

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA

FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCE DE LA NATURE ET DE LA VIE

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

THESE

Présentée

Par **MASMOUDI Mohamed Chemse Eddine**

En vue de l'Obtention du Diplôme De Doctorat LMD en Sciences Agronomiques

THEME

**Impact de la correction chimique de la qualité des eaux d'irrigation
sur deux cultures céréalières (orge et blé) dans la région de Biskra**

Jury:

Saadi Ines	MCA	Président	Université de Biskra
Boumaraaf Belkacem	MCA	Directeur de thèse	Université de Biskra
Guimeur Kamel	MCA	Examineur	Université de Biskra
Mancer Halima	MR	Examinatrice	CRSTRA

Année universitaire : 2023/2024

REMERCIEMENT

Je remercie avant tout ALLAH tout puissant, de m'avoir guidé toutes les années d'étude et m'avoir donné la volonté, la patience et le

Courage pour terminer ce travail.

Je remercie ma famille surtout mes parents pour ses sacrifices et ses sincérités.

Je remercie mon encadreur Dr BOUMARAF BELKACEM, pour m'avoir aidé et soutenir au moment le plus délicat.

Je le remercie pour son bien vaillance, orientations, ses précieux conseils et encouragements.

Je remercie infiniment Dr SAADI INES qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury d'examen de cette thèse.

Je remercie profondément Dr GUIMEUR KAMEL et Dr MANCER HALIMA qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.

MASMOUDI MED CHEMSE EDDINE

DÉDICACE

Au nom du dieu le clément et le miséricordieux.

A ma très chère mère, pour son amour, son support physique et moral, ses prières et sa tendresse de m'avoir donné la force de continuer et obtenir ce travail.

A mon très cher père le Pr. MASAMOUDI ALI pour ses encouragements son soutien moral et physique et pour tous les efforts qu'il a déployés pour aiguïser ma curiosité scientifique qui m'ont précieusement aidé à avoir ce travail.

A ma chère épouse qui a été mon soutien et ma motivation pour terminer ce travail.

A la joie de mon cœur mes filles Mariya et amira, que dieu les protèges.

A toute la famille MASMOUDI - GHAMRI.

A Athmani Tarek, Tahrine Mohamed pour leur aide et soutien.

A mes chers amis : Imad Eddine N, Takie Eddine Y, Mahdi M, Younes G, Brahim M, Zakaria B, Yacine B.

A toute les personnes les plus chères à mon cœur.

Je dédie ce travail.

MASMOUDI MED CHEMSEDDINE

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : L'interprétation des classes des eaux d'irrigation.....	18
Tableau 2: Niveaux de toxicité pour des ions spécifiques (meq/L).....	19
Tableau 3: La limite de classe pour le pourcentage de sodium échangeable.....	21
Tableau 4 : Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation.....	22
Tableau 5: Propriétés physico-chimiques de sol.....	41
Tableau 6: La qualité chimique des eaux d'irrigation.	42
Tableau 7: Quantités de nitrates de calcium ajoutées aux eaux d'irrigation	42
Tableau 8: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la longueur des tiges.....	53
Tableau 9: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le rendement des grains.....	54
Tableau 10: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le rendement en paille.	55
Tableau 11: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le nombre des grains par épi.	57
Tableau 12: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le poids de 1000 grains.....	58
Tableau 13: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la longueur d'épi.	59
Tableau 14: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la CE du sol.....	61
Tableau 15: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le pH du sol.....	62
Tableau 16: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur teneur de Sodium soluble du sol.	63
Tableau 17: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur teneur de calcium soluble du sol.....	64
Tableau 18 : L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le teneur de potassium soluble du sol.	65
Tableau 19: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le teneur de magnésium soluble du sol.	66

Tableau 20: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le teneur de chlore soluble du sol.....	67
Tableau 21: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le calcaire totale du sol.....	68
Tableau 22: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le rendement de paille.	73
Tableau 23: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le rendement en grains.	72
Tableau 24: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la longueur d'épi.	77
Tableau 25: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le poids de 1000 grains.....	76
Tableau 26: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la longueur des tiges.....	70
Tableau 27: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le nombre des grains par épi.	74
Tableau 28: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la CE du sol.....	78
Tableau 29: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le pH du sol.	79
Tableau 30: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le teneur de sodium soluble du sol.	80
Tableau 31: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le teneur de calcium soluble du sol.	81
Tableau 32: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le teneur de potassium soluble du sol.....	82
Tableau 33: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le teneur de magnésium soluble du sol.	83
Tableau 34: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le teneur de chlore soluble du sol.....	84
Tableau 35: L'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le calcaire totale du sol.....	85

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Mécanisme de la salinisation (codeval, 2016).....	15
Figure 2: Diagramme pour la classification des eaux d'irrigation (Richard., 1954).....	17
Figure 3: répartition des sols salins dans le monde (Wicke et al., 2011).....	23
Figure 4: La différence entre la structure du sol flocculé (les agrégats) et dispersé. (Choudhari et kharche, 2018)	24
Figure 5: Bilan minéral des éléments nutritifs des plantes (FAO, 1999).....	29
Figure 6: flux d'azote au sein d'une parcelle agricole : le cycle de l'azote (PAN., 2020)	30
Figure 7: les quatre formes de calcium dans le sol. (Source :Soltner).....	32
Figure 8: Graines de blé provenant de plantes cultivées avec une fertilisation faible en Mg (à gauche) et adéquate en Mg (à droite). (Ceylan, et al., 2016).....	34
Figure 9: Blé atteint d'une carence en cuivre. Source (Reid, 2006)	37
Figure 10: Position et situation géographique de la région de Biskra. (Merabti., 2016) ...	40
Figure 11: Test de germination (Photo original).....	43
Figure 12: Dispositif expérimental (Photo original).....	46
Figure 13: l'application foliaire du traitement phytosanitaire (Photo original).	47
Figure 14 : Helminthosporiose du blé (Photo original).	48
Figure 15: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur la longueur des tiges.	52
Figure 16: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le rendement en grains.	54
Figure 17: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le rendement en paille.....	55
Figure 18: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le nombre des grains par épi. .	56
Figure 19: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le poids de 1000 grains	58
Figure 20: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur la longueur d'épi.....	59
Figure 21: Evolution de CE du sol.....	60
Figure 22: Evolution du pH du sol.....	61
Figure 23: Teneur de sodium soluble du sol.....	63
Figure 24: Teneur de calcium soluble du sol.....	64
Figure 25: Teneur de potassium soluble du sol.	65
Figure 26: Teneur de magnésium soluble du sol.	66
Figure 27: Teneur de chlore du sol.	67
Figure 28: Evolution du calcaire total dans le sol.....	68
Figure 29 : Evolution du SAR de la solution du sol	69
Figure 30: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur la longueur des tiges.	70
Figure 31: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le rendement en grains.	71
Figure 32: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le rendement en paille.....	73
Figure 33: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le nombre des grains par épi. .	74
Figure 34: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le poids de 1000 grains.	75
Figure 35: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur la longueur d'épi.....	77
Figure 36: Evolution de la CE du sol.....	78
Figure 37: Evolution du pH du sol.....	79
Figure 38: Teneur de sodium soluble du sol.....	80
Figure 39: Teneur de calcium soluble du sol.....	81
Figure 40 : Teneur de potassium soluble du sol.	82

Figure 41: Teneur de Magnésium soluble du sol.....	83
Figure 42: Teneur de chlore du sol.	84
Figure 43: Evolution du calcaire total dans sol.....	85
Figure 44 : Evolution du SAR de la solution du sol	86

Table des matières

Remerciement	I
Dédicace.....	II
Liste des tableaux... ..	III
Liste des figures.....	V
Résumé	5
Introduction generale.....	9
Chapitre1: La qualite des eaux d'irrigation et leurs effets sur le sol.....	13
I.1 Introduction.....	13
I.2 Salinite.....	14
I.2.1 Definition.....	14
I.2.2 Origine.....	14
I.2.2.1 La roche mère.....	14
I.2.2.2 La nappe phreatique.....	14
I.2.2.3 Origine anthropique	15
I.2.3 Comment mesurer la salinite ?.....	15
I.3 La sodicite.....	16
I.4 Les elements toxiques.....	18
I.4.1 Sodium.....	19
I.4.2 Chlore.....	19
I.4.3 Bore.....	20
I.5 L'alcalinite residuelle.....	20
I.6 Le pourcentage de sodium.....	21
I.7 Classification des eaux d'irrigation.....	21
I.8 Effets des eaux d'irrigation sur le sol.....	22
I.8.1 Sol salin.....	23
I.8.2 Sol sodic (alcalin).....	24
Chapitre 2: Le stress salin chez les plantes et les elements mineraux.....	26
II.1 Introduction.....	26

II.2 Effet du stress salin sur le comportement des plantes.....	26
II.2.1 Le stress osmotique.....	26
II.2.2 Le stress ionique.....	27
II.2.3 Effet nutritionnel.....	27
II.3 La nutrition minerale.....	27
II.4 Sources des elements nutritifs des plantes.....	28
II.5 Les elements mineraux et leur interactions et effet sur la plante.....	29
II.5.1 Elements majeurs.....	29
II.5.1.1 L'azote.....	29
II.5.1.2 Le phosphore.....	30
II.5.1.3 Le potassium.....	31
II.5.1.4 Le calcium.....	32
II.5.1.5 Le magnesium.....	33
II.5.1.6 Le soufre.....	34
II.5.2 Elements mineurs.....	35
II.5.2.1 Le fer.....	35
II.5.2.2 Le molybdene.....	35
II.5.2.3 Le cuivre.....	36
II.5.2.3 Le bore.....	37
II.5.2.4 Le chlore.....	38
Chapitre 3 : Materiel et methodes.....	40
III.1 Objectif.....	40
III.2 Situation geographique.....	40
III.3 Le sol.....	41
III.4 Les eaux d'irrigation.....	41
III.5 Les plantes.....	43
III.6 Test de germination.....	43
III.7 Les pots de vegetation.....	44
III.8 Remplissage des pots.....	44

III.9 Le protocole experimental.....	44
III.10 L'irrigation	44
III.11 Dispositif experimental.....	44
III.12 Traitements phytosanitaire.....	46
III.13 Parametres étudiés.....	48
III.13.1 Longueur des tiges.....	48
III.13.2 Rendement en grains.....	48
III.13.3 Rendement en paille.....	49
III.13.4 Nombre des grains par epi.....	49
III.13.5 Poids de 1000 grains.....	49
III.13.6 Longueur d'epi.....	49
III.14 Methodes d'analyse.....	49
Chapitre 4 : Resultats et discussions.....	52
Premiere partie : La culture d'orge.....	52
IV.1 Effet de la correction des eaux sur les parametres de la plante.....	52
IV.1.1 Longueur des tiges.....	52
IV.1.2 Rendement en grains.....	53
IV.1.3 Rendement en paille.....	54
IV.1.4 Nombre des grains par epi.....	56
IV.1.5 Poids de 1000 grains.....	57
IV.1.6 Longueur d'epi.....	58
IV.2 Effet de la correction des eaux sur le sol.....	60
IV.2.1 Evolution de la ce du sol.....	60
IV.2.2 Evolution du pH du sol.....	61
IV.2.3 Sodium soluble	62
IV.2.4 Calcium soluble	63
IV.2.5 Potassium soluble	64
IV.2.6 Magnesium soluble	66
IV.2.7 Le chlore	67

IV.2.8 Calcaire total	68
IV.2.9 Le SAR.....	69
Deuxieme partie : La culture de blé.....	70
IV.3 Effet de la correction des eaux sur les parametres de la plante.....	70
IV.3.1 Longueur des tiges.....	70
IV.3.2 Rendement en grains.....	71
IV.3.3 Rendement en paille.....	72
IV.3.4 Nombre des grains par epi.....	73
IV.3.5 Poids de 1000 grains.....	75
IV.3.6 Longueur d'epi.....	76
IV.4 Effet de la correction des eaux sur le sol.....	77
IV.4.1 Evolution de la ce du sol.....	77
IV.4.2 Evolution du pH du sol.....	79
IV.4.3 Sodium soluble	80
IV.4.4 Calcium soluble	81
IV.4.5 Potassium soluble	82
IV.4.6 Magnesium soluble	83
IV.4.7 Le chlore	83
IV.4.8 Calcaire total	85
IV.4.9 Le SAR.....	86
Synthese et conclusion generale.....	88
References bibliographiques.....	91

Résumé :

Le manque d'eau douce pour l'irrigation dans le monde et en particulier dans les zones arides et semi-arides est souvent posé comme un problème majeur pour l'agriculture, qui nécessite des recherches pour valoriser l'eau d'irrigation saline.

Ce travail vise à étudier l'impact de la correction chimique de la qualité de l'eau d'irrigation sur deux cultures céréalières orge et blé dur. L'expérimentation consiste à amender les eaux d'irrigation salées par un amendement calcique approprié. En effet, cinq catégories d'eaux d'irrigation de différentes salinités et différents teneurs en sodium (eaux brutes) sont corrigées par un apport de différentes doses de calcium (eaux corrigées). Les eaux corrigées sont donc préparées à partir des eaux brutes en appliquant des doses de calcium représentée par le nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ en fonction de leur teneur en sodium soluble dont le but est d'équilibrer les deux teneurs en sodium et en calcium. Les traitements sont cinq types d'eau brutes de salinité différente S1, S2, S3, S4 et S5 ainsi que cinq types d'eau corrigées S1c, S2c, S3c, S4c et S5c. Les dix traitements sont appliqués pour les deux cultures orge et blé en essais en pots de végétation.

Les résultats obtenus montrent des effets généralement favorables en fonction de l'espèce. Pour la croissance et le rendement en grains, l'effet de l'ajout de calcium est plus clair sur l'orge que sur le blé, en effet, tous les traitements corrigés présentent des hauteurs des plantes et des rendements en grains supérieurs que ceux des traitements bruts, cependant pour le rendement en paille et la longueur d'épi l'effet d'amendement calcique est remarquable pour les deux cultures.

Pour le nombre des grains par épi, l'effet de l'amendement calcique est totalement positif pour l'orge, tandis que pour le blé, cet effet est positif dans les salinités élevées. Pour les faibles salinités, les eaux brutes qui ont apporté le nombre de grains par épi le plus élevé.

Pour le sol, la conductivité électrique du sol augmente avec l'augmentation de la salinité de l'eau d'irrigation et l'ajout de calcium dans les deux cultures. En effet, les traitements corrigés présentent des conductivités électriques supérieures que celles des traitements bruts. Le pH est généralement moins élevé dans les traitements corrigés pour les deux cultures que celui des traitements bruts.

Pour la solution du sol, il y a enrichissement de la solution du sol en calcium et magnésium dans tous les traitements corrigés pour les deux cultures, cependant, le sodium, le chlore et le potassium sont généralement inférieurs dans les traitements corrigés que dans les traitements bruts dans les deux cultures.

Le calcaire total du sol est moins élevé dans les traitements corrigés que dans les traitements bruts dans les deux cultures.

Enfin, on peut dire que l'effet de l'amendement calcique est positif pour les deux cultures, mais il est très bien clair sur l'orge que le blé suite à la différence de la tolérance à la salinité.

Mots clés : Correction chimique, blé, orge, la qualité d'eau, eau d'irrigation saline.

ملخص:

غالبًا ما يمثل نقص المياه العذبة للري في العالم وخاصة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة مشكلة رئيسية للزراعة، الأمر الذي يتطلب البحث لتأمين مياه الري المالحة.

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير التصحيح الكيميائي لنوعية مياه الري على القمح والشعير. تتكون التجربة من تحسين مياه الري المالحة بإضافة محسن كلسي مناسب. حيث تم تصحيح خمس أنواع من مياه الري ذات ملوحة مختلفة ومحتويات صوديوم مختلفة (الماء الأصلي) عن طريق إضافة جرعات مختلفة من الكالسيوم (الماء المصحح). تم تحضير المياه المصححة من المياه الأصلية عن طريق إضافة جرعات من الكالسيوم على شكل $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ وفقًا لمحتواها من الصوديوم القابل للذوبان والذي يهدف إلى موازنة محتوى الصوديوم والكالسيوم. المعاملات عبارة عن خمسة أنواع من المياه الأصلية ذات درجة ملوحة مختلفة S1، S2، S3، S4، و S5 بالإضافة إلى خمسة أنواع من المياه المصححة S1C، S2C، S3C، S4C، و S5C. تم تطبيق المعاملات العشرة على زراعة الشعير والقمح في تجارب الأبيص النباتي.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها تأثيرات إيجابية بشكل عام اعتمادًا على ال زراعتين. بالنسبة للنمو و محصول الحبوب فإن تأثير إضافة الكالسيوم أكثر وضوحًا على الشعير منه على القمح، حيث أن جميع المعاملات المصححة أظهرت أن طول النباتات و محصول الحبوب أعلى من تلك التي في المعاملات الأصلية، أما محصول القش وطول السنبلة فإن تأثير المحسن الكلسي ملاحظ لكلا الزراعتين.

وبالنسبة لعدد الحبوب في السنبلة الواحدة فإن تأثير المحسن الكلسي إيجابي تمامًا بالنسبة للشعير، أما بالنسبة للقمح فإن هذا التأثير إيجابي في الملوحة العالية فقط. بالنسبة للملوحة المنخفضة، فإن المياه الأصلية هي التي تقدم أكبر عدد من الحبوب لكل سنبلة.

وبالنسبة للتربة فإن التوصيل الكهربائي للتربة يزداد مع زيادة ملوحة مياه الري وإضافة الكالسيوم في كلا الزراعتين. حيث تتمتع المعاملات المصححة بموصلية كهربائية أعلى من تلك الخاصة بالمعاملات الأصلية. يكون الرقم الهيدروجيني أقل عمومًا في المعاملات المصححة لكلا الزراعتين منه في المعاملات الأصلية.

بالنسبة لمحلول التربة، تم إثراء محلول التربة بالكالسيوم والمغنيسيوم في جميع المعاملات المصححة ل زراعتين، إلا أن الصوديوم والكلور والبوتاسيوم بشكل عام أقل في المعاملات المصححة عنها في المعاملات الأصلية في الزراعتين. وكان الكلس الكلي للتربة أقل في المعاملات المصححة عنه في المعاملات الأصلية في كلا الزراعتين. وأخيراً يمكن القول أن تأثير المحسن الكلسي إيجابي لكلا الزراعتين، ولكنه واضح جداً على الشعير أكثر من القمح بعد اختلاف تحمل الملوحة.

الكلمات المفتاحية : التصحيح الكيميائي، القمح، الشعير، نوعية المياه، مياه الري المالحة.

Abstract:

The lack of fresh water for irrigation in the world and especially in arid and semi-arid areas is often posed as a major problem for agriculture, which requires research to valorize saline irrigation water.

This work aims to study the impact of chemical correction of irrigation water quality on wheat and barley.

The experiment consists of amending salty irrigation water with an appropriate calcium amendment. In fact, five types of irrigation water with different salinities and different sodium contents (raw water) are corrected by adding different doses of calcium (corrected water). The corrected waters were prepared from the raw waters by applying the doses of calcium represented by $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ according to their soluble sodium content, the aim of which is to balance the two sodium and calcium contents. The treatments are five types of raw water of different salinity S1, S2, S3, S4 and S5 as well as five types of corrected water S1c, S2c, S3c, S4c and S5c. The ten treatments are applied to the two cultures barley and wheat in vegetation pot trials.

The results obtained show generally favorable effects depending on the species. For growth and grain yield, the effect of calcium addition is clearer on barley than on wheat, in fact, all corrected treatments present higher plant heights and grain yields than those raw treatments, however for straw yield and ear length the effect of calcium amendment is remarkable for both cultures.

For the number of grains per ear, the effect of calcium amendment is totally positive for barley, while for wheat, this effect is positive in high salinities. For low salinities, the raw waters which provided the highest number of grains per ear.

For soil, soil electrical conductivity increases with increasing irrigation water salinity and the addition of calcium in both cultures. Indeed, the corrected treatments have higher electrical conductivities than those of the raw treatments. The pH is generally lower in the corrected treatments for both cultures than that of the raw treatments.

For the soil solution, there is enrichment of the soil solution in calcium and magnesium in all the corrected treatments for the two cultures, however, sodium, chlorine and potassium are generally lower in the corrected treatments than in the raw treatments in the two cultures.

Total soil limestone was lower in the corrected treatments than in the raw treatments in both crops.

Finally, we can say that the effect of the calcium amendment is positive for both crops, but it is very clear on barley than wheat following the difference in tolerance to salinity.

Keywords: Chemical correction, barley, wheat, water quality, saline irrigation water.

Introduction générale

Les cultures céréalières sont considérées comme l'une des cultures vivrières stratégiques les plus importantes au monde en général et en Algérie en particulier, en raison de la nature et des caractéristiques de la société algérienne qui considère les céréales parmi les produits de base de grande consommation.

Aujourd'hui, l'écart entre offre et demande céréalière s'accroît de plus en plus et l'essentiel des consommations des céréales (70%) est importé, conséquence de plusieurs éléments : une croissance démographique incontrôlée, une forte consommation alimentaire due à l'exode rural, une dégradation accrue des conditions physiques du secteur agricole, une baisse importante des ressources hydriques. (Chabane et Boussard., 2012)

En 2013, les importations de céréales ont totalisé 3,16 milliards de dollars, contre 3,18 milliards de dollars en 2012, reculant de 0,62%, alors que les quantités importées ont augmenté de 2,55% pour atteindre 10,03 millions de tonnes. L'Algérie importe globalement 5% de la production mondiale de céréales. (Ammar., 2014)

L'Algérie ambitionne d'augmenter la superficie allouée aux céréales dans le cadre des investissements, et ce pour atteindre l'objectif fixé à un million d'hectares de superficies irriguées dans le grand sud, ceci afin d'atteindre l'autosuffisance et de répondre aux besoins du pays. L'eau reste la principale priorité, et le secteur agricole est considéré comme le plus gros consommateur d'eau, sachant que le changement climatique réduit considérablement les précipitations, spécialement dans les zones arides et semi arides où les précipitations sont rare, associé à forte évaporation, et selon Salhi et al (2023) l'évaporation concentre les solutions et les eaux évoluent et changent leur qualité. Le développement des cultures céréalières est confronté à la salinité des eaux d'irrigation dans la région saharienne.

Dans les zones arides, la salinité du sol et des eaux d'irrigation est une contrainte environnementale majeure affectant les sols agricoles (Alvarez et al., 2015)., c'est dû principalement à l'exploitation des eaux de forte minéralisation en irrigation, ce qui cause à court terme une baisse remarquable des rendements et à long terme un changement irréversible de la stabilité des sols.

En effet, les eaux salées surtout celles qui sont riches en sodium provoquent non seulement une augmentation de la pression osmotique de la solution du sol ce qui limite l'approvisionnement en eaux aux plantes mais aussi une toxicité et un déséquilibre nutritionnel important pour les cultures. Elle peut causer aussi une dégradation de la structure du sol ce qui rend le sol difficilement exploitable en agriculture.

Les efforts visant à accroître la production agricole dans les régions arides et semi-arides sont généralement entravés par le manque d'eau douce pour l'irrigation. Par conséquent, il est souvent nécessaire d'utiliser de l'eau de moindre qualité pour répondre aux besoins en eau des cultures. (Hamdy et al., 1993)

Dans ces conditions l'utilisation rationnelle de l'eau salée s'impose pour bien valoriser l'eau, atténuer l'effet de la salinité et mieux favoriser le développement des cultures (Masmoudi., 2012)

L'irrigation avec des eaux riches en sels peut entraîner la fixation de sodium par le complexe adsorbant du sol, donc un processus de sodisation, avec ses conséquences éventuelles pour les propriétés du sol : tendance à la dispersion des argiles, à la dégradation de la structure, à la perte de perméabilité et à l'asphyxie des plantes. (Gouaidia et al., 2013)

Ces sols peuvent être améliorés par l'utilisation d'amendements qui contiennent du Ca, lorsqu'ils sont ajoutés à l'eau, augmenter la concentration de calcium dans l'eau, réduisant ainsi le sodium par rapport au calcium et le SAR, améliorant ainsi le taux d'infiltration. (Risikesh., 2018). En plus, l'effet néfaste de sodium sur le sol ou sur la plante est d'autant plus accentué lorsque le sodium domine dans le milieu. Pour l'eau d'irrigation tant que le sodium n'atteint pas 50% du total des cations son action sur le complexe adsorbant du sol semble restreinte, au dessus de cette valeur le danger est grand il se traduit par l'imperméabilisation et la stérilisation du sol (Durand., 1983). L'effet de la sodicité sur la plante est un effet toxique est induit des problèmes nutritionnels dû au déséquilibre du rapport Ca/Na (Van Hoorn., 2001). Il est à noter que le milieu plus ou moins équilibré est moins agressif pour les plantes que le milieu non équilibré. Ainsi la toxicité du chlorure de sodium est moins forte en présence de calcium qui joue un rôle antagoniste (Maume et Dulac., 1929 in Durand., 1983 ; Masmoudi et al., 2014). Selon Rengasamy (1987) la présence de calcium dans l'eau saline-sodique limite l'adsorption du sodium par les colloïdes du sol et par conséquent empêche la formation de sol sodique avec de mauvaises conditions physiques. En plus, le calcium est nécessaire pour de nombreux processus importants dans la plante (Hepler et Wayne., 1985)

Introduction générale

Ce travail vise à étudier l'impact de la correction chimique de la qualité des eaux d'irrigation sur deux cultures céréalières (orge et blé) dans la région de Biskra. Les eaux corrigées ont été préparées à partir des eaux brutes par l'application des doses du calcium représenté par le nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ selon leurs teneurs en sodium soluble dont le but d'équilibrer les deux teneurs en sodium et en calcium. Les deux catégories des eaux brutes et corrigées sont utilisées en irrigation de deux cultures céréalières orge et blé dur en essais en pots de végétation dans le but d'analyser le comportement de ces deux cultures et réduire l'effet nocif de sodium à travers la création d'un milieu équilibré favorable au sol et à la plante.

CHAPITRE PREMIER :

**LA QUALITÉ DES EAUX D'IRRIGATION ET LEURS
EFFETS SUR LE SOL**

Chapitre1: La qualité des eaux d'irrigation et leurs effets sur le sol

I.1 Introduction

La notion de vie, toute vie est une illusion sans l'existence de l'eau. En effet, l'eau est le facteur essentiel et l'indispensable pour la survie. Dans la nutrition et le développement de tout les êtres vivants, des plantes en particulier le rôle de l'eau est fondamentale sous un double rapport : c'est un élément constitutif et élément véhicule l'homme a vu très tôt l'intérêt qu'il avait à apporter sur les terres qu'il cultivait l'eau d'irrigation, sans laquelle les plantes ne pouvaient se développer: il a pratiqué l'irrigation. L'irrigation donc a une très grande importance dans la production et l'économie du pays, elle est dans beaucoup de pays constitue un art ancien aussi vieux que la civilisation, mais pour le monde entier c'est une science moderne, la science de la survie.

Le désir d'augmenter la production alimentaire rend impérative une extension rapide de l'irrigation dans le monde. Quoique l'irrigation soit d'une importance capitale dans les régions désertiques arides et semi arides, elle devient de plus en plus importante également dans les régions humides.

La durabilité de l'agriculture irriguée dans les terres arides et semi-arides dépend principalement du niveau de salinité du sol et de la qualité de l'eau d'irrigation. (Aldakheel., 2011)

Près d'un milliard d'hectares de sols touchés par la salinisation ont été recensés à travers le monde (soit 8,7% des sols de la planète). Ces sols sont principalement observés en milieu naturellement aride ou semi-aride, en Afrique, en Asie et en Amérique latine. (FAO., 2021)

Les risques de salinisation des sols sont alors importants dans les zones caractérisées par une faible pluviométrie et une forte évaporation, une eau d'irrigation salée, une nappe phréatique salée, et une texture fine (Snoussi., 2000)

La salinisation résulte le plus souvent de l'irrigation de sols mal drainés sous climat aride. La stagnation de l'eau dans les couches superficielles du sol par défaut de drainage se traduit par une accumulation de sels dans les horizons les plus superficiels, car les mouvements ascendants, liés à la forte évaporation due au climat chaud et aride, excèdent de beaucoup l'infiltration et donc le lessivage. (François., 2008)

I.2 Salinité

I.2.1 Définition

Selon Slama (2004) la salinité découle de la présence des solutés minéraux majeurs dissouts dans les eaux ou dans les sols. C'est la mesure de la totalité des sels dissouts.

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), de potassium (K^+), les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les bicarbonates (HCO_3^-) (Couture., 2006). L'effet de la salinité se manifeste généralement chez la plupart des plantes cultivées par une réduction de la croissance et le développement. (Munns et al., 1983)

I.2.2 Origine

I.2.2.1 La roche mère

La principale source de sels dans le sol et les eaux est l'altération géochimique continue des roches qui forment les couches supérieures de la croûte continentale terrestre. (Suarez et Jurinak., 2011). L'altération de la roche mère peut libérer les éléments nécessaires à la formation des sels solubles (altération de minéraux primaires riches en sodium, de roches volcaniques, des produits de l'hydrothermalisme riches en soufre et en chlore). (Boualla et al., 2012)

I.2.2.2 La nappe phréatique

La salinisation peut être due à la remontée d'une nappe salée peu profonde, ou à la remonté capillaire pendant les périodes sèches. (Durand, 1983 ; Daoud et al, 1993 ; Boualla et al., 2012). Ensuite, l'humidité s'évapore à partir de la surface, laissant le sel. Il en résulte que les ions du sel hydrosoluble cristallisés restent et sédimentent sur la surface du sol. (codeval 2016)

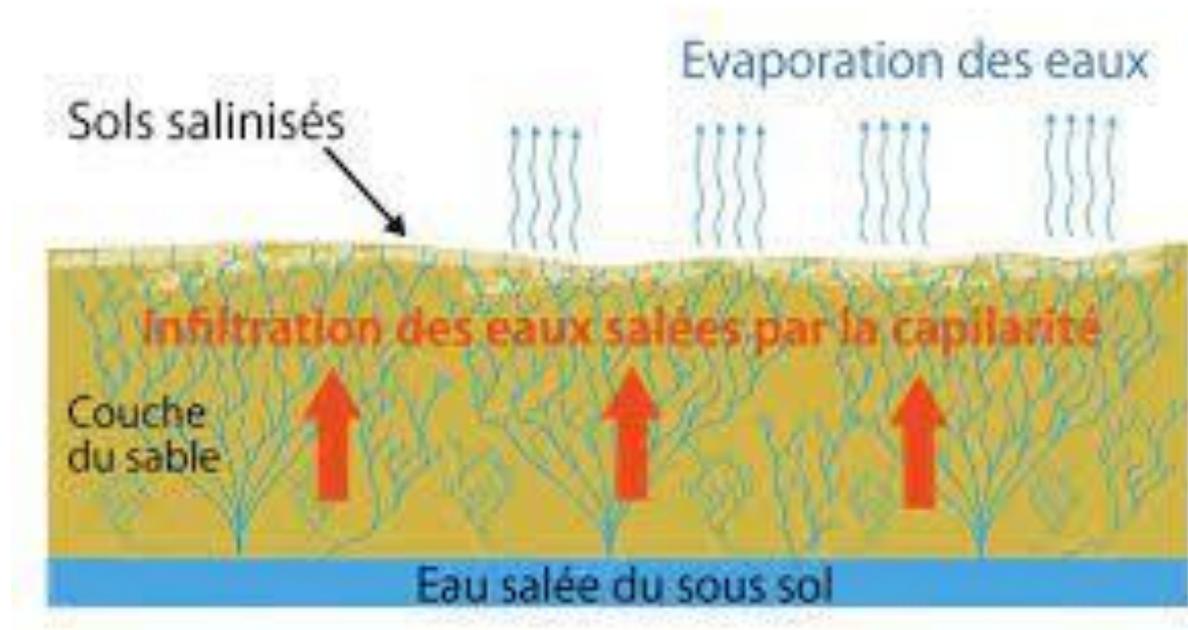


Figure 1 : Mécanisme de la salinisation (codeval, 2016)

I.2.2.3 Origine anthropique

Les nitrates, sulfates, chlorures et potassium font partie du cortège d'éléments permettant d'identifier une pollution anthropique d'origine agricole, urbaine ou encore industrielle. (Bekkoussa et al., 2013). Dans le premier type d'origine agricole et selon Slama (2004) la minéralisation de la matière organique comme tout amendement organique, le fumier, lors de son application, peut augmenter la salinité du sol. La quantité de fumier et son pouvoir salinisant varient avec l'espèce animale, par exemple le fumier de volaille selon Zeghdoud (2015) est considéré comme le plus riche en éléments salinisant. En outre l'effet des engrais minéraux, la dissolution des engrais minéraux dans le sol a plusieurs effets sur les propriétés du sol, parmi lesquels la salinité et le pH du sol sont les plus apparents. (Moughli., 2000).

I.2.3 Comment mesurer la salinité ?

Pour déterminer la salinité des sols et des eaux d'irrigation, on utilise un conductimètre pour mesurer la conductivité électrique, l'unité de mesure est exprimée comme décisiemens par mètre, et selon Suarez et Jurinak (2011) l'une des premières méthodes pour déterminer la quantité de sels dissous est basée sur l'évaporation d'un volume donné d'eau

ou d'extrait de sol et sur la mesure du poids du résidu. Le résultat est appelé le total des solides dissous (TDS) et les dimensions sont en mg/l.

I.3 La sodicité

Là où les cations monovalents dominent les cations échangeables (sodium en particulier), la structure du sol perd sa stabilité et la dégradation structurale se produit facilement. (Tanji et Kielen., 2002). Il y a donc éclatement des agrégats du sol, ce qui provoque un sol dur et compact lorsqu'il est sec et excessivement imperméable à l'eau.

Selon Couture (2006) la concentration de sodium dans l'eau d'irrigation est estimée par le ratio d'absorption du sodium (SAR). Le SAR décrit la quantité de sodium en excès par rapport aux cations calcium et magnésium, qui eux, peuvent être tolérés relativement en grande quantité dans l'eau d'irrigation.

Voici la façon dont on calcule le SAR (le sodium, le calcium, et le magnésium sont exprimé en meq/l) :

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

Le diagramme de classification des eaux d'irrigation est illustré à la figure suivant et est basé sur la conductivité électrique en micromhos par centimètre et le rapport d'adsorption du sodium. Selon Douaoui et Hartani (2007) la conductivité électrique et le SAR sont les paramètres retenus pour caractériser la qualité des eaux souterraines utilisées dans l'irrigation.

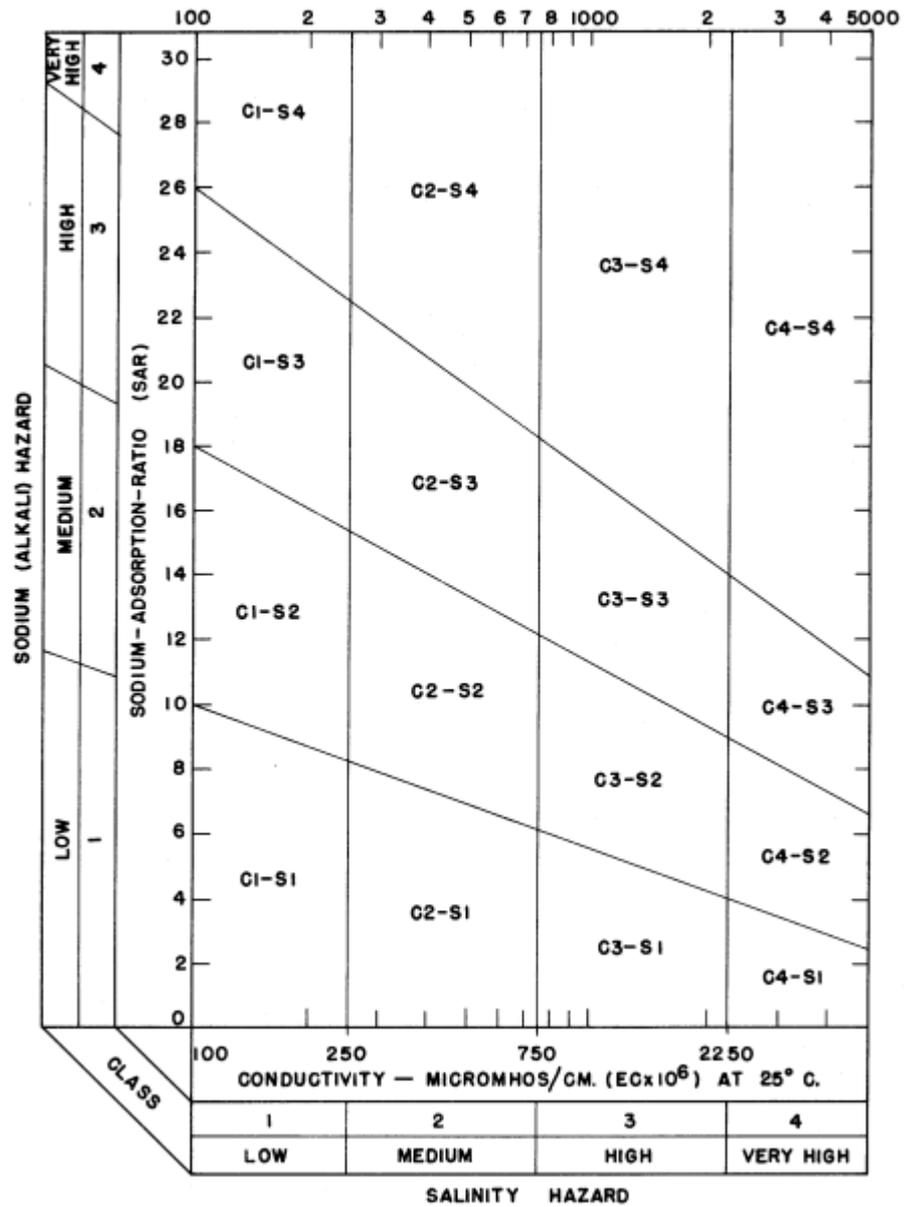


Figure 2: Diagramme pour la classification des eaux d'irrigation (Richard., 1954)

La signification et l'interprétation des classes de qualité des eaux d'irrigation sur le diagramme sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Chapitre 4 : Résultats et discussions

Tableau 1 : l'interprétation des classes des eaux d'irrigation (Richard, 1954)

Classes	Qualité	Appréciation
C1-S1	Bonne	Eau présentant une bonne qualité pour l'irrigation, utilisable avec précautions pour les plantes sensibles.
C1-S2, C2-S1	Moyenne à bonne	Eau de qualité bonne à moyenne a utilisé avec précaution pour les sols mal drainés et pour les plantes sensibles.
C2-S2, C1-S3, C3-S1	moyenne à médiocre	Qualité moyenne à médiocre a utilisé avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.
C1-S4, C2-S3, C3-S2,	médiocre à mauvaise	Eau de qualité médiocre à mauvaise, utilisée avec précaution pour les sols lourds et les plantes sensibles, l'emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse.
C2-S4, C4-S2, C3-S3	Mauvaise	Eau de qualité mauvaise utilisée que pour les sols légers et bien drainés et pour les plantes résistantes avec nécessité de doses de lessivages et/ou apport de gypse.
C3-S4, C4-S3	très mauvaise	Qualité très mauvaise a n'utilisé que pour les circonstances exceptionnelles.
C4-S4	Inutilisable	Déconseillée pour l'irrigation.

I.4 Les éléments toxiques

Les éléments traces sont généralement présents à de faibles niveaux dans la nature. De nombreux oligo-éléments sont des micronutriments essentiels en très petites quantités comme le fer, le manganèse, le molybdène et le zinc, mais la fourchette entre carence et toxicité est étroite. (Tanji et Kielen., 2002)

La toxicité pose un problème différent de ceux de salinité et de perméabilité car elle se manifeste dans le végétal lui-même comme résultat de l'absorption et de l'accumulation

Chapitre 4 : Résultats et discussions

de certaines substances contenues dans l'eau d'irrigation, elle peut apparaître même quand la salinité est faible. Les substances toxiques qui nous préoccupent sont le sodium, le chlorure et le bore. Elles peuvent faire baisser les rendements et provoquer l'échec de la récolte. (Ayers et Westcot., 1984)

Tableau 2: Niveaux de toxicité pour des ions spécifiques (meq/l) (Morris et Devitt, 1991)

	Bore	Chlore	Sodium
Nul	< 1	1 – 3	< 3
Légère à modéré	1-3	3 – 9	3-9
Sévère	> 3	> 9	> 9

La toxicité 'des éléments minéraux provoquent toujours successivement quatre types d'effets : d'abord une diminution de la croissance, puis son arrêt, ensuite l'apparition de symptômes visuels (déformations, décolorations et dessèchements..) enfin, la mort de la plante. L'apparition progressive de ces phénomènes dépend de l'augmentation de la concentration de l'élément toxique dans le milieu nutritif. (Morard., 1995)

I.4.1 Sodium

Le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation. Cet élément origine de l'altération de la roche et du sol, des intrusions d'eau de mer, des eaux traitées et des systèmes d'irrigation, (Couture., 2006). Le problème principal avec une grande quantité de sodium est son effet sur la perméabilité du sol et sur l'infiltration de l'eau. Le sodium remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les particules d'argile et provoque la dispersion des particules du sol. Le sodium contribue aussi directement à la salinité totale de l'eau. (N'Diaye et al., 2010). Les symptômes de toxicités de sodium Na^{2+} sur les plantes sont des brûlures de feuilles, le dessèchement et la mort des tissus sur les bords externes des feuilles. (Maillard, 2001)

I.4.2 Chlore

L'effet toxique de l'ion Cl a été noté par de nombreuses chercheurs, mais ils ont eu parfois tendance à considérer que la toxicité du Cl était synonyme de l'effet défavorable d'une forte salinité du sol (Hayward., 1952), par ailleurs, selon Ballesteros et al (1997) l'accumulation excessive du chlore diminue l'absorption des anions indispensables à la

croissance et au développement des végétaux en particulier les nitrates, les nitrites, les sulfates

I.4.3 Bore

Les eaux d'irrigation contenant plus de 1,0 ppm de bore (B) peuvent provoquer une accumulation de bore à des niveaux toxiques lorsqu'elles sont utilisées pour irriguer des plantes sensibles. (Morris et Devitt., 1991). L'excès en bore provoque un enroulement des feuilles et nécroses des limbes (Cahurel., 2008).

Selon Reid (2006) la toxicité se manifeste sur les feuilles par des taches jaunes de toutes formes, ponctuations, stries ou marbrures. Elle peut entraîner une nécrose des tissus commencent d'ordinaire à la pointe et sur la bordure des vieilles feuilles. Dans des conditions de carence grave, les symptômes peuvent s'étendre à toute la plante

4I.5 l'alcalinité résiduelle

Selon Eaton, (1950) si une alimentation en eau contient plus de carbonate et de bicarbonate que de calcium et de magnésium, après que l'évaporation et l'absorption par les plantes ont entraîné la précipitation du calcium et du magnésium sous forme de sels de carbonate, le résidu de carbonate est associé au sodium. Et selon Palmer, (1911) ce carbonate de sodium est l'alcalinité primaire.

Pour des raisons de description, il sera appelé « carbonate de sodium résiduel RSC ».

$$\text{RSC} = (\text{HCO}_3 + \text{CO}_3) - (\text{Ca} + \text{Mg})$$

Les classes de RSC selon Richard (1954) sont :

- $\text{RSC} < 1,25 \text{ meq/l} \implies$ Bonne
- $1,25 < \text{RSC} < 2,5 \text{ meq/l} \implies$ Médiocre
- $\text{RSC} > 2,5 \text{ meq/l} \implies$ Mauvaise

I.6 le Pourcentage de Sodium

La dégradation de la structure du sol est due pour une bonne partie à la teneur relativement élevée en sodium par rapport à celles du calcium et du magnésium qu'elles soient solubles ou échangeables. (Douaoui et Hartani., 2007)

Le pourcentage de sodium échangeable (ESP), représente la concentration en sodium Na^+ échangeable (exprimée en $\text{még.}100\text{g}^{-1}$) par rapport à la capacité d'échange cationique (CEC) du sol qui est la quantité totale de cations, que ce dernier peut adsorber sur son complexe d'échange avec la solution du sol. (Gaham., 2016)

$$\text{ESP} = (\text{Exch Na} / \text{CEC}) 100$$

Selon FAO (1984) on peut classer un sol en fonction de son état de dégradation par la valeur de son ESP comme suit :

Tableau 3: la limite de classe pour le pourcentage de sodium échangeable (FAO, 1984)

Le pourcentage de sodium échangeable (ESP)	Les classes
< 5%	légère alcalinité
de 5 à 20%	alcalinité modérée
de 20 à 45%	alcalinité grave
> 45%	alcalinité très grave

I.7 Classification des eaux d'irrigation

Il ya plusieurs classifications pour déterminer la validité de l'eau pour l'irrigation et ces classifications différent en termes de motifs sur lesquels ils dépendent, notamment celles indiquées dans le tableau suivant :

Chapitre 4 : Résultats et discussions

Tableau 4 : évaluation de la qualité des eaux d'irrigation. (Halitim et Daoud., 1994)

Conductivité électrique (ds/m)	Concentration (g/L)	Evaluation Américaine	Evaluation Russe	Evaluation de Durand pour l'Algérie
CE <0.25	<0.2	Faiblement salée	Bonne qualité	Non saline
0.25 < CE <0.75	0.2-0.5	Moyennement salée		Salinité moyenne
0.75 < CE <2.25	0.5-1.5	Fortement salée	Risque de salinisation	Forte salinité
2.25 < CE <5	1.5-3	Très fortement salée		Très forte salinité
5 < CE <20	3-7	Salinité excessive	Ne peut être utilisée sans lessivage	Salinité excessive

I.8 Effets des eaux d'irrigation sur le sol

La dégradation de la qualité des sols et des eaux suite à l'irrigation constitue un danger sérieux pour la durabilité de ce système d'exploitation des terres. Il est bien connu que la mise en valeur agricole sous irrigation dans les zones semi-arides et arides conduit le plus souvent à la dégradation de la qualité des sols (Mathieu et Ruellan., 1980; Larson et Pierce., 1991; Robert., 1992; 1996; Umali., 1993; Badraoui et Merzouk., 1994; Farhat., 1995; Badraoui et al., 1998a; 1998b).

Selon La FAO (2002), la salinisation des sols due à l'irrigation réduit la surface des terres irriguées de 1 à 2 % par an. (fig3)

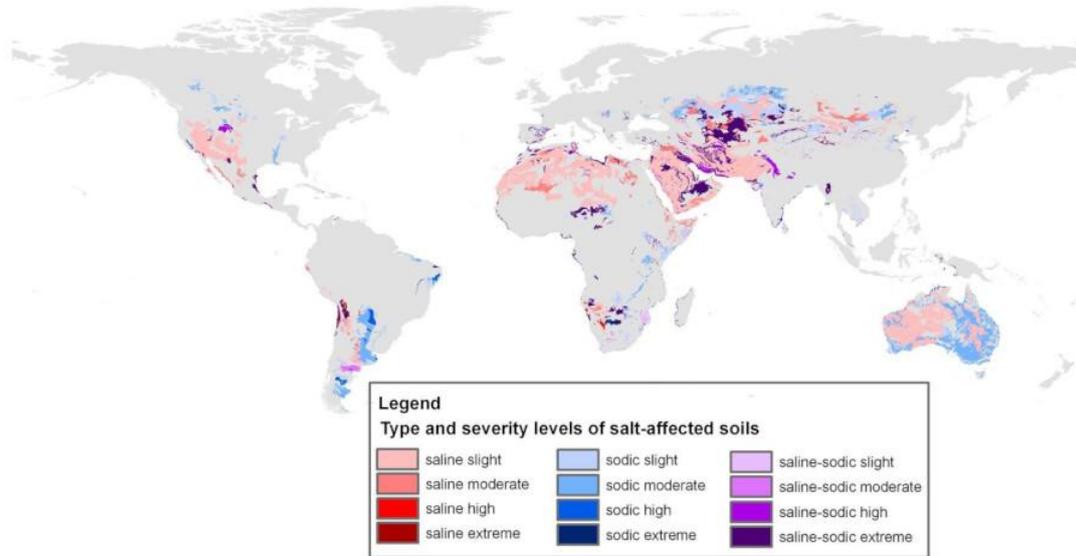


Figure 3: répartition des sols salins dans le monde (Wicke et al., 2011)

En Algérie, plus de 20 % des sols irrigués sont concernés par le problème de la salinité. (Douaoui et Hartani., 2007). L'intensité du processus de salinisation dépend des caractéristiques du sol que l'on veut irriguer, de la qualité des eaux utilisées, des conditions de leur emploi et en particulier l'efficacité du système de drainage. Cependant, ces pratiques d'irrigation ont engendré la modification du fonctionnement des sols et accru le risque de salinisation. (Gouaidia et al., 2013). Et si les sels deviennent excessifs, les pertes de rendement en résulteront. Pour éviter les pertes de rendement, les sels dans le sol doivent être contrôlés à une concentration inférieure à celle qui pourrait affecter le rendement. (Ayers et Westcot., 1984)

Au cours de l'accumulation des connaissances sur la nature, les caractéristiques et les relations de croissance des plantes dans les sols affectés par le sel, deux groupes principaux de ces sols ont été distingués. (Szabolcs., 1974; Vargas et al., 2018).

I.8.1 Sol salin

Sont des sols dont la conductivité électrique (CE) de l'extrait de la pâte saturée est supérieure à 4ds/m à 25°C et dont le pourcentage de sodium échangeable (ESP) est inférieur à 15 %. Généralement, le pH est inférieur à 8,5. Ces sols correspondent aux «

Solontchaks » à cause de la présence de sels en excès et de l'absence de quantité suffisante de sodium échangeable, les sols salés sont généralement floculés, et en conséquence la perméabilité est supérieure ou égale à celle des sols similaires non salés

1.8.2 Sol sodic (alcalin)

Ces sols contiennent des sels de sodium capables de provoquer une hydrolyse alcaline, principalement du Na_2CO_3 . Ces sols étaient appelés sols « alcalins » dans la littérature plus ancienne. Les sols sodiques ont CE moins de 4 dS/m à 25 C°, ESP plus de 15 et SAR plus de 13. La majeure partie du sodium est sous forme échangeable. De très petites quantités de sels libres sont présentes dans la solution de sol. Le pH du sol est supérieur à 8,5. À la suite de l'irrigation, des conditions fortement alcalines peuvent se développer dans ces sols et des valeurs de pH atteignant ou dépassant 10 sont courantes. Lorsque la matière organique est dispersée et déposée à la surface, les sols sodiques apparaissent brun noir et sont parfois appelés sols alcalins noirs. (Choudhari et kharche., 2018)

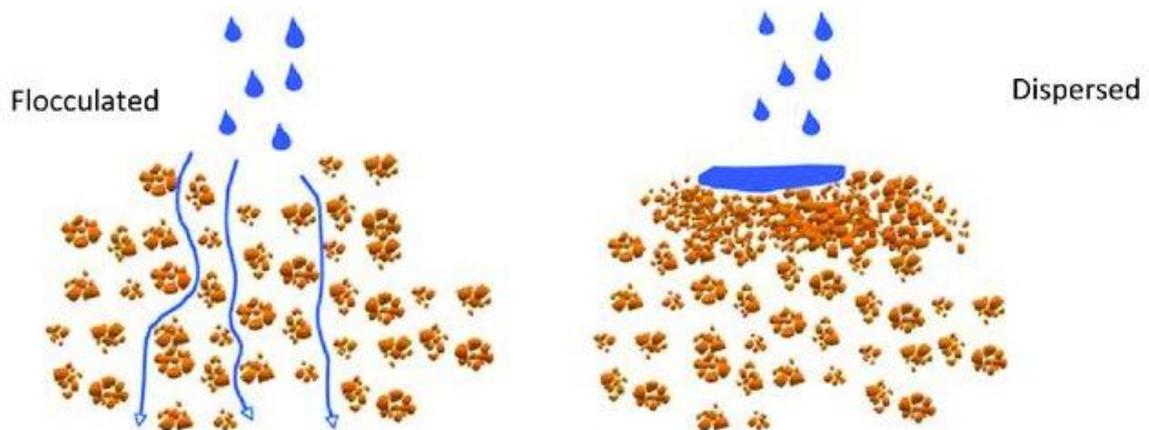


Figure 4: La différence entre la structure du sol floculé (les agrégats) et dispersé. (Choudhari et kharche, 2018)

La floculation (à gauche, Fig4) est importante car l'eau se déplace à travers les grands pores et les racines des plantes poussent principalement dans l'espace des pores. Les argiles dispersées (à droite) bouchent les pores du sol et entravent le mouvement de l'eau et le drainage du sol.

CHAPITRE DEUXIÈME:

**LE STRESS SALIN CHEZ LES PLANTES ET LES
ÉLÉMENTS MINÉRAUX**

Chapitre 2: Le stress salin chez les plantes et les éléments minéraux

II.1 introduction

Les besoins de la plante évoluent au cours de son développement. Aux stades où ils sont nécessaires, les éléments minéraux doivent pouvoir être prélevés par la plante dans le sol. Ils doivent être disponibles en quantités suffisantes et sous une forme disponible. Si les éléments ne sont pas disponibles au moment nécessaire, la croissance de la plante sera limitée et le rendement final plus faible. (FAO., 2005).

La quantité de sels dans le sol que les plantes peuvent supporter sans grand dommage pour leur culture varie avec les familles, les genres et les espèces, mais aussi les variétés considérées. C'est pourquoi il n'est pas possible de définir, dans l'absolu, le seuil de salinité à partir duquel les cultures subissent un stress salin. (Levigneron et al., 1995).

Selon les travaux de Munns et Rawson (1999) tous les paramètres de rendement subissent une réduction sous l'action de la salinité et que, plus la salinité est élevée plus le rendement est réduit. Lorsque l'orge est soumis à un stress salin au cours de l'épiaison ou la différenciation de l'épi, le nombre d'épillets par épi est réduit ainsi que le nombre des grains .ainsi ils ont montré que la salinité a un effet néfaste sur la remobilisation des réserves au cours de la phase de remplissage des grains.

II.2 Effet du stress salin sur le comportement des plantes

La salinité ou le stress salin a des effets nocifs sur le comportement des plantes en générale qui affectent dans la plupart des cas la croissance et le rendement, et selon Ashraf et Harris (2004) les effets délétères de la salinité sur la croissance des plantes sont associés à (1) un faible potentiel osmotique de la solution du sol (stress hydrique), (2) un déséquilibre nutritionnel, (3) un effet ionique spécifique (stress salin) ou (4) une combinaison de ces facteurs.

II.2.1 Le stress osmotique

Dans des conditions salines, le faible potentiel osmotique des solutions salines du sol oblige les plantes exposées à ces milieux à maintenir un potentiel osmotique intracellulaire plus faible, (Ashraf et Lin wu., 1994). Lorsque l'ajustement osmotique n'est pas suffisant, l'eau a tendance à quitter les cellules, ce qui provoque la perte de la turgescence. (Redonodo-Gomez et al., 2006).

II.2.2 Le stress ionique

Le maintien de l'homéostasie des ions peut être particulièrement difficile pour les plantes dans des conditions salines, car l'accumulation d'ions toxiques (c'est-à-dire Na^+) peut perturber la capacité de la plante à contrôler l'accumulation d'autres ions. Chez la plupart des espèces, Na^+ semble s'accumuler à des niveaux toxiques avant Cl^- ; ainsi, nous nous concentrons ici sur le Na^+ , car la réduction du Na^+ dans la pousse, tout en maintenant l'homéostasie du K^+ , est un élément clé de la tolérance à la salinité dans de nombreuses céréales et autres cultures. (Negrão et al., 2016) le sodium entre une compétition avec le potassium et calcium. (Jin et al., 2007)

II.2.3 Effet nutritionnel

Les effets nutritionnels de la salinité incluent les deux actions primaires du sel sur les plantes : La toxicité directe due à l'accumulation excessive des ions dans les tissus et un déséquilibre nutritionnel provoqué par l'excès de certains ions. L'accumulation des ions Na^+ dans la plante limite l'absorption des cations indispensables tels que K^+ et Ca^{2+} . (Levigneron et al., 1995). Ainsi l'augmentation de la concentration en Na^+ s'accompagne d'une réduction de la concentration en Mg, K, N, P et Ca dans la plante. Ce déséquilibre nutritionnel est une cause possible des réductions de croissance en présence de sels lorsque des ions essentiels comme K^+ , Ca^{2+} ou NO_3^- deviennent limitant (Haouala et al., 2007).

II.3 La nutrition minérale

Les plantes sont des organismes autotrophes. Elles vivent dans un environnement essentiellement inorganique, prélèvent le CO_2 dans l'atmosphère, l'eau et les éléments minéraux dans le sol. (Hopkins., 2003)

Toute plante a besoin pour vivre d'un apport d'éléments nutritifs. Ceux-ci sont absorbés essentiellement sous forme minérale. On distingue entre les éléments principaux -parmi lesquels on compte l'azote, le phosphore, le potassium, le calcium, le magnésium et le soufre- et les oligo-éléments comme le bore, le fer, le cuivre, le manganèse, le molybdène et le zinc, dont la plante n'a besoin qu'en quantité très faible. A côté des éléments indispensables, il existe d'autres éléments, utiles mais non vitaux pour la croissance de la plupart des plantes. On trouve parmi eux le sodium, l'aluminium, le silicium, le chlore et le cobalt. (Kali et Potasse., 2004)

La reconnaissance des symptômes de carence permettra de corriger les carences avant qu'elles ne deviennent trop sévères. Néanmoins, on doit faire preuve de prudence si l'évaluation des besoins nutritifs des plantes repose principalement sur les symptômes de carence. En effet, de tels signes peuvent se manifester tard en saison, bien après que la plante a été affectée ; dans ce cas les symptômes ne révèlent pas les causes de la carence. De plus, au niveau du sol, la cause véritable du problème peut être un manque de l'élément en question ou un excès d'autres éléments, une alcalinité ou une acidité du sol trop élevée, un déficit d'humidité ou un ralentissement de la croissance des racines, on devrait confirmer tout diagnostic de carence par l'analyse du sol ou des tissus de la plante. (Reid., 2006)

II.4 Sources des éléments nutritifs des plantes

Les plantes reçoivent des éléments nutritifs principalement:

- Des réserves du sol.
- Des engrais minéraux.
- Des sources organiques.
- De l'azote atmosphérique à travers la fixation biologique.
- Du dépôt aérien causé par le vent et la pluie.
- De l'irrigation, inondation ou eau souterraine et du transport de sédiments par ruissellement. (FAO., 1999)

peut se dégager dans l'atmosphère, une partie peut être assimilée par les microorganismes ou être fixée par les argiles ou la matière organique, enfin une partie peut être oxydée: c'est la nitrification qui constitue la seconde étape. Cette oxydation biologique se réalise elle même en deux temps: transformation de l'ion ammonium (NH_4^+) en ion nitreux (NO_2^-) puis transformation de ce dernier en ion nitrique (NO_3^-) (Van Schreven, 1965).

Selon Diehl (1975), la carence en azote se traduit par une réduction de taille et une teinte vert jaunâtre. Les végétaux prennent un port dressé. Les bourgeons se développent mal ou s'évaluent pas.

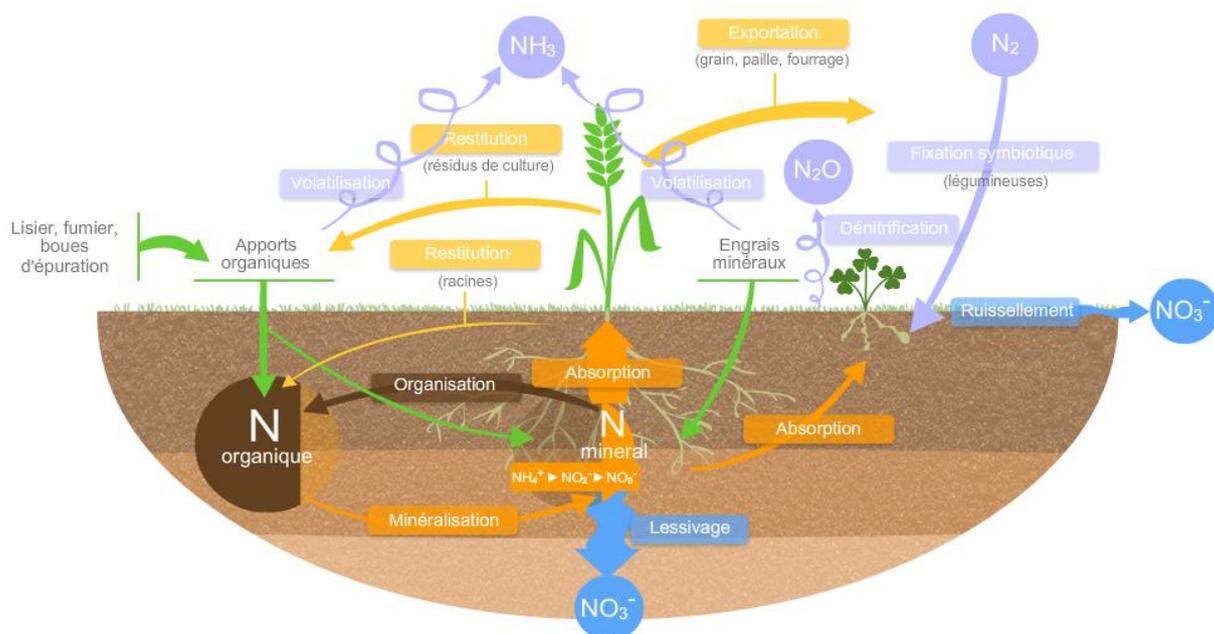


Figure 6: flux d'azote au sein d'une parcelle agricole : le cycle de l'azote (PAN., 2020)

II.5.1.2 Le phosphore

Le phosphore (P) est le nutriment intervenant dans les transferts d'énergie de la plante, d'une importance vitale pour la synthèse des protéines, la photosynthèse et la transformation de sucres. Le P est un composant intégral de composés importants des cellules végétales, incluant les sucres phosphates, les intermédiaires de la respiration et la

photosynthèse ainsi que les phospholipides composant les membranes végétales. Il est également un composant des nucléotides utilisés dans le métabolisme énergétique des plantes (comme ATP) et dans l'ADN et l'ARN (Coelho et al., 2013 ; Hopkins., 2003).

Le phosphore augmente la résistance des plantes au froid, aux maladies et aux conditions de croissance défavorables. Le phosphore est mobile dans les plantes. En cas de carence, le phosphore se déplace des tissus âgés vers les tissus jeunes et plus actifs. La décoloration pourpre des feuilles ou du bord des feuilles est un symptôme commun de carence en phosphore. (Karemangingo et al., 2007). Aussi la carence en phosphore selon les travaux de Zuang (1982) peut compromettre l'absorption des nitrates.

Le phosphore n'est pas exposé au lessivage car il n'est pas mobile dans le sol en s'accumulant au niveau de l'horizon superficiel du sol. Cependant, en sol riche en calcaire, la forme soluble se transforme en phosphate de calcium insoluble. On parle alors, de la fixation ou de la rétrogradation qui présente la cause du non disponibilité d'une partie du phosphore apporté pour les plantes. (Daoudi., 2018)

II.5.1.3 Le potassium

Le potassium joue le rôle d'activateur de différents enzymes. Il est l'élément le plus important qui permettant l'augmentation de la pression cellulaire. Le potassium régularise l'économie de l'eau dans la plante et réduit l'évaporation; il en accroît donc la résistance à la sécheresse. Les plantes bien alimentées en K ont des parois cellulaires plus épaisses, ce qui augmente leur résistance à la verse ainsi qu'aux attaques de champignons et d'insectes. Le potassium améliore le rendement de l'assimilation chlorophyllienne et la résistance au gel. (Kali et Potasse., 2004)

L'excès de potassium ne provoque pas un phénomène de toxicité, mais un déséquilibre qui se manifeste par l'absorption insuffisante d'autres éléments comme le calcium et le magnésium. Lorsqu'il y a une toxicité proprement dite par excès, il y a une elongation des entre-nœuds, le feuillage devient pâle et moucheté et à la fin, il y aura flétrissement et chute des feuilles. (Chouard., 1952)

Les symptômes de carence apparaissent d'abord dans les feuilles les plus âgées, qui présentent un aspect tacheté ou des signes de chlorose qui sont suivis de lésions

nécrotiques (zones de tissu mort) sur le bord des feuilles. Chez les monocotylédones, et particulièrement chez le maïs et d'autres céréales, les lésions de nécrose débutent à la pointe de la feuille, constituée des cellules les plus vieilles, puis progressent graduellement le long des bords vers les cellules plus jeunes de la partie basale de la feuille. Les tiges sont raccourcies et moins rigides et leur sensibilité aux champignons responsables de la pourriture des racines est accrue. Il en résulte que les plantes carencées en potassium versent facilement. (Hopkins., 2003)

II.5.1.4 Le calcium

Le calcium (Ca) est en général le troisième macronutriment le plus absorbé par les cultures, étant limité pour des cultures spécifiques et importantes pour assurer un rendement élevé des cultures avec une qualité et une faible incidence des maladies. (Prado., 2021)

Le Ca dans le sol est adsorbé dans les colloïdes du sol ou en tant que composant de la matière organique. Dans des conditions de pH élevé, le Ca peut précipiter sous forme de carbonates, de phosphates ou de sulfates, avec une solubilité réduite. Le Ca considéré comme disponible pour les plantes est celui adsorbé aux colloïdes (échangeable) et présent dans la solution du sol (Ca^{2+}). (prado et al., 2007)

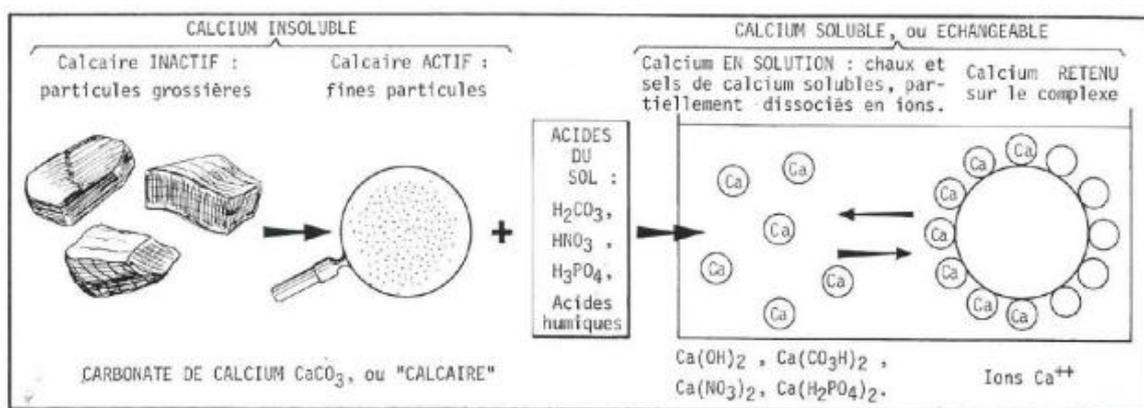


Figure 7: les quatre formes de calcium dans le sol. (Source :Soltner)

Les cations Ca^{2+} présents dans les amendements calcaires jouent donc un rôle de liaison entre les argiles et les humus tous deux chargés négativement. Les cations monovalents (1 seule charge +, ex : Na^+ et K^+) ont un pouvoir flocculant plus faible sur les argiles voir nul

sur l'humus. Au champ, un sol bien pourvu en Ca^{2+} aura un ratio $\text{Ca}/\text{CEC} > 65\%$. Cela favorise le maintien d'une structure grumeleuse avec une bonne perméabilité à l'eau et à l'air avec des agrégats plus résistants à la dispersion causées par les pluies. A l'inverse, un sol avec un mauvais état calcique et donc avec un faible ratio Ca/CEC aura tendance à se compacter et donc à s'asphyxier. (Guerin., 2016)

Le calcium (Ca) a beaucoup d'effets sur la croissance et le développement de la plante, lui étant attribué le rôle de messenger secondaire dans de nombreuses réponses de la plante. Il est essentiel au maintien de l'intégrité structurelle des membranes et des parois cellulaires lors du processus de division cellulaire, durant l'absorption ionique, la germination du grain de pollen et pendant la croissance du tube pollinique. (Coelho et al., 2013)

Le calcium n'est pas un élément toxique pour la plante, même à des concentrations élevées. Les effets sont indirects. Dans le sol, des teneurs élevées en calcium engendrent une augmentation du pH, ce qui diminue l'absorption de certains éléments, comme le bore (B), le fer (Fe), le manganèse (Mn) et le zinc (Zn). La faible absorption de ces éléments peut induire l'apparition de symptômes sur la plante. Le calcium entre en compétition avec l'absorption d'autres cations, comme le magnésium (Mg) et le potassium (K), ce qui peut provoquer une carence en ces éléments. (Michel., 1999).

La carence en calcium perturbe le développement et la résistance de la paroi, fragilise la membrane et l'intégrité cellulaire ; les apex racinaires, foliaires et les fleurs se nécrosent, les fruits ramollissent et pourrissent (pourriture apicale). Il perturbe la signalisation calcique qui régit de nombreux phénomènes cellulaires essentiels. La carence en calcium affaiblit la tolérance des plantes aux stress biotiques et abiotiques et amoindrit la qualité des plantes et le rendement des cultures. (Barth, 2021).

II.5.1.5 Le magnésium

Le magnésium (Mg) est un nutriment essentiel pour un large éventail de processus physiologiques et biochimiques fondamentaux chez les plantes. Cela implique en grande partie la synthèse de la chlorophylle, la production, le transport et l'utilisation de photoassimilants, l'activation enzymatique et la synthèse des protéines. (Ishfaq., 2022)

Les symptômes de carence en magnésium se caractérisent par une croissance lente, La carence se manifeste par une chlorose, les feuilles se décolorent mais les nervures restent

Chapitre 2: Le stress salin chez les plantes et les éléments minéraux

vertes. La carence est assez fréquente dans les sols artificiels et lorsqu'il y a excès de potassium (Kali et Potasse., 2004).

Aussi la carence en phosphore selon les travaux de Ceylan et al (2016) a indiqué une réduction du poids des graines de blé de 41 mg/graine à 24 mg/graine dans un environnement pauvre en Mg (fig8)



Figure 8: Graines de blé provenant de plantes cultivées avec une fertilisation faible en Mg (à gauche) et adéquate en Mg (à droite). (Ceylan, et al., 2016)

Le magnésium est absorbé par la plante sous forme d'ion Mg^{2+} . On le trouve dans les solutions de sol, sur les surfaces argileuses et dans les couches d'argile. Le magnésium sur les surfaces argileuses (sites d'échange) devient soluble lorsqu'il est remplacé par un autre cation présent dans la solution du sol. Certaines recherches indiquent que l'utilisation répétée d'engrais riches en cations (par exemple, K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , etc.) peut déplacer le Mg sur les sites d'échange (capacité d'échange cationique) et peut induire une carence en Mg. (Mikkelsen., 2010).

II.5.1.6 Le soufre

Le S est d'abord un élément constitutif puisqu'il entre dans la composition des acides aminés soufrés (cystéine et méthionine, cystine...). Il constitue un agent de liaison essentiel au sein et entre les protéines, et un régulateur des activités enzymatiques. Il est par ailleurs nécessaire à l'assemblage des éléments constitutifs de la chlorophylle. De nombreux travaux évoquent également le rôle des composants soufrés dans le système de défense des plantes pour prévenir les infections fongiques ou le stress oxydatif. (Piron., 2020).

En cas de carence en soufre, la synthèse des protéines est perturbée; il y a excès d'hydrates de carbone dans les tissus végétaux. Les parois cellulaires s'épaississent. Les symptômes de carence ; chlorose des nervures foliaires et des feuilles; les nervures sont en général plus claires que les tissus internervaires. Les feuilles sont moins larges et la pousse a un aspect ligneux. (Kali et Potasse., 2004).

II.5.2 Eléments mineurs

II.5.2.1 Le fer

Le fer (Fe) est le micronutriment le plus important responsable de la croissance normale des plantes. À l'inverse, la sur utilisation ou l'absorption de Fe peut entraîner une toxicité pour les plantes car il s'agit d'un catalyseur de Fenton extrêmement combatif. Fe est la molécule structurelle dans plusieurs enzymes et pigments, par conséquent, il joue un rôle important dans la physiologie des plantes. (Naz, 2022)

La carence en fer ralentit la synthèse des hydrates de carbone et des protéines, Les symptômes d'une carence en fer Chlorose (décoloration) des jeunes feuilles. En cas de carence aiguë les feuilles deviennent presque blanches et dépérissent. On rencontre des carences en Fe en arboriculture fruitière, dans la culture des petits fruits et en viticulture (Kali et Potasse., 2004).

Les facteurs qui ont été associés à la carence en fer dans d'autres régions du monde sont des déséquilibres extrêmes de ce métal avec d'autres métaux comme le molybdène, le cuivre ou le manganèse. Une teneur en phosphore excessive dans le sol peut aussi contribuer à des problèmes d'assimilation du fer. Dans les sols qui sont pauvres en matières organique ou lorsqu'un pH élevé, un taux de chaux élevé, l'humidité et la froideur du sol se combinent, les cultures sensibles peuvent montrer des symptômes de carence en fer. (Reid., 2006)

II.5.2.2 Le molybdène

Contexte l'importance du molybdène pour la croissance des plantes est disproportionnée par rapport aux quantités absolues requises par la plupart des plantes. En dehors de Cu, Mo est le micronutriment essentiel le moins abondant trouvé dans la plupart des tissus

végétaux et est souvent défini comme la base à partir de laquelle tous les autres nutriments sont comparés et mesurés. Le molybdène est utilisé par des enzymes sélectionnées pour effectuer des réactions redox. (Kaiser et al., 2005)

La croissance ainsi que la photosynthèse sont diminuées en cas de carence en molybdène; on peut constater une accumulation d'azote nitrique dans la plante. (Kali et Potasse., 2004).

Les symptômes de carence peuvent également être masqués par l'effet indirect du molybdène sur les enzymes assimilatrices d'azote (c'est-à-dire NR). De nombreuses cultures horticoles, céréalières et légumineuses poussant à des niveaux de molybdène déficients en présence d'engrais azotés développeront des feuilles vert pâle et, parfois, des régions nécrotiques au bord des feuilles, accompagnées d'une diminution de la croissance globale des plantes. (Chatterjee and Nautiyal., 2001)

II.5.2.3 Le cuivre

Le cuivre est d'une importance capitale pour la vie. Le cuivre est essentiel à la photosynthèse et à la respiration mitochondriale, au métabolisme du carbone et de l'azote, à la protection contre le stress oxydatif et est nécessaire à la synthèse de la paroi cellulaire, pour ne citer que quelques-unes de ses tâches cellulaires. (Hänsch et Mendel., 2009)

Les symptômes généraux d'une carence en cuivre ; une déformation des jeunes feuilles, une nécrose du méristème apical, une chlorose et la fanaison des jeunes pousses. Chez les citronniers ou les orangers, cette carence entraîne une chute des jeunes feuilles connue sous le terme de mort estivale. (Kali et Potasse, 2004).



Figure 9: Blé atteint d'une carence en cuivre. Source (Reid, 2006)

II.5.2.3 Le bore

Les fonctions du bore (B) dans la plante sont associées à celles du calcium au niveau de la régulation du fonctionnement de la membrane et de la paroi cellulaire, à la division et à l'augmentation des cellules, à la lignification de la paroi cellulaire, essentiel à la formation des tissus méristématiques. Il influence le développement des racines, l'absorption des nutriments et la germination du grain de pollen, participe au métabolisme et au transport des hydrates de carbone à travers la formation de complexes borate-sucres, important dans la synthèse des protéines ; il agit sur le métabolisme des acides nucléiques et également sur le métabolisme et le transport des auxines. (Coelho et al., 2013)

Les symptômes généraux d'une carence en bore pour toutes les plantes sont la décoloration des feuilles (feuillage bleu-vert souvent), le développement anormal des points de croissance (ramification anormale des tiges, formation d'une rosette) et un retard de croissance. (Duval, 1995)

Les symptômes de toxicité du bore apparaissent normalement d'abord sur les feuilles plus âgées sous la forme d'un jaunissement, de taches ou d'un dessèchement des tissus des feuilles aux extrémités et sur les bords. Le dessèchement et la chlorose progressent souvent vers le centre entre les veines (interveinales) à mesure que de plus en plus de bore s'accumule avec le temps (Ayers et Westcot, 1985)

II.5.2.4 Le chlore

Le chlore est comme le sodium, un élément difficile à situer. Pendant longtemps, on a considéré qu'il n'était pas indispensable aux végétaux en se basant sur les critères suivants : l'absence de chlorures dans les solutions hydroponiques n'empêche pas les plantes d'effectuer leur cycle végétatif complet, d'autre part, on n'observe pas de carence eu chlore dans des conditions normales. Il est, en effet, difficile d'obtenir des milieux rigoureusement purs étant donné l'omniprésence de cet élément dans les eaux, les sols et l'atmosphère. De plus, les feuilles absorbent bien le chlore à l'état gazeux et les chlorures eu aérosols. (Morard et Garcia, 1977)

Selon Ayers et Westcot (1985), le chlorure n'est ni adsorbé ni retenu par les sols ; il se déplace donc facilement avec l'eau du sol, est absorbé par la culture, se déplace dans le flux de transpiration et s'accumule dans les feuilles.

Le chlore, qui est absorbé et se retrouve dans la plante sous forme de chlorures, est caractérisé par son extrême mobilité dans le végétal. Contrairement à ce que l'on observe pour le sodium, le chlore a tendance à s'accumuler dans les parties aériennes et dans les organes les plus jeunes. (Gracia, 1975)

L'excès en chlorure provoque un jaunissement prématuré des feuilles inférieures avec une brûlure des marges des feuilles et la chute des feuilles. Les Plantes se flétrissent facilement (Yash, 1998).

CHAPITRE TROISIÈME :
MATÉRIEL ET MÉTHODES

Chapitre 3 : Matériel et Méthodes

III.1 Objectif

Notre travail consiste à une amélioration de la qualité des eaux d'irrigation à travers la modification de la composition chimique de l'eau surtout en ce qui concerne l'équilibre ionique entre le sodium et le calcium ce qui diminue l'effet agressif du sodium.

Nos objectifs sont:

- l'amélioration de la qualité chimique de l'eau d'irrigation
- l'enrichissement de l'eau d'irrigation par des éléments nutritifs utiles
- l'amélioration des rendements des cultures
- l'amélioration de la fertilité du sol
- Eviter les problèmes de toxicité et la dégradation de la structure

III.2 Situation géographique

L'expérimentation est effectuée au terrain du département d'agronomie à l'université de Biskra, sous abri couvert d'insecte proof, le but de cette serre est d'éviter l'action de pluie et les vents violents et les dégâts éventuels des oiseaux.

La wilaya de Biskra est située au sud-est de l'Algérie, elle est bordée au nord par la wilaya de Batna et au Sud par les wilayas de El-Oued et Ouargla, elle est également bordée au Est par la wilaya de Khenchela, et de l'Ouest, les wilayas de M'sila et Djelfa.

La wilaya de Biskra est également appelée la capitale de Ziban et la porte du Sahara, en raison de son emplacement stratégique, sa superficie étant estimée à plus de 20000 km², située à 34°48 Nord, et 5°44 Est.

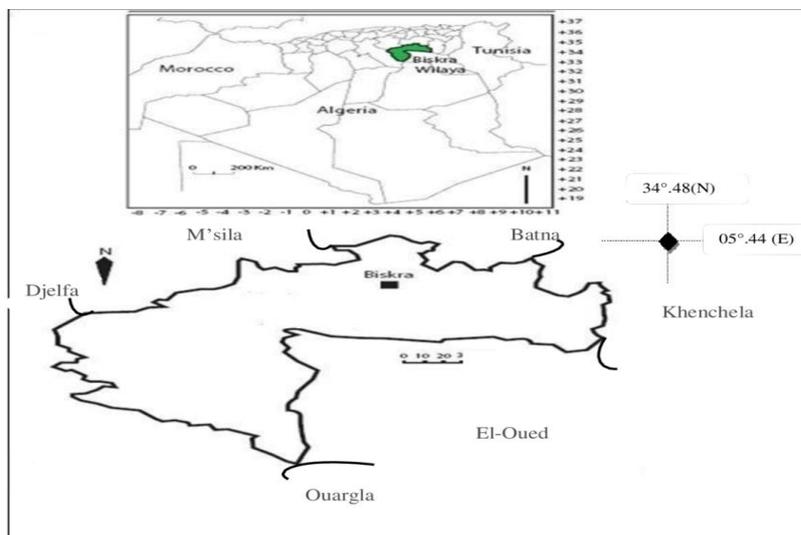


Figure 10: Position et situation géographique de la région de Biskra. (Merabti, 2016)

III.3 Le sol

Le sol utilisé est celui du terrain d'expérimentation de département d'agronomie de Biskra, il s'agit d'un sol limono-argileux, calcaire et pauvre en matière organique. Ces caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 5: propriétés physico-chimiques de sol.

Calcaire total	35%
Matière organique	0.8 %
Conductivité électrique à 25°C 1/5	4.3 dS/m
Potassium soluble:	1.23 meq/l
Calcium soluble:	16.53 meq/l
Sodium soluble:	12.61 meq/l
Magnésium soluble:	9.57 meq/l
Chlore :	21.02 meq/l
Bicarbonate:	3.77 meq/l
Sulfate:	16.24 meq/l
Humidité à la capacité au champ	28.57%
pH de la solution de sol	8.09
Granulométrie :	
*Argile (%)	19%
*Limon fin (%)	22.5%
*Limon grossier (%)	12%
*Sable fin (%)	22%
*Sable grossier (%)	24.5%
* Texture : Limono-argileux	

III.4 Les eaux d'irrigation

On a fait une collection de plusieurs échantillons des eaux d'irrigation de différentes régions de Biskra (Ain Naga, Loutaya, El Hadjb). Ces eaux sont soumises à des analyses chimiques précises pour choisir les types d'eaux qui seront utilisés dans notre expérimentation. Les principaux critères de choix sont la conductivité électrique qui doit être graduelle et la teneur en sodium soluble qui doit être supérieure au calcium soluble afin de faire l'amendement calcique nécessaire. Cinq types d'eaux choisies dont les caractéristiques sont regroupés dans le tableau 6.

Chapitre 3 : Matériel et méthodes

Tableau 6: la qualité chimique des eaux d'irrigation.

Type d'eau	CE (mS/m)	pH	Ca ⁺⁺ meq/l	Mg ⁺ meq/l	K ⁺ meq/l	Na ⁺ meq/l	SO ₄ ⁻ meq/l	Cl ⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l
S1	2.84	7.86	6	8.6	0.19	13.92	9.44	13.5	3.25
S2	3.84	7.58	10.4	9	0.16	20.01	6.96	25	4.5
S3	4.83	7.28	12	9	0.16	26.43	10.24	35	3.75
S4	6.37	7.54	15.4	18.6	0.15	35.95	15.76	46.6	3.75
S5	7.68	7.52	25.8	20.2	0.48	38.15	31.6	41	2.5

Les quantités de calcium ajoutées aux eaux d'irrigation sous forme de nitrate de calcium Ca(NO₃)₂·4H₂O sont basées sur l'équivalence de leurs teneurs en sodium solubles et sont présentées dans le tableau 7.

Tableau 7: Quantités de nitrates de calcium ajoutées aux eaux d'irrigation

	S1	S2	S3	S4	S5
Na soluble meq/l	13.92	20.01	26.43	35.95	38.15
Ca soluble meq/l	6	10.4	12	15.4	25.8
Déficit en Ca meq/l Na – Ca	7.92	9.6	14.43	20.55	12.35
Quantité de Nitrate de Ca pour l'équilibre Na: Ca g/l	0.93	1.13	1.7	2.42	1.45

III.5 Les plantes

Les plantes test utilisées sont une variété d'orge (*Hordeum Vulgare L.*) appelée FOUARA R1 et une variété de blé dur (*Triticum Durum*) appelée VITRON R1.

Fouara est une variété locale à paille courte ou moyenne, fort tallage, bonne productivité, tolérante au froid à la sécheresse et la verse, adaptée aux hauts-plateaux. (Boufenar et al., 2006)

Vitron est une variété originaire d'Espagne, paille haute à moyenne, cycle végétatif demi-précoce, tallage moyen, mieux adaptée aux régions arides et semi-arides, sensible aux maladies, bonne productivité (Bouthiba et Debaeke., 2009)

III.6 Test de germination

Le test de germination est effectué au laboratoire dans des conditions ambiantes avec des variétés différentes de blé dur et d'orge.



Figure 11: Test de germination (Photo original).

La variété choisie de blé dur est VITRON R1 avec un pourcentage de 90% de germination.

La variété choisie d'orge est FOUARA R1 avec un pourcentage de 100% de germination.

III.7 Les pots de végétation

L'essai est réalisé dans des pots en plastique perforés en bas avec 4 trous pour assurer un bon drainage, hauteur de 18 cm, diamètre supérieure est de 20 cm, diamètre de la base est de 13 cm.

III.8 Remplissage des pots

On a effectué un tamisage du sol pour homogénéiser les particules de ce dernier, puis tous les pots sont remplis par une quantité de 4.5 kg de sol avec une couche de gravier qui est posée sur la base de chaque pot. Le sol a été mélangé avec le sable (1/3) et a été l'objet d'un lessivage important.

III.9 Le protocole expérimental

Les traitements utilisés dans cette expérimentation sont dix traitements représentés par cinq types d'eaux originales ou brutes S1, S2, S3, S4, S5 et cinq types d'eaux corrigés S1C, S2C, S3C, S4C, S5C qui sont les mêmes eaux brutes mais enrichis avec différentes quantité de calcium comme a été expliqué au dessus. Le semis a été effectué le 25/11/2019 de façon homogène dans les pots, chaque pot a été irrigué par l'eau représentant son traitement spécifique. Un apport d'engrais phosphaté (TSP 46%) et potassique (Sulfate de potasse 50%) a été effectué au début de l'essai en mélange avec le sol tandis que la fertilisation azoté (urée 46%) a été fractionnée deux fois au cours de la culture. L'essai a été conduit jusqu'à la récolte des grains le 15/05/2020.

III.10 L'irrigation

Pour la détermination des besoins en eau d'irrigation de notre culture, on a déterminé d'abord la capacité de rétention du sol. La différence entre le poids du pot à la capacité de rétention et le poids actuel donne la quantité d'eau nécessaire d'irrigation pour amener le

sol à la capacité au champ. Le lessivage se fait périodiquement pour éviter l'accumulation des sels.

III.11 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est de type blocs aléatoires complets, constitué de 10 traitements et 3 répétitions dans chaque culture, chaque traitement comporte 30 semences. Les traitements sont S1, S1C, S2, S2C, S3, S3C, S4, S4C, S5 et S5C.

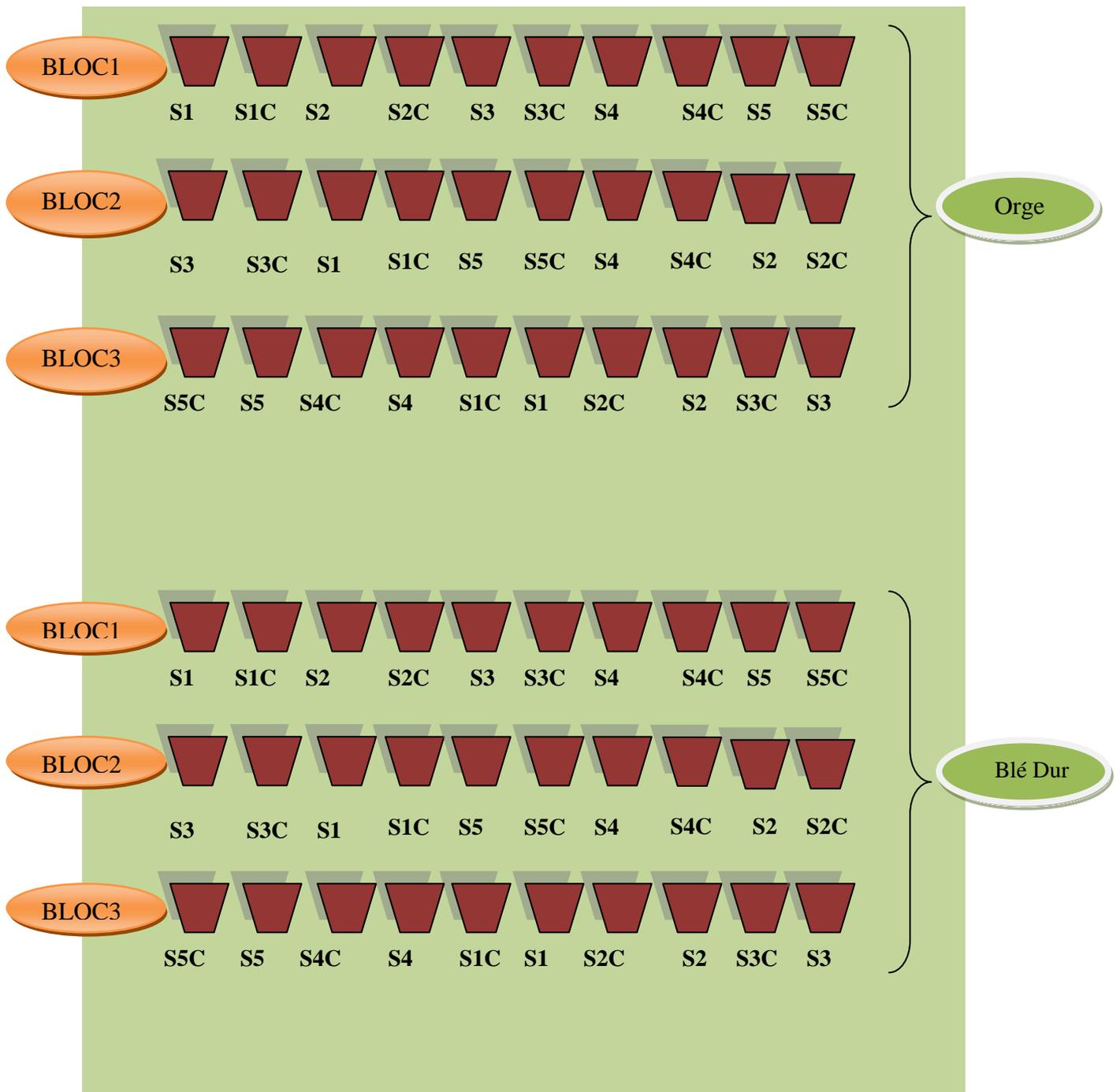


Schéma du dispositif expérimental



Figure 12: Dispositif expérimental (Photo original).

III.12 Traitements phytosanitaire

Au cours de notre expérimentation, on a traité contre le puceron noir et vert par un produit qui porte le nom **Aceplan 20 SP**.

Matière active : acetamiphide 20%

La dose : 0.5g du produit/ 5l d'eau

Mode d'emploi : application foliaire



Figure 13: l'application foliaire du traitement phytosanitaire (Photo original).

On a traité aussi contre une maladie fongique « Helminthosporiose » qui touche notre culture de Blé dur par un fongicide :

Matière active : 125g/l Tébuconazole et 375g/l de chlorothalonil sous forme de suspension concentrée (SC).

La dose : 1ml du produit/ 1l d'eau

Mode d'emploi : application foliaire



Figure 14 : Helminthosporiose du blé (Photo original).

III.13 Paramètres étudiés

III.13.1 Longueur des tiges

Pour déterminer l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la croissance des plantes dans chaque culture, nous avons mesuré la hauteur de la tige en centimètres à l'aide d'un ruban gradué. On a choisi trois plantes représentatives de chaque traitement. Les valeurs données sont les moyennes obtenues des trois plantes pour les trois répétitions.

III.13.2 Rendement en grains

Après la récolte de matériel végétal, on a pesé les rendements en grains de chaque traitement, exprimé en (g), pour déterminer l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le rendement en grains.

III.13.3 Rendement en paille

Après la récolte de matériel végétal, on a pesé les pailles de chaque traitement, exprimé en (g), pour déterminer l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le rendement en paille.

III.13.4 Nombre des grains par épi

Nous avons calculé le nombre des grains par épi, pour déterminer l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la croissance des plantes dans chaque culture. On a choisi trois épis représentatifs de chaque traitement. Les valeurs données sont les moyennes obtenues des trois épis pour les trois répétitions.

III.13.5 Poids de 1000 grains

Après la récolte de matériel végétal, on a déterminé le poids de 1000 grains de chaque traitement, exprimé en (g), pour voir l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur ce paramètre.

III.13.6 Longueur d'épi

Pour déterminer l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la croissance des plantes dans chaque culture, nous avons mesuré la longueur d'épi en centimètres à l'aide d'une règle graduée. On a choisi trois épis représentatifs de chaque traitement. Les valeurs données sont les moyennes obtenues des trois plantes pour les trois répétitions.

III.14 Méthodes d'analyse

pH eau : méthode électro magnétique par pH mètre Modèle Hanna.

CE eau : méthode électro magnétique par un conductimètre mobile modèle Hanna

pH sol : méthode électro magnétique par pH mètre avec un rapport sol/eau (1/5).

Chapitre 3 : Matériel et méthodes

CE sol : méthode électro magnétique par un conductimètre mobile avec un rapport sol/eau (1/5).

Mg et Ca : méthode de complexométrie.

Na et K : se fait par photomètre à flamme.

CO₃, HCO₃ et CL : se fait par méthode de titration.

SO₄ : se fait par spectrophotomètre à UV.

Granulométrie : méthode de sédimentation par Pipette de Robinson

Humidité à la capacité de rétention : on a met le pot de végétation dans un bassin en plastique à une hauteur d'eau de 5 cm pour assurer la saturation par remonté capillaire, puis on a laissé le pot drainer après sa couverture par un couvert plastique. En deuxième étape on a calculé le pourcentage d'humidité de sol après le pesage d'un échantillon de sol avant et après le séchage dans un étuve : $((\text{Poids humide} - \text{poids sec}) / \text{poids sec}) \times 100$.

CHAPITRE QUATRIÈME :
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre 4 : Résultats et discussions

Première partie : la culture d'orge

IV.1 Effet de la correction des eaux sur les paramètres de la plante

IV.1.1 Longueur des tiges

D'après le graphique (fig 15), on remarque que l'effet de la correction des eaux d'irrigation sur la longueur des tiges est clair. Les traitements corrigés présentent généralement des longueurs de tiges plus élevées que les autres traitements. L'amendement calcique a un effet significatif et ceci peut s'expliquer par l'effet du Ca qui allège l'effet négative de la salinité (Bliss et al., 1986 ; Jaleel et al., 2007) suite à son rôle dans l'équilibre ionique et le maintien de la perméabilité sélective de la membrane (Akhavan et al., 1991). En plus, il nous semble que cette amélioration résulte de l'effet de l'azote inclus dans l'amendement ajouté et qui a un effet marqué sur la croissance. La meilleure longueur est obtenue par le traitement S5C.

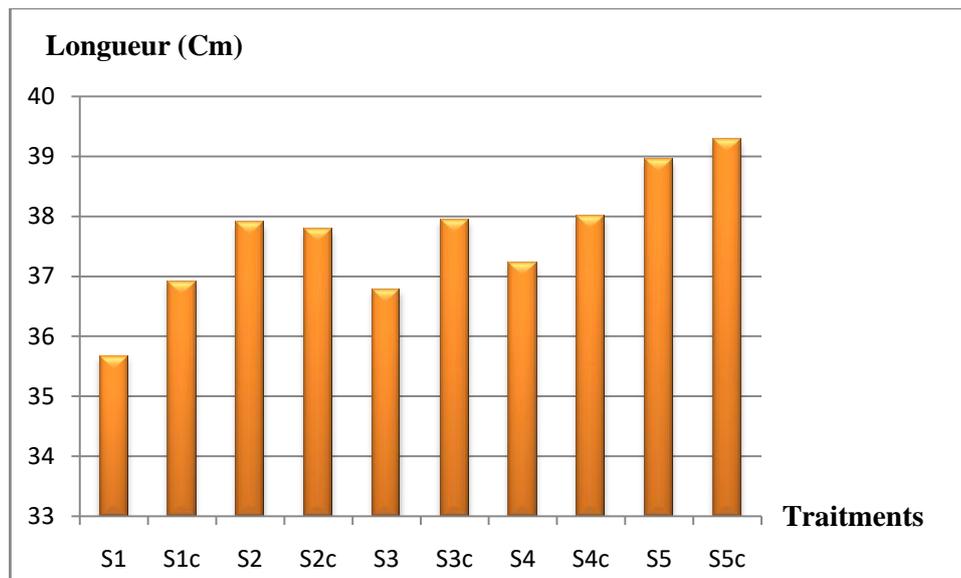


Figure 15: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur la longueur des tiges.

Tableau 8: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la longueur des tiges.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
S5C	39,273	A	
S5	38,940	A	
S4C	37,997	A	B
S3C	37,940	A	B
S2	37,887	A	B
S2C	37,777	A	B
S4	37,217	A	B
S1C	36,907	A	B
S3	36,777	A	B
S1	35,667		B

IV.1.2 Rendement en grains

D'après le graphique (fig 16) de rendement en grains, on remarque que presque tous les traitements corrigés présentent des rendements en grains plus élevés que ceux des traitements bruts malgré l'augmentation de la charge saline des eaux corrigés induite de l'addition de sel de calcium. Ceci montre l'effet favorable et équilibrant du calcium dans le milieu nutritionnel (Masmoudi et al., 2014). La baisse de rendement de S5c par rapport à S5 peut être due à la CE très élevée.

Le meilleur rendement est obtenu par S2C. L'analyse de variance montre des différences significatives où les traitements S2C, S4C et S3C présentent les meilleurs résultats et se classent au même groupe homogène par rapport aux autres traitements. Cette amélioration des rendements s'explique par une augmentation significative du nombre de grains par épi, consécutive à une amélioration de leur fertilité (Pearman et al., 1978).

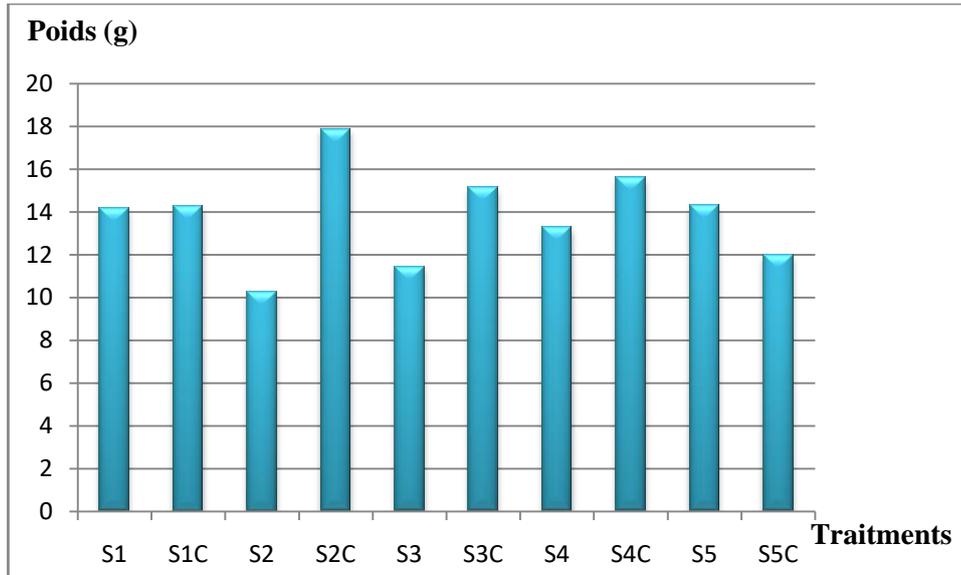


Figure 16: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le rendement en grains.

Tableau 9: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le rendement des grains.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes			
S2C	17,890	A			
S4C	15,627	A	B		
S3C	15,140	A	B		
S5	14,290		B	C	
S1C	14,230		B	C	
S1	14,147		B	C	
S4	13,280		B	C	
S5C	11,990			C	D
S3	11,453			C	D
S2	10,283				D

IV.1.3 Rendement en paille

Les résultats montrent que les meilleurs rendements en paille sont obtenus par les traitements corrigés S5C, S3C, S2C (fig3) ce qui montre que la correction utilisée a un effet positif, le faible rendement est obtenu par le traitement S4.

L'analyse de variance (Tab 10) montre un effet significatif selon le test de Fisher (LSD). Le traitement corrigé S5C présente le rendement en paille le plus élevé (28.06 g). Il semble que l'azote ajouté avec le calcium a joué un rôle important dans la production de la biomasse aérienne pour les traitements corrigés. l'azote reste l'élément déterminant pour la production des céréales (Ryan et al., 2009). En plus l'eau d'irrigation S5 est

Chapitre 4 : Résultats et discussions

relativement riche en potassium ce qui semble joué un rôle d'équilibre nutritionnel positif avec le calcium face à la salinité et le sodium. Aussi le K réduit l'effet négatif de Cl (Tavili et Biniiaz., 2009). Cette action est plus claire en production de la biomasse qu'en production des grains.

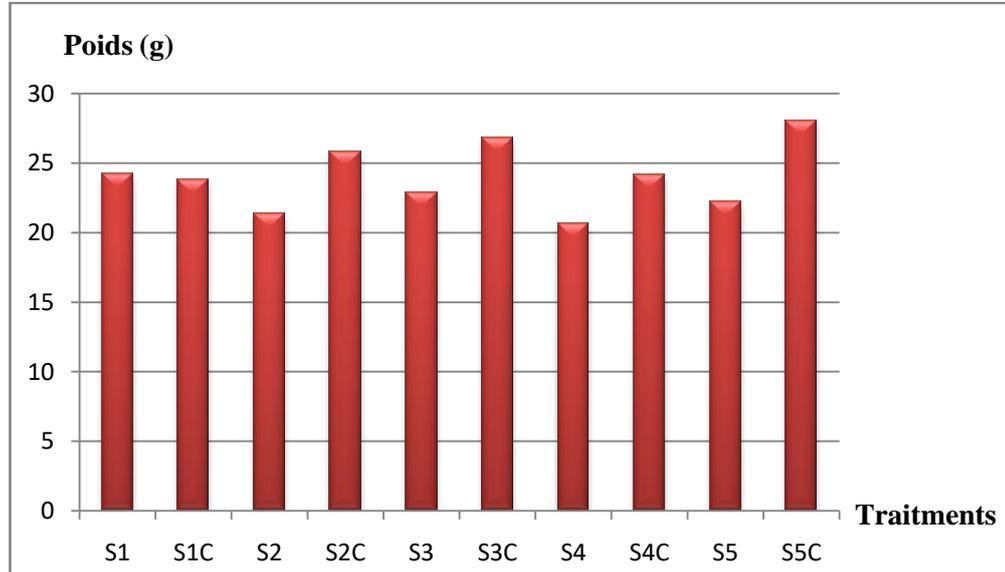


Figure 17: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le rendement en paille.

Tableau 10: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le rendement en paille.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
S5C	28,057	A		
S3C	26,810	A	B	
S2C	25,777	A	B	C
S1	24,243	A	B	C
S4C	24,107	A	B	C
S1C	23,793	A	B	C
S3	22,920	A	B	C
S5	22,177		B	C
S2	21,393		B	C
S4	20,610			C

IV.1.4 Nombre des grains par épi

L'effet de la correction des eaux d'irrigation est très clair sur le nombre des grains par épi (fig 18), on remarque que les meilleurs nombre des grains par épi sont obtenus par les traitements corrigés par rapport aux autres traitements ce qui montre l'effet du Ca ajouté sur le nombre de grains par épi. L'ajout du Ca a une action favorable dans le milieu nutritionnel (Masmoudi., 2016) en allégeant l'effet inhibiteur des sels (Shaikh et al., 2007). L'analyse de la variance montre que les traitements S2C et S4C forment le premier groupe, c'est au même temps que ces deux traitement donnent les meilleurs rendements en grain, donc cette amélioration des rendements s'explique par une augmentation significative du nombre de grains par épi, comme a été déjà signalé.

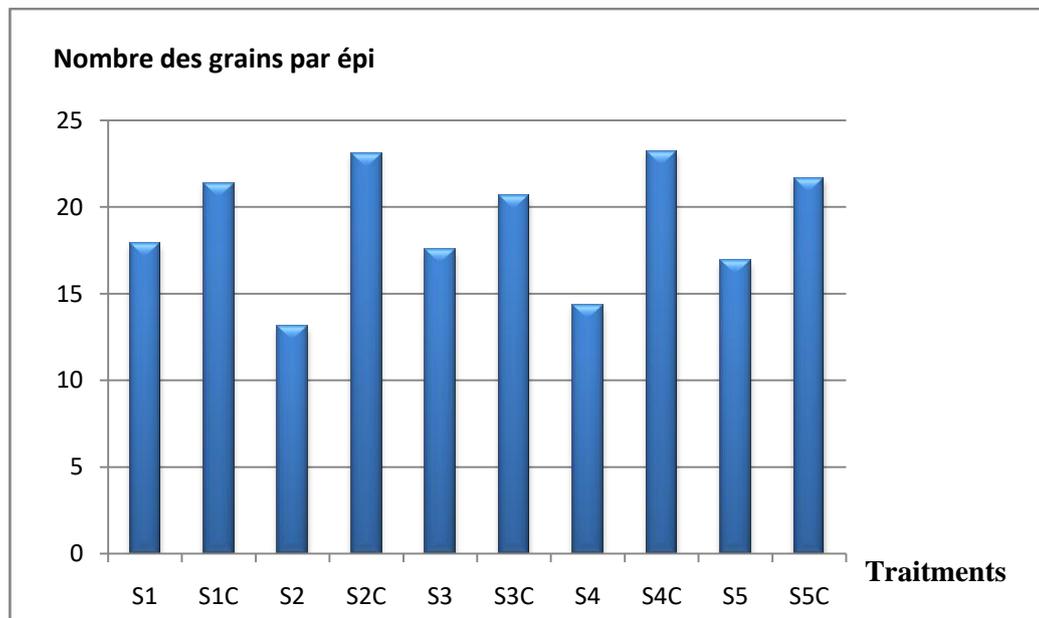


Figure 18: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le nombre des grains par épi.

Tableau 11: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le nombre des grains par épi.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes				
S4C	23,223	A				
S2C	23,110	A				
S5C	21,667	A	B			
S1C	21,333	A	B	C		
S3C	20,667	A	B	C		
S1	17,890		B	C	D	
S3	17,557		B	C	D	E
S5	16,890			C	D	E
S4	14,333				D	E
S2	13,110					E

IV.1.5 Poids de 1000 grains

D'après le graphique (fig 19), on remarque que le poids de 1000 grains le plus élevé est de 47 g environ représentée par le traitement S2, cependant le poids de 1000 grains le plus faible est de 34 g environ représenté par le traitement S5C.

On constate qu'il y'a une corrélation inverse entre le poids de 1000 grains et le nombre des grains par épi surtout dans les traitements S2, S4 et S5, le poids augmente lorsque le nombre des grains par épi est faible. La correction de la qualité de l'eau change le schéma morphogénétique des plantes. (Snoussi et al., 1998).

L'analyse de variance montre qu'il y a des différences significatives entre les traitements, le premier groupe est représenté par S2, S4, S5. Donc, l'effet de la correction est positif sur le nombre de grains par épi mais généralement négatif sur le poids de 1000 grains.

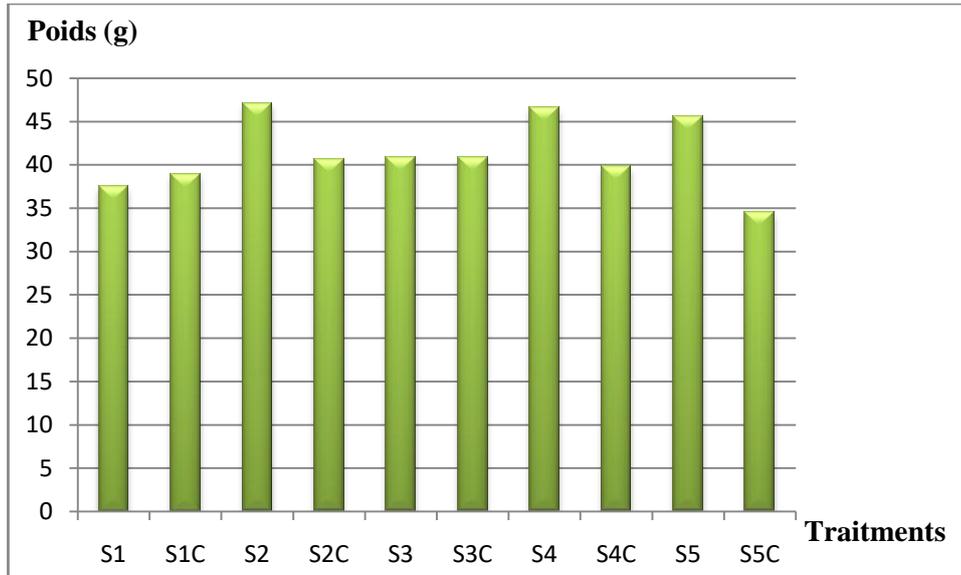


Figure 19: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le poids de 1000 grains

Tableau 12: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le poids de 1000 grains.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
S2	47,167	A		
S4	46,607	A		
S5	45,627	A		
S3	40,873		B	
S3C	40,793		B	
S2C	40,647		B	
S4C	39,820		B	
S1C	38,927		B	
S1	37,553		B	C
S5C	34,487			C

IV.1.6 Longueur d'épi

Les résultats obtenus (fig 20) montrent une amélioration de la longueur d'épi des traitements corrigés comme le nombre de grains par épi. Tous les traitements corrigés présentent des épis plus longs que les traitements bruts. En effet, l'addition de Ca améliore la croissance des plantes sous stress salin (Cramer et al., 1990).

Chapitre 4 : Résultats et discussions

L'analyse de variance montre que S5C possède la longueur d'épi la plus élevée (4.6 cm) par contre S2 présente la longueur le plus faible (3.9 cm). Ce qui signifie probablement que le nitrate de calcium joue un rôle important dans la morphologie de l'épiaison de la plante.

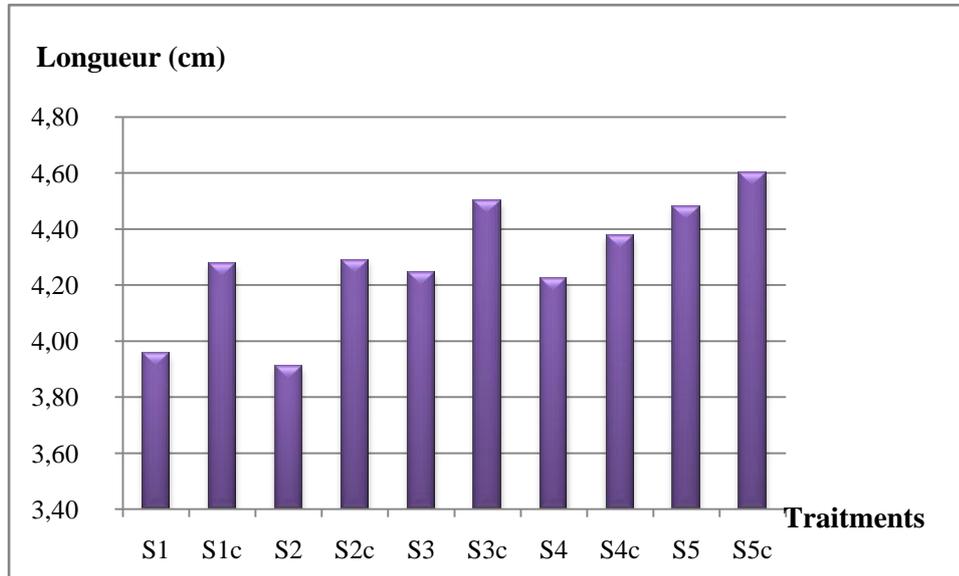


Figure 20: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur la longueur d'épi.

Tableau 13: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la longueur d'épi.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes			
S5C	4,600	A			
S3C	4,500	A	B		
S5	4,480	A	B		
S4C	4,377	A	B		
S2C	4,290	A	B	C	
S1C	4,277	A	B	C	D
S3	4,247	A	B	C	D
S4	4,220		B	C	D
S1	3,956			C	D
S2	3,913				D

IV.2 Effet de la correction des eaux sur le sol de la culture d'orge.

IV.2.1 Evolution de la CE du sol

Les mesures de la CE des échantillons des sols prélevés à la fin de cycle de la culture montrent une influence importante des eaux d'irrigation et l'amendement calcique (fig 21). En effet, les résultats montrent une augmentation de la CE avec l'augmentation de la salinité des eaux d'irrigation, ainsi les traitements amendés par le calcium présentent de CE supérieures que les traitements des eaux brutes.

La CE la plus élevée est enregistrée dans le traitement S5C tandis que la plus faible est présentée par le traitement de l'eau la moins salée S1 (Tab 14). Il semble que l'équilibre ionique est plus important pour le végétal malgré l'augmentation de la CE des traitements amendés (Snoussi et Halitim., 1998 ; Masmoudi., 2014).

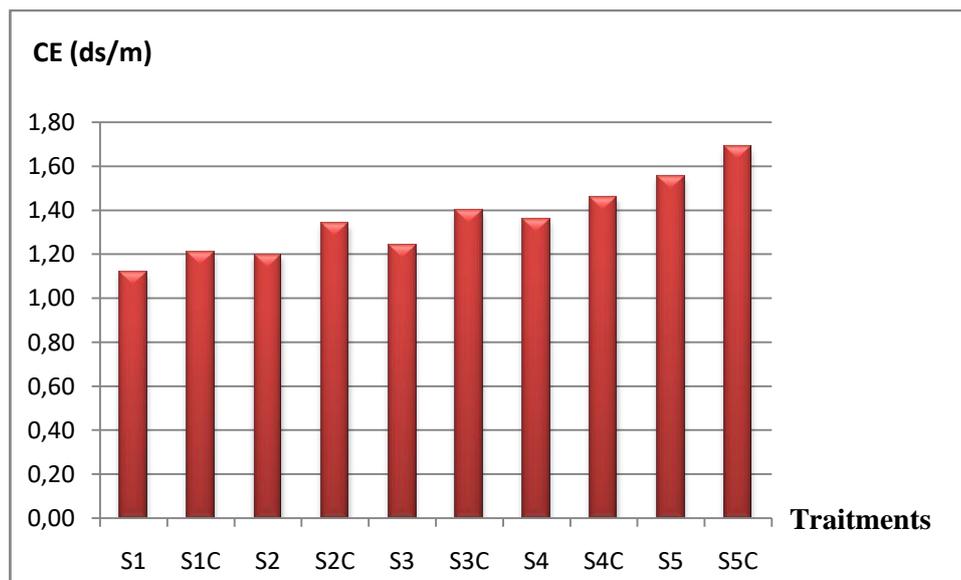


Figure 21: Evolution de CE du sol.

Chapitre 4 : Résultats et discussions

Tableau 14: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la CE du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes					
S5C	1,690	A					
S5	1,557	A	B				
S4C	1,460		B	C			
S3C	1,400		B	C	D		
S4	1,360			C	D	E	
S2C	1,340			C	D	E	
S3	1,240				D	E	F
S1C	1,210					E	F
S2	1,200					E	F
S1	1,120						F

IV.2.2 Evolution du pH du sol

Les résultats obtenus (Fig 22, Tab15) montrent que le pH varie entre 7.04 et 7.58, les traitements corrigés présentent généralement des valeurs de pH inférieures que les traitements bruts homologues, ceci probablement s'explique par l'ajout de nitrate de calcium qui a une réaction acide.

Le pH le plus bas 7.04 est enregistré dans le traitement S5C. Toute diminution de pH est bénéfique dans les conditions des sols de notre région, car elle peut favoriser en plus la disponibilité des éléments nutritifs. En fait, la disponibilité des éléments nutritifs essentiels varie avec le pH (Crawford et al., 2008)

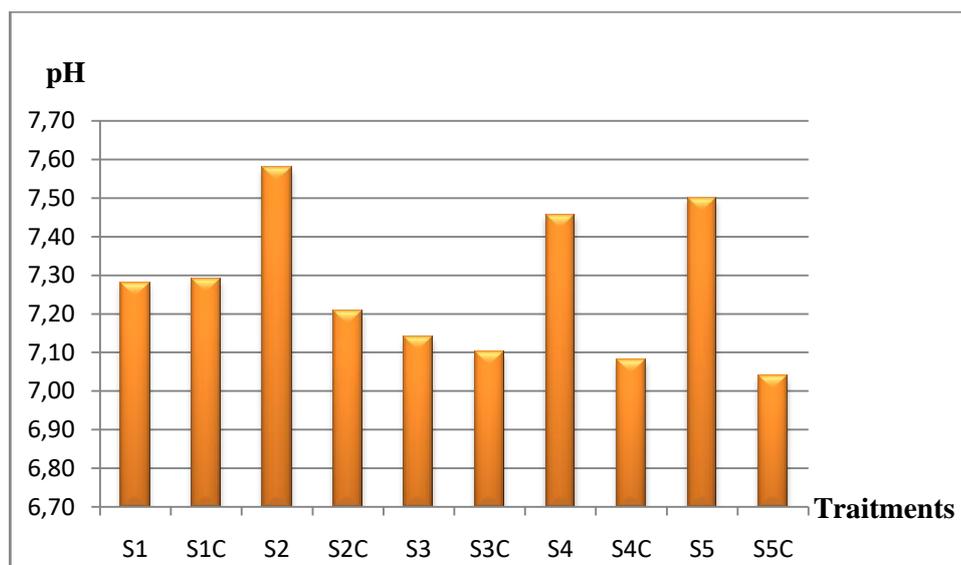


Figure 22: Evolution du pH du sol.

Tableau 15: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le pH du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes			
S2	7,580	A			
S5	7,500	A			
S4	7,457	A			
S1C	7,290		B		
S1	7,280		B		
S2C	7,207		B	C	
S3	7,140			C	D
S3C	7,100			C	D
S4C	7,080			C	D
S5C	7,040				D

IV.2.3 Sodium soluble :

D'après les résultats obtenus (Fig 23, Tab16), on remarque généralement une diminution de sodium soluble dans les traitements corrigés par rapport à leurs traitements homologues bruts, ceci nous semble dû à l'enrichissement de la solution du sol par le calcium ajouté et son remplacement de sodium sur le complexe adsorbant, ce qui entraîne un lessivage partiel de sodium libéré.

Toute diminution de la concentration de sodium de la solution du sol est positif pour le végétal et surtout le sol comme il à signalé Durand (1983) pour l'eau d'irrigation tant que le sodium n'atteint pas 50% du total des cations son action sur le complexe adsorbant du sol semble restreinte, au dessus de cette valeur le danger est grand, il se traduit par l'imperméabilisation et la stérilisation du sol.

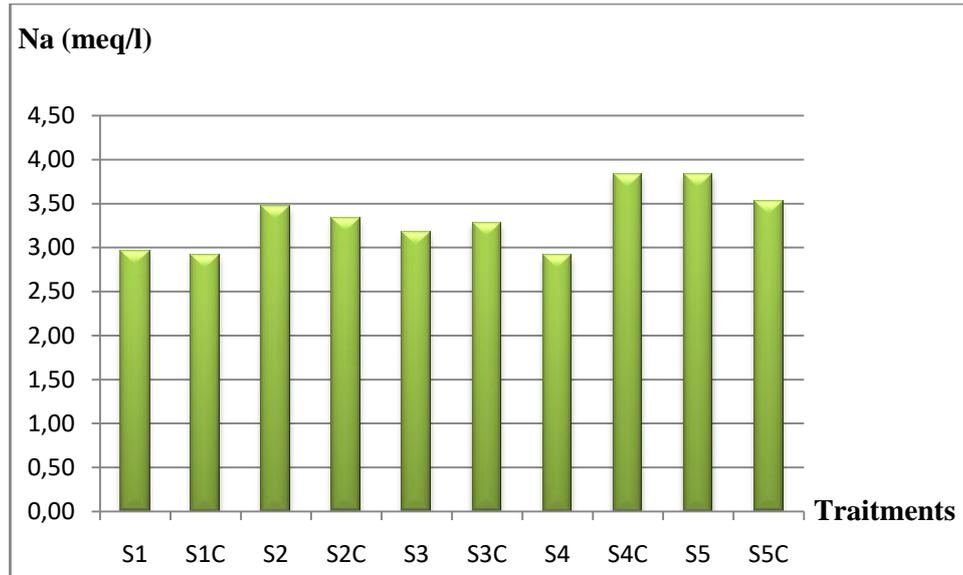


Figure 23: Teneur de sodium soluble du sol.

Tableau 16: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la teneur de sodium soluble du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes				
S5	3,840	A				
S4C	3,840	A				
S5C	3,520		B			
S2	3,470		B			
S2C	3,330			C		
S3C	3,280			C	D	
S3	3,170				D	
S1	2,957					E
S1C	2,910					E
S4	2,910					E

IV.2.4 Calcium Soluble :

Les résultats du calcium soluble (Fig 24, Tab17) montrent clairement la supériorité des traitements corrigés par rapport aux traitements homologues des eaux brutes. Donc la solution du sol des traitements amendés est enrichie par le calcium ajouté où S5C présente le teneur la plus élevée de calcium soluble 6.8 meq. Selon Mathess (1982) la concentration relativement élevée de cation calcium peut limiter l'effet dangereux du

sodium qui provoque ultérieurement la dispersion des agrégats du sol, créant finalement un problème de mouvement d'eau dans les systèmes pédologiques.

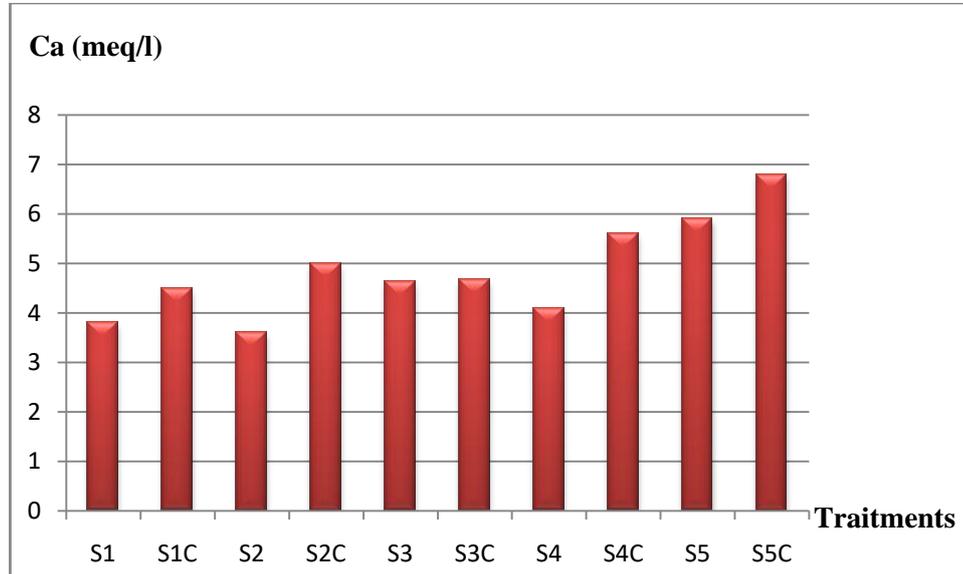


Figure 24: Teneur de calcium soluble du sol.

Tableau 17: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la teneur de calcium soluble du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes				
S5C	6,800	A				
S5	5,900		B			
S4C	5,600		B			
S2C	5,000			C		
S3C	4,667			C		
S3	4,633			C	D	
S1C	4,500			C	D	
S4	4,100				D	E
S1	3,800					E
S2	3,600					E

IV.2.5 Potassium soluble :

D'après les résultats obtenus (Fig25, Tab18), on remarque une diminution de la teneur de la solution du sol en potassium dans les traitements corrigés par rapport aux traitements homologues des eaux brutes. Le traitement brut S5 présente le teneur la plus élevée

Chapitre 4 : Résultats et discussions

0.16meq/l environ, et le traitement corrigé S4C présente la teneur la moins élevée 0.02meq/l environ.

Ceci semble s'expliquer par le remplacement de calcium ajouté de l'ion de potassium sur les sites d'échange du sol. En effet, le calcium est bivalent donc plus retenu sur le complexe adsorbant que le potassium monovalent qui sera éventuellement exposé au lessivage.

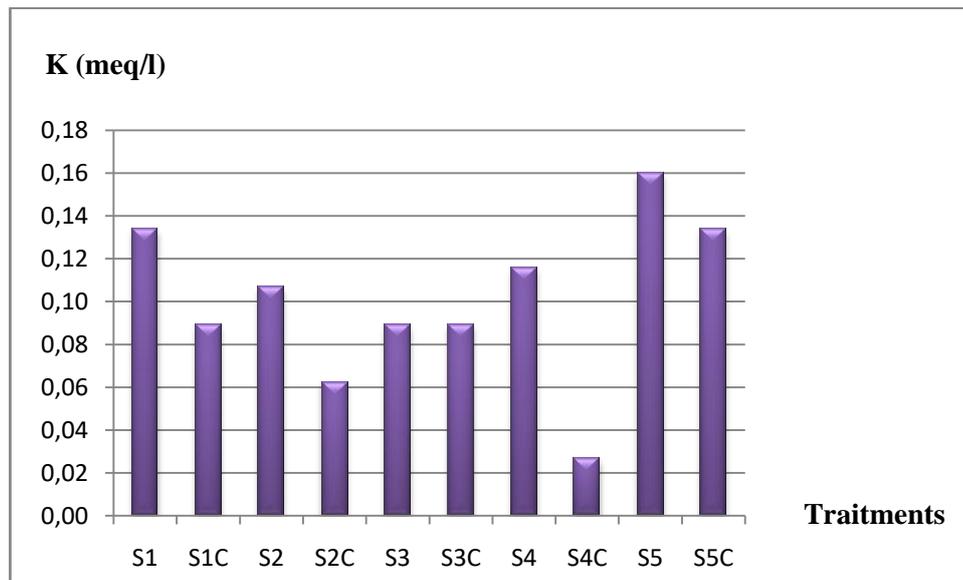


Figure 25: Teneur de potassium soluble du sol.

Tableau 18 : l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la teneur de potassium soluble du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
S5	0,160	A	
S1	0,134	A	B
S5C	0,134	A	B
S4	0,116	A	B
S2	0,107	A	B
S1C	0,089	A	B
S3	0,089	A	B
S3C	0,089	A	B
S2C	0,036	A	B
S4C	0,027		B

IV.2.6 Magnésium soluble :

Les résultats du magnésium soluble (Fig 26, Tab 19) montrent clairement la supériorité des traitements corrigés par rapport aux traitements homologues des eaux brutes où le traitement corrigé S5C présente la teneur la plus élevée 3,2 meq/l tandis que la plus faible 1,0 meq/l environ est présentée par le traitement S2.

Il nous semble que la diminution partielle du pH a pu favoriser une solubilisation relative du carbonate de magnésium ou du carbonate double de calcium et magnésium ce qui augmente la teneur de magnésium dans la solution du sol des traitements corrigés.

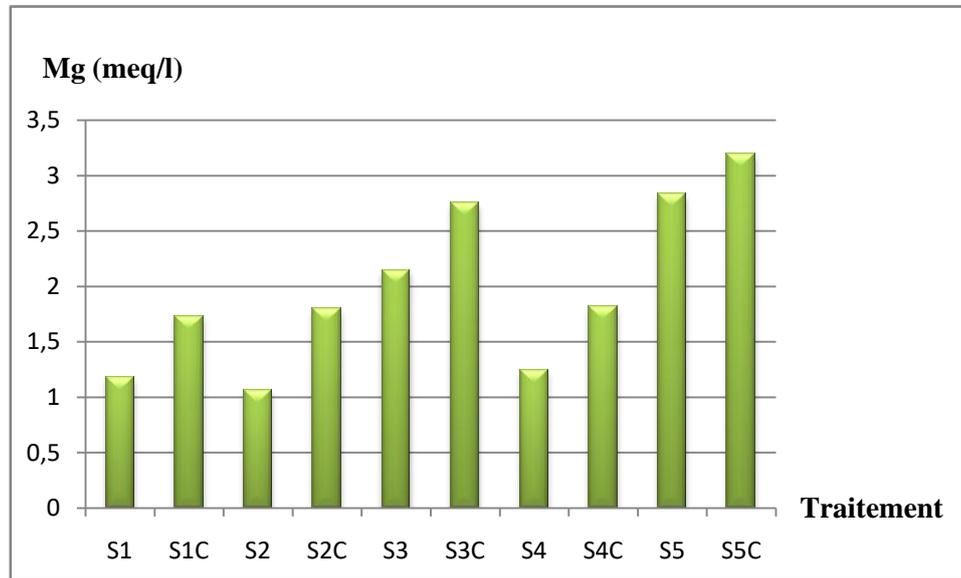


Figure 26: Teneur de magnésium soluble du sol.

Tableau 19: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la teneur de magnésium soluble du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes			
S5C	3,200	A			
S5	2,834	A	B		
S3C	2,750		B		
S3	2,150			C	
S4C	1,817			C	D
S2C	1,800			C	D
S1C	1,734				D
S4	1,250				E
S1	1,177				E
S2	1,067				E

IV.2.7 Le Chlore :

D'après les résultats obtenus (Fig 27, Tab 20), on remarque une diminution de chlore dans les traitements corrigés par rapport à leurs traitements homologues bruts. Ceci est probablement le résultat d'un lessivage partiel de l'ion chlore dans les traitements corrigés suite à l'apport de l'anion nitrate qui a joué un rôle dans l'équilibre ionique ainsi que la contribution du calcium dans l'amélioration de la structure du sol. L'ion nitrate étant l'antagoniste de l'anion chlore (Khelil, 1979)

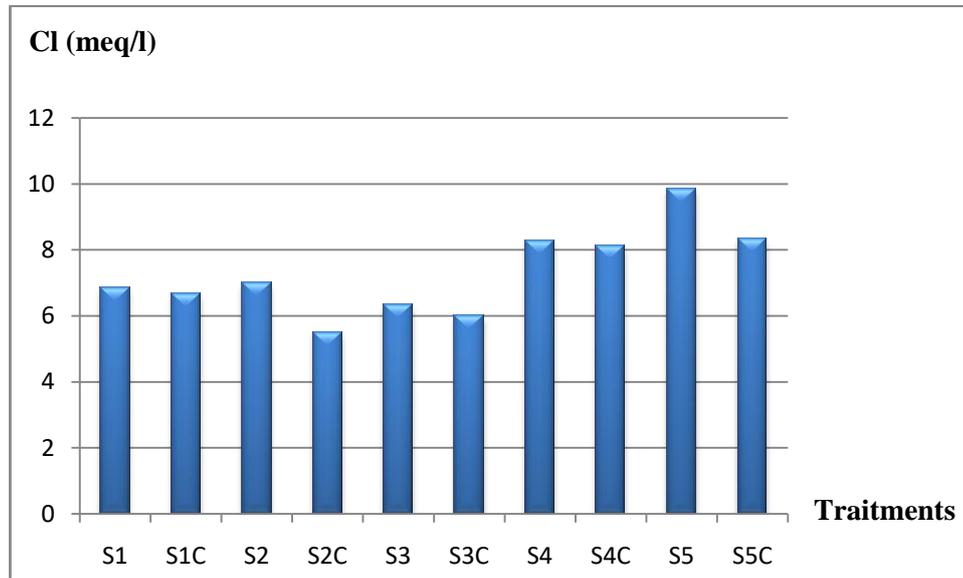


Figure 27: Teneur de chlore du sol.

Tableau 20: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la teneur de chlore soluble du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes			
S5	9,833	A			
S5C	8,333	A	B		
S4	8,250	A	B		
S4C	8,125	A	B	C	
S2	7,000		B	C	D
S1	6,833		B	C	D
S1C	6,667		B	C	D
S3	6,333		B	C	D
S3C	6,000			C	D
S2C	5,500				D

IV.2.8 Calcaire total :

Les résultats obtenus (Fig 28, Tab21) montrent que le calcaire total du sol varie entre 32.8% et 36.7%, où les traitements bruts montrent un pourcentage de calcaire total plus élevé que leur traitements homologues corrigés, ceci nous semble dû à la diminution partielle du pH du sol dans les traitements amendés provoquée par l'apport de nitrate de calcium qui a un pH varie entre 5.5 et 7.

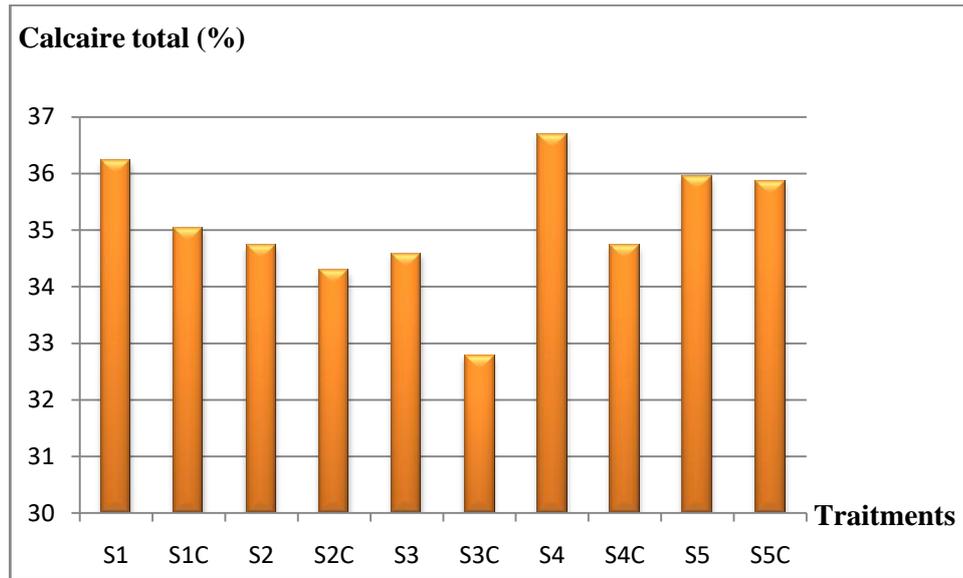


Figure 28: Evolution du calcaire total dans le sol.

Tableau 21: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le calcaire total du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
S4	36,690	A		
S1	36,240	A	B	
S5	35,940	A	B	
S5C	35,867	A	B	
S1C	35,037	A	B	
S4C	34,735	A	B	C
S2	34,733	A	B	C
S3	34,583		B	C
S2C	34,287		B	C
S3C	32,780			C

IV.2.9 Le SAR

La figure (29) présente les valeurs de SAR de la solution du sol de la culture d'orge, elles varient entre 1.57 (S5C) et 2.27 (S2), on remarque que les traitements corrigés montrent en général des valeurs inférieures que les traitements bruts. On peut dire que les traitements corrigés présentent un faible danger d'alcalinisation grâce au calcium ajouté. La sodicité du sol peut augmenter avec l'irrigation avec une eau chargée en sodium (Badraoui, 2003), mais la présence du calcium peut atténuer le danger.

Ceci nous semble que la diminution des valeurs de SAR dans les traitements corrigés est favorisé par l'apport de nitrate de calcium qui fait un équilibre ionique dans la solution du sol.

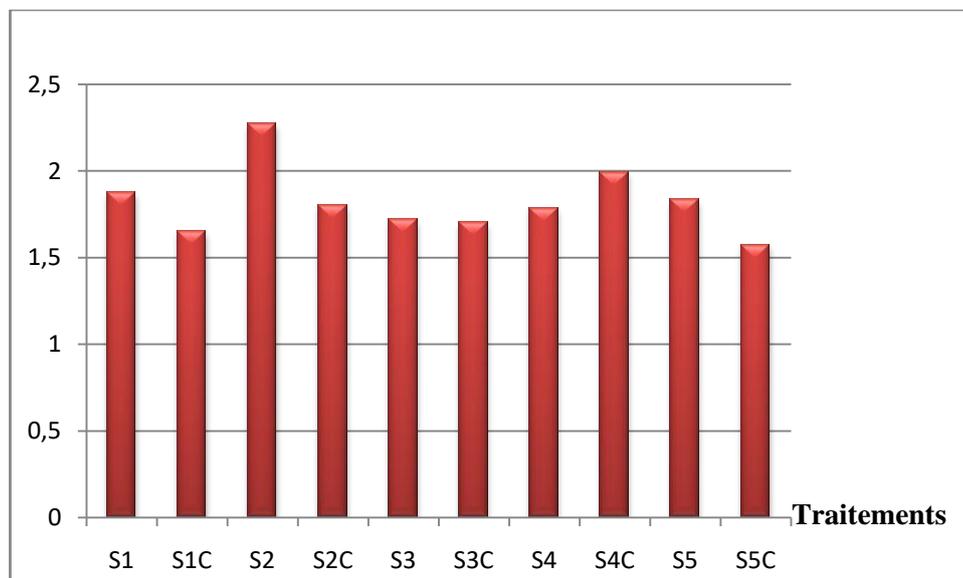


Figure 29 : Evolution du SAR de la solution du sol

Deuxième partie : la culture de Blé

IV.3 Effet de la correction des eaux sur les paramètres de la plante

IV.3.1 Longueur des tiges

A l'inverse de la culture d'orge, les résultats de la longueur des tige du blé (fig 33, T 26) montrent en général une supériorité des traitements bruts par rapport aux traitements corrigés sauf le traitement S5C. Ceci nous semble dû à la différence de la tolérance à la salinité entre les deux espèces. Mais lorsque la salinité devient élevée l'effet de calcium devient plus important comme inhibiteur de l'effet nocif de sodium (Shaikh et al., 2007).

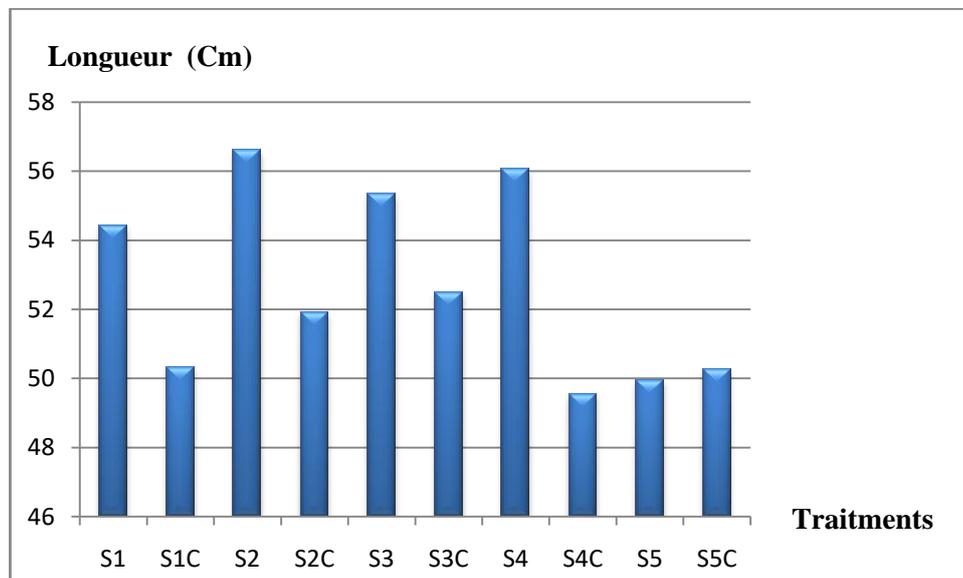


Figure 30: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur la longueur des tiges.

Tableau 22: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la longueur des tiges.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
S2	56,607	A		
S4	56,053	A	B	
S3	55,330	A	B	C
S1	54,440	A	B	C
S3C	52,497	A	B	C
S2C	51,915	A	B	C
S1C	50,330		B	C
S5C	50,277		B	C
S5	49,943		B	C
S4C	49,553			C

IV.3.2 Rendement en grains

D'après le graphique (fig 30) de l'effet de la correction des eaux d'irrigation sur le rendement en grains, on remarque que presque tous les traitements bruts présentent des rendements en grains plus élevés que ceux des traitements corrigés sauf le traitement S5C qui a produit 15 g environ de rendement en grains supérieur à son traitement homologue S5 où le rendement est 9.4 g seulement. Ceci peut probablement s'expliquer par la sensibilité de la production des grains pour une plante moyennement tolérante à la salinité. En effet l'ajout du calcium augmente la salinité ce qui permet la supériorité des traitements bruts, mais lorsque la salinité de ces derniers augmente l'effet inhibiteur de calcium devient efficace. Selon ZNATI (2009), l'apport des doses supplémentaires de Ca, K et Mg peut limiter l'effet négatif de la salinité en augmentant la résistance du végétal.

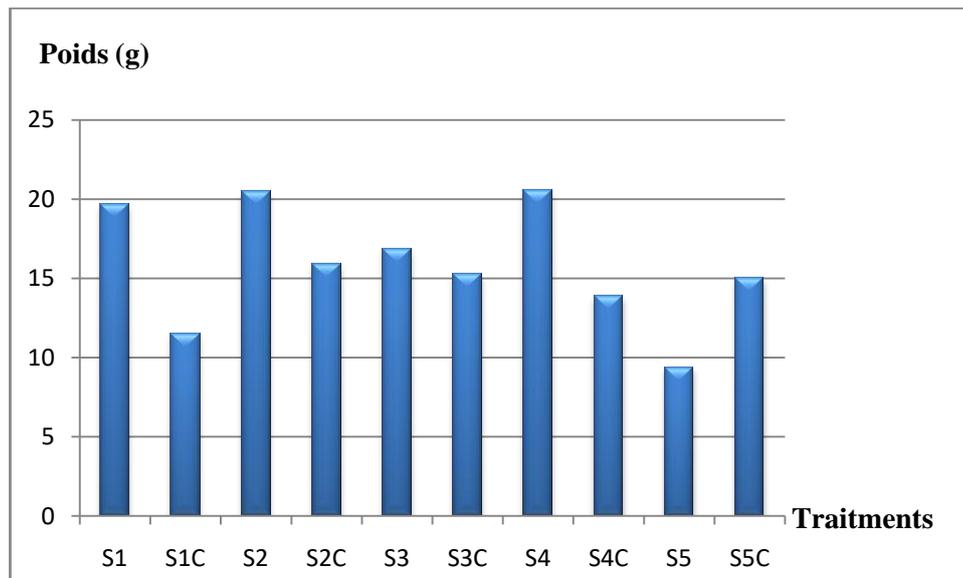


Figure 31: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le rendement en grains.

Chapitre 4 : Résultats et discussions

Tableau 23: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le rendement en grains.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes				
S4	20,563	A				
S2	20,477	A				
S1	19,650	A				
S3	16,813		B			
S2C	15,920		B	C		
S3C	15,250		B	C		
S5C	14,990		B	C		
S4C	13,870			C	D	
S1C	11,500				D	E
S5	9,400					E

IV.3.3 Rendement en paille

Les résultats obtenus (fig 29) montrent une amélioration très claire sur le rendement de paille dans les traitements corrigés par rapport aux traitements bruts. Le rendement de paille le plus élevée est de 22 g environ représenté par le traitement S1C, cependant le rendement de paille le plus faible est de 13 g environ représenté par le traitement S3.

A travers l'analyse statistique (tab 22), on observe que les traitements S1C et S2C représentent le premier groupe homogène (A) ayant produit considérablement la plus grande quantité en matière sèche. Il semble que l'azote contenu dans l'amendement calcique appliqué a joué aussi un rôle important dans la production de la biomasse.

Donc on peut dire que la correction chimique des eaux d'irrigation a bien favorisé la croissance du végétal pour tous les niveaux de salinités.

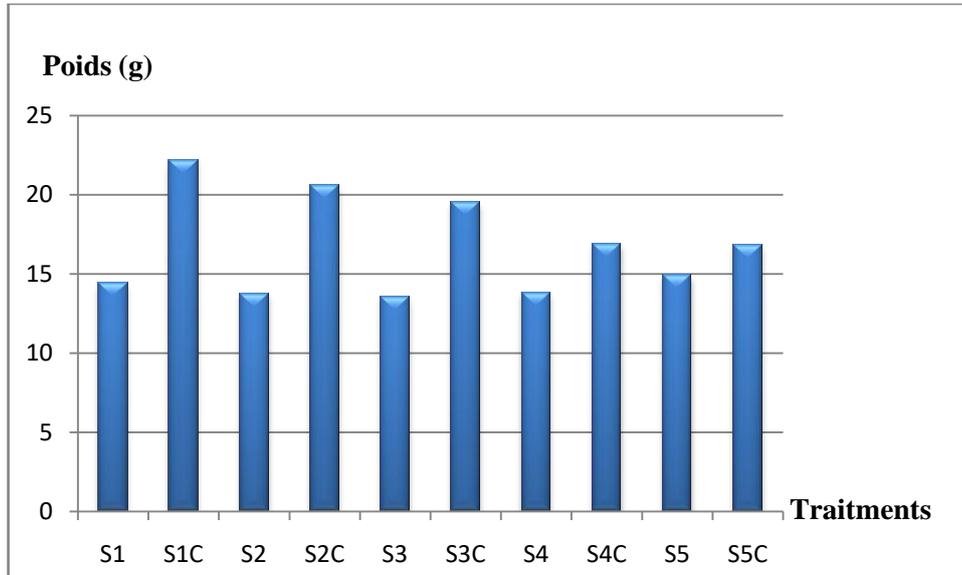


Figure 32: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le rendement en paille.

Tableau 24: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le rendement de paille.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes			
S1C	22,137	A			
S2C	20,600	A			
S3C	19,483	A	B		
S4C	16,910		B	C	
S5C	16,837		B	C	
S5	14,870			C	D
S1	14,437			C	D
S4	13,807				D
S2	13,770				D
S3	13,543				D

IV.3.4 Nombre des grains par épi

A travers la figure (34) et le tableau (27) présentant l'effet de la correction des eaux d'irrigation sur le nombre des grains par épi, on remarque que le traitement S4C présente le meilleur nombre des grains par épi (20 grains) suivi de deux traitements corrigés aussi S3C et S5C. Il est à noter que le traitement S4C a donné la meilleure longueur d'épi.

Chapitre 4 : Résultats et discussions

Les résultats montrent aussi que les deux les traitements bruts S1 et S2 présentent des nombres de grains par épi supérieurs que ceux de leur traitements homologues S1C et S2C ce qui montre que dans les conditions de faibles salinité, l'effet de l'amendement calcique est minime. Selon Bliss et al (1986) l'effet de l'apport du Ca allège l'effet négatif de la salinité.

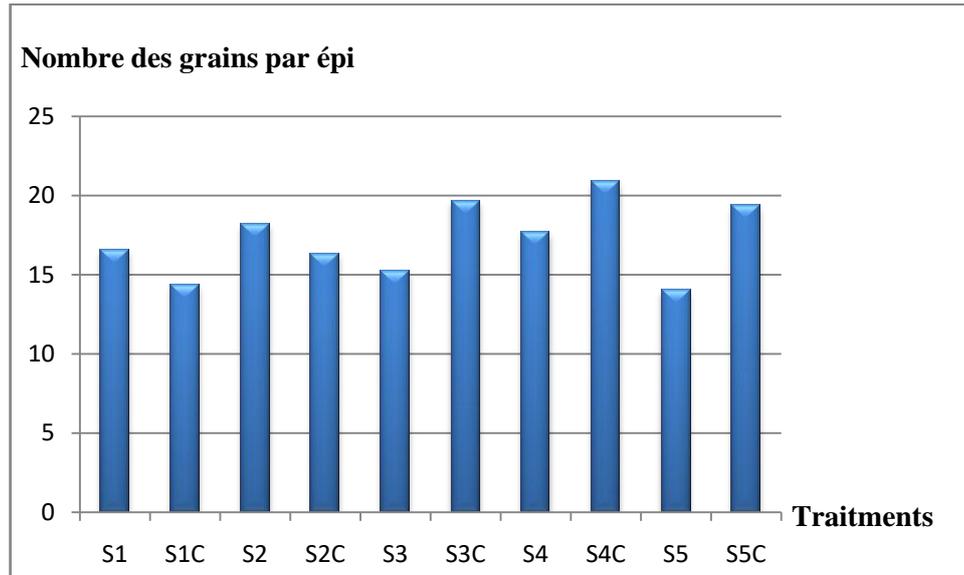


Figure 33: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le nombre des grains par épi.

Tableau 25: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le nombre des grains par épi.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
S4C	20,887	A	
S3C	19,663	A	B
S5C	19,333	A	B
S2	18,220	A	B
S4	17,665	A	B
S1	16,553	A	B
S2C	16,330	A	B
S3	15,217	A	B
S1C	14,330		B
S5	13,997		B

IV.3.5 Poids de 1000 grains

D'après le graphique (fig 32) qui représente l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le paramètre poids de 1000 grains, on observe que ce paramètre est influencé par la salinité où le traitement S1 présente le poids le plus élevé 58 g environ. Les traitements bruts de faibles salinité présentent des poids de 1000 grains supérieur que leur traitements homologues corrigés jusqu'à S4 où les traitements S4C et S5C sont supérieurs à leurs traitements homologues bruts S4 et S5. Comme nous avons déjà signalé la sensibilité de la production des grains à la salinité, le calcium ajouté peut être efficace par son rôle d'équilibre de l'agressivité de sodium dans les traitements les plus salés. On peut dire que l'amendement calcique a créé un milieu équilibré et réduit l'effet nocif de la salinité suite à son rôle dans l'équilibre ionique et le maintien de la perméabilité sélective de la membrane. (Khavan et al., 1991)

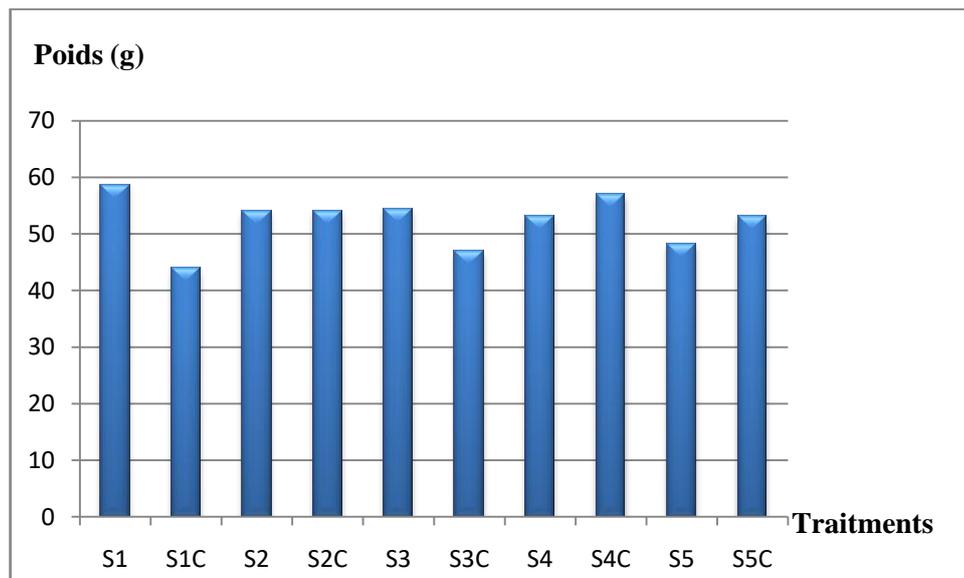


Figure 34: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur le poids de 1000 grains.

Tableau 26: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le poids de 1000 grains.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
S1	58,727	A		
S4C	56,917	A	B	
S3	54,430	A	B	
S2C	54,163	A	B	
S2	54,147	A	B	
S4	53,090		B	
S5C	53,050		B	
S5	48,120			C
S3C	46,977			C
S1C	43,977			C

IV.3.6 Longueur d'épi

Comme les résultats de la paille, les résultats obtenus de la longueur d'épi (fig 31) montrent une amélioration importante de la longueur d'épi des traitements corrigés, on observe que tous les traitements corrigés ont des longueurs d'épi plus élevés que les traitements brutes. A travers l'analyse de la variance (tab 24) on remarque que tout les traitements corrigés S4C, S5C, S1C, S3C et S2C occupent le premier groupe homogène (A) de la longueur d'épi qui varie entre 6.4 et 6.6 cm environ, par rapport a leurs traitements homologues S5, S4, S1, S2 et S3 qui viennent en deuxième groupe homogène (B) de longueur d'épi qui varie entre 5 et 5.5 cm environ. Cette amélioration est peut être due comme nous avons signalé précédemment à l'azote contenu dans l'amendement calcique à coté de l'effet du calcium. Donc on peut signaler que le calcium ajouté joue un rôle important dans la morphologie de la plante (Snoussi et al., 1998).

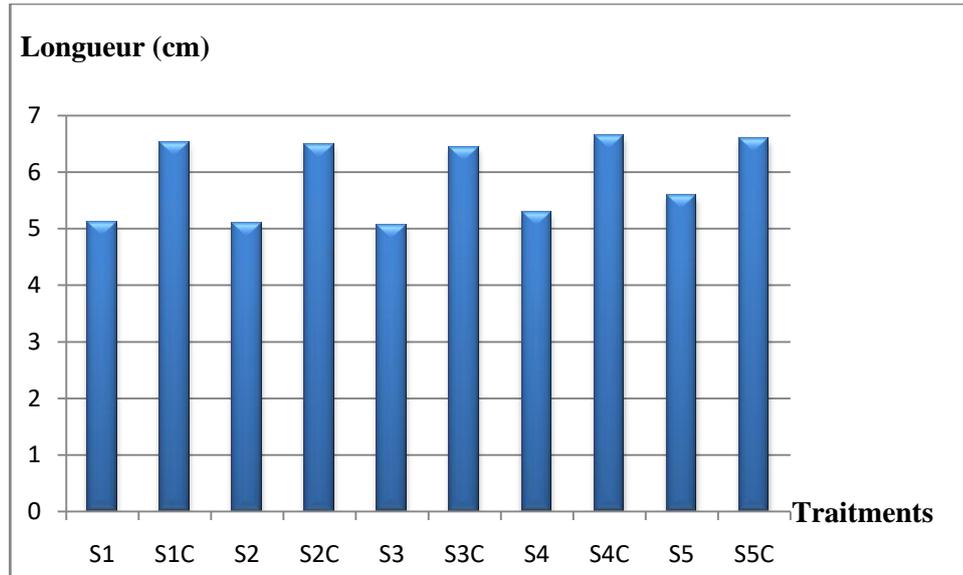


Figure 35: Effet de la correction des eaux d'irrigation sur la longueur d'épi.

Tableau 27: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la longueur d'épi.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
S4C	6,643	A	
S5C	6,587	A	
S1C	6,520	A	
S2C	6,483	A	
S3C	6,440	A	
S5	5,587		B
S4	5,280		B
S1	5,117		B
S2	5,107		B
S3	5,067		B

IV.4 Effet de la correction des eaux sur le sol de la culture de blé.

IV.4.1 Evolution de la CE du sol

Les résultats obtenus (Fig 21, Tab28) montrent une influence importante des eaux d'irrigation et l'amendement calcique sur la CE du sol. On remarque qu'il y a une corrélation directe entre la CE du sol et la CE de l'eau d'irrigation, où l'accroissement de la CE du sol est en fonction de l'augmentation de la CE de l'eau d'irrigation, ainsi les traitements amendés par le calcium présentent des CE supérieures que les traitements des eaux bruts homologues .

Chapitre 4 : Résultats et discussions

On remarque que le graphique d'évolution de la CE du sol de la culture de blé est presque le même que celui de la culture d'orge. Comme nous avons signalé dans le cas de l'orge que l'équilibre ionique est plus important que la CE dans les eaux corrigées. SNOUSSI (1998) a montré que la production de la tomate est 13 fois plus élevée dans les eaux salines corrigées que les eaux salines naturelles.

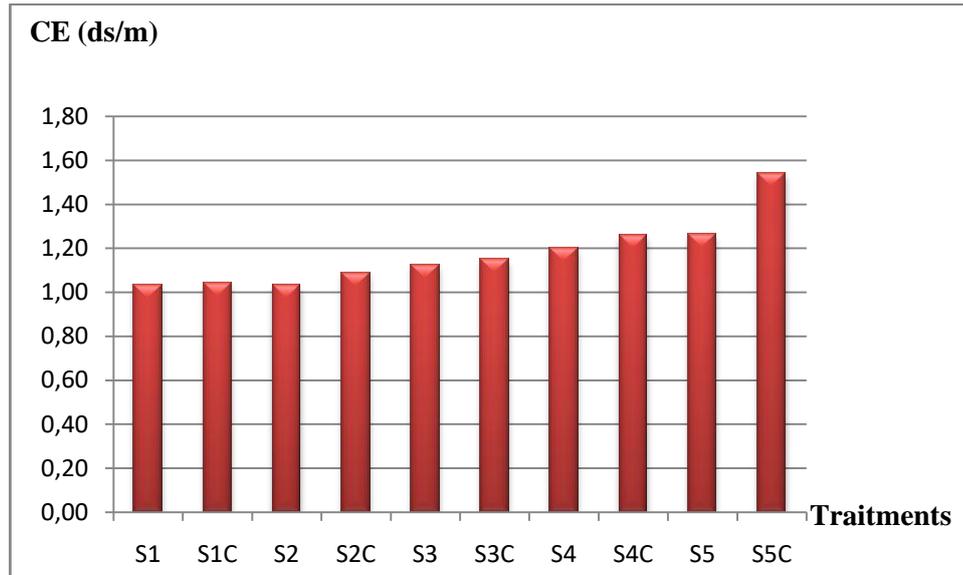


Figure 36: Evolution de la CE du sol.

Tableau 28: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la CE du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes					
S5C	1,540	A					
S5	1,263		B				
S4C	1,257		B	C			
S4	1,200		B	C	D		
S3C	1,150			C	D	E	
S3	1,123				D	E	F
S2C	1,090				D	E	F
S1C	1,040					E	F
S1	1,030						F
S2	1,030						F

IV.4.2 Evolution du pH du sol

D'après les résultats représentés sur le graphique (fig 36) et l'analyse statistique (tab 29) qui représentent l'évolution de pH du sol sur la culture de blé dur, on observe que tous les traitements bruts présentent un pH plus élevé que les traitements corrigés homologues, où le pH le plus élevé est représenté par le traitement S3 (pH=7.67).

Le pH varie entre 7,05 et 7.67, il est presque comme celui de la culture d'orge. La diminution du pH dans les traitements corrigés est vraisemblablement le résultat de l'apport de nitrate de calcium comme nous avons déjà signalé où son pH est entre 5 et 7.

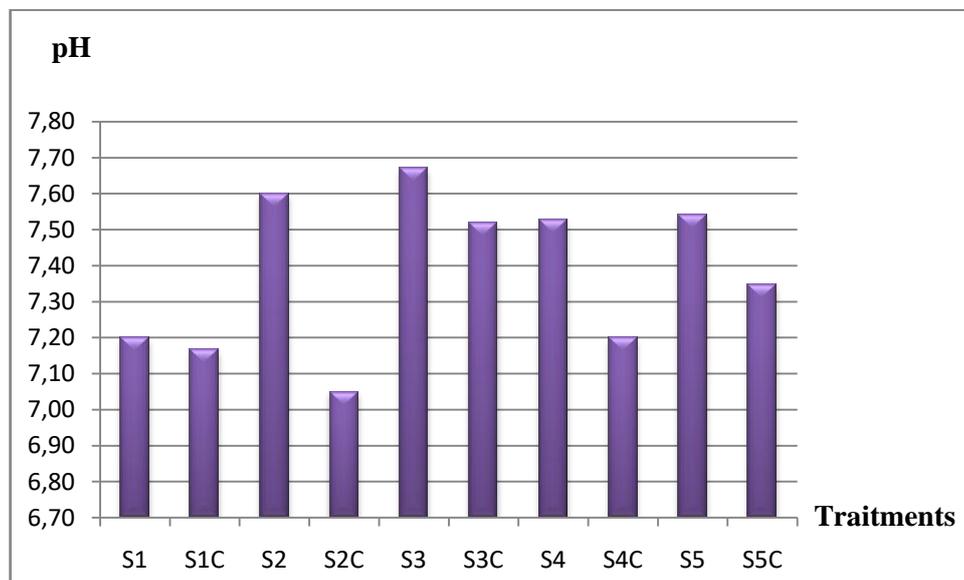


Figure 37: Evolution du pH du sol.

Tableau 29: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le pH du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes			
S3	7,670	A			
S2	7,600	A			
S5	7,540	A	B		
S4	7,527	A	B		
S3C	7,520	A	B		
S5C	7,347		B	C	
S1	7,200			C	D
S4C	7,200			C	D
S1C	7,167			C	D
S2C	7,050				D

IV.4.3 Sodium soluble :

D'après les résultats obtenus (Fig 37, Tab30) on remarque aussi une diminution de sodium soluble dans les traitements corrigés par rapport à leurs traitements homologues des eaux brutes. L'apport de l'amendement calcique a enrichit la solution du sol par le calcium qui a joué un rôle important dans l'élimination partielle de sodium à travers l'échange et le lessivage comme nous avons indiqué dans la culture d'orge. Les sols sodiques sont relativement imperméables à l'air et à l'eau ce qui rend les sols et les plantes affectés par une eau d'irrigation riche en sodium (Husien et al., 2017)

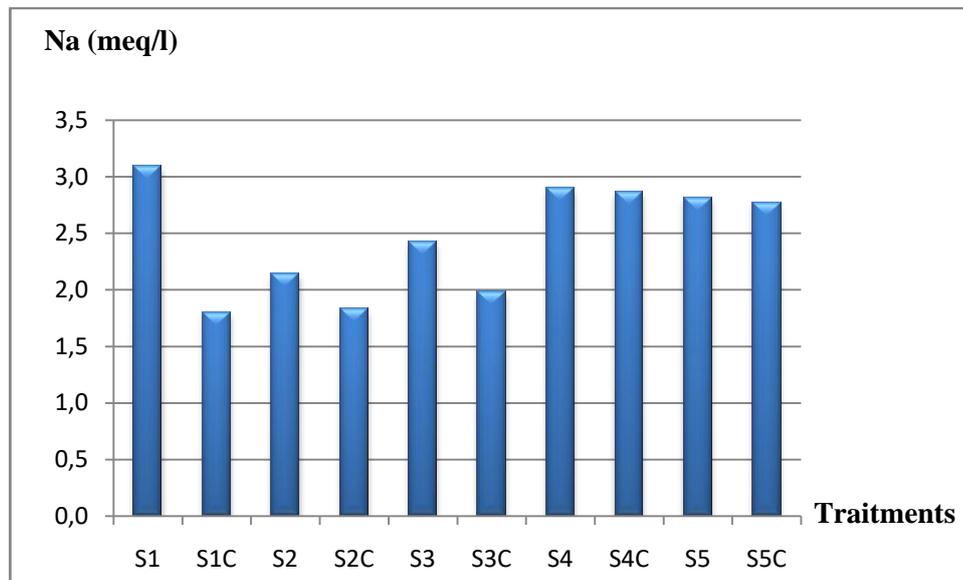


Figure 38: Teneur de sodium soluble du sol.

Tableau 30: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la teneur de sodium soluble du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes					
S1	3,093	A					
S4	2,900		B				
S4C	2,863		B				
S5	2,815		B				
S5C	2,770		B				
S3	2,420			C			
S2	2,140				D		
S3C	1,980				D	E	
S2C	1,827					E	F
S1C	1,793						F

IV.4.4 Calcium soluble :

Comme dans le cas de la culture d'orge, les résultats du calcium soluble (Fig 38, Tab 31) du sol de la culture de blé montrent nettement la supériorité des traitements corrigés par rapport aux traitements homologues des eaux brutes. La présence de calcium dans la solution du sol issu de l'amendement calcique apporté est très importante pour créer un milieu équilibré et éviter la toxicité de sodium. Selon Khelil (1979) l'ion calcium est l'antagoniste du cation Na du sel toxique (NaCl).

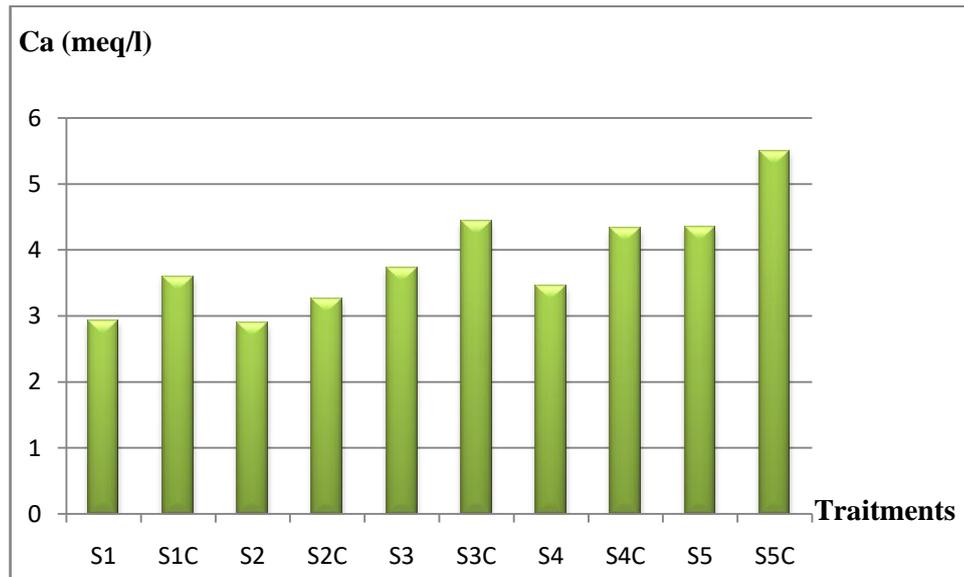


Figure 39: Teneur de calcium soluble du sol.

Tableau 31: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la teneur de calcium soluble du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes					
S5C	5,500	A					
S3C	4,433		B				
S5	4,350		B	C			
S4C	4,333		B	C			
S3	3,733			C	D		
S1C	3,600				D	E	
S4	3,450				D	E	F
S2C	3,267				D	E	F
S1	2,933					E	F
S2	2,900						F

IV.4.5 Potassium soluble :

D'après les résultats obtenus (Fig 25, Tab32) on remarque que les traitements bruts présentent des teneurs plus élevées de potassium soluble dans le sol que leur traitements homologues corrigés, c'est le même résultat trouvé dans la culture d'orge. Le traitement brut S5 présente la teneur la plus élevée 0.2meq/l environ et le traitement corrigé S2C présente la teneur la plus faible 0.05meq/l environ.

Ceci constituer peut être une confirmation de notre explication concernant la teneur de potassium dans le sol de la culture d'orge par l'échange de deux éléments calcium et potassium et le lessivage partiel de ce dernier dans les traitements corrigés.

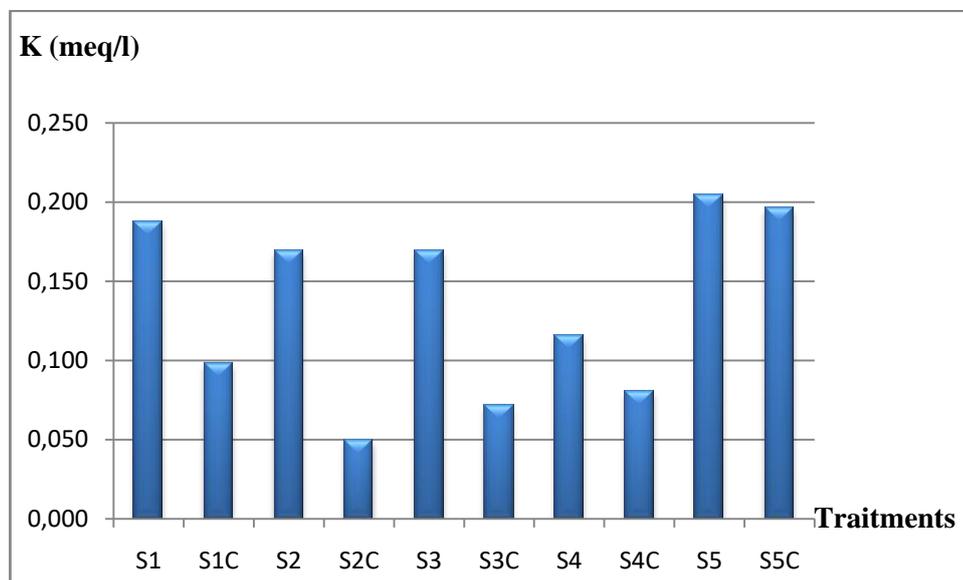


Figure 40 : Teneur de potassium soluble du sol.

Tableau 32: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la teneur de potassium soluble du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
S5	0,205	A		
S5C	0,196	A		
S1	0,187	A		
S2	0,169	A	B	
S3	0,169	A	B	
S4	0,116		B	C
S1C	0,098			C
S4C	0,080			C
S3C	0,071			C
S2C	0,049			C

IV.4.6 Magnésium soluble :

Les résultats de magnésium soluble (Fig 40, Tab33) montrent clairement la supériorité des traitements corrigés par rapport à leur traitement homologues des eaux brutes comme dans le cas de la culture d'orge. Les traitements corrigés S4C et S5C présentent les teneurs les plus élevées en magnésium soluble 2,7 meq/l et 2,6 meq/l respectivement. Ceci peut confirmer éventuellement la solubilisation relative du carbonate de magnésium.

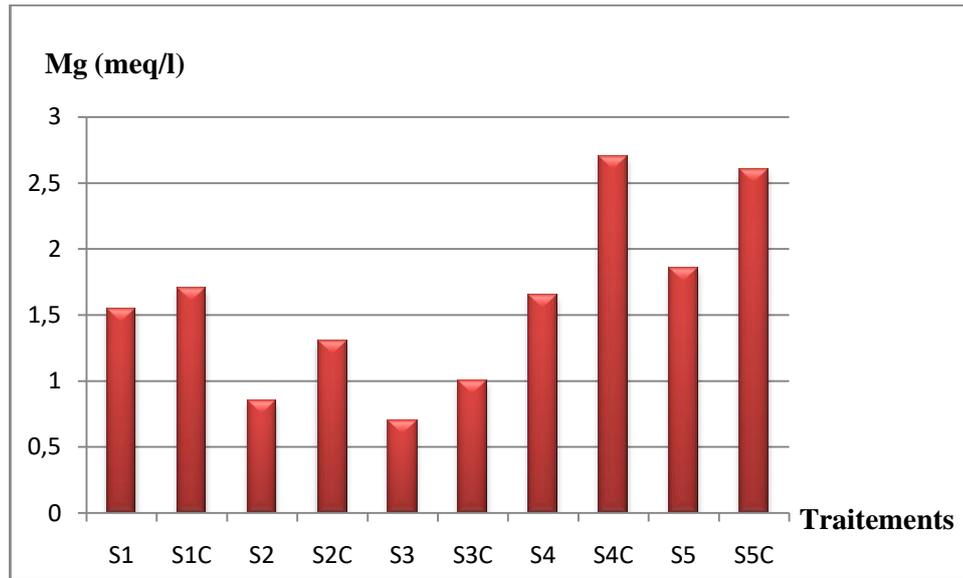


Figure 41: Teneur de Magnésium soluble du sol.

Tableau 33: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la teneur de magnésium soluble du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes				
S4C	2,700	A				
S5C	2,600	A				
S5	1,850		B			
S1C	1,700		B			
S4	1,650		B	C		
S1	1,550		B	C		
S2C	1,300			C	D	
S3C	1,000				D	E
S2	0,850					E
S3	0,700					E

IV.4.7 Le Chlore :

D'après les résultats obtenus (Fig 41, Tab34) on observe que les traitements bruts montrent des teneurs en chlore plus élevées que les traitements corrigés homologues comme le cas de la culture d'orge. Le chlore a généralement une bonne corrélation positive avec le sodium (Masmoudi, 2012).

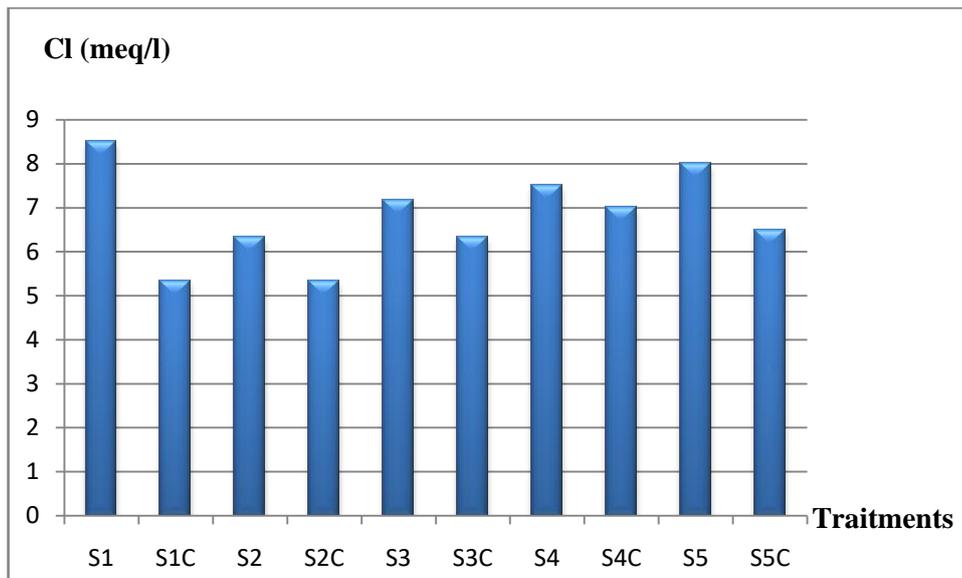


Figure 42: Teneur de chlore du sol.

Tableau 34: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur la teneur de chlore du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
S1	8,500	A		
S5	8,000	A	B	
S4	7,500	A	B	
S3	7,167	A	B	
S4C	7,000	A	B	
S5C	6,500		B	C
S2	6,333		B	C
S3C	6,333		B	C
S2C	5,333			C
S1C	5,333			C

IV.4.8 Calcaire total :

D'après les résultats obtenus (Fig 42, Tab35), on remarque que le calcaire total du sol varie entre 30% et 35% environ. Les traitements bruts montrent en général un pourcentage de calcaire total plus élevé que les traitements corrigés homologues. Ceci nous semble probablement dû à une diminution relative du pH comme nous avons signalé dans le cas de la culture d'orge.

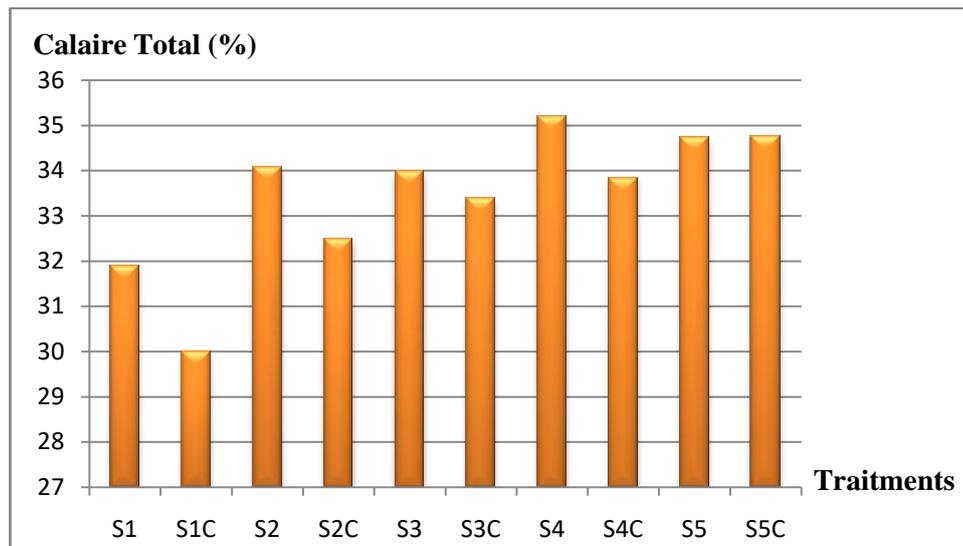


Figure 43: Evolution du calcaire total dans sol

Tableau 35: l'analyse statistique de l'effet de la correction chimique des eaux d'irrigation sur le calcaire total du sol.

Modalité	Moyenne estimée	Groupes				
S4	35,187	A				
S5C	34,737	A	B			
S5	34,735	A	B			
S2	34,060	A	B	C		
S3	33,983	A	B	C		
S4C	33,837	A	B	C		
S3C	33,387		B	C	D	
S2C	32,480			C	D	
S1	31,880				D	
S1C	30,000					E

IV.4.9 Le SAR

Les valeurs de SAR de la solution du sol de la culture de blé (Fig 44) varient entre 1.1 (S1C) et 2.07 (S1), on remarque que tout les traitements bruts montrent des valeurs du SAR plus élevées que les traitements corrigés homologues. On peut dire que les traitements corrigés présentent un faible danger de sodicité suite à l'apport de calcium.

Donc, la diminution des valeurs de SAR dans les traitements corrigés provoqué par l'apport de nitrate de calcium qui a fait un équilibre ionique dans la solution du sol, comme nous avons signalé dans le cas de la culture d'orge.



Figure 44 : Evolution du SAR de la solution du sol

SYNTHÈSE ET CONCLUSION GÉNÉRALE

SYNTHESE ET CONCLUSION GENERALE

Notre travail consiste à une amélioration de la qualité des eaux d'irrigation à travers la modification de la composition chimique de l'eau surtout en ce qui concerne l'équilibre ionique entre le sodium et le calcium ce qui peut diminuer l'effet agressif du sodium, améliorer la fertilité du sol et par conséquent l'amélioration des rendements des cultures. De plus l'enrichissement de l'eau d'irrigation par des éléments nutritifs utiles, et éviter les problèmes de toxicité et la dégradation de la structure du sol.

A l'issus de cette étude nous pouvons synthétiser les résultats obtenus sur les deux cultures orge et blé dur comme suit:

L'effet de l'amendement calcique est positif pour les deux cultures, mais on peut dire qu'il est très bien clair sur l'orge que le blé, ceci nous semble dû à la différence de tolérance à la salinité entre les deux espèces, l'orge a une tolérance élevée tandis que le blé a une tolérance moyenne. Malgré l'augmentation de la salinité provoquée par l'ajout du sel de calcium, l'amendement a un impact important sur la culture en allégeant l'effet nocif de sodium suite à l'équilibre ionique établi ce qui a eu une action positive sur la croissance des plantes. On peut récapitule cet effet comme suit :

- Pour la croissance et le rendement en grains, l'effet de l'ajout de calcium est plus clair sur l'orge que sur le blé, en effet, tout les traitements corrigés présentent des hauteurs des plantes et des rendements en grains supérieurs que ceux des traitements bruts, cependant pour le rendement en paille et la longueur d'épi, l'effet d'amendement calcique est remarquable pour les deux cultures.

- Pour le nombre des grains par épi, l'effet de l'amendement calcique est totalement positif pour l'orge, tandis que pour le blé, cet effet est positif dans les salinités élevées. Pour les faibles salinités, les eaux brutes qui ont apporté le nombre de grains par épi le plus élevé.

Concernant l'effet de l'amendement calcique sur le sol, on peut citer :

- La conductivité électrique du sol augmente avec l'augmentation de la salinité de l'eau d'irrigation et l'ajout de calcium dans les deux cultures. En effet, les traitements corrigés présentent des conductivités électriques supérieures que celles des traitements bruts.

- Pour le pH est généralement moins élevé dans les traitements corrigés pour les deux cultures que celui des traitements bruts.

- Pour la solution du sol, il ya enrichissement de la solution du sol en calcium et magnésium dans tout les traitements corrigés pour les deux cultures, cependant, le sodium

, chlore et potassium sont généralement inférieurs dans les traitements corrigés que dans les traitements bruts dans les deux cultures.

- Le calcaire total du sol est moins élevé dans les traitements corrigés que dans les traitements bruts dans les deux cultures suite probablement à la diminution partielle du pH du sol.

L'amélioration constatée est probablement le résultat de l'apport de calcium qui a équilibré l'environnement nutritionnel et a une action positive sur le sol face à l'agressivité de la salinité et du sodium. Plusieurs chercheurs ont indiqué que le Ca peut atténuer l'effet inhibiteur du NaCl et donc contribuer à l'amélioration de la croissance racinaire. (Cramer et al, 1989 ; Zhong et Läuchli, 1993 ; Colmer et al, 1996) Ainsi, Lopez et Satti (1996) ont découvert que l'ajout de Ca à une solution nutritive saline augmente la longueur des racines malgré l'augmentation de la concentration car la toxicité du Ca est très faible. De plus, on peut également noter l'effet de l'azote inclus dans l'amendement du nitrate de calcium, notamment sur les paramètres de croissance. Enfin, on peut dire que la correction chimique de la qualité de l'eau d'irrigation peut jouer un rôle important sur les plantes cultivées en créant un environnement favorable malgré l'augmentation de la salinité de l'eau corrigée.

A partir de ce qui précède, on peut conclure que l'amendement calcique a un effet favorable sur la production des grains et la biomasse pour les cultures tolérantes (l'orge), mais pour les cultures moyennement et peu tolérantes, il est préférable de l'utiliser pour la production de la biomasse. Ceci peut constituer une suggestion et perspective de recherche pour une large gamme de cultures de différentes tolérances.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

References Bibliographiques

- Akhavan M., Campbell W.F., Jurinak J.J., Dudley L.M., 1991.** Effects of CaSO₄, CaCl₂ and NaCl on leaf nitrogen, nodule weight and acetylene reduction activity in *Phaseolus vulgaris*. *Arid land research and management* 5, 2, 97-103.
- Aldakheel Y. Y., 2011.** Assessing NDVI Spatial Pattern as Related to Irrigation and Soil Salinity Management in Al-Hassa Oasis, Saudi Arabia. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 39(2), 171–180.
- Álvarez S., Sánchez-Blanco M. J., 2015.** Comparison of individual and combined effects of salinity and deficit irrigation on physiological, nutritional and ornamental aspects of tolerance in *Callistemon laevis* plants. *Journal of plant physiology*, 185, 65-74.
- Ammar, M., 2014.** Organisation de la chaîne logistique dans la filière céréales en Algérie. Etat des lieux et perspectives. Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de hautes études du CIHEAM. CIHEAM-IAMM. 127P.
- Ashraf, M., Wu, L., 1994.** Breeding for Salinity Tolerance in Plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 13(1), 17–42.
- Ashraf, M., Harris, P. J. C., 2004.** Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plant Science*, 166(1), 3–16.
- Ayers R.S., Westcot D.W., 1984.** la qualité de l'eau en agriculture. *Bulletin FAO, d'irrigation et de drainage* 80p. Rome, Italie
- Badraoui M., 2003.** Elaboration d'un modèle d'éco-bilan pour l'évaluation environnementale de l'agriculture irriguée au Maroc (Cas de périmètre irrigué de Tadla). *Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II Rabat*, 38p.
- Ballesteros E., Blumwal E., Donaire J.P., Belver A. 1997.** Na⁺/H⁺ antiport activity in tonoplast vesicles isolated from sunflower roots induced by NaCl stress. *Physiol.Plant.* 99. pp. 328-334.
- Bekkoussa B., Jourde H., Batiot-Guilhe C., Meddi M., Khaldi A., Azzaz H., 2013.** Origine de la salinité et des principaux éléments majeurs des eaux de la nappe phréatique de la plaine de Ghriss, Nord-Ouest algérien, *Hydrological Sciences Journal*, 58:5, 1111-1127,
- Bliss R.D., Platt-Aloia K. A., Thomson W. W., 1986.** The inhibitory effect of NaCl on barley germination. *Plant, Cell and Environment*. 9, (9), 727–733.

References Bibliographiques

- Boualla N., Benziane A., Derrich Z., 2012.** Origine de la salinisation des sols de la plaine de M'léta (bordure sud du bassin sebkha Oran). *Journal of Applied Biosciences*. PP 3787 – 3796
- Bouthiba, A. and Debaeke, P., 2009,** May. Besoins en eau de différentes variétés de blé dur en conditions semi-arides. In *Symposium international en Agriculture durable en région Méditerranéenne (AGDUMED)*, Rabat, Maroc (pp. 14-16).
- Badraoui M, Merzouk A., 1994.** Changes of soil qualities under irrigation : the effect of salt accumulation on water retention by Vertisols. In *CIHEAM Ed., farm water management techniques*, Rabat, Morocco.
- Badraoui M, Soudi B, Merzouk A, Farhat A, M'hamdi A., 1998.** Changes of soil qualities under irrigation in the Bahira region of Morocco : Salinization. *Advances in GeoEcology* 31.
- Barth, J. G., 2021.** Calcaire et Calcium chez les plantes. *Soin de la terre*.
- Cahurel J. Y., 2008.** Fertilisation De La Vigne Un Point Sur Les Préconisations. *Les Oligo-Eléments*. Fiche 6. 6P.
- Ceylan, Y., Kutman, U. B., Mengutay, M., & Cakmak, I., 2016.** Magnesium applications to growth medium and foliage affect the starch distribution, increase the grain size and improve the seed germination in wheat. *Plant and Soil*, 406(1-2), 145–156.
- Chabane, M. and Boussard, J.M., 2012.** La production céréalière en Algérie: Des réalités d'aujourd'hui aux perspectives stratégiques de demain.
- Chatterjee C, Nautiyal N., 2001.** Molybdenum stress affects viability and vigour of wheat seeds. *Journal of Plant Nutrition* 24 : 1377–1386
- Chouard P., 1952.** *Les cultures sans sol*. Ed. *Maison Rustique*. Paris. 200P.
- Choudhary, O.P., Kharche, V.K., 2018.** Soil salinity and sodicity. *Soil science: an introduction*, 12, pp.353-384.
- Coelho B. A. L. D., Gilvan B. F., Alexandre C B. F., Da Conceição Santana Carvalho M., Julio Cesar B., Traore K., 2013.** Diagnostique visuel des carences nutritionnelles du cotonnier. *Echange d'expériences sur le cotonnier*. COTON-4. 41P.
- Codeval., 2016.** *Lutte contre la dégradation des terres et leur valorisation*. Guide pratique. Centre forestier de recyclage a thies. *Cooperation Senegal-Japon*. 104p
- Colmer T.D., Fan T.W.M., Higashi R.M., Lauchli A., 1996.** Interactive effects of Ca²⁺ and NaCl salinity on the ionic relations and proline accumulation in the primary root tip of sorghum bicolor. *Physiologia Plantarum* 3, (97), 421-424.

References Bibliographiques

- Couture I., 2003.** Analyse d'eau pour fin d'irrigation. AGRI-VISION 2003-2004. MAPAQ Montérégie-Est, Canada.
- Couture I., 2006.** Principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau en micro-irrigation. Colloque sur l'irrigation l'eau, source de qualité et de rendement. Craaq.
- Cramer G R., Epstein E., Läuchli A., 1989.** Na-Ca interactions in barley seedlings: relationship to ion transport and growth. *Plant, Cell and Environment* 5 (12) 551-558.
- Cramer G.R., Epstein E., Läuchli A., 1990.** Effects of sodium, potassium and calcium on salt-stressed barley. *Physiologia Plantarum* 80,1: 83-88.
- Crawford T. W., Singh J., U., and Breman H., 2008** Résoudre les Problèmes Agricoles Relatifs à l'Acidité du Sol dans la Région des Grands Lacs de l'Afrique Centrale. Rapport sur le Contrôle de l'Acidité du Sol. IFDC 123P.
- Daoud Y., Cheverry C., Robert M., 1993.** Rôle physico-chimique du magnésium dans les sols des plaines du Chélif (Algérie). *Science du Sol*, 31, (4) : 281-293.
- Daoudi M., 2018.** Fertilisation et engrais naturels et bio. Rôles des éléments nutritifs (N, P et K) pour les plantes. bioenligne.com.
- Diehl, R., 1975.** Agriculture générale. Ed.J.B. Baillière. Paris.400P.
- Diehl, R., 1975.** Agriculture générale. 2 e édition. J. B. Baillière, 19.
- Douaoui, A., Hartani, T., 2007.** Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Actes de l'atelier régional SIRMA. Tunis.
- Durand J.H., 1983** Les sols irrigables. Etude pédologique. SES, Alger, 190P
- Duval, J., 1995.** La luzerne et le bore. Document de synthèse.
- Eaton, F.M., 1950.** Significance of Carbonates in Irrigation Waters. *Soil Science*, 69, 123-134.
- FAO, 1984:** Prognosis of salinity and alkanity.FAO soil Bulletin 31, 268 P.
- FAO., 1999.** Guide pour une gestion efficace de la nutrition des plantes. Rome, Italie. 20 pp.
- FAO., 2002.** La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture. Rome, Italie. 0251-1460 pp.
- FAO., 2005.** Notions de nutrition des plantes et de fertilisation des sols. Utilisation des Intrants agricoles par les Organisations de Producteurs. 25P.
- FAO., 2021.** La carte mondiale des sols touchés par la salinisation. Site : Nations unies ONU. Colloque international sur les sols touchés par la salinisation.

References Bibliographiques

- Farhat A., 1995.** Effets de l'irrigation par pivot sur la qualité des sols dans la Bahira : situation actuelle et perspectives de développement. Thèse de 3ème cycle, IAV Hassan II, Département Sci. Sol, Rabat, Maroc.
- François. R., 2008.** Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité, Edition DUNOD, Paris, 1152 pages
- Gaham H., 2016.** Contribution à la détermination d'indicateurs pertinents de diagnostic de la dégradation physique de sols de la plaine du Bas Cheliff soumis à la salinité et la sodicité. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en agronomie. Université de Mostaganem.60p.
- Garcia M., 1975.** Influence de la salinité due au chlorure de sodium sur l'équilibre acido-basique du sorgho-grain. Thèse de spécialité, Université de Toulouse, 84 p.
- Gouaidia L., Guefaïfia O., Boudoukha A., Laid Hemila M., Martin C., 2013.** Évaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols: exemple de la plaine de Meskiana (Nord-Est Algérien). *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, (Volume 6), 141-160.
- Guerin F., 2016.** Le calcium dans le sol. *Bulletin Sol et Agronomie des Chambres d'agriculture des Pays de la Loire*.2p.
- Halitim A., 1988.** Sols des régions arides d'Algérie. OPU. Alger, 384P.
- Hamdy A., Safwat A., et Mahmoud A., 1993.** Saline water management for optimum crop production. *Agricultural water management* 24,3: 189-203.
- Hanana, M., Hamrouni, L., Cagnac, O. and Blumwald, E., 2011.** Mécanismes et stratégies cellulaires de tolérance à la salinité (NaCl) chez les plantes. *Environmental Reviews*, 19(NA), pp.121-140.
- Hänsch, R. and Mendel, R.R., 2009.** Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current opinion in plant biology*, 12(3), pp.259-266.
- Haouala, F., Ferjani, H. and El Hadj, S.B., 2007.** Effet de la salinité sur la répartition des cations (Na⁺, K⁺ et Ca²⁺) et du chlore (Cl⁻) dans les parties aériennes et les racines du ray-grass anglais du chiendent. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 11(3).235-244.
- Hayward H E., 1952.** Croissance des plantes en milieu salin. Rapport examinant les problèmes biologique relatifs aux plantes qui peuvent supporter l'eau pour l'irrigation. Organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture.USA.45p
- Hepler P. K., Wayne R. O., 1985.** Calcium and plant development. *Annual review of plant physiology* 36.1: 397-439.

References Bibliographiques

- Hopkins, W.G., 2003.** Physiologie végétale. De Boeck Supérieur.
- Husien, A., Seboka, S. and Shifarra, W., 2017.** Assessment of irrigation water quality of lowlands in the Bale Zone, South Eastern Oromia, Ethiopia. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 9(12), pp.264-269.
- Jaleel C.A, Manivannan P., Sankar B., Kishorekumar A, Panneerselvam R., 2007** Calcium chloride effects on salinity-induced oxidative stress, proline metabolism and indole alkaloid accumulation in *Catharanthus roseus*. *C. R. Biologies* 330, 674–683.
- Jin Z.M., Wang C.H., Liu Z.P., Gong W.J., 2007.** Physiological and ecological characters studies on *Aloe vera* under soil salinity and sea water irrigation. *Process Bioch.* 42: 710-714.
- Ishfaq, M., Wang, Y., Yan, M., Wang, Z., Wu, L., Li, C. and Li, X., 2022.** Physiological essence of magnesium in plants and its widespread deficiency in the farming system of china. *Frontiers in Plant Science*, 13.
- Kaiser, b. N., Gridley, k. L., Ngaire Brady, j., Phillips, t., & Tyerman, s. D., 2005.** The role of molybdenum in agricultural plant production. *Annals of botany*, 96(5), 745–754.
- Kali A G., Potasse S A., 2004.** Les symptômes de carence en éléments nutritifs. Edit Murtenstrasse 116, France. 33P.
- Kamal, E.D., 1990.** Water management in oases. Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Zagazig University. Zagazig (Egypt).
- Karemangingo, C Zebarth, B.J., Scott, P., Savoie, D. and Moreau, G., 2007.** Nitrogen management for potato: general fertilizer recommendations. New-Brunswick Ministry of Agriculture. Fisheries and Aquaculture, Fredericton, NB, Canada.
- Khavan M., Campbell W. F., Jurinak J. J., Dudley L. M., 1991.** Effects of CaSO_4 , CaCl_2 and NaCl on leaf nitrogen, nodule weight and acetylene reduction activity in *Phaseolus vulgaris*. *Arid land research and management* Vol 5, N° 2, PP 97-103.
- Khelil, A., 1979.** Influence du nitrate de calcium sur la croissance, la composition minérale et les équilibres ioniques du clémentinier alimenté avec une solution nutritive enrichie en chlorure de sodium. *Fruits*, 34(3), pp.179-188.
- Larson WE, Pierce FJ., 1991.** Conservation and enhancement of soil quality. In evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol. 2 : Technical papers. Bangkok, Thailand, Inter. Board for Soil Research and Management, IBSRAM Proceedings No 12(2).

References Bibliographiques

- Levigner A., Lopez F., Vansuyt G., Berthomieu P., Fourcroy P., Casse-Delbart F., 1995.** Les plantes face au stress salin. Cah. Agric. 4, p. 263–273.
- Maillard., 2001.** Le point sur l'Irrigation et la salinité des sols en zone sahélienne. Risques et recommandations. Handicap International. Novembre 2001, 34 p.
- Masmoudi A., 2012.** Problèmes de la salinité liés à l'irrigation dans la région saharienne cas des oasis des Ziban. Thèse de doctorat, université de Biskra, 142 P.
- Masmoudi A., Hemeir A., Benaissa M., 2014.** Impacts de la concentration et du type de sel sur le potentiel germinatif et la production de biomasse chez l'orge (*hordeum vulgare*). Courrier du Savoir 18, 95-101
- Masmoudi A., 2016.** Effect of NaCl in presence of calcium and potassium on germination and growth of durum wheat (*triticum durum* l.) International Journal of Agriculture and Environmental Research. Volume 2, Issue : 6
- Mathess G., 1982.** The Properties of Groundwater. John Willey and Sons, New York. P 406.
- Mathieu C., Ruellan A., 1980.** Evolution morphologique des sols irrigués en région méditerranéenne semi-aride. Cahier ORSTOM, Série pédologie, 13, 3-25
- Merabti B., 2016.** Identification, composition and structure of Culicidae populations of the region of Biskra. Effects of environmental factors on the seasonal abundance. Thesis of doctorate, university of Ouargla, 169P.
- Meychik N.R., Nikolaeva J.I., Yermakov I.P., 2005.** Ion exchange properties of the root cell walls isolated from the halophyte plants (*Suaeda altissima* L.) grown under conditions of different salinity. Plant Soil. 277: 163-174.
- Michel L., 1999.** Nutrition en calcium : problèmes et prévention. Laboratoire de diagnostic en phytoprotection, MAPAQ. Publication VT 046. 15P.
- Mikkelsen, R., 2010.** Soil and fertilizer magnesium. Better Crops. 94:26–28.
- Morard, P., Garcia, M., 1977.** La salinite due au chlorure de sodium et les vegetaux superieurs. Fruits, 32(4), pp.263-267.
- Morard.P., 1995.** Les cultures végétales hors sol. Pub.Agri.Paris.301P
- Morris, R., Devitt, D., 1991.** "Sampling and interpretation of landscape irrigation water." University of Nevada, Reno, USA. Fact Sheet : 02-91.
- Moughli L., 2000.** Les engrais minéraux Caractéristiques et Utilisations. Bulletin mensuel d'information et de liaison du pnnta, Transfert de Technologie en Agriculture MADREF/DERD.4p

References Bibliographiques

- Munns, R., Greenway, H., & Kirst, G. O., 1983.** Halotolerant Eukaryotes. *Physiological Plant Ecology III*, 59–135.
- Munns, R., Rawson, H.M., 1999.** Effect of salinity on salt accumulation and reproductive development in the apical meristem of wheat and barley. *Functional Plant Biology*, 26(5), pp.459-464.
- Naz, M., Dai, Z., Tariq, M., Raza, M.A., Qi, S., Sun, Y., Shi, X. and Du, D., 2022.** Role of NRAMP transporters for Fe, mineral uptake, and accumulation in rice and other plants. In *Metals Metalloids Soil Plant Water Systems* (pp. 331-348). Academic Press.
- Negrão, S., Schmöckel, S. M., & Tester, M., 2016.** Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. *Annals of Botany*, 119(1), 1–11.
- N'Diaye, A.D., Kankou, M.O., Sarr, A.D. and Lo, B., 2010.** Suivi de la qualité des effluents de la ville de Nouakchott irrigués au niveau du périmètre maraîcher de Sebka. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(4).
- Palmer, C., 1911.** The geochemical interpretation of water analyses. U. S. Geol Survey Bul. 479.
- PAN., 2020.** Les enjeux d'une bonne gestion agronomique de l'azote. Programme d'actions nitrates. France.
- Pearman I., Thomas S. M., Thorne G. N., 1978.** Effect of nitrogen fertilizer on growth and yield of semi-dwarf and tall varieties of winter wheat. *The Journal of Agricultural Science*, 91(1), 31–
- Piron D., 2020.** Manque de soufre : les cultures en souffrent-elles ? , *Bulletin Sol et Agronomie des Chambres d'agriculture des Pays de la Loire*.2p.
- Prado RM, Natale W, Rozane D. E., 2007.** Soil liming effects on the development and the nutritional status of the carambola tree and its fruit yielding capacity. *Commun Soil Sci Plant Anal.*; 38:493–511.
- Prado RM., 2021.** Mineral nutrition of tropical plants. Springer Nature.
- Redondo-Gomez S., Wharmby C., Castillo J.M., Mateos-Naranjo E., Luque C.J., de Cires A., Luque T., Davy A.J., Figueroa M.E., 2006.** Growth and photosynthetic responses to salinity in an extreme halophyte, *Sarcocornia fruticosa*. *Physiol. Plant.* 128: 116-124.
- Reid, K., 2006.** "Carences en oligo-éléments dans le blé d'automne." <http://www.omafra.gov.on.ca> Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales, Toronto, Ontario Canada.

References Bibliographiques

- Rengasamy P., 1987.** Importance of calcium in irrigation with saline-sodic water. A viewpoint. *Agricultural water management* 12,3: 207-219.
- Richards L. A., 1954.** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agric.Handbook* 60, USDA, Washington D.C. 160 p.
- Risikesh T., 2018.** Management and utilization of saline water in Agriculture. college of agriculture, Balaghat jawaharlal nehru krishi vishwa vidyalaya, Jabalpur, 4P.
- Robert M., 1992.** Le sol, une ressource naturelle à préserver pour la production et l'environnement. *Cahier Agriculture*, 1: 20-34.
- Robert M., 1996.** Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Masson, Paris, p.241.
- Ryan J., Ibriki H., Sommer R., McNeill A., 2009.** Nitrogen in rainfed and irrigated cropping systems in the Mediterranean region. *Advances in Agronomy*, 104: 53-136.
- Salhi N., Douaoui A., Akkacha A., Bourrie G., Trolard F., 2023.** Influence de l'évaporation sur la qualité géochimique des eaux d'irrigation de la plaine semi-aride du Bas-Chélif. INRA.Poster.
- Shaikh F., Gul B., LI W.Q., LIU X., Khan M. A., 2007.** Effect of calcium and light on the germination of *Urochondra setulosa* under different salt. *Journal of Zhejiang univ. sci.* B. 8, (1), 20-26.
- Slama F., 2004.** La salinité et la production végétales. Centre de publication universitaire. Tunis. 163P.
- Snoussi S.A, Halitim A., 1998.** Valorisation des eaux salines pour la nutrition minérale des plantes cultivées : cas de la tomate et du haricot. *EGS.* 5, 4, 289 – 298.
- Snoussi S.A., 2000.** Valorisation des eaux salines pour la nutrition minérale des plantes cultivées. En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat d'état en sciences agronomiques. Institut National Agronomique, Alger.152p.
- Suarez, D. L., Jurinak, J. J., 2011.** The Chemistry of Salt-Affected Soils and Waters. *Agricultural Salinity Assessment and Management*, 57–88.
- Szabolcs I, Fink J., 1974.** Salt affected soils in Europe. The Hague: Martinus Nijhoff.
- Tahraoui S., 2016.** Effet des sels solubles sur la production de la biomasse et l'absorption des éléments minéraux chez l'orge (*Hordium vulgare*) et le blé dur (*Triticum durum*). En vue de l'obtention du diplôme de Magister en sciences agronomiques. Université Mohamed Khider Biskra.103p.

References Bibliographiques

- Tanji, K. K., & Kielen, N. C. (2002).** Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid Areas, Irrigation and Drainage Paper 61, FAO, Rome.
- Tavili A., Biniiaz M., 2009** Different salts effects on the germination of *Hordeum vulgare* and *Hordeum bulbosum*. Pakistan journal of nutrition 8, (1), 63-68.
- Umali DL, 1993.** Irrigation-induced salinity. A growing problem for development and the environment. World Bank technical paper 215, p.78.
- Van Hoorn J.W., 2001** Salinity control. Course on land and water management. IAM, Bari.
- Van Schre~en D. A., 1965.** Quelques aspects microbiologiques du cycle de l'azote dans le sol. Anns Inst. Pasteur, Paris, Suppl. au No. 3, 19-49.
- Vargas, R., Pankova, E.I., Balyuk, S.A., Krasilnikov, P.V., Khasankhanova, G.M., 2018.** Handbook for saline soil management.
- Wicke, B., Smeets, E., Dornburg, V., Vashev, B., Gaiser, T., Turkenburg, W. and Faaij, A., 2011.** The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. Energy & Environmental Science, 4(8), pp.2669-2681.
- Yash P. K., 1998.** Reference Methods for Plant Analysis. Handbook. Soil and Plant Analysis Council, Inc. 286P.
- Zeghdoud H., 2015.** Effet de la correction chimique de la qualité des eaux d'irrigation sur le sol et le végétal. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en agronomie. Université Mohamed Khider Biskra.48p.
- Zhong H., Läuchli A., 1993.** Spatial and temporal aspects of growth in the primary root of cotton seedlings: Effects of NaCl and CaCl₂. Journal of experimental botany 4, (44), 763-771.
- Znati A., 2009.** Une bonne gestion de l'utilisation des nutriments réduit les effets nocifs de la salinité sur les plantes. Engrais arabes 54, 36-37. (En arabe)
- Zuang H., 1982.** Fertilisation des cultures sur substrat. Ed. CTIFL. Paris p287-290