

Institut National Agronomique
Diplôme de Magister en Sciences Agronomiques
Option: Science du Sol

***EVOLUTION DE LA SALINITE DES SOLS
IRRIGUES DANS UNE REGION
SAHARIENNE.***

Présentée par :
ZIZA Fatima – Zohra
Mr Daoud Y. Professeur Directeur de thèse
22/10/2006

Devant le jury composé de : Mr Djili K. Professeur Président du jury Mr Dridi B. Maître de
conférence Examineur Mme Kourgli N. Chargée de cours Examinatrice

Table des matières

..	1
Remerciements . .	3
Résumé .	5
Summary . .	7
ص-خ-ل-م .	9
INTRODUCTION .	11
CHAPITRE I : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE .	13
1. Importance de la salinisation secondaire des sols. .	13
2. Le problème de la salinisation des terres irriguées au Sahara .	14
3. Qualité des eaux d'irrigation .	16
4. La tolérance des plantes à la salinité .	18
Conclusion . .	19
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES D'ETUDE . .	21
1. Présentation de la zone d'étude .	21
1.1. Le climat .	21
1.2. Hydrogéologie . .	23
1.3. La géomorphologie .	24
1.4. Les de sols . .	24
1.5. L'agriculture dans la région de Adrar . .	24
2. MATERIEL D'ETUDE . .	25
2.1. Les parcelles étudiées .	25
2.2. les eaux d'irrigation .	25
2.3. Le végétal .	26
3. MéthodeS d'étude . .	26
3.1. Le sol .	27
3.2. L'eau d'irrigation . .	30

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION .	33
1. Composition chimique des eaux d'irrigation . .	33
1.2. Les risques liés à la Salinité (CE dS/m à 25° C) . .	34
1.3. Les risques liés à la sodicité (SAR) . .	34
1.4. Les risques liés au carbonate de sodium résiduel (RCS) .	36
1.5. Les risques liés à la toxicité spécifique de certains ions en solution .	36
1.6. Détermination du faciès géochimique des eaux de la nappe albienne .	37
1.7. La fraction de lixiviation . .	38
Conclusion . .	39
2. Variabilité spatiale et méthode d'échantillonnage . .	39
2. 1. La variabilité spatiale .	40
2.2. la variabilité verticale .	40
Conclusion . .	41
2.3. Méthode d'échantillonnage des trois sites d'étude . .	41
3. Caractérisation de quelques paramètres chimiques et physiques du sol témoin .	42
3.1. Caractéristiques chimiques . .	42
3.2. Description du profil . .	43
4. Evolution de la salinité à l'échelle d'une campagne agricole dans le Site 1 . .	43
4.1. Etat Initial : Stade tallage . .	44
Conclusion . .	47
4.2. Etat final : Stade maturation .	47
Conclusion . .	50
4.3. Comparaison entre l'Etat initial et l'Etat final . .	51
4.4. Corrélation entre la conductivité électrique et les éléments en solution .	53
Conclusion . .	53
5. Evolution de la salinité à l'échelle d'une campagne agricole dans le Site 2 . .	54
5.1. Etat Initial : Stade tallage . .	54
Conclusion . .	58
5.2. Etat Final : Stade maturation . .	58

5.3. Comparaison entre l'Etat initial et l'Etat final de l'horizon 1 .	61
5. 4. Corrélation entre la conductivité électrique et les éléments en solution .	63
5.5. Mesure de l'humidité dans le sol entre deux irrigations . .	64
Conclusion . .	65
6. Evolution de la salinité à l'échelle d'une campagne agricole dans le Site 3 . .	65
6.1. Etat initial : Stade tallage . .	66
Conclusion . .	70
6.2. Etat Final : Stade maturation . .	70
6.3. Comparaison des moyennes entre l'Etat initial et l'Etat final . .	73
Conclusion . .	76
6.4. Corrélation entre la conductivité électrique et les éléments en solution .	76
Conclusion . .	76
7. Comparaison des 3 sites étudiés .	77
7.1. Etat initial : Stade tallage . .	77
7.2. Etat final : Stade maturation .	83
8. Discussion . .	89
8. 1. Evaluation de l'état de salinité des sols .	89
8. 2. Evolution des paramètres de la salinité dans les sols . .	93
8.3. La vitesse de salinisation des sols . .	96
8. 4. Facteur de concentration de l'eau d'irrigation .	97
8.5. Variabilité spatiale .	98
8. 6. L'effet de la salinité sur la diminution des rendements du blé .	99
CONCLUSION GENERALE .	105
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .	109

DEDICACES A ma famille A mes Professeurs, Mr Daoud, Y. et Mr Djili, K. qui par leurs actes ont toujours donné au travail sa valeur de vertu. Sincèrement Fatima

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un projet MESRS II dont l'intitulé est : « Caractérisation et gestion de la salinité dans les périmètres irrigués dans une région Saharienne cas de la région d'Adrar », financé par le Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche Scientifique.

Cette thèse a vu le jour grâce à l'aide, aux encouragements et au soutien indéfectible de Monsieur Daoud Y., qui a encadré ce travail, Professeur en Sciences du Sol au laboratoire de Pédologie à l'Institut National Agronomique. La clarté de ses enseignements, la rigueur dans le travail, les conseils judicieux et enrichissants et la remise en question des concepts simples mais compliqués à la fois m'ont beaucoup éclairé et animé en moi la volonté de continuer sur cette voie passionnante de la recherche.

Permettez-moi, Monsieur Daoud Y, de vous exprimer mon profond respect et de vous dire tout simplement merci.

J'exprime mes vifs et sincères remerciements, mon profond respect et ma reconnaissance à Monsieur Djili K., Professeur en Sciences du Sol au département de Pédologie à l'INA, pour avoir accepté de présider le jury et aussi pour son amabilité, ses encouragements, sa disponibilité, et ses conseils judicieux qui m'ont beaucoup éclairés pour le traitement statistique des données.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury, Madame Kourougli Feknous N., chargée de cours au département de Pédologie à l'INA et Monsieur Dridi B., Maître de conférence au département de Pédologie à l'INA d'avoir accepté d'examiner ce travail et aussi pour leur amabilité et leurs encouragements.

Je tiens aussi à remercier infiniment Laboudi. A., Chercheur INRAA à la station expérimentale de Adrar pour son aide déterminante, sa gentillesse et sa disponibilité.

Merci à Bradai Rachid et Zouahra Ali, membres de l'équipe technique du projet de m'avoir aidé à réaliser l'échantillonnage sur le terrain.

Mes sincères remerciements s'adressent aussi à Bacha Fadila, Terranti Salima, Sedrati Sabiha, Rahal Hafida et Djidda Hamid pour leurs encouragements, leur aide et surtout leur soutien morale.

Je m'en voudrai d'oublier de remercier sincèrement Melle Larbi Fatouma, Mme Oukil Zahia bibliothécaires pour leur disponibilité et leur gentillesse; et Mr Saidi said du département de la poste graduation pour son aide et sa gentillesse.

Résumé

L'extension du phénomène de la salinisation des terres sahariennes limite considérablement la durabilité des systèmes de production céréaliers irrigués sous pivot.

L'objectif principal de ce travail est de faire une analyse qualitative et quantitative de l'état de salinité des sols irrigués par pivot depuis quelques années. Pour cela, trois périmètres irrigués respectivement depuis 2, 3 et 4 années sont étudiés et comparés par rapport au sol témoin non irrigué. Pour chaque parcelle, l'évolution de la salinité est étudiée entre deux périodes du cycle végétatif du blé, l'état initial correspond au stade tallage, et l'état final correspond au stade maturation ; l'irrigation se fait par aspersion avec une eau de la nappe albienne.

Les résultats relatifs aux caractéristiques chimiques des eaux d'irrigation mettent en évidence une forte salinité et un faible danger de sodicité, les teneurs en sodium et en chlorures contenues dans ces eaux sont excessives en mode d'irrigation par aspersion.

L'évolution de la salinité dans le temps et à l'échelle d'une campagne agricole est hautement significative à partir de la quatrième année. En effet, la salinité passe de 2.55 dS/m dans le site témoin classé peu salé à 12.5 dS/m dans le site cultivé pour la quatrième année classé très salé ; cette teneur en sels solubles correspond à un facteur de concentration de l'eau d'irrigation égale à 7.5 dans l'horizon de surface et 6 dans l'horizon de sub-surface. De même que la vitesse de salinisation des sols est variable en fonction du nombre d'années, elle est importante après 4 années d'irrigation.

L'analyse de la solution du sol dans les trois sites enregistre un enrichissement de la solution du sol en sodium, en sulfates et en chlorures, ce qui constitue les sels de la série neutre. Les teneurs élevées de ces ions engendreraient des phénomènes d'antagonismes et de déséquilibres ioniques importants.

Le faciès géochimique au niveau des trois sites est : Sulfaté-sodique, Sulfaté-mixte et mixte-calcique. Les valeurs du SAR obtenues sont faibles et sont inférieures à 10.

A l'effet salinité s'ajoute l'effet du déficit hydrique, En effet, des mesures des profils hydriques au stade maturation enregistrent un déficit hydrique permanent.

La pratique empirique actuelle des irrigations par pivot avec une eau minéralisée et sous un climat Saharien très évaporant engendre dès la quatrième année, une salinisation secondaire suffisante pour affecter le rendement du blé dur.

Mots clés : Salinisation, irrigation, céréales, Sahara

Summary

The extension of the phenomenon of the salinization in the earths to Sahara limit considerably the durability of the systems of production wheat irrigated under pivot. The main objective of this work is to make a qualitative and quantitative analysis of the state of saltiness of soils irrigated by pivot since some years. To this effect, three parcels irrigated respectively since 2, 3 and 4 years are studied. For every parcel, the evolution of the saltiness is studied between two periods of the vegetative cycle of wheat, the initial state corresponds to the stage tallage, and the final state corresponds to the stage maturation.

The relative results to the chemical features of the waters of irrigation of the tablecloth albiennaise put in evidence a strong saltiness and a weak danger of sodicité, the contents in sodium and in chlorides contained in these waters are excessive in fashion of irrigation by aspersion.

The evolution of the saltiness in the time and to the scale of an agricultural country is meaningful from the fourth year, at the end of country.

