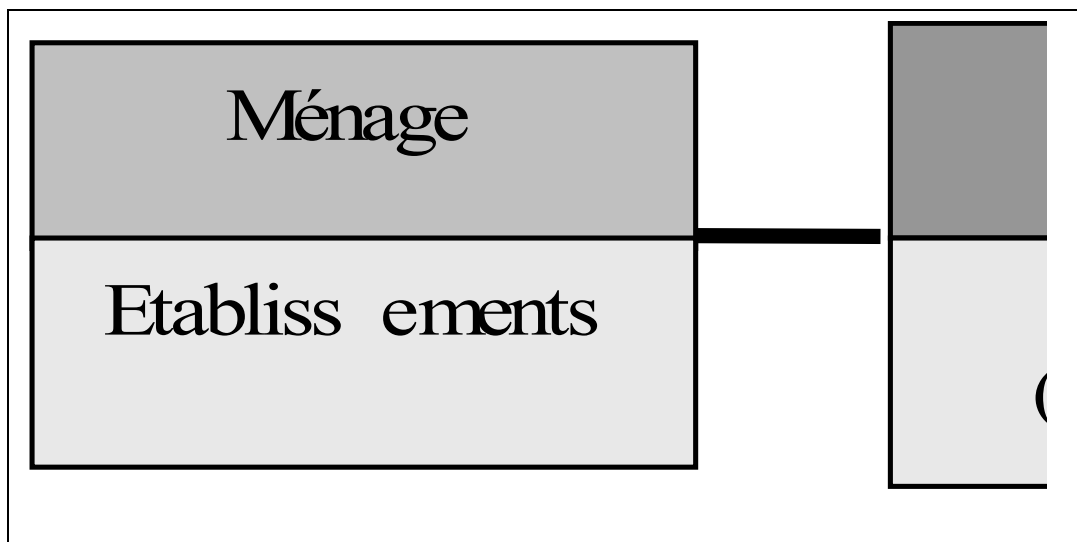


Figure 1 : Composantes d'eaux résiduaires urbaines

Industrie

Prétra

Non t

Composition des eaux usées

Les eaux usées contiennent des déchets solides, des matières en suspension, des éléments nutritifs, des substances chimiques et des éléments biologiques nocifs. Les constituants majeurs des eaux usées domestiques sont cités dans le tableau (Tab. 1) ci-dessous:

Tableau 1: Constituants majeurs des eaux usées domestiques.

Constituants	Concentration (mg/l)		
	<i>Elevée</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Faible</i>
Solides totaux	1200	700	350
Solides totaux dissous	850	500	250
Matière en suspension	350	200	100
Azote total	85	40	20
Phosphore total	20	10	6
Chlorures	100	50	30
Alcalinité (CaCO ₃)	200	100	50
Graisses	150	100	50
DBO ₅ (*)	300	200	100

*DBO₅ : La demande biochimique en oxygène en 5 jours à 20°C (Pescod, 1992).

Traitement des eaux usées

L'objectif principal du traitement est de produire des effluents traités à un niveau approprié et acceptable du point de vue du risque pour la santé humaine et pour l'environnement. À cet égard, le traitement des eaux résiduaires le plus approprié est celui qui fournit, avec certitude, des effluents de qualité chimique et microbiologique exigée pour un certain usage spécifique, à bas prix et des besoins d'opération et d'entretien minimaux.

Les différents degrés de traitements conventionnels sont (FAO, 2003) :

- Traitement préliminaire : Enlèvement des solides grossiers et d'autres grands fragments de l'eau usée brute.
- Traitement primaire : Enlèvement des solides organiques et inorganiques sédimentables ainsi que les matériaux flottants.
- Traitement secondaire : Enlèvement des matières organiques solubles et des matières en suspension des eaux usées issues du traitement primaire.

- Traitement tertiaire et/ou avancé : Enlèvement de constituants spécifiques de l'eau usée tels que les nutriments et les métaux lourds, qui ne sont pas enlevés par le traitement secondaire. La désinfection, habituellement avec du chlore, est employée pour réduire les constituants microbiologiques.

Intérêts liés au traitement des eaux usées

Les eaux usées doivent être traitées adéquatement et utilisées convenablement. Cela est important pour différentes raisons (Choukr-Allah et Hamdy, 2005) :

- La décharge d'eaux usées non traitées dans l'eau de surface affecte la qualité tant de l'eau dans laquelle elle entre, que de l'eau plus loin en aval.
- Les eaux usées traitées pourraient être utilisées pour fournir une source fiable de l'eau d'irrigation dans les zones urbaines, fournissant l'eau pour les jardins, les terrains de sport, la verdure au bord des routes.
- L'utilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation diminue la demande en eau douce pour l'agriculture.
- Si elle est traitée et gérée convenablement, l'eau usée traitée peut être utilisée pour fournir différents éléments nutritifs essentiels à la croissance de la plante. Cela fait bénéficier directement les agriculteurs parce qu'ils doivent faire peu ou pas d'investissement dans les engrais.

Contraintes liées à l'utilisation des eaux usées épurées

- Salinité : La salinité moyenne (conductivité électrique entre 2 et 4 mhos/cm) enregistrée dans les eaux usées se traduit après irrigation par une augmentation de la salinité du sol (Bahri et Houmane, 1987).
- Alcalinité : L'augmentation de l'alcalinité du sol, qui peut se produire avec l'eau usée traitée à cause de la concentration élevée en Na, réduit la perméabilité du sol, particulièrement en surface, même si le lessivage a lieu. Toutefois, pour

une certaine valeur du Rapport d'Adsorption du Sodium (SAR), la vitesse d'infiltration augmente ou diminue avec le niveau de salinité (Rhoades, 1977).

- La phytotoxicité : l'eau usée peut potentiellement créer une toxicité due à une concentration élevée de certains éléments comme le bore et quelques métaux lourds. Les ions les plus toxiques rencontrés généralement dans l'eau usée traitée sont le sodium (Na), le chlorure (Cl) et le bore (B) qui causent la plupart des cas des problèmes de toxicité (Rhoades, 1977).
- Les éléments traces et métaux lourds : C'est le problème principal avec la réutilisation des eaux usées traitées dans les pays ayant une industrie lourde. Les métaux qui peuvent être présents dans les eaux résiduaires {cadmium (Cd), cuivre (Cu), molybdène (Mo), nickel (Ni) et zinc (Zn)} peuvent constituer un risque sanitaire significatif (Rhoades, 1977).
- Problèmes de colmatage des systèmes d'irrigation : L'accumulation (dépôts biologiques, algues, etc.) dans les arroseurs, les canalisations d'alimentation, les orifices de distribution, peut causer un colmatage tout comme une concentration importante en algues et en matières en suspension. Les problèmes de colmatage les plus sérieux ne se produisent qu'avec les systèmes goutte à goutte (Massena, 2003).
- Impact sur la santé humaine : La réutilisation de l'eau usée épurée pour l'irrigation est associée à des agents biologiques (virus, bactéries, protozoaires pathogènes) qui entrent par voie buccale (par exemple, en mangeant des légumes contaminés par ascaris) ou par la peau (en cas d'ankylostomes et de schistosomes) (OMS, 1989).

Les eaux usées peuvent aussi contenir des toxines chimiques fortement toxiques de sources industrielles comme les matériaux dangereux des déchets hospitaliers. Les groupes appropriés de polluants chimiques sont les métaux lourds, les substances hormonales actives et les antibiotiques. Le risque associé à ces substances peut, à long terme, constituer une grande menace à la santé publique et plus difficile à traiter que les risques de pathogènes excrétés (Choukra-allah & Hamdy, 2004).

Réutilisation des eaux usées en agriculture au Maroc

Potentiel des eaux usées au Maroc

Selon le Secrétariat d'Etat Chargé de l'Eau, Le volume annuel des eaux usées a presque triplé au cours des trois dernières décennies. Il est passé de 48 à 500 millions de m³ de 1960 à 1999. Le volume est estimé actuellement à 500 millions de m³ et il est prévu atteindre près de 900 millions de m³ en l'an 2020 (Fig.2).

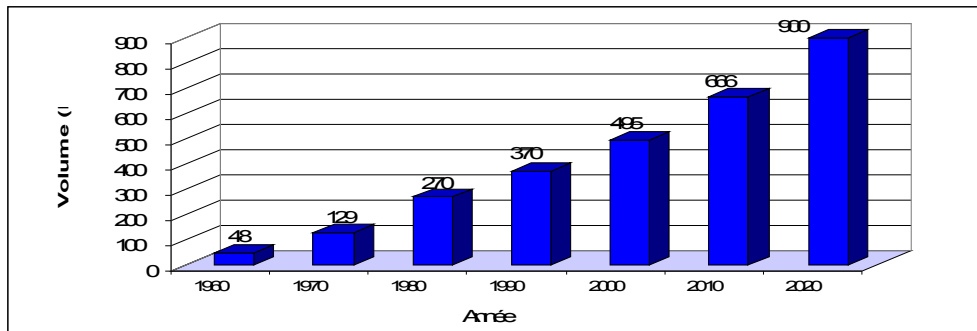


Figure 2 : Evolution du volume des eaux usées brutes urbaines au Maroc entre 1960 et 2020.

Importance de l'épuration des eaux usées au Maroc

Actuellement, le Maroc réutilise les eaux sans les traiter pour la majorité des cultures pratiquées. Il s'agit là d'une situation grave tant sur le plan sanitaire qu'environnemental. Au Maroc les superficies irriguées avec les eaux usées seraient de plus de 7000 ha. Ces superficies sont candidates à l'augmentation en raison des pénuries d'eau qui frappent ces régions, l'accès facile à ces eaux en absence d'une station d'épuration et d'un vide réglementaire qui interdit leur réutilisation (Choukr-Allah, 2001).

Les contraintes climatiques ont poussé les agriculteurs à irriguer leurs cultures avec des eaux usées lorsqu'il n'y a pas de disponibilité des eaux douces. L'intérêt pour la réutilisation des eaux usées traitées a augmenté sensiblement dans la partie méridionale du Maroc dû au déficit de l'eau (plus de 260 millions m³ par an) et l'augmentation de la demande pour l'approvisionnement en eau (Choukr-Allah *et al.*, 2003).

Une surface d'approximativement 7235 ha est directement irriguée par l'eau usée urbaine non traitée à savoir 70 Mm³ de l'eau usée est réutilisée chaque année dans

l'agriculture sans aucune mesure de précaution pour être appliquée. De divers types de cultures sont irrigués avec l'eau usagée telle que les fourrages verts, l'horticulture, les cultures de plein champ et l'arboriculture (Fatta *et al.*, 2005).

Le Maroc a commencé depuis les années 80 à installer des stations d'épuration des eaux usées dans plusieurs villes (Tab.2).

Tableau 2: Situation des principaux projets d'épuration réutilisation des eaux usées au Maroc

Projet	Système d'épuration	Démarrage	Capacité de traitement	Population raccordée
Marrakech	Lagunage facultatif	1985	380 m ³ /j	3000
Ouarzazate	Lagunage	1989	430 m ³ /j	4300
Ben Sergao	Infiltration percolation	1990	750 m ³ /j	15000
Ben Slimane	Lagunage aéré	1997	5600 m ³ /j	37000
Drarga	Infiltration colation	2000	600 m ³ /j	8000

La quantité des eaux usées au Maroc était de 600 Mm³ en 2008, cette quantité est estimé de 900 Mm³ en l'an 2020, il y a plusieurs facteurs derrière l'accroissement de la quantité des eaux usées comme l'augmentation du taux de branchement (de 79% en 1993 à 85 % en 2010), l'augmentation de la consommation de l'eau potable (en moyenne supérieur 100 litres/habitants/Jour) et l'accroissement démographique (de 4,4 à 5 %) Choukr-Allah (2009).

Quant au grand Agadir le volume journalier moyen de l'effluent brut a été évalué à 47.000 m³/jr en l'an 2000 passera à 78.000 m³/jr en l'an 2020. Les valeurs maximales atteintes au mois de juillet sont de 52.000 m³/jr et 86.892 m³/jr respectivement pour les années 2000 et 2020.

Typologie et composition des eaux usées

Les effluents bruts contiennent les métaux lourds et différentes substances organiques et minérales potentiellement toxiques, mais le principal risque associé avec

l'irrigation par les eaux usées est le risque sanitaire dû aux macro et micro-organismes pathogène (Capra & Scicolone, 2007).

Selon Choukr-Allah (2009) les différents types des eaux usées au Maroc selon le nombre des habitants par centre sont comme suit (Tab. 3) :

Tableau 3: Typologie des eaux usées au Maroc

Paramètres	Petits centres (moins de 20.000 habitants)	Centres moyens (entre 20.000 et 100.000 habitants)	Grandes villes (plus de 100.000 habitants)	Moyenne nationale
DBO ₅ mg/l	400	350	300	350
DCO mg/l	1000	950	850	900
MES mg/l	500	400	300	400
Taux de restitution	50	75	80	65

Les constituants des eaux usées sont classés en deux catégories : des constitutions néfastes représentés par les germes pathogènes, les micropolluants organiques et métaux lourds et les matières en suspension et des constituants bénéfiques qui enrichissent les sols : matière organique et éléments fertilisants. L'azote ne doit pas se trouver en concentration élevées dans les effluents pour éviter la pollution nitrique des eaux souterraines et les effets négatifs sur la production végétale. Les constituants des eaux usées en micro-organismes à Agadir (Soudi *et al.*, 2000) sont citées ci-dessous (Tab. 4):

Tableau 4: Caractéristiques microbiologiques des eaux usées à Agadir

Caractéristique	Eaux brutes	Eaux épurées	Rendement (%)
Coliformes fécaux (nb/100ml)	$1,5 \times 10^8$	<1000	99
Streptocoques fécaux (nb/ml)	$2,1 \times 10^8$	<1000	99
Helminthes (nb/ml)	241	0	100

1.1.1. Traitement des eaux usées : Cas de la station du Complexe Horticole d'Agadir (système sheaffer)

Les eaux usées, qu'elles soient d'origine domestique ou industrielle, sont collectées par un réseau d'assainissement complexe pour être traitées dans une station d'épuration avant d'être rejetées dans le milieu naturel. En station les traitement varient en fonction

de la nature de ces eaux usées et de la sensibilité à la pollution du milieu récepteur (Aussel *et al.*, 2004).

L'épuration se fait soit par le lagunage naturel ou par d'autres techniques plus compactes (lits bactériens, boues activées, infiltration percolation et utilisation des végétaux), le choix du procédé d'épuration dépend de la nature des rejets, la taille de la population, l'objectif d'épuration, site d'épuration et la disponibilité des terrains.

Les principaux facteurs de choix de la technique de traitement sont (Mahi, 2008) :

- La réglementation ;
- Le degré d'exposition des travailleurs ;
- Le type de système de distribution de l'eau ;
- Le type de système d'irrigation ;
- Les caractéristiques du sol ;
- Les cultures irriguées.

Les filières d'assainissement classiques utilisent généralement des procédés biologiques intensifs comme les boues activées et permettent l'abattement de la MO et des MOS et sous certaines conditions des autres composés indésirables (azote, phosphore, germes). Ce sont les techniques les plus répandues.

En parallèle à ces filières standards, des écotechniques se sont développées et sont également capables de traiter la pollution azotée et phosphorée, et/ou bactériologique. Le principe des écotechniques est d'utiliser les capacités épuratrices d'un écosystème naturel pour traiter en partie les eaux usées. Deux principales techniques ont été déployées et développées dans le monde (Brouillet *et al.*, 2008) :

- les lagunages fondés sur l'activité algale qui assure la production d'oxygène nécessaire à la vie des organismes épurateurs.
- les techniques utilisant des végétaux supérieurs qui interviennent soit indirectement par leur système racinaire à l'entretien d'une vie microbienne

dans des sols naturels ou reconstitués, soit directement par l'exportation d'eau ou d'éléments fertilisants prélevés dans les eaux usées.

Le système sheaffer (station du complexe horticole d'Agadir) : c'est un système conçu par la société Sheaffer international, LLC, et qui utilise des lagunes aérées avec une capacité de distribuer 100 % des effluents pour l'irrigation ou autres applications. Ce que rend ce processus unique est que l'injection d'aération dans le bassin d'accumulation des effluents se fait à environ 75 cm du fond, et au dessous de cette profondeur, les eaux usées sont maintenues dans un état anaérobique dans les 15 ou 25 cm du fond (Hinch, 2008).

Le principe est relativement simple vu que ce système de traitement permet aux réactions aérobies d'avoir lieu. En effet, de cette façon, les bactéries qui existent naturellement vivent de la matière organique dont les eaux usées brutes sont riches, aboutissent à sa dégradation ainsi qu'à la destruction des microorganismes pathogènes et des parasites. Certaines études ont montré que cette méthode permet la dégradation de plus de 85% des coliformes fécaux. Par ailleurs, la forte aération de l'effluent évite la formation du méthane et des gaz qui produisent les mauvaises odeurs. De plus vu que les bactéries épuratrices vivent sur la matière organique qu'elles dégradent, il n'y a pas de production de boues résiduelles.

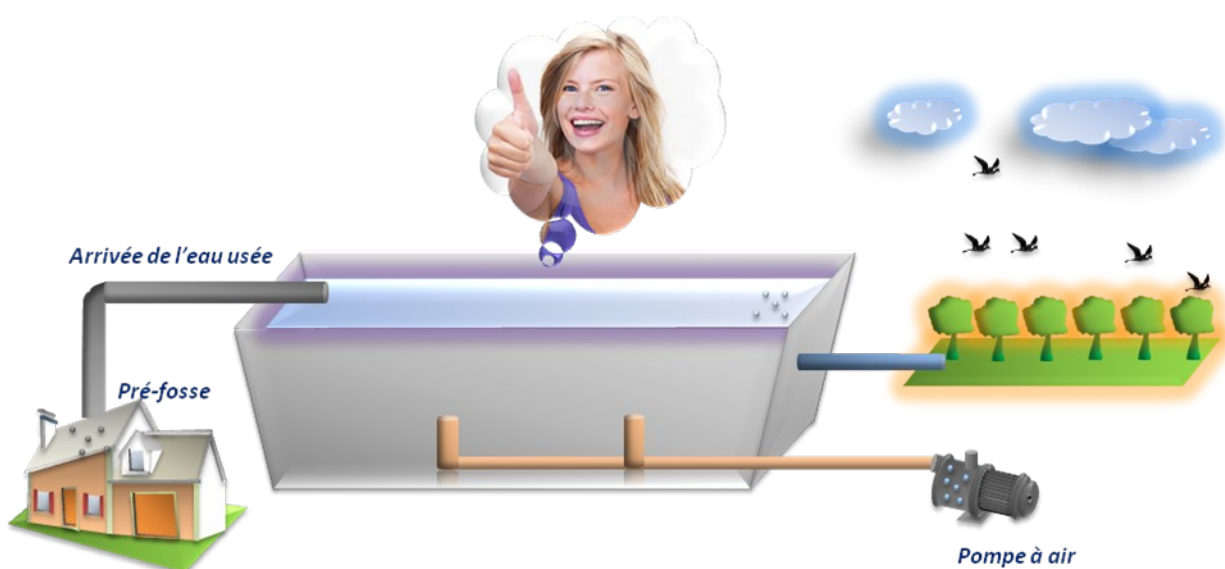


Figure 3 : Schéma de système Sheaffer adopté dans la station du traitement des eaux usées au Complexe Horticole d'Agadir

L'eau ainsi traitée pendant 40 jours peut être utilisée en agriculture et le système, ne produisant pas de mauvaises odeurs, peut être implanté à proximité des agglomérations génératrices des eaux usées. Les bassins peuvent même être utilisés comme pièces d'eau décoratives si le projet doit être installé dans un parc ou dans un boisement (Wahbi, 2007).

Intérêt de la réutilisation des eaux usées en agriculture

Selon Mahi (2008), le recours à la réutilisation des eaux usées au Maroc peut se faire pour les raisons suivantes :

- Conditions climatiques: climat aride, mauvaise répartition des précipitations, sécheresse ;
- Développement socio-économique et accroissement démographique ;
- Rareté des ressources et déficit croissant en eau (classement du Maroc parmi les pays en situation de stress hydrique).

D'après Choukr-Allah (2009), l'intérêt de la réutilisation des eaux usées épurées est qu'on peut les utiliser pour l'irrigation en agriculture ou pour l'arrosage de espaces verts et terrains de golf, ils sont considérées comme une ressource en eau additionnelle et une source d'éléments nutritifs fertilisants et permettent ainsi de générer un gain économique.

A Agadir par exemple la superficie des espaces verts publiques est estimée à environ 630 ha et les espaces verts dits privés s'élève à environ 87 ha, il existe aussi 4 golfs qui couvrent une superficie totale de 268 ha, soit en total de 985 ha une superficie importante qui pourra bénéficier des eaux usées traitées, et par la suite une économie en eau fraîche. Comme elles peuvent être prometteuses pour irriguer d'autres cultures.

Impact de la réutilisation des eaux usées sur le végétal et le sol

La réutilisation des eaux usées domestiques doit être considérée comme une nouvelle ressource en eau surtout pour l'irrigation mais avec la prise en considération du risque sanitaire, la contamination du sol et l'effet de ces eaux sur la croissance des cultures.

Les réseaux d'irrigation dans le Souss sont déjà concentrés, ces réseaux pourront être utilisés pour l'irrigation par les eaux usées traitées. Cependant il y aura toujours un doute

concernant la sécurité de la réutilisation de telles eaux, alors des critères rationnels pour les eaux usées traitées sur la base d'une fiable évaluation du risque sanitaire doivent être pris en considération. Par exemple le risque chimique de réutiliser les eaux usées traitées pour l'irrigation pourra arriver en consommant des produits pollués par contact direct avec ces eaux (Chiou, 2008).

A. Impact sur le végétal

L'irrigation du coton avec des eaux usées traitées (EUT) et principalement par goutte à goutte représente une pratique dans différents pays, par exemple une étude à Israël indique que l'apport de 200 kg de N par ha et par an grâce aux EUT excède l'apport de N minéral par les engrais (120 à 180 kg/ha.an) souvent appliqué pour la culture du coton, l'excès en azote dans le système sol-plante provoque une augmentation de concentration de l'azote foliaire durant la phase végétative et la phase de croissance du coton ; et une baisse du pourcentage des tissus du coton (da Fonseca *et al.*, 2007).

L'irrigation par les EUT a donné des résultats similaires et parfois meilleurs que l'irrigation par l'eau fraîche, le Tab. 5 montre la différence (Choukr-Allah and Hamdy, 2004) :

Tableau 5: comparaison entre le rendement obtenu par l'irrigation par les EUT et celui obtenu par l'eau fraîche

Traitement	Cultures						
	Chrysanthème	Melon	Courgette	Aubergine	Maïs	Blé tendre	Blé dur
	Fleurs/plant	T/ha	Kg/plant	Kg/m ²	Qx/ha	Qx/ha	Qx/ha
Eaux fraîches	69	26,2	1,29	3,17	12,43	5,10	0
Eaux usées traitées	80	34,6	2,18	3,41	12,62	48,69	31,83

L'apport de la même quantité des EUT (125 mm) pour la culture du blé pendant le stade de floraison et le stade de remplissage des graines a donné un rendement satisfaisant de 41,4 q/ha, un rendement maximal de 48,1 q/ha a été obtenu quand on a appliqué 70 % des besoins en irrigation (175 mm) pendant le stade de floraison et on a obtenu une grande chute du rendement des graines quand on a appliqué moins de 50

mm pendant ce stade, alors on conclut que le stade de floraison est le plus critique stade de croissance(Choukr-Allah and Hamdy, 2004).

Les effets de l'irrigation par des eaux usées sur le complexe sol/plante démontrent dans le cas d'une culture de pomme de terre en Tunisie, que quelque soit la technique d'irrigation utilisée, sous un même programme de fertigation, les eaux usées traitées apportent des rendements toujours supérieurs à ceux obtenus par irrigation à l'eau de nappe (Xanthoulis and Fonder, 2005).

Au Maroc, dans le cas de cultures d'aubergine et de géranium, les eaux usées épurées par épuvalisation ont une charge fertilisante telle qu'un effet dépressif sur le nombre de fruits produits a été observé ainsi qu'une moindre consommation hydrique de la culture.

En Palestine, la recherche de plantes adaptées à l'irrigation par des eaux usées a permis d'identifier une variété de pois qui ne subit pas de perte et dont les paramètres de biomasse, rendement en graines et qualité de formation des graines sont améliorés lors d'irrigation par des eaux usées. Dans la plus part des cas, l'irrigation par goutte à goutte de surface ou souterraine a donné des résultats similaires, une réduction de la contamination microbiologique est observée pour le goutte à goutte souterrain.

L'irrigation complémentaire par les eaux usées pour une culture céréalière au Maroc montre que dans le cas de la culture de blé dur, les rendements sous irrigation par les eaux usées épurées par infiltration-percolation sont statistiquement meilleurs que sous irrigation par eau de puits. Pour la culture de blé tendre, les rendements sont liés à la quantités d'éléments fertilisants apportés plutôt qu'à la nutrition hydrique (Xanthoulis and Fonder, 2005).

Pour les cultures maraîchères irriguées avec les eaux usées traitées, il est nécessaire de faire respecter un délai entre l'irrigation et la décontamination. Pour le maïs fourrager produit dans un périmètre irrigué avec l'eau usée traitée, il est nécessaire de faire respecter un délai entre l'irrigation et la consommation de l'herbe par les animaux. Les premiers résultats montrent que cette espèce ne se décontamine pas rapidement. un délai de 10 jours pour le maïs nous paraît un minimum et il faut veiller à ce qu'il soit respecté (Hamou *et al.*, 2000).

B. Impact sur le sol

L'irrigation par les EUT provoque une augmentation de l'EC du sol de 16 % sous un régime de 100 % d'ETM durant le premier stade de croissance, la quantité du nitrate lessivée est de l'ordre de 38,5 kg/ha dont 67 % durant le deuxième stade de croissance. Le bilan d'azote dans le sol pour des cultures testées sous un apport d'irrigation par les EUT indique un grand risque d'infestation de la nappe par le nitrate. En réalité la texture du sol, le grand taux de lessivage et la grande concentration en nitrate dans les effluents contribuent à un potentiel de lessivage du nitrate très important, la quantité d'azote perdue dans les percolations profondes varie et dépend de la culture, la quantité d'irrigation apportée et la qualité des EUT. Un apport d'eau correspond à 120 % d'ETM induit un lessivage très important de N et réduit aussi l'accumulation des sels dans la zone racinaire, éventuellement le rendement obtenu a été augmenté pour ce régime d'apport. L'application d'un apport égale à l'ETM de la culture induit l'accumulation des sels et réduit le rendement et le lessivage d'azote (Choukr-Allah and Hamdy, 2004).

Sous une culture de maïs, la teneur en nitrate s'accumule dans le sol lorsqu'il n'y a pas d'irrigation, alors qu'inversement, le sodium s'accumule lorsqu'il y a irrigation. Le phosphore présent dans le sol est plus important pour la croissance des plantes en condition de non irrigation. La teneur en potassium est invariable au cours du temps, les sols israéliens étant naturellement bien pourvus en cet élément. Par contre, il est un facteur limitant à la croissance des plantes, une carence induisant une non réponse à la fertilisation azotée (Xanthoulis et Fonder, 2005).

L'irrigation avec les EUT augmente le rendement de la canne à sucre, cependant une application supérieure à 100 % du besoin de la plante ne donne pas un bénéfice en termes du rendement et cause par la suite des problèmes d'accumulation de Na dans le sol, cette application induit à des changements du pH et autres échanges cationiques (Leal *et al.*, 2009a).

Une expérience a été menée sur une culture de riz en Grèce montre que des échantillons du sol prélevés à partir des blocs irrigués par des EUT ont une grande valeur de conductivité électrique (EC) et de macroéléments comme Cl, Na, Ca, Mg, K, N, et P

comparé avec des valeurs obtenues dans des échantillons prélevés à partir des bloc irrigué par l'eau de rivière (Papadopoulos *et al.*, 2009).

Les bénéfices économiques et agronomiques de l'irrigation par les EUT sont évidents, mais des polluants peuvent être introduits et accumulés dans le sol après une application à long terme à cause de la mauvaise gestion et le traitement impropre des eaux usées (Chen *et al.*, 2004).

Des changements dans les paramètres de sodicité et de salinité du sol sont les plus importantes altérations après une irrigation par des EUT dans les systèmes culturaux (Leal *et al.*, 2009b). L'irrigation par des effluents domestiques a été évalué durant 25 mois dans le sud d'Iran de 2003 à 2005 dans le quel 14 espèces d'arbres sont irriguées par des effluents et des eaux de forage avec un apport annuel respectivement de 3940 et 5395 m³/ha, alors pour atténuer l'effet environnemental de ces effluents, un système d'irrigation par goutte à goutte a été conçu. Les résultats statistiques obtenus montrent que les effluents n'ont pas un effets adverse sur les propriétés du sol, l'EC du sol a été réduit de 8,2, 6,8 et 7 dS/m vers 1,07, 1,12 et 3,5 dS/m respectivement dans les couches 0-30, 30-60 et 60-90 cm, le SAR a été réduit aussi, tandis que le pH a été augmenté de 0,8 et 0,6 unité dans les couches 0-30 et 30-60 cm, la matière organique a été aussi augmentée, les 25 mois d'irrigation avec les effluents cause une légère augmentation dans la densité apparente et une légère baisse dans la perméabilité du sol (Hassanli *et al.*, 2008).

Deux parcelles de laitue irriguée par de l'eau fraîche et des EUT ont été surveillées pendant une période de 3 ans, la quantité des éléments minéraux, les métaux lourds et des microorganismes pathogènes dans le sol a été analysé. L'irrigation par les EUT avait une grande influence sur les paramètres du sol : matière organique, N, P, Ca, Al, Fe, Pb et Zn. Les microorganismes pathogènes ont été détectés dans le sol de la parcelle irriguée par les EUT pendant 27 jours sous des conditions humides. Le rendement de laitue de la parcelle irriguée par les EUT été significativement meilleur (Manas *et al.*, 2009).

Effets de la salinité sur les plantes et le sol

Origines de la salinisation des sols

La salinité est une contrainte majeure qui affecte la croissance et le développement des plantes. La salinité du sol ou de l'eau est causée par la présence d'une quantité excessive de sels. Généralement un taux élevé de Na^+ et Cl^- cause le stress salin.

Les facteurs climatiques et de la gestion de l'eau peut accélérer la salinisation. Dans les zones arides et semi-arides, l'évapotranspiration joue un rôle très important dans la pédogenèse des sols salins et sodiques. Wanjogu et al. (2001) a signalé que la plupart de ces zones reçoivent moins de 500 mm de pluie par an, ce qui, couplé à une l'évapotranspiration potentielle annuelle d'environ 2000 mm conduit à la salinisation. Un autre type de salinité se produit dans les zones côtières soumises aux marées où la cause principale est l'intrusion d'eau salée dans les rivières (Cyrus *et al.*, 1997) ou les nappes (Howard et Mullings, 1996). Les cultures de riz côtières de l'Asie, par exemple, sont souvent touchés par l'exposition à l'eau de mer apportés par les cyclones dans l'océan Indien (Sultana *et al.*, 2001).

D'autres sols sont affectés par des facteurs d'origine humaine, principalement en raison de méthodes inappropriées de l'irrigation. Une eau de mauvaise qualité (Tab. 6) est souvent utilisée pour l'irrigation, de sorte que finalement le sel s'accumule dans le sol à moins que la gestion du système d'irrigation soit telle que les sels sont lessivés de la surface du sol. D'autre part, ce genre de salinisation peut être causé par d'autres facteurs relatifs à d'autres activités hors irrigation, tels que la déforestation (Szabolcs, 1994), l'accumulation des sels dont l'origine est l'eau ou l'air (venant de l'industrie, eaux usées urbaines,...) (Bond, 1998; Bouwer, 2002), la contamination par les éléments chimiques venant de l'agriculture intensive (Serres...) (Pessarakli, 1991) et le surpâturage (Szabolcs, 1994).

Tableau 6: Classes de qualité de l'eau d'irrigation (Richards, 1969 in PERIGAUD J., 1977).

Qualité de l'eau	Conductivité de l'eau (mmhos /cm)	Sels solubles correspondants estimés en NaCl (mg/l)
Excellente	< 0,25	< 160
Faible salinité	0,25 – 0,75	160 - 500

Forte salinité	0,75 – 2,25	500 - 1500
Très forte salinité	2,25 - 5	1500 - 3600

Effets de la salinité sur les plantes

Selon Carvajal *et al.* (1999); Yeo (1998); Grattan et Grieve (1999), les effets directs des sels sur la croissance des plantes peuvent être divisés en trois grandes catégories: (i) une réduction du potentiel osmotique de la solution du sol qui réduit l'eau disponible pour les plantes, (ii) une détérioration de la structure physique du sol en réduisant la perméabilité de l'eau et l'aération du sol et (iii) l'augmentation de la concentration de certains ions qui ont un effet inhibiteur sur le métabolisme des plantes (toxicité des ions spécifiques et les carences en minéraux nutritifs). La contribution relative des effets osmotiques et les toxicités ioniques spécifiques sur le rendement sont difficiles à quantifier. Cependant, Dasberg *et al.* (1991) ont indiqué que pour la plupart des cultures, les pertes de rendement causé par un stress osmotique pourraient être importantes sans arriver au cas d'apparition de lésion foliaire.

Pour (Omami, 2005), la salinité est un facteur environnemental très important qui limite la croissance et la productivité des plantes. Puisque la croissance des plantes est dépendante de la photosynthèse, les facteurs environnementaux affectant la croissance toucheront également la photosynthèse (Omami, 2005). En effet, le stress salin ralentit la croissance en longueur de la plante. Ceci, est due au fait que de la plante utilise une proportion de ses ressources énergétiques pour la régulation osmotique et ionique nécessaire pour la turgescence cellulaire, donc moins d'énergie disponible pour les exigences de la plante (Shannon, 1984).

D'autres auteurs confirment que la réponse générale des plantes à la salinité est la réduction de la croissance (Romero-Aranda *et al.*, 2001; Ghoulam *et al.*, 2002). L'effet initial et primaire de la salinité, en particulier à des concentrations faibles à modérées, est due aux effets osmotiques (Munns et Termaat, 1986; Jacoby, 1994). Les effets osmotiques des sels sur les plantes sont le résultat de l'abaissement du potentiel hydrique du sol dû à l'augmentation de la concentration du soluté dans la zone racinaire. En effet, avec des potentiels hydriques du sol très faibles, cette condition interfère avec la

capacité de la plante à extraire l'eau du sol et de maintenir la turgescence. Ainsi, le stress salin peut ressembler à la sécheresse pour certaines espèces. Cependant, à des concentrations salines faible ou modéré (fort potentiel en eau du sol), les plantes peuvent s'ajuster osmotiquement (accumulation de solutés internes) et maintenir un potentiel de flux d'eau (Guerrier, 1996; Ghoulam *et al.*, 2002.). La croissance des plantes peut être modérée dans ces conditions, mais, contrairement à la sécheresse, la plante n'est pas en déficit hydrique (Shannon, 1984).

À des niveaux élevés de la salinité, certains symptômes spécifiques des dégâts sur plantes peuvent être reconnues, telles que la nécrose et la brûlure de la pointe de la feuille dues aux ions Na^+ ou Cl^- (Wahome *et al.*, 2001). Les fortes concentrations ioniques peuvent perturber l'intégrité des membranes et des fonctions, interférer avec l'équilibre soluté interne et absorption des nutriments, entraînant ainsi des symptômes de carences similaires à celles qui se produisent en l'absence de salinité (Grattan et Grieve, 1999).

Le sodium et le chlorure sont généralement les ions les plus répandues et impliqués dans les sols salins ou eaux salines, et qui sont responsables de la majeure partie des effets négatifs qui peuvent être liés à des toxicités ioniques spécifiques (Levitt, 1980). D'autre part, la salinité est affectée par des interactions environnementales telles que l'humidité relative, la température, le rayonnement et la pollution atmosphérique (Shannon *et al.*, 1994). L'accumulation de sel dans les feuilles provoque la sénescence prématurée, la réduction de la disponibilité des assimilats pour les zones de croissance et réduit ainsi la croissance des plantes (Munns *et al.*, 1995). Neumann (1997) a considéré que l'inhibition de la croissance des feuilles par le sel diminue le volume des nouveaux tissus foliaires dans lesquels l'excès de sel peut être accumulé et, et si combiné avec l'accumulation de sel continu, il pourrait conduire à l'accumulation de plus haut niveaux de sel. En effet, le stress salin affecte tous les processus tels que la croissance, les relations hydriques, la photosynthèse et l'absorption minérale.

Tolérance des plantes à la salinité

La tolérance en sel a été définie comme la capacité d'une plante à supporter durant son cycle de vie sur un substrat contenant des hautes concentrations de sel soluble.

Guillaume Calu (2004) a classifié les plantes selon leur sensibilité à la salinité en deux groupes :

- Halophytes sont des plantes qui peuvent se développer et grandir en présence de hautes concentrations en sel, encore plus haut que celui de l'eau de mer (à peu près 500 mM de NaCl).
- Glycophytes sont des plantes sensibles aux basses concentrations en sel ; presque toutes les espèces de récolte (culture).

La sensibilité des plantes à la salinité dépend des facteurs exogènes, des espèces et variétés de plantes cultivées. Notons également que la capacité des plantes à tolérer la salinité dépend de l'interaction entre la salinité et les facteurs exogènes (sol, eau, conditions climatiques). Donc une compréhension de base de ces interactions est nécessaire pour une évaluation précise de la tolérance au sel.

Le stress salin affecte la plante durant tout son développement, cependant des différences de tolérance à la salinité selon les espèces et les variétés ont été remarqués dans les différents paramètres de croissance enregistrés (Omami, 2005). La grandeur de la réduction de la croissance sous l'effet de salinité varie beaucoup avec les espèces et d'une manière faible avec les variétés (Bolarin *et al.*, 1991; Ghoulam *et al.*, 2002). Pour les variétés les plus sensibles, le sel s'accumule plus vite, et parce que les cellules sont incapables de compartimenter le sel dans les vacuoles au même degré élevé que les variétés tolérantes, les feuilles risquent de mourir plus tôt (Munns, 1993).

Présentation de l'Amarante :

Origine et systématique

L'amarante est originaire de l'Amérique du sud et de l'Amérique centrale où sa culture par les Aztèques remonte à 5000 à 7000 ans (Kauffman et Weber, 1990; Stallknecht et

Schulz-Schaeffer, 1993). L'Amarante était à la fois une culture vivrière importante pour les Aztèques et un élément important dans leurs cérémonies religieuses (Myers, 1996). À l'heure actuelle, les amarantes sont largement cultivées comme légume à feuilles vertes ou comme céréale dans de nombreuses régions de l'Asie sub-tropicales et tropicales, en Afrique et en Amérique centrale. Selon Feine *et al.*, (1979) ceci est probablement dû à la capacité de ces plantes de s'adapter facilement à de nouveaux environnements et des climats extrêmement larges, ainsi que leur capacité concurrentielle qui permet une culture avec le minimum d'entretien et de techniques culturales.

L'Amarante est une plante annuelle appartenant à la classe des magnoliopsida, la famille des Amaranthacées ou chenopodiaceae, l'ordre des caryophyllales et le genre *Amaranthus* (G. Kelly O'brien, 2008). L'Amarante est attribuée à des plantes à la fixation de CO₂ du type C4.

Amarante vient du mot grec *Amarantos* signifiant qui ne se fane pas, elle représentait le symbole d'immortalité à l'époque et de nos jours dans le langage des fleurs, elle traduit la fidélité et l'amour durable. C'est une plante originaire d'Amérique du sud, des régions tropicales d'Asie, d'Afrique ou des Andes. L'*Amaranthus caudatus* appelé blé des Incas par les amérindiens, kiwicha dans les Andes, huautli par les Aztèques, était considérée par ces derniers comme une plante sacrée par excellence. Plante domestiquée depuis 7000 ans était cultivée du fait de ses grandes valeurs nutritives, thérapeutiques et rituelles (O'brien and Price, 1983 ; Yarger, 2008).

Description de la plante

L'Amarante est une plante pouvant dépasser 1m de hauteur, à racine charnue et pivotante et dont la tige épaisse, robuste et ramifiée est recouverte d'une pilosité avec des sillons longitudinaux.

Elle possède de nombreuses feuilles alternes et de grandes tailles, surtout celles se trouvant à la base. Les feuilles sont portées par un long pétiole, leur limbe vert tendre a une bordure entière. De l'aisselle des feuilles partent des rameaux secondaires et, vers l'extrémité, ce sont des fleurs qui se développent tout l'été et même en automne.

Ces fleurs sont minuscules mais elles sont extrêmement nombreuses, regroupées en épis cylindriques, rappelant l'aspect d'une queue qui finit par traîner majestueusement à terre (O'Brien and Price, 1983 ; Yarger, 2008).

Les feuilles (légumes) d'Amarante :

Le feuillage d'amarante est utilisé comme un légume et comme une nourriture animale particulièrement sous les tropiques et sous-tropiques. C'est une source excellente de fer biodisponible, jusqu'à 57 ppm (Rangarajan et Kelly, 1994), de la vitamine A, avec une moyenne de 250 ppm. Elle contient aussi des protéines (Segura-Nieto et al., 1994).

Les graines d'Amarante:

L'amarante n'est pas de la famille des graminées, elle n'est donc pas considérée comme une céréale. Cependant, comme elle est utilisée un peu comme les céréales : c'est une pseudo-céréale. Comme d'autres petites graines, l'amarante peut être traitée en soufflé, en flocons, extrudées et sous forme de farine moulue. La graine a un équilibre exceptionnellement nutritif d'acides aminés, ce qui fait de lui, une nourriture en protéines excellente (Segura-Nieto et al., 1994). Elle est aussi potentiellement utile comme une source d'amidon et comme une source d'huile de squalène.

En Inde, Mexique, Népal, Pérou etc., la graine d'amarante est une nourriture traditionnelle, utilisé également dans des produits de confiserie. (Rangarajan et Kelly, 1994).

Les semences sont d'une couleur pâle, variant du blanc cassé au rose pâle. Les graines du végétal d'ornement sont noirs et brillants. Les deux types sont comestibles et peuvent être utilisés comme sources de la farine, mais si les types de graines noires sont mélangés avec les types pâles, il est souvent considéré comme de la contamination.

Types d'amarante

La plupart des espèces d'Amarante sont sauvages. Un nombre limité d'Amarante est utilisé comme récolte. La majorité d'entre elles est couverte de mauvaises herbes. Les types couverts de mauvaises herbes sont principalement *A. viridis*, *A. spinosus*, *A. retroflexus* et *A. hybridus*. *Amaranthus retroflexus* est considéré comme une des pires

mauvaises herbes du monde. La différence entre l'espèce couverte de mauvaises herbes et les types cultivés est le fait, que le type cultivé a tendance à être indéterminé et robuste dans l'habitude de croissance. (NRC, 1984).

On distingue aussi l'Amarante ornementale, qui est très colorée. Elle peut avoir la coloration solide de rose, pourpre sombre, orange, verte ou blanche dont l'inflorescence penchée est semblable à la corde, droit ou inaperçu dans la feuille axile. (Rangarajan et Kelly, 1994).

Variétés

L'amarante est constituée d'environ 60 à 70 espèces aussi bien en climats tempérés que tropicaux, dont 40 sont considérés comme originaires d'Amérique. Ces espèces sont repartis en 4 catégories: céréales, légumes, plantes ornementales et plantes de mauvaises herbes (O'brien et Price, 1983 ; Yarger, 2008).

Parmi ces différentes espèces d'amarante, 3 ont été sélectionnées au fil des ans, pour la consommation humaine et animale: hypochondriacus A. (plume prince) et cruentus A. (amarante pourpre) sont couramment cultivées pour la graine, et tricolores A. (tampala) est cultivé principalement pour les feuilles (O'brien et Price, 1983 ; Yarger, 2008).

Utilisation et importance nutritionnelle

Elle est cultivée comme plante potagère pour ses feuilles comestibles et ses graines ou tout simplement comme fleur décorative. L'Amarante est une plante annuelle avec de petites graines, il ya environ 60 espèces, aussi bien tolérante à la salinité, chaleur et sécheresse (Stallknecht et Schulz-Schaeffer, 1993).

L'amarante est un aliment très nutritif. Les feuilles, les graines et les tiges tendres sont consommées comme herbe potagère dans les sauces ou soupes, cuite avec d'autres légumes, avec un plat principal, ou par lui-même.

Tableau 7: Composition approximative des graines et des feuilles d'amarante non cuits (Cole, 1979).

Composition approximative des graines et des feuilles d'amarante non cuits (100 g portions)		
Composant	Légume (feuille)	graine

Humidité	86.9 g	9.0 g
Protéine	3.5 g	15 g
Graisse	0.5 g	7.0 g
Glucides	6.5 g	63.0 g
Fibre	1.3 g	2.9 g
Calories	36	391
Phosphore	67 mg	477 mg
Fer	3.9 mg	----
potassium	411 mg	----
Vitamine A (bêta-carotène)	6100UI	0
Riboflavine(B2)	0.16 mg	0.32 mg
Niacine(B3)	1.4 mg	1.0 mg
Acide ascorbique(C)	80 mg	3.0 mg
Thiamine(B1)	0.08 mg	0.14 mg
cendre	2.6 g	2.6 g
calcium	267 mg	490 mg

Ce tableau montre que l'amarante est très nutritive, aussi bien la feuille que la graine. On note une quantité particulièrement élevée de vitamine C, de fer, calcium, vitamine A et B1,2,3, lipides, glucides et protéines. L'amarante est sans gluten, elle convient aux personnes aux besoins nutritionnels accrus.

Comparaison entre l'amarante et d'autres céréales

L'amarante est plus riche en protéines (14 à 16g/100g) que toutes les autres céréales que nous utilisons :

Le blé n'en contient que 11 à 13%, l'avoine 12%, le maïs 8 à 10g%, le riz 7 à 8%.... Mais ce qui est plus intéressant c'est que ses protéines sont d'une excellente qualité ou valeur biologique (efficacité à assurer la croissance et l'entretien de nos cellules). Par rapport à la protéine de référence (100), la graine d'amarante atteint le coefficient 75 alors que le blé est à 56,9, le maïs à 44, le soja à 68 et le lait de vache à 72,5.

La lysine, un acide aminé essentiel et limité dans les céréales (blé : 0,38g/100g), est bien représentée dans l'amarante (0,82g/100g). Par rapport à d'autres céréales (blé,

seigle, orge, avoine), l'amarante ne contient pas de gluten dans ses protéines. Elle est donc à recommander dans toutes les allergies de ce type et dans la maladie cœliaque en particulier. L'amarante contient au moins cinq fois plus de calcium (250mg/100g), deux fois plus de magnésium (310mg/100g) et au moins trois fois plus de fer (9 mg/100g) que les autres céréales ([Belhabib](#), 2005).

Tolérance de l'amarante à la salinité

L'amarante est une plante halophyte, donc elle résiste à de grandes concentrations de sel. Des études faites par Omami (2006), sur certaines variétés d'amarante (*A. tricolor*, adhésion 83) pouvaient vivre même sur des milieux salins jusqu'à concentrations de 100 mM (12.8 dS/ m). D'autres variétés pouvaient aller même jusqu'à 200 mM (24 dS/m).

Bien que l'augmentation de la salinité dans le milieu diminue la hauteur des plantes, le nombre de feuilles et la surface foliaire ainsi que le taux de photosynthèse et la conductance stomatique ont été considérablement réduits.

Condition de culture et rendement

L'Amarante est une plante facile à cultiver. On la sème au printemps dans un sol bien drainé, suffisamment humide et fertile, à exposition ensoleillée. On éclaircit le semis en laissant 50 à 80 cm entre les pieds. Des apports d'engrais ne seront qu'un plus pour la culture. Elle ne résiste pas au gel donc pour la multiplier, seul le semis est utilisable.

Les plantes peuvent croître de plus de deux mètres de hauteur et de maturité jusqu'à 50 000 graines, et la longueur de leurs inflorescences est plus d'un mètre. De 0,5 à 3,0 kg de graines suffit pour ensemer un hectare. L'Amarante peut également se développer sur des sols pauvres, elle peut ainsi résister à la sécheresse et la chaleur.

Le rendement de l'amarante varie selon les espèces, en graines de 1 à 6 t /ha, et celle de matière verte jusqu'à 70 t/ha. Par exemple, le rendement en graines d'*Amaranthus cruentus* oscillent entre un minimum de 500-800kg/ha et un maximum de 2500-4000 kg/ha. Pour Sur chaque plot, une placette de 1m² avait été posée. Les observations ont porté sur le comptage du nombre de pieds/m². Au laboratoire, les mesures ont porté sur

le poids des épis de chaque pied ainsi que l'estimation de la densité. Pour Belhabib (2005), le rendement peut atteindre 30qx/Ha.

Les rendements d'*Amaranthus caudatus* et d'*Amaranthus cruentus* sont plus faibles que ceux d'*Amaranthus hypochondriacus*. L'inconvénient de l'amarante est sa graine très fine, ce qui rend son ensemencement difficile. Il ya peu de preuves expérimentales sur le contrôle des mauvaises herbes et la fertilisation des cultures d'amarante. Bien que la graine d'amarante cultivée n'a pas de longue période de dormance (Svirskis, 2003).

Maladies et parasites

Dans les sols humides, les semis peuvent mourir d'agents pathogènes. En effet, l'amarante peut être attaquée par certaines maladies fongiques, notamment la fonte des semis et les chancres, cependant on ne lui attribue aucun fongicide. La pourriture des racines peut se produire également, si les sols sont humides.

L'amarante est généralement considérée comme tolérante des nématodes, mais néanmoins, on rapporte la présence de nématodes à galles sur les racines de l'amarante. Quelques insectes peuvent toutefois causer des dommages importants. L'amarante peut succomber aux chenilles, pyrales, méloés, punaises et foreurs de tiges.

Aucun virus n'a été noté sur l'Amarante, et pas de maladies bactériennes graves observées (Myers, 1999).

Présentation du Quinoa

Origine et systématique

Le quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd.) est une espèce native d'Amérique du Sud, originaire de la région andine et plus particulièrement des hauts plateaux (Altiplano) bolivien et péruvien (Mujica et al., 2001). Les régions où elle est plus cultivée sont à des altitudes de 3000 à 4000 mètres à la Bolivie et au Pérou (Belhabib, 2005). Pendant la période Inca, il a toutefois occupé après le maïs une place prédominante parmi les plantes à graines (Jacobsen et Stolen, 1993). Après la conquête espagnole dans la région au XVIème siècle, la culture et l'utilisation du quinoa ont connu un important déclin à

cause de l'introduction de cultures européennes (blé, orge) ; de plus, les colons espagnols semblent en avoir activement découragé la culture en raison de son statut religieux dans la société Inca, qui considérait le quinoa comme une graine sacrée (Cusack, 1984; Jacobsen et Stolen, 1993). Ce n'est qu'au XXème siècle que la culture du quinoa a progressivement redémarré. Actuellement, le quinoa est cultivée en Europe et aux Etats Unis (Benlhabib, 2005).

Le quinoa appartient à la sous-famille des Chenopodioideae de la famille Amaranthaceae. Dans la sous-famille Chenopodioidea, environ 368 espèces ont été classées comme tolérantes aux stress abiotiques, soit environ 28% de la famille, bien plus que n'importe quelle autre famille ou sous-famille (Orcutt et Nilsen, 2000).

Culture du quinoa au niveau mondial

Le quinoa occupe une superficie d'environ 99.313 ha dans le monde, et la production était de 78.025 tonnes en 2010, La Bolivie est la principale producteur du quinoa en termes de superficie qui de l'ordre de 63.010 ha avec une production d'environ 36.106 tonnes mais le Pérou produit plus de 41.000 tonnes sur une superficie d'environ 35.313 Ha (rendement plus élevé au Pérou) (FAOSTAT, 2010).

Le quinoa a été introduit au Maroc dans la région de Khénifra en automne 1999 avec le début du projet BAFI/BYU-IAV Hassan II. Un essai de multiplication et d'évaluation de 14 variétés a été entrepris dans le cadre de l'activité d'adaptation de cultures alternatives et installé à l'Institut Technique Agricole de Ben Khilil. En parallèle, la culture de quelques parcelles chez des agriculteurs de la localité d'Agoudim a été initiée. Après cinq années d'expérimentations et de multiplication du quinoa, un matériel variétal adéquat a été développé et la production locale a augmenté. Aussi, la nécessité d'instaurer d'une part une consommation locale et d'ouvrir d'autre part un marché national est devenue présente. C'est ainsi qu'un atelier de promotion de l'utilisation et de la consommation locale du quinoa a été organisé en septembre 2004 au profit de la femme rurale de la région (Benlhabib, 2005).

Description de la plante

La plante montre une grande diversité génétique et donc morphologique d'une variété à l'autre, mais aussi à l'intérieur d'une même variété. Verte, orange, rose, rouge ou pourpre, tachetée ou non... les couleurs de la tige, des feuilles, des épis et des graines varient considérablement. Les plants mesurent de 50 cm à 1,50 m de haut en fonction de la variété, mais aussi des conditions de croissance. Les graines, principale partie comestible de la plante, peuvent être de trois formes différentes : conique, cylindrique ou ellipsoïde (Winkel, 2009).

La tige, cylindrique au niveau du collet et anguleuse plus haut, contient une moelle de texture tendre chez les jeunes plantes, devenant spongieuse et creuse à maturité, avec une écorce ferme et compacte. Les feuilles d'une même plante sont nettement polymorphes, celles de la tige principale étant plus longues que celles des ramifications. Les feuilles, alternes, ont un limbe en forme de losange, de triangle ou lancéolé, plat ou onduleux, charnu et tendre (celles de jeunes plantes se consomment comme légume). Le nombre de dents ou de lobes des feuilles serait une caractéristique variétale. Le quinoa présente des fleurs hermaphrodites disposées en inflorescences en grappes, considérées comme de faux épis (panicules). Le fruit est un akène, de forme cylindrique à lenticulaire, dans lequel l'embryon périphérique entoure le péricarpe central (tissus de réserve) et se trouve couvert par le péricarpe et deux assises tégumentaires (Del Castillo *et al.*, 2008).

Variétés

Les variétés de quinoa sont nombreuses et ce-ci est due à la nature de la région d'origine de cette culture. La région traditionnelle de culture du quinoa en Amérique du Sud s'étend de la Colombie au Nord (2°N) au Chili au Sud (40°S), et du niveau de la mer à 4 000 mètres d'altitude. Cette diversité d'écosystèmes est associée à une variabilité génétique importante se traduisant par plus de 1 000 variétés de quinoa (Tapia, 2000) ; le germoplasme bolivien regroupe actuellement 3 121 accessions (Rojas *et al.*, 2010). Ces variétés peuvent être réparties en cinq groupes selon les adaptations morphologiques et physiologiques particulières qu'elles ont pu développer pour s'adapter à leur environnement. Le premier groupe est très différent des quatre autres, et se trouve à basse altitude et proche de la mer, dans un climat pluvieux (1 000 à 1 500 mm par an). Le

deuxième groupe correspond aux quinoas subtropicaux des vallées humides amazoniennes, entre 1 500 et 2 000 m d'altitude avec une pluviométrie de 1 000 à 2 000 mm. Le troisième se rencontre dans les vallées andines situées entre 2 000 et 3 500 m d'altitude et qui ont des précipitations modérées (500 à 1 500 mm). Le quatrième contient les variétés « altiplaniques », qui se développent entre 3 800 et 4 100 m d'altitude, aux alentours du lac Titicaca ainsi que sur l'Altiplano Nord et Centre, avec des précipitations comprises entre 400 et 800 mm par an. Enfin, le dernier groupe contient les variétés proches des "salars", vastes déserts de sel du sud de l'Altiplano bolivien et de la frontière avec le Chili. Les précipitations annuelles dans la région, caractérisée par un climat aride, sont en moyenne inférieures à 300 mm. Les variétés des trois premiers groupes ont des graines de petite taille, tandis que celles du groupe "Salar" présentent les graines les plus grosses (Rojas *et al.*, 2010).

Importance nutritionnelle du quinoa

La graine du quinoa possède une valeur nutritive élevée et sa qualité nutritionnelle a été comparée à celle du lait par l'Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO). Il est, en termes de quantité et de qualité de protéines, supérieur à de nombreuses céréales (Tab. 10). Le quinoa contient ainsi de 11 à 22% de protéines selon les sources, alors que cette teneur n'est généralement que de 7 à 13% chez les céréales (Ayala *et al.*, 2001 ;). Il possède de plus une composition en acides aminés essentiels complète et relativement équilibrée, qui le rend complémentaire de la plupart des céréales, voire de certaines légumineuses. Il est en particulier riche en lysine, présente en faible quantité chez le blé. Le quinoa s'approche ainsi des besoins en acides aminés pour l'alimentation humaine définis par la FAO (FAO, 1970 ; 1985). Le quinoa ne contient pas de gluten et est également riche en minéraux, en lipides et en fibres (Tapia, 2000).

Tableau 8: Composition des graines de quinoa et de blé (g/100g de matière sèche) (Tapia, 2000).

Composante	Quinoa	Blé
Protéines	11,0 - 21.3	12,5
Lipides	5,3 - 8.4	2 - 3
Glucides	53,5 - 74.3	67 - 71
Fibres	2,1 - 4.9	2- 4

Cendres	3,0 - 3.6	1,5 - 2,5
Humidité	9,4 - 13.4	14,5

Tolérance du quinoa à la salinité

Dans la zone majeure de production du quinoa située dans les salars boliviens, certains sols ou eaux d'irrigation peuvent avoir des concentrations en sel non négligeables. D'après Bosque *et al.* (2001; 2003), les variétés du groupe "Salar" peuvent résister à des niveaux de salinité compris entre 8 et 15 mS/cm sans diminution de leur biomasse. Jacobsen *et al.*, (2000b) ont trouvé chez une de ces variétés un maintien du rendement jusqu'à une salinité de 25 mS/cm, avec une division du rendement par 2 lorsque la salinité de l'eau dépasse les 30 mS/cm. Mujica *et al.* (2001) parlent même d'une germination possible à 52 mS/cm, mais retardée de 25 jours.

Le quinoa est ainsi capable d'accumuler des ions salins dans ses tissus pour ajuster le potentiel hydrique foliaire. Cela lui permet de maintenir la turgescence cellulaire et de limiter sa transpiration, évitant des dommages physiologiques que pourrait causer la sécheresse. En conditions salines, le quinoa se comporte donc comme un halophyte facultatif et pourrait être utilisé pour nettoyer des sols contaminés par le sel (Jacobsen *et al.*, 2000a).

Jacobsen *et al.*, (2000b) dans une étude relative à la résistance de quinoa à la salinité montrent que quelques-unes des caractéristiques qui ont été mesurées, tels que la surface foliaire, la production de biomasse, le rendement grainier et l'indice de récolte, ont présenté de meilleures réponses modérées dans des conditions salines (10-20 mS/cm) que sous faible CE, indiquant que le quinoa est une halophyte facultative. L'étude a également indiqué que l'un des personnages les plus sensibles à la salinité était la hauteur des plantes. Par conséquent, le dépistage pour seulement une légère baisse de ce personnage peut être un moyen d'accroître le rendement en graines de quinoa dans des sols salins.

Quinoa, comme facultative halophyte, accumule les ions de sel dans les tissus. Ce mécanisme ajusté potentiel hydrique des feuilles, ce qui permet aux plantes de maintenir la turgescence des cellules et la transpiration limite dans des conditions salines.

L'accumulation de sel indique que le quinoa peut être utilisé pour nettoyer les sols contaminés par le sel. Les personnages les plus sensibles à la salinité sont la conductance stomatique, la surface foliaire et la hauteur des plantes Jacobsen *et al.*, (2000b).

Condition de culture et rendement

L'expérience de la zone de production du quinoa au niveau de l'Amérique du Sud est la référence pour le mode de culture du quinoa qui est aussi variable selon la zone de cette région. Pour l'Altiplano Nord et centre, le cycle de culture dure entre 150 et 200 jours selon les régions et les variétés. Le semis doit être fait en conditions humides, généralement début septembre dans la région du Salar où les sols sableux ont conservé l'humidité, ou alors fin septembre-courant octobre dans les autres régions, avec l'arrivée des premières pluies.

L'itinéraire technique (rotation jachère - quinoa) s'effectue le plus souvent sur deux années (Felix, 2004). Dans la zone de l'Altiplano Centre où le quinoa est quasiment apte à la culture, sur des sols relativement sablo-limoneux et sablo-argileux, plus pierreux que dans l'Altiplano Sud. La plupart du temps le quinoa est inscrit dans une rotation pomme de terre – quinoa – orge – jachère de 3 à 5 ans, mais depuis quelques années certains terrains sont cultivés sans pomme de terre avec le quinoa en tête de rotation (quinoa – orge – jachère de 2-3 ans) (Lebonvallet, 2008).

Préparation du sol

La préparation du sol se fait normalement à partir de mi-février et peut se prolonger jusqu'à courant mars. Elle est réalisée soit par "yunta" (2 taureaux) (retournement du sol sur 15-20 cm), soit au tracteur avec une charrue à disque (retournement sur 20-30 cm). Selon le type de rotation, ce labour précoce peut être réalisé directement avant une culture de quinoa ou non. Lorsqu'il s'agit d'une rotation où le quinoa suit la pomme de terre, la préparation du sol est réalisée pour la pomme de terre en année 1 ; en année 2 pour le quinoa, elle correspond juste à la récolte de la pomme de terre, effectuée en avril-mai (Lebonvallet, 2008).

Semis

Le semis est réalisé en septembre-octobre selon l'occurrence des premières pluies, généralement il s'agit d'un semis "voleo surcado" : les graines sont lancées puis la ligne (surco) est ouverte à la yunta ou au tracteur. Dans certains cas, le "surco" est ouvert en premier, puis les graines y sont semées. La densité de semis est d'environ 8-9 kg.ha⁻¹ (200 plantes/m²), et la profondeur entre 3 et 5 cm. Si le semis de quinoa ne suit pas une récolte de pomme de terre mais une jachère, il faut au préalable enlever tout ce qui est paille ou thola (Lebonvallet, 2008).

Lebonvallet (2008) a reporté aussi que les observations sur le terrain et les dires d'experts indiquent bien que la phase critique de culture du quinoa se situe au moment de la levée ; si la levée a pu se faire dans de bonnes conditions d'humidité, le reste de cycle ne présente généralement pas de difficultés particulières, sauf évènement climatique majeur (gelées, grêles ou sécheresse particulièrement fortes). En revanche, il n'est par exemple pas rare de voir des parcelles avec un pourcentage de levée inférieur à 30%, si le quinoa n'est pas semé au bon moment et dans un sol trop sec, voire entre 0 et 10% dans le cas d'un semis vraiment mauvais. Dans le cas d'un semis en poquet, l'émergence peut atteindre 100% des graines semées, mais il existe toujours un risque que les plantules soient recouvertes de sable par le vent, et donc de réduire fortement la densité de levée.

Fertilisation et irrigation

Concernant les interventions en cours de cycle de culture, il s'agit essentiellement de fertilisation, réalisée au moment du semis le cas échéant. Si le quinoa suit un cycle de pomme de terre, alors la fertilisation est apportée au moment du semis de la pomme de terre. C'est une fertilisation principalement organique (fumier), mais également parfois accompagnée de fertilisation chimique (« 1/2 ou 1 sac » d'urée par hectare). Si le quinoa suit une jachère, alors aucune fertilisation n'est apportée. Il peut également y avoir un contrôle des parasites (larves) (Lebonvallet, 2008).

L'irrigation complète du quinoa n'est pas une bonne option. Cependant avec un apport d'irrigation limité, le rendement en graines du quinoa pourra être stabilisé en 60 à 70 % de son potentiel (Geerts, 2008). La culture du quinoa tolère le stress hydrique et

s'adapte bien aux régions où la pluviométrie annuelle avec irrigation se situe entre 250 à 400 mm (Benlhabib, 2005).

Récolte

La récolte se fait de fin mars à début mai. Sur environ 60% des parcelles, le quinoa est arraché jusqu'à la racine, dans le reste des cas il est coupé. Les graines sont ensuite laissées à sécher dans le champ entre 1 et 2 mois. Les rendements sont en moyenne autour de 0,8 à 0,9 t.ha-1, pour des parcelles de 4 000 m² ou moins. Il arrive également que les quinoas soient laissés sur pied jusqu'en mai ou en juin pour cause d'absence de main d'oeuvre, la pomme de terre (qui sinon risque de développer des maladies) et l'orge (indispensable pour alimenter les animaux) étant récoltées avant. Dans ce cas, les graines sont toujours utilisables pour la consommation, mais plus pour les semences si des pluies se sont produites, car ils ont perdu leur qualité germinative (Lebonvallet, 2008).

Pour Mujica *et al.*, (2001), Si le potentiel de rendement de quinoa atteint 11 Kg/Ha, la production maximale obtenue en conditions optimales est d'environ 6 Kg/Ha et sur l'Altiplano elle n'est en moyenne que de 0,6 Kg/Ha (Laguna, 2002). L'indice de récolte peut être compris entre 0,20 et 0,45, et le poids de 1 000 graines moyen est de 2,30 g. La culture (labour, semis, récolte) a été mécanisée dans l'Altiplano Nord et dans l'Altiplano Centre, mais elle reste encore en partie manuelle dans le Sud (Felix, 2004).

Maladies et parasites

La principale maladie rencontrée chez le quinoa est le mildiou. Les variétés altiplaniques et du salar n'y sont pas toutes résistantes, mais le climat sec n'est pas propice à son apparition. En revanche, la forte teneur en saponine de la graine chez la plupart des variétés du salar les rend moins sensibles aux attaques d'oiseaux ou de parasites, grâce à son goût amer et sa toxicité pour les animaux de petite taille (Tapia *et al.*, 2000).

CHAPITRE II

Chapitre II - Effet de la salinité et de la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de l'Amarante

Résumé— Un essai a été conduit en 2010 à la station expérimentale de l'IAV-CHA-Agadir au sud ouest du Maroc pour évaluer les effets des eaux usées domestiques traitées et de la salinité pour l'irrigation de l'Amarante sous conditions semi-arides. Trois variétés (A0020, A0057 et A211) ont été testées avec trois niveaux de salinité de l'eau EC1 (0,92 dS/m) comme contrôle, EC3 (3 dS/m) et EC6 (6 dS/m). En termes de croissance, l'augmentation du niveau de salinité appliquée réduit significativement la hauteur de la plante, la surface foliaire, le poids frais mesuré au stade de la floraison et la maturité végétative, pour toutes les variétés. Même avec l'application de la EC6, les rendements étaient relativement élevés par rapport à ceux obtenus dans des conditions normales de culture. A noté une accumulation importante de nitrates, de chlorure et de sodium dans les couches du sol durant le cycle de culture. L'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation s'est avérée possible. La variété A211 est la moins sensible au stress de la salinité et elle pourrait être plus prometteuse pour son introduction dans la zone d'étude.

Mots-clés —Amarante, salinité, climat semi-aride, eaux usées traitées.

Abstract— An experiment was implemented in a field in the south of Morocco to evaluate the effects of domestic treated wastewater use for irrigation of amaranth crop under semi-arid conditions. Three varieties (A0020, A0057 & A211) were tested and irrigated using domestic treated wastewater EC1 (0,92 dS/m) as control, EC3 (3dS/m) and EC6 (6dS/m) obtained by adding sea water. In term of growth, an increase of the EC level of applied irrigation water reduced significantly the plant's height, leaf area, fresh and dry weight measured at vegetative, flowering and maturity stage for all varieties. Even with the application of the EC6, yields were relatively higher in comparison with the once obtained in normal cultivation conditions. A significant accumulation of nitrate, chloride and sodium in soil layers during the crop cycle was noted. The use of treated waste water for its irrigation is proved to be possible. The variety A211 had showed to be less sensitive to salinity stress and it could be more promising its introduction to study area.

Keywords—Amaranth, salinity, semi-arid, treated wastewater.

INTRODUCTION

L'utilisation des eaux usées traitées est une option acceptable pour les agriculteurs seulement si la qualité des eaux usées est aussi qualifiée pour l'irrigation. Le taux élevé de salinité des eaux usées étant le facteur limitant, le plus important en dehors de la charge microbiologique. Dans ce cas, une pratique de culture adéquate et plus ou moins résistante à la salinité s'impose, d'où le choix de l'Amarante.

Actuellement avec le développement socio-économique et l'accroissement démographique ; un problème majeur se pose dans le monde, notamment dans les pays en développement : l'insécurité alimentaire, d'où l'utilisation de l'amarante dans nos essais, mettant l'accent sur l'utilisation possible de cette espèce comme une culture nutritive dans les régions semi-arides. L'amarante (*Amaranthus* spp.) est utilisée pour ses graines et ses feuilles riches en protéines, vitamines, et minéraux. C'est une plante ayant une capacité à s'adapter à différentes conditions de croissance (sols faibles en éléments nutritifs), températures élevées, tolérante à la sécheresse et à la salinité (Myers 1996). Mettre en évidence l'effet des eaux usées traitées sur l'Amarante et voir également leur impact sur le sol constituent les objectifs de cette présente étude. En suivant le comportement de trois variétés d'Amarante (A211 ; A0020 ; A0057) vis à vis de la salinité à différents niveaux (0,92ds/m ; 3ds/m ; 6ds/m), pour essayer de cerner le degré de tolérance de ces variétés. Le travail aussi d'ouvre sur la possibilité d'introduire une culture comme l'Amarante dans le système culturale de la région.



Matériel et méthodes

Lieu

Le travail a été réalisé au niveau de la station expérimentale de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Complexe horticole d'Agadir situé à 2 km d'Ait Melloul, à 17 km de la ville d'Agadir sur la route principale N° 32 allant vers Taroudant. De latitude 30°36' Nord, longitude 9°36' et de l'altitude 32m.

Matériel végétal et plantation

Dans cet essai, le matériel végétal utilisé est constitué de trois lignées d'Amaranthus spp. Ces lignées sont fournies par l'Université de Copenhagen (UCPH) et les lignées sélectionnées par Prof. Belhabib de l'IAV Hassan II.

<p>- N°0057</p>	 <p>Photo 1: Variété A0057.</p>	<p>Cette variété est caractérisée par une inflorescence rose clair. De grandes feuilles alternes, à limbe simple. La tige est dressée et la racine est pivotante. La plante est dotée d'une possibilité de régénérescence après cassure.</p>
<p>- N°211:</p>	 <p>Photo 2: Variété A211</p>	<p>Cette variété est caractérisée par une inflorescence hétérogène (verte, brune, pourpre et même une hybridation de coloration telle que verte mélangée au pourpre). De grandes feuilles alternes, à limbe simple. La tige est dressée et la racine est pivotante.</p>

<p>- N°0020 :</p>		<p>Cette variété est caractérisée par une inflorescence verte. Des feuilles moyennes, à limbe simple. La tige est ramifiée et la racine est pivotante.</p>
-------------------	--	--

Photo 3: Variété A0020.

Les semis des 3 variétés d'Amarante a été fait le 15/07/2010, dans des plaques alvéolées (germoirs) contenant de la tourbe commerciale sous serre. Il y a germination de plus de 60% du semis et apparition des feuilles au bout de 3 à 5 jours.

Les plants sont transplantées le 18/08/2010, quatre semaine après semis, sur la parcelle bien labourée et irriguée, afin de maintenir les plantes dans des conditions hydriques favorables pour que les racines soient bien établies.

Dispositif expérimental

Les plantes ont été irriguées à l'aide d'eaux usées traitées avec trois niveaux de salinité :

- EC1 comme témoin (0,92 dS/m),
- EC3 (3 dS/m - eaux usées traitées + eau de mer),
- EC6 (6 dS/m - eaux usées traitées + eau de mer).

Quatre répétitions ont été adoptées pour chacun des traitements sur des parcelles de 12 m² selon une conception de parcelle split plot comme le montre la fig. 4.

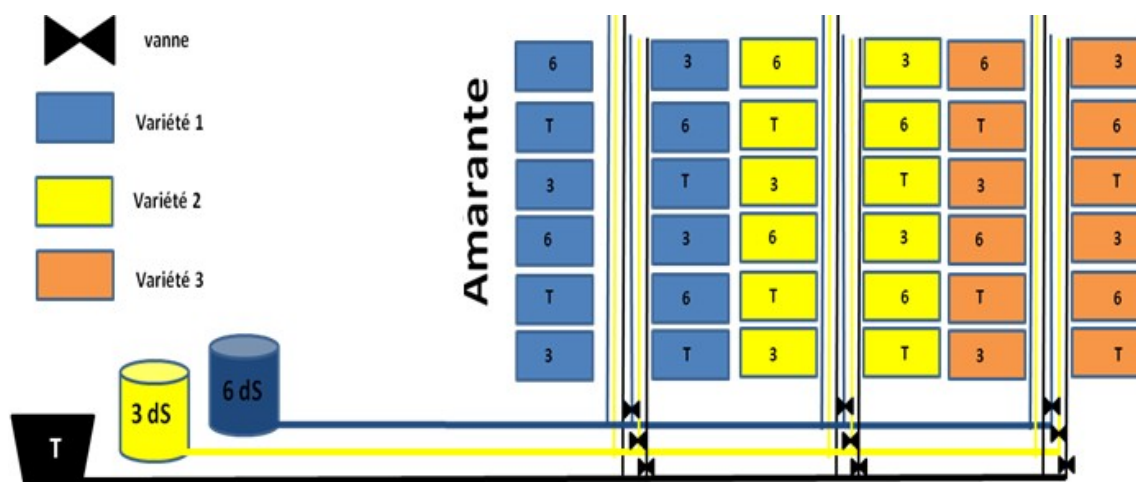


Figure 4: Dispositif expérimental des trois variétés d'Amarante.

Sol

Le sol est de type limoneux, moyennement riche en matière organique, avec un pH de 8,04 et une EC de 0,17 dS/m. L'humidité à la capacité au champ (Hcc) est égale à 30% et l'humidité au point de flétrissement permanent (Hpfp) est égale à 15%. Ces données seront très utiles pour le calcul des besoins en eau de la culture.

Irrigation

Caractéristiques de l'eau

Les eaux usées utilisées pour l'irrigation de la culture sont traitées au niveau de la station de traitement des eaux usées située dans le site d'étude (complexe horticole d'Agadir) et elles sont conformes aux normes de l'OMS (Annexe1) et aux normes marocaines (SEEE, 2007), car elles sont de type classe A (Annexe1 et annexe5 : analyses biologiques). Elles sont riches en éléments fertilisants et en matière organique.

Le mode de traitement « Sheaffer » est basé essentiellement sur l'aération de l'effluent brut durant une période qui dépend de la charge biologique des eaux usées. La durée théorique moyenne du traitement varie de 30 à 40 jours (Wahbi, 2007).

L'eau usée, une fois traitée est acheminée du bassin de traitement vers la station de tête qui assure la distribution de l'eau vers la parcelle.

L'eau de mer et l'eau usée sont combinées, et réglées de telle sorte à avoir les conductivités électriques souhaitées (3 dS/m et 6 dS/m). Le mélange a été réalisé en

utilisant des injecteurs avec un taux d'injection de 60 l/h pour le traitement de 3 dS/m et un taux d'injection de 240 l/h pour le traitement de 6 dS/m.

Tableau 9: Caractéristiques des eaux usées traitées utilisées (Analyses du laboratoire du CHA).

Paramètre	Concentration (mg/L)
NH ₄	64.80
NO ₃	99.20
P	15.00
K	08.19
Ca	66.80
Na	51.29
Cl	101.50
Mg	39.60
Matière total suspendue	55.46
Matière mineral suspendu	29.20
pH	7.77
EC (dS/m)	0.92
DBO5	21.00

1.1.1. Système d'irrigation

Afin d'économiser l'eau et d'éviter toute éventuelle contamination de la culture, les plantes sont irriguées au goutte à goutte.

Chaque ligne de plante est irriguée à partir d'une rampe portant des goutteurs espacés de 0,4 m et dont le débit est de 2 l/h. L'interligne est de 0,5 m.

Besoins en eau de la culture

Pour calculer les besoins en eau des cultures on fait intervenir tout le continuum sol-plante-atmosphère, pour le sol on prend l'humidité à la capacité au champ (Hcc) et l'humidité au point de flétrissement permanent (Hpfp) comme caractéristique propre au sol, pour le climat c'est l'évapotranspiration de référence ETo qui intervient dans la gestion d'irrigation, et pour la plante on prend en considération le coefficient cultural (Kc) et la profondeur racinaire.

- Calcul de la dose nette maximale (DNM) :

$$DNM = f \times (H_{cc} - H_{pfp}) \times Z \times \% SH, \text{ (Elattir, 2005)}$$

f: réduction tolérable du réserve utile = 10 %

Hcc : humidité à la capacité au champ = 30 %

Hfp: humidité au point de flétrissement permanent = 15 %

Z: profondeur racinaire = 25 cm

% SH: pourcentage de la zone humectée = 30 %

Alors DNM = 1,125 mm

- Calcul de la pluviométrie horaire

C'est la quantité d'eau écoulée par les goutteurs par unité de surface et par unité du temps, elle est exprimée en mm/hr. Les calculs sont faites par rapport au traitement témoin T1 (non stressé), alors dans notre cas où la distance entre goutteurs est de 0,4 m, le débit nominal est de 2 l/h et la distance entre lignes est de 0,5 m, alors on a 6 goutteurs/m², donc la pluviométrie horaire est égale à : $PH = 2 \times 6/1 = 12 \text{ mm/hr}$.

- Calcul de la durée d'irrigation nécessaire pour donner une DNM

$$Tirri = PH / DNM = 12/1,125 = 10,66 \text{ min}$$

Alors pour satisfaire la réduction tolérable en réserve utile et ramener le niveau d'humidité à la capacité au champ il faut 10 min d'arrosage.

- Calcul du besoin net en irrigation

$$NIR = ET_m / Eff = ETo \times Kc / Eff$$

Le coefficient Kc sert une agrégation des différences physiques et physiologiques entre les cultures (Allen *et al.*, 2000), l'ETo représente l'approche climatique, ce paramètre est fournie par la station météorologique IAV-CHA, il est calculé par la méthode de Penman qui a été le premier effort de combiner les deux composantes de l'énergie et du transport de la vapeur atmosphérique pour estimer ETo (Zhao *et al.*, 2009), Eff est l'efficacité de système d'irrigation, il est égale à 0,85 pour l'irrigation par goutte-à-goutte.

Dans notre calculs on prend l'ETo d'hier pour irriguer aujourd'hui, par exemple si l'ETo d'hier est égale à 4 mm et $K_c = 0,95$, alors pour irriguer aujourd'hui il faut donner $NIR = ET_m / E_{ff} = 4 \times 0,95 / 0,85 = 4,47$ mm

- Calcul de la fréquence d'irrigation

Pour que l'irrigation soit efficace on doit apporter l'eau fréquemment pour éviter les problèmes d'évaporation et de percolation. La fréquence d'irrigation est l'un des facteurs les plus importants dans la gestion d'irrigation goutte à goutte. En raison des différences dans l'humidité du sol, les rendements des cultures peuvent être différentes lorsque la même quantité d'eau est appliquée sous de fréquences différentes d'irrigation (Wang et *al.*, 2005)

$$F = NIR / DNM$$

$F = 4,47 / 1,125 = 3,97$, donc on doit irriguer 3 fois, 10 min pour chaque fois et le reste (0,97) on va l'apporter demain en l'ajoutant à l'apport d'irrigation, et ainsi de suite pour les jours qui suivent.

Paramètres suivis

Paramètres agronomiques

Des mesures destructives sont faites à la fin de chaque stade (stade végétatif, floraison, maturation et récolte) tout au long du cycle de développement de la plante. Ces mesures destructives permettent de déduire les paramètres agronomiques, ainsi que les analyses des éléments minéraux au niveau foliaire.

- Croissance en longueur de la plante

Des mesures de la hauteur de la tige principale ont été réalisées sur 5 plants par plot chaque quinzaine de jours, ces plants ayant été marqués au préalable à l'aide de piquets en plastic sur lesquels sont inscrits la variété, le plot et le traitement administré.

- Poids frais, le poids secs des plantes et surface foliaire

Chaque plante arrachée est étiquetée avec son sol et acheminé au laboratoire pour la séparation des différents organes (racines, tiges, feuilles et fleurs ou fruits), puis la mesure de la surface foliaire se fait à l'aide de l'appareil « Leaf measurement system »,

pour déterminer ensuite le poids frais et sec des organes après passage à l'étuve à une température de 60°C pendant 36 à 48h.

- Analyses foliaires

Les feuilles séchées sont broyées en poudre fine à l'aide d'un broyeur électrique au laboratoire des sciences du sol du Complexe Horticole d'Agadir. A partir de cette poudre, sont déterminées les teneurs en sodium, potassium, chlore, phosphore et azote totale.

- Rendement

Sur chaque plot, une placette de 1 m² avait été posée. Les observations ont porté sur le comptage du nombre de pieds/m². Au laboratoire, les mesures portent sur le poids des épis de chaque pied ainsi que l'estimation de la densité.

Paramètres pédologiques

Les paramètres pédologiques sont pris à l'état initial (témoin), puis à chaque fin de stade, après chaque arrachage, le sol est prélevé au niveau de la profondeur de la racine pour voir l'évolution de ses paramètres (pH, EC, humidité, teneur en nitrate, phosphore, potassium, sodium, et chlore).

L'extraction de la solution du sol est effectuée à l'aide des lysimètres d'aspiration (suction cup lysimeter) qui est un dispositif cylindrique comprenant une coupe de céramique poreuse; un tube qui constitue un réservoir ; et un assemblage simple bouchon avec un seul trou. Trois prélèvements sont effectués au début pour stade végétatif, puis au stade floraison et en fin du cycle vers la maturité des graines.

Analyses statistiques

L'analyse statistique est faite à l'aide du logiciel «MINITAB v 13.31», en adoptant une analyse de la variance ANOVA, model linéaire généralisé à deux facteurs traitements et variétés.

Résultats et discussion

Paramètres de croissance des plantes

Hauteur de la tige principale

Les figures 5, 6 et 7 montrent une croissance accélérée des plantes du 06/09/2010 au 04/10/2010, cette période correspond au stade végétatif. A partir du 04/10/2010, la croissance commence à se ralentir pour se stabiliser vers le 11/10/2010, phase qui coïncide avec le début du stade de maturation.

L'analyse statistique a montré une différence significative entre les traitements à partir de la floraison. Par conséquent, lorsque le niveau de salinité augmente de 0,92 dS/m (contrôle) à 3 et 6 dS/m, la hauteur de la plante a été réduite. La comparaison entre les hauteurs de plantes de variétés différentes a montré une réduction de croissance, en termes de hauteur, d'environ 5 % à 10,4 % pour A211, 9,3 % à 25 % pour les A0057 et 4 à 9 % pour A0020 respectivement pour les traitements CE3 et CE6 par rapport au contrôle. En fait, A0057 a été la variété la plus sensible en réponse au stress de la salinité. Ce schéma expliqué par le ralentissement de la croissance des plantes se manifeste par des entrenœuds courts, une diminution de croissance et, par conséquent, une diminution de la longueur totale de la plante. Le sel entraîne une diminution de la turgescence, qui provoque le retard de la croissance (Hsiao, 1973).

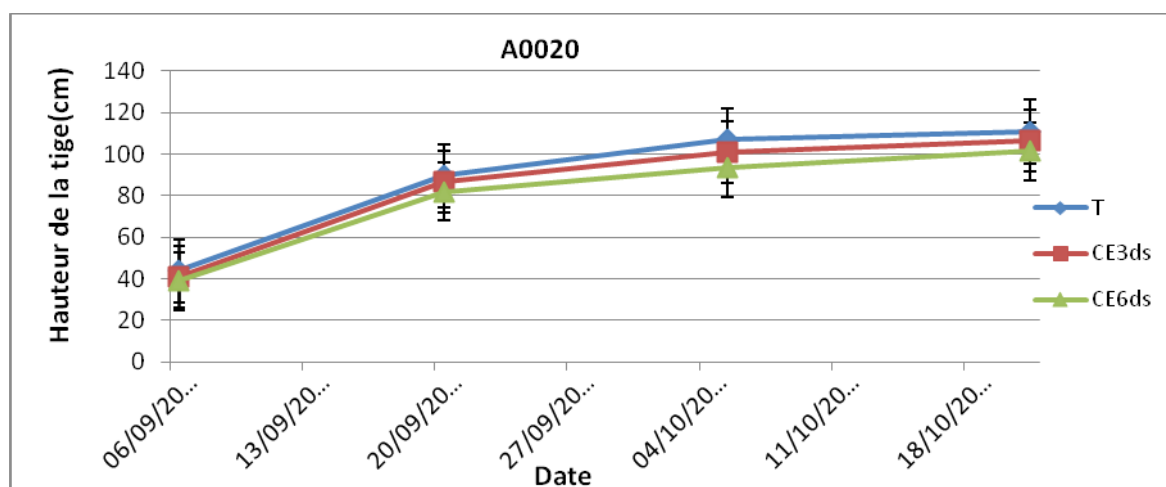


Figure 5: Evolution de la hauteur de la tige principale de la variété A0020.

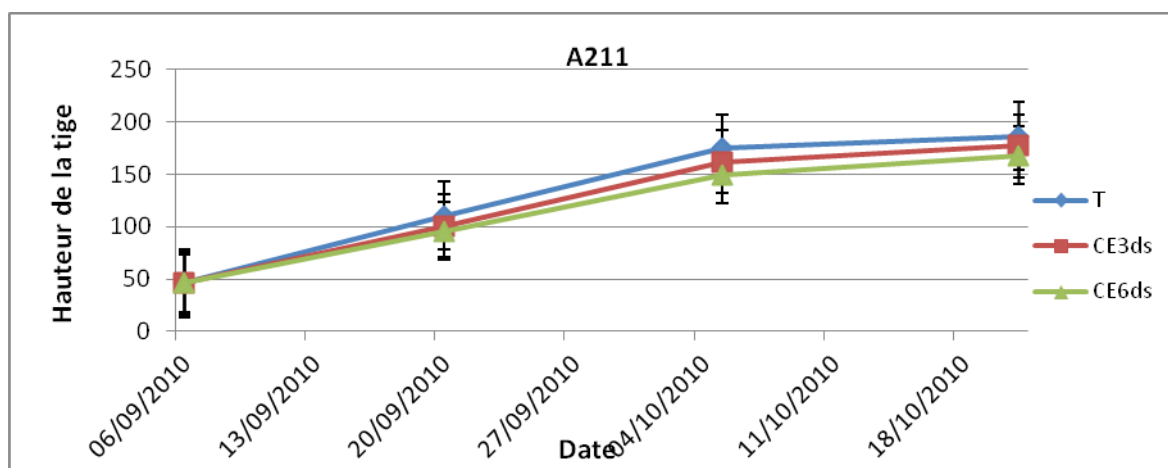


Figure 6: Evolution de la hauteur de la tige principale de la variété A211.

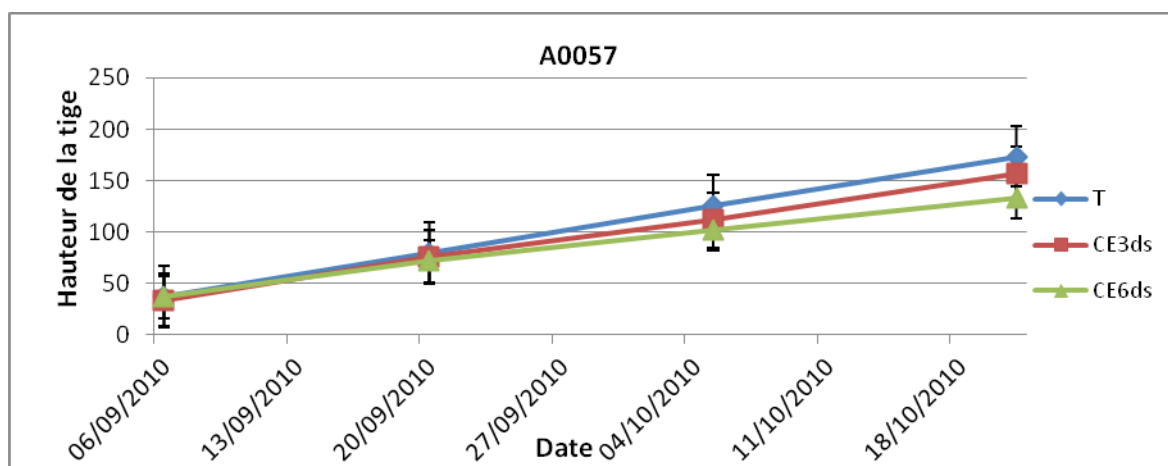


Figure 7: Evolution de la hauteur de la tige principale de la variété A0057.

Surface foliaire

La surface foliaire est un paramètre important pour caractériser la croissance de la plante. Les figures 8,9 et 10 montrent l'évolution de la surface foliaire chez les trois variétés d'Amarante.

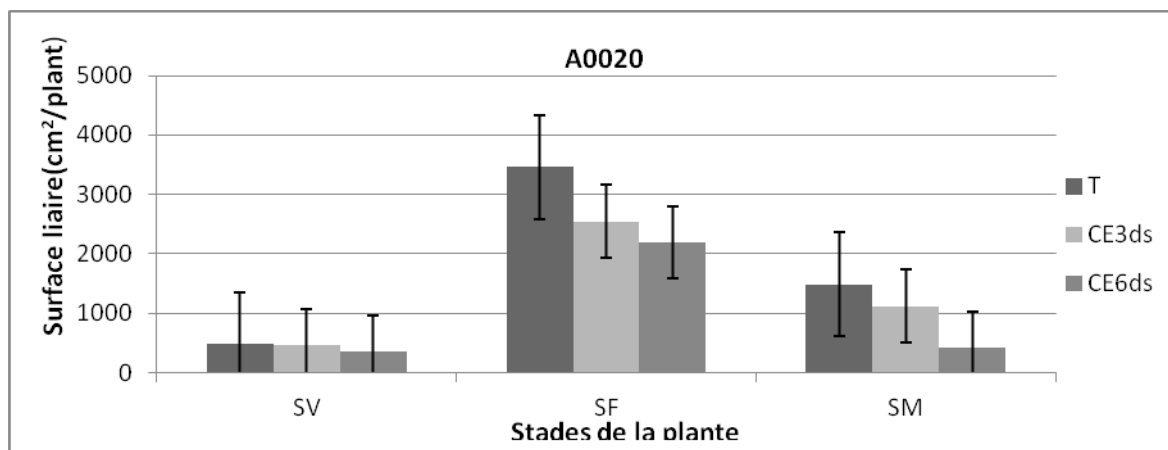


Figure 8: Evolution de la surface foliaire (A0020).

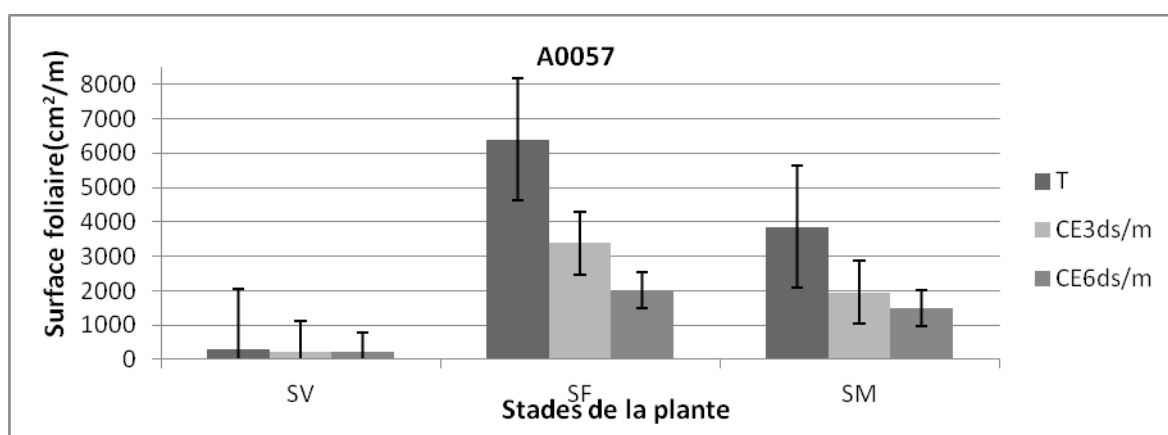


Figure 9: Evolution de la surface foliaire (A0057).

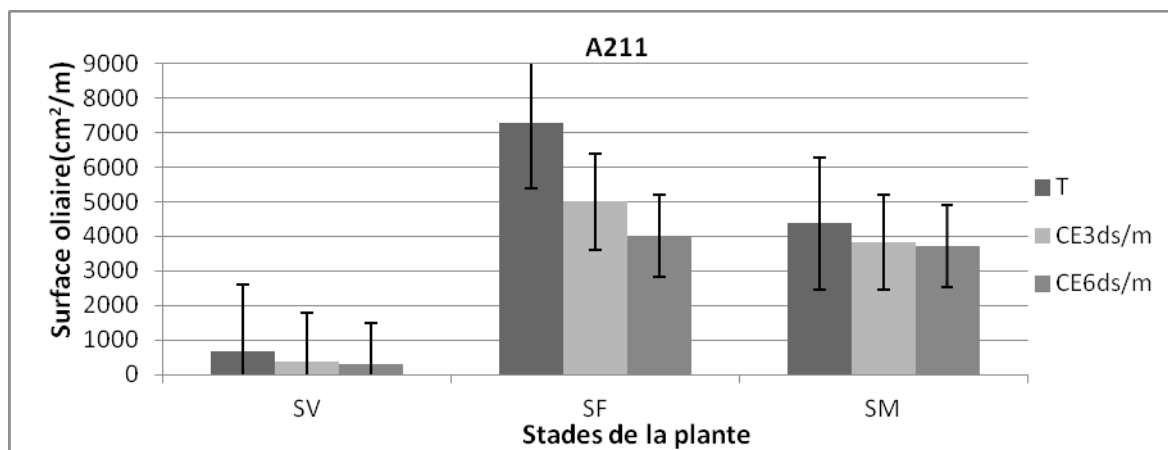


Figure 10: Evolution de la surface foliaire (A211).

D'après les courbes d'évolution de la surface foliaire au cours du cycle de la culture, on remarque qu'elle augmente progressivement du stade végétatif pour atteindre un maximum de : 3456,6 cm² pour le témoin, 2548,7cm² pour CE3 et 2194,3 cm²/plante pour CE6 concernant la variété A0020 ; 7293,3 cm² pour T, 4998,6 cm² pour CE3 et 3998,9 cm²

pour CE6 à propos de la variété A211 et pour la variété A0057, elle atteint 6395,9 cm² pour T, 3388,4 cm² pour CE3 et 2024,4 cm²/plante pour CE6 au stade floraison puis elle chute progressivement vers la fin du stade maturation à cause de l'élimination des feuilles basales et du vieillissement de la plante.

Pour ce paramètre l'analyse statistique a révélé une différence significative entre les différents traitements. En effet, une réduction de 24,5 % à 37,4 % pour A0020, 12,5 % à 15,2 % pour A211 et 49,3 % à 61 % pour les A0057 par rapport au contrôle, respectivement pour les traitements CE3 et CE6. Cela montre que la surface foliaire est affectée négativement quand il y a augmentation de la conductivité électrique de l'eau d'irrigation (Fig. 8, 9 et 10). Selon Baba (1985), une dose de NaCl 150 mM réduisent la surface foliaire, aussi bien dans une variété sensible que dans une variété tolérante. Ainsi, la surface foliaire diminue lorsque le niveau de salinité augmente.

La réduction de la surface foliaire, selon Omami (2005) implique que la surface disponible pour la respiration et la production d'assimilats seront réduits ce qui en conséquence réduit la croissance de la plante.

Biomasse

Poids frais

Racine

Les figures 11, 12 et 13 montrent une augmentation progressive du poids frais de la racine durant le cycle. Cette augmentation diminue avec l'augmentation de la conductivité électrique de l'eau d'irrigation chez toutes les variétés. L'analyse statistique révèle un effet significatif de la salinité sur le poids frais de la racine.

Au niveau d'une conductivité de l'eau d'irrigation de 3ds/m et 6ds/m, une diminution respective du poids de la racine de 12,5% et 43,2% par rapport au témoin (A211), de 3,5% et 60,7% chez la variété A0020 et chez la variété A0057, la diminution est de 39,2% et 43,5%. L'augmentation de la conductivité électrique touche plus le poids frais de la racine de la variété A0020, les variétés A211 et A0057 sont moins touchées à la fin du cycle. Les figures 11,12 et 13 indiquent l'évolution du poids frais de la racine chez les trois

variétés.

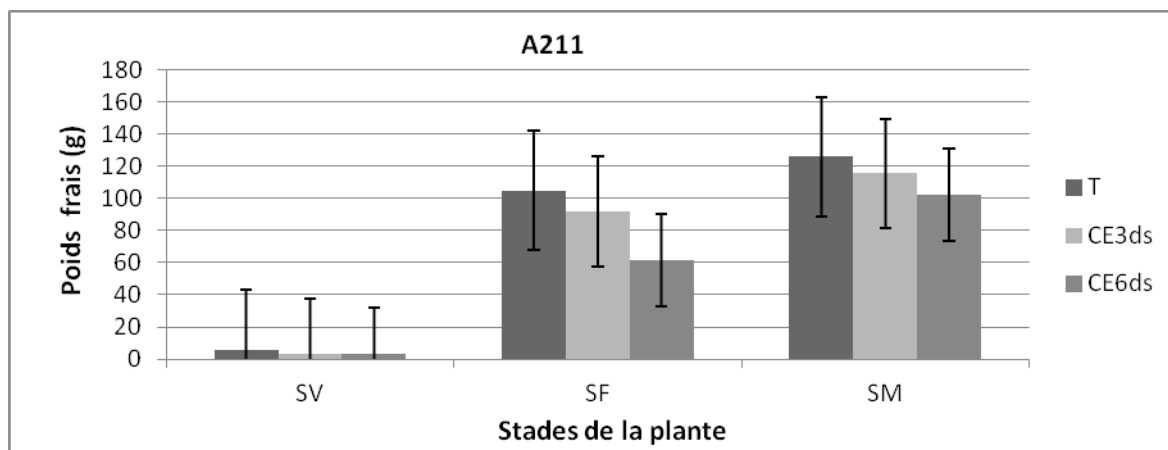


Figure 11: Evolution poids frais de la racine (A211).

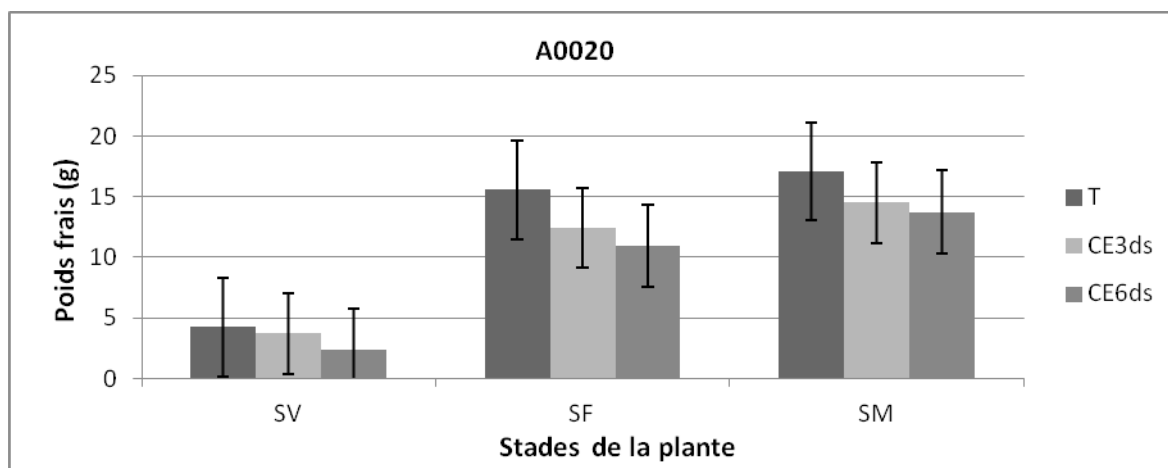


Figure 12: Evolution du poids frais de la racine(A0020).

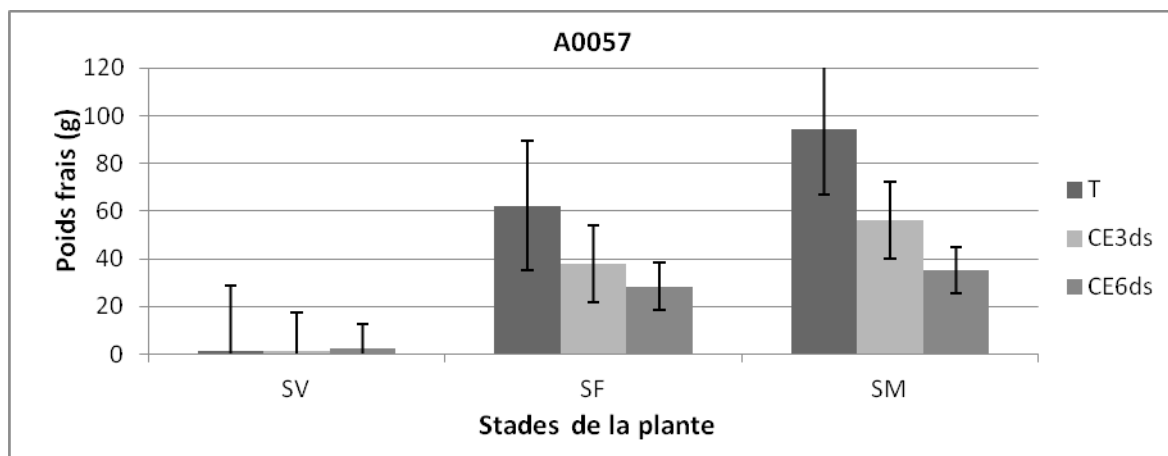


Figure 13: Evolution du poids frais de la racine(A0057).

Feuille

Les résultats relatifs à l'effet de salinité sur le poids frais des feuilles sont illustrés dans les figures ci-dessous :

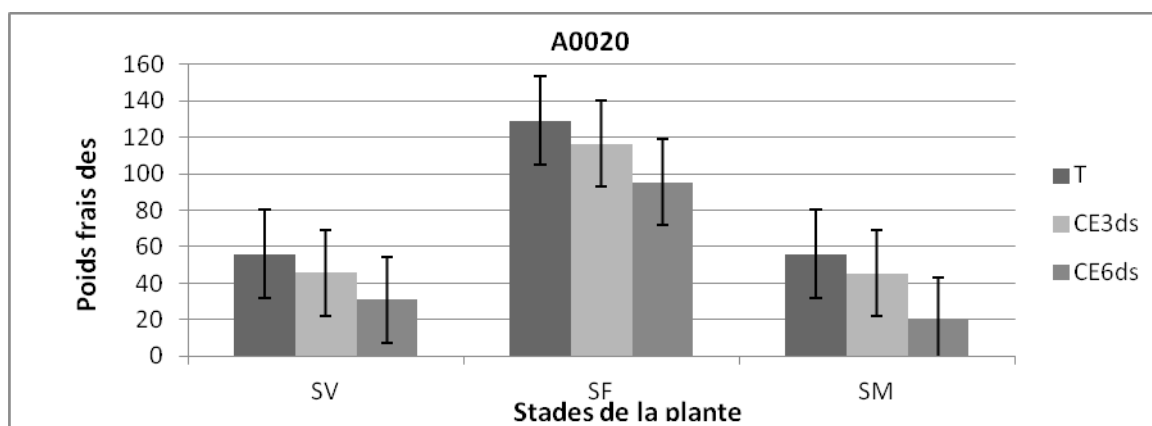


Figure 14: Evolution du poids frais des feuilles (A0020).

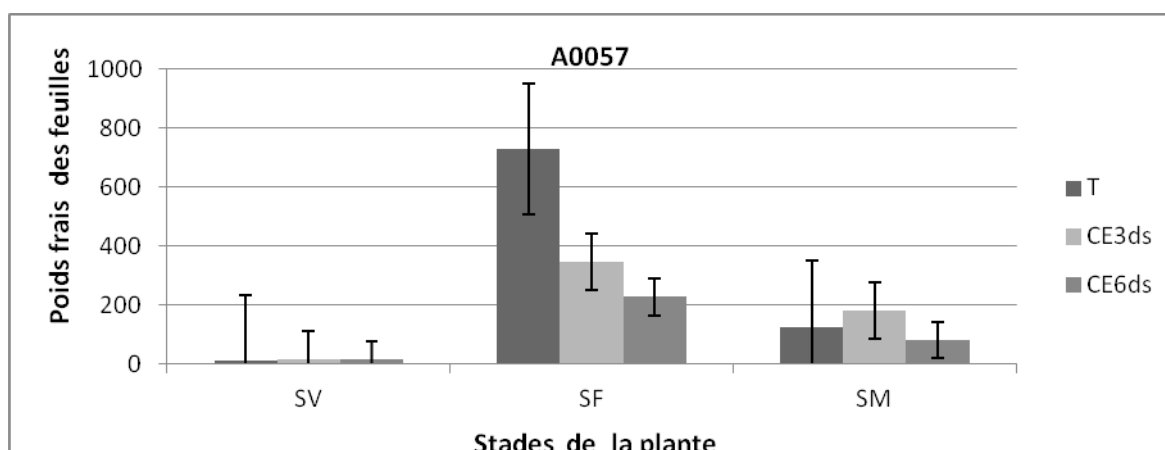


Figure 15: Evolution du poids frais des feuilles (A0057).

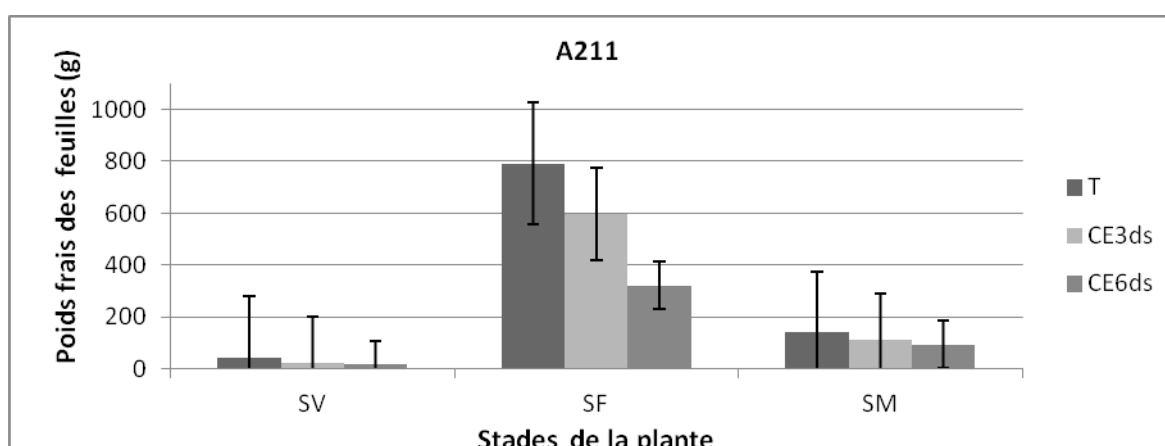


Figure 16: Evolution du poids frais des feuilles (A211).

Le poids des feuilles diminue avec l'augmentation des CE (figures 14, 15 et 16), de 18,8% à 64,8% pour la variété A0020, de 28,6% à 35,4% pour la variété A0057 et de 21,4% à 32,8% pour la variété A211 respectivement pour les CE3 à CE6 par rapport au témoin (0,92 ds/m). Le poids frais des feuilles de la variété A0020 est plus influencé par l'élévation de la CE (Fig. 14, 15 et 16). L'analyse statistique montre une différence hautement significative entre les poids frais des différents traitements. D'après le test de Tukey, ces variétés se subdivisent en deux groupes homogènes: un groupe a comprenant les variétés A0020 et A0057 et un groupe b avec les variétés A0057 et A211.

L'augmentation importante du poids frais du stade végétatif au stade floraison est expliquée essentiellement par la disponibilité de l'eau et d'azote. La teneur en eau des feuilles diminue et donc le poids frais des feuilles diminue ceci est dû à l'entrée en sénescence de la plante pendant le stade final.

L'augmentation est progressive pour tous les traitements chez les trois variétés. L'analyse statistique montre une différence hautement significative entre le poids frais de la tige par rapport aux différents traitements. D'après le test de Tukey, ces variétés se subdivisent en deux groupes homogènes: groupe a (A0020) et groupe b (A0057 et A211).

L'augmentation de la CE de l'eau d'irrigation entraîne une diminution du poids frais de la tige de (25,1% à 74%) variété A0020, (34,3% à 37,1%) variété A0057, (20,6% à 38%) variété A211 pour CE3 et CE6 par rapport au témoin (0,92 dS/m). Le poids frais de la tige de la variété A0020 est plus affecté par l'augmentation de la CE (Fig. 17,18 et 19).

Les figures ci-dessous indiquent l'évolution du poids frais de la tige chez les trois variétés.

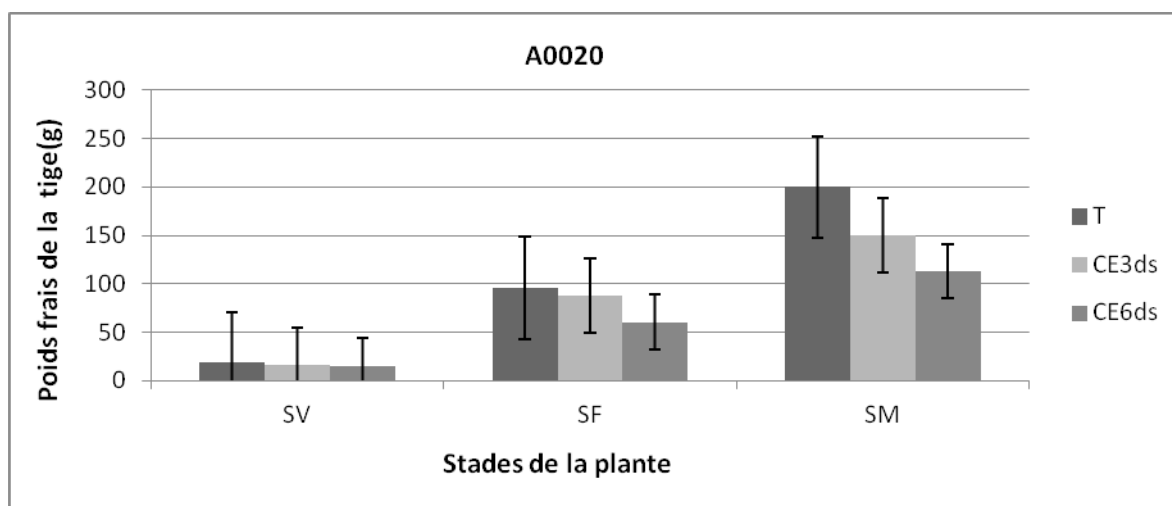


Figure 17: Evolution du poids frais de la tige (A0020).

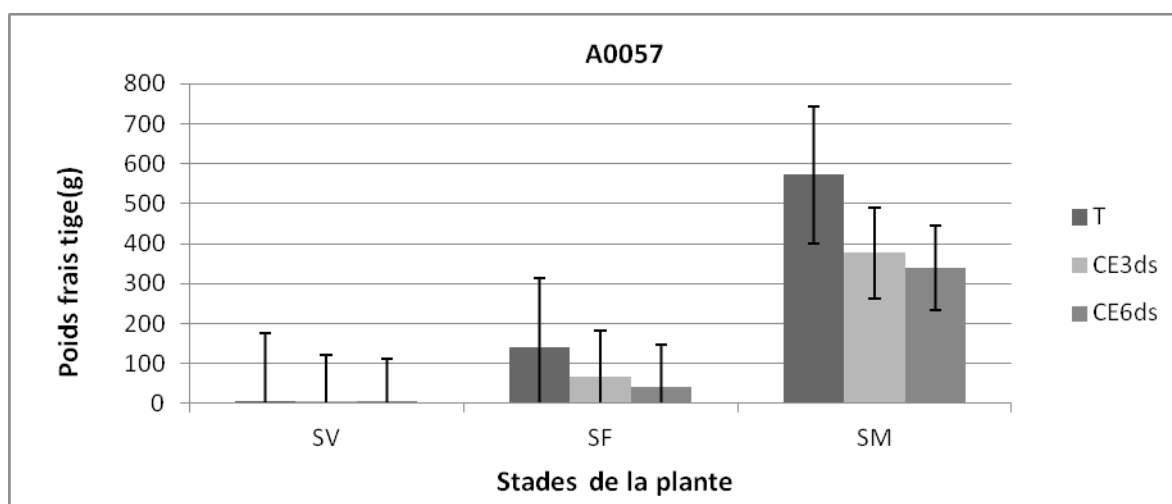


Figure 18: Evolution du poids frais de la tige(A0057).

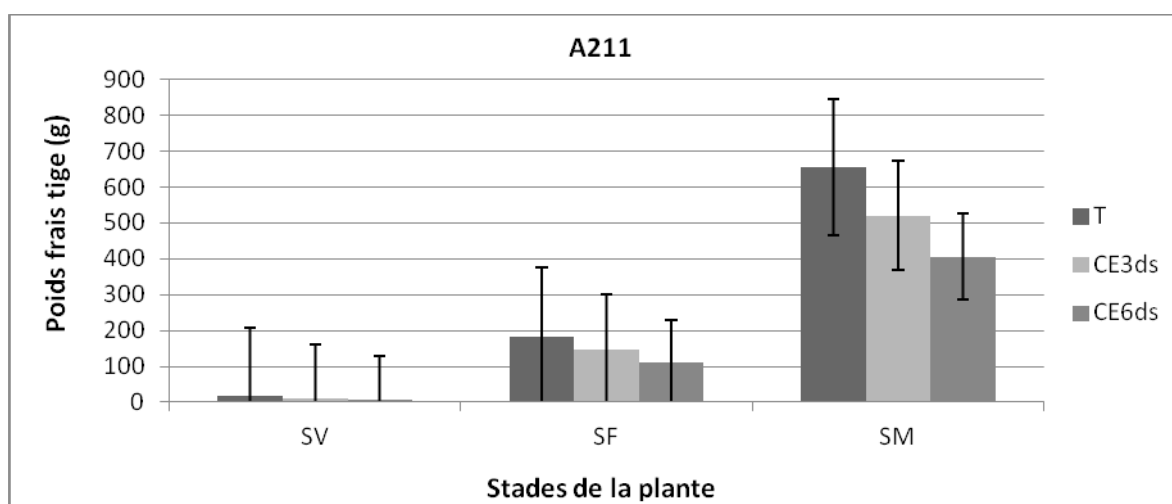


Figure 19: Evolution du poids frais de la tige (A211).

Inflorescence :

L'augmentation de la CE de l'eau d'irrigation entraîne une diminution du poids frais de la tige de (24,4% à 75,1%) variété A0020, (47,8% à 56,2%) variété A0057, (41,8% à 50,8 %) variété A211 pour CE3 et CE6 par rapport au témoin. Le poids frais de l'inflorescence baisse avec l'augmentation de la CE.

L'analyse statistique indique une différence significative entre les poids frais de l'inflorescence. La moyenne des poids frais sont de 120,9 g, 110,3 g et 26,3 g respectivement pour les variétés A0020, A211 et A0057. D'après le test de Tukey, ces variétés sont subdivisées en groupes homogènes groupe a (A0057, A0020) et un groupe b (A0020, A211).

Poids sec

Racine :

Le poids sec de la racine a eu une augmentation importante durant la première phase de croissance pour tous les traitements mais le témoin présente une augmentation plus importante (Fig. 20, 21 et 22).

L'analyse statistique montre une différence hautement significative entre le poids sec des racines par rapport aux différents traitements. En effet, une réduction de 14,3% à 39,8% pour la variété A0020, de 35,3% à 40,4% chez la variété A211 et de 12,2% à 40,6% concernant la variété A0057 a été observée. La variété A0020 et A211 étant les plus touchées par l'augmentation de la CE.

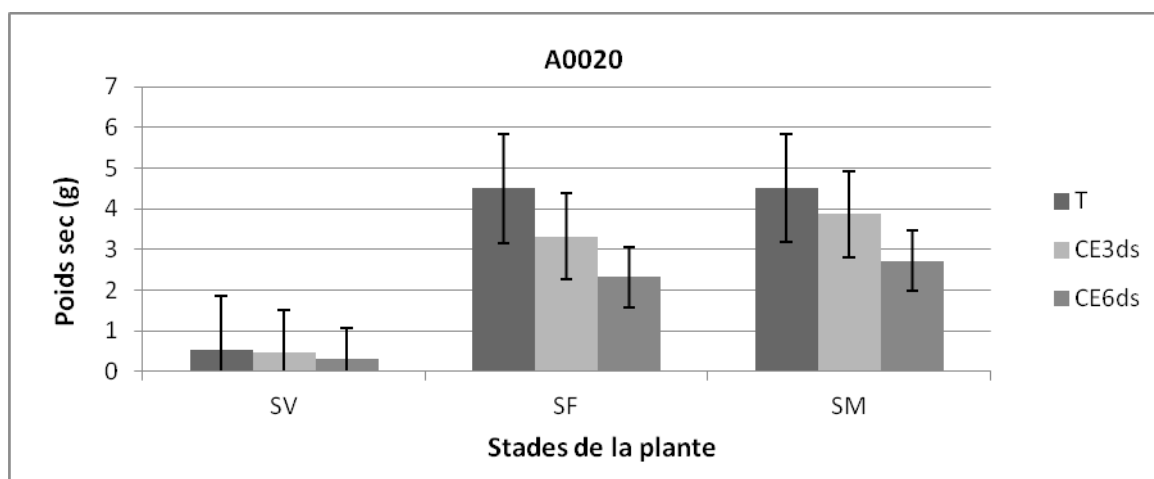


Figure 20: Evolution du poids sec de la racine (A0020).

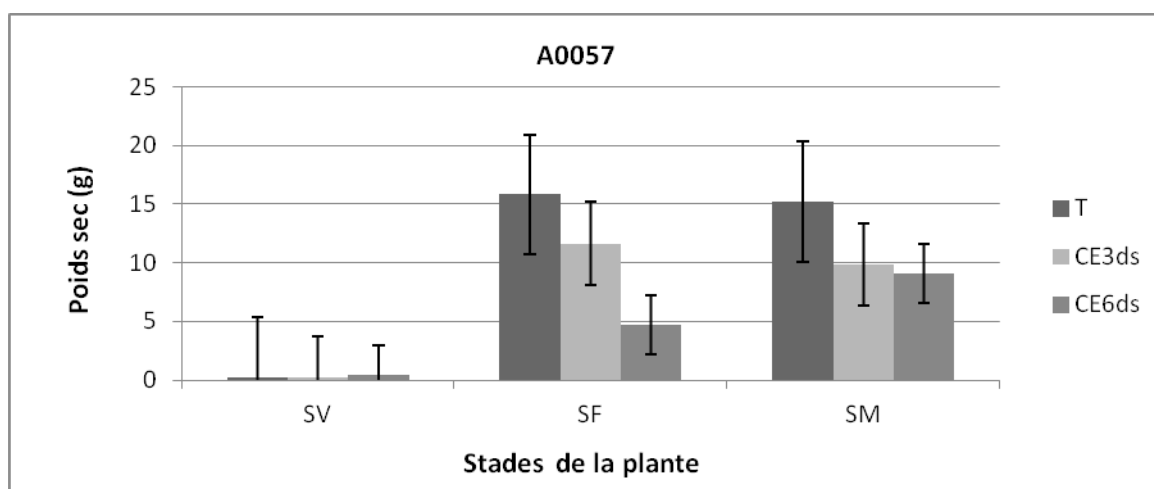


Figure 21: Evolution du poids sec de la racine (A0057).

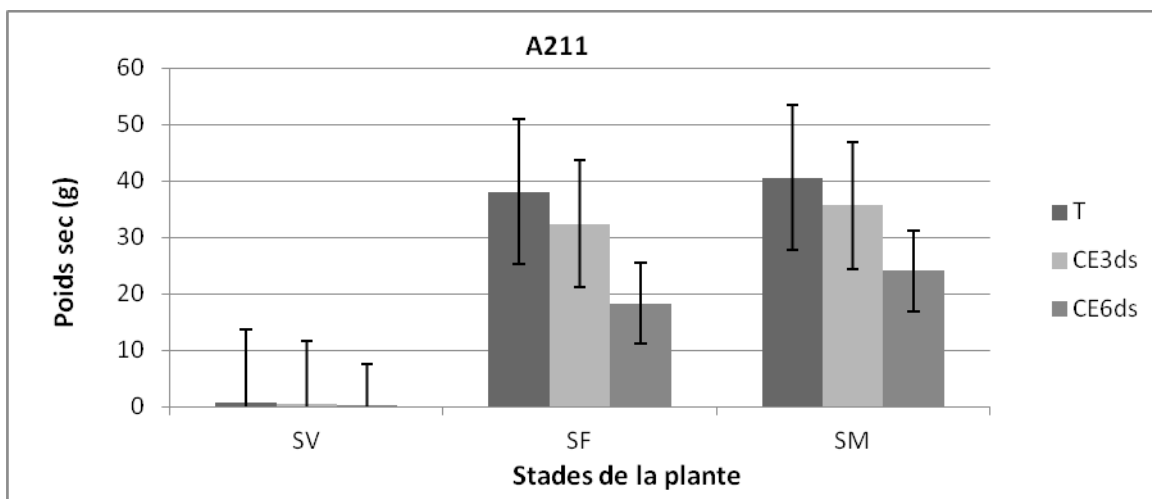


Figure 22: Evolution du poids sec de la racine (A211).

Feuille :

Les figures suivantes illustrent l'évolution du poids sec de la tige.

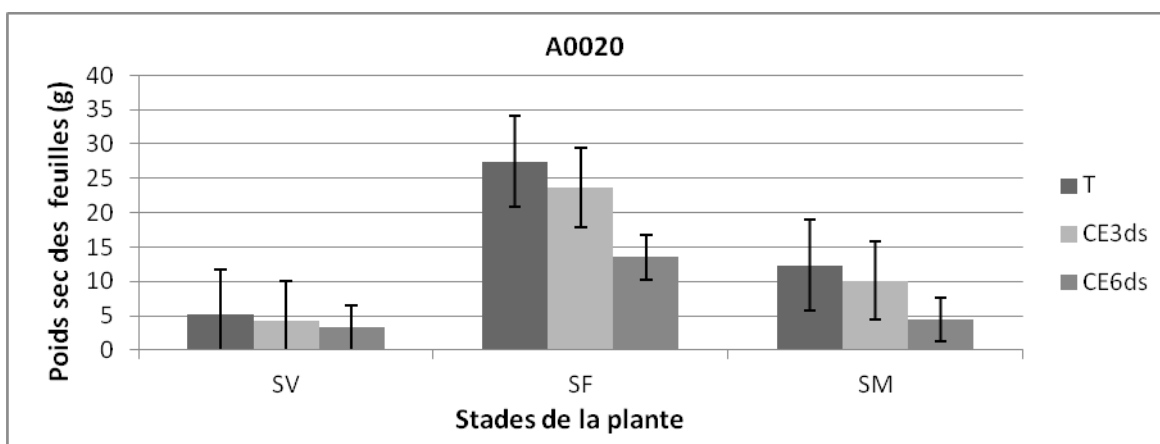


Figure 23: Evolution du poids sec des feuilles (A0020).

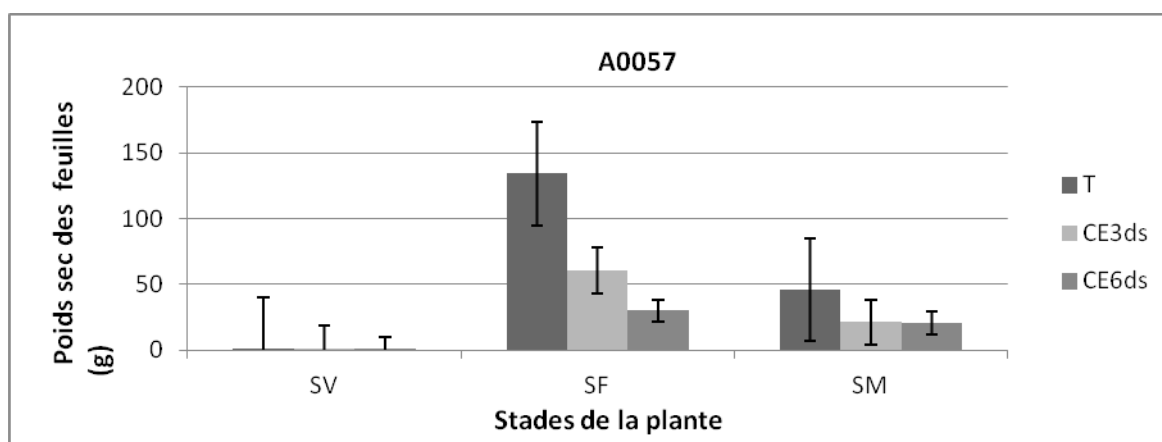


Figure 24: Evolution du poids sec des feuilles(A0057).

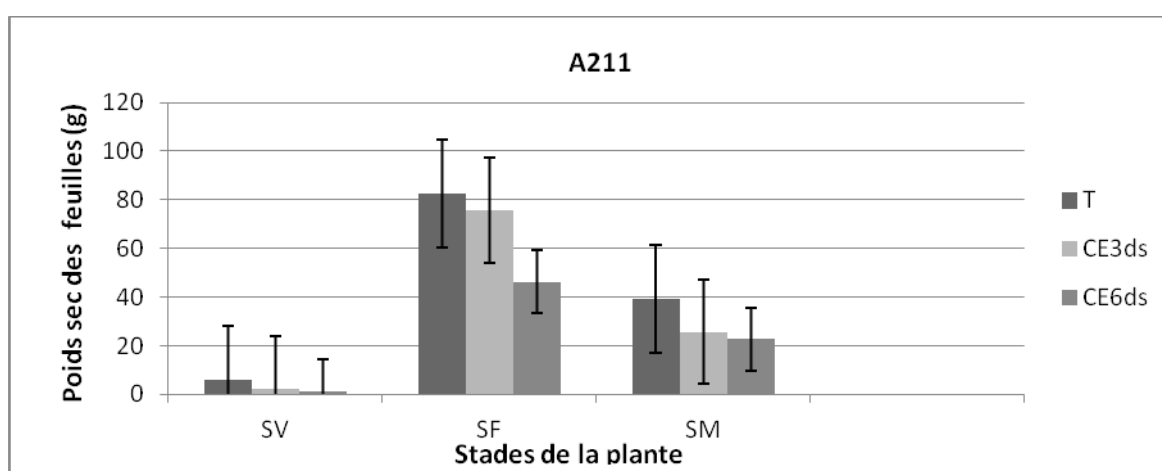


Figure 25: Evolution du poids sec des feuilles(A211).

Les valeurs faibles du poids sec enregistrés chez les traitements les plus salins durant tout le cycle peuvent être expliquées par le fait que le sel réduit les indices stomatiques sur les surfaces épidermiques des feuilles, les volumes cellulaires, le taux relatif d'expansion foliaire, les poids frais et secs des feuilles (Bray et Reid, 2002).

L'analyse statistique montre une différence significative entre le poids sec des feuilles des différents traitements. Une réduction de 18% à 31,4% pour la variété A0020, de 34,3% et 42% chez la variété A211, 54% à 55% pour la variété A0057, respectivement pour les traitements 3ds et 6ds par rapport au témoin. Les variétés A0020 et A211 étant les plus touchées par l'augmentation de la CE. (Fig. 23, 24 et 25).

Tige :

Le poids sec de la tige augmente avec le temps pour atteindre sa valeur maximale vers la fin du cycle de la culture. Cette augmentation est affectée par l'augmentation de la

conductivité électrique de l'eau d'irrigation (Fig. 26, 27 et 28). L'analyse statistique révèle une différence significative entre le poids sec des différents traitements. En effet une réduction du poids sec de la tige de 19,3% à 49,9% concernant la variété A0020, de 29,9% à 34,9% chez la variété A211 et de 15% à 23% à propos de la variété A0057, respectivement pour les traitements 3ds et 6ds par rapport au traitement témoin. La variété A0020 étant la plus touchée par l'augmentation de la CE.

Les figures ci-dessous montrent l'évolution du poids sec de la tige.

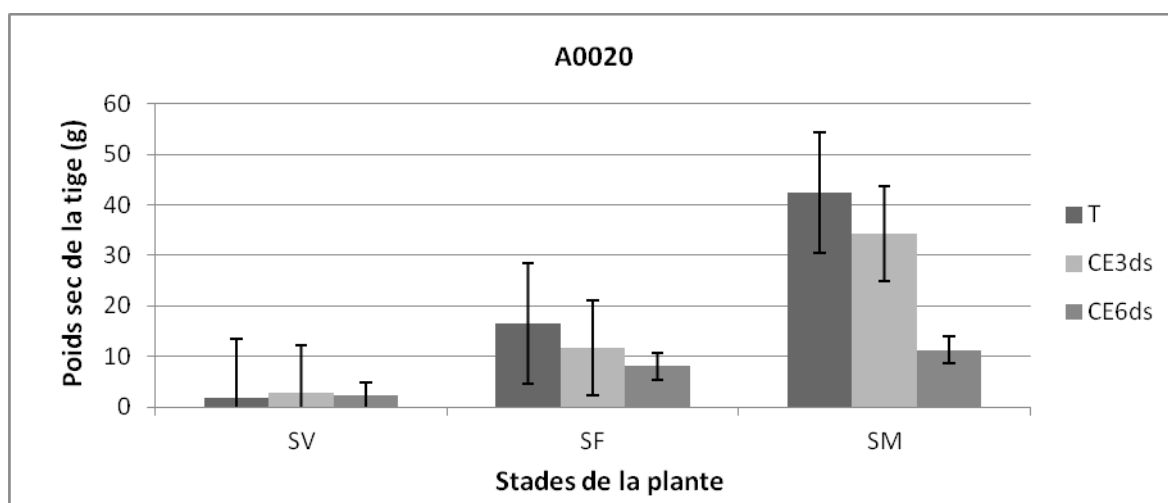


Figure 26: Evolution du poids sec de la tige(A0020).

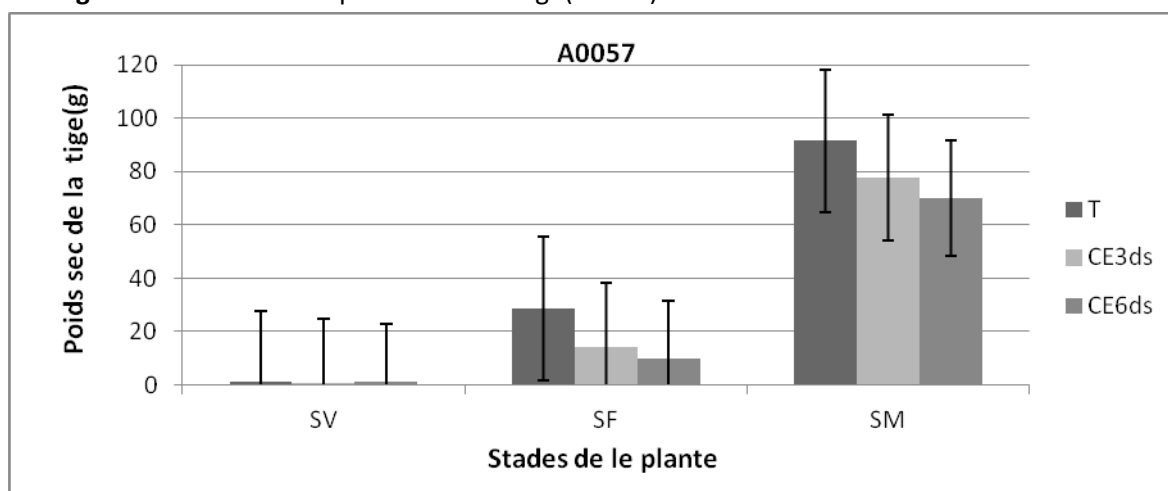


Figure 27: Evolution du poids sec de la tige (A0057).

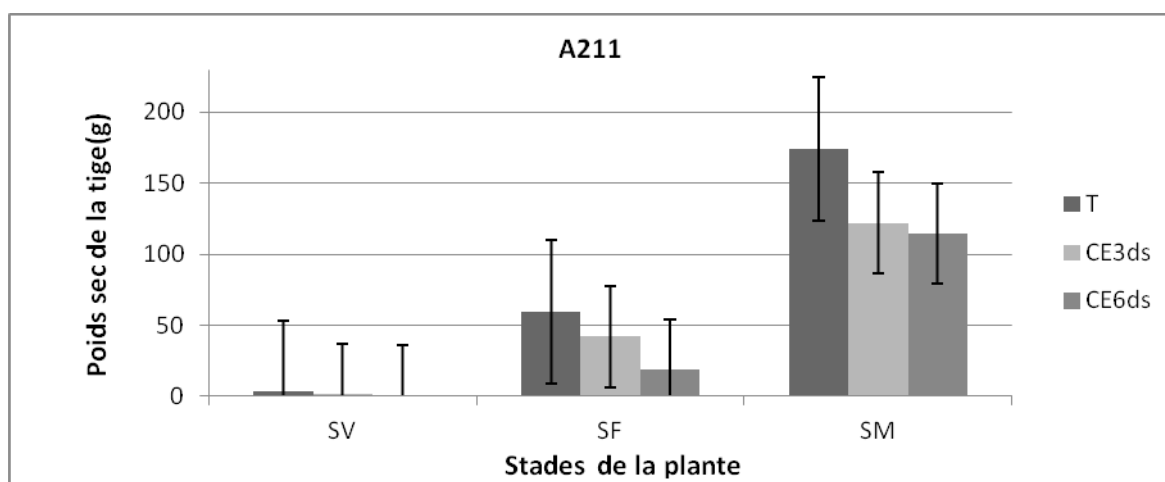


Figure 28: Evolution du poids sec de la tige (A211).

Inflorescence :

Le poids sec de l'inflorescence diminue avec l'augmentation de la conductivité électrique.

L'analyse statistique montre une différence hautement significative entre le poids sec de l'inflorescence suivant les différents traitements. Une réduction de 21,9% à 44,8% chez la variété A0020, de 42,6% à 49,8% a propos de la variété A211, de 10% à 29,6% concernant la variété A0057, respectivement pour les traitements CE3 et CE6, par rapport au témoin. Les variétés A0020 et A211 sont les plus touchées.

Paramètres édaphiques

Teneur en sodium dans le sol

Les figurent suivants illustrent la teneur en sodium du sol.

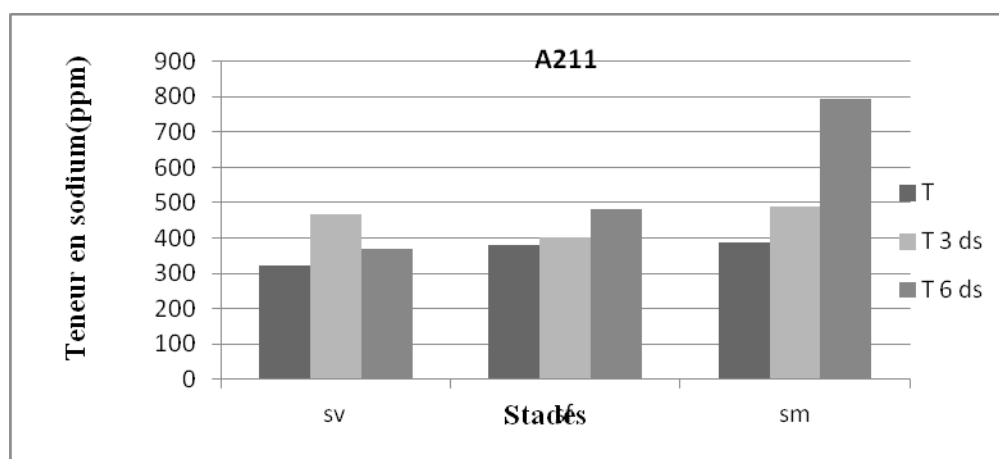


Figure 29: Teneur en sodium au niveau du sol (A211).

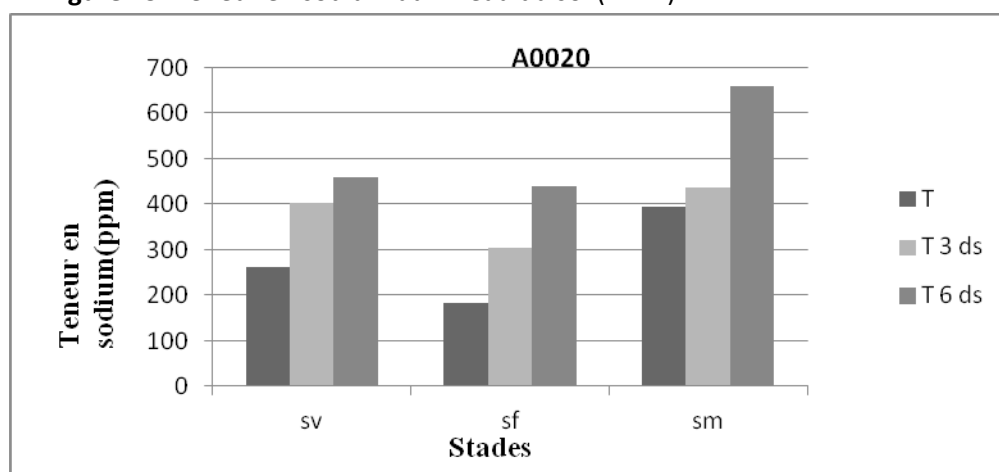


Figure 30: Teneur en sodium au niveau du sol (A0020).

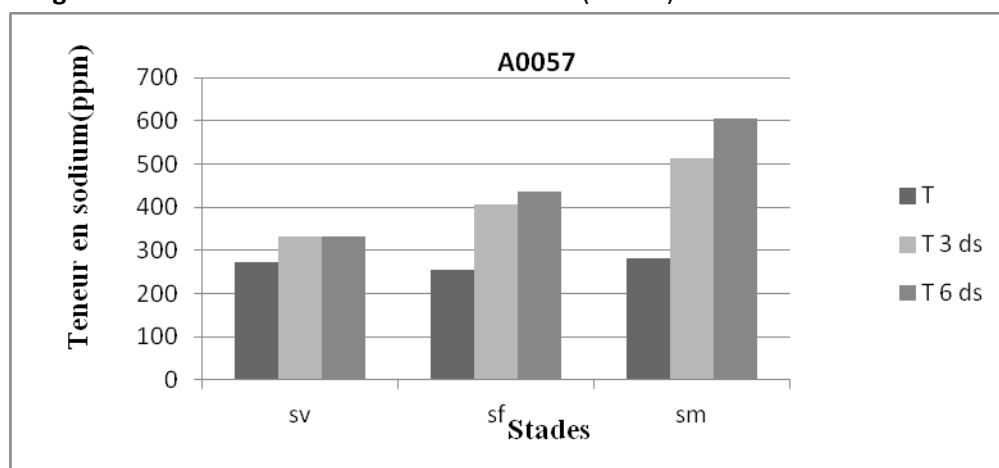


Figure 31: Teneur en sodium au niveau du sol (A0057).

D'après les figures 29, 30 et 31, une augmentation très progressive du sodium le long du cycle est remarquée. Cette accumulation du sodium augmente avec l'augmentation de la conductivité de l'eau de l'irrigation. L'analyse statistique indique une différence hautement significative entre les traitements. Le témoin a accumulé moins de sodium. On

note les concentrations de 387,7 ppm, 488,6 ppm et 799,4 ppm concernant la variété A211, de 394,1 ppm, 435 ppm et 658,8 ppm chez la variété A0020 et de 200,5 ppm, 513,8 ppm et 605,3 ppm à propos de la variété A0057 respectivement pour le témoin, le traitement CE3 et le traitement CE6.

Teneur en chlore dans le sol

La mesure de la concentration du chlore dans le sol sous l'irrigation saline est d'une importance particulière, elle permet l'évaluation du niveau de la salinité. Les figures 32, 33 et 34 montrent l'évolution de la concentration du chlore en méq/l durant le cycle de culture.

La concentration du chlore augmente considérablement le long du cycle, cette augmentation est due à son accumulation dans le sol. Ceci s'explique surtout par le type d'eaux utilisées en irrigation (eaux usées+eau de mer) qui sont riches en chlore. L'analyse statistique indique une différence hautement significative entre les concentrations de chlore des différents traitements.

L'accumulation progresse avec l'augmentation de la conductivité électrique de l'eau d'irrigation. En effet le traitement CE6 indique les concentrations les plus élevées : 15 méq/l, 16,7 méq/l et 17 méq/l, suivie du traitement CE3 : 13,75 méq/l, 13 méq/l et 13,75 méq/l, le témoin indique moins d'accumulation : 11,75 méq/l, 11,5 méq/l et 11,5 méq/l respectivement pour les variétés A0020, A0057 et A211.

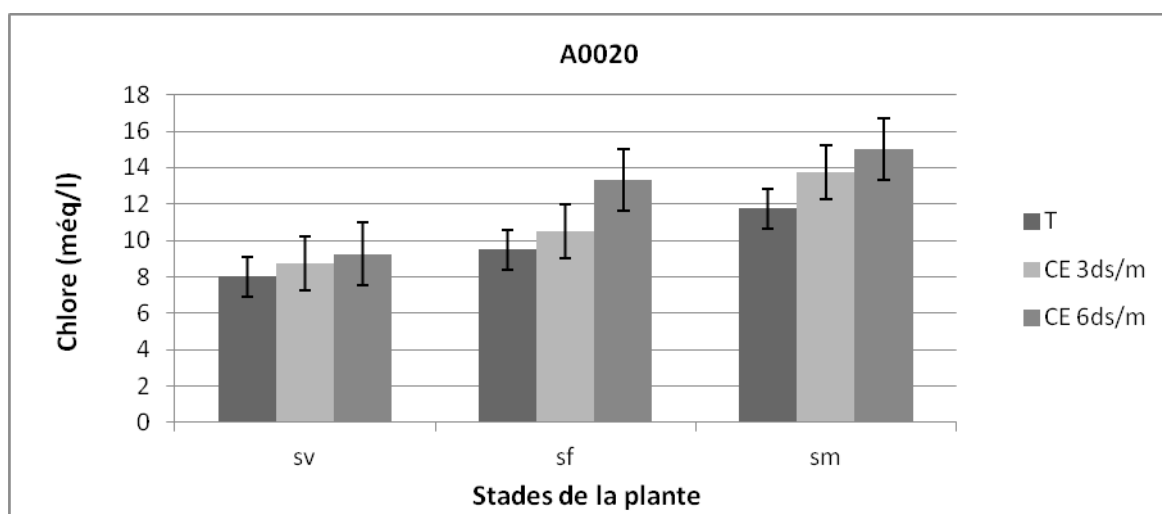


Figure 32: Teneur en chlore du sol (A0020).

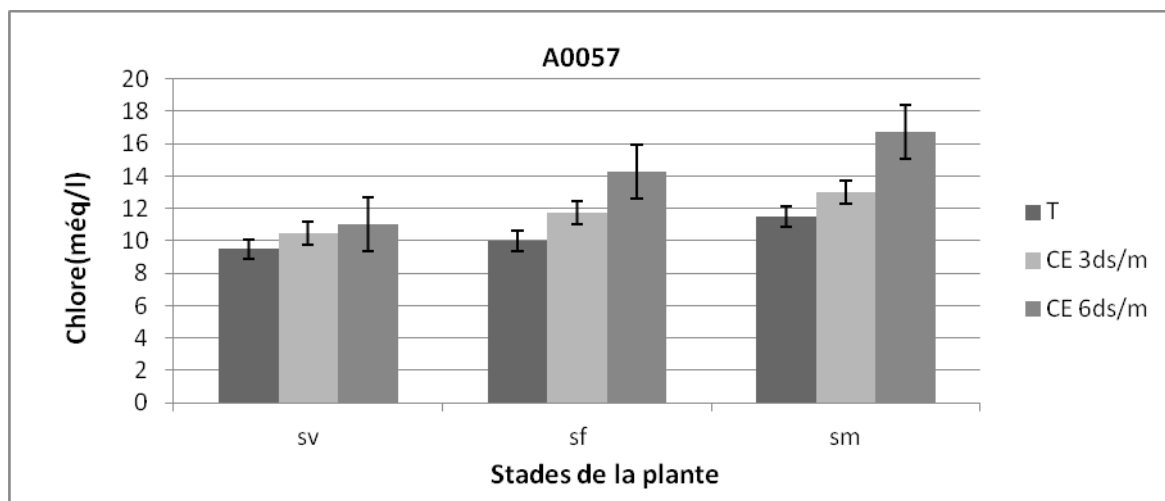


Figure 33: Teneur en chlore du sol (A0057).

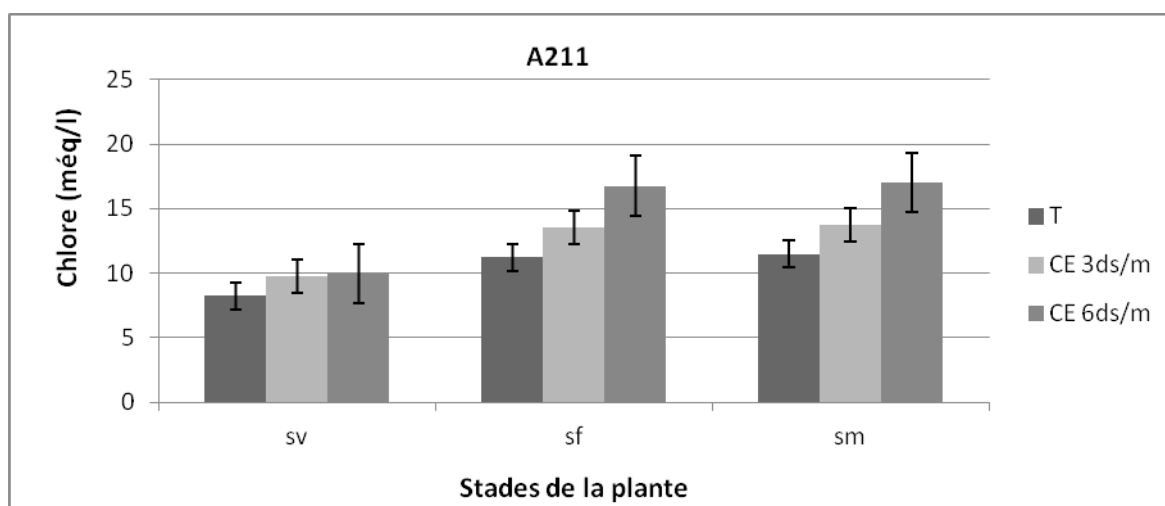


Figure 34: Teneur en chlore du sol (A211).

Teneur en nitrate

Les figures ci-dessous illustrent l'évolution des nitrates au niveau du sol.

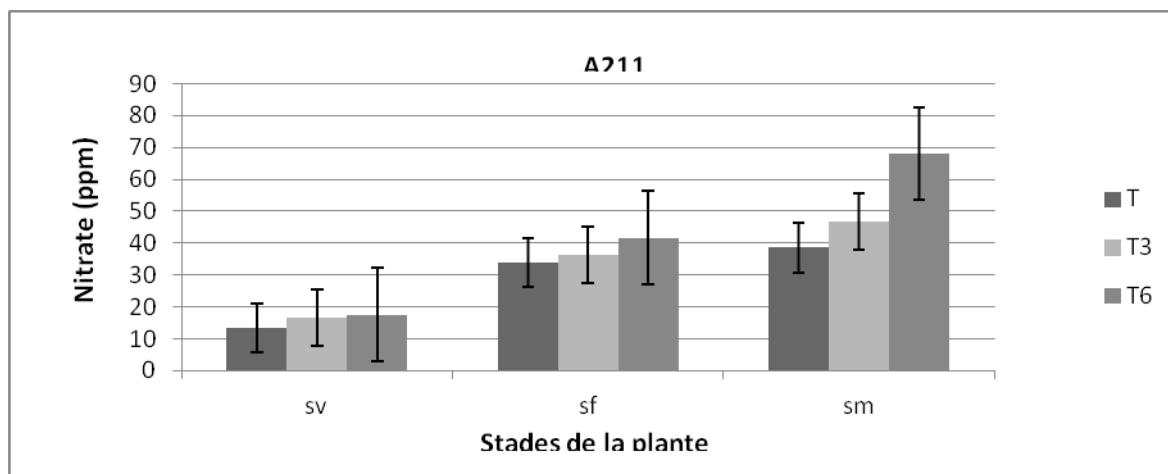


Figure 35: Concentration en nitrate du sol (A211).

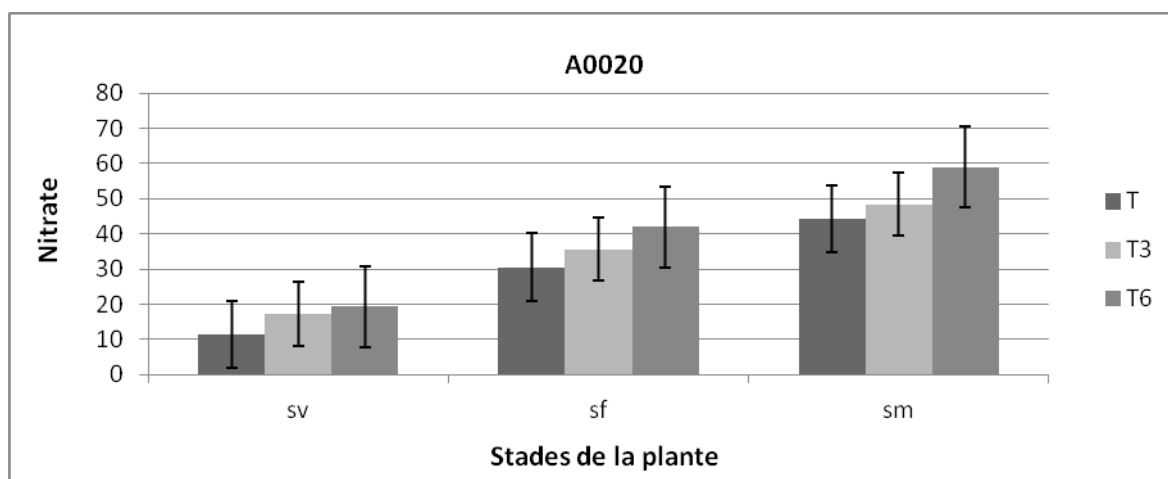


Figure 36: Concentration en nitrate du sol (A0020).

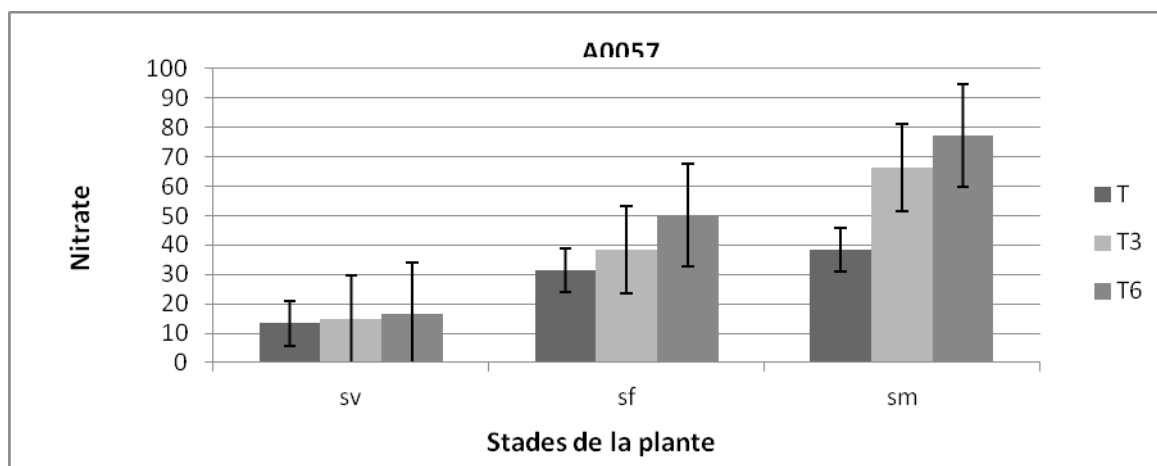


Figure 37: Concentration en nitrate du sol (A0057).

Les eaux usées étant riches en nitrates, le suivi de l'évolution de cet élément est crucial.

L'augmentation est rapide au cours du stade végétatif, ceci est dû au fait que l'eau apporte des quantités importantes de nitrate, qui dépassent les besoins de la plante à ce stade, puis la concentration augmente du stade floraison jusqu'à la fin du stade maturation ou il commence à diminuer (figures 35, 36 et 37).

Evolution de la CE du sol

Les figures suivantes illustrent la conductivité électrique du sol durant le cycle.

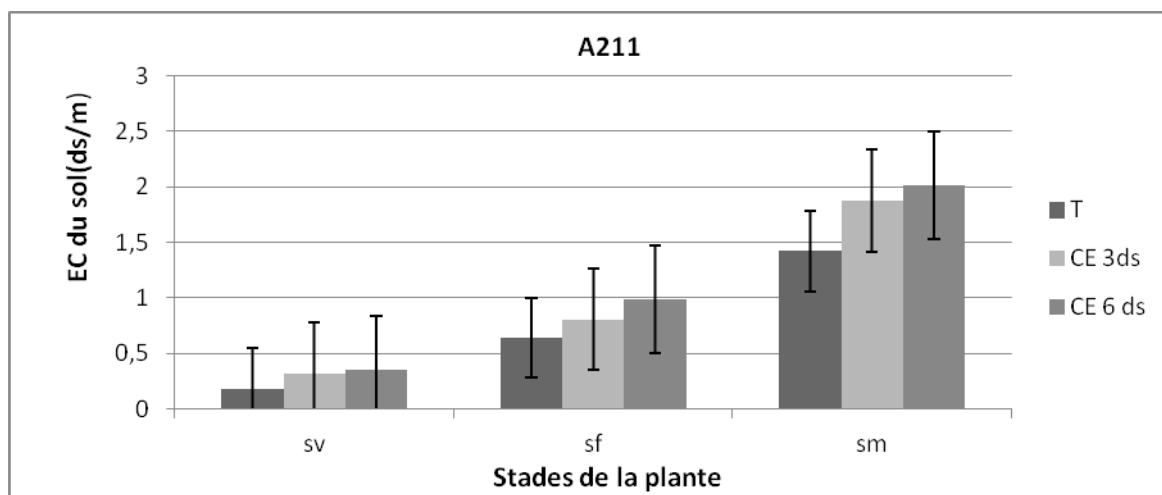


Figure 38: Evolution de la CE de la solution du sol pour la variété (A211).

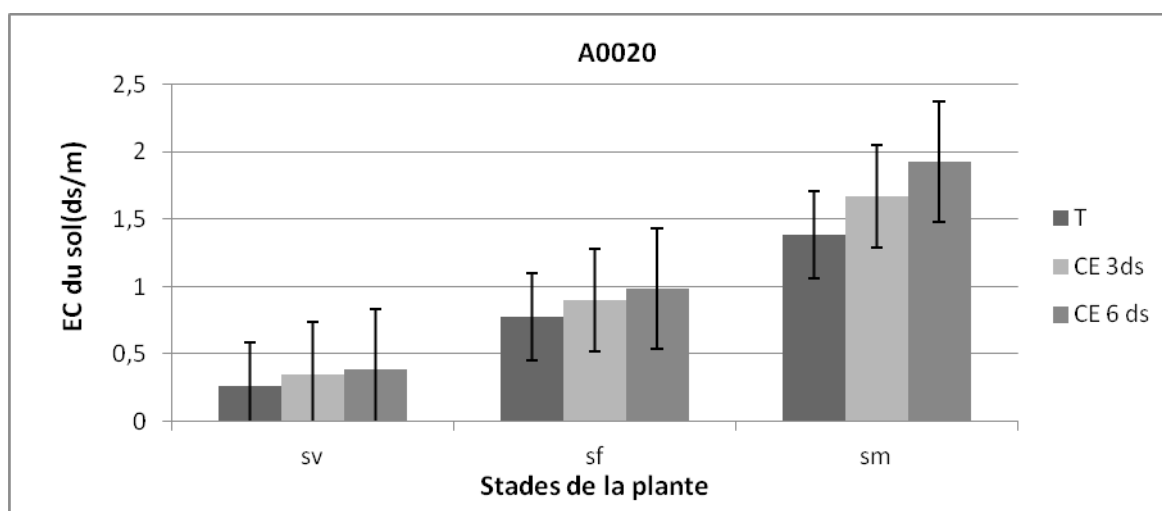


Figure 39: Evolution de la CE de la solution du sol pour la variété (A0020).

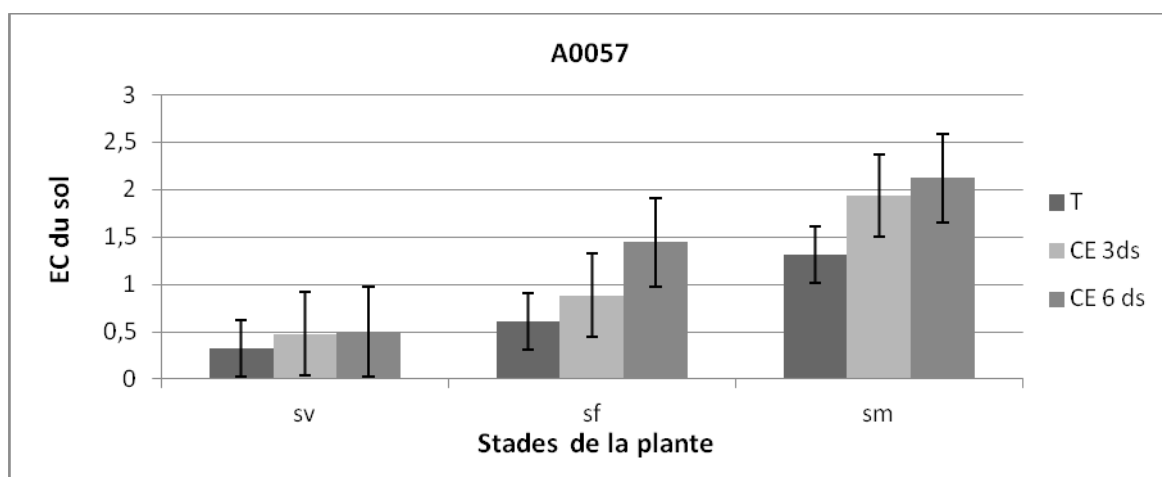


Figure 40: Evolution de la CE de la solution du sol pour la variété (A0057).

Selon les figures 38, 39 et 40 une augmentation de la CE du sol du stade végétative au stade maturation est remarquée. L'analyse statistique montre une différence significative entre les CE des différents traitements. En effet, la CE du sol qui était de 0,30 dS/m au départ, a augmenté progressivement jusqu'à 1,4 dS/m (T); 1,8 dS/m (CE 3); 2,01 dS/m (CE 6) au niveau du sol de la variété A211; 1,38 dS/m (T); 1,67 dS/m (CE3); 1,92 dS/m (CE6) au niveau du sol de la variété A0020; 1,31 dS/m (T); 1,93 dS/m (CE3) et 2,12 dS/m (CE6) au niveau du sol de la variété A0057.

La figure 41 illustre l'évolution de la CE du sol à différentes profondeurs.

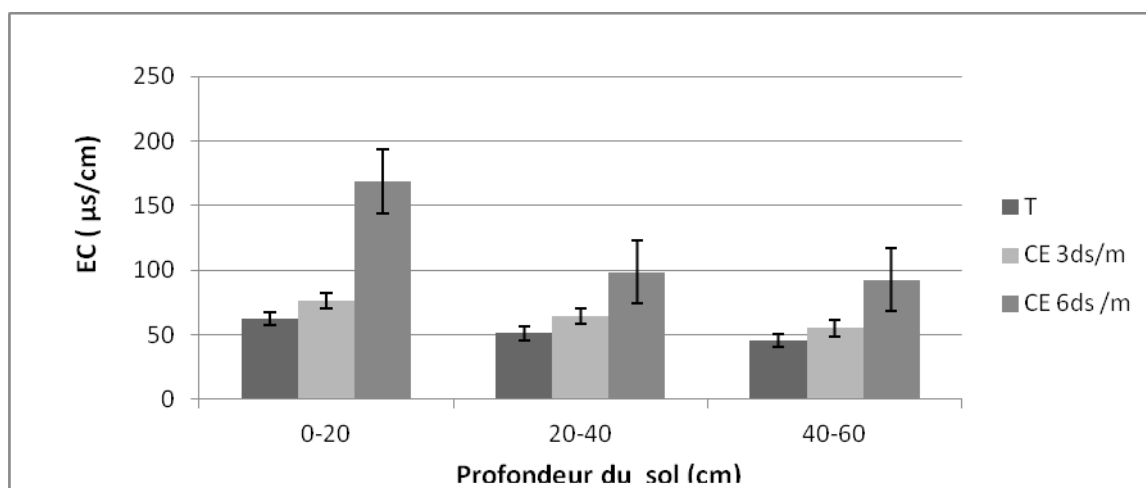


Figure 41: Evolution de la CE de la solution du sol à différentes profondeurs du sol.

La figure montre que la conductivité électrique du substrat diminue avec la profondeur du sol, ceci se manifeste pour les courbes de tous les traitements. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Choukr-Allah (2009).

pH du sol

Les figures 42, 43 et 44 indiquent l'évolution du pH au niveau du substrat, le pH a tendance à augmenter du stade végétatif au stade floraison puis subit une chute progressive jusqu' à la fin du cycle. L'analyse statistique n'indique pas de différence significative entre les traitements. L'augmentation du pH est expliquée, d'une part, par l'alcalinisation du milieu à cause des ions OH^- , qui sont à l'origine d'une forte absorption des ions nitrates (NO_3^-), puisque la plante, pendant ce stade, absorbe plus d'azote pour croître. D'autre part, cette augmentation peut être due à la concentration des ions sodium et les bicarbonates apportés par les eaux d'irrigation (eaux usées+eau de mer) qui ont un effet alcalinisant.

La diminution du pH durant la fin du cycle, s'explique par l'acidification du milieu à cause de la libération des ions H^+ . C'est la période de production maximale et la plante a tendance à absorber plus d'éléments nutritifs et donc l'acidification du milieu. En effet, différentes interactions entre la plante et le substrat se manifeste : pour chaque cation K^+ , Ca^{++} , et Mg^{++} absorbé les racines libèrent les cations équivalents H^+ provoquant la diminution du pH.

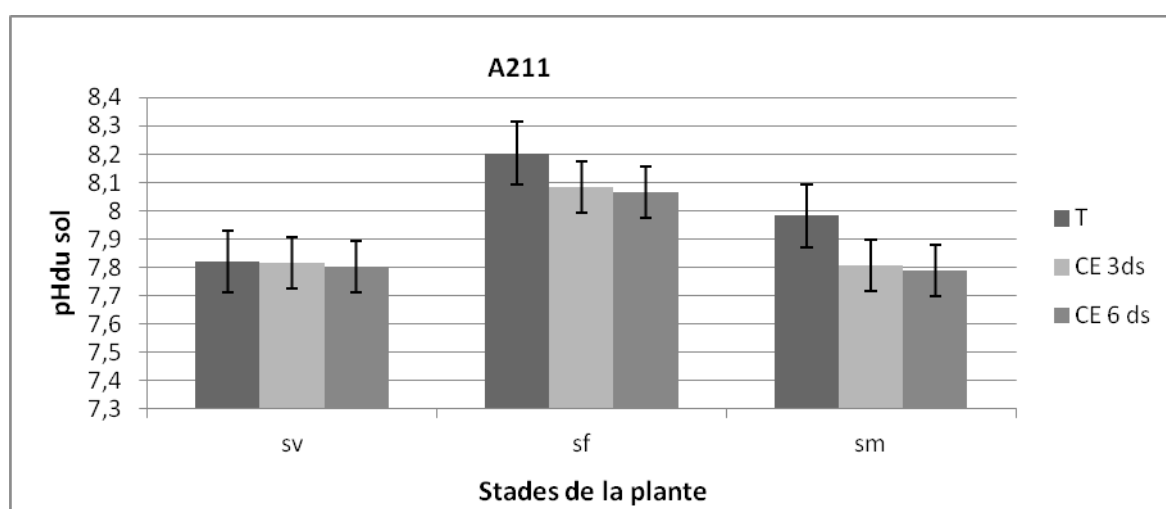


Figure 42: Evolution du pH du sol (A211).

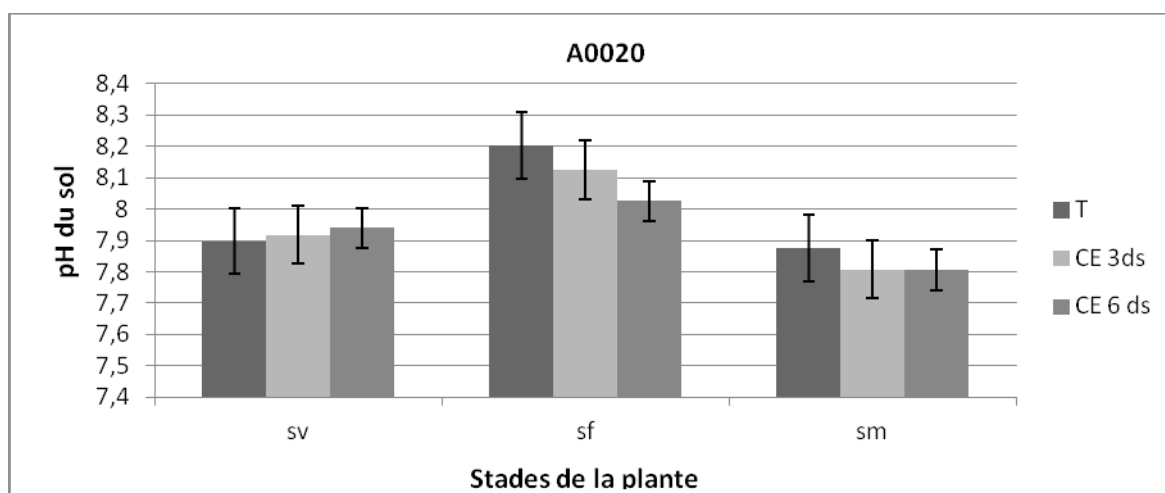


Figure 43: Evolution du pH du sol (A0020).

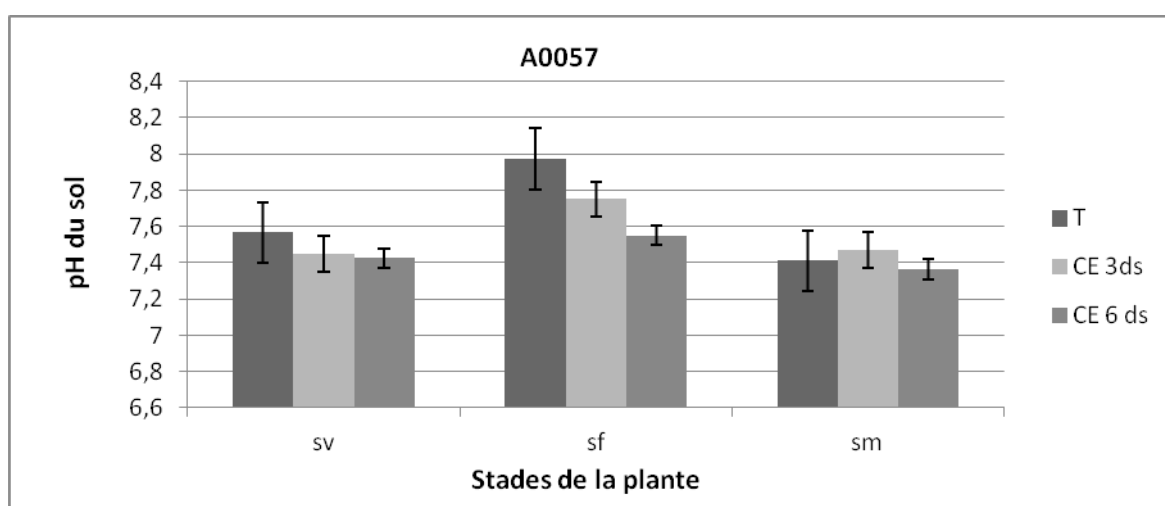


Figure 44: Evolution du pH du sol (A0057).

Analyses foliaires

Dans le but de suivre l'évolution des éléments minéraux de la plante, les analyses foliaires ont été effectuées à différents stades du cycle de la plante.

Teneur en potassium

Le potassium est un élément indispensable à la croissance de la plante. Il maintient la turgescence des cellules et contrôle l'ouverture et la fermeture des stomates. Notons que l'absorption du potassium est influencée par le niveau de salinité, ce qui explique la faible teneur en cet élément au niveau des traitements avec la conductivité électrique élevée (figures 45, 46 et 47).

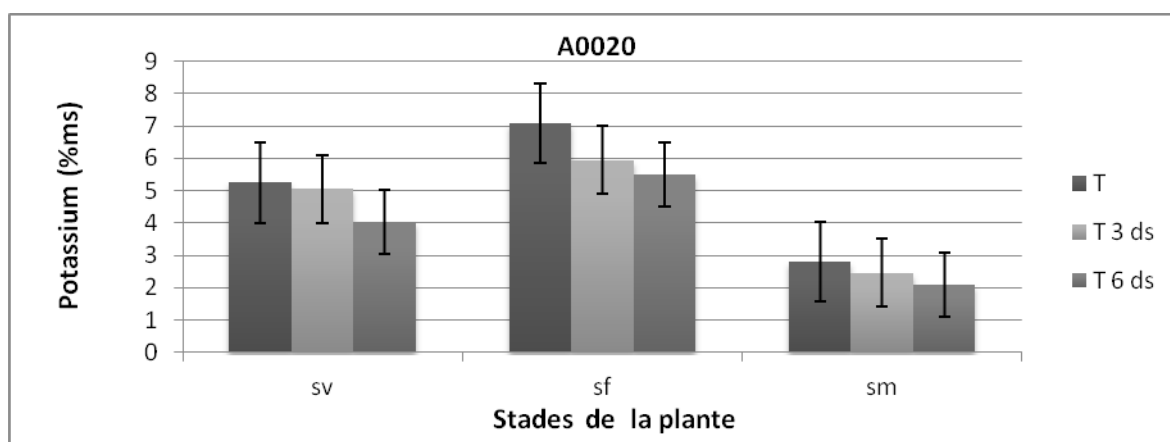


Figure 45: Teneur en potassium au niveau des feuilles en % de matière sèche (A0020).

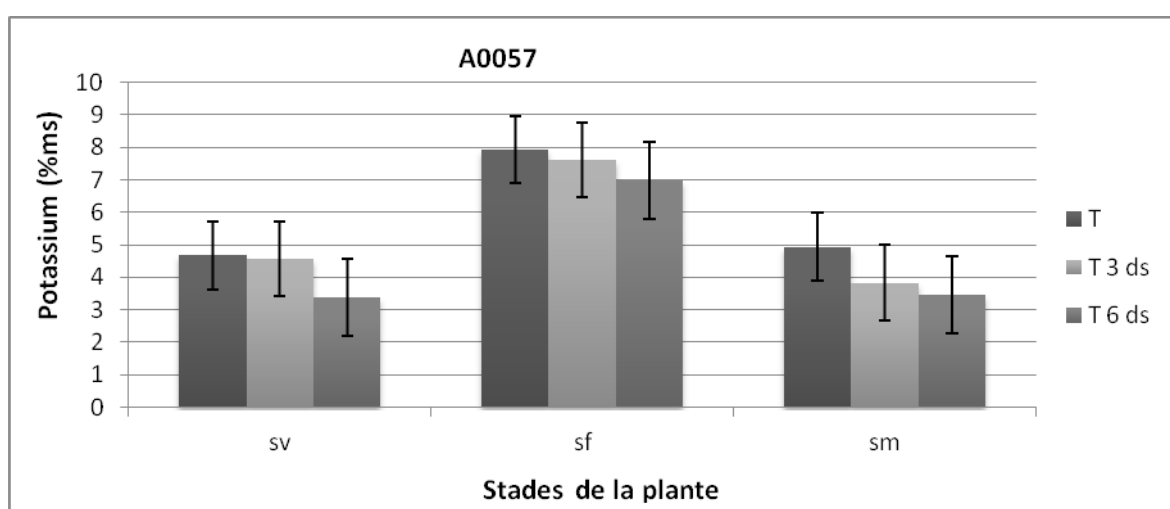


Figure 46: Teneur en potassium au niveau des feuilles en % de matière sèche (A0057).

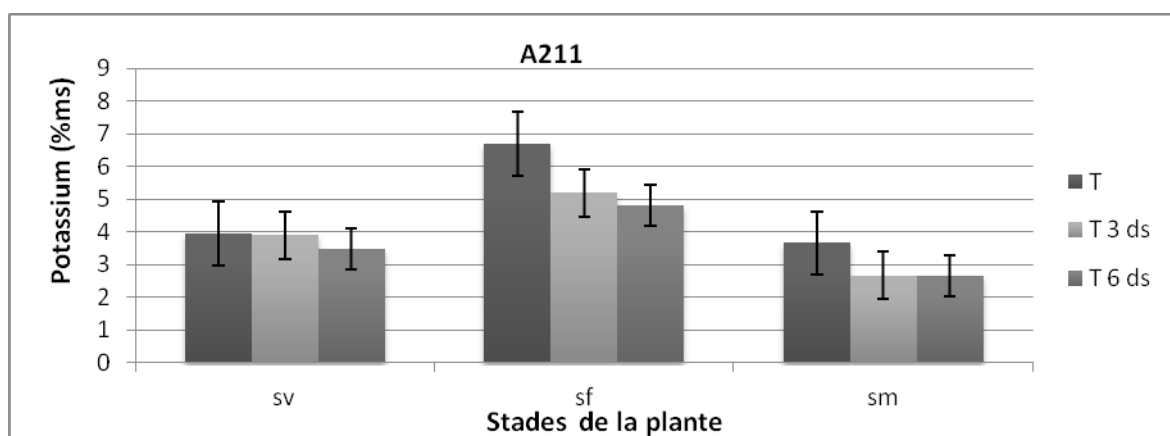


Figure 47: Teneur en potassium au niveau des feuilles en % de matière sèche (A211).

L'accumulation du potassium est plus importante pour le traitement témoin, et elle diminue progressivement au fur et à mesure que la conductivité de l'eau d'irrigation augmente. Cette réduction est due au phénomène d'antagonisme sodium-potassium.

L'analyse statistique révèle une différence hautement significative ($p < 0.01$) entre les concentrations de potassium des différents traitements. En effet, des réductions de 12,6% à 25,5% chez la variété A0020, de 22,4% à 29,6% pour la variété A0057, de 27% à 28% à propos de la variété A211, respectivement pour les traitements CE3 et CE6 comparés au témoin, sont observées.

Teneur en sodium

Les figures ci-dessous illustrent la teneur en sodium au niveau des feuilles chez les différentes variétés.

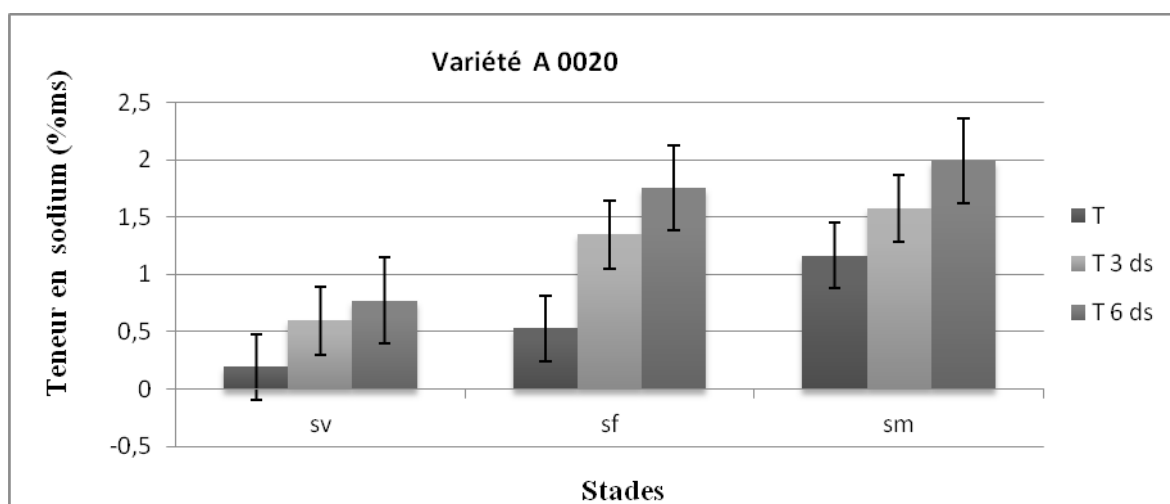


Figure 48: Teneur en sodium de la feuille (A0020).

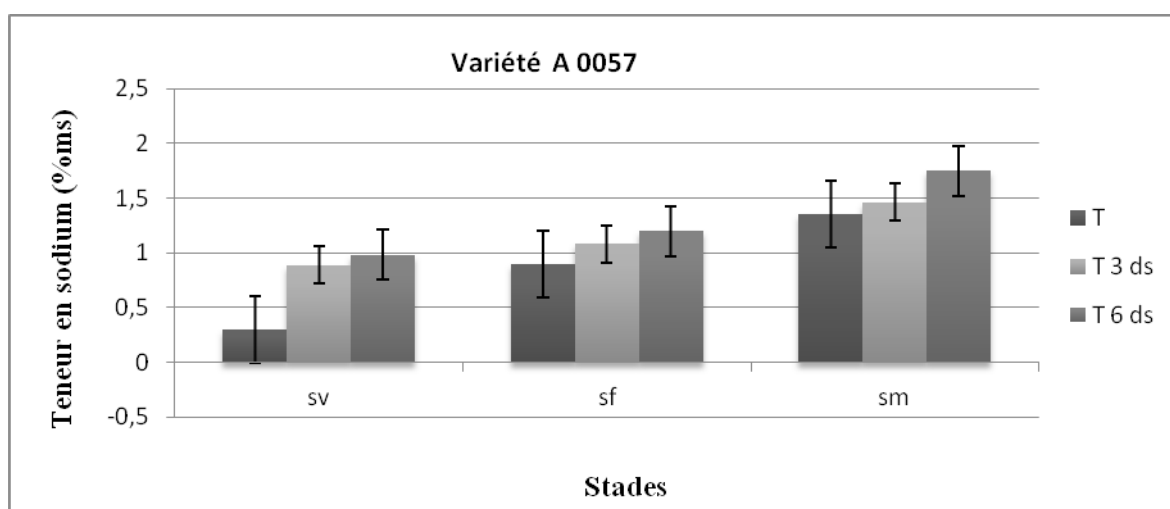


Figure 49: Teneur en sodium de la feuille (A0057).

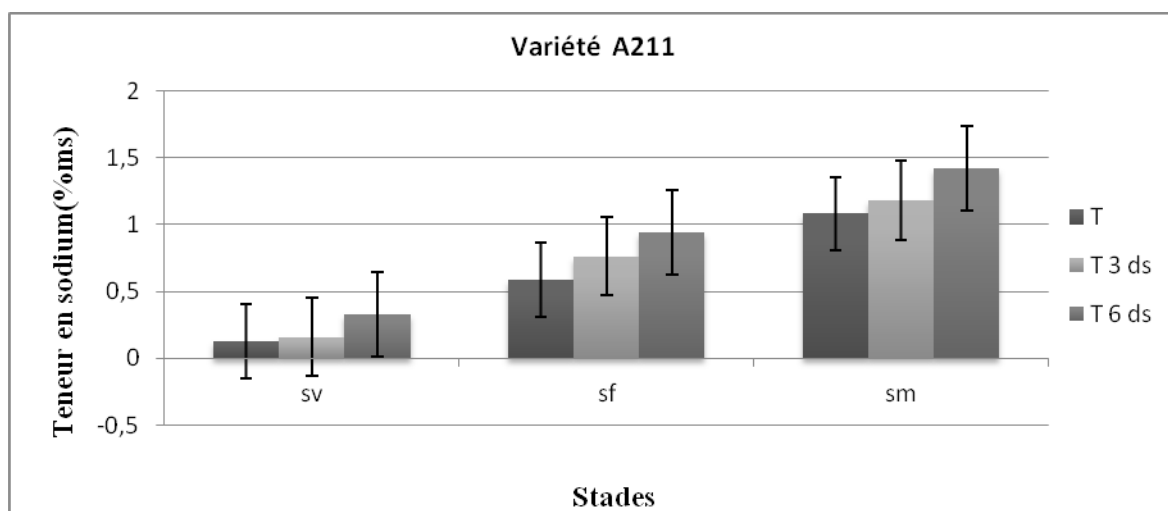


Figure 50: Teneur en sodium au niveau de la feuille (A211).

Les figures 48, 49 et 50 montrent que les teneurs en sodium augmentent considérablement au niveau des feuilles avec l'accroissement de la conductivité électrique de l'eau d'irrigation chez les trois variétés. Le témoin présente la plus faible teneur en sodium. L'analyse statistique montre une différence hautement significative entre les concentrations de sodium des différents traitements. On remarque une teneur de 1,16%, 1,57% et 1,98% chez la variété A0020, de 1,35%, 1,46% et 1,74% à propos de la variété A0057, de 1,08%, 1,17% et 1,42% chez la variété A211, respectivement pour le témoin, le traitement CE3 et le traitement CE6.

Teneur en chlore

Nous constatons que le chlore s'accroît avec l'augmentation de la conductivité électrique chez toutes les variétés. Le chlore a tendance à s'accumuler d'avantage du stade végétative au stade floraison (Fig. 51, 52 et 53). L'accumulation de chlore est légèrement plus importante chez la variété A0057 par rapport aux deux autres variétés. L'analyse statistique montre une différence significative entre les concentrations en chlore des différents traitements. Le degré d'accumulation est différent entre les

traitements. On note une concentration de 11,25 méq/l, 19,25 méq/l et 28,5 méq/l concernant la variété A0020, une concentration de 13méq/l, 19méq/l, 25 méq/l et 23 méq/l chez la variété A0057, une concentration de 12,75 méq/l, 16,75 méq/l et 20,2 méq/l chez la variété A211, respectivement pour le témoin, le traitement CE3 et le traitement CE6.

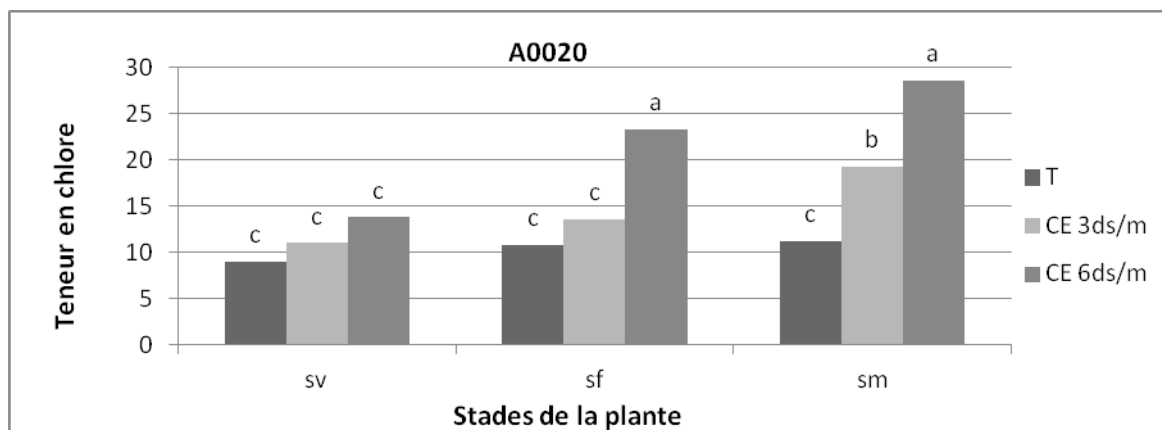


Figure 51: Concentration du chlore au niveau de la feuille (A0020).

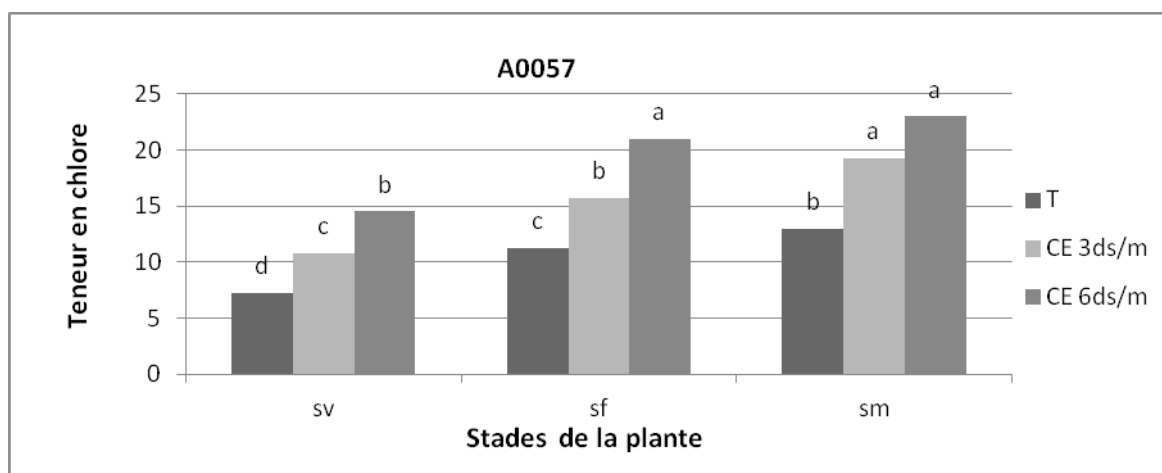


Figure 52: Concentration du chlore au niveau de la feuille (A0057).

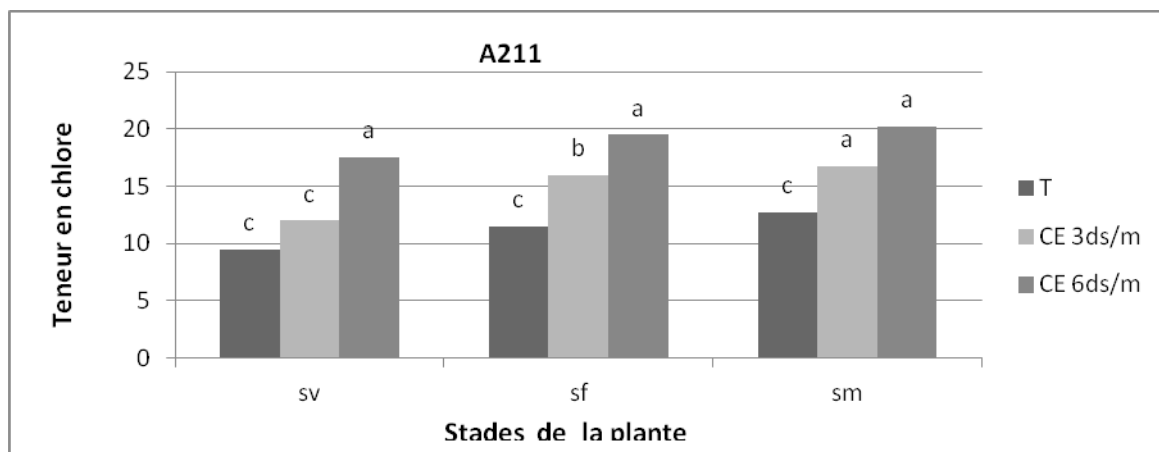


Figure 53: Teneur en chlore au niveau de la feuille (A211).

Teneur en phosphore

Le phosphore est un élément majeur dont la plante a besoin en grandes quantités, cet élément est essentiel pour la croissance et le développement des racines. L'évolution de la teneur en phosphore est illustrée sur les figures ci-dessous.

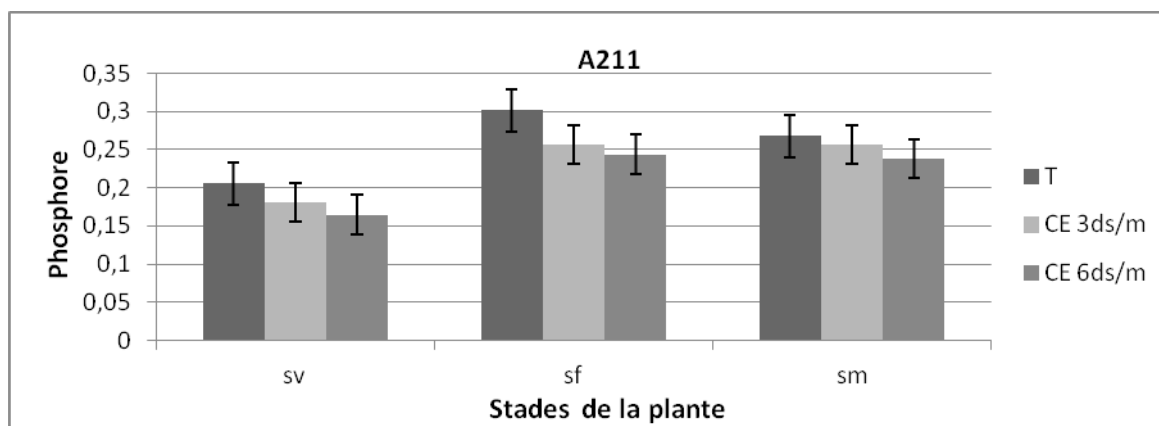


Figure 54: Teneur en phosphore au niveau de la feuille (A211).

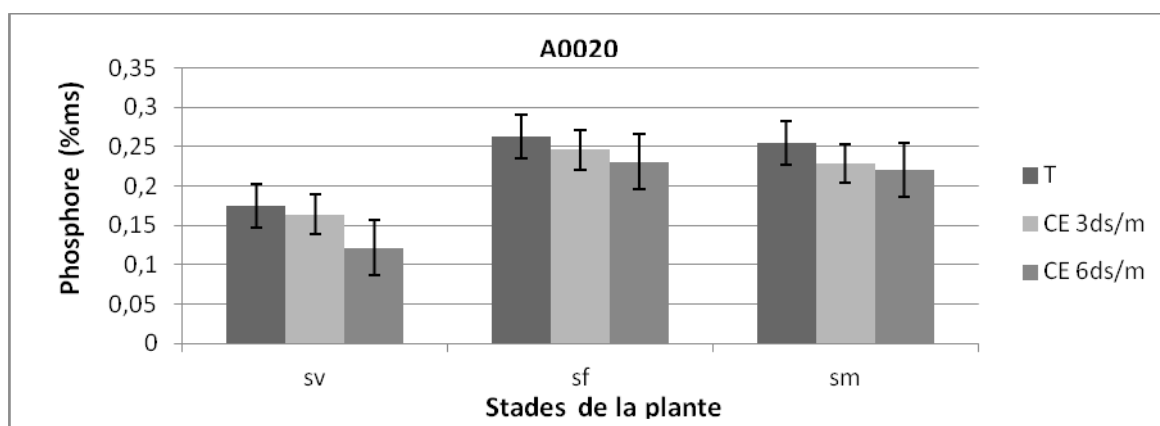


Figure 55: Teneur en phosphore au niveau de la feuille (A0020).

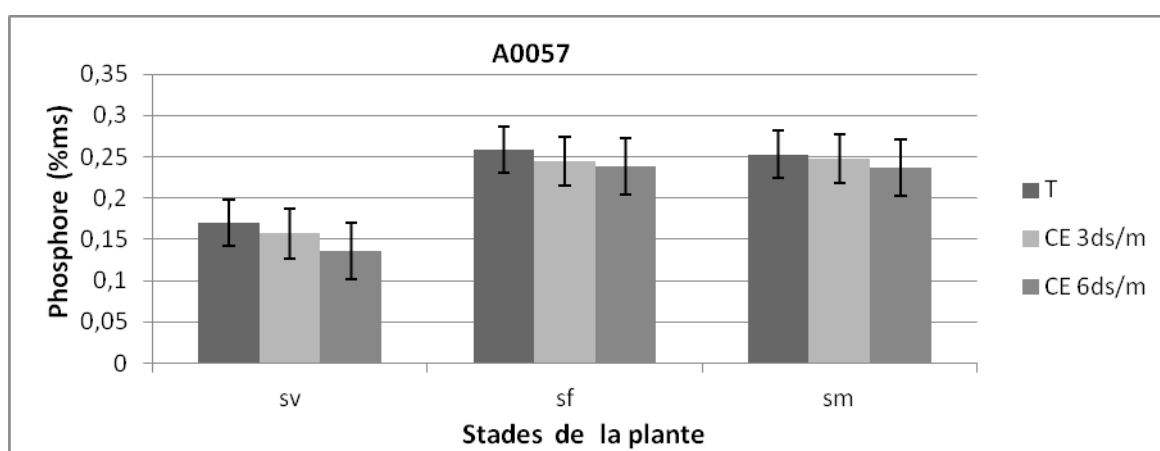


Figure 56: Teneur en phosphore au niveau de la feuille (A0057).

La teneur en phosphore la plus élevée est repérée chez le témoin et ceci chez toutes les variétés. L'analyse statistique indique une différence significative entre les teneurs en phosphore des différents traitements. Une diminution progressivement de la teneur en phosphore se remarque avec l'augmentation de la salinité de l'eau d'irrigation chez toutes les variétés. En effet, une diminution de 10,2% à 13,4% chez la variété A0020, de 2,13% à 6,1% pour la variété A0057 et de 4,1% à 11,1% concernant la variété A211, respectivement pour les traitements CE3 et CE6 par rapport au témoin.

Teneur en azote total

Les figures ci-dessous montrent la teneur en azote total chez les différentes variétés.

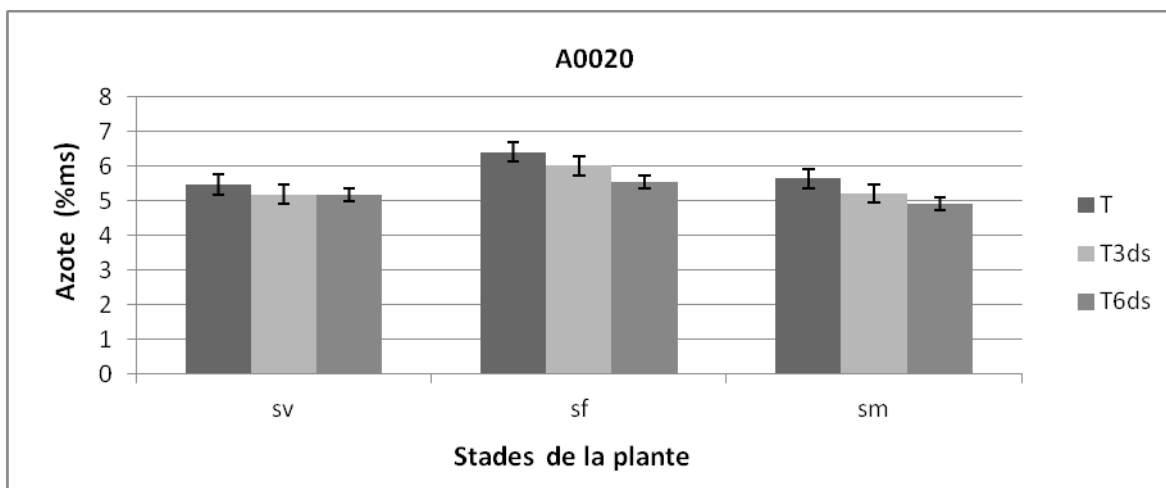


Figure 57: Concentration de l'azote des feuilles (A0020).

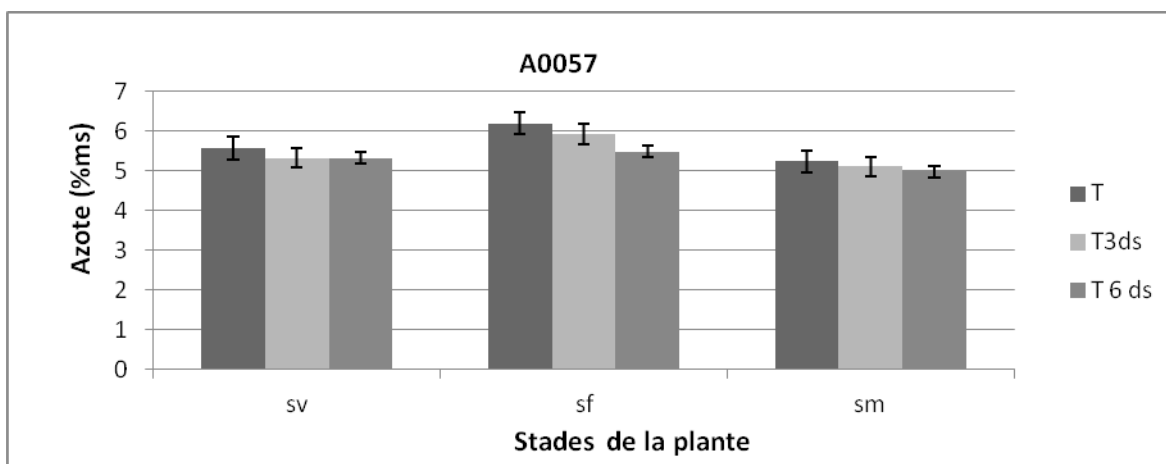


Figure 58: Concentration de l'azote des feuilles (A0057).

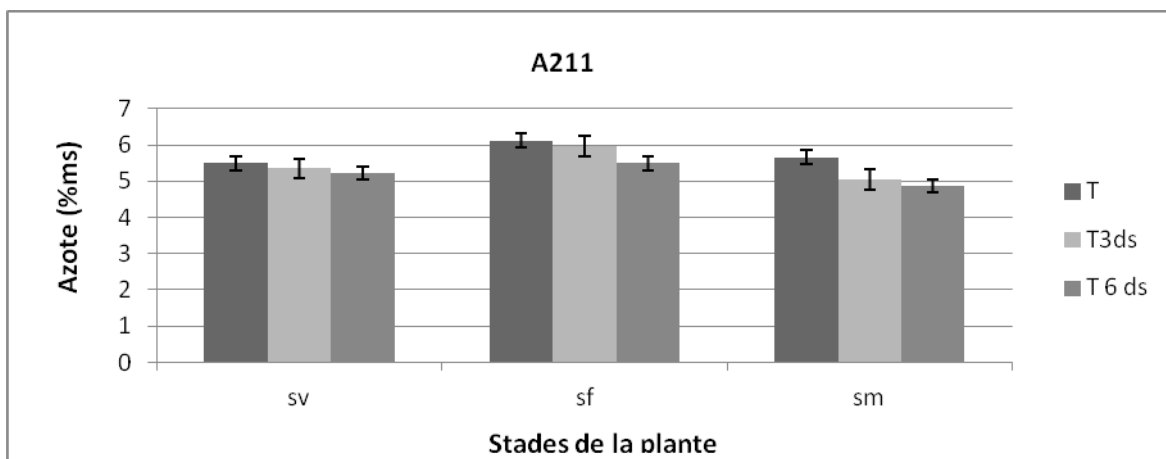


Figure 59: Concentration de l'azote au niveau de la feuille (A211).

Les figures 57, 58 et 59 montrent que les concentrations en azote diminuent avec l'augmentation de la conductivité électrique de l'eau d'irrigation. L'analyse statistique montre une différence significative entre les traitements.

Le témoin présente la valeur la plus élevée d'azote, puis le traitement à CE de 3 dS/m et le traitement à une CE de 6 dS/m présente la plus petite valeur. On note une diminution de 7,6% à 12,9% chez la variété A0020, de 2,6% à 4,9% concernant la variété A0057 et de 10,8% à 13,9% à propos de la variété A211, respectivement pour les traitements 3ds et 6ds par rapport au témoin.

Rendement

L'augmentation de la CE de l'eau d'irrigation entraîne une diminution du rendement de 17,8 % à 25,2 % pour A0020, de 6,9 % à 28,3 % pour les A0057, de 3,6 % à 8,6 % pour A211 respectivement pour CE3 et CE6 par rapport au contrôle (T) (Tab. 9). Les rendements des variétés A0020 et A0057 sont plus touchés par les stress salin, tandis que le rendement de la variété A211 a été légèrement touché. L'analyse statistique a montré une différence hautement significative entre les différents traitements. Néanmoins, les rendements obtenus, même avec l'application d'un traitement CE6, étaient relativement élevés comparés à ceux obtenus en particulier pour A211. La réduction du rendement est directement liée à une réduction de la croissance.

Tableau 10. Effet de la salinité sur le rendement

Rendement (T/Ha)	CE 1 (Témoin)	CE3	CE6
A0020	4,71 d	3,87 e	3,52 e
A211	7,03 a	6,78 a	6,43 b
A0057	6,77 a	5,63 c	4,85 d

Discussion

La présence de sel dans l'eau d'irrigation a entraîné une diminution de la croissance et de la surface foliaire chez toutes les variétés. Aussi bien au niveau du poids frais qu'au

niveau du poids sec, le sel a affecté les différentes parties de la plante chez toutes les variétés. L'effet du sel est plus accentué au niveau des racines et feuilles pour la variété A0020 qu'au niveau de la tige. Par contre chez les variétés A211 et A0057 les racines sont plus sensibles que les feuilles et tiges. La variété A0020 reste la plus touchée par rapport aux deux autres variétés, qui adaptent presque le même comportement vis-à-vis de la salinité.

Ces résultats sont similaires à ceux de Sadiki et Trabelsi (1989), qui ont travaillé sur les réponses de cinq variétés de tomate irriguées avec des eaux salines confirmant qu'une dose de 100 mM de NaCl entraîne une réduction de la matière sèche et fraîche de tous les organes de la plante, les tiges et les racines sont plus affectées que les feuilles.

Le stress salin augmente la teneur en sodium et en chlore au niveau des feuilles ; par contre il réduit le pourcentage de potassium chez toutes les variétés. Bains et Fireman (1964) ont abouti aux mêmes résultats et avaient confirmé que l'accumulation de sodium échangeable dans le sol entraîne une diminution de l'absorption du potassium et du calcium pour cinq espèces incluant la tomate. La variété A0020 qui est la moins sensible par rapport aux deux autres variétés a accumulé beaucoup plus de Na^+ et Cl^- au niveau de ses feuilles. Ce qui est conforme à la conclusion de Rush et Epstein (1976, 1981) qui rapporte que la différence entre deux espèces de tomate, l'une tolérante (*L. cheesmanii*, espèce sauvage) et l'autre sensible (*Lycopersicon esculentum*, espèce cultivée) se situe au niveau de l'accumulation des ions Na^+ , qui est plus élevée chez la première que chez la seconde. Dans le même sens, Grattan et Grieve (1999) ont reporté qu'un niveau élevé d'absorption de sels (NaCl) rentre en concurrence avec l'absorption d'autres ions nutritifs, tels que K^+ , Ca^{2+} , N et P et entraîne des troubles nutritionnels et, éventuellement, réduit le rendement et la qualité. D'autres auteurs confirment cette constatation dans un certain nombre de plantes comme Perez-Afocea *et al.*, (1996); Khan *et al.*, (2000); Bayuelo-Jiménez *et al.*, (2003).

L'irrigation avec différentes eaux salines a entraîné une élévation de la conductivité électrique du sol. Cette conductivité élevée est due à l'accumulation du sodium et chlore. La migration des éléments minéraux dans le sol est liée à la migration de l'eau dans celui-ci. Ainsi, une évolution progressive des teneurs en éléments minéraux est notée durant le

cycle. L'augmentation du chlore peut être expliquée par sa mobilité au niveau du sol, alors que celle du sodium est moins marquée à cause de sa fixation sur les sites d'échange. Le potassium du sol augmente progressive tout au long du cycle. Cette accumulation du K^+ peut être due à la bonne fertilité du sol et aux éléments fertilisants des eaux usées.

Conclusion

À l'avenir, dans des conditions limitées des réserves d'eau douce, l'agriculture sera probablement forcée de plus en plus à utiliser une eau de qualité marginale, des eaux usées traitées ou de solution saline. Dans ce contexte, ce travail visait à suivre le comportement des trois variétés d'amarante selon les niveaux de salinité différents de l'eau et des eaux usées traitées. Les effets de la salinité sur les aspects agronomiques et sur les paramètres édaphiques ont été comparés entre les variétés d'amarantes.

Le tress salin a eu des effets significatifs sur tous les paramètres de croissance. Les différences observées chez les variétés concernant toutes les caractéristiques étudiées, étaient très significatives. Les interactions entre les variétés et les niveaux de stress de la salinité ont été aussi importantes. Cependant, leur sensibilité au stress de la salinité varie avec le niveau de stress et selon la variété. Par conséquent, l'effet du sel était plus prononcé dans les racines et les feuilles de la variété A0020 qu'au niveau des tiges.

Cependant, les racines sont plus sensibles que les feuilles et les tiges pour A0057 et A211. Par conséquent, le rendement a été réduit. En effet, l'amarante est susceptible au stress salin à partir d'un niveau de salinité de 3 dS/m. Ces conclusions sont confirmées par Jacobsen et *al.*, (2000) en indiquant que pour l'amarante, les caractères affectés par le stress de salinité sont la conductance stomatique et le potentiel hydrique foliaire, ce qui indique que cette espèce n'a pu adapter son activité à un stress physiologique, résultant en une faible biomasse et la production de graines.

Des différences significatives en termes de rendement pour les différentes variétés sous stress salin ont été observées. Néanmoins, les rendements obtenus, même avec l'application du traitement CE6, étaient relativement élevés comparativement à ceux obtenus en particulier pour A211. En fait, la variété A211 a montré qu'elle est prometteuse en termes de productivité et de tolérance au sel, comme conséquence, elle peut être l'objet d'une recherche approfondie afin de l'introduire dans le système de culture d'Agadir comme une région semi-aride.

L'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation de l'amarante peut être une solution alternative pour réduire l'utilisation de l'eau douce; Néanmoins, davantage d'efforts et de travaux doit se faire en terme de technologie de traitement des eaux usées, de la salinisation des sols et la sélection des autres nouvelles génotypes tolérantes au sel et à la sécheresse.

CHAPITRE III

Chapitre III – Effet de la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation du Quinoa

Résumé— Le but de ce travail était d'étudier l'effet de l'irrigation avec des eaux usées traitées avec des conductivités électriques divers (T (0, 92dS/m), CE3 (3dS/m) et CE6 (6dS/m) sur trois variétés de quinoa cultivées dans un champ dans la région d'Agadir au sud du Maroc. Le suivi de l'évolution des paramètres chimiques et agronomiques tout au long de la culture a permis de déterminer les réponses au stress salin dans des conditions arides. Les résultats ont montré que la salinité a menée à la diminution de la hauteur de la plante et a réduit le poids frais et sec dans les différentes parties des plantes pour les trois variétés. L'augmentation de la CE de l'eau d'irrigation n'a pas influencé le rendement pour les trois variétés. Ainsi, le quinoa a résisté à la salinité et s'est révélé un comportement d'une plante halophyte facultative. En effet, l'utilisation d'eaux usées traitées est faisable pour irriguer le quinoa, en particulier dans les zones arides pour une utilisation durable des ressources en eau.

Mots-clés —Quinoa, salinité, climat semi-aride et eaux usées traitées.

Abstract—The purpose of this work was to study the effect of the irrigation using waste water with various electric conductivities (T (0,92dS/m), EC3 (3dS/m) and EC6 (6dS/m) on three varieties of quinoa cultivated in a field south of Morocco. The follow up of the evolution of the chemical and agronomic parameters throughout the culture made it possible to determine the responses to the saline stress in arid conditions. Results showed that the salinity caused the depression of plant's height, and reduced the fresh and dry weight in the different parts of the three varieties plants. The increase of the irrigation water EC didn't affect the yield for the varieties. Thus, quinoa resisted to salinity and proved a behavior of a facultative halophyte crop. In fact, the cultivation of this using treated wastewater is feasible especially in arid areas for a sustainable use of water resources.

Keywords—Quinoa, salinity, semi-arid climat and treated wastewater.

INTRODUCTION

Cette partie de l'étude s'inscrit dans le contexte de recherche d'alternatives de ressources en eau pour l'irrigation et de cultures alternatives capables de s'adapter dans les conditions défavorables. L'utilisation des eaux usées traitées est une meilleure alternative vue que ses avantages sont multiples; en particulier pour les pays qui sont confrontés à une pénurie chronique d'approvisionnement en eau et où l'économie est principalement axée sur l'agriculture. Toutefois, la possibilité d'utiliser des eaux usées traitées pour l'irrigation peut varier selon : la concentration totale de sels dissous dans l'eau et les concentrations spécifiques aux sels tel que le sodium, le phosphate et les nitrates du sol (ex. la perméabilité et l'infiltration) et le type de culture (ex. tolérance au sel d'espèces particulières). En fait, des problèmes de salinité doivent être atténués en travaillant sur ces trois facteurs.

Comme les problèmes de salinité sont aggravés, l'adoption des cultures aux conditions de salinité modérée est nécessaire avec la possibilité d'introduire des cultures sous-exploitées, tolérantes aux sels. Les plantes tolérantes aux sels peuvent offrir une alternative logique pour beaucoup de pays en développement. Le Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) est une Pseudo-céréale andins traditionnel attirant progressivement l'attention à cause de son adaptabilité à produire dans ces sols défavorables et les conditions climatiques. Il a été cultivé dans le Pérou et les Andes boliviennes plus de 7000 ans. En revanche, le quinoa a une très haute valeur nutritionnelle. En dehors de la haute teneur en protéines, les graines sont également riches en vitamines et en minéraux. Le potentiel de cette culture n'a pas encore été pleinement exploité, principalement en raison du manque de recherches sur les systèmes cultures durables et sur la gestion des contraintes biotiques et abiotiques de production. Le quinoa est bien adapté à se développer sous sol défavorable et des conditions climatiques (Garcia *et al.*, 2003).

L'objectif de cette partie d'étude est d'évaluer la réponse du quinoa au stress salin combiné avec l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation. Ainsi, la possibilité d'utiliser ces eaux avec trois niveaux de salinité pour l'irrigation du quinoa a été étudiée. L'évaluation de la tolérance de ces variétés à la salinité est faite en termes de croissance

et de rendement. D'autre part, les paramètres du sol sont mesurés afin de caractériser les effets du niveau de salinité de l'eau d'irrigation.

Matériel et méthodes

Matériel végétal et plantation

Les variétés de quinoa utilisées sont : QS 0938, D 0708, QM 1113. L'essai a commencé le 28 juillet 2010, date à laquelle le semis a été effectué, et s'est terminé le 10 décembre 2010 date de la récolte. Ces lignées sont fournies par l'Université de Copenhague (UCPH) et les lignées sélectionnées par Prof. Belhabib de l'IAV Hassan II.

Lieu, dispositif expérimental et mesures

Il s'agit des mêmes conditions, matériels et méthodes décrites au niveau du Chapitre II de la culture de l'Amarante.

Résultats et discussion

Paramètres de croissance des plantes

Hauteur de la tige principale

Les figures 60, 61 et 62 illustrent l'évolution des hauteurs des plantes par variété et par traitement selon le stade de croissance.

La hauteur des plantes est différente d'une variété à l'autre suivant le stade. La première mesure a révélé une différence significative entre les tailles des plantes des différentes variétés, la variété V1 (QS0938) a donné la plus grande moyenne de 38,8 cm pour le témoin (T) soit une vitesse de croissance de 1,20 cm/jour, suivi de la variété V2 (D0708) pour le traitement CE3 avec une moyenne de 33,5 cm soit une vitesse de croissance de 1,04 cm/jour. Il est à noter que cette mesure a été faite seulement 15 jours après le début des traitements.

L'analyse a révélé une différence hautement significative en faveur de la variété V3 (QM1113) montrant la moyenne la plus élevée et qui est de 107,05 cm pour le témoin (T) et 139,25 cm pour le CE6 suivie par la variété V2 (D0708) avec une moyenne de 74,2 cm pour le traitement CE3 et 82 cm pour le traitement T. Ceci indique que les variétés 2 et 3 ont respectivement une vitesse de croissance moyenne de 1,33 cm/jour, 3,57 cm/jour à

la troisième mesure et 1,44 cm/jour et 2,93 cm/jour dans la quatrième et dernière mesure.

En ce qui concerne l'effet de l'augmentation de la salinité, la variété V1 était la plus sensible avec une relativement faible diminution de la hauteur des plantes. Pour les variétés 2 et 3, l'application des traitements CE3 et CE6 n'a pas affecté la hauteur des plantes. Ce qui est en parfaite accord avec les travaux de Wilson *et al.*, 2002, selon lesquels, il n'y aurait pas eu de réduction significative de la hauteur des plantes ou de leur poids frais jusqu'au traitement supérieur à 11 dS/m.

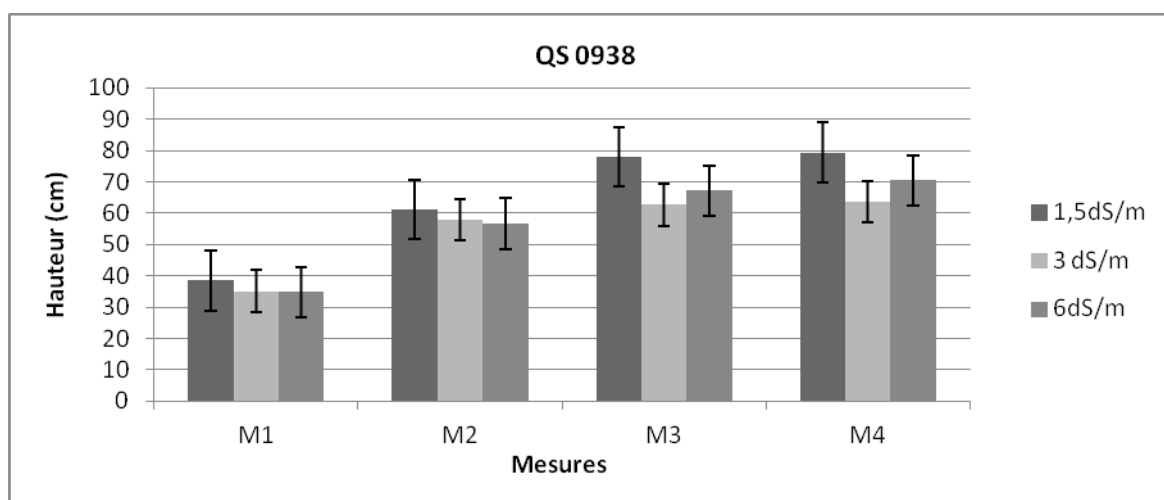


Figure 60: Evolution de la hauteur des tiges pour la variété QS0938 (1).

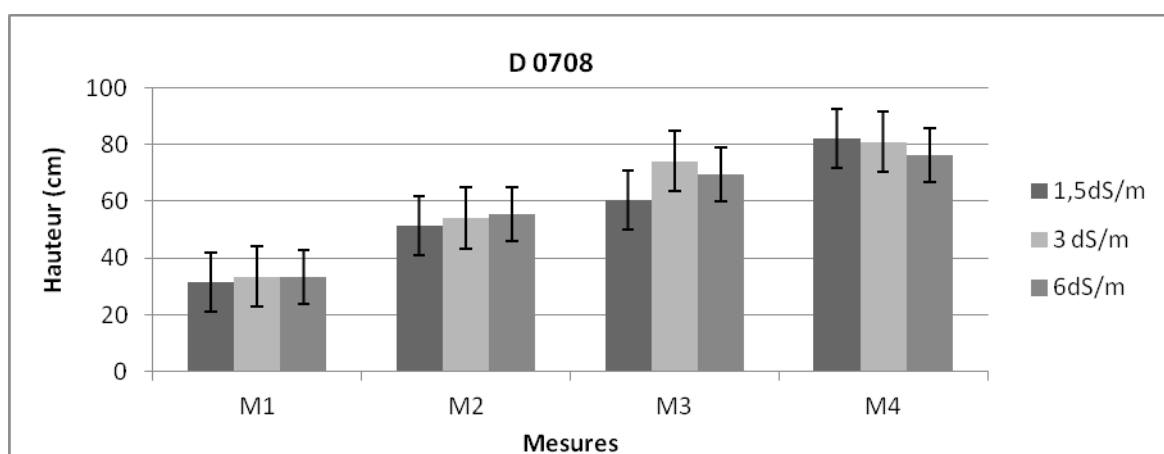


Figure 61: Evolution de la hauteur des tiges pour la variété D0708 (2).

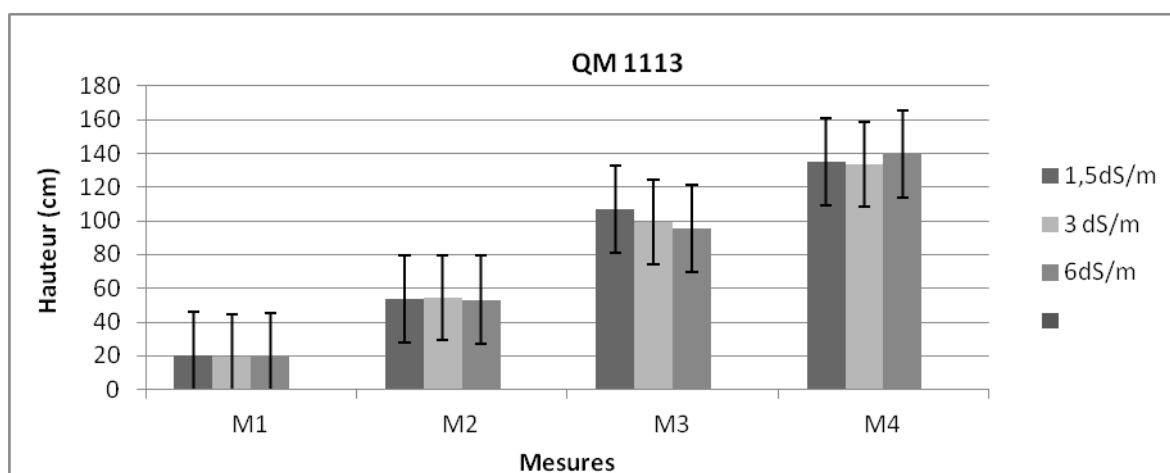


Figure 62: Evolution de la hauteur des tiges pour la variété QM1113 (3).

Surface foliaire

Il y a eu une différence significative entre les surfaces foliaires des 3 variétés au stade 2 au profit de la variété V2 et hautement significative au stade 3 en faveur de la variété V1. Au stade 2, la variété V3 a donnée une moyenne maximale de 8008,67cm²/plant sous le traitement T suivi de la variété V2 avec une moyenne de 7557,8 cm²/plant sous le traitement CE6. Au stade 3, la variété QS 0938 a donné les moyennes maximales de 1092,18, 1106,42 et 1117,95 m²/plant respectivement sous les traitements T, CE3 et CE6. Ce qui pourrait s'expliquer d'une part par une différence d'assimilation des éléments nutritifs par les différentes variétés due à des teneurs différentes des traitements au stade 2 et d'autre part, à la sénescence des vieilles feuilles au stade 3.

La variété D708 a montré une résistance vis-à-vis de l'augmentation de la salinité, ce qui est plus marquée au stade floraison. Par contre chez la variété QM1113, l'augmentation de la salinité a diminué relativement la surface foliaire marquée aussi au stade floraison.

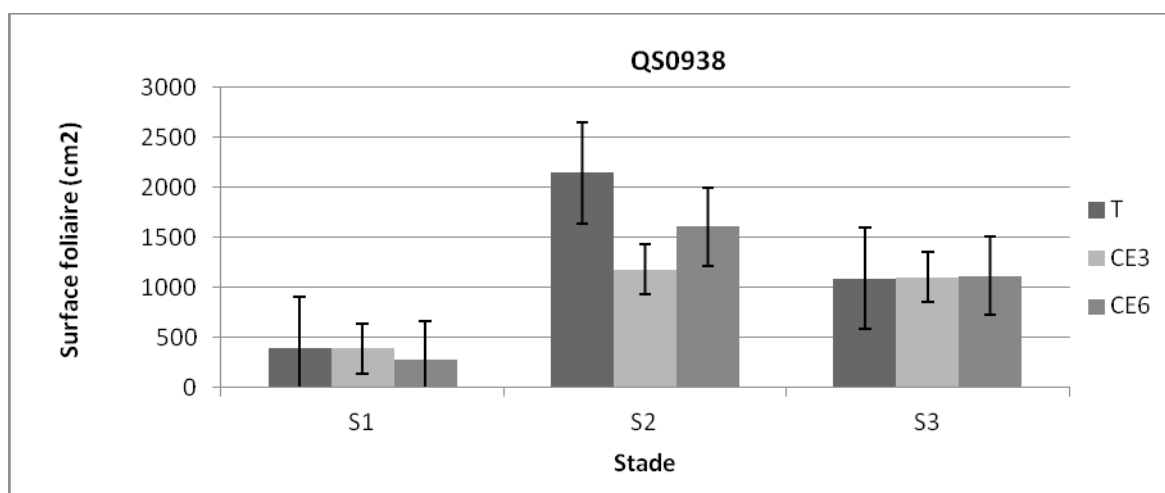


Figure 63: Evolution de la surface foliaire pour la variété QS0938 (1).

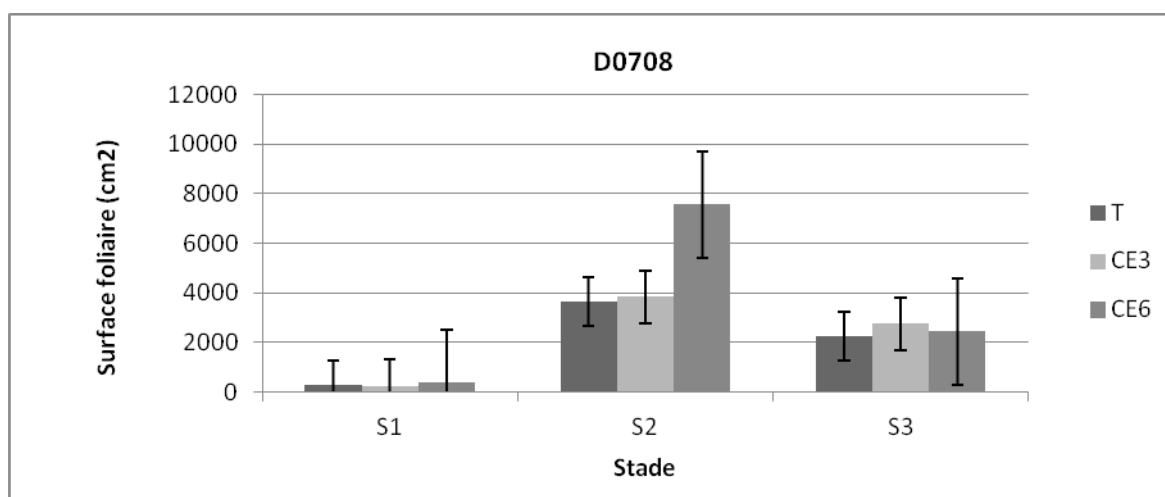


Figure 64: Evolution de la surface foliaire pour la variété D0708 (2).

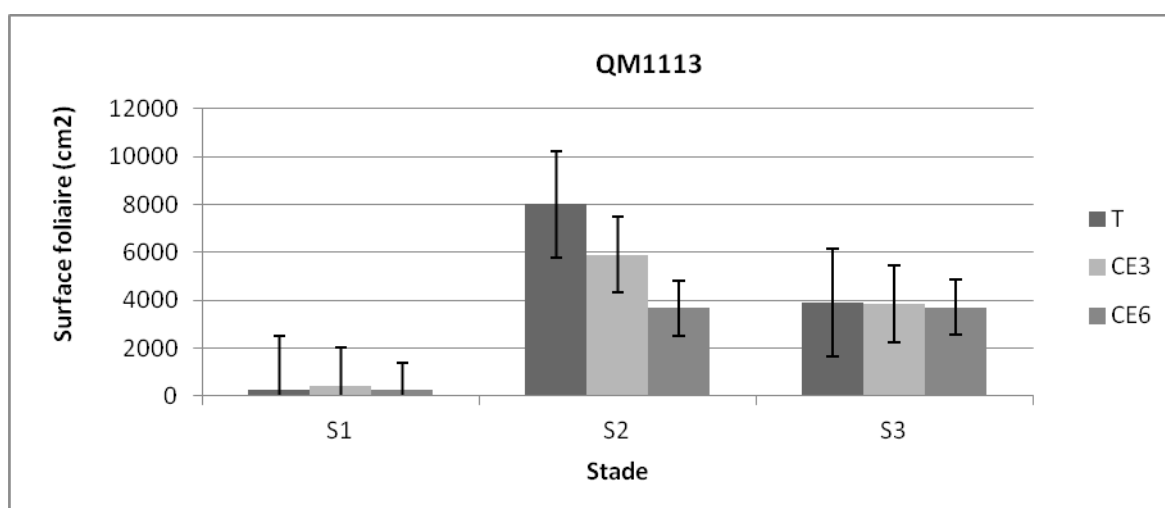


Figure 65: Evolution de la surface foliaire pour la variété QM1113 (3).

Biomasse

Poids frais des plantes

L'analyse ne montre aucune différence vis à vis des traitements. Au sein d'une même variété, aucune différence de comportement par rapport aux 3 niveaux de traitement pour ce qui est du poids frais. Par contre, les variétés répondent différemment à ces mêmes traitements. Au stade de croissance végétative V et au stade de maturité M, il n'y a pas eu de différence significative entre les variétés alors qu'au stade de floraison F, les différences de poids frais sont significatives ($p < 0,02$) au profit de la variété D0708 qui présente les poids frais moyens les plus élevés soient 412,175, 352,85 et 290,25 g/plante respectivement sous les traitements T, CE3 et CE6. L'augmentation de la salinité n'a pas engendré une réduction importante du poids frais des plantes. Ce-ci est expliqué par le fait que le quinoa démontré la capacité d'accumuler des ions de sel dans ses tissus pour contrôler et ajuster le potentiel hydrique foliaire. Cela permet aux plantes de «maintenir la turgescence des cellules et la transpiration limite dans des conditions salines, évitant ainsi des dommages physiologiques à la sécheresse ou la mort (Jacobsen *et al.*, 2000).

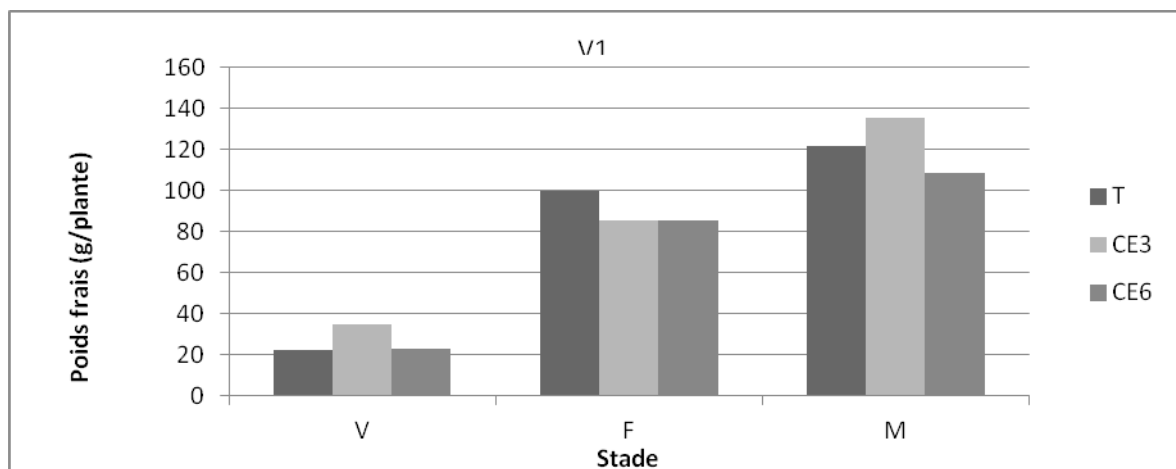


Figure 66: Evolution du poids frais total pour la variété QS0938 (1).

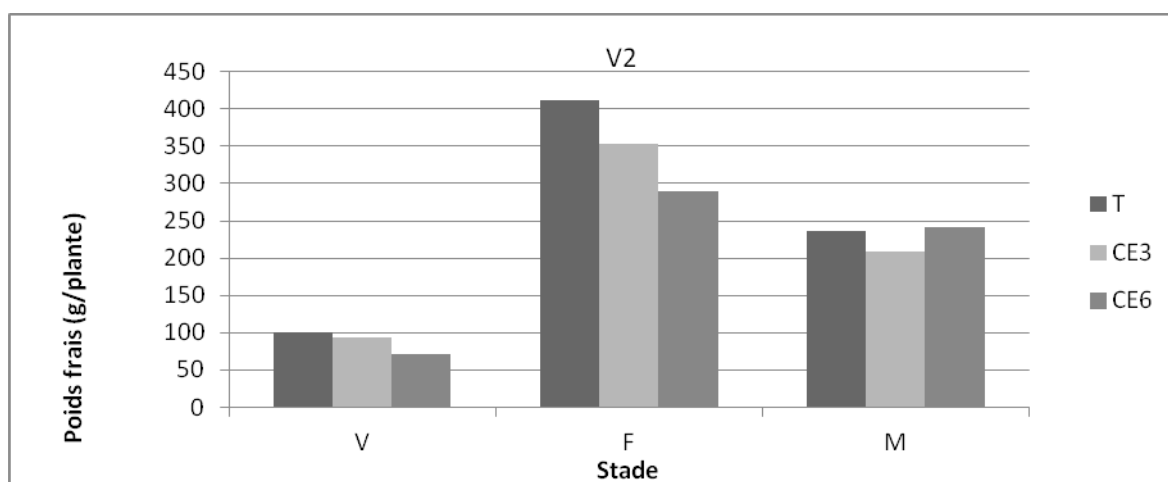


Figure 67: Evolution du poids frais total pour la variété D0708 (2).

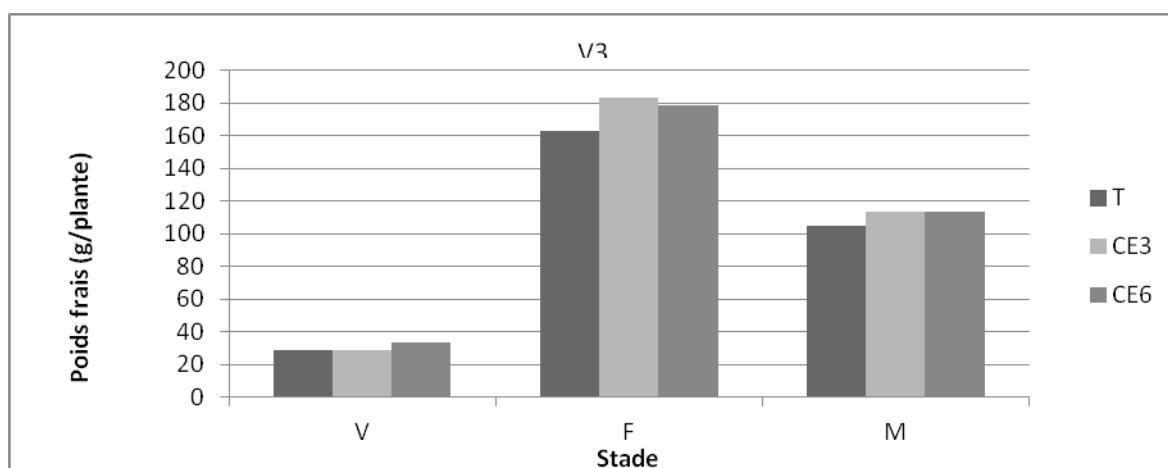


Figure 68: Evolution du poids frais total pour la variété QM1113 (3).

Poids sec des plantes

L'analyse statistique a révélé une différence significative ($p < 0,039$) entre les poids secs au niveau du stade de maturité M en faveur de la variété D0708 par rapport à la variété 1 et 3. Elle a donné les plus grandes moyennes de poids secs soient 86,32, 71,3 et 79,52 g/plante respectivement sous les traitements T, CE3 et CE6.

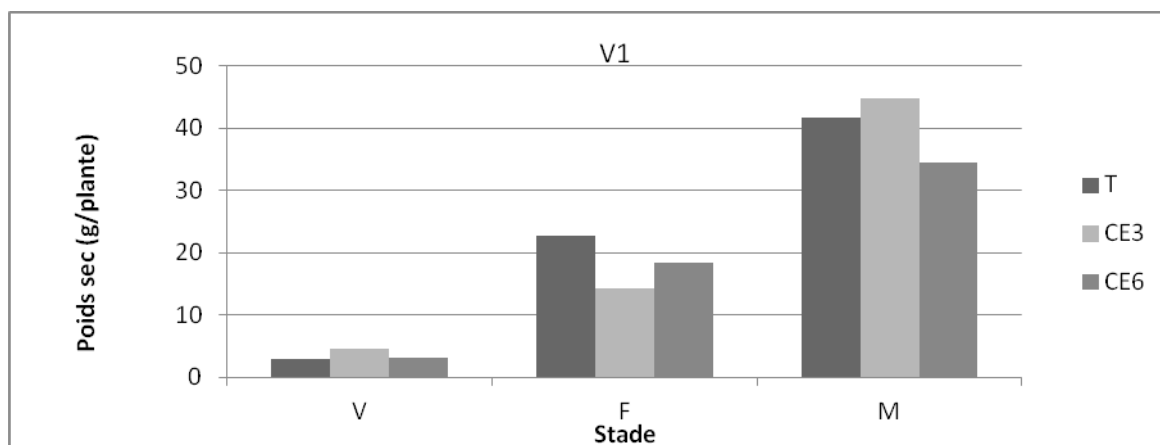


Figure 69: Evolution du poids sec total pour la variété QS0938 (1).

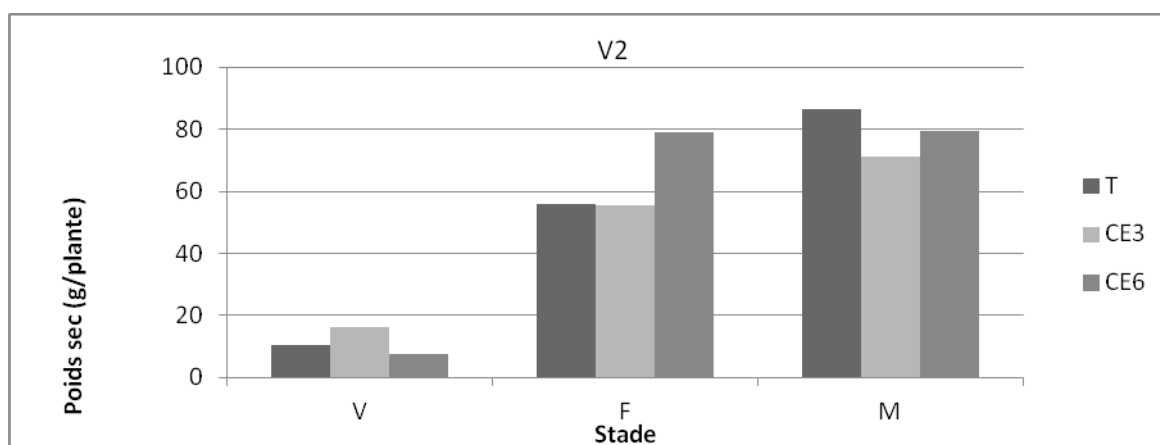


Figure 70: Evolution du poids sec total pour la variété D0708 (2).

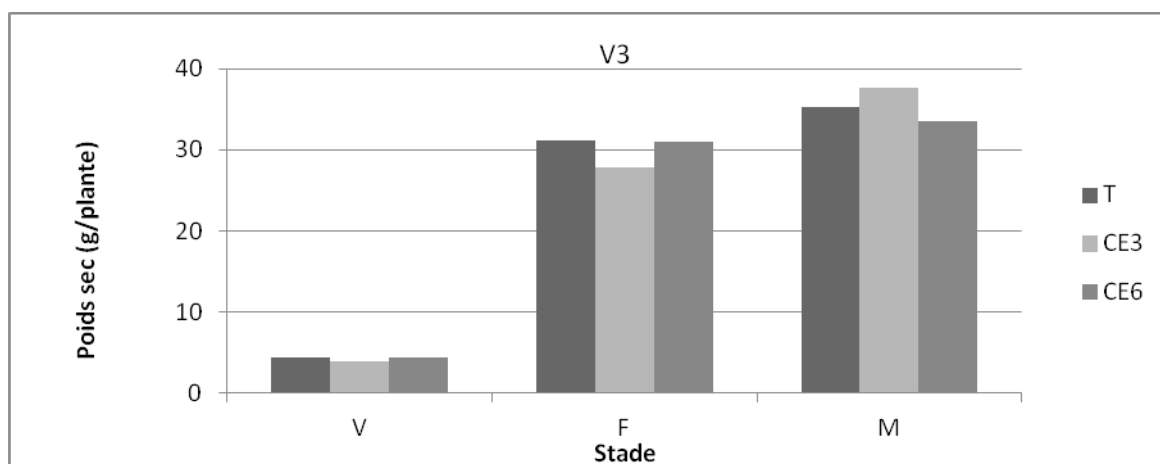


Figure 71: Evolution du poids sec total pour la variété QM1113 (3).

Paramètres édaphiques

Evolution de la CE du sol

La conductivité électrique au niveau du sol évolue d'une manière différente d'une variété à l'autre et d'un traitement à l'autre (Fig. 72, 73 et 74). Chez la variété QS 0938, on a observé une augmentation de la conductivité électrique jusqu'au stade 2 qui va ensuite diminuer jusqu'au stade 3 et cela pour les traitements T et CE3. Le traitement CE6 présente une allure croissante du stade 1 au stade 3 avec une CE moyenne de 0,726 dS/m. Chez la variété QM 1113, on a obtenu un comportement similaire à celui de la variété QS 0938 pour les traitements T et CE6. Le traitement CE3 présente une allure différente, la conductivité électrique du sol augmente du stade 1 au stade 2 ensuite elle se stabilise jusqu'au stade 3. Chez la variété D 0708, on a observé une allure tout a fait différente des deux autres variétés, la conductivité électrique a diminué du stade 1 au stade 2 et à partir de là, elle a repris de la valeur. Ces différences de comportements des variétés vis-à-vis des traitements ont été mises en évidence par l'analyse statistique. Au stade 1, la différence d'évolution de la conductivité au niveau du sol est significative ($p < 0,036$) en faveur de la variété D 0708 avec les conductivités électriques les plus élevées : 0,66, 0,64 et 1,00 dS/m respectivement pour le traitement T, CE3 et CE6. Au stade 2, la différence est hautement significative ($p < 0,01$) en faveur de la variété QS 0938 suivi de la variété QM 1113. Au stade 3, la différence devient très hautement significative ($p < 0,001$) au profit de la variété D0708 suivi de la variété QM 1113.

Ces variations de la CE pourraient s'expliquer par des modifications de la CE de l'eau usée traitée utilisée pour l'irrigation au cours du temps.

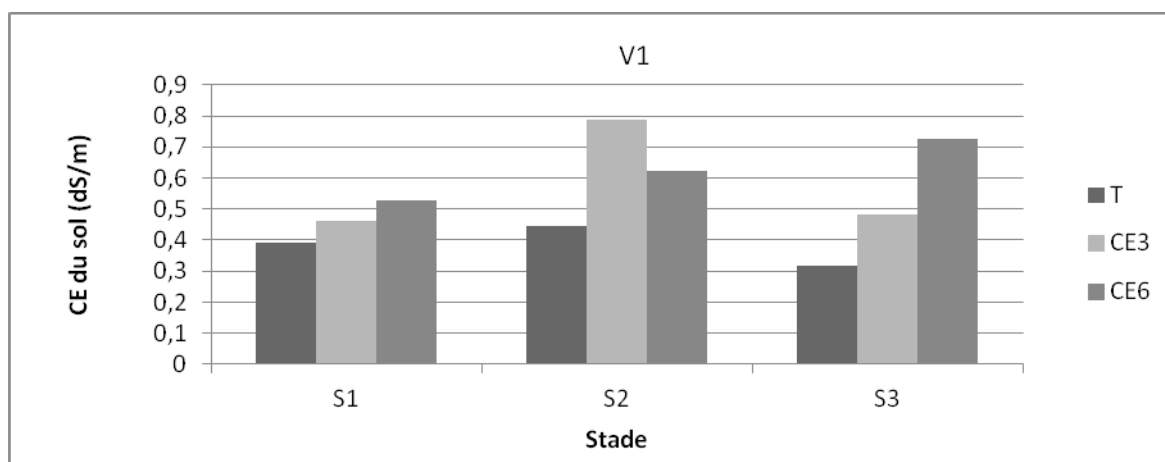


Figure 72: Evolution de la CE du sol pour la variété QS0938 (1).

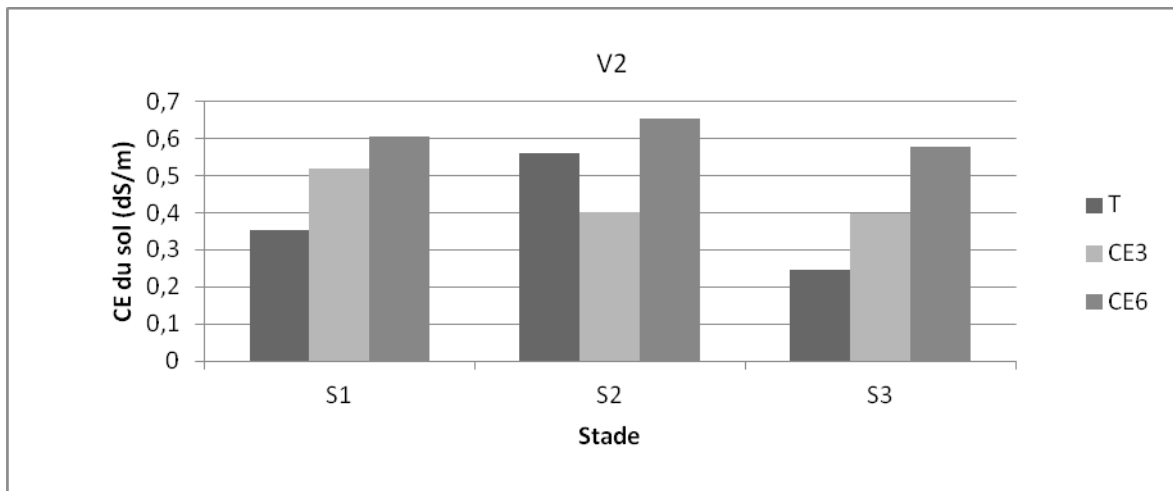


Figure 73: Evolution de la CE du sol pour la variété D0708 (2).

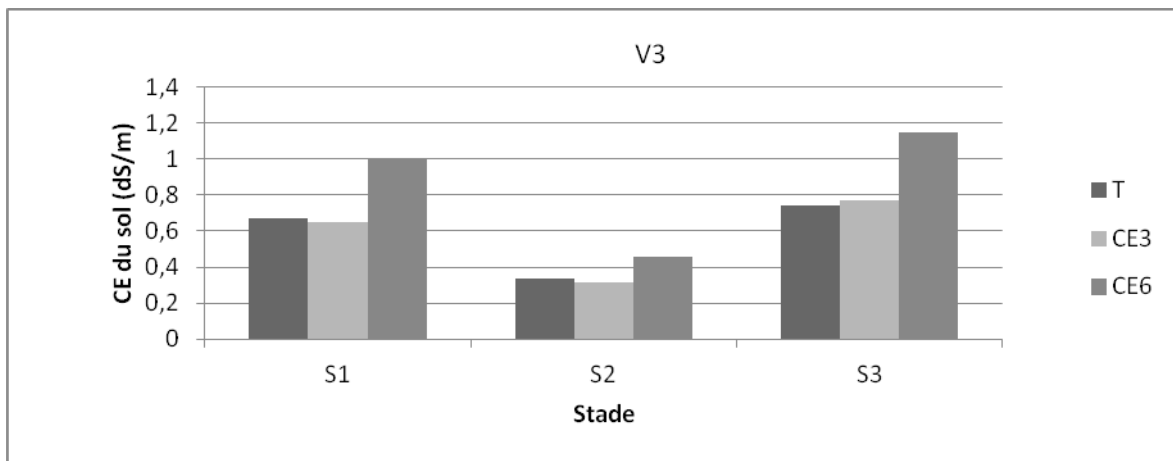


Figure 74: Evolution de la CE du sol pour la variété QM1113 (3).

pH du sol

Le pH du sol diminue du stade 1 au stade 2 pour la variété QS 0938 sous les traitements T et CE3 tandis que sous le traitement CE6, le pH augmente du stade 1 au stade 3. Par contre chez les variétés QM 1113 et D 0708, le pH a tendance à augmenter du stade 1 au stade 2. Le pH du sol sous traitement T de la variété QM 1113 diminue du stade 1 au stade 2 pour augmenter par la suite. Chez la variété D 0708, le pH du sol sous traitement T et CE3 augmente du stade 1 au stade 3.

Statistiquement, au stade 1, il y a une influence significative ($p < 0,038$), au stade 3 une différence est hautement significative ($p < 0,001$) des traitements sur l'évolution du

pH du sol par rapport aux variétés au profit de la variété D0708 sous traitement 6. Mais en général cette variation reste faible pour toutes les variétés.

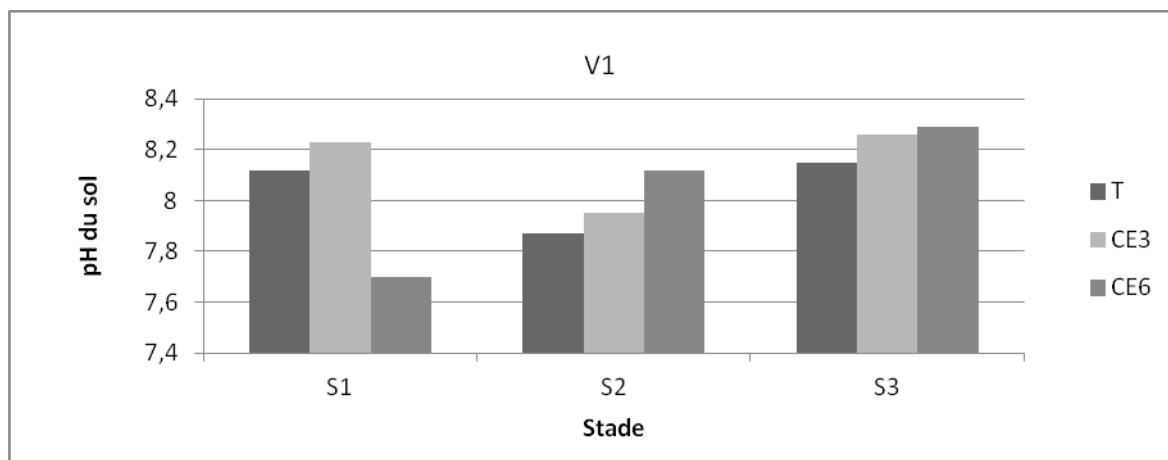


Figure 75: Evolution du pH du sol pour la variété QS0938 (1).

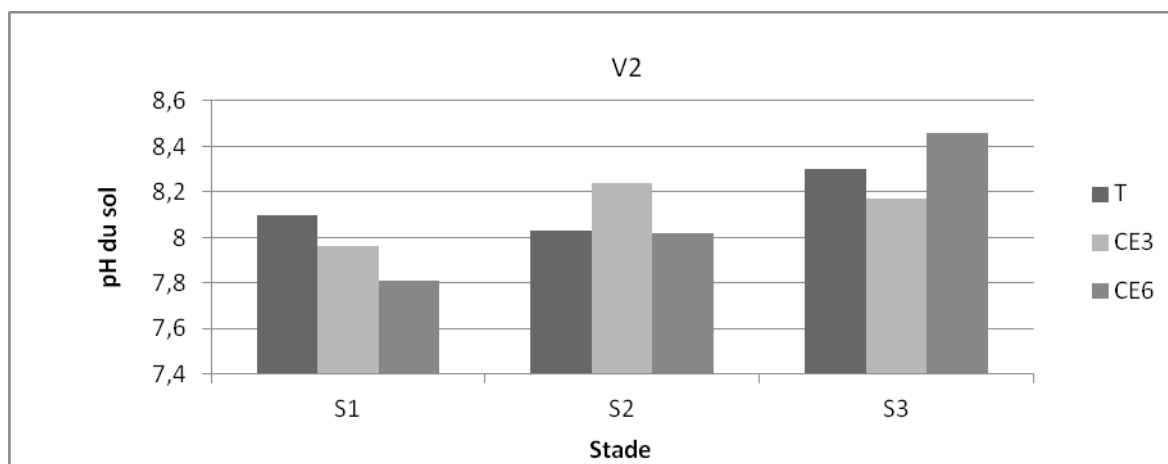


Figure 76: Evolution du pH du sol pour la variété D0708 (2).

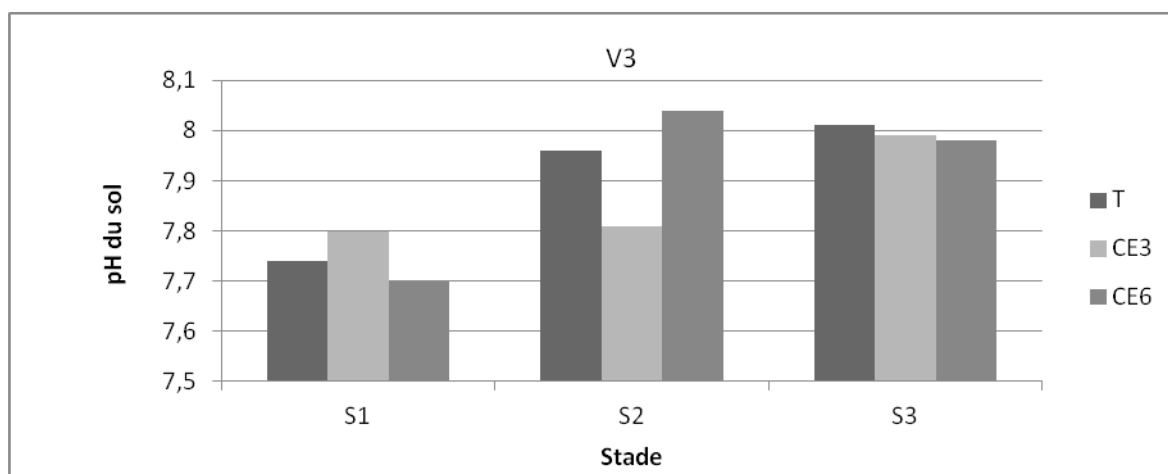


Figure 77: Evolution du pH du sol pour la variété QM1113 (3).

Teneur en sodium dans le sol

La teneur en sodium dans le sol de la variété QS 0938 et D 0708 présente la même allure sous les 3 traitements. La teneur en sodium commence par décroître dans le sol du stade 1 au stade 2 pour ensuite augmenter au maximum jusqu'au stade 3. Chez la variété QM 1113, la teneur diminue d'abord sous traitement CE6 jusqu'au stade 2 la teneur maximale est atteinte stade 3. Sous le traitement CE3 et T, la teneur croit progressivement jusqu'au stade 2 et régresse.

Statistiquement, la différence de teneur n'existe qu'au stade 2 en faveur de la variété QM 1113 sous le traitement T suivi de la variété QS 0938 sous le traitement CE3.

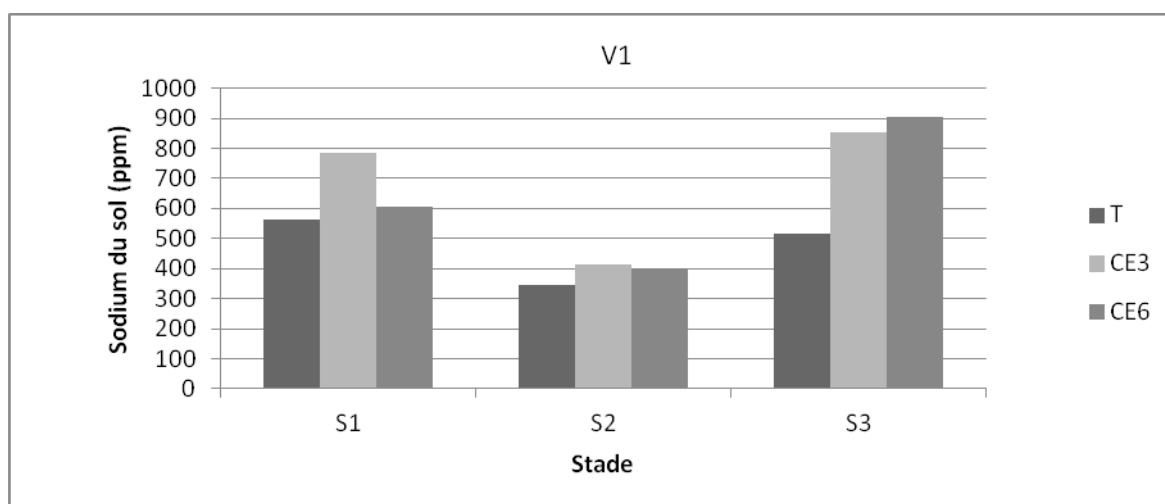


Figure 78: Evolution de la concentration du sodium dans le sol pour la variété QS0938 (1).

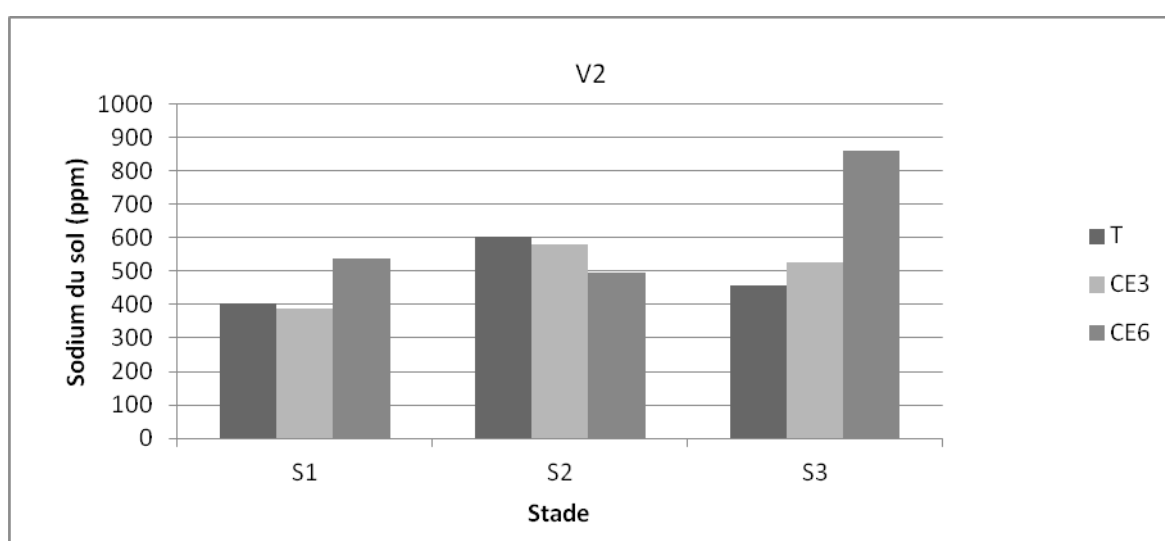


Figure 79: Evolution de la concentration du sodium dans le sol pour la variété D0708 (2).

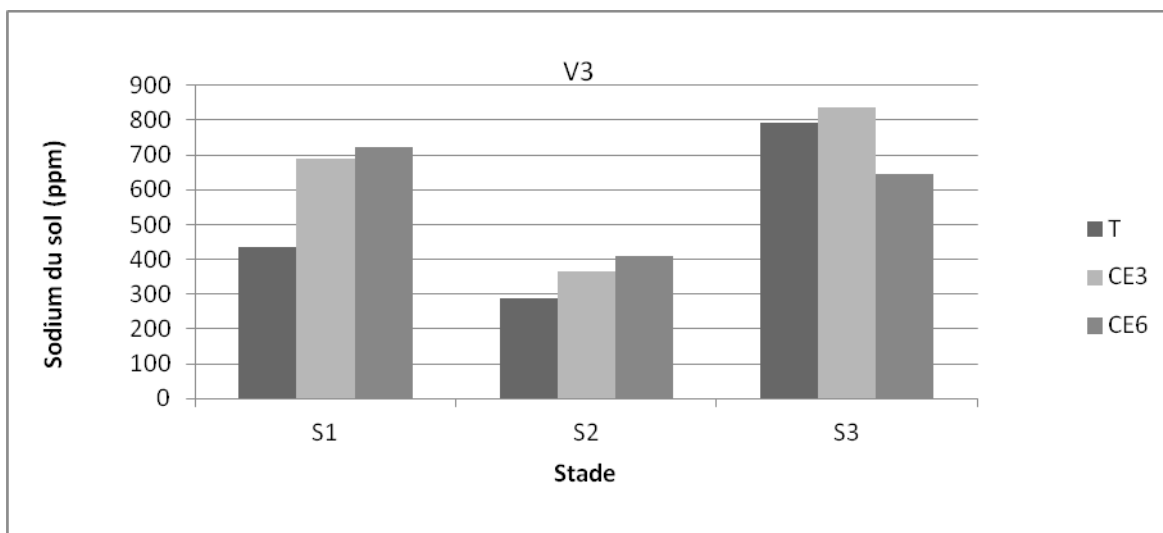


Figure 80: Evolution de la concentration du sodium dans le sol pour la variété QM1113 (3).

Teneur en chlore dans le sol

Le teneur en chlore dans le sol était en général élevé pour le traitement CE6 pour toutes les variétés. L'évolution dans le temps a connu une diminution progressive d'un stade à un autre pour toutes variétés et tous les traitements avec une concentration élevée pour la variété QS0938 au stade 3.

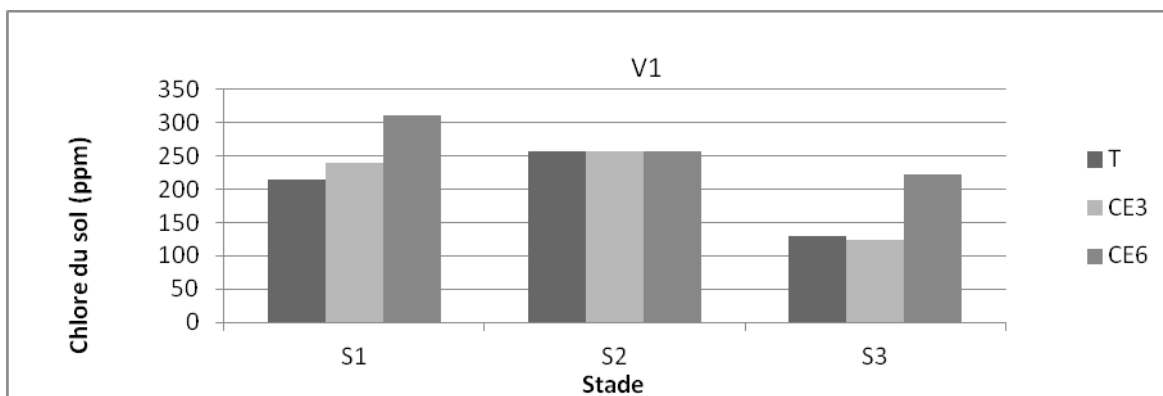


Figure 81: Evolution de la concentration du chlore dans le sol pour la variété QS0938 (1).

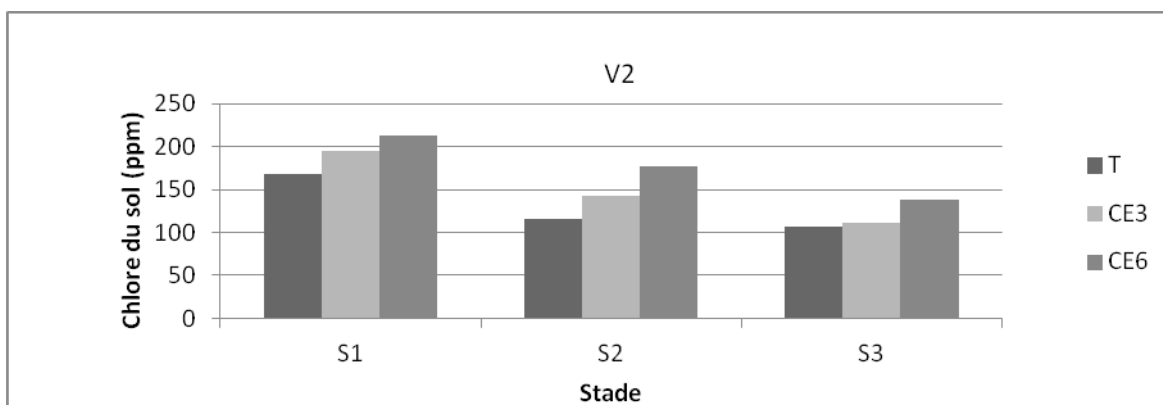


Figure 82: Evolution de la concentration du chlore dans le sol pour la variété D0708 (2).

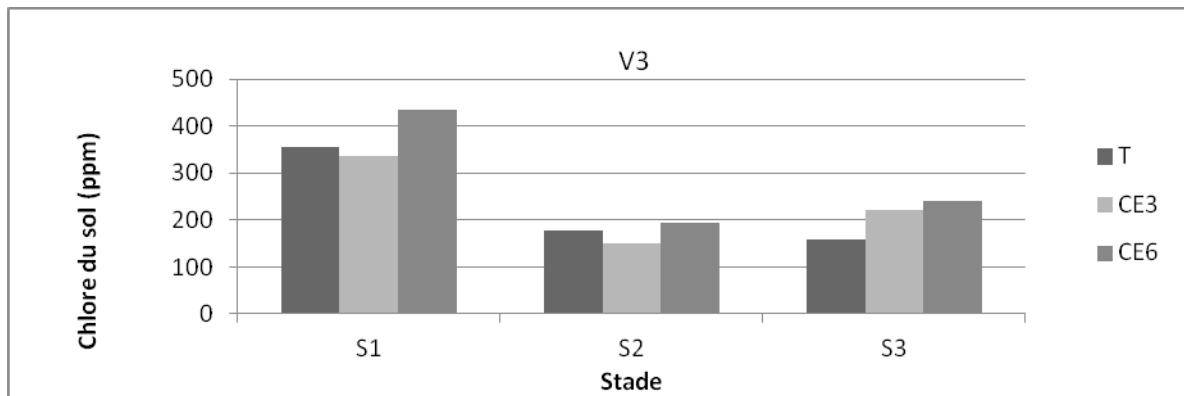


Figure 83: Evolution de la concentration du chlore dans le sol pour la variété QM1113 (3).

Analyses foliaires

Teneur en sodium

Pour la variété QS 0938, la teneur des feuilles en sodium sous les différents traitements évolue dans le même sens. Les plus faibles teneurs en sodium sont obtenus au stade 2 avec une moyenne 0,14%, 0,19% et 0,22% respectivement pour les traitements T, CE3 et CE6. Pour la variété QM 1113, les teneurs en sodium sous le traitement T et 3 diminue du stade S1 au stade S2 pour atteindre respectivement leur maximum et minimum, soit 0,25% et 0,18%.

La variété D 0708 présente quand à elle pour la teneur en sodium, la même allure sous les 3 traitements. On observe une décroissance du stade 1 au stade 2 où on obtient les plus faibles teneurs 0,09%, 0,06% et 0,09% pour les traitements T, CE3 et CE6. Statistiquement, il y a une différence significative au stade 1 ($p < 0,013$), une différence hautement significative au stade 2 ($p < 0,000$) et une différence significative au stade 3 ($p < 0,022$) au profit de la variété QM 1113.

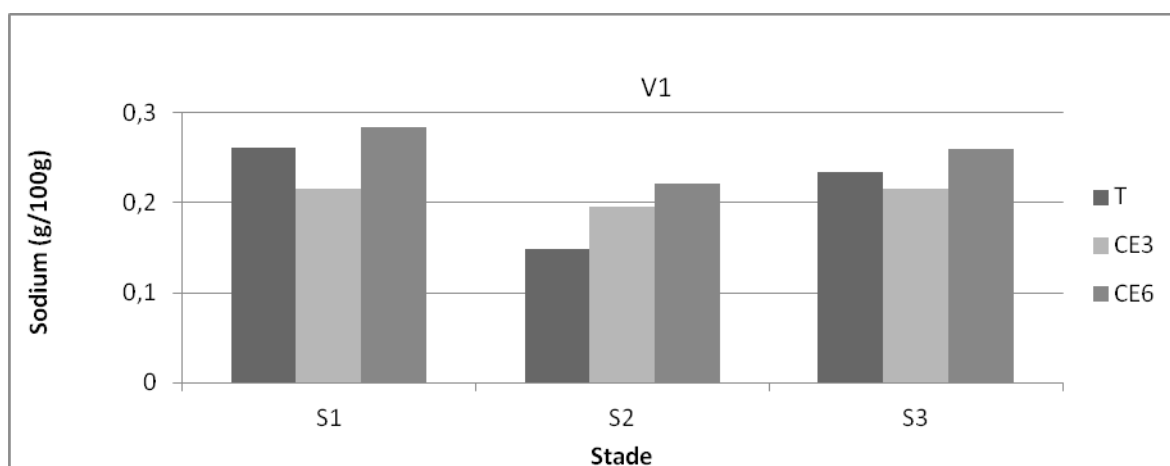


Figure 84: Evolution de la concentration du sodium foliaire pour la variété QS0938 (1).

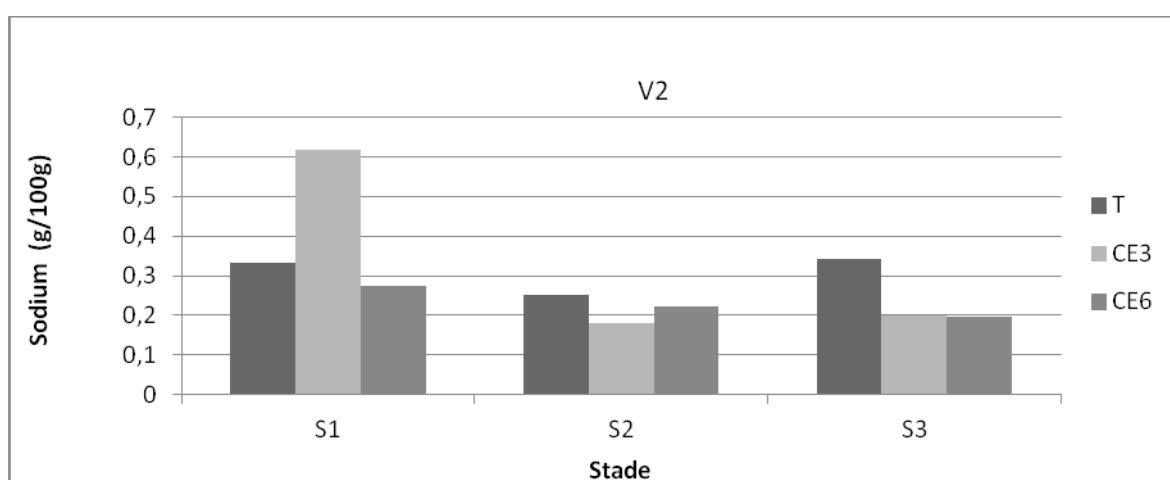


Figure 85: Evolution de la concentration du sodium foliaire pour la variété D0708 (2).

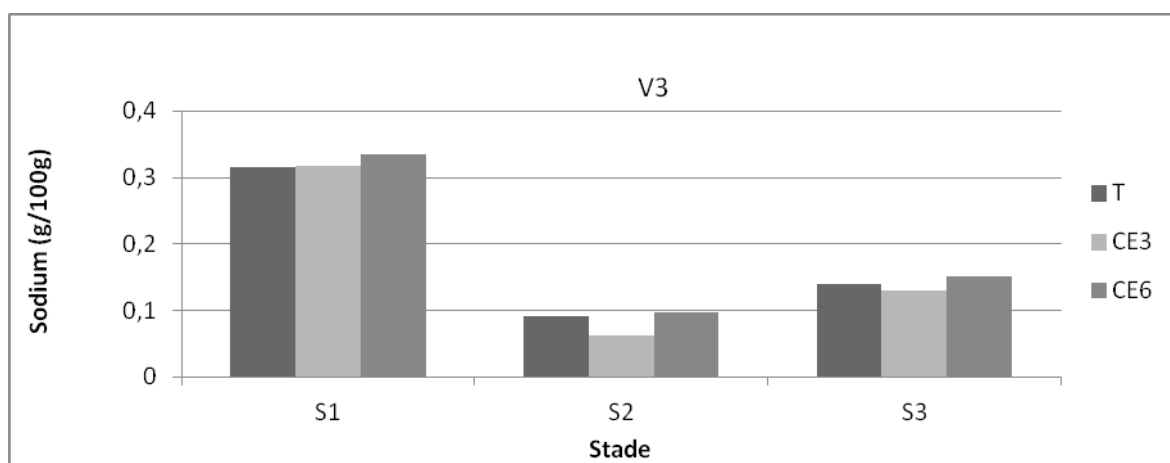


Figure 86: Evolution de la concentration du sodium foliaire pour la variété QM1113 (3).

Teneur en chlore

La teneur des feuilles en chlore pour la variété QS 0938, sous les différents traitements évolue de la même façon. Elle monte du stade 1 au stade 2 pour se stabiliser relativement entre les stades 2 et 3. Cette évolution ressemble à celle observée chez les deux autres variétés. La valeur la plus élevée de la teneur en chlore a été enregistrée pour la variété QS 0938 au stade 2 et qui est de 0,62 % pour le traitement CE3 alors que celle-ci a été élevée pour la variété QM1113 au stade 2 mais pour le traitement CE6 avec une valeur de 0,65 %.

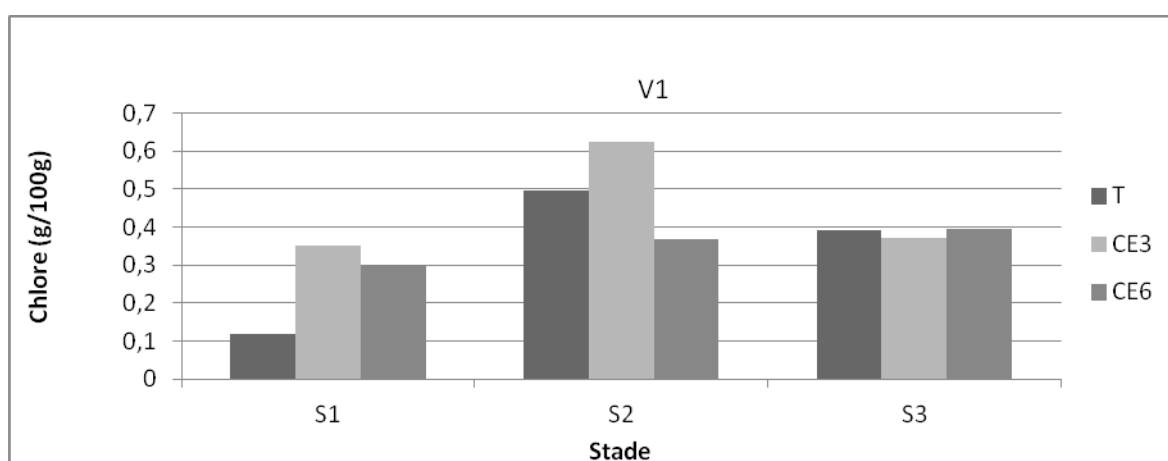


Figure 87: Evolution de la concentration du chlore foliaire pour la variété QS0938 (1).

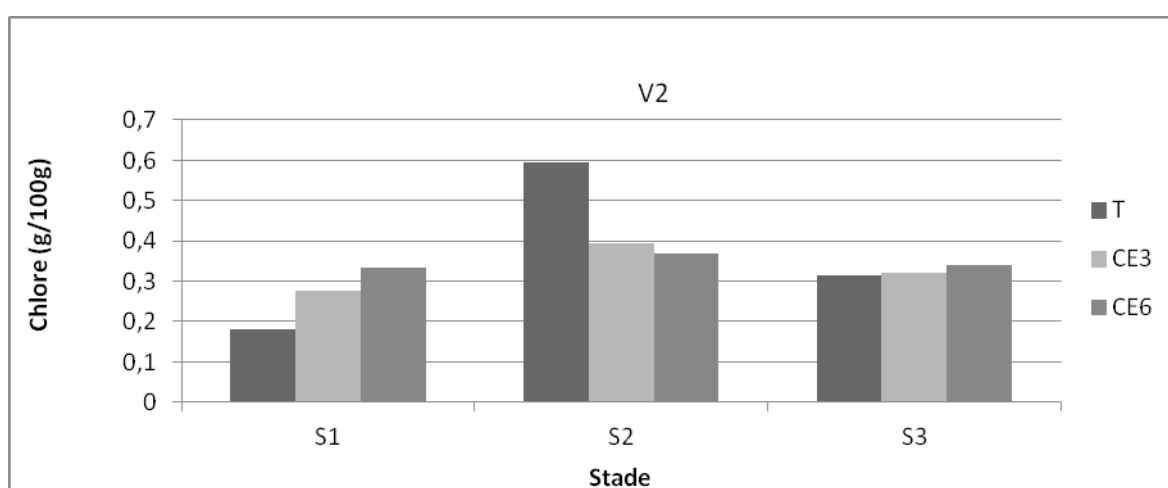


Figure 88: Evolution de la concentration du chlore foliaire pour la variété D0708 (2).

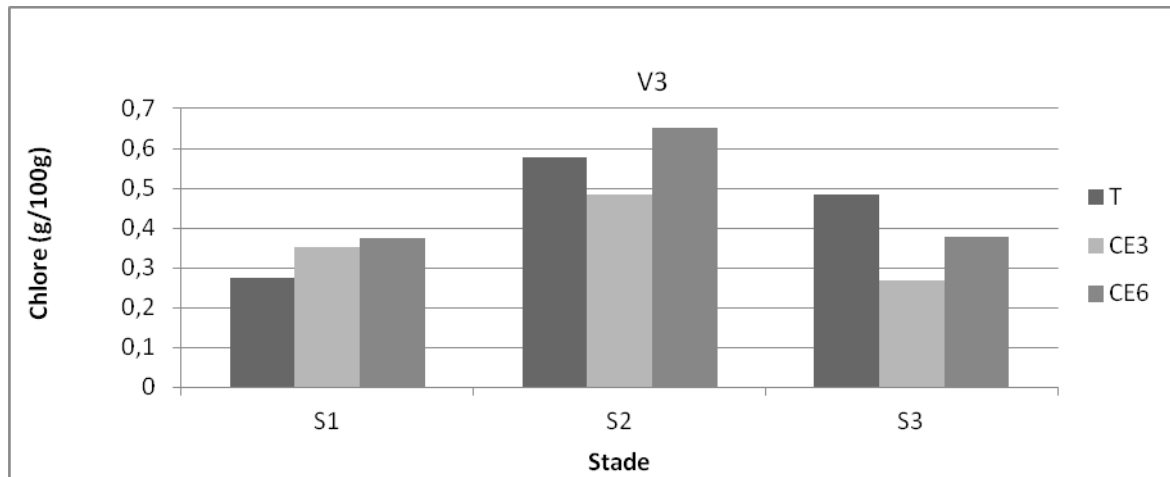


Figure 89: Evolution de la concentration du chlore foliaire pour la variété QM1113 (3).

Teneur en phosphore

L'analyse statistique a révélé une différence significative de la teneur en phosphore ($p < 0,031$) en faveur de la variété D0708, au niveau du stade 1. Les plus grandes valeurs y ont été enregistrées par la variété QM 1113 sous le traitement CE3 avec une moyenne de 0,87 % suivi de la variété D 0708 sous le traitement T avec une moyenne de 0,86 %. Pour la variété QS 0938, la teneur en phosphore évolue de la même manière pour les 3 traitements. Les teneurs les plus faibles sont enregistrés au stade 1 et vont évolués pour atteindre leur maximum au stade 3. La variété QM 1113 présente une évolution différentes en ce qui concerne le traitement CE3 et CE6, la plus petite teneur y a été enregistré pour le traitement CE3 ce qui pourrait se traduire par un problème de mobilisation du phosphore du sol vers les feuilles. Pour la variété D 0708, l'évolution du phosphore sous le traitement T est similaire a celle de traitement CE3 avec une diminution du phosphore du stade 1 au stade 2 et augmentation de la quantité dans les feuilles au stade 3. Le traitement CE6 présente une allure différente, la courbe décroît du stade 1 jusqu'au stade 3.

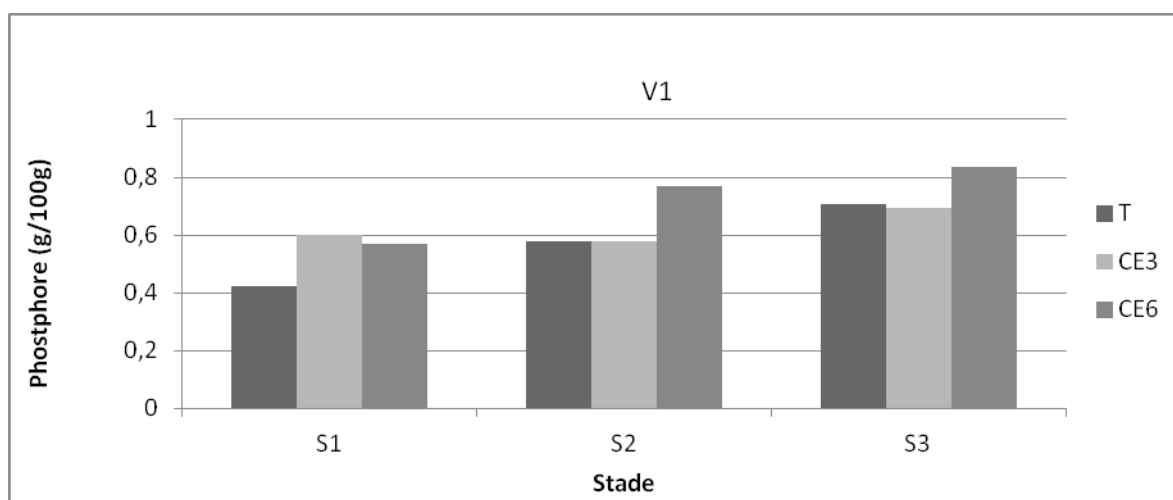


Figure 90: Evolution de la concentration du phosphore foliaire pour la variété D0708 (2).

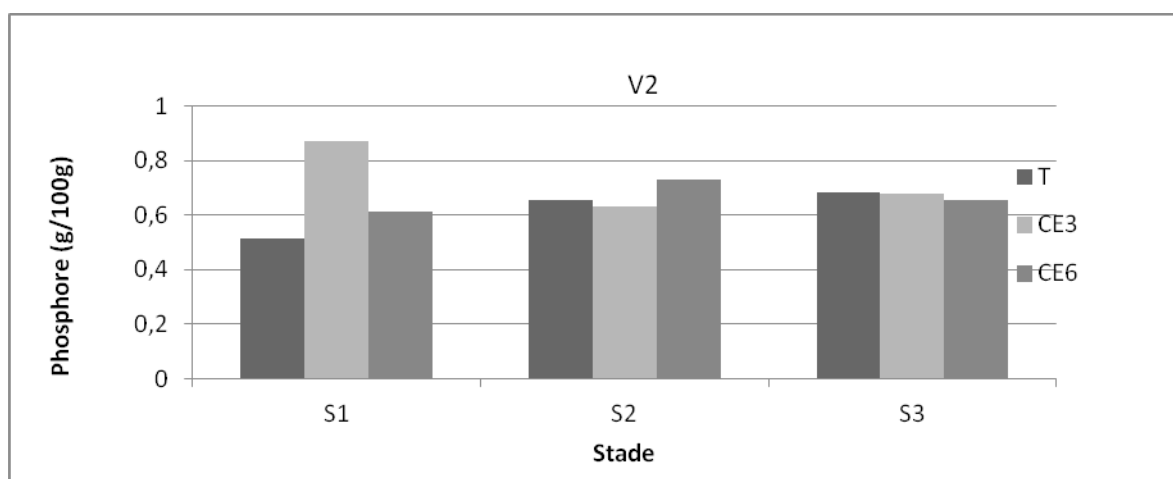


Figure 91: Evolution de la concentration du phosphore foliaire pour la variété D0708 (2).

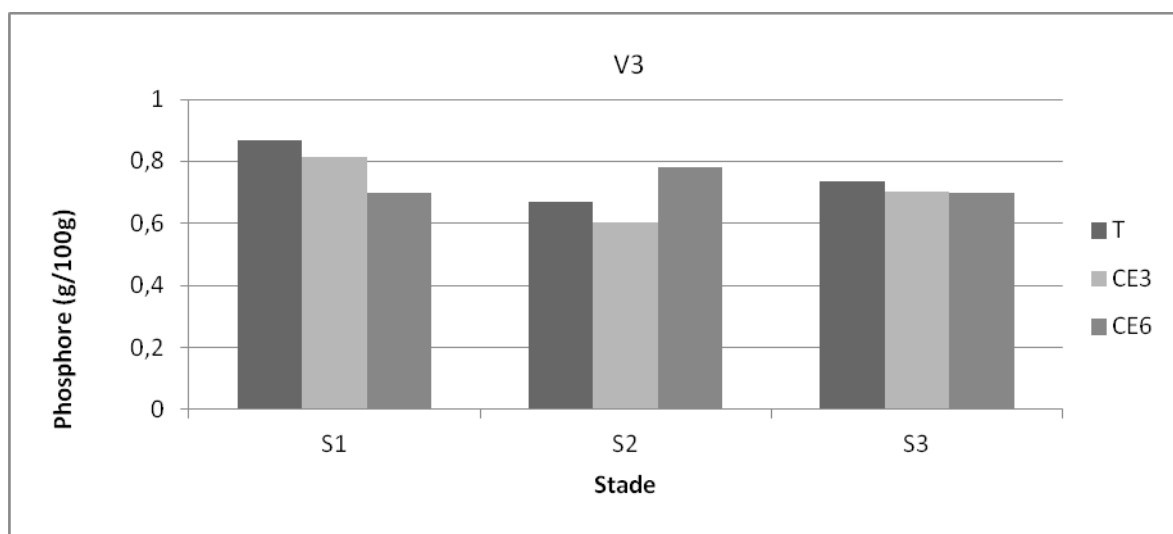


Figure 92: Evolution de la concentration du phosphore foliaire pour la variété QM1113 (3).

Rendement

L'analyse a révélé une différence significative ($p < 0,039$) au niveau du rendement au profit de la variété 3 avec une moyenne de 6.92 T /ha sous le traitement CE6 suivi de la variété 2 avec une moyenne de 5.65 T /ha sous le traitement T. En effet, la variété QM 1113 a montré un comportement très tolérant au stress salin vu le rendement élevé obtenu.

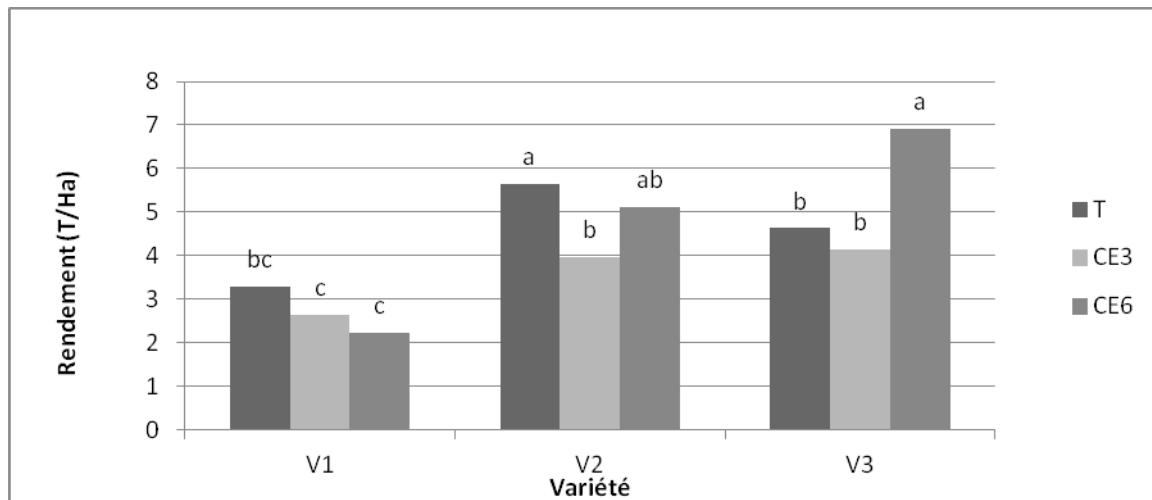


Figure 93: Evolution du rendement en graines par traitement et par variété.

Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Jacobsen *et al.*, (2000) lors d'une de leur expérience sur le quinoa au Pérou en utilisant l'eau d'irrigation conventionnelle. Il s'est avéré que certaines des caractéristiques qu'ils ont mesurées, comme la surface foliaire, la production de biomasse et le rendement en graines ont montré les meilleures réponses en conditions salines comprise entre 10 et 20 dS/m. La qualification donnée au quinoa comme étant une culture très tolérante à la salinité selon Tanji and Kielen, 2002 est confirmée. Ce-ci est expliqué par le fait que le quinoa a démontré la capacité d'accumuler des ions de sel dans ses tissus pour contrôler et ajuster le potentiel hydrique foliaire. Cela permet aux plantes de «maintenir la turgescence des cellules et la transpiration limitée dans des conditions salines, évitant ainsi des dommages physiologiques à la sécheresse ou la mort (Jacobsen *et al.*, 2000). Dans le cas de la présente étude, la différence est la performance significative du quinoa obtenue en utilisant des eaux non conventionnelles.

Conclusion

Dans le contexte de la rareté de l'eau et de recherche de nouvelles ressources en eau, ce travail visait à surveiller le comportement des trois variétés de quinoa sous différents niveaux de la salinité des eaux usées traitées. Les effets de la salinité sur les aspects agronomiques et pédologiques ont été comparés entre les variétés de quinoa.

La salinité avait de faibles effets sur tous les paramètres de croissance. En termes de croissance, une augmentation du niveau de salinité de l'eau d'irrigation réduit légèrement la hauteur de la plante, la surface foliaire, le poids frais et sec mesuré au stade végétatif, au stade floraison et maturité. En fait, la réduction de croissance entraîne une réduction faible du rendement pour toutes les variétés testées lorsque les niveaux de la CE augmentent. Par conséquent, l'analyse a révélé une différence significative dans les performances au profit de la variété QM 1113, avec une moyenne de 6,92 t/ha sous traitement CE6 suivie de la variété D 0708, avec une moyenne de 5,65 t/ha sous le contrôle T. Néanmoins, les rendements obtenus, même avec l'application du traitement CE6, sont relativement plus élevés en comparaison avec ceux obtenus dans des conditions normales de culture.

La culture du quinoa a montré une meilleure performance sous l'utilisation des eaux usées traitées. En effet, cette culture peut être l'objet d'une recherche approfondie afin de l'introduire dans le système de culture de la région du Souss Massa comme région semi-aride. Dans ce sens un travail d'introduction du quinoa dans le système de culture dans la région au côté de céréales et de légumineuses a été réalisé dans ce but et sera présenté dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

Chapitre IV- Introduction du Quinoa comme nouvelle culture dans le système de rotation avec l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation

Résumé—Ce travail a été conduit à la station expérimentale de l'IAV Hassan II-CHA-Agadir au sud ouest du Maroc entre 2010 et 2012. Il visait à évaluer les effets de l'utilisation des eaux usées traitées sur les propriétés du sol et les paramètres agronomiques en adoptant une rotation de cultures introduisant le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) comme nouvelle culture dans un climat semi-aride. La production de biomasse, le rendement, le niveau de la conductivité électrique et des nitrates du sol sont les paramètres suivis durant les trois saisons de cultures. Les résultats obtenus montrent que le quinoa avait un comportement performant quand est elle précédée par la culture de la fève en matière d'efficience d'utilisation d'eau et aussi l'enregistrement du niveau le plus bas d'accumulation de sels dans le sol en comparaison avec les combinaisons Fève>quinoa et jachère>quinoa. Concernant la croissance et la production, il s'est avéré que la culture du quinoa après le pois chiche était plus bénéfique en termes de productivité en biomasse et en rendement.

Mots-clés —Quinoa, rotation des cultures, sol, biomasse, rendement, climat semi-aride et eaux usées traitées.

Abstract—This work was conducted at the experimental station of the IAV Hassan II-CHA-Agadir in southwest Morocco between 2010 and 2012. It aimed to assess the effects of the use of treated wastewater on soil properties and agronomic parameters by adopting crop rotation introducing quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as a new crop under semi-arid climate. Biomass production, yield, nutrient accumulation in crop's leaves and the level of electrical conductivity and soil nitrate are the monitored parameters during the three growing seasons. Results show that quinoa proved a promising behavior when it is preceded by the culture fabae bean in term of water use efficiency and also recording to the lowest level of salt accumulation in the soil in comparison with the combinations bean> quinoa and fallow> quinoa. For growth and yield, it was found that after growing quinoa chickpea was more advantageous in terms of biomass productivity and yield.

Keywords—Quinoa, crop rotation, soil, biomass, yield, semi-arid climat and treated wastewater.

INTRODUCTION

Le quinoa en raison de sa haute valeur nutritive et sa grande adaptabilité à des environnements divers, cette culture a été considérée comme une culture prometteuse pour les terres marginales et les régions semi-arides et les perspectives d'avenir de la culture, qui est tolérante au sel et avec des géotypes à rendements élevés, sont très encourageantes. (Bhargava *et al.*, 2006). En fait, il s'agit d'une culture prometteuse pour pouvant être introduite dans le système de rotation avec d'autres cultures telles que les céréales et les légumineuses et aussi dans le but d'avoir une diversification des cultures.

La diversification des cultures avec des légumineuses est envisagée comme une partie intégrante de la stratégie de la production alimentaire mondiale pour corriger les carences en nutriments (micro) et en protéines (FAO, 1997). Ils sont également appréciés pour leur rôle dans l'amélioration de la fertilité des sols et de l'eau et de la productivité des cultures suivantes (Ali *et al.*, 2000).

La faisabilité d'un système de rotation des cultures ou des systèmes recommandés pour une région est étroitement liée à la rentabilité des cultures impliquées dans ce système. Par conséquent, les systèmes de rotation des cultures prévues afin d'obtenir une augmentation de la production dans une longue période ne peut pas répondre à la demande des producteurs qui donnent la priorité à leur revenu annuelle. C'est pourquoi les systèmes appropriés de rotation des cultures ne peut être largement utilisé dans les zones agricoles à cultures-multiples (Dogan *et al.*, 2008).

A partir des différents états cités ci-dessus, ce travail vise à évaluer les effets de l'utilisation des eaux usées traitées sur les propriétés du sol telles que la salinisation des sols et la présence de constituants indésirables (nitrates) et des paramètres agronomiques de la culture cultivée en adoptant la rotation des cultures introduisant le quinoa comme une nouvelle culture. Ainsi, ce travail est une partie d'une série de recherche impliquée dans la recherche de solutions pour la gestion de l'eau dans des conditions de pénurie d'eau en introduisant de nouvelles cultures prometteuses en terme de valeur nutritive et de tolérance à la salinité et à la sécheresse dans une région semi-aride comme Souss Massa.

Présentation des cultures

Maïs doux (*Zea mays sacharata*)

Origine, systématique et morphologie

Le maïs doux est originaire de l'Amérique du nord (Skiredj *et al.*, 2003). Il appartient à la famille des poacées (graminées), sous famille des panicoidées, tribu des maïdées et genre *Zea*. C'est une plante annuelle, monoïque (comme le melon) (Baya, 2008).

Le maïs doux est une plante de grande taille, à limbes développés. Les plantes possèdent des épillets males en grappes spiciformes réunis sur une panicule terminale étalée et des inflorescences femelles insérées à l'aisselle des feuilles, dans lesquelles les épillets sont alignés en rangées, et sont portés sur un rachis presque ligneux épaissi. L'ensemble de la structure (épi) est enveloppée dans de nombreuses bractées foliacées développées (spathes), et une masse de longs stigmates s'échappe au sommet des spathes en une touffe de filaments (soies). Les racines sont de deux types : séminales et adventives. Les séminales sont les premières à se former, suivies des adventives, qui prennent la forme de couronnes à partir des entre-nœuds les plus bas de la tige (Baya, 2008).

Importance de la culture

Au niveau mondial, la surface cultivée du maïs est de l'ordre de 158 Millions hectares, et la production de cette culture est de l'ordre de 792 Millions tonnes (FAOSTAT, 2007).

Tableau 11: surface cultivée et production du maïs pour les pays producteurs majeurs (FAOSTAT, 2007)

Pays	Surface cultivée (Ha)	Production (Tonnes)
États-Unis	35014640	331175072
Chine	29497391	151948870
Brésil	13767400	52112200
Inde	7770000	18960000
Mexique	7333277	23512752
Indonésie	3630324	13287527
Argentine	2838072	21755364
France	1530700	14528000
Canada	1368700	11648700

Le Maroc a produit en 2007 environ 94860 tonnes de maïs sur un total de superficie de l'ordre de 228.300 ha (FAOSTAT, 2007). Il a exporté environ 7300 tonne du maïs doux durant la campagne 2008/2009 (EACCE, 2009).

Exigences de la plante

La température optimale pour la germination des graines est de 18 °C et la température optimale de croissance est de 24 °C, avec 10 °C est le T_{min} pour la croissance et 35 °C est la T_{max} (Smith *et al.*, 2007), la plante est de saison chaude, fort exigeante en chaleur. Elle redoute les gelées, elle a les mêmes exigences que la tomate. Les températures élevées réduisent la qualité des épis formés (accélération de la transformation des sucres en amidon et passage rapide du stade laiteux au stade pâteux) (Skiredj *et al.*, 2003).

Le maïs doux prospère des sols profonds, naturellement riches. Cependant les sols bien drainants sont souhaitables. Les sols sableux sont les meilleurs pour une culture précoce parce que les sols sableux se réchauffent rapidement dans le printemps que les sols lourds, le maïs doux adapte bien à une large gamme de pH du sol, mais la croissance optimale a été obtenue dans des pH de 6 à 6,5 (Lerner et Dana, 1998).

Pour l'irrigation du maïs doux, selon une norme couramment admise, on considère que les moyens d'irrigation (débit et volume) doivent permettre de satisfaire les besoins en eau au moins 8 ans sur 10. Quand on dispose de ces moyens, la stratégie d'irrigation, c'est-à-dire le plan prévisionnel d'arrosage est construit sans craindre a priori une insuffisance de la ressource par rapport aux besoins. Selon les conditions pédoclimatiques, ce niveau des moyens en débit et en volume nécessaire est évidemment différent. Il dépend de la demande climatique et de la contribution possible des réserves en eau des sols (Deumier *et al.*, 2007).

Les besoins en eau du maïs doux s'élèvent à 520 mm, et l'efficacité d'utilisation de l'eau est d'environ 16,3 kg/mm (Al Rifaï, 2007).

Les recherches ont démontré que le maïs, comme d'autres cultures, prélève au mieux 50 % de l'azote des engrais minéraux appliqués. Une application de 180 kg/ha d'azote minéral, 56 kg/ha (31 %) de cet engrais azoté se retrouvent sous forme organique à la

suite de l'activité biologique du sol. Une importante partie de l'azote appliqué, soit 45 kg/ha (25 %), est perdue dans l'environnement. Plusieurs études ont démontré qu'au-delà du niveau de fertilisation optimale, le coefficient d'utilisation de l'azote par le maïs diminue beaucoup et le risque de pertes dans l'environnement s'accroît alors considérablement (Thibaut *et al.*, 2006).

Pois chiche (*Cicer arietinum*)

Origine, systématique

C'est au Moyen-Orient qu'on a commencé à cultiver le pois chiche, il y a environ 7000 ans. Les deux types de pois chiche produits à l'échelle commerciale sont le desi et le kabuli (Skrypetz, 2001). Le pois chiche est une plante annuelle de saison froide appartient à la famille de légumineuse, et au genre Cicer (Margheim *et al.*, 2002).

Certaines variétés du pois chiche ont des feuilles composées et autres ont des feuilles simples, les feuilles composées possèdent environ 8 à 20 folioles. La plante possède un système racinaire avec des nodules qui permettent la fixation de l'azote atmosphérique nécessaire pour la croissance, elle a une profondeur des racines efficace de 1,2 m, le pois chiche comme le blé, c'est une plante auto pollinisatrice. Les feuilles, fleurs et gousses sont poilus, les gousses contiennent une ou plusieurs graines (Corp *et al.*, 2004).

Importance de la culture

Le pois chiche est la troisième plus importante légumineuse dans le monde, environ 11 Millions d'hectares sont cultivés avec 9 Millions de tonnes de production dans le monde, il est cultivé dans plus que 45 pays dans le monde. La plante fournit des protéines de haute qualité pour les gens dans les pays en voie de développement (Goodwin, 2003). L'Inde reste le premier producteur de pois chiche dans le monde (FAOSTAT, 2008).

Le pois chiche pourrait avoir une place importante dans les systèmes de culture des zones semi-arides marocaines. Les résultats des travaux expérimentaux, de plus d'une décennie à l'INRA, ont démontré un gain de rendement allant du simple au double, et même au triple dans certains cas, par rapport à la culture traditionnelle de pois chiche de printemps. Ce gain de rendement est dû principalement à une meilleure utilisation des eaux de pluies, généralement perdues par évaporation entre les mois de novembre et

mars pour la culture de printemps, à la précocité de la récolte et au potentiel génétique des variétés (Dahan et ElHadi, 1998).

La production au niveau national a passé de 15060 tonnes en 2000 sur une superficie de 66100 Ha à 56620 Tonnes en 2010 sur une superficie de 78100 Ha avec un rendement moyen de 7.25 qx/Ha en 2010 (FAOSTAT).

Exigences de la plante

Le pois chiche se développe bien dans des conditions d'humidité adéquates et à des températures variant entre 21 °C et 29 °C le jour et proches de 20 °C la nuit. La durée de maturation dépend de la chaleur et de l'humidité disponible, mais varie entre 95 et 105 jours pour le pois desi et entre 100 et 110 jours pour le pois kabuli. Le pois chiche est adapté de façon optimale aux zones de sols bruns et brun foncé, il résiste relativement bien à la sécheresse en raison de sa longue racine pivotante, il n'est pas bien adapté aux zones de grande humidité, aux sols salins, aux sols lents à se réchauffer au printemps, ainsi qu'aux sols détrempés ou gorgés d'eau. Il est préférable de ne pas semer le pois chiche dans les terres basses, à proximité de marécages ou dans des sols à forte teneur en matière organique, afin de prévenir une maturation inégale ou prolongée (Skrypetz, 2001). Le pois chiche s'adapte aux sols assez lourds, pourvu qu'ils soient bien drainés. Comme pour les autres cultures, sa productivité sera plus faible dans les sols peu fertiles. Il tolère des pH allant de 6 à 9 (Dahan et M. ElHadi, 1998)

Le pois chiche est mieux adapté aux apports faibles d'eau. La consommation d'eau du pois chiche dépend de l'humidité du sol et le niveau du rendement de 110 à 280 mm pour un rendement en graine de 900 et 3000 kg/ha. Le pois chiche nécessite 15 % de l'humidité du sol par volume de la zone racinaire, le pois chiche prend ses besoins en eau de l'humidité conservée dans les sols profonds (plus de 150 cm de profondeur), par conséquent l'humidité extractible dans les profils du sol peut être augmenté par une gestion des pratiques qui encourage la croissance des racines utilisant des géotypes avec des systèmes racinaires plus développés (Singh et Diwakar, 1995)

Le Coefficient cultural (Kc) est de 0,4 durant le stade initial, 1 durant le stade floraison et remplissage des graines et 0,35 durant la sénescence (Allen *et al.*, 2000)

Dans les sols où le pois chiche est habituellement cultivé, le *Rhizobium* sp est généralement présent en quantité suffisante, et il n'y a pas de besoin d'inoculer. Le pois chiche d'hiver peut donc satisfaire ses besoins en azote jusqu'à 80%, selon l'alimentation hydrique. L'aptitude de la plante à fixer une grande partie de son azote permet d'éviter les apports d'azote. Néanmoins, nous recommandons l'apport supplémentaire de 10 à 20 kg N/ha au semis.

Dans les sols pauvres à moyennement pourvus en phosphore (3.4 à 5.5 ppm P), on recommande un apport de 40 à 60 kg P2O5/ha. Ceci améliore le rendement, la taille des graines et la nodulation (Dahan et ElHadi, 1998).

Fève (*Vicia fabae* L.)

Origine, systématique et description

Décrite par Linné en 1753, la fève *Vicia faba* L. (*broad bean* en anglais) est une plante dicotylédone herbacée originaire d'Asie ou du Moyen-Orient. Sa culture est très ancienne et pratiquée dans le monde entier. La plante appartient à la famille des Fabaceae, il en existe 2 sous-espèces, *paucijuga* et *eu-faba*. Dans la sous-espèce *eu-faba*, 3 variétés différentes sont dénombrées (Gallais and Bannerot 1992):

- *Vicia faba major*, la fève maraîchère à grosses graines destinées à la consommation humaine ;
- *Vicia faba minor*, la petite fève ou féverole utilisée pour l'alimentation du bétail ;
- *Vicia faba equina*, la fève à cheval à graines moyennes aussi appelée féverole ou févette dans certaines régions. Comme son nom l'indique elle est également destinée à l'alimentation du bétail.

La plante est composée d'une tige longue, creuse et anguleuse, de feuilles alternes, composées et pennées ; elles ont de 2 à 6 folioles disposées irrégulièrement de chaque côté du pétiole. Les fleurs de la fève sont groupées en nombre variant entre 2 et 6, formant des grappes. Elles sont portées par de courts rameaux à l'aisselle des feuilles. Les fleurs sont de couleurs blanches ou rosées, tachées de noir. Le fruit est une gousse charnue, suivant la variété, de longueur très variable (4 à 30 cm) ; d'abord vert,

l'épiderme de la gousse devient noir à maturité. La gousse contient plusieurs graines de dimensions et de couleur différentes selon la variété (MARA, 1967).

Importance de la culture

Cette espèce (*Vicia fabae* L.) est rencontrée dans toutes les régions du Maroc. La fève est consommée en vert ou en graines sèches. C'est une culture de saison froide qui est cultivée dans les zones intérieures du pays. La graine est riche en phosphore, en vitamine C, en protéines et en énergie (Skiredj *et al.*, 2007).

Les fèves sont produites au Maroc pour la consommation humaine et pour l'alimentation animale. Elles sont parfois utilisées comme cultures de couverture ou engrais vert. Elles occupent 40 à 45% de la SAU couverte par les légumineuses alimentaires, soit environ 200.000 Ha (Bennasseur, 2008).

La production de fèves sèches au niveau national est passé de 32600 tonnes en 2000 sur une superficie de 137000 Ha à 149380 Tonnes en 2010 sur une superficie de 196900 Ha avec un rendement moyen de 7.59 qx/Ha en 2010 (FAOSTAT).

La fève, en tant que légumineuse, a trois fonctions principales dans un système de culture: 1) Une nutrition humaine et animale riche en protéine, 2) la fourniture de N au système via la fixation symbiotique de N₂, et 3) la diversification du système de culture via la réduction des obstacles de croissance et de rendement pour les autres espèces dans la rotation (Jensen *et al.*, 2010).

Exigences de la plante

La fève préfère des sols limoneux argileux bien drainant. Les sols sableux exigent une fréquence élevée d'apport d'eau. Le pH optimal du sol est de 5,5 et 6,5 (Skiredj *et al.*, 2007). Elle craint les sols très secs, légers ou peu profonds dans lesquels elle ne produit généralement que des gousses courtes et de graines mal venues. Une culture de fève ne devra jamais être entreprise sur un sol infesté d'orobanche.

La culture étant de saison froide, elle présente de faibles exigences en chaleur. Les fortes températures en période de nouaison ou de grossissement des graines sont néfastes et résultent en des gousses vides (Skiredj *et al.*, 2007). Elle meure à -4°C (Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire, direction de la recherche

agronomique, 1967). Elle est sensible au manque d'eau et exige une alimentation hydrique régulière supérieure à 350 mm/an (Bennasseur, 2008).

La règle générale à suivre dans la gestion des éléments fertilisants est de compenser leur exportation par la culture. Il est admis qu'une tonne de graines de fève exporte environ 4 kg de phosphore, 10 kg de potassium, 1,5 kg de soufre, et 1,3 kg de calcium. Connaissant le rendement objectif réaliste, on peut estimer les apports (Bennasseur, 2008).

Chez la culture de fève, qui est une légumineuse fixatrice de l'azote atmosphérique, aucun apport azoté n'est nécessaire. Cependant, un apport initial d'environ 20 unités d'azote/ha, soit environ 50 kg/ha d'urée ou 60 kg/ha d'Ammonitrate au début du cycle favorise le démarrage de la culture avant que l'azote atmosphérique ne soit disponible à la plante à travers les nodosités (Bennasseur, 2008). Environ 30 kg/ha de soufre sont recommandés pour des sols sablonneux bien drainés. Cependant, rien ne remplacera des analyses de sol pour une meilleure gestion des carences en cet élément (Bennasseur, 2008).

Karamanos (1991) estime que les besoins en eau de la culture de fève sont relativement importants. Bien que la fève soit généralement conduite en "Bour", elle répond bien aux apports d'eau. L'humidité du sol doit être maintenue au dessus de 50% de la capacité au champ sur les premiers 30 cm du profil. Pour une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation, il est préconisé de procéder à des irrigations pendant les phases critiques chez la fève. Ces phases correspondent au début de la ramification, la floraison, et le remplissage des graines (Bennasseur, 2008).

Petit pois (*Pisum sativum* L.)

Origine, systématique et description

Le petit pois (*Pisum sativum* L.) fait partie des légumineuses cultivées appartenant à la famille des Fabaceae (Griga et Novak 1990). Des preuves archéologiques indiquent qu'il a été cultivé en Est et pendant la période grecque néolithique dès 6000 AJ (Zohary and Hopf 1973). L'aire de répartition de toutes les sous-espèces des pois sauvage se trouve au

Moyen-Orient mais originaires de l'Asie du nord-ouest. Ce fut aussi le principal centre de distribution des pois cultivés en Europe et en Asie du Sud (Tiwari, 1998).

Importance de la culture

La valeur économique du petit pois est primordialement due aux compositions chimiques de ces graines. Ces graines contiennent, en fonction de la variété et de l'environnement de culture, 18-35% de protéines, 20-50% d'amidon, 4-10% de sucres, 0,6-1,5% de lipides, 2-10% de cellulose, 2-4% de minéraux et 9-15% d'eau (Sumner *et al.*, 1980). Comme d'autres légumineuses à graines, en raison de la symbiose avec des bactéries fixatrices d'azote, les petits pois accumulent jusqu'à trois fois plus de protéines que les céréales. Les graines de cultivars de pois contiennent généralement 22-28% de protéines. En plus, par rapport aux céréales et aux autres légumineuses, les petits pois ont des protéines de meilleure qualité. D'autre part, ils contiennent tous les acides aminés essentiels qui sont importants pour l'organisme vivant (Matthews and Arthur 1985). Puisque ces graines sont riches en protéines, quantité et qualité, il est une ressource importante de protéines à la consommation humaine, en particulier dans les pays en développement (Saskatchewan Pulse Grower, 2000).

Du point de vue agronomique, les plantes de petit pois dans la rotation des cultures offre de nombreux avantages pour le sol et pour les cultures suivantes. Comme une culture fixatrice d'azote, elle peut améliorer la fertilité des sols et de réduire les apports d'engrais. La quantité d'azote fixée par le petit pois sous une série de conditions au Royaume-Uni était de 71 à 119 kg de N/Ha (Davies *et al.*, 1985) et en Nouvelle-Zélande était de 17-83 kg N/Ha (Askin *et al.*, 1985). L'azote fixé peut fournir environ 75% de l'azote nécessaire à la plante de petit pois, de plus l'azote de la plante de pois est accumulé dans les graines. L'azote qui reste dans les résidus végétaux peut être libéré sous une forme disponible lorsque les résidus végétaux se décomposent et peuvent être absorbée par les cultures successives (Saskatchewan Pulse Grower, 2000).

La production de petit pois vert au niveau national a passé de 36090 tonnes en 2000 sur une superficie de 10745 Ha à 140319 Tonnes en 2010 sur une superficie de 17547 Ha avec un rendement moyen de 8 T/Ha en 2010 (FAOSTAT).

Exigences de la plante

Le pois est une culture de saison fraîche et est largement cultivé dans les zones tempérées froides et dans les hautes terres des régions tropicales du monde. *Rhizobium leguminosarum* peut infecter les racines formant des nodules qui sont capables de fixer l'azote atmosphérique.

L'optimum de croissance est de 13- 18 °C (la croissance commence à 4 °C). La plante résiste au gel s'il ne dure pas plusieurs jours; c'est une plante de jours longs. Les hautes températures réduisent la qualité des gousses. La forte humidité de l'air est préjudiciable à la culture: plusieurs maladies cryptogamiques se développent et freinent le développement de la culture. Les régions à fortes pluviométrie ne conviennent pas à la culture. La plante a de faibles exigences en sol. Cependant un sol sableux est toujours plus préféré qu'un sol lourd qui draine mal et présente des difficultés d'aération. Le pH optimum du sol est de 5,5-6,8. La culture tolère une carence prolongée en Mg. Elle répond bien à un apport de Mn. Elle craint la salinité. Elle a de faibles exigences en Cu et en bore (Skiredj *et al.*, 2007).

Matériel et méthodes

Lieu

Le travail a été réalisé au niveau de la station expérimentale de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Complexe horticole d'Agadir situé à 2 km d'Ait Melloul, à 17 km de la ville d'Agadir sur la route principale N° 32 allant vers Taroudant. De latitude 30°36' Nord, longitude 9°36' et de l'altitude 32m.

Matériel végétal et plantation

La variété de quinoa cultivée est la D0708. Pour la fève, la variété choisie est la Reine Mora, c'est une variété précoce, vigoureuse et très productive. Le maïs est un de type doux et la variété plantée est Overland. Le pois chiche planté est de type local.

Les schémas suivant décrivent la disposition temporaire des cycles de cultures durant les trois saisons de culture entre 2010 et 2012.



Figure 94 : Disposition temporaire de l'installation des cultures pendant la saison 2010

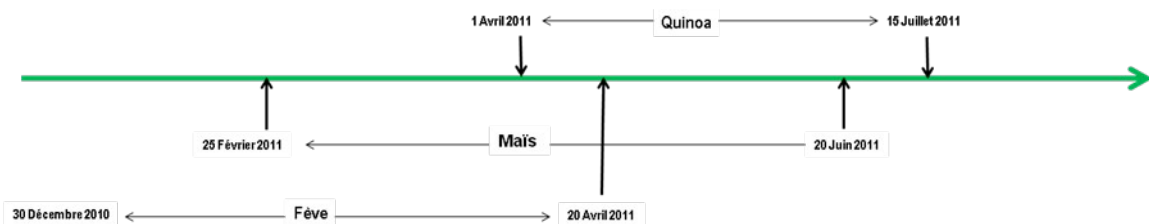


Figure 95 : Disposition temporaire de l'installation des cultures pendant la saison 2011.

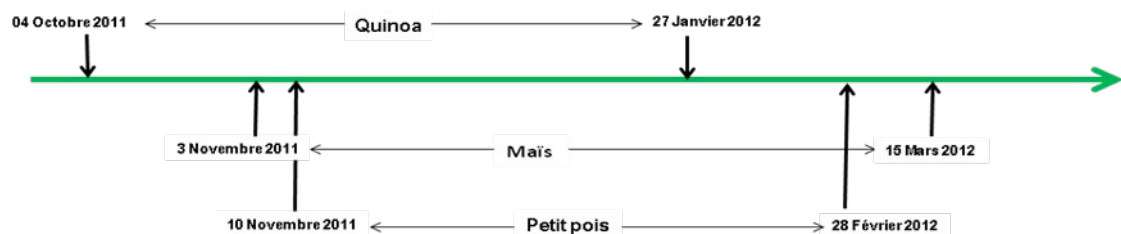


Figure 96 : Disposition temporaire de l'installation des cultures pendant la saison 2012.

Dispositif expérimental

Le dispositif a été choisi de manière tout à fait aléatoire avec 4 répétitions et chaque plot représente une superficie de 10 m². Le schéma général de rotation est décrit dans la figure suivante.

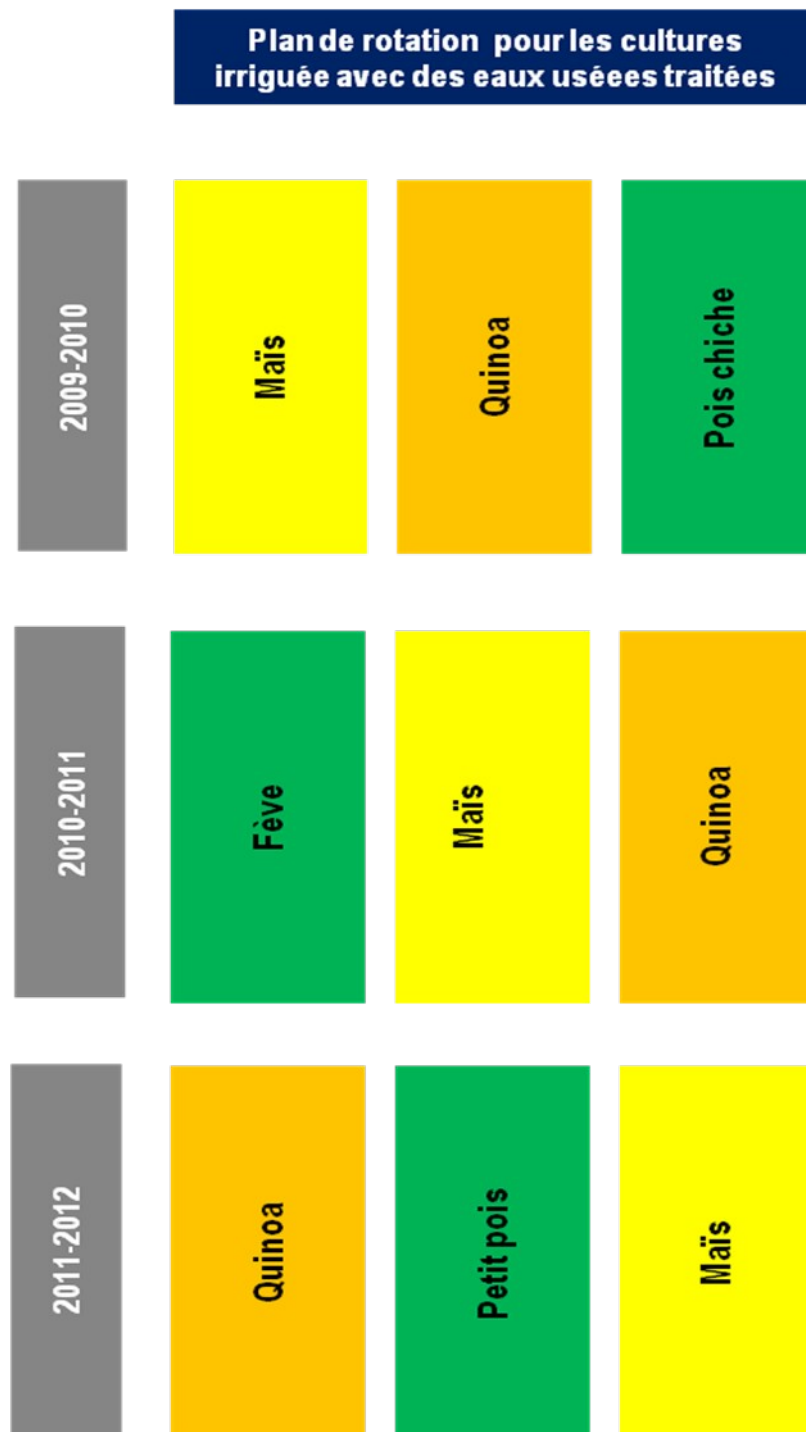


Figure 97 : Dispositif expérimental et disposition temporaire de l'installation des cultures pendant les trois saisons 2010, 2011 et 2012.

Conditions de cultures

Les caractéristiques du sol et des eaux usées ainsi que la méthode d'irrigation sont décrites dans la chapitre II.

Paramètres suivis

Paramètres agronomiques

Des mesures destructives sont faites à la fin de chaque stade (stade végétatif, floraison, maturation et récolte) tout au long du cycle de développement de la plante. Ces mesures destructives permettent de déduire les paramètres agronomiques, ainsi que les analyses des éléments minéraux au niveau foliaire.

- Poids frais, le poids secs des plantes et surface foliaire

Chaque plante arrachée est étiquetée avec son sol et acheminé au laboratoire pour la séparation des différents organes (racines, tiges, feuilles et fleurs ou fruits), puis la mesure de la surface foliaire se fait à l'aide de l'appareil « Leaf measurement system », pour déterminer ensuite le poids frais et sec des organes après passage à l'étuve à une température de 60°C pendant 36 à 48h.

- Analyses foliaires

Les feuilles séchées sont broyées en poudre fine à l'aide d'un broyeur électrique au laboratoire des sciences du sol du Complexe Horticole d'Agadir. A partir de cette poudre, sont déterminées les teneurs en sodium, potassium, chlore, phosphore et azote totale.

- Rendement

Sur chaque plot, une placette de 1 m² avait été posée. Les observations ont porté sur le comptage du nombre de pieds/m². Au laboratoire, les mesures portent sur le poids des épis ou gousses de chaque pied ainsi que l'estimation de la densité.

Paramètres pédologiques

Les paramètres pédologiques sont pris à l'état initial (témoin), puis à chaque fin de stade, après chaque arrachage, le sol est prélevé au niveau de la profondeur de la racine pour voir l'évolution de ses paramètres (CE, teneur en nitrate).

L'extraction de la solution du sol est effectué à l'aide des lysimètres d'aspiration (suction cup lysimeter) qui est un dispositif cylindrique comprenant une coupe de céramique poreuse; un tube comme un réservoir ; et un assemblage simple bouchon avec

un seul trou. Trois prélèvements sont effectués au début pour le stade végétatif, puis au stade floraison et enfin en fin du cycle vers la maturité des graines.

Résultats et discussion

Paramètres de croissance des plantes

Production de Biomasse

Dans cette rotation de culture le quinoa est maintenu, comme nouvelle culture, à côté du maïs comme céréale pour chaque saison pour pouvoir comparer les biomasses obtenues en fonction de la culture qui précède et qui suit ces cultures.

Biomasse fraîche des plantes

Le quinoa est cultivé après les cultures de légumineuses, après le pois chiches et après la fève et après jachère. La biomasse fraîche moyenne obtenue pour quinoa avec la combinaison pois chiche > quinoa était égale à 857 g/plante tandis qu'elle a seulement atteint 287 g/plante pour la combinaison fève > quinoa. D'autre part, La biomasse fraîche moyenne pour le quinoa planté après jachère a atteint la valeur la plus élevée et qui est de 1176 g/plante. Ce résultat indique que la culture de quinoa après le pois chiche était plus bénéfique en termes de productivité en biomasse par rapport à la combinaison quinoa après fève; alors que la combinaison de culture jachère>quinoa était meilleure que les deux combinaisons. Ceci indique que le pois chiche peut être une bonne culture précédente au quinoa.

En ce qui concerne le maïs, deux combinaisons ont été réalisées : le maïs après la jachère et le maïs après le quinoa. La production de biomasse fraîche du maïs doux de la première combinaison (maïs après jachère) était très importante et elle a atteint 1726 g/plante. Cependant le rendement moyen du maïs de la deuxième combinaison (maïs après quinoa) était égal à 900 g/plante. Ceci indique que la culture du maïs après la jachère était beaucoup plus meilleure qu'après le quinoa.

Le tableau suivant indique les valeurs de production de biomasse fraîche pour les différentes cultures testées durant les trois saisons de cultures.

Tableau 12 : Biomasse totale fraîche des plantes durant les trois saisons de cultures (g/plante)

Saison 2010	Quinoa	Pois chiche	Maïs
	1176	722	1726
Saison 2011	Maïs	Quinoa	Fève
	900	857	714
Saison 2012	Petit pois	Maïs	Quinoa
	451	559	287

Biomasse sèche des plantes

La biomasse sèche représentée dans le tableau ci-dessous représente le poids sec des différentes parties de la plante.

Pour le quinoa, la biomasse sèche produite est abstenue avec pour la combinaison jachère>quinoa avec une moyenne de 271 g/plante suivie par la combinaison pois chiche>quinoa où le quinoa a produit 166 g/plante de biomasse sèche. Dans le cas de la combinaison Fève>quinoa, le quinoa a produit une faible moyenne de masse fraîche avec une valeur de 88 g/plante. Mais cette dernière, moyenne obtenue pour la combinaison Fève>quinoa, valeur reste importante si on compare le rapport poids frais/poids sec pour les différentes combinaisons.

Tableau 13 : Biomasse totale sèche des plantes durant les trois saisons de cultures (g/plante)

Saison 2010	Quinoa	Pois chiche	Maïs
	271	218	437
Saison 2011	Maïs	Quinoa	Fève
	226	166	180
Saison 2012	Petit pois	Maïs	Quinoa
	84	185	88

Paramètres édaphiques

Evolution de la CE du sol

Les figures suivantes illustrent le niveau de la CE du sol avant le semis et après la récolte pour les trois saisons de cultures. Après la récolte de la première saison, la CE du sol a augmenté pour toutes les cultures, le quinoa a enregistré la plus haute accumulation de sel dans le sol par rapport aux autres cultures (Fig. 98). Ainsi, la CE initiale du sol était 0,17 dS/m en moyenne pour la parcelle de culture ; durant la première saison la CE du sol a augmenté à 0,33 ; 0,29 ; 0,21 dS/m respectivement pour le quinoa, le pois chiche et le maïs.

Juste après la 2^{ème} saison, la CE du sol a diminué et a atteint 0,27 ; 0,17, 0,19 dS/m respectivement pour le maïs, le quinoa et la fève. Le sol du maïs a accumulé le plus de sels et le quinoa a enregistré la valeur la plus faible.

Durant la 3^{ème} saison, la CE du sol a augmenté faiblement pour le petit pois et le maïs alors qu'elle a diminuée d'une manière remarquable pour passer de 0,20 dS/m avant le semis à 0,16 dS/m après la récolte pour le quinoa.

Après 3 saisons de rotation, la combinaison qui a montré la plus faible accumulation de sel a été la culture de maïs suivi de la fève puis le quinoa.

La réduction de l'accumulation du sol du quinoa a été remarquée lors des saisons 2011 et 2012. D'autre part, la diminution de la CE directement après la saison de culture 2010 est expliquée par les pluies qui ont coïncidé avec cette période et qui ont permis un lessivage du sol.

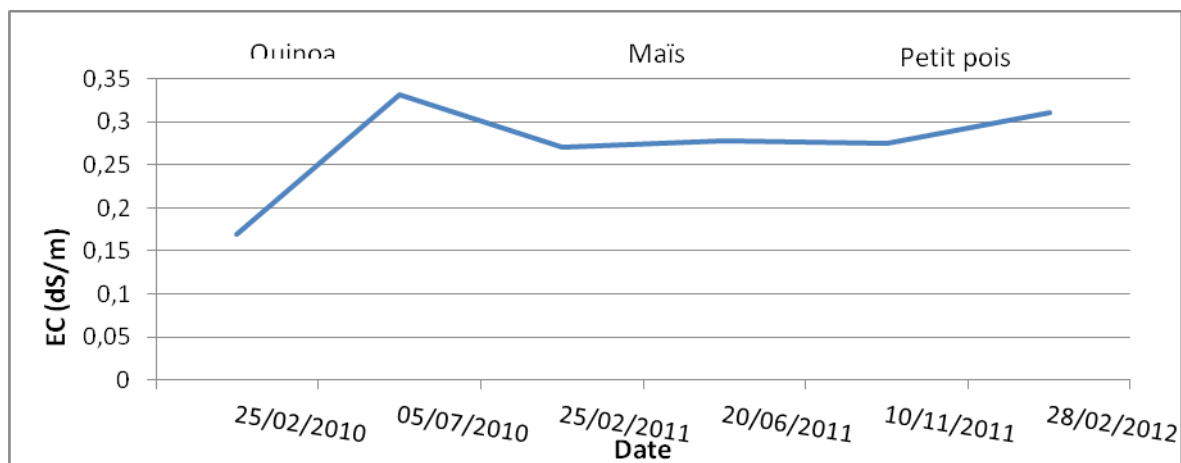


Figure 98 : Evolution de la CE du sol (extrait 1/5) durant les trois saisons pour la combinaison de rotation Quinoa-Maïs-Petit pois.

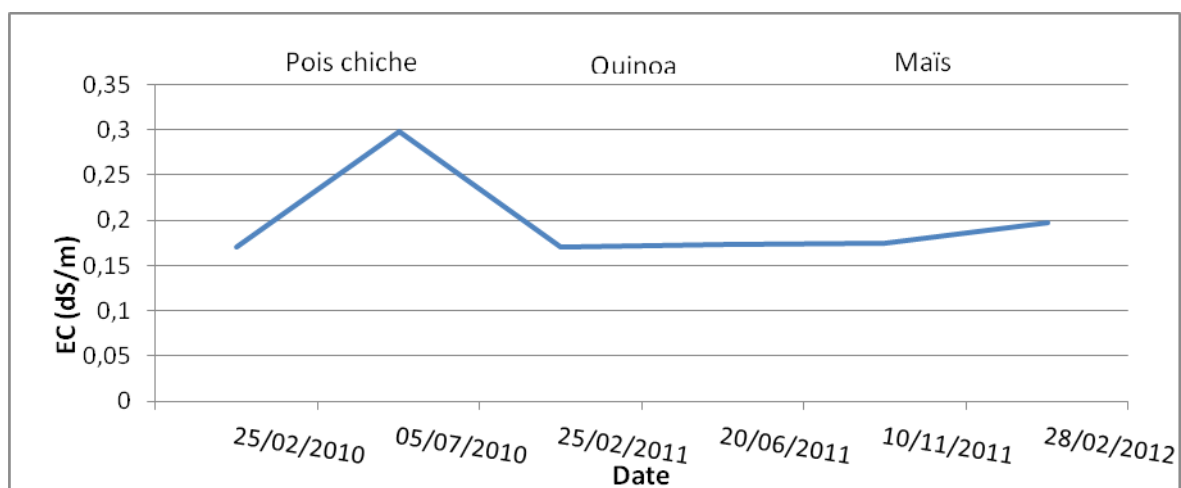


Figure 99 : Evolution de la CE du sol (extrait 1/5) durant les trois saisons pour la combinaison de rotation Pois chiche-Quinoa-Maïs.

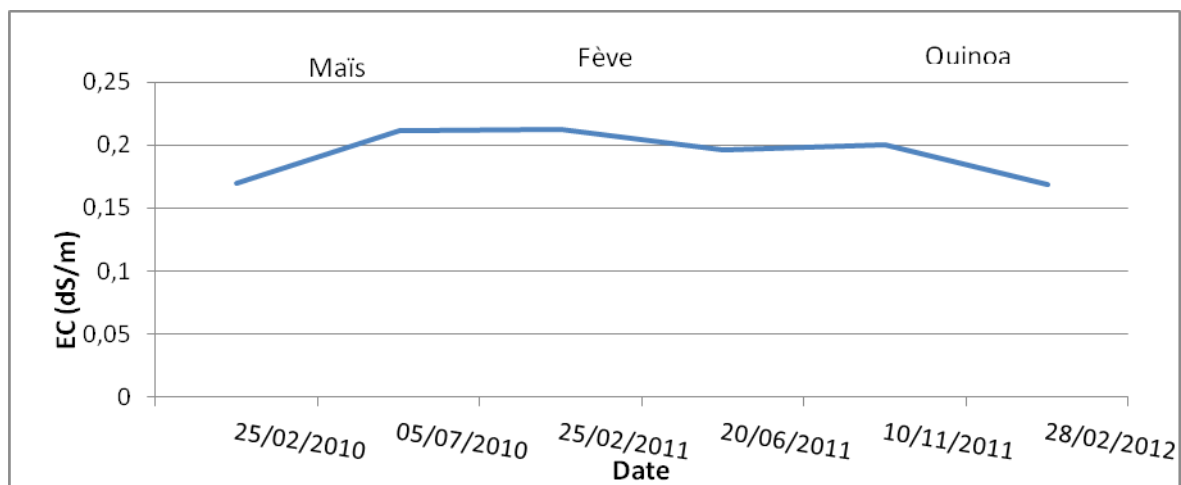


Figure 100 : Evolution de la CE du sol (extrait 1/5) durant les trois saisons pour la combinaison de rotation Maïs-Pois chiche-Quinoa.

Evolution du nitrate du sol

Le contenu initial du sol en nitrate était de 10,1 ppm avant les semis pour toutes les parcelles de cultures. Après chaque cycle de culture, la teneur en nitrate du sol a augmenté d'une manière significative. Ainsi, la teneur en nitrates du sol après la récolte a atteint 27,3, 33,8, 38,4 ppm respectivement pour le quinoa, le pois chiche et le maïs. Ce résultat indique que le quinoa a enregistré la plus faible teneur en nitrates dans le sol et le maïs la plus élevée.

Après la 2ème saison, la teneur en nitrates du sol a diminué et elle était de l'ordre de 21,6, 19,4 et 15,68 ppm respectivement pour le maïs, le quinoa et la fève. Cela indique clairement que le quinoa a permis de réduire la teneur en nitrates des sols mieux que le maïs et la fève. La fève a enregistré la plus forte teneur en nitrate du sol et cela était dû à la fixation d'azote de l'air par les nodules.

Durant la 3ième saison, la concentration des nitrates du sol a augmenté faiblement pour le petit pois et le maïs alors qu'elle a diminuée pour culture du quinoa en passant de 20,4 ppm avant le semis à 14,8 après la récolte.

La réduction de l'accumulation des nitrates du sol du quinoa a été remarquée lors de la saison 2012. D'autre part, la diminution de la teneur en nitrates directement après la saison de culture 2010 (Annexe 4) est expliquée aussi par les pluies qui ont coïncidé avec cette période et qui ont permis un lessivage du sol.

Après 3 ans de la rotation, la combinaison qui a montré la plus faible accumulation de nitrates a été la culture de maïs suivi de la fève puis le quinoa.

Les figures suivantes illustrent le niveau de la teneur en nitrates du sol avant le semis et après la récolte pour les trois saisons de cultures.

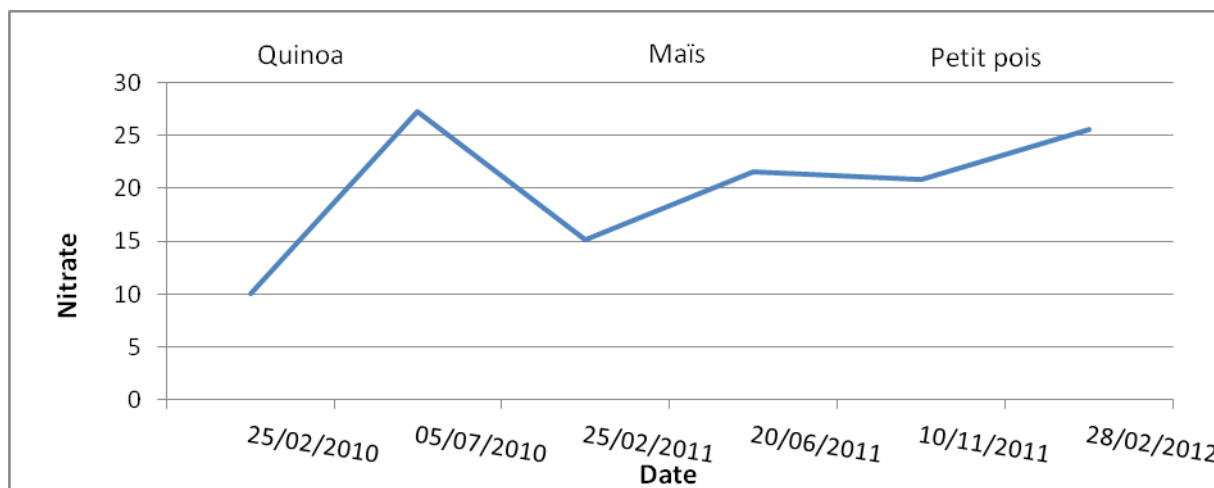


Figure 101 : Evolution du nitrate du sol (en ppm) durant les trois saisons pour la combinaison de rotation Quinoa-Maïs-Petit pois.

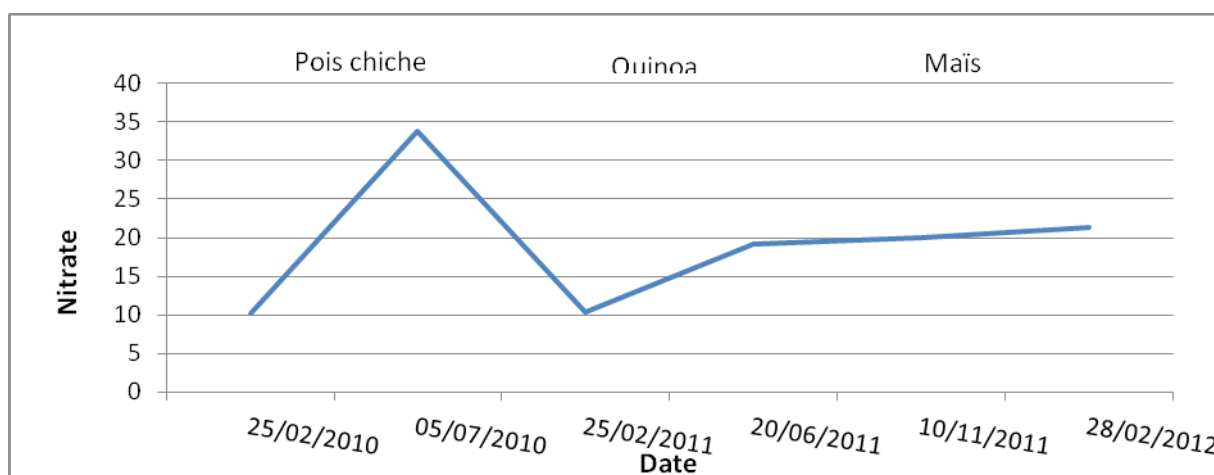


Figure 102 : Evolution du nitrate du sol (en ppm) durant les trois saisons pour la combinaison de rotation Pois chiche-Quinoa-Maïs.

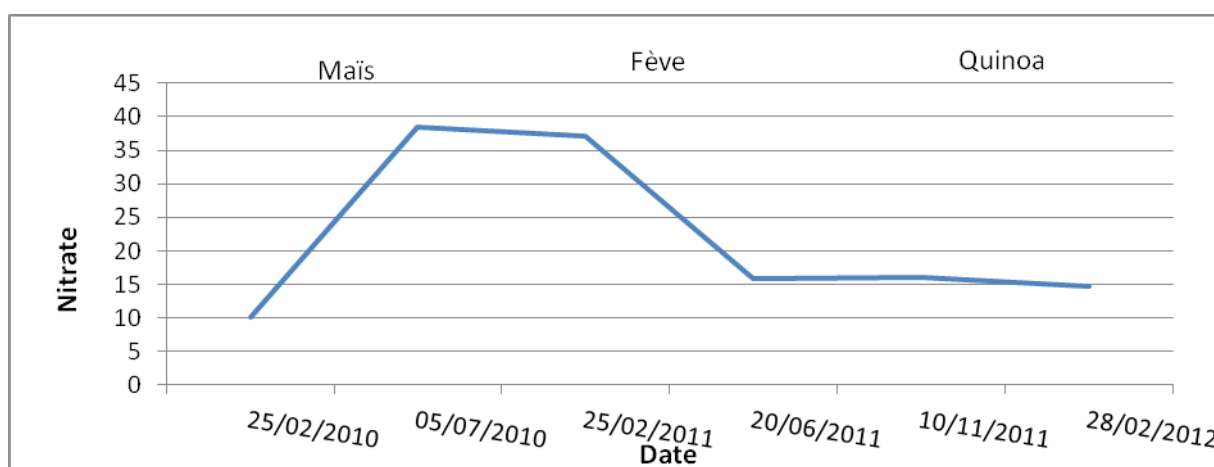


Figure 103 : Evolution du nitrate du sol (en ppm) durant les trois saisons pour la combinaison de rotation Maïs-Pois chiche-Quinoa.

Le tableau suivant représente les valeurs de la CE et la concentration des nitrates du sol pour les trois saisons de cultures.

Tableau 14 : Evolution de la CE et des Nitrates du sol pendant les trois saisons de culture.

		CE	NO3-	CE	NO3-	CE	NO3-
		Quinoa	Pois chiche	Maïs			
Saison 2010	Initial	170.0	10.1	170.0	10.1	170.0	10.1
	Final	331.0	27.3	298.2	33.8	211.9	38.4
Saison 2011		Maïs	Quinoa	Fève			
Saison 2011	Initial	270.0	15.2	170.9	10.4	212.5	37.2
	Final	278.7	21.6	173.0	19.2	196.2	27.9
Saison 2012		Petit pois	Maïs	Quinoa			
Saison 2012	Initial	275,3	20,9	175,2	20,01	200,3	20,4
	Final	311,1	25,6	177,7	21,3	168,2	14,8

Le suivi de la concentration des nitrates du sol est très important. Les nitrates dans la solution du sol sont immédiatement disponible et agissent rapidement, ils sont plus susceptible au lessivage. Les nitrates peuvent s'infiltrer dans le sol dans les aquifères souterrains, contaminant ainsi l'eau. L'étendue de la contamination par les nitrates, et la rapidité avec laquelle elle se produit, dépend à la fois du type de sol et de la profondeur de la source d'eau. Les nitrates peuvent s'infiltrer plus facilement dans les sols légers sableux que dans les sols argileux (Dioudis *et al.*, 2003 ; Filintas, 2005). En effet, une culture comme le quinoa, qui peut accumuler plus de nitrate du sol peut aider à réduire le danger de percolation et d'infiltration des nitrates vers la nappes.

Analyses foliaires

Le tableau ci-dessous montre les niveaux de concentration des différents éléments nutritifs au niveau des feuilles des cultures testées pendant les trois saisons. Les valeurs présentées dans le tableau ci-dessous illustrent les valeurs mesurées pendant la phase de maturité des plantes pour pouvoir suivre le niveau d'accumulation des éléments nutritifs dans les feuilles.

Pour l'azote, les concentrations les plus élevées sont enregistrées chez la fève et qui ont atteint 4.18 % lors de la 2^{ème} saison, suivie de celles du quinoa qui ont atteint 3, 87

lors de la même saison, suivi du petit pois avec une valeur de 3,83 % lors de la 3^{ème} saison de culture et enfin le maïs avec la valeur la moins élevée qui a atteint 2,51%.

Le quinoa cultivé après une jachère a accumulé une valeur faible en azote (2,03 %) en comparaison avec les combinaisons pois chiche>quinoa (3,87 %) et fève>quinoa (3,23 %). Ce niveau d'accumulation peut être expliqué par le fait que ces légumineuses en plus des apports en azote provenant des eaux usées traitées apportées, fixent l'azote et enrichissent le sol en azote pour les cultures suivantes. En effet, en comparant la combinaison légumineuse>quinoa et la combinaison jachère>quinoa, la grande capacité du quinoa d'absorber plus d'azote est constatée. Dans ce contexte, il est à signaler que l'impact de la fève, comme légumineuse, sur la dynamique de l'azote des cultures suivantes est bien documenté. Par exemple, le bénéfice en azote résiduel d'une culture de blé d'hiver suivant la fève de printemps comme culture précédente représente une économie de 30 kg d'engrais N/ha par rapport à une séquence de culture blé-blé (McEwen *et al.*, 1989). Une étude canadienne comparant cinq cycles de rotation avec fève-orge-blé et orge-orge-blé a montré que la fève a amélioré le rendement moyen de l'orge et de blé de 21 et 12%, respectivement, ce qui est équivalent à la fourniture des céréales avec près de 120 kg N ha⁻¹ d'engrais azotés (Wright, 1990).

Tableau 15 : Evolution de la teneur foliaire en N, P, K et Na pendant les trois saisons de culture.

	Culture	N (%)	P (%)	K (%)	Na
Saison 2010	Quinoa	2,03	0,27	0,72	0,06
	Pois chiche	2,87	0,65	4,09	0,08
	Maïs	2,31	0,39	0,82	0,08
Saison 2011	Maïs	2,44	0,48	0,11	0,08
	Quinoa	3,87	0,56	1,23	0,09
	Fève	4,18	0,33	4,68	0,30
Saison 2012	Petit pois	3,83	0,31	2,50	0,10
	Maïs	2,51	0,43	0,22	0,07
	Quinoa	3,23	0,47	0,80	0,05

Pour le potassium, les légumineuses ont accumulées une concentration importante en cet élément dans leurs feuilles avec une valeur de 4.68 % pour la fève, 4,09 % pour pois chiche et 2,50 % pour le petit pois. La teneur en potassium dans les feuilles du maïs est faible quand il succède au quinoa (0,11 % lors de la saison 2011 et 0,22 % pour la saison

2012) par rapport au cas où il succède à une jachère pour laquelle la concentration a atteint 0,82 %. En ce qui concerne le quinoa, la concentration du potassium est élevée pour la combinaison pois chiche>quinoa (1,23 %) par rapport à la combinaison fève>quinoa (0,80 %) et à la combinaison jachère>quinoa (0,72 %).

Rendement

Dans cette rotation de culture le quinoa est maintenu, comme nouvelle culture, à côté du maïs comme céréale pour chaque saison de cultures pour pouvoir comparer les rendements obtenus en fonction de la culture qui précède et qui suit ces cultures.

Le quinoa est cultivé après les cultures de légumineuses, après pois chiches et après la fève, et après la jachère. Le rendement moyen obtenu avec le quinoa pour la combinaison pois chiche > quinoa était égal à 62 g/plante tandis que le rendement moyen du quinoa obtenu pour la combinaison fève > quinoa était de l'ordre de 57 g/plante. Le rendement moyen obtenu pour le quinoa planté après jachère était égal à 74 g/plante. Ce résultat indique que la culture de quinoa après le pois chiche était plus bénéfique en termes de productivité par rapport à la combinaison quinoa après fève ; alors que la combinaison de culture jachère>quinoa était meilleure que les deux combinaisons. Ceci indique que le pois chiche peut être une bonne culture précédente au quinoa. Le rendement du quinoa, obtenu, du travail conduit par Geerts *et al.* a atteint 53,5 g/plante montre que les valeurs sont meilleures. Les résultats obtenus par Geerts *et al.* sont celles d'une variété de quinoa conduite pendant la saison de 2005-2006 en Bolivie avec l'apport de 100 % des besoins en eau de la culture (548 mm).

D'autre part, la culture du quinoa après une légumineuse était bénéfique et a permis d'améliorer le rendement. La fève comme légumineuse permet d'améliorer le rendement des cultures suivantes selon plusieurs auteurs comme par exemple Wani *et al.*, 2009 qui a cité que la fève est utilisée non seulement comme engrais vert mais aussi permet d'améliorer le rendement des céréales et d'autres cultures.

Pour le maïs, deux combinaisons ont été réalisées : le maïs après la jachère et le maïs après le quinoa. Le rendement moyen du maïs doux de la première combinaison (maïs après jachère) était égal à 680 g/plante (poids frais des graines). Cependant le

rendement moyen du maïs de la deuxième combinaison (maïs après quinoa) était égal à 556 g/plante. Ceci indique que la culture du maïs après la jachère était meilleure qu'après le quinoa.

Pour le pois chiche, le rendement en graine obtenu et qui est d'une moyenne de 88 g/plante, constitue un rendement élevé en le comparant avec le rendement obtenu pour un essai conduit en Inde en utilisant une eaux usées urbaines pour irriguée le pois chiche où le rendement n a pas dépassé 12 g/plante (Iqbal Tak *et al.*, 2012).

Le tableau suivant indique les rendements de différentes cultures testées durant les trois saisons de cultures.

Tableau 16 : Rendement pour les trois saisons de culture (g/plante)

Saison 2010	Quinoa*	Pois chiche*	Maïs
	74	98	680
Saison 2011	Maïs	Quinoa*	Fève
	556	62	339
Saison 2012	Petit pois	Maïs	Quinoa*
	357	289	57

*Rendement exprimé en poids secs des graines par plante pour le quinoa et pois chiche et en poids frais des graines pour les autres cultures.

Efficiencia d'utilisation de l'eau par culture

L'efficiencia d'utilisation de l'eau (EUE), en anglais : water use efficiency WUE, est la mesure de la capacité d'une plante ou d'un système de culture à transformer l'eau en biomasse ou en graine. Il comprend à la fois l'eau utilisée par la plante stockée dans le sol et les précipitations pendant la saison de croissance (GRDC, 2009).

L'EUE pour les cultures testées durant les trois saisons de cultures est exprimée en kg poids de graines (fraiches ou sèches) récoltées par m³ d'eau utilisée par la plante.

Le tableau ci-dessous montre les valeurs de l'EUE pour chaque culture. Il indique que la valeur la plus élevée d'EUE est obtenue pour le petit pois lors de la dernière saison de culture et qui a atteint 8, 82 kg/m³ suivie du maïs lors de la première saison de culture dont la valeur de la EUE a atteint 7,35 kg/m³. Cette efficiencia d'utilisation d'eau pour le maïs est importante si on la compare avec l'efficiencia obtenue par (Deumier, 2005) qui est de l'ordre de 1.63 kg/m³. Ce qui peut être expliqué par la richesse des eaux usées

traitées en éléments nutritifs en plus des bonnes conditions climatiques qui ont coïncidées avec la saison de culture (8,50 T/Ha).

Pour le quinoa, l'EUE a été élevé pour la 3^{ème} saison de culture avec une valeur de 1,28 kg/m³ et plus faible pour la 2^{ème} saison avec une moyenne de 0,89 kg/m³. Les valeurs d'efficacité obtenues sont meilleures en les comparant avec les résultats obtenus par Geerts *et al.* où une variété de quinoa conduite pendant la saison de 2005-2006 dans en Bolivie pour laquelle la valeur de l'EUE a atteint 0.38 avec l'apport de 100 % des besoins en eau de la culture (548 mm).

L'EUE du quinoa comparée pour les différentes combinaisons, montre que la meilleure EUE est obtenue avec la combinaison fève>quinoa, suivie par la combinaison jachère>quinoa et enfin la combinaison pois chiche>quinoa.

La combinaison de rotation maïs>Fève>quinoa était la meilleure en matière d'accumulation de sels dans le sol parmi les combinaisons réalisées lors des trois saisons de culture. Ceci explique la meilleure efficacité d'utilisation de l'eau pour les cultures constituant cette combinaison (maïs, fève et quinoa) à travers une meilleure disponibilité de l'eau pour les plantes au niveau de la zone racinaire.

Tableau 17 : Efficacité d'utilisation de l'eau par les plantes pour les trois saisons de culture (kg/m³)

	Apport en eau (mm/ha)			EUE (kg/m ³)		
	Quinoa	Pois chiche	Maïs	Quinoa	Pois chiche	Maïs
Saison 2010	357	278	463	1,04	1,76	7,35
Saison 2011	Maïs	Quinoa	Fève	Maïs	Quinoa	Fève
	493	348	354	5,64	0,89	4,79
Saison 2012	Petit pois	Maïs	Quinoa	Petit pois	Maïs	Quinoa
	202	271	223	8,82	5,33	1,28

Conclusion

Parmi les objectifs principaux du travail présenté dans ce chapitre, l'évaluation du comportement du quinoa comme étant une nouvelle culture dans la région au sein d'un système de rotation associant des céréales et des légumineuses irriguées avec des eaux usées traitées.

En ce qui concerne la croissance, il s'est avéré que la culture de quinoa après le pois chiche était plus bénéfique en termes de productivité en biomasse par rapport à la combinaison quinoa après fève; alors que la combinaison de culture jachère>quinoa était meilleure que les deux combinaisons. Ceci indique que le pois chiche peut être une bonne culture précédente au quinoa.

En ce qui concerne le maïs, deux combinaisons ont été réalisées : le maïs après la jachère et le maïs après le quinoa. En effet, la production de la culture du maïs après la jachère était beaucoup plus meilleure que la culture après le quinoa.

La mesure de l'accumulation des éléments nutritifs dans la feuille ont montré qu'en comparant la combinaison légumineuse>quinoa et la combinaison jachère>quinoa, la grande capacité du quinoa d'absorber plus d'azote est constatée par rapport aux autres cultures testées.

L'évolution de la CE et de la concentration des nitrates du sol a été évaluée pour les trois saisons de culture. Ces 3 cycles de rotation ont montré que la combinaison qui a montré la plus faible accumulation de sel a été la culture de maïs suivi de la fève puis le quinoa. D'autre part et après la 2ème saison, la teneur en nitrates du sol a diminué et pour toutes les cultures mais d'une manière importante pour le quinoa. Ceci permet de conclure clairement que le quinoa a permis de réduire la teneur en nitrates des sols mieux que le maïs et la fève. La fève a enregistré la plus forte teneur en nitrate du sol et cela était dû à la fixation d'azote de l'air par les nodules. Cette conclusion est confirmée pour la 3ième saison, pour laquelle la concentration des nitrates du sol a augmenté faiblement pour le petit pois et le maïs alors qu'elle a diminuée pour culture du quinoa.

Concernant les rendements, la culture de quinoa après le pois chiche était plus bénéfique en termes de productivité par rapport à la combinaison quinoa après fève; alors que la combinaison de culture jachère>quinoa était beaucoup plus meilleure que les deux combinaisons. Ceci indique que le pois chiche peut être une bonne culture précédente au quinoa. Pour le maïs, la productivité après la jachère était meilleure que la culture après le quinoa.

L'efficacité d'utilisation de l'eau a été évaluée et il s'est avéré que l'EUE du quinoa comparée pour les différentes combinaisons, montre que la meilleure EUE est obtenue avec la combinaison fève>quinoa, suivie par la combinaison jachère>quinoa et enfin la combinaison pois chiche>quinoa. Le niveau d'EUE ou productivité de l'eau obtenu pour la fève est très important avec l'usage des usées traitées (4.79 kg/m^3) alors qu'elle n'a pas dépassé 2 kg/m^3 pour la fève irriguées en eau douce dans un travail conduit en Syrie par Zhang, 2003.

Compte tenue des citations ci-dessus, la culture du quinoa a montré un comportement performant quand elle est précédée par la culture de la fève en matière d'efficacité d'utilisation d'eau et aussi l'enregistrement du niveau le plus bas d'accumulation de sels dans le sol.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS GENERALES

Dans le contexte de rareté de l'eau et de recherche de nouvelles ressources en eau, ce travail visait à surveiller le comportement de trois variétés de quinoa et d'amarante, comme nouvelles cultures dans la région, sous différents niveaux de la salinité des eaux usées traitées comme source non conventionnelle d'eau. Les effets de la salinité sur les aspects agronomiques et pédologiques ont été comparés entre les variétés. D'autre part, le travail aussi a visé l'évaluation du comportement du quinoa dans un système de rotation associant des céréales (maïs et des légumineuses irriguées avec des eaux usées traitées).

Pour l'amarante, le tress salin a eu des effets significatifs négatifs sur tous les paramètres de croissance. Les interactions entre les variétés et les niveaux de stress de la salinité ont été aussi importantes. Cependant, leur sensibilité au stress de la salinité varie avec le niveau de stress et la variété. Par conséquent, l'effet du sel était plus prononcé dans les racines et les feuilles de la variété A0020 qu'au niveau des tiges. Cependant, les racines sont plus sensibles que les feuilles et les tiges pour A0057 et A211. Par conséquent, le rendement a été réduit. En effet, les différences significatives en termes de rendement pour les différentes variétés d'amarante sous stress salin ont été observées. Néanmoins, les rendements obtenus, même avec l'application d'un niveau de salinité de 6 dS/m, étaient relativement élevés comparativement à ceux obtenus en particulier pour la variété de l'amarante A211. En fait, la conclusion à retirer est que la variété A211 a montré qu'elle est la plus prometteuse en termes de productivité et de tolérance au sel. Par conséquent, il est recommandé que cette variété fasse l'objet d'une recherche approfondie afin de l'introduire dans le système de culture d'Agadir comme étant une région semi-aride.

Concernant le quinoa, la salinité avait de faibles effets sur tous les paramètres de croissance. Une augmentation du niveau de salinité de l'eau d'irrigation a réduit légèrement la hauteur de la plante, la surface foliaire, le poids frais et sec mesuré au stade végétatif, au stade floraison et maturité. En fait, la réduction de croissance a entraîné une réduction faible du rendement pour toutes les variétés testées lorsque les

niveaux de la CE augmentent. Par conséquent, l'analyse a révélé une différence significative dans les performances au profit de la variété QM 1113, avec une moyenne de 6,92 t/ha irriguée avec une eau saline de 6 dS/m suivie de la variété D 0708, avec une moyenne de 5,65 t/Ha pour le témoin T. Néanmoins, les rendements obtenus, même avec l'application du traitement CE6, sont relativement plus élevés en comparaison avec ceux obtenus dans des conditions normales de culture.

La culture du quinoa, en conclusion de la deuxième étude, a montré une meilleure performance sous une irrigation par des eaux usées traitées associée à un stress salin. La qualification donnée au quinoa comme étant une culture très tolérante à la salinité selon Tanji and Kielen, 2002 est confirmée. La variété QM 1113 était la meilleure variété et peut être recommandée pour la production de grains de quinoa dans la région.

Le quinoa a montré une meilleure performance par rapport à la culture d'amarante en réponse au stress salin. Cette conclusion a été faite par Jacobsen *et al.*, 2000 où l'amarante était quatre fois plus sensible à la salinité que le quinoa en terme de rendement en graines. Par contre les variétés d'amarante avaient une meilleure capacité de germination vu que le taux de germination des graines est élevé par rapport au quinoa. Dans le cas de la présente étude, la différence est la performance significative du quinoa obtenue en utilisant des eaux non conventionnelles.

En ce qui concerne la croissance des cultures dans le système de rotation, il s'est avéré que la culture de quinoa après le pois chiche était plus bénéfique en termes de productivité en biomasse par rapport à la combinaison quinoa après fève; alors que la combinaison de culture jachère>quinoa était meilleure que les deux combinaisons. Ceci indique que le pois chiche peut être une bonne culture précédente au quinoa. Pour le maïs, deux combinaisons ont été réalisées : le maïs après la jachère et le maïs après le quinoa. En effet, la production de la culture du maïs après la jachère était beaucoup plus meilleure que la culture après quinoa.

D'autre part, la mesure de l'accumulation des éléments nutritifs dans la feuille ont montré qu'en comparant la combinaison légumineuse>quinoa et la combinaison jachère>quinoa, la grande capacité du quinoa d'absorber plus d'azote est constatée par rapport aux autres cultures testées.

L'évolution de la CE et de la concentration des nitrates du sol a été évaluée pour les trois saisons de culture a montré que la fève a enregistré la plus forte teneur en nitrate du sol et cela était dû à la fixation d'azote de l'air par les nodules. Cette conclusion est confirmée pour la 3^{ème} saison, pour laquelle la concentration des nitrates du sol a augmenté faiblement pour le petit pois et le maïs alors qu'elle a diminuée pour la culture du quinoa. Ceci permet de conclure clairement que le quinoa a permis de réduire la teneur en nitrates des sols mieux que le maïs et la fève.

Concernant les rendements, la culture de quinoa après le pois chiche était plus bénéfique en termes de productivité par rapport à la combinaison quinoa après féverole ; alors que la combinaison de culture jachère>quinoa était beaucoup plus meilleure que les deux combinaisons. Ceci indique que le pois chiche peut être une bonne culture précédente au quinoa. Pour le maïs, la productivité après la jachère était meilleure que la culture après le quinoa.

L'efficience d'utilisation de l'eau du quinoa comparée pour les différents combinaisons, montre que la meilleure EUE est obtenue avec la combinaison fève>quinoa, suivie par la combinaison jachère>quinoa et enfin la combinaison pois chiche>quinoa.

Compte tenue des citations ci-dessus, la culture du quinoa a montré un comportement performant quand elle est précédée par la culture de la fève en matière d'efficience d'utilisation d'eau et aussi l'enregistrement du niveau le plus bas d'accumulation de sels dans le sol. D'autre part, son adaptation aux conditions de stress salin fait du quinoa une culture prometteuse dans une région semi-aride comme la région du Souss Massa.

Les perspectives à venir du quinoa, choisie par la FAO comme culture de l'année 2013, emmène à encourager les agriculteurs, surtout les petits agriculteurs se trouvant dans des zones à sol affectées par la salinisation comme le cas des communes rurales Sidi Wassay et Massa dans la province de Chtouka Ait baha (ou d'autres zones au niveau national) ou dans les parcelles non exploitées avoisinant les stations de traitement des eaux usées. Néanmoins, la recherche de nouvelles techniques est recommandée pour améliorer le taux de germination du quinoa ou recherche de variété ayant un taux meilleur de

germination vue qu'il est difficile de procéder à un semis en pépinière pour pouvoir planter une superficie importante. La présence de saponines et aussi la taille des graines récoltés constituent des contraintes à soulever par des recherches futures pour convaincre les agriculteurs à adopter cette culture pour valoriser leurs terres et qui peuvent faire objet de travaux de recherche future dans le contexte marocain. C'est le cas du travail menée en Colombie par Rosero *et al.*, en 2010, pour lequel l'adoption du quinoa a un bon potentiel et permettra aux agriculteurs d'innover dans la production alimentaire humaine et animale, en cultivant le quinoa pour ces graines riches pour l'Homme et utilisant ses sous-produits pour les animaux tout en profitant du large choix entre les nombreuses variétés de quinoa.

Le recyclage des eaux usées traitées pour être utilisée comme source d'irrigation est souvent l'approche technique et économique la plus recommandée pour éviter la dégradation de l'environnement et ainsi éliminer les effets des risques sanitaires. Ces eaux usées sont une ressource d'eau renouvelable qui s'accroît jour après jour et n'est pas affectée par les changements climatiques, encore plus, elle est riche en nutriments qui permettent une réduction d'utilisation d'engrais et par conséquent elle est considérée comme un matériel d'économie d'énergie. En effet, la réutilisation de ces eaux est très bénéfique pour assurer la compensation des risques de sécheresse sur la durabilité des systèmes de cultures et la pression sur les ressources en eaux conventionnelles. Néanmoins, les technologies de traitement doivent être améliorée et avancée pour donner la possibilité de la réutilisation des eaux sur un large spectre de cultures toutes en préservant les effets sur l'environnement.

Enfin, une campagne d'information est nécessaire pour faire connaître l'importance nutritionnelle du quinoa au consommateur marocain et aussi l'importance de la réutilisation des eaux traitées dans l'agriculture et l'économie de l'eau dans un pays susceptible au changement climatique, comme le Maroc.

REFERENCES

ABSHSMD, 2012. Débat régional sur l'eau.
http://www.abhsm.ma/IMG/pdf_Debatregional.pdf

Al Rifaï Mehdi, 2007. Besoins en eau des plantes. In: (ed). Demande climatique et mécanismes physiologiques: Pratiques agricoles alternatives, France, INRA UEFE, France.

Agriculture Development Fund (ADF), Final Report, 2000. Saskatchewan Agriculture Food and Rural Revitalization.

Allen Richard G., Pereira Luis S., Raes Dirk and Smith M., 2000. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper, 56: 326.

Ali M, PK Joshi, S Pande, M Asokan, SM Virmani, R Kumar, BK Kandpal, 2000. Legumes in the Indo-Gangetic Plains of India. Pp. 35-70. In. Johansen, C., Duxbury JM, Virmani SM, Gowda CLL, Pande S, Joshi PK (Eds). Legumes in Rice and Wheat Cropping Systems of Indo-Gangetic Plains: Constraints and Opportunities. ICRISAT, Patancheru, India; and Cornell University, New York, USA.

Allemann J., Van Den Heever E., and Viljoen J., 1996. Evaluation of Amaranthus as possible vegetable crop. Appl. Plant Sci. 10, 1-4.

Asano T., 1998. Wastewater Reclamation and Reuse, Water Quality Management Library Volume 10. Boca Raton, Florida, CRC Press.

Askin D.C., White J.G.H., Rhodes P.J., 1985. Nitrogen fixation by pea and their effect on soil fertility. In: Hebblewaite PD, Heath MC, Dawkins TCK (ed) The pea crop: A basis for improvement Butterworths, London, pp 421-430.

Aussel H., Lebacle C. et Dornier G., 2004. Le traitement des eaux usées. Point des connaissances ED 5026: 4.

Ayala G., Ortega L., Moron C., 2001. Valor nutritivo y usos de la quinua. Quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) : ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. Mujica, A., Jacobsen S. E., Izquierdo J., Marathe, J. P. et FAO (eds). CIP, UNAP. FAO, CD Cultivos Andinos, version 1.0. Santiago, Chile.

Bahri A. et Houmane B., 1987. Effet de l'épandage des eaux usées traitées et des boues résiduelles sur les caractéristiques d'un sol sableux de Tunisie. Science du Sol, 25(4) : 267-278.

Bains S.S. et Firema N.M., 1964. Effet of exchangeable sodium pourcentage on the groth and absorpion of essential nutrients and sodium by five crop.PlantsAgronomy journal, vol 13: P.333-335.

Baya B., 2008. La culture du maïs ensilage. Edition INRA 2008, Fiches techniques. <http://www.inra.org.ma/publications/ouvrages/mais_13.pdf>

Bayuelo-Jiménez J.S., Debouck D.G. & Lynch J.P., 2003. Growth, gas exchange, water relations, and ion composition of Phaseolus species grown under saline conditions. Field Crops Res. 80, 207-222.

Belhabib, 2005. Les cultures alternatives : Quinoa, Amarante et épeautre. Bulletin du PNTTA n° 133, Octobre 2005.

Bennasseur A., 2008. Référentiel pour la Conduite Technique de la fève (Vicia faba).pp :93-94.

Bhargava A., Shukla S., Ohri D., 2006. Chenopodium quinoa-An Indian perspective. Ind Crops Prod 23:73-87.

Bolarin M.C., Fernandez F.G., Cruz V. & Cuartero J., 1991. Salinity tolerance in four wild tomato species using vegetative yield salinity response curves. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 116, 285-290.

Bond W.J., 1998. Effluent irrigation – an environmental challenge for soil science. Aust. J. Soil Res. 36, 543-555.

Bosque H., Lemeur R., Van Damme P., Jacobsen S.E., 2003. Ecophysiological Analysis of Drought and Salinity Stress of Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.). Food Reviews International. 19:111-119.

Bouwer H., 2002. Integrated water management for the 21st century: problems and solutions. J. Irrig. Drain. Eng. 28, 193-202.

Brouillet J.L.A, Picot B.B, Sambuco J.P.A, Gaillard L.C, Soteras G.A and Valarié I., 2008. Ecotechniques D'assainissement Des Eaux Usees Domestiques : Evolution Et Perspectives. In: (ed). XIIIe Congrès Mondial de l'Eau, Montpellier, France, Montpellier, France.

Capra A. et Scicolone B., 2007. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. Journal of Cleaner Production, 15(16): 1529-1534.

Carvajal M., Martinez V. & Alcaraz F.C., 1999. Physiological function of water channels as affected by salinity in roots of paprika pepper. Physiol. Plant. 105, 95-101.

Chen Y., Wang C. X., Wang Z. J. and Huang S. B., 2004. Assessment of the contamination and genotoxicity of soil irrigated with wastewater. Plant and Soil, 261(1-2): 189-196.

Chiou R. J. (2008). Risk assessment and loading capacity of reclaimed wastewater to be reused for agricultural irrigation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 142(1-3): 255-262.

Choukr-Allah R. Hamdy A., 2004. Wastewater treatment and reuse in Mediterranean region as a potential resource for drought mitigation. In: Hamdy A. et Liuzzi G.T (eds). *Water management for drought mitigation in the Mediterranean. Regional Conference on Arab Water*, Cairo, Egypt, April, 12-16, 2004.IAMB, Valenzano, pp. 219-233 *Options méditerranéennes*, ser. B47.

Choukr-Allah R., Hamdy A. et Young T., 2003. Wastewater treatment technology adapted to small and medium community in the Mediterranean region. In: Hamdy A. (edt). *Water resources management and water saving in irrigated agriculture (Wasla project)*.Options méditerranéennes, ser. B 44: pp. 103-111.

Choukr-Allah R., 2009. Recyclage des eaux non conventionnelles comme ressources potentielles d'économie d'eau pour les pays Méditerranéens. AGDUMED. Rabat, Maroc.

Cole J. N., 1979. *Amaranth from the Past for the Future*. Rodale Press, Inc., Emmaus Pennsylvania, USA. 311 pp., including bibliography of 120 publications.

Corp M., Machado S., Ball D., Smiley R., Petrie S., Siemens M. and Guy S., 2004. Chickpea production guide. *Dryland cropping systems*, EM 8791-E: 14.

Cunningham AB, Dejager PJ and Hansen LCB, 1992. *The indigenous plant use programme*. Foundation for Research Development, Pretoria.

Cuzack D., 1984. Quinoa : Grain of the Incas. *Ecologist*. 14:21-31.

Cyrus D.P., Martin T.J. & Reavell P.E., 1997. Salt-water intrusion from the Mazingazi river and its effects on adjacent swamp forest at Richards Bay, Zululand, South Africa. *Water SA* 23, 101-108.

Da Fonseca A. F., Herpin U., De Paula A. M., Victoria R. L. and Melfi A. J., 2007. Agricultural use of treated sewage effluents: Agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. *Scientia Agricola*, 64(2): 194-209.

Dahan R. et Elhadi M., 1998. Fiche technique: Le pois chiche d'hiver. *Transfert de technologie en agriculture*, 39.

Dasberg S., Bielorai H., Haimowitz A. & Erner Y., 1991. The effect of saline irrigation water on "Shamouti" orange trees. *Irrig. Sci.* 12, 205-211.

Davies D.R., 1977. Restructuring the pea plant. *Sci. Prog.* 64: 201-214.

Del Castillo C., Grégory M. et Winkel T., 2008. La quinoa en Bolivie : une culture ancestrale devenue culture de rente " bio-équitable ". *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 12 (4): 421-435.

Deumier J., Lacroix B., Bouthier A., Verdier J.I. and Mangin M., 2007. Strategies de conduite de l'irrigation du maïs et du sorgho dans les situations de ressource en eau restrictive.

Deumier JM., Boussaguet J. and Mailheau M. (2005). Stratégie des agriculteurs, pilotage et ajustement des apports d'eau aux besoins des cultures. Colloque Cemagref « Eau et agriculture durable », SIMA, Paris, 1/03/2005.,8p.

Dogan R., Goksoy T. A., Yagdi K. and Turan, M. Z. (2008). Comparison of the effects of different crop rotation systems on winter wheat and sunflower under rain-fed conditions. *African Journal of Biotechnology* Vol. 7 (22), pp. 4076-4082.

Dioudis P., Filintas T.Ag., and Pateras D., 2003. Drip irrigation frequency effects on movement and concentration of nitrates on corn crop. *Proceedings of Scientific Congress on the Management of Aquatic Resources and the Sustainable Development of Thessaly, the 3rd Conference of Thessaly Development, Company of Thessalian Studies, (ETHEM), Larissa, December 12-14, Vol. B, 159-171.*

Eacce L'etablissement Autonome De Contrôle Et De Coordination Des Exportations (2009). statistiques export Maroc. <<http://www.eacce.org.ma/vidé.asp?m=4&r=21&s=3>>

Elattir H. 2005. La conduite et le pilotage de l'irrigation Goutte à Goutte en maraichage. *Transfert de technologie en agriculture*, 124.

Faby J.E.A.N., Brissaud F., 1997. L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Office International de l'Eau, documentation technique de la FNDAE (Fonds National pour le développement des Adductions d'Eau). Hors série N° 11.

FAO., 2003. L'irrigation avec les eaux usées traitées : manuel d'utilisation. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. <http://epuvaléau.fsagx.ac.be/Texte%5CManuelREUTFAO.pdf>

FAO, 1997. Preventing micronutrient malnutrition. A guide to food based approaches-manual for policy makers and programme planners. Food and Agricultural Organization of United Nations and International Life Sciences Institute, ILSI Press.

FAOSTAT, 2010. <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>

FAOSTAT (2008). Statistiques sur les productions des cultures.

FAOSTAT, 2007. Statistiques sur les productions des cultures.

Fatta D., Salem Z., Mountadar M., Assoubhei O. et Loizidou M., 2005. Urban Wastewater Treatment and Reclamation for Agricultural Irrigation: The situation in Morocco and Palestine. *The Environmentalist*, 24: 227-236.

Feine L.B., Harwood R.R., Kauffman C.S. & Senft, J. P.A. , 1979. Amaranth, gentle giant of the past. In: G.A. Ritchie (ed.), *New Agricultural Crops*. Westview Press, Boulder, Colorado, pp. 41-63.

Felix D., 2004. Diagnostic Agraire de la province Daniel Campos, Bolivia: Le développement de la filière quinoa et ses conséquences sur l'équilibre du système agraire Aymara. Mémoire ESAT1 Cnearc, Cicda, Ensam. Montpellier. 113p.

Filintas T.Ag., 2005. Land Use Systems with emphasis on Agricultural Machinery, Irrigation and Nitrates Pollution, with the use of Satellite Remote Sensing, Geographic Information Systems and Models, in Watershed level in Central Greece. MSc Thesis, Department of Environmental Studies, Faculty of Environment, University of Aegean, Mitilini, Greece.

Gallais A., Bannerot H., 1992. Amélioration des espèces végétales cultivées: objectifs et critères de sélection. Paris: INRA.

Garcia M., 2003. Agroclimatic study and drought resistance analysis of Quinoa for an irrigation strategy in the Bolivian Altiplano. Ph.D. dissertation. Dissertations N° 556. Fac. of Agr. and Applied Biol. Sciences, K.U.Leuven, Belgium.

Garcia M., Raes D. and Jacobsen S.E., 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. *Agr.Water Manage.* 60: 119-134.

Geerts S., 2008. Deficit irrigation strategies via crop water productivity modeling: Field research of quinoa in the Bolivian Altiplano. Faculteit Bio-ingenieurs wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven. Doctoraatsproefschrift.

Geerts S., Raes D. , Garcia M., Vacher J., Mamanib R., Mendozab J., Huanca R., Morales B., Miranda R., Cusicanqui J. and Taboada C.. (2008). Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *European journal of agronomy*.28:427-436.

Ghoulam C., Foursy A. et Fares K., 2002. Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. *Environ. Exp. Bot.* 47, 39-50.

Goodwin M., 2003. Crop Profile for Chickpeas. Pulse Canada: 26.

Grattan S.R. et Grieve C.M., 1999. Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Sci. Hort.* 78, 127-157.

- GRDC, grain research and development corporation, 2009. Water use efficiency, Fact sheet. http://www.grdc.com.au/uploads/documents/GRDC_Water%20Use%20Efficiency%20.North%20version%20231009.pdf
- Griga M., Novak F.J., 1990. Pea (*Pisum sativum* L.). In: Bajaj YPS (ed) Biotechnology in Agriculture and Forestry 10, Legumes and Oilseed Crops I pp 65-99.
- Guerrier G., 1996. Fluxes of Na⁺, K⁺ and Cl⁻, and osmotic adjustment in *Lycopersicon pimpinellifolium* and *L. esculentum* during short- and long-term exposures to NaCl. *Physiol. Plant.* 97, 583-591.
- Hamdy A. et Ragab R., 2005. Reuse of treated waste water in irrigation : challenges and perspectives. In: Ragab R. and Koo-Oshima S. (eds). International workshop on environmental consequences irrigation with poor quality waters. (Kuala Lumpur, Malaysia, 2005). pp.5-56.
- Hauschild M. et Döll P., 2000. Water Use in Semi-arid Northeastern Brazil – Modeling and Scenario Analysis. Report A0003, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Northeast of Brazil Brazilian-German cooperation program.
- Hamou R. Ait, Roulahbal O. and Haddadi F., 2000. Impact microbiologique des eaux usées traitées sur le poivron et le maïs fourrager. *Recherche Agronomique, INRA*, 7(77-E).
- Hassanli A. M., Javan M. and Saadat Y., 2008. Reuse of municipal effluent with drip irrigation and evaluation the effect on soil properties in a semi-arid area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 144(1-3): 151-158.
- Hinch Nathan, 2008. Treating Wastewater for Multiple Reuses <<http://www.sldtonline.com/content/view/595/104/>>
- Howard K.W.F. & Mullings E., 1996. Hydrochemical analysis of ground-water flow and saline incursion in the Clarendon Basin, Jamaica. *Ground Water* 34, 801-810.
- Hsiao T.G., 1973. Plant responses to water stress. *Ann. Rev. Plant Physiology*.
- Iqbal Tak H., Ahmad F., Babalola O.O. et Inam A., 2012. Growth, Photosynthesis and Yield of Chickpea as Influenced by Urban Wastewater and Different Levels of Phosphorus. *International Journal of Plant Research*, 2(2): 6-13.
- IPCC, 2007. Freshwater resources and their management. *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC, 2008. *Climate Change and Water, Intergovernmental Panel on Climate Change Technical Report IV*. June 2008.
- Jacobsen SE, Mujica A, and Jensen C.R., 2003. The resistance of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to adverse abiotic factors. *Food Rev. Int.* 19: 99-109.

- Jacobsen S.E., Quispe H., Christiansen J.L., Mujica A., 2000a. What are the mechanisms responsible for salt tolerance in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.)? European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research (E. Commission, ed.), Bruxelles. p. 511-516.
- Jacobsen S.E., Quispe H., Mujica A., 2000b. Quinoa: an alternative crop for saline soils in the Andes. CIP Report Program 1999-2000 (CIP, ed.), Peru, Lima. p. 403-408.
- Jacobsen S.E., Stolen O., 1993. Quinoa - Morphology, phenology and prospects for its production as a new crop in Europe. *European Journal of Agronomy*. 2:19-29.
- Jacoby B., 1994. Mechanisms involved in salt tolerance by plants. In: M. Pessarakli (ed.), *Handbook of Plant and Crop Stress*. Marcel Dekker, New York, pp. 97-123.
- Jensen E.S., Peoples M.B., Hauggaard-Nielsen H., 2010. Faba bean in cropping systems. *Field Crops Research*, Volume 115, Issue 3: 203-216.
- Karamanos A.J., Elston J. and Wadsworth R.M., 1991. Water stress and leaf growth of field Beans (*Vicia faba* L.) in the field: Water potentials and Laminar Expansion. *Ann. Bot.* 49:815-826.
- Kauffman C.S. & Weber L.E., 1990. Grain amaranth. In: J. Janick and J.E. Simon (Eds.), *Advances in New Crops*. Timber Press, Portland, OR, pp. 127-139.
- Khan M.A., Ungar I.A. & Showalter A.M., 2000. Effects of sodium chloride treatments on growth and ion accumulation of the halophyte *Haloxylon recurvum*. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31, 2763-2774.
- Laguna P., 2002. Competitividad, externalidades e internalidades: un reto para les organizaciones economicas campesinas. *Debate Agrario, Analysis y Alternativas*. Lima, Pérou. 34:95-169.
- Leal R. M. P., Firme L. P., Montes C. R., Melfi A. J. and Piedade S. M. D., 2009a. Soil Exchangeable Cations, Sugarcane Production And Nutrient Uptake After Wastewater Irrigation. *Scientia Agricola*, 66(2): 242-249.
- Leal R. M. P., Herpin U., Da Fonseca A. F., Firme L. P., Montes C. R. and Melfi A. J., 2009b. Sodcity and salinity in a Brazilian Oxisol cultivated with sugarcane irrigated with wastewater. *Agricultural Water Management*, 96(2): 307-316.
- Lebonvallet S., 2008. Implantation du quinoa et simulation de sa culture sur l'Altiplano bolivien. Thèse de doctorat, Agro Paris Tech, France.
- Lerner B.R., et Dana Michael N., 1998. Growing Sweet Corn. *Vegetables*: 1-3.
- Levitt J., 1980. Responses of Plants to Environmental Stresses: Water, Radiation, Salt, and other stresses. Academic Press, New York, pp. 365-488.

Mahi Mustapha, 2008. Situation actuelle à l'échelle nationale de l'épuration et de la réutilisation des eaux usées épurées et de la valorisation des boues. The Third Workshop And Training Session For Sowamed Project In Rabat. Rabat, Morocco.

Manas P., Castro E. and De Las Heras J., 2009. Irrigation with treated wastewater: Effects on soil, lettuce (*Lactuca sativa* L.) crop and dynamics of microorganisms. *Journal of Environmental Science and Health Part a-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 44(12): 1261-1273.

Margheim J.F. , Baltensperger D., Wilson R.G., Lyon D.J., Hein G.L., Robert M., Harveson, Burgener P., Krall J.M., Cecil J.T., Rickertsen J.R., West R., Merrigan A.P., Watson M.H. and Hansen B.J., 2002. Chickpea production in the high plains.

Massena P.A., 2003. Valorisation des eaux usées en irrigation localisée. *Eau & irrigation. Water irrigation news*, Octobre, 2003. <<http://www.mrea-jo.org/Documents/Eauxusees-EI1003.pdf>>

Matthews P. and Arthur E., 1985. Genetic and environmental components of variation in protein content of peas. In: Hebblethwaite PD, Heath MC, Dawkins TCK (ed) *The Pea Crop*. Butterworths.

McEwen J., Darby R.J., Hewitt M.V. and Yeoman D.P., 1989. Effects of field beans, fallow, lupins, oats, oilseed rape, peas, ryegrass, sunflowers and wheat on nitrogen residues in the soil and on the growth of a subsequent wheat crop. *J. Agric. Sci., Camb.* 115, 209-219.

Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire, direction de la recherche agronomique, 1967. Fiche technique : légumineuses alimentaires : La culture des fèves et fèveroles, La culture de la lentille, la culture du pois chiche. pp : 1, 2.

Mujica A., Izquierdo J., Marathee J.P., 2001. Origen y descripción de la quinua. *Quinua (Chenopodium quinoa Willd.) : ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro*. Mujica, A., Jacobsen, S. E., Izquierdo, J., Marathee, J. P. et FAO (eds). CIP, UNAP. FAO, CD Cultivos Andinos, version 1.0. Santiago, Chile.

Munns R., Schachtman D.P. & Condon A.G., 1995. The significance of a two-phase growth response to salinity in wheat and barley. *Aust. J. Plant Physiol.* 22, 561-569.

Munns R., 1993. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. *Plant Cell Environ.* 16, 15-24.

Munns R. & Termaat A., 1986. Whole-plant responses to salinity. *Aust. J. Plant Physiol.* 13, 143-160.

Mvungi A., Mashauri, D. & Madulu N.F., 2005. Management of water for irrigation agriculture in semi-arid areas: Problems and prospects. *Physics and Chemistry of the Earth* 30: 809–817.

Myers R. L. (1996). Amaranth: new crop opportunity. In: J. Janick (ed.), *Progress in New Crops*, ASHS Press, Alexandria, VA, pp. 207-220.

- NRC (National Research Council), 1984. Amaranth: modern prospects for an ancient crop. National Academy Press, Washington, D.C.
- Neumann P. (1997). Salinity resistance and plant growth revisited. *Plant Cell Environ.* 20, 1193-1198.
- O'Brien G.K. and Price M.L. Amaranth, 1983. Amaranth, grain and vegetable types. Revised by Yarger L. (2008). ECHO technical Note, 2008.
- Omami E.N., 2005. Effects of salinity in agriculture - An overview. University of Pretoria etd.
- OMS, 1989. L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture: recommandations à visées sanitaires. Rapport d'un groupe d'experts de l'OMS. Série de rapports techniques 778. OMS, Genève.
- Orcutt D.M., Nilsen E.T., 2000. The Physiology of Plants Under Stress. John Wiley & Sons, Inc., New York
- Papadopoulos F., Parissopoulos G., Papadopoulos A., Zdragas I., Ntanos D., Prochaska C. and Metaxa I., 2009. Assessment of Reclaimed Municipal Wastewater Application on Rice Cultivation. *Environmental Management*, 43(1): 135-143.
- Pereira L.S. & Paulo A.A., 2004. Droughts: Concepts, Indices and Prediction. In: *Water Management for Drought Mitigation in the Mediterranean* (eds A. Hamdy & G. Trisorio Liuzzi). Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes Tecnomack –Bari, Italy 113-144.
- Perez-Alfocea F., Balibrea M.E., Santa Cruz A. & Estan M.T., 1996. Agronomical and physiological characterization of salinity tolerance in a commercial tomato hybrid. *Plant and Soil* 180, 251-257.
- Pescod M.B., 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. Fao, Rome. Fao irrigation and drainage paper, 47.
- Pessarakli M., 1991. Formation of saline and sodic soils and their reclamation. *J. Environ. Sci. Health* 26, 1303-1320.
- Rangarajan A. and Kelly J., 1994. Iron availability from Amaranthus species. *Legacy* 7:1-4.
- Rhoades J.D., 1977. Potential of using saline agricultural drainage for irrigation. In: *Proceeding Water Management for Irrigation and Drainage*, ASCE, Reno, Nevada, July, 1977. pp. 85-116.
- Rojas W., Pinto M., Soto J.L., 2010. Distribución geográfica y variabilidad genética de los granos andinos. In Rojas W., Soto J.L., Pinto M., Jäger M. et Padulosi S. (eds). *Granos Andinos: Avances, logros y experiencias desarrolladas en quinua, cañahua y amaranto en Bolivia*. Bioversity International 2010. http://www.proinpa.org/index.php?option=com_phocadownload&view=file&id=152%3Agranos-andinos-avances-logros-y-experiencias-desarrolladas-en-quinua-caahua-y-amaranto-en-bolivia&Itemid=185&lang=es

- Romero-Aranda R., Soria T. & Cuartero J., 2001. Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions. *Plant Sci.* 160, 265-272.
- Rosado J. et Morais M.M., 2010 .Water Management Strategies to combat scarcity in Semi-arid and Mediterranean regions: differences and similarities. Second International Conference: Climate, Sustainability and Development in Semi-arid Regions. Ceará – Brazil, 16 – 20 August, 2010.
- Rosero O.L., Rosero D. A. and Lukešová D., 2010. [Determination of the capacities of the Farmers to Adopt Quinoa Grain \(*Chenopodium quinoa* Willd.\) as Potential Feedstuff. *Agricultura Tropica Et Subtropica* vol. 43 \(4\): 308-315.](#)
- Rush D.W. et Epstein E., 1981. Comparative studies on the sodium, potassium, and chloride relations of a wild halophytic and a domestic salt-sensitive tomato species. *Plant Physiol.* 68:1308-1313.
- Rush D.W. et Epstein E., 1976. Genotypic responses to salinity. Differences between salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of the tomato. *Plant Physiol.* 57: 162-166
- Sadiki A. et Trabelsi H., 1989. Réponses de 5 variétés de tomates irriguées avec des eaux salines .Mémoire de fin d'études 2ème cycle., I.A.V. CHA, Agadir.
- SEEE, Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement, 2007. Brochure : Pourquoi des normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation ?
Web: www.matee.gov.ma
- Segura-Nieto M., Barba De La Rosa A.P., and Paredes-Lopez O., 1994. Biochemistry of amaranth proteins. in *Amaranth Biology, Chemistry, and Technology*. (ed.) Octavio Paredes-López, CRC Press. Boca Raton. pp. 75-106.
- Singh B. and Singh G., 2004. Influence of soil water regime on nutrient mobility and uptake by Dalbergia sissoo seedlings. *Tropical Ecology*, 45(2): 337-340.
- Sipala, S., Mancini, G. and Vagliasindi, F.G.A., 2003. Development of web-based tool for the calculation of costs of different wastewater treatment and reuse scenarios. *Wat. Sci. Tech.*, 3: 89-96.
- Skiredj A., Elattir H. et El Fadl A., 2007. Légumineuses et maïs doux : [La fève en vert](#). Institut Agronomique et vétérinaire Hassan II. Département d'horticulture. <http://www.legume-fruit-maroc.com>
- Skiredj A., Elattir H., Walali L.D. and El Fadl A., 2003. Artichaut, le cardon, le maïs doux, l'asperge, le poireau. *Transfert de technologie en agriculture*, 102: 4.
- Shannon M. C., Grieve C. M. & Francois L.E., 1994. Whole-plant response to salinity. In: R. E. Wilkinson (ed.). *Plant-environment Interactions*. Marcel Dekker, New York, pp. 199-244.

- Shannon M.C., 1984. Effects of salinity on growth and accumulation of organic ions in cultivated and Wild tomato species. *Journal of the American Society for horticultural Science*. 112:416 – 423.
- Sipala S., Mancini, G. and Vagliasindi F.G.A., 2003. Development of web-based tool for the calculation of costs of different wastewater treatment and reuse scenarios. *Wat. Sci. Tech.*, 3: 89-96.
- Soudi Brahim, Mario Kerby and Choukr-Allah R., 2000. Réutilisation des eaux usées en agriculture. *Transfert de technologie en agriculture*, 67: 4.
- Stallknecht G.F. & Schulz-Schaeffer J.R., 1993. Amaranth rediscovered. In: J. Janick and J.E Simon (Eds.), *New Crops*. Wiley, New York, pp.211-218.
- Sultana N., Ikeda T. & Kashem M.A., 2001. Effect of foliar spray of nutrient solutions on photosynthesis, dry matter accumulation and yield in seawater- stressed rice. *Environ. Exp. Bot.* 46, 129-140.
- Sumner A.K., Nielsen M.A. and Youngs C.G., 1980. Production and evaluation of pea protein isolate. Presented at the 40th annual meeting of the Institute of Food Technologists, New Orleans, La, June 8-11.
- Svirskis A., 2003. Investigation of amaranth cultivation and utilization in Lithuania. *Agronomy research*, 1 (2): 253-264.
- Szabolcs L., 1994. Soils and salinization. In: M. Pessarakli (ed.), *Handbook of Plant and Crop stress*. Marcel Dekker, New York, pp. 3-11.
- Tanji, K.K., Kielen, N.C. 2002. Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 61: 205 pp.
- Tapia M.E., 2000. Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación. Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro. Mujica, A., Jacobsen, S. E., Izquierdo, J., Marathe, J. P. et al. FAO (eds). CIP, UNAP. FAO, CD Cultivos Andinos, version 1.0. Santiago, Chile.
- Thibaudeau S., Cantin J., Filion P., Guay D., Rivest R., Thibault É. et al. Tremblay G., 2006. Fertilisation azotée dans le maïs-grain. In: Martin Chantigny, Marcel Giroux and Noura Ziadi, Canada.
- Tiwari K.R., 1998. Pea and Powdery Mildew: Genetics of host-pathogen interaction and identification of molecular markers for host resistance. Ph. D. Thesis of University of Manitoba.
- UN, 2000. Water, a shared responsibility. The United Nations World Water Development Report - 2. UNESCO and Berghahn Books, Paris and London.
- United Nations Environment Programme (UNEP), 2010. New Science and Developments in our Changing Environment 2010. UNEP Year Book. Division of Early Warning and Assessment (DEWA), Nairobi. 66.

- UN-Water, 2006. Coping with water scarcity: a strategic issue and priority for system wide action.
- UN-Water, 2007. Coping with water scarcity: challenge of the twenty – first century.
- Vargas-Yáñez, M., Moya F., Tel E., García-Martínez M.C., Guerber E. & Bourgeon M., 2009. Warming and salting in the western Mediterranean during the second half of the 20th century: inconsistencies, unknowns and the effect of data processing. *Scientia Marina*. 73(1): 7-28.
- Wahbi Abdallah, 2007. L'effet de cinq substrats sur une culture de haricot vert irriguée par les eaux usées épurées sous serre: aspects nutritionnels, agronomiques et physiologiques. CIHEAM-IAMB, valenzano, bari, Italie. master of science.
- Wahome P.K., Jesch H.H. & Grittner I., 2001. Mechanisms of salt stress tolerance in two rose rootstocks: *Rosa chinensis* 'Major' and *R. rubiginosa*. *Sci. Hort.* 87, 207-216.
- Wang Feng-Xin, Kang Yaohu and B Shi-Ping Liu (2005). Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 79(2006): 248-264.
- Wani S.P., McGill W.B., Haugenkozyra K.L., Robertson J.A. and Thurston J.J., 1994. Improved soil quality and barley yields with faba-beans, manure, forages and crop rotation on a gray luvisol. *Can. J. Soil Sci.* 74, 75-84.
- Wanjogu S.N., Muya E.M., Gicheru P.T. & Waruru B.K., 2001. Soil degradation: Management and rehabilitation in Kenya. Proceedings of the FAO/ISCW expert consultation on Management of Degraded Soil in Southern and Eastern Africa (MADS-SEA) 2nd Networking Meeting 18-22 September 2000, Pretoria, South Africa. PR102-113.
- Wilson C., Read J. & Abo-Kassem, E., 2002. Effect of mixed-salt salinity on growth and ion relations of a quinoa and a wheat variety. *Journal of Plant Nutrition* 25, 2689-2704.
- Winkel T., 2009. Le Quinoa : le succès bio équitable d'une plante ancestrale. *Actualité scientifique*, 329: 2.
- World Water Assessment Programme (WWAP), 2009. The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World. Paris: Unesco and London. Earthscan.
- Wright A.T., 1990. Yield effect of pulses on subsequent cereal crops in the northern prairies. *Can. J. Plant Sci.* 70, 1023-1032.
- Xanthoulis D. and Fonder N., 2005. Sustainability And Optimisation Of Treatments And Use Of Wastewater In Agriculture In Mediterranean Region. INCO project. Gembloux, Belgium: 6.
- Yeo A.R., 1998. Molecular biology of salt tolerance in the context of whole plant physiology. *J. Exp. Bot.* 49, 915-929.
- Zhang H., 2003. Improving Water Productivity through Deficit Irrigation: Examples from Syria, the North China Plain and Oregon, USA. In: J.W. Kijne, Barker R. and Molden D.

(ed). CAB International. Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement CSIRO Plant Industry, Wembley, Australia, CSIRO Plant Industry, Wembley, Australia.

Zhao Wenzhi, Liu Bing and Zhang Zhihui, 2009. Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. Agricultural Water Management, In Press, Corrected Proof.

Zohary D. & Hopf M., 1973. Domestication of pulses in the Old World. Science 182: 887-894.

ANNEXES

Annexe 1. Recommandations et normes de l'Organisation Mondiale de la Santé pour l'irrigation avec des eaux usées.

Catégories	Conditions de réutilisation	Groupes exposés	Techniques d'irrigation	Nématodes intestinaux ^b	Coliformes fécaux/100mL	Traitements recommandés pour atteindre le niveau de qualité microbiologique
A	Irrigation sans restrictions A1 pour les cultures maraîchères consommées crues, les terrains de sports, les parcs publics ^d	Travailleurs, consommateurs, public	Toutes	≤ 1	$\leq 10^d$	Série de bassins de stabilisation, réservoir de stockage et de traitement ou traitement équivalent permettant d'atteindre la qualité microbiologique escomptée
B	Irrigation restreinte. Céréales, cultures industrielles, fourragères, pâturage et forêt ^c	Travailleurs Population sis dans l'environnement proche	Par aspersion Par rigole d'infiltration ou par gravité Toutes	≤ 1 ≤ 1 $\leq 0.1^e$	$\leq 10^5$ $\leq 10^3$ $\leq 10^3$	Série de bassins de rétention avec un temps de séjour suffisant (8 à 10 jours) ou traitement équivalent permettant l'abattement des œufs d'helminthes et des coliformes
C	Irrigation localisée sur des cultures ^(f) de la catégorie B s'il n'y a pas d'exposition des travailleurs ou du public	Aucun	Goutte-à-goutte, micro-jet, etc.	Non applicable	Non applicable	Pré-traitement nécessaire pour des raisons techniques liées à l'irrigation, mais pas moins qu'une sédimentation primaire

a : Dans certains cas, tenant compte du contexte épidémiologique, socioculturel et environnemental, ces limites sont changées en conséquence ;

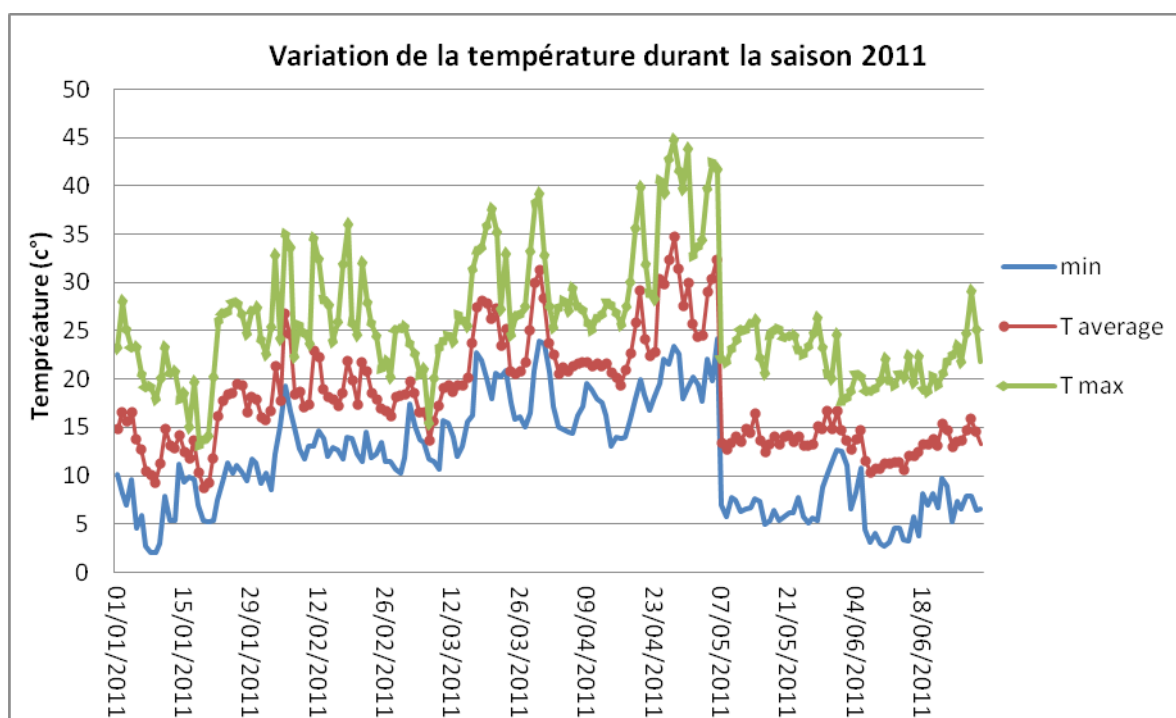
b : Les espèces de *Ascaris* et *Trichuris*;

c : Durant la période d'irrigation

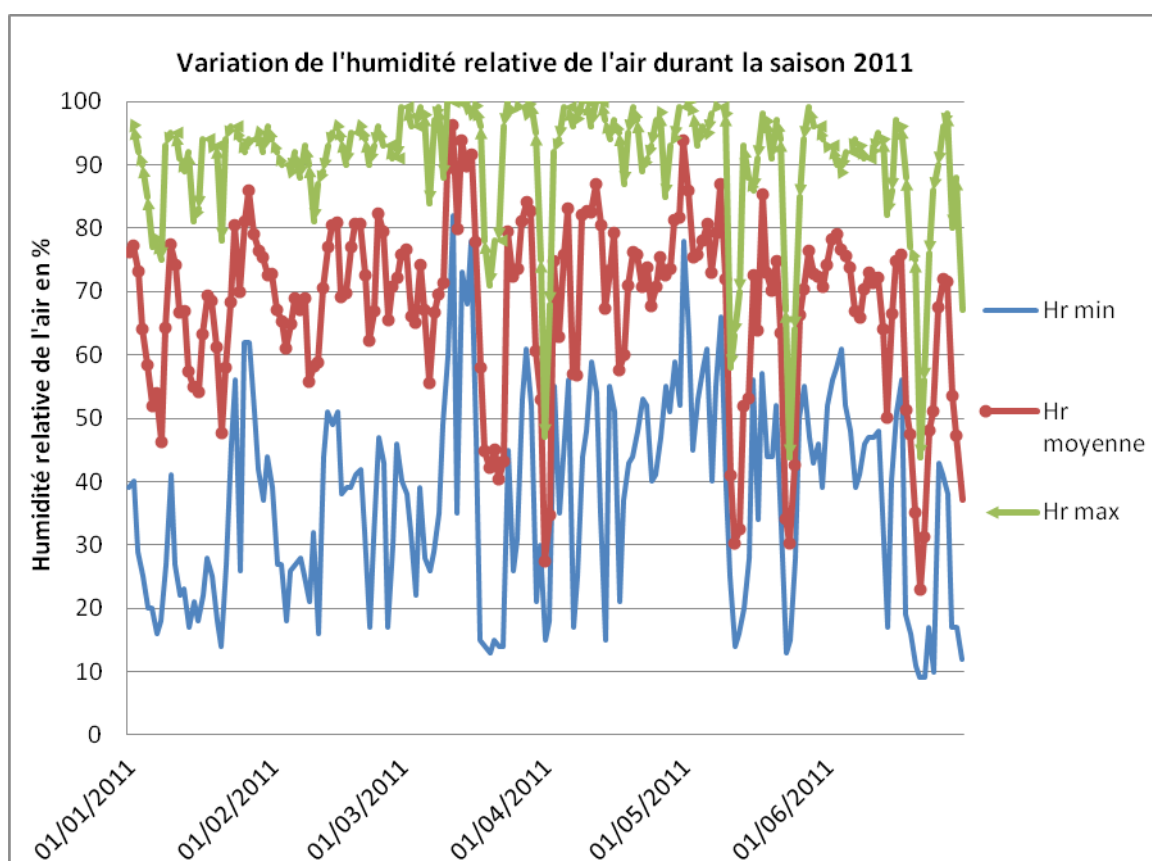
d : Des limites plus restrictives de moins de 200 coliformes fécaux /100 mL sont plus appropriées pour les Golfs, les hôtels et des espaces où le public peut avoir un contact direct avec les espaces irrigués.

e : Cette limite peut être augmentée à ≤ 1 œuf/l si (i) il fait chaud et sec et que l'irrigation de surface n'est pas pratiquée ou (ii) le traitement de l'eau contient aussi des traitements chimiothérapeutiques anti-helminthes.

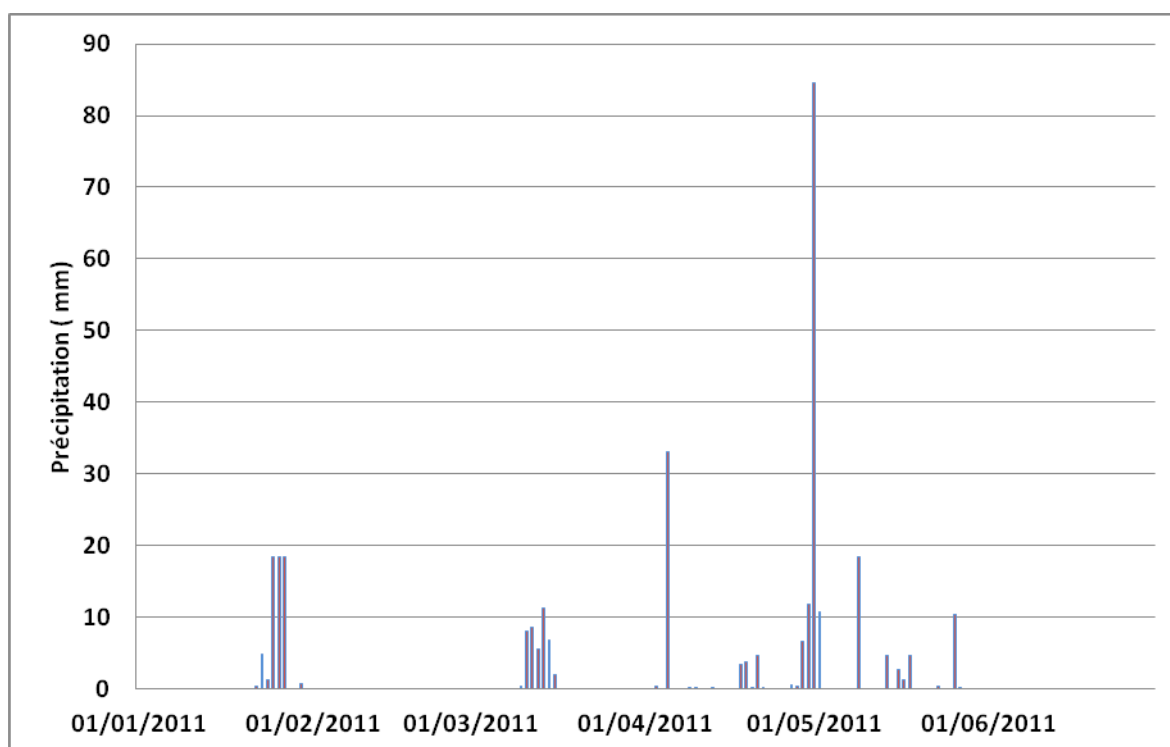
f : Dans le cas des arbres fruitiers, l'irrigation doit s'arrêter deux semaines avant la récolte, et aucun fruit ne doit être récolté au sol. L'irrigation par aspersion ne doit pas être utilisée.



Annexe 2. Variation de la température durant la saison 2011.



Annexe 3. Variation de l'humidité relative durant la saison 2011.



Annexe 4. Enregistrement des précipitations (mm) durant la saison 2011.

Annexe 5. Résultats analyses eaux traitées eaux usées traitées du Complexe Horticole d'agadir

Répétitions	Nombre d'individu dans 100 ml d'eau		
	Coliformes Totaux	Coliformes ficaux	Stréptocoques ficaux
R ₁	90	60	60
R ₂	250	600	600
R ₃	60	60	90
Moyenne	133	240	250
Dans les Normes de l'OMS	-	OUI (<1000)	OUI (<1000)

Annexe 6. Analyses statistiques

Modèle linéaire généralisé : Rendemnt en fonction de tRAITEMENT; bLOC

Analyse de la variance pour Rendemnt, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
tRAITEME	2	3,294	3,294	1,647	0,27	0,773
bLOC	3	29,477	29,477	9,826	1,60	0,285
Erreur	6	36,829	36,829	6,138		
Total	11	69,601				

bLOC	tRAITEMENT	variété	Rendemnt
1	T	V1	2,11107
2	T	V1	1,82732
3	T	V1	4,68
4	T	V1	4,50165
1	3	V1	4,24539
2	3	V1	2,33392
3	3	V1	2,41901
4	3	V1	1,60741
1	6	V1	0,94086
2	6	V1	1,65712
3	6	V1	4,66301
4	6	V1	1,72765
1	T	V2	6,60634
2	T	V2	7,9854
3	T	V2	1,8924
4	T	V2	4,70373
1	3	V2	3,6718
2	3	V2	5,84143
3	3	V2	2,62009
4	3	V2	4,27457
1	6	V2	9,52605
2	6	V2	1,7822
3	6	V2	2,34435
4	6	V2	6,86499
1	T	V3	5,6745
2	T	V3	4,54841
3	T	V3	3,35098
4	T	V3	4,95715
1	3	V3	3,82634
2	3	V3	5,6745
3	3	V3	3,45198
4	3	V3	3,67868
1	6	V3	6,40248
2	6	V3	4,48545
3	6	V3	9,57914
4	6	V3	7,2181

Modèle linéaire généralisé : PFS1 en fonction de traitement; varietés; ...

Analyse de la variance pour PFS1, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
--------	----	--------	----------	----------	---	---

traiteme	2	829,7	829,7	414,8	1,35	0,279
varietés	2	74,2	74,2	37,1	0,12	0,887
bloc	3	1044,2	1044,2	348,1	1,13	0,357
traiteme*varietés	4	896,5	896,5	224,1	0,73	0,582
Erreur	24	7389,1	7389,1	307,9		
Total	35	10233,5				

Modèle linéaire généralisé : PFS2 en fonction de traitement; varietés; ...

Analyse de la variance pour PFS2, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
traiteme	2	17803	17803	8901	0,25	0,778
varietés	2	323319	323319	161659	4,61	0,020
bloc	3	192186	192186	64062	1,83	0,169
traiteme*varietés	4	48926	48926	12231	0,35	0,842
Erreur	24	841100	841100	35046		
Total	35	1423333				

Modèle linéaire généralisé : PFS3 en fonction de traitement; varietés; ..

Analyse de la variance pour PFS3, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
traiteme	2	124072	124072	62036	0,33	0,723
varietés	2	1254624	1254624	627312	3,33	0,053
bloc	3	2190382	2190382	730127	3,87	0,022
traiteme*varietés	4	448981	448981	112245	0,60	0,669
Erreur	24	4524849	4524849	188535		
Total	35	8542908				

Modèle linéaire généralisé : PSS1 en fonction de traitement; varietés; ...

Analyse de la variance pour PSS1, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
traiteme	2	7,761	7,761	3,881	0,77	0,475
varietés	2	11,003	11,003	5,501	1,09	0,352
bloc	3	31,222	31,222	10,407	2,06	0,132
traiteme*varietés	4	9,446	9,446	2,362	0,47	0,759
Erreur	24	121,116	121,116	5,046		
Total	35	180,549				

Modèle linéaire généralisé : PSS2 en fonction de traitement; varietés; ...

Analyse de la variance pour PSS2, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
traiteme	2	2488	2488	1244	0,55	0,584
varietés	2	13842	13842	6921	3,06	0,066
bloc	3	3749	3749	1250	0,55	0,652
traiteme*varietés	4	3815	3815	954	0,42	0,792
Erreur	24	54339	54339	2264		
Total	35	78233				

Modèle linéaire généralisé : PSS3 en fonction de traitement; varietés; ...

Analyse de la variance pour PSS3, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
traiteme	2	7934	7934	3967	0,60	0,558

varietés	2	49609	49609	24805	3,74	0,039
bloc	3	10417	10417	3472	0,52	0,670
traiteme*varietés	4	5180	5180	1295	0,20	0,938
Erreur	24	159236	159236	6635		
Total	35	232376				

Modèle linéaire généralisé : SFS1 en fonction de traitement; varietés; ...

Analyse de la variance pour SFS1, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
traiteme	2	19942	19942	9971	0,20	0,819
varietés	2	11427	11427	5713	0,12	0,891
bloc	3	105565	105565	35188	0,71	0,554
traiteme*varietés	4	157721	157721	39430	0,80	0,538
Erreur	24	1185194	1185194	49383		
Total	35	1479848				

Modèle linéaire généralisé : SFS2 en fonction de traitement; varietés; ...

Analyse de la variance pour SFS2, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
traiteme	2	6693162	6693162	3346581	0,29	0,752
varietés	2	117890924	117890924	58945462	5,08	0,014
bloc	3	194957233	194957233	64985744	5,60	0,005
traiteme*varietés	4	73656716	73656716	18414179	1,59	0,210
Erreur	24	278328500	278328500	11597021		
Total	35	671526535				

Modèle linéaire généralisé : SFS3 en fonction de traitement; varietés; ...

Analyse de la variance pour SFS3, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
traiteme	2	1150889	1150889	575445	0,65	0,532
varietés	2	10291997	10291997	5145998	5,79	0,009
bloc	3	6258325	6258325	2086108	2,35	0,098
traiteme*varietés	4	1900703	1900703	475176	0,53	0,711
Erreur	24	21323116	21323116	888463		
Total	35	40925030				

B	tra	var	PFS1	PFS2	PFS3	PSS1	PSS2	PSS3	SFS1	SFS2	SFS3
1	T	V1	13	157	245	1,6	32	94,8	171,9	1310,9	1448
2	T	V1	34,5	175	367	4,4	32,2	152	391	3834,1	747,6
3	T	V1	5,1	268	117	0,84	47,4	37,2	72,05	1819,9	550,3
4	T	V1	36,3	280	566	4,9	53,1	194	954,7	1618,5	5623

1	3	V1	64,7	79	237	8,9	14,8	80,7	631,3	969,1	1724
2	3	V1	24,3	47	213	3,4	8,1	67,6	277,8	880,7	1276
3	3	V1	20,5	195	455	2,7	39,8	162	239,3	1524,1	1867
4	3	V1	31,5	130	457	3,4	20,3	161	424,2	1370,7	3558
1	6	V1	31,3	170	440	4,3	32,9	155	363,4	915,6	2019
2	6	V1	39,2	164	79,9	5,5	27	23,8	449,5	1935,5	351,2
3	6	V1	6,1	57	218	0,6	10,6	73,7	85,92	450,7	1047
4	6	V1	15,3	143	379	2	23,7	126	196,6	3130,7	1120
1	T	V2	6,1	137	269	1,1	24,1	82,3	43,82	2825,3	530
2	T	V2	44,6	440	317	7,5	87	128	455,4	6614,4	312,1
3	T	V2	12	159	789	1,7	29,3	102	165,4	1538	153,1
4	T	V2	52,7	120	1281	7,1	16,7	55,7	507,2	3597,4	94,55
1	3	V2	21,6	83	442	2,5	14,5	150	183	1129	1235
2	3	V2	59,6	215	91,7	8,8	37,1	26,6	505,4	4199	300
3	3	V2	9,9	213	237	1,1	30,2	73	74,58	3730,2	862,7
4	3	V2	22,9	348	190	3,2	47,9	65,3	218,2	5440,4	647,7
1	6	V2	36,5	423	260	5,7	72,2	76,1	394,5	3900,1	612,1
2	6	V2	26,4	159	310	2,8	31,1	105	272,2	19025,6	277,1
3	6	V2	49,6	310	178	5,5	46,4	53,6	706	4013,7	1147
4	6	V2	21,8	267	181	3,6	46,1	52,8	209,3	3292	277,4
1	T	V3	25,7	91	119	3,01	13,1	128	336,3	2201,4	115,5
2	T	V3	17,9	953	119	2,14	130	474	213,3	17239,1	1059
3	T	V3	49,6	217	556	4,7	21	56,4	508,1	3802,3	537,6
4	T	V3	6,7	493	1850	0,69	75,3	191	103,7	8791,9	1789
1	3	V3	36	105	47,2	3,1	21,1	91,1	357	1439,6	45,61
2	3	V3	53,8	764	331	6,6	114	214	513,5	12943,4	320,2
3	3	V3	17,8	84	1582	1,68	10,5	122	260,1	1037,4	1530
4	3	V3	60,1	609	1436	4,9	99,4	152	678,3	8158,3	1389
1	6	V3	31,3	364	186	3,1	47,9	114	390	4482,9	180,1
2	6	V3	16,8	172	138	2,23	22,4	141	353,2	2589	133
3	6	V3	10,9	264	1855	0,97	261	262	132,5	85,4	1794
4	6	V3	11,9	503	644	1,25	80,2	97,4	127,2	7571	622,9

Modèle linéaire généralisé : Taille1 en fonction de traitement; variétés; ...

Analyse de la variance pour Taille1, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL du modèle	DL réduit	SC séq
traiteme	3	3	553,33
variétés	2	2	1250,72
bloc	3	3	181,19
traiteme*variétés	6	3+	38,18
Erreur	21	24	393,96
Total	35	35	2417,39

Modèle linéaire généralisé : taille1 en fonction de traitement; varietés; ...

Analyse de la variance pour taille1, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
traiteme	2	4,50	4,50	2,25	0,14	0,872
varietés	2	1801,25	1801,25	900,63	55,29	0,000
bloc	3	181,78	181,78	60,59	3,72	0,025
traiteme*varietés	4	37,74	37,74	9,43	0,58	0,681
Erreur	24	390,92	390,92	16,29		
Total	35	2416,19				

Modèle linéaire généralisé : taille2 en fonction de traitement; varietés; ...

Analyse de la variance pour taille2, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
traiteme	2	1,13	1,13	0,56	0,02	0,980
varietés	2	190,94	190,94	95,47	3,37	0,051
bloc	3	36,89	36,89	12,30	0,43	0,731
traiteme*varietés	4	78,07	78,07	19,52	0,69	0,607
Erreur	24	679,95	679,95	28,33		
Total	35	986,98				

Modèle linéaire généralisé : taille3 en fonction de traitement; varietés; ...

Analyse de la variance pour taille3, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
traiteme	2	520,9	520,9	260,5	2,20	0,133
varietés	2	9908,6	9908,6	4954,3	41,82	0,000
bloc	3	96,5	96,5	32,2	0,27	0,845
traiteme*varietés	4	474,1	474,1	118,5	1,00	0,427
Erreur	24	2843,0	2843,0	118,5		
Total	35	13843,1				

Modèle linéaire généralisé : taille4 en fonction de traitement; varietés; ...

Analyse de la variance pour taille4, en utilisant la SC ajustée pour les tests

Source	DL	SC séq	SC ajust	CM ajust	F	P
traiteme	2	67,4	67,4	33,7	0,14	0,871
varietés	2	27167,9	27167,9	13584,0	55,98	0,000
bloc	3	306,4	306,4	102,1	0,42	0,740
traiteme*varietés	4	542,3	542,3	135,6	0,56	0,695
Erreur	24	5823,5	5823,5	242,6		
Total	35	33907,5				

bloc	traitement	variété	taille1	taille2	taille3	taille4
1	T	V1	28,4	57,4	82	82,5
2	T	V1	47	69,4	79	92
3	T	V1	36,4	55,2	72	70
4	T	V1	42	62,4	78,5	70,5
1	3	V1	34,2	58	58,5	67
2	3	V1	41,2	54,2	51	69,5
3	3	V1	33,2	57,8	72,5	66
4	3	V1	31,4	61,4	69	60

1	6	V1	29,2	62,8	88,5	92
2	6	V1	41,2	62,8	54	69,5
3	6	V1	36,8	53,6	61,5	62,5
4	6	V1	32,2	47,4	65	62
1	T	V2	31,8	50,6	68,5	70
2	T	V2	34,4	50,6	82,5	96
3	T	V2	32,8	57,6	80	91
4	T	V2	27,7	46,4	68,5	80
1	3	V2	30,8	52,8	85,5	100
2	3	V2	35,2	56,6	76,5	89
3	3	V2	27,2	47,8	58	70
4	3	V2	40,8	59,4	77,5	80
1	6	V2	30,8	54,6	67,5	76
2	6	V2	33,4	56,2	62,5	105
3	6	V2	30	51,8	58,5	99
4	6	V2	39,2	58,4	65	37
1	T	V3	20,8	54,4	84,5	118
2	T	V3	20,2	51,2	103	126,5
3	T	V3	17,6	46,4	110,5	127
4	T	V3	21,6	61,6	126	151,5
1	3	V3	21,4	50,8	110	122,5
2	3	V3	19,6	49,6	99	123
3	3	V3	14,8	56,8	117	144
4	3	V3	21,8	60,8	112	145
1	6	V3	16,6	54,2	98,5	127,5
2	6	V3	22,6	54	104	137,5
3	6	V3	21,6	56,4	110	145
4	6	V3	18,2	48,6	88,5	151