Indeed, the saltiness passes 2.55 dS/m in the site witness to 12.5 dS/m in the site cultivated for the fourth year. This content passes the doorstep of tolerance extensively to the saltiness of the hard wheat. The analysis of the soil solution in the three sites records an enrichment of the soil solution in sodium, in chlorides and in sulphates what generates phenomena of antagonisms and ionic unbalance importing an ionic unbalance.

To the effect saltiness the effect is added stress moisture ; indeed, the measures of the moisture profiles to the stage maturation record a moisture deficit permanent

The present empiric practice of the irrigations by pivot with a mineralized water and under a climate Of the Sahara very evaporating generates dice the fourth year, a sufficient secondary salinization to affect the output of the hard wheat.

Key words: Salinization, irrigation, wheat, Sahara

ص-خ-لم

بورا، بالإضافة إلى فترة الفراش، تسبب لزيادة الإنتاجية من جودة سلالم الإنتاج الخالص (الحجر الجيري والجبس) من صخور.

الهدف الرئيسي لهذا العمل هو إجراء تحليل كمي و كيفي لعنقبة التلويحة في الأراضى المنسقية بقرى المحوري .

الهدف الرئيسي لهذا العمل هو إجراء تحليل كمي و كلفي لعنقبة التلويحة في الأراضى المنسقية عن طريق القرى المحوري منذ عهد سنوات.

ولأن تلك مساحات مرمية بالتشكيل منذ القرن ثلاث و أربع سنوات، تمت حولها مساحة مازودة مع قطعة أرض من مساحة غير مرمية

بالنسبة لكل قطعة أرض، تمت متابعة تطور التلويحة على مرحلتين من خلال فترات التلويح حيث أن المرحلة الأولى خصت بتطور فراغات و لها أهمية منها فكانت في مرحلة التلويح، يتم السقي بالطريقة المحورية و باستخدام المياه الجوفية.

تمت النتائج الخاصة بالتحديد الكمي لآثار التلويح على وجود نسبة تلويحة كبيرة و خطر تدمير توازن التربة بصفة مرفقة، حيث أن نتائج و نتائج التطوير التي تحتوي على الماء في تربة الأراضى المنسقية لتتدرج السقي المحوري.

تطور التلويحة مع مرور الوقت و على مستوى دورة زراعية يتخذ إنتاجاً متعاقباً يبدأ من السنة 13 في الموقع المتأخر قليل التلويحة إلى 19-22 في الأجزاء و بالتالي فإن التلويحة انتقلت من في موقع كل يوم السنة الرابعة (الذي يعتبر تربة التلويحة) كما تميزت في الإنتاج قابلية (SS) على مستوى الفترة المنسقية من 6 تقديرات يوضح المر شعور فركيز في ماء قلبي يتأخر على مستوى ما فوق السطح الأرضي و إلى

علاوة على ذلك فإن سرعة التلويح في الأجزاء المنسقية عند فترات الإنتاج المتتالية بعد أربع سنوات من السقي.

تتأثر سنوات التربة في المواقع الثلاثة سلبت إيجاباً لتحتوي تربة من حيث الأسموية، الصفات و كذا التلويح، و هي تتسبب الإنتاج المتعدد .

النتيجة المترتبة لهذه الأبحاث قد تؤدي إلى ظهور اختلافات في التوزيع و اختلافات في التفاعلات الأيونية.

التركيب الكيماوي على مستوى المواقع الثلاثة كالتالي : سلفات الصوديوم، سلفات الصوديوم و سلفات الصوديوم (10.) - المحتصن عليها صميقة و دون الأميرة (64.7%) في ()

يضاف إلى ذلك تلويحة عميق آخر وهو نقص في تربة، بالذات في الأجزاء حول توازن المياه في مرحلة التلويح، قد سببت قلة ذلك التربة.

إن تطبيق النتائج على السقي المحوري، بواسطة مياه جوفية، و هي تربة منسقية مع سقي محوري يفسر شدة التلويح، يؤدي بداية من السنة الرابعة إلى ظهور تلويحة ثانية كافية لتلويح سلباً على مرمية السقي المنسقية.

المصطلحات الخاصة:

التلويح - السقي - التلويحة

INTRODUCTION

La salinisation des sols constitue un problème qui menace l'équilibre de l'environnement à différentes échelles, de la cellule végétale jusqu'à l'écosystème (Dutuit et Pourrat, 1994). Ce phénomène est très répandu dans tous les continents (Cheverry et Robert, 1998), en particulier dans les zones arides et semi-arides (Villa-Castorena *et al.*, 2003). Ces dernières représentent 40 à 50 % de la surface dans le monde (Palta, 2005). En effet, certains travaux estiment que plus de 6,5% des terres, soit 9 millions de km², sont déjà affectés par la salinité, et que plus de la moitié des terres irriguées est salée (Cheverry et Bourrié, 1998). Dans le pourtour méditerranéen, 80 millions d'hectares de terres seraient affectés par la salinité de différentes natures et à différents degrés (Hamdy *et al.*, 1995).

En Algérie, les facteurs qui contribuent à l'extension du phénomène de salinisation des terres sont liés à l'aridité du climat qui porte sur plus de 95 % du territoire, la qualité médiocre des eaux d'irrigation, le système de drainage souvent inexistant ou non fonctionnel, et la conduite empirique des irrigations (Daoud et Halitim, 1994 ; Djili *et al.*, 2003 ; Saidi, 2004).

Par ailleurs, le développement de la céréaliculture dans les zones sahariennes a été lancé au début des années quatre vingt. Son objectif est d'augmenter la production céréalière dont les niveaux de rendement en agriculture pluviale sont faibles dans le Nord du pays.

Dans ces zones Sahariennes, le sol présente un faible niveau de fertilité, les réserves hydriques sont importantes, non renouvelables et diversement minéralisées, et les besoins en eau des cultures sont élevés à cause d'une forte demande climatique (Daoud

et Halitim, 1994). Laboudi (2001) montre que dans la région d'Adrar, l'évapotranspiration maximale d'une culture de blé est de l'ordre 960 mm par cycle végétatif. Les céréales, qui constituent la culture principale dans les nouveaux périmètres, sont considérées comme modérément tolérantes à la salinité (FAO, 1987), se développent bien dans les sols à texture sableuse (Callot *et al.*, 1982).

Cette expérience de mise en valeur des terres n'a pas abouti aux résultats escomptés et se trouve confrontée à de nombreux problèmes qui affecte la production agricole (Djili *et al.*, 2003). Ces derniers sont directement liés à l'itinéraire technique qui n'est pas maîtrisé. En effet, les facteurs qui limitent les rendements se traduisent par l'effet conjugué d'un ensemble de facteurs :

La pratique de la fertilisation qui n'est pas toujours appropriée au contexte saharien (forme, mode d'apport et dose), la technique et la rationalisation de la conduite de l'irrigation, la date du semis, le choix des variétés, la qualité des semences et le développement des mauvaises herbes.

Cependant, le principal effet enregistré est la salinisation secondaire des sols suite à l'effet cumulé des irrigations avec des eaux minéralisées. En effet, dans la région Nord du Sahara à Gassi-touil, des accumulations importantes en sels solubles dans l'horizon de surface ont été enregistrées après seulement 5 campagnes, ayant pour conséquence des chutes de rendements remarquables (Ziza, 1992).

Le présent travail, consiste à évaluer l'état de salinité des sols cultivés en céréales dans 3 périmètres de la région d'Adrar. Ces périmètres sont mis en culture et irrigués depuis respectivement 2 , 3 et 4 années. Ils sont situés sur le plateau de Ba-amar à environ 60 km au sud de Adrar.

Le principal objectif de ce travail, consiste à évaluer le niveau de salinité atteint dans les sols en fonction du nombre d'années d'irrigation et sa contribution éventuelle dans la diminution des rendements du blé.

Ce travail est structuré en trois parties :

- le premier chapitre porte sur une analyse bibliographique relative à la salinisation des sols irrigués par des eaux diversement minéralisées, et aux conséquences sur le comportement du végétal,
- le second chapitre présente le matériel et les méthodes d'étude,
- le troisième chapitre fera l'objet de la présentation des résultats et des discussions.

CHAPITRE I : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Importance de la salinisation secondaire des sols.

L'extension du phénomène de la salinisation des terres agricoles résulte de la non maîtrise des irrigations avec des eaux salées sous un climat évaporant et sans un système de drainage (Servant, 1978). Ceci se traduit par l'effet cumulé des sels apportés dans le sol à chaque irrigation. La culture prélève dans le sol ses besoins en eau en laissant une solution très concentrée en sel. Cette concentration sera encore très importante par l'irrigation suivante dans la surface du sol et dans la zone racinaire, avec pour conséquences une transformation profonde des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

Les symptômes visibles produit par un stress salin sont très semblables a ceux produit par un stress hydrique. La sécheresse et la salinité sont deux processus qui favorisent un déficit hydrique et une diminution des rendements et, à terme la stérilité des sols (Servant, 1978 ; Bonilla *et al.*, 2004).

Chaque année, 10 millions d'hectares de terres cultivées sont abandonnées en raison de l'accumulation de sels par l'irrigation (Szabolcs, 1994). Selon Hans (2003)

l'extension du phénomène de salinisation des sols dans le monde a atteint près de 7 % soit 920 millions d'hectares de terres irrigués dans le monde sont significativement affectés par la salinité.

Le tableau I révèle que le pourcentage dans le monde des terres atteintes par la salinité, est significatif, il varie d'un minimum de 8.8 à 16.6 % entre l'Australie et l'Inde respectivement et d'un maximum de 30 à 33 % en Egypte et en Iran.

Le tableau I. Le pourcentage des terres affectées par la salinité suite l'irrigation dans le monde

Pays	% de terres atteintes	Pays	% de terres atteintes
Chine	15	Pakistan	26.2
Inde	16.6	Iran	30.00
USA	23.0	Egypte	33.00
Australie	8.8	Thaïlande	10.0
Afrique du sud	8.9	Argentine	33.7

Dans les pays de la méditerranée, l'aridité du climat, le pouvoir évaporant de l'air très élevé, les pratiques agricoles, l'irrigation non contrôlée avec des eaux chargées en sels solubles, la texture fine, le mauvais drainage, constituent les principaux facteurs qui favorisent la salinisation des sols.

Le tableau II montre un pourcentage variant d'un minimum de 7 % en Grèce à un maximum de 30 – 40 % en Egypte, en Algérie 10 à 15 % des terres irriguées sont affectées par la salinisation secondaire.

Tableau II. Estimation du pourcentage des terres irriguées atteintes par la salinisation dans certains pays de la Méditerranée.

Pays	% de terres atteintes	Pays	% de terres atteintes
Algérie	10 - 15	Grèce	7
Chypre	25	Jordanie	16
Egypte	30 - 40	Maroc	10 - 15
Espagne	10 - 15	Portugal	10 - 15
Israël	13	Syrie	30 - 35

2. Le problème de la salinisation des terres irriguées au Sahara

Le développement de l'agriculture saharienne avec la création des périmètres irrigués s'est fait selon une logique de fonctionnement complètement opposée à celle du système oasien. En effet, ce dernier subsiste depuis un millénaire dans un système couvert, économe en eau et en énergie, protégé contre les agressions du climat, ce qui a assuré sa pérennité. En revanche, l'agriculture moderne se trouve dans un espace très loin des

oasis, exposée au vent et par conséquent à l'érosion éolienne, utilisant d'une manière très onéreuse les ressources en eau souterraine et minéralisée sans capacité d'adaptation (Chalet, 1999). Dans un environnement aussi sévère, la production agricole en l'occurrence la céréaliculture est confrontée à de nombreux problèmes qui limitent les rendements (Djili *et al.*, 2003).

Pour comprendre les causes de la diminution des rendements en céréales il est impératif d'analyser tous les paramètres qui interviennent dans l'itinéraire technique. Il ressort de l'enquête réalisée sur le terrain et des récentes études réalisées dans la région une insuffisance des connaissances scientifiques sur le milieu naturel dans le quel évolue l'agriculture saharienne principalement le sol et le climat (Daoud et Halitim, 1994 ; Djili *et al.*, 2003).

En effet, les exigences hydriques des cultures dépendent pour l'essentiel d'un facteur climatique dont la composante principale est l'évapotranspiration. En effet, la plante nécessite pour produire 1 g de matière sèche une quantité en eau qui varie entre 300 ml et 1000 ml qu'elle absorbe puis transpire, selon la demande climatique ; en phase finale, la plante n'en conserve que 5 %, le reste 95 % est rejeté dans l'atmosphère (Fardeau et Stengel, 1998).

Une évaluation empirique montre que l'évapotranspiration d'une culture de blé est de 6000 m³ d'eau/ ha/an, pour le palmier dattier, elle est de 18 000 m³ d'eau ha/an (Daoud et Halitim, 1994 ; Dubost, 1992).

Au Sahara, la non maîtrise de la conduite des irrigations sous pivot se traduit par un gaspillage d'eau important au début du cycle végétatif (Mouhouche, 2000) et un déficit d'eau important dans l'horizon de surface au mois mars - avril ; avec une perte en eau de 30 % du volume d'arrosage par évaporation de l'eau avant son arrivée au sol a été enregistrée (Attalah, 2000).

Dans la région d'Adrar, l'eau d'irrigation de la nappe albienne est relativement moins salée, sa conductivité électrique est inférieure à 2 g/l, en revanche, celle mesurée au Nord du Sahara dans la région de Gassi-touil, varie en moyenne de 6 à 8 g/l. Les teneurs en chlorures et en sodium sont excessives et dépassent la limite tolérée en irrigation par aspersion.

Par ailleurs, dans la région d'Adrar, le mauvais choix des sites constitue une contrainte à l'opération de mise en valeur. La réalisation des forages et l'installation des pivots qui nécessitent des moyens financiers considérables se font sur des sols sans aucune étude pédologique et hydrogéologique précise ; alors que le choix du sol est une opération judicieuse et constitue un préalable au succès d'un projet de mise en valeur. En effet, dans certains cas la profondeur du sol n'excède pas 15 centimètres, c'est le cas de Tsabit au Nord de Adrar où il y a salinisation des sols dus à la présence d'une nappe salée à faible profondeur induite par l'irrigation en absence du drainage.

Aussi une présence d'une importante charge caillouteuse en surface est enregistrée et dans tout le profil. Ce qui peut constituer d'une part un obstacle à la croissance racinaire et d'autre part l'usure du matériel mécanique agricole.

Dans le même sens, le travail du sol se fait au chisel, car il permet d'ameublir le sol

en profondeur, d'éliminer les repousses du blé, et de faciliter la lixiviation des sels. Il est déconseillé d'effectuer le labour à la charrue à soc, car elle aurait pour effet de remonter les sels ainsi que les pierres en surface.

D'autre part, la pratique de la fertilisation n'est pas toujours appropriée aux conditions édaphiques du milieu saharien. En effet, l'azote est appliqué sous forme d'urée. Or des études ont montré que dans des conditions édaphiques similaire à ceux de Adrar caractérisées par des températures élevées, pH alcalin et une capacité d'échange cationique limitée, l'utilisation de l'urée est inappropriée; car il y a une perte de 90% d'azote sous forme ammoniacal (N'diaye et Guindo, 1998).

La fertilisation phosphorique n'est pas maîtrisée dans toutes ses formes (mode d'apport, dose d'application, forme).

La fertilisation potassique est pratiquement inexistante. Les sols sahariens sont en majorité bien pourvus en potassium échangeable, mais la mise en culture de ces sols entraîne forcément une diminution des teneurs existantes d'une part par les prélèvements de la culture et d'autre part leurs perte par la lixiviation.

Aussi, la date de semis est un paramètre qui conditionne l'obtention de bon rendement car, un semi-tardif conduit à des températures élevées en fin du cycle durant la formation du grain provoquant l'échaudage et donne de petits grains ridés.

En raison d'une mauvaise purification des semences, le développement des mauvaises herbes envahissent le terrain et concurrencent la plante, c'est le cas de la folle avoine et le brome observé sur les parcelles cultivées en céréales et en fourrages. Le brome est un adventice de la famille des graminées caractérisée par un enracinement profond et vigoureux, qui envahissent les périmètres irrigués, phénomène très répandu et qui constitue parfois l'une des causes de l'abandon du site.

Enfin, l'insuffisance de la maîtrise technique de la céréaliculture irriguée à Adrar limite les rendements. Le tableau III montrent les données des rendements en céréales obtenues sur 3 années, et qui sont inférieurs à 30 q/ha.

	Année 1999		Année 2000		Année 2001	
	Superficie (ha)	Rendements (q/ha)	Superficie (ha)	Rendements (q/ha)	Superficie (ha)	Rendements (q/ha)
Blé dur	2.482	28	2.468	29	1.838	28
Blé tendre	678	30	744	30	1.645	30
Orge	800	30	136	18	-	-

Tableau III. Les rendements obtenus des céréales et des fourrages irrigués sous Pivot.

3. Qualité des eaux d'irrigation

L'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation n'est pas une fin en soi, elle est très spécifique aux conditions pédoclimatiques et aux pratiques agricoles de la zone. C'est pourquoi il existe de nombreuses classifications dans le monde.

D'après Rhoades (1990a) in Ghassemi *et al* (1995), les différentes classifications proposées sont essentiellement empiriques. Il cite l'exemple de l'utilisation d'une eau saumâtre pour l'irrigation qui a été classée comme inutilisable pour les plantes, a été utilisée avec succès dans d'autres régions sous différentes conditions climatiques et pour différents types de cultures.

Selon de nombreux auteurs (USSL, 1954 ; Ayers et Wscot, 1994 ; Ghassemi *et al.*, 1995), le principal critère pour l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation est la concentration totale en sels solubles, car la réponse de la majorité des plantes à la salinité est évaluée par la salinité globale plutôt que par l'action spécifique de chaque ion.

Néanmoins, pour toutes les classifications, les paramètres chimiques à prendre en considération pour voir si une eau est de qualité acceptable sont :

- la conductivité électrique qui traduit la concentration totale des sels solubles dans l'eau d'irrigation,
- la sodicité (SAR) qui traduit la proportion du sodium adsorbé sur le complexe argilo-humique par rapport au calcium et au magnésium,
- les carbonates, les bicarbonates ainsi que les éléments toxiques (USSL, 1954 ; Ayers et Wescot, 1994 ; Ghassemi *et al.*, 1995).

Ces paramètres présentent un effet direct sur la plante et sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

La classification conventionnelle de USSL (1954) du laboratoire de Riverside de Californie modifiée par Durand serait plus adaptée pour l'Algérie.

En Algérie, les eaux d'irrigation sont plus ou moins chargées en sels solubles selon leurs origines. La salinité des eaux des nappes phréatiques au Sahara est variable dans l'espace, elle se détériore du Sud vers le Nord à cause du changement dans la lithologie de l'aquifère (Daoud et Halitim, 1994). Ce sont des eaux riches en chlorures, en sodium et en sulfates.

Le faciès chimique selon la classification de Servant (1978) est chloruré-sulfaté, chlorurés, sulfaté-chloruré. Ces éléments sont susceptibles d'une part de se concentrer dans la zone racinaire lors de l'évaporation et de créer un milieu toxique pour la plante et d'autre part lors de l'irrigation par aspersion, ces éléments après évapotranspiration se concentrent au niveau des feuilles ce qui provoquent leurs brûlures (Ayers et wescot, 1994).

D'autre part, les conséquences de l'utilisation d'une eau salée ou non sont évaluées sur les modifications des propriétés physiques d'un sol en tenant compte de la nature et du pourcentage de l'argile. En effet, Bertrand *et al.* (1994) ont montré que des irrigations avec des eaux très peu minéralisées conduisent à une salinisation des sols. Le cas des eaux du grand fleuve de sud Saharien du Niger est édifiant, car il s'agit d'une eau très peu minéralisée avec

une CE inférieur à 0.1 ds/m, mais présente un déséquilibre ionique dominé par l'ion sodium. Lors des évaporations, cette eau se concentre avec un accroissement des concentrations en sodium. Ceci se traduit par une dégradation rapide de la structure des

sols. En revanche, l'utilisation d'une eau salée mais contenant une forte proportion en calcium par rapport au sodium est recommandée en assurant le drainage, car dans ces conditions, l'ion calcium remplacera l'ion sodium par phénomène d'échange (Duhaufour, 1983 ; Bertrand *et al.*, 1994).

Les critères d'évaluation de la qualité d'une eau d'irrigation (tableau IV) sont établis en fonction de la tolérance de la culture, de son stade de développement, du type de sol, du mode d'irrigation et des conditions climatiques (USSSL, 1954)

Tableau IV. Critères d'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation (USSSL, 1954)

Danger de Salinité (CE en dS/m)	Danger d'alcalinité (SAR)
Faible < 0.25	< 10
Moyenne 0.25 à 0.75	10 à 18
Forte 0.75 à 2.25	18 à 26
Très forte > 2.25	> 26

D'autre part, les travaux de Leland *et al* (1994) ont montré clairement qu'une eau d'irrigation de bonne qualité n'est pas utilisée durant tout le cycle végétatif de la plante, les plantes sensibles sont irriguées avec une eau non ou peu salée et les plantes tolérantes aux sels sont cultivées en rotation et irriguées avec une eau salée. Cette technique est utilisée dans de nombreux pays et elle permet de limiter et de préserver l'utilisation des ressources hydriques de bonne qualité.

Dans le même sens, des expériences ont été réalisées au moyen orient, en Chine, au Pakistan et en Egypte où l'utilisation des eaux de drainage pour l'irrigation présente une alternative très intéressante pour palier au manque d'eau (Hamdy *et al.*, 1995).

4. La tolérance des plantes à la salinité

La tolérance de la plante à la salinité est définie comme étant sa capacité à accumuler des ions pour ajuster sa pression osmotique interne par rapport au milieu extérieur sans préjudices. A partir d'un certain seuil, qui dépasse la tolérance de la plante, celle-ci va dépenser de l'énergie à faire face au stress salin plutôt qu'à la production de sa biomasse.

Les différentes stratégies que la plante adopte face au stress salin est l'accumulation d'ions tels que le sodium et les chlorures dans la vacuole pour assurer une pression interne importante et minimiser la cytotoxicité (Blumwald *et al.*, 2000). Cependant, une pression élevée de la vacuole, pourrait provoquer une succion importante du cytosol dont la déshydratation nuirait au fonctionnement du métabolisme en désorganisant la structure des protéines. La plante lutte contre ce phénomène par la synthèse et l'accumulation d'osmoprotecteur, comme la proline qui est reconnue comme indicatrice du stress salin, et la Béta- glycine. Ces composés par leurs concentrations assurent l'ajustement osmotique entre le cytosol et la vacuole (Ramos *et al.*, 2004 ; Zid et Grignon, 1991).

La tolérance des plantes à la salinité varie largement en fonction de l'influence

génétique et de l'influence du milieu édaphique : pH, aération, température, matières organiques les conditions climatiques (température, humidité, intensité de la lumière) et les techniques culturales (fertilisation, irrigation) (Zid et Grignon, 1991 ; Daoud et Halitim, 1994 ; Ghassemi *et al.*, 1995).

Il a été clairement démontré que le stade le plus sensible est le stade germination-levée, ceci s'explique par le fait que la graine a besoin d'eau pour humecter ses téguments. Une eau salée, diminue la disponibilité en eau pour la graine et facilite la pénétration des ions toxiques, ce qui nuit à la germination de la graine. Même les plantes les plus résistantes à la salinité, notamment les halophytes présentent une sensibilité au sel au stade germination levée (USSL, 1954 ; Debez, 2004). Toutefois, elles montrent une reprise de la germination lorsque les conditions de stress salin disparaissent (Alia et Abdelly, 2005).

En revanche, certaines espèces maintiennent leur capacité germinative jusqu'à plus de 30 g/l NaCl, notamment certaines chénopodiacées qui tolèrent une teneur de 48 g / l (Khan, 1998 in Atia et Abdelly, 2005).

Hamdy *et al.*, (1995) rapportent que la diminution des rendements d'une culture est attribuée à une forte teneur en sels solubles durant le stade germination levée qui aboutit à une mauvaise densité de peuplement et à une chute sensible des rendements plutôt qu'à un excès de sels dans le sol aux stades suivants.

Chez les céréales, l'effet dépressif du sel se manifeste à partir d'un seuil critique de concentration, caractéristique de l'espèce et de la variété (Cramer *et al.*, 1994). Le blé dur, est plus sensible à la salinité que le blé tendre et le stade germination levée ne doit pas dépasser une CE de 4 dS/m à 25 °C.

La culture du blé face au stress salin et hydrique réagit par tout le végétal, le rapport partie aérienne / partie racinaire diminue avec la fermeture des stomates pour réduire l'effet soif. Ce qui conduit à élever la température à l'intérieur du végétal car la fermeture des stomates réduit la transpiration (plante meurt de chaud) et si la photosynthèse est réduite, l'élongation racinaire est réduite.

Dans le même sens, pour une même concentration en sels solubles, l'effet de la salinité est accentué en climat sec et chaud plutôt qu'en climat frais et humide. En effet, les plantes sont moins résistantes à l'action du sel lorsque le potentiel de transpiration est élevé en climat sec et chaud, contrairement à un potentiel de transpiration faible en climat frais et humide (Ben-Ascher, 1994 ; Villa Castalen *et al.*, 2003).

Conclusion

L'extension de la salinité des sols prend des proportions alarmantes et conduit à la diminution de la production agricole et à long terme à la stérilité des sols. La gestion rationnelle des ressources en eau et en sols à grande échelle est nécessaire pour préserver la fertilité des sols et prévenir le phénomène de salinisation. La maîtrise du couple irrigation – drainage, l'introduction de techniques d'irrigation appropriées au

contexte saharien avec un choix judicieux des plantes résistantes à la salinité est primordiale pour une gestion rationnelle des ressources hydriques et édaphiques. Ce qui permet ainsi d'assurer la durabilité des systèmes de production agricole.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES D'ETUDE

1. Présentation de la zone d'étude

1.1. Le climat

Le Sahara Algérien qui couvre une superficie de l'ordre de 2 millions de km² entre les 18 ° et 35 ° de latitude Nord constitue un désert parmi les plus arides et les plus chauds du globe. L'aridité extrême est expliquée par des valeurs climatiques stables depuis quatre millénaires. Ce climat est la résultante d'un phénomène naturel de circulation de masse d'air, il s'agit d'un régime anticyclonique quasi permanent. Cette aridité constitue le facteur essentiel de la pédogenèse et distribution de la végétation.

Les précipitations

Les précipitations mensuelles présentent des valeurs très faibles dans la région de Adrar. Les précipitations moyennes annuelles de la période 1989 – 1996 sont de l'ordre de 10 mm (tableau V).

Les températures

Pour les mois les moins chauds de décembre à février, les températures moyennes oscillent entre 11 et 14°C. Pour les mois les plus chauds de Mai à Août, elles sont nettement plus élevées et varient en moyennes de 37 à 44 °C. L'amplitude thermique journalière est importante toute l'année. Elle varie de 11 à 20° C, elle est nettement plus marquée pendant les mois les plus chauds.

Mois	Température de l'air en °C			Précipitations en mm	Evaporation mm
	Moyenne	Maxima	Minima		
Janvier	11.70	19.21	4.18	0.71	193.1
Février	15.90	24.65	7.10	1.00	233.8
Mars	18.90	27.10	10.77	0.14	356
Avril	24.03	32.32	15.74	0.00	413.4
Mai	28.45	37.15	19.72	1.28	499.1
Juin	34.12	43.2	25.04	1.00	571.5
Juillet	36.10	44.75	27.45	0.00	655.8
Août	35.68	44.31	27.05	0.14	613.8
Septembre	32.43	40.37	24.5	2.14	499.8
Octobre	26.84	33.94	19.75	0.57	370
Novembre	18.50	25.90	11.11	1.00	253.8
Décembre	14.54	22.06	7.03	2.28	202

Tableau V. Données climatiques de la station de Adrar (1989 – 1996)

L'évaporation

L'évaporation mensuelle, mesurée par la méthode du Bac Colorado, est toujours supérieure aux précipitations. L'évaporation est intense en été à cause des températures très élevées.

Les vents

Les vents sahariens sont en relation directs avec les mécanismes climatiques généraux et les perturbations qui s'y développent. Les vents liés au champ barométrique général soufflent surtout le jour. Pendant la nuit, l'inversion des températures qui se produit dans les couches basses de l'atmosphère conduit à une plus grande stabilité. Dès le lever du jour, le rayonnement solaire les réchauffe à nouveau et permet une reprise des turbulences jusqu'au sol. La région de Adrar est très ventée, la vitesse du vent est souvent supérieure à 5 m/s toute l'année. Son effet est très défavorable pour l'agriculture du fait de l'augmentation de l'évapotranspiration et des dommages provoqués sur les cultures par l'ensablement. Les vents dominants ont une direction Nord-Est et Nord-Ouest.

L'humidité relative

L'humidité relative est caractérisée par une moyenne annuelle inférieure à 50 %. Les

valeurs minimales peuvent atteindre 25%, elles sont observées en juin- juillet ; les valeurs maximales sont observées au mois de janvier.

L'insolation

L'insolation atteint 3500 heures / an. La durée de l'insolation moyenne journalière est de 8 à 12 heures par jour selon les saisons. Elle excède 9 heures pendant au moins la moitié de l'année du mois d'avril au mois de septembre. Elle est maximale au mois de juillet avec 12 heures par jour, et elle est minimale au mois de janvier avec 8 heures par jour.

La synthèse climatique

Le climat de la région de Adrar est caractérisé par une sécheresse intense et permanente toute l'année, les précipitations moyennes mensuelles sont négligeables.

L'indice d'aridité De Martonne est calculé sur la base de deux paramètres climatiques, les précipitations annuelles (P en mm) et la température moyenne annuelle (T en °C). La formule de calcul est la suivante :

$A = P / T + 10 = 0.29$. Cette valeur de 0.29 est inférieure à 10, elle signifie que la région d'Adrar est caractérisée par un climat aride.

Le calcul du Quotient pluviométrique d'Emberger (1955) se calcul ainsi :

$$Q2 = 3.43 P / (M - m)$$

P : Précipitations annuelles total (mm)

M : Température maximale du mois le plus chaud

m : température minimale du mois le plus froid

$$Q2 = 3.43 (10.26) / 44.75 - 4.18 = 0.86$$

La valeur du quotient pluviométrique est de 0.86, classe la région de Adrar dans l'étage saharien doux.

En conclusion, la zone de Adrar est une zone de désert absolu, son climat aride à sécheresse stricte n'autorise aucune agriculture pluviale.

1.2. Hydrogéologie

La région d'Adrar renferme des eaux souterraines de la nappe Albienne. Ces eaux du continental intercalaire sont contenues dans les formations continentales du crétacé inférieur. C'est un aquifère fossile très volumineux, il s'étend sur plus de 600 000 Km², son épaisseur₃ est de plusieurs centaines de mètres avec un volume évalué à 60 000 milliards de m³ (Unesco, 1972). La profondeur du toit de l'aquifère augmente du Sud au Nord. Les affleurements apparaissent au pied des plateaux de Tadmait et de Tinther où la nappe est exploitée depuis longtemps par les foggaras de Gourara, du Touat et de Tidikelt (Dubost, 1992).

La nappe Albienne affleure dans la partie Sud et Sud-Ouest et plonge à plus de 1500 m vers le Nord –Est. La minéralisation des eaux de la nappe Albienne est variable, elle se

détérioré du Sud vers le Nord à cause des changements dans la lithologie de l'aquifère (Daoud et Halitim, 1994).

1.3. La géomorphologie

La région de Adrar se situe entre le plateau de Tadmaït à l'Est et la série de dépressions plus ou moins continues le long desquelles se localisent les Ksars et les palmeraies du Gourrara et du Touat. Il s'agit d'un plateau avec une pente très faible caractérisée par :

- des encroûtements gypso-calcaire dans les zones relativement basses. Les vestiges d'une croûte superficielle de calcaire complètement fragmenté, dans les zones hautes du plateau génèrent une charge de surface très grossière donnant un paysage de reg,
- des traces de sels et de gypse à travers les fissures des niveaux compacts (dalles gréso-calcaire) et dans les interstices de sables limoneux et les niveaux graveleux,
- des dépressions relativement humides qui semblent évoluer vers des sebkhas

1.4. Les sols

Les sols du Sahara sont caractérisés par leurs régimes hydriques de type aridique. Le climat sec favorise la formation de sols minéraux bruts d'ablation en position topographique haute avec une concentration d'éléments grossiers et des sols minéraux bruts d'apports éoliens. La couverture pédologique présente une grande hétérogénéité. Dans les zones basses et endoréiques, l'évaporation intense conduit à l'extension des sols salés avec des encroûtements gypso-salins, gypseux, ou gypso-calcaires (Daoud et Halitim, 1994).

1.5. L'agriculture dans la région de Adrar

Il faut distinguer l'agriculture traditionnelle et l'agriculture sous pivot. Au niveau d'Adrar, la culture du palmier dattier est caractérisée par une grande hétérogénéité variétale. Les palmeraies sont groupées en oasis. Elles sont caractérisées par une hétérogénéité de leur répartition dans l'espace en raison d'une part de l'immensité du territoire, et d'autre part de la rareté des points d'eau. Dans le Touat, Gourrara, et Tidikelt, la plus grande partie des oasis est constituée de jardins privés portant sur une agriculture vivrière familiale à base de cultivars originaux : le palmier, l'olivier, l'amandier, le figuier, l'abricotier, le grenadier, la vigne, les cultures fourragères (la luzerne) et les céréales (blé tendre, orge). Pour le palmier, la variété la plus utilisée et la plus résistante au bayoud et qui a une valeur commerciale reconnue est Takerboucht. Le système de culture séculaire d'oasis est irrigué à partir des foggaras qui captent l'aquifère superficielle de l'Albien dont le drainage des eaux pour l'irrigation se fait par fossé à ciel ouvert.

Le fonctionnement des foggaras est favorisé par la présence d'une pente en direction de la palmeraie. Aujourd'hui ce système de culture est en déclin pour des problèmes

d'entretien des foggaras et de rabattement du niveau de la nappe provoqué par les nouveaux périmètres irrigués par pivots.

La production animale est limitée en raison des ressources fourragères rares.

En conclusion, le climat très évaporant, l'eau d'irrigation minéralisée, les vents fréquents et violents, l'absence de réseau de drainage, et l'absence de maîtrise dans la conduite des irrigations sont des facteurs favorables à la salinisation secondaire des sols dans la région d'Adrar.

2. MATERIEL D'ETUDE

2.1. Les parcelles étudiées

Les 3 sites étudiés se trouvent à proximité les uns des autres sur le plateau de Ba-amar qui se trouve à 60 km au sud de Adrar.

Les trois sites présentent chacun une superficie de 40 ha cultivée en blé dur (variété Waha) et irriguée avec l'eau de la nappe Albienne. Le choix de ces 3 sites est justifié par le nombre d'année de leur mise en culture, le site 1 est cultivé et irrigué depuis 2 ans, le site 2 est cultivé et irrigué depuis 3 ans, le site 3 est cultivé et irrigué depuis 4 ans. Le climat est homogène dans la zone d'étude, les sols sont comparables, le facteur de variation est donc le nombre d'années de mise en irrigation par pivot.

Le témoin correspond au sol non cultivé adjacent aux 3 sites étudiés, il a fait l'objet d'une étude de caractérisation et constituera l'état de référence ou l'état initial du sol pour les 3 sites étudiés.

Un autre site mitoyen aux 3 sites étudiés a fait l'objet d'une étude sur la variabilité spatiale pour la détermination de la méthode d'échantillonnage des trois sites.

2.2. les eaux d'irrigation

Les eaux d'irrigation proviennent de trois forages de la nappe Albienne, chaque forage alimente un site, la profondeur de la nappe au niveau du plateau de Ba-amar varie entre 8 et 13 m.

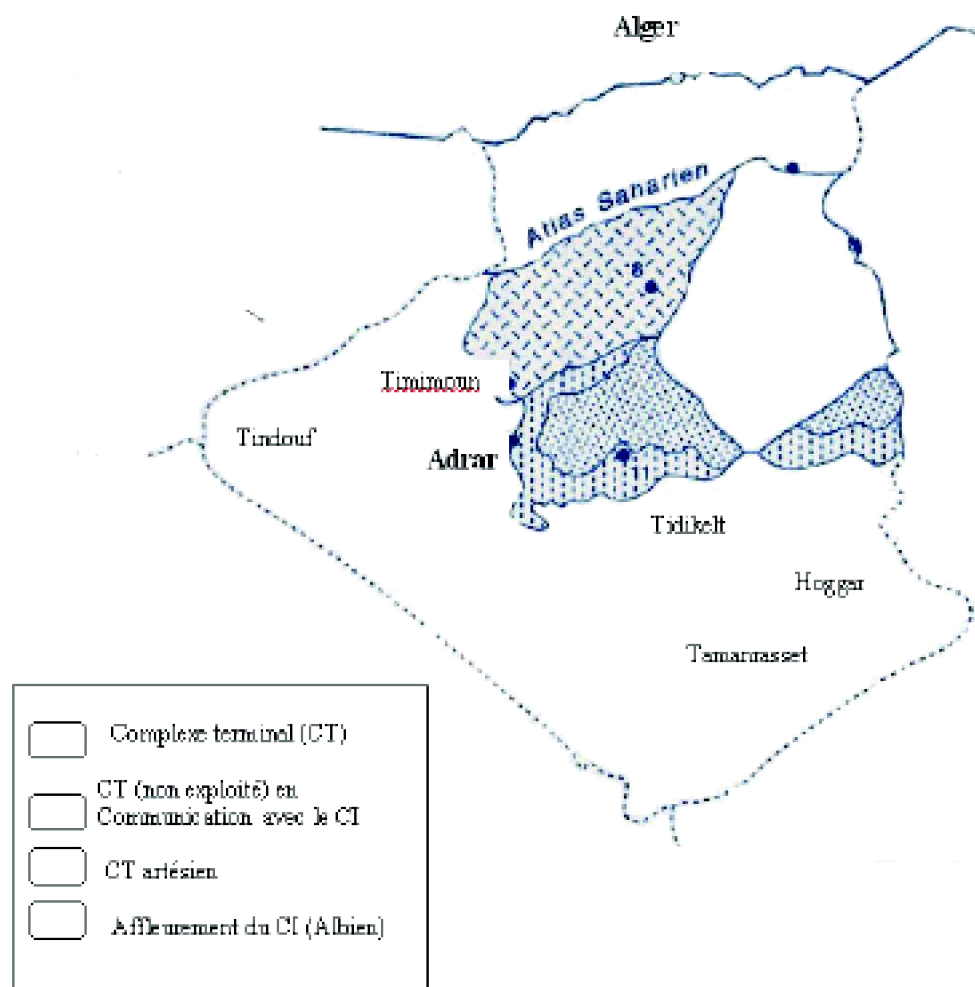


Figure 1. Les ressources hydriques du Sahara d'après Dubost (1992)

2.3. Le végétal

Le blé dur, et dans une moindre mesure l'orge, constitue l'essentiel de la production végétale réalisée sous pivot dans la région de Adrar. La plante cultivée est une céréale. Il s'agit du blé dur, la variété Waha, considérée comme moyennement tolérante à la salinité.

Toutes les expériences montrent que la meilleure date de semis pour les céréales se situe entre le 15 novembre et la fin décembre. Durant la campagne 2001/2002, le semis a été réalisé début décembre. La profondeur de semis est de 3 à 4 centimètres pour les sites d'études.

3. Méthodes d'étude

3.1. Le sol

Pour évaluer l'hétérogénéité spatiale de ce type de sol, un site représentatif de la zone d'étude a été retenu pour un essai préliminaire. L'objectif visé est de choisir la méthode pour l'échantillonnage des trois sites d'étude. Sur ce site de 40 ha irrigué et cultivé en blé, un échantillonnage (figure 2) sur 2 rayons de la surface du pivot est réalisé, 20 sondages par rayon (transects) et par profondeurs (0-20 cm et 20-40 cm) sont effectués pour obtenir un balayage spatial qui renseigne sur la variabilité spatiale de la salinité du sol. Les deux transects (rayons) forment un angle de 45° environ. Le prélèvement des échantillons du sol a été réalisé 1/2 heure après irrigation à l'aide d'une tarière.

Pour cerner l'évolution de la salinité à l'échelle d'une campagne agricole, l'échantillonnage du sol, dont la méthode découle des résultats de l'essai préliminaire, a été réalisé au début et à la fin du cycle végétatif du blé.

Tous les sites d'études ont été échantillonnés de la même manière. Chaque site d'une surface de 40 ha est subdivisé en 4 quarts d'égale superficie, 24 prélèvements sur 2 profondeurs ont été réalisés à la tarière dans chaque quart, leur mélange permet de constituer un échantillon moyen (figure 3). Ainsi, nous obtenons quatre échantillons moyens par horizon et par site. Trois répétitions ont été réalisées pour les différentes analyses chimiques. Deux périodes d'échantillonnage sont retenues, la première date de l'échantillonnage est le 15 Janvier 2002, elle correspond au stade tallage de la culture du blé (cet échantillonnage correspond à une période appelée état initial), la deuxième date est le 1 mai 2002, elle correspond au stade maturation (appelé état final).

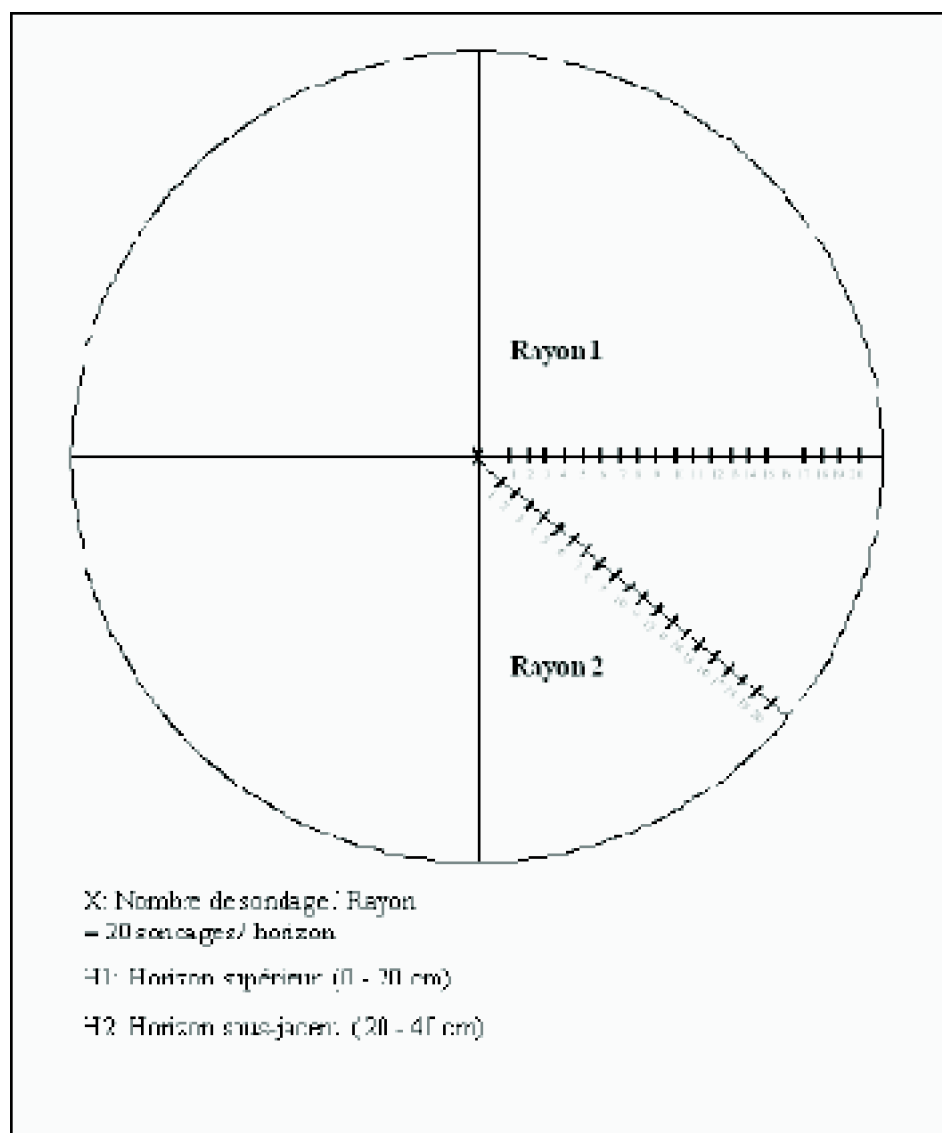


Figure 2. Plan d'échantillonnage du site pour l'essai préliminaire

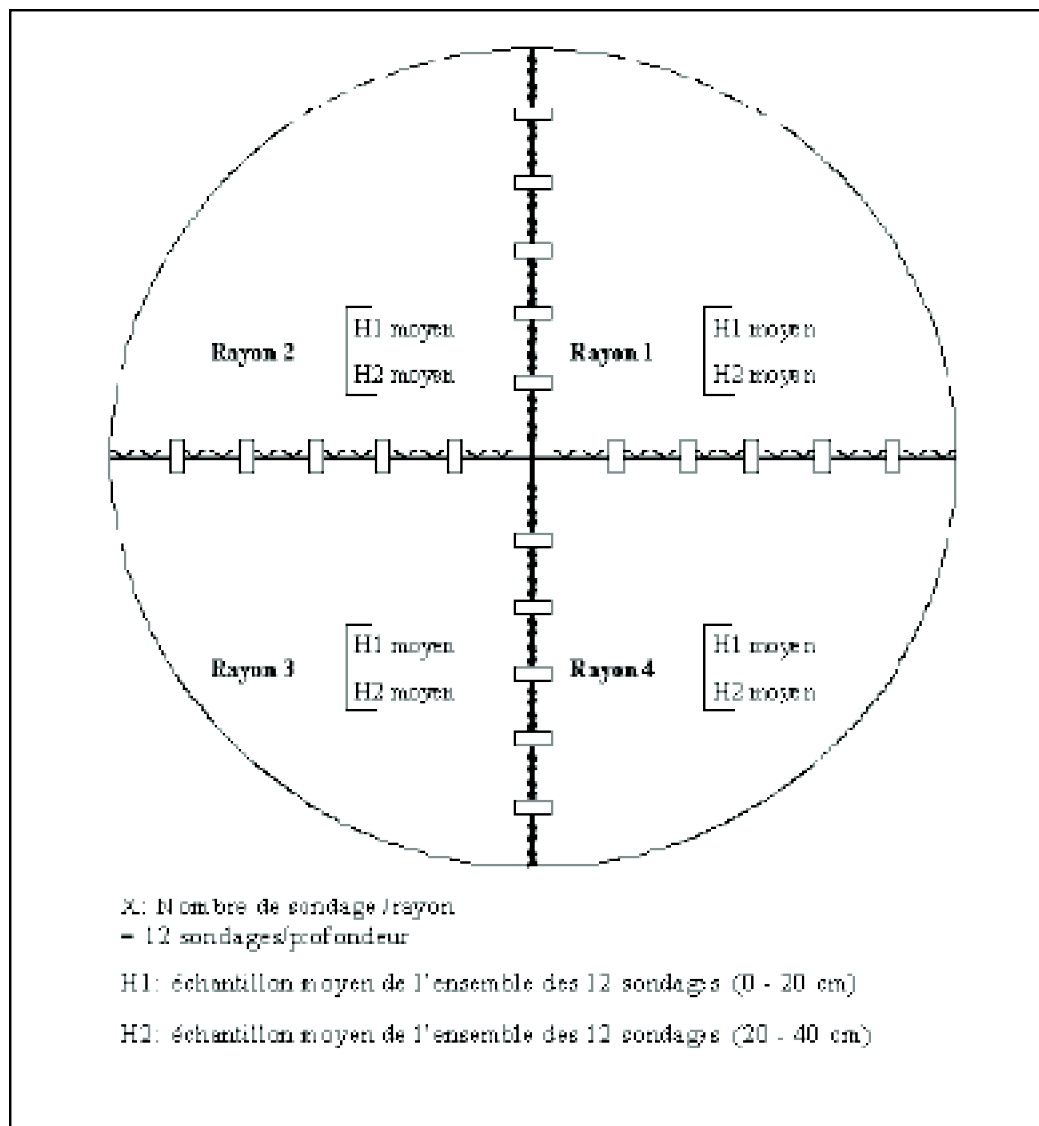


Figure 3. Présentation du plan d'échantillonnage des sites d'étude

Une caractérisation morphologique du site témoin a été réalisée. A cet effet, un profil a été implanté pour sa description. La mesure de certains paramètres physiques (densité apparente par la méthode au cylindre et les pF à la capacité de rétention et au point de flétrissement).

Les analyses chimiques ont été réalisées sur des échantillons de sol tamisés à 2 mm.

- Le pH est mesuré à l'aide d'un pH mètre de type Hanna par la méthode électrométrique avec une électrode en verre. L'appareil est préalablement étalonné avec des solutions étalon de 7 et 10. Le rapport terre/eau est de 1 / 2.5.
- Pour la conductivité électrique et le bilan ionique, le rapport terre / eau = 1/2 a été utilisé, étant donné que la préparation de la pâte saturée ne peut se faire sur ce type d'échantillon à texture sablo-limoneuse à sableuse. Une prise d'essai de 50 g de terre est mise en suspension dans 100 ml d'eau distillée et dégazée. Après une agitation

de 1h 30 mn, les extraits ont été filtrés. Quelques gouttes de Toluol ont été rajoutées dans les extraits pour assurer leurs conservations et faire les analyses du bilan ionique dans de bonnes conditions.

- La conductivité électrique est mesurée par un conductimètre de type Hanna muni d'une électrode en verre, un étalonnage préalable est nécessaire avec une solution $KCl = 0.02N$, les mesures sont rapportées à une température standard de $25^{\circ}C$.
- Le dosage des cations solubles monovalents (potassium et sodium) a été réalisé par spectrophotométrie d'émission atomique à flamme en présence du cesium / aluminium pour réduire des interférences entre le potassium et le sodium.
- Le dosage des cations bivalents (calcium et magnésium) a été réalisé par spectrophotométrie d'absorption atomique en présence du lanthane pour réduire les interférences entre le calcium et le magnésium.
- Les chlorures sont dosés par la méthode Argentométrique de Mohr.
- Le dosage des sulfates se fait par colorimétrie en présence du chlorure de baryum, les ions SO_4^{--} précipitent sous forme sulfate de baryum en présence d'un catalyseur appelé le Tween 80, la colorimétrie utilisée est de type Jenway 6051, la longueur d'onde utilisée est de 420 nm..
- Le dosage des carbonates et bicarbonates se fait par titrimétrie à l'acide sulfurique en présence d'indicateurs colorés, de la phénophtaléine pour les carbonates et l'orange de méthyle pour les bicarbonates.
- Le calcaire total est dosé par la méthode volumétrique à l'aide du Calcimètre de Bernard. L'appareil de mesure a été préalablement étalonné avec du $CaCO_3$ pur.
- La détermination de la capacité d'échange cationique a été réalisée par percolation sur colonne par la méthode de BOWER, en utilisant une solution d'acétate de sodium 1N à pH 8,2 pour déplacer les cations échangeables et pour la capacité d'échange cationique on utilise l'acétate 'ammonium 1N et à pH 7.
- La mesure de l'humidité du sol aux deux niveaux de potentiels matriciels (pF) est réalisée au laboratoire sur des échantillons remaniés (sol tamisé à 2mm) à pF 2,2 et à pF 4.2.
- La mesure de la densité apparente est réalisée sur le terrain par la méthode du cylindre.
- La mesure de la teneur en eau du sol a été réalisée sur un seul site (site 2) avant et après irrigation. Les prélèvements de sols ont été réalisés à la tarière sur deux profondeurs 0 - 20 cm et 20 - 40 cm ; la mesure se fait par gravimétrie.

3.2. L'eau d'irrigation

Au niveau de chaque pivot, un prélèvement de l'eau d'irrigation est réalisé. Le pH et la CE sont mesurés sur les prélèvements initiaux. Le bilan ionique est réalisé sur des solutions diluées en utilisant les mêmes méthodes que pour l'extrait dilué.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

1. Composition chimique des eaux d'irrigation

Les sels solubles contenus dans les eaux d'irrigation, présentent un risque majeur de diminution des rendements des cultures et de dégradation des sols. Pour cela une caractérisation chimique des eaux d'irrigation est indispensable, afin de savoir si la qualité des eaux est acceptable pour l'irrigation.

L'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation se fait selon la classification américaine. Bien que cette méthode soit utilisée par de nombreux chercheurs et par de nombreux pays, elle reste très sévère en regard de la disponibilité et de la qualité de l'eau d'irrigation dans les autres régions du monde. Dans ce sens Durand a rajouté une 5^{ème} classe de salinité et de sodicité qui est devenue le diagramme de USSL (1954) modifié par Durand (1958).

Pour cette étude, l'échantillonnage des eaux des différents forages à été réalisé au niveau des trois forages a proximité de chaque site.

Le forage 1 correspond au site 1, le forage 2 correspond au site 2 et le forage 3 correspond au site 3.

Le tableau VI. Présente les résultats d'analyses chimiques des eaux d'irrigation des différents forages de la nappe Albienne.

Forages	pH	CE dS/m	SAR	Na ⁺ meq/l	K ⁺ meq/l	Ca ²⁺ meq/l	Mg ²⁺ meq/l	SO ₄ ²⁻ meq/l	Cl ⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l
F1	7.98	1.5	4.35	7.97	0.60	4.88	1.85	6.07	7.5	3.2
F2	8.15	1.80	4.16	7.66	0.57	4.88	1.95	6.32	8.5	3.04
F3	7.75	1.66	4.23	7.97	0.87	4.97	2.16	6.70	7.5	2.92

Tableau VI. Composition chimique des eaux d'irrigation

1.2. Les risques liés à la Salinité (CE dS/m à 25° C)

Le principal critère pour l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation est la concentration totale en sels solubles, car la réponse de la majorité des plantes à la salinité est évaluée par la salinité globale plutôt que par l'action spécifique de chaque ion (USSL, 1954 ; Ghassemi *et al.*, 1995).

Les risques liés à la salinité sont exprimés par les valeurs de la conductivité électrique à 25 °C, selon le diagramme de USSL (1954) modifié par Durand (1958). Les résultats du tableau VI montrent que les eaux d'irrigation des 3 forages de la nappe Albienne, sont classés en C1 S3. Ils présentent une forte salinité et appartiennent à la classe : 0.25 dS/m < CE < 2.25 dS/m..

Le problème principal pour l'irrigation par aspersion avec des eaux salées est l'humectation et la concentration des sels solubles au niveau des feuilles, ce qui peut conduire à des brûlures et même la défoliation totale. Les lésions sont spécifiques à chaque culture et elles sont dépendantes de la fréquence d'arrosage et de la température (Mass, 1986). Des auteurs suggèrent que les brûlures des feuilles peuvent être évitées si l'irrigation se fait la nuit (Mass, 1986 ; Ayers et wescot, 1994 ; Hamdy *et al.*, 1995).

Par ailleurs, Il a été montré que les céréales pouvaient être irriguées avec des eaux d'une salinité de 6 dS/m en maintenant la plante à un état hydrique convenable, sans effet défavorable sur le sol et sur la plante (Hamdy *et al.*, 1995). En revanche, Maas (1986) et Maas et Hoffman (1977) suggèrent que la majorité des plantes cultivées, même si elles sont tolérantes à la salinité, présentent une diminution des rendements lorsqu'elles se développent sous irrigation à l'eau saline.

1.3. Les risques liés à la sodicité (SAR)

Les risques liés à la sodicité sont exprimés par le SAR. Ce paramètre traduit la propriété qu'à cette eau de modifier la proportion des cations échangeables d'un sol, en particulier d'augmenter la proportion de sodium, quand elle est mise en contact prolongé avec le sol

(Servant, 1978).

Le SAR de ces eaux d'irrigation est faible, il varie entre 4.16 et 4.35. la limite tolérée étant égale à 10. Compte tenu de la nature des sols à faible teneur en argile, ce paramètre a peu d'importance sur les propriétés physiques de ces sols. Le SAR de l'eau d'irrigation seul ne prend pas en compte la nature du sol.

En effet, Job (1998) rapporte qu'on peut irriguer un sol sableux avec une eau de SAR élevé car ces sols ne risquent pas de dégradation des propriétés physiques.

Le SAR ajusté est le coefficient ajusté d'adsorption du sodium pour les sols calcaires. Il permet d'estimer l'action de l'eau d'irrigation sur les propriétés chimiques et physiques du sol. Dans le cas des sols étudiés, seul l'action chimique sera prise en considération, car il s'agit de sols perméables pauvres en

argile. L'action chimique sera évaluée à travers l'effet de la concentration en ions carbonates sur la dissolution ou la précipitation des espèces carbonatées telle que la calcite présente dans le sol.

Le SAR ajusté se calcul par la formule suivante :

$$\text{Le SAR ajusté} = \text{SAR} * 1 + (8.4 - \text{pH}_C)$$

$$\text{pH}_C = (\text{pK}'2 - \text{pK}'c) + \text{p} (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) + \text{p} (\text{ALK})$$

(8.4 -pH_c), ce paramètre est indicatif de l'eau considérée à provoquer la précipitation ou à la dissolution des carbonates de calcium ou de magnésium.

La valeur 8.4 correspond au pH d'un sol en équilibre avec CaCO₃

Avec (8.4 -pH_c) > 0 Provoque la précipitation du CaCO₃

(8.4 -pH_c) < 0 devrait provoquer le passage en solution du CaCO₃ présent dans le sol.

pH_c : représente un pH théorique, calculé de l'eau d'irrigation en contact avec de la chaux et en équilibre avec le CO₂ du sol.

(pK'2 - pK'c) : représente la somme de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ + Na⁺ en meq/l

p (Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺) : représente la somme de Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ en meq/l

p (ALK) : représente la somme de CO₃⁻⁻ + HCO₃⁻ en meq/l

Pour les trois eaux analysées, le paramètre (8.4 -pH_c) est positif, ces eaux sont susceptibles de provoquer une précipitation de la calcite dans le sol.

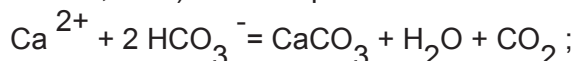
Par ailleurs, les résultats du tableau VII indiquent des valeurs du SAR ajusté variant de 8.73 à 11.31. Ces valeurs sont acceptables pour un sol sableux (Warrence et al., 2003).

Tableau VII. Présentation des résultats du SAR Ajusté des eaux d'irrigation

Eaux d'irrigation des 3 forages	SAR	SAR Ajusté
F1	4.35	11.31
F2	4.16	8.73
F3	4.23	9.3

I.4. Les risques liés au carbonate de sodium résiduel (RCS)

Le résiduel carbonate de sodium constitue un critère important pour classer les eaux d'irrigation, car il détermine le danger d'alcalinisation due à l'irrigation. Ce paramètre prédit la tendance du CaCO_3 à précipiter en présence de fortes teneurs en bicarbonates (Bohn *et al.*, 1985) selon l'équation suivante :



On distingue les différents niveaux d'appréciation du RCS :

$\text{RCS} = [(\text{CO}_3^{--} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})] > 2.5$ est considéré comme un risque dans toutes les conditions.

RSC compris entre 1.25 et 2.5 : un risque potentiel de précipitation du CaCO_3

RSC inférieur à 1.2 : seuil qui caractérise une eau utilisable pour l'irrigation.

Le danger d'alcalinisation s'explique par l'apparition de pH élevé dus à la formation de bicarbonate de sodium. En effet, les cations Ca^{2+} et Mg^{2+} apportés par les eaux d'irrigation sont susceptibles de précipiter sous forme de carbonates de calcium et de magnésium, l'excès de $(\text{CO}_3^{--} + \text{HCO}_3^-)$ sera présent sous forme de carbonate et bicarbonates de Na dissous. L'irrigation continue conduit à la formation et à une accumulation du bicarbonate de sodium entraînant une élévation du pH de l'ordre de 10 à 11.

Les résultats du Tableau VI montrent que les eaux d'irrigation présentent de faibles teneurs en bicarbonates (HCO_3^-), une absence des carbonates et la somme des teneurs en calcium et en magnésium est largement supérieure aux teneurs des bicarbonates ; par conséquent le RCS est très inférieur à 1.25 et le risque lié au carbonate de sodium résiduel est quasiment nul. Ce résultat est confirmé par la présence de sels de la série neutre (NaCl , Na_2SO_4) conditionnés par un pH inférieur à 8.3.

D'autres part, les travaux de Van Hoorn (1995) montrent que les eaux d'irrigation dans la région de la méditerranée ne renferment pas un excès de bicarbonate par rapport au calcium, elles ne présentent donc pas un risque de sodicité. De même, Daoud et Halitim (1994) ont montré qu'au Sahara les effets de l'alcalinité sont absents

I.5. Les risques liés à la toxicité spécifique de certains ions en solution

En tenant compte de la qualité de l'eau d'irrigation, du mode d'irrigation par aspersion et le type de culture, la toxicité est évaluée par l'action de certains ions en solution telles que les chlorures, le sodium et le bore (USSL, 1954 ; Bohn *et al.*, 1985 ; Valles *et al.*, 1988 ; Ghassemi *et al.*, 1995 ; Ayers et wescot, 1994).

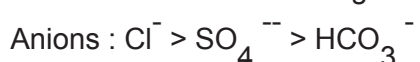
D'après le tableau VI, les résultats montrent que les concentrations des chlorures et du sodium dépassent largement les teneurs tolérées. En effet, les teneurs en chlorures

varient entre 7.5 et 8.5 meq/lce qui est excessive en mode d'irrigation par aspersion dont la limite tolérée est de 3 meq/l, au-delà de cette valeur les chlorures peuvent endommager les feuilles de la culture. Aussi, les teneurs en sodium sont assez élevées et varient entre 7.66 et 7.97 meq/ ;la limite tolérée du sodium en mode d'irrigation par aspersion est de 3 meq/l. Ces teneurs assez élevées sont susceptibles de provoquer des toxicités au niveau des racines et sur les feuilles (Ayers et wescot, 1994 ; Bauder, 2000).

D'autres part, lorsque l'absorption se produit pendant les périodes de hautes températures et basses humidités (< 30 pour cent), la toxicité est aggravée par les conditions venteuses(Ayers et Wescot, 1994) et la région de Adrar est la plus ventée parmi l'ensemble des régions du Sahara.

I.6. Détermination du faciès géochimique des eaux de la nappe albienne

Le diagramme de Piper permet de déterminer le faciès géochimique des eaux de la nappe albienne. D'après la composition chimique des eaux d'irrigation, la classification des cations et des anions pour les trois eaux se fait comme suit



Les données analytiques portées sur le diagramme de Piper enregistrent des faciès chlorurés sodiques (figure 4) pour les eaux d'irrigation des trois forages.

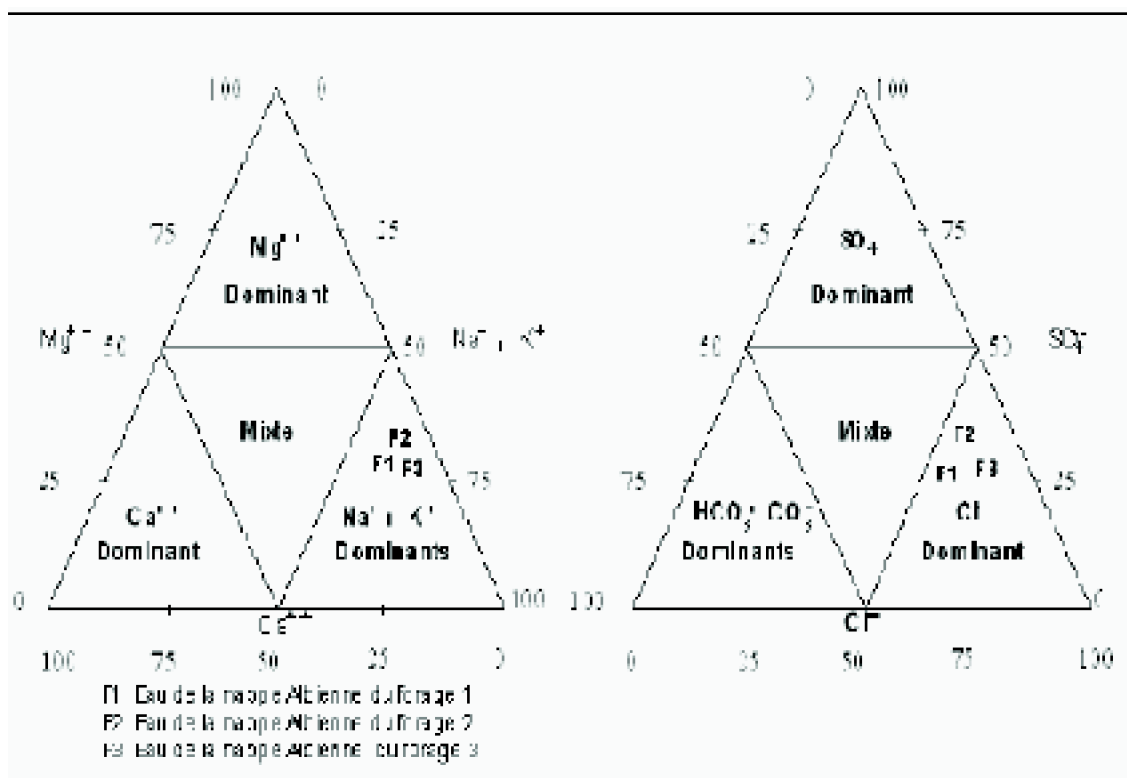


Figure 4. Diagramme de PIPER pour les trois forages de la nappe Albienne

1.7. La fraction de lixiviation

La fraction de lixiviation se définit par la part du volume d'eau d'irrigation qui consiste à dissoudre les sels accumulés dans le sol et à les entraîner en dessous de la zone racinaire par un mouvement descendant de l'eau (Ayers, 1984 ; Ayers et Wescot, 1994). L'importance de l'accumulation des sels dépend de la qualité d'eau d'irrigation, de la conduite des irrigations et de l'efficacité du drainage.

A une concentration excessive de sel, correspond une baisse de rendement. Pour empêcher la perte de rendement, il faut maintenir les sels dans le sol à une concentration tolérable pour la plante (Warrence *et al.*, 2003).

Dans les zones arides, la prédiction de la fraction de lixiviation est très délicate à cause de la richesse des sols en sels peu solubles tels que les carbonates de calcium, de magnésium, les sulfates de calcium et de magnésium. Ces derniers sont sujets aux phénomènes de dissolutions et de précipitations lorsqu'ils s'accumulent dans la zone racinaire et interfèrent dans la balance ionique / Sol.

La fraction de lixiviation permet ainsi :

- d'évacuer les sels qui se sont concentrés dans la zone racinaire en dehors du profil racinaire,
- d'affranchir la plante des effets néfastes de la salinité.

Elle est caractérisée par une salinité plus faible par rapport à la solution du sol qui est plus concentrée sous l'effet de l'évapotranspiration et l'absorption racinaire (Shannon *et al.*, 1993). La fraction de lixiviation en remplaçant la solution du sol, permet de maintenir une concentration en sels soluble favorable pour la plante. Elle dépend de plusieurs facteurs :

- de la salinité de l'eau d'irrigation et de la dose d'arrosage,
- de la texture du sol et de conductivité hydraulique,
- de la tolérance de la plante à la salinité, car la membrane racinaire est très
- spécifique à chaque culture et donc présente différentes affinités et sélectivités aux divers ions.

La plante réagit à la salinité moyenne de la zone racinaire, et Ayers et Wescot (1994) estiment que la profondeur utile du sol est divisée en quatre quarts et que 55 % de l'eau évapotranspirée proviennent du premier quart (0 –30 cm), 23% du second quart, 13 % du troisième quart et 9 % du dernier quart de 30 cm chacun..

Il en découle des différents calculs l'équation suivante :

$$\frac{(CE_{wi}) FI}{\max - CE_{wi}} = 5 CE$$

CE_{wi} = la conductivité électrique de l'eau d'irrigation à 25 °C

CE_{max} = Conductivité électrique qui correspond au seuil de tolérance de la culture de blé.

Les résultats du tableau VIII donnent une fraction de lixiviation qui varie de 4.22 % à 4.69 % pour les trois sites. Ces résultats corroborent ceux de Van Hoorn (1995) qui enregistre une fraction de lixiviation de 4 % dans les sols à texture sableuse.

Tableau VIII. Fraction de lixiviation des trois forages

Forages	CE en dS/m à 25°C	Fraction de lixiviation en %
1	1.5	4.22
2	1.60	4.51
3	1.66	4.69

Conclusion

Il ressort de cette étude que les eaux de la nappe albienne ont une composition chimique relativement constante, caractérisée par une forte salinité ; celle-ci varie entre 1.50 et 1.66 dS/m.

Les valeurs du SAR sont faibles, compte tenu de la nature des sols de la région de Adrar à dominance sablo-limoneuse, ce paramètre à peu d'importance sur l'évolution des propriétés physiques de ces sols.

Par ailleurs, des problèmes de toxicité par le sodium et des chlorures sont possibles, car les concentrations obtenues sont excessives en mode d'irrigation par aspersion.

La fraction de lixiviation nécessaire pour évacuer les sels solubles en dehors de la zone racinaire dans un sol à texture Sablo-limoneuse 4.22 % et 4.7 % pour les 3 sites.

Le faciès géochimique selon le diagramme de Piper est de type chloruré-sodique

LepH est légèrement alcalin ce qui limite considérablement la solubilité de certains éléments tels que le phosphore et certains oligo-éléments.

2. Variabilité spatiale et méthode d'échantillonnage

L'objectif principal de cet essai préliminaire est d'étudier la variabilité spatiale et verticale de quelques paramètres chimiques d'un sol irrigué localisé dans le plateau de Ba-Amar. Comme la variabilité spatiale se dédouble d'une hétérogénéité temporelle due soit à la variabilité climatique (fréquence des vents), soit à des changements dans la gestion de l'irrigation, un nombre élevé de sondages est nécessaire. A cet effet, un site a été retenu pour cet essai, présente une superficie de 40 ha. Il est cultivé en blé irrigué sous pivot. L'échantillonnage est fait tout au long de 2 rayons du pivot (Rayon 1 et Rayon 2) du

centre vers la périphérie. Les deux rayons présente deux répétitions et forment un angle de 45° environ. Vingt (20) points de sondages équidistants de 10 mètres sont effectués au niveau de chaque rayon du pivot (figure 2).

Le prélèvement des échantillons de sols a été réalisé 1/ 2 heure après irrigation à l'aide d'une tarière sur deux profondeurs, 0 - 20 cm et 20 – 40 cm.

Les paramètres chimiques retenus sont le pH et la conductivité électrique mesurés sur un extrait aqueux 1 / 2, et le calcaire total.

Le paramètre statistique descriptif retenu pour évaluer la variabilité de ces paramètres selon les deux rayons échantillonnés est le coefficient de variation (Tableau IX).

Les normes retenues pour son interprétation sont celles de Vauclin (1982) :

Coefficient de variation faible : $CV < 12.5 \%$

Coefficient de variation modéré : $12.5 < CV < 25 \%$

Coefficient de variation très élevé : $CV > 25 \%$

2. 1. La variabilité spatiale

Les résultats présentés dans le tableau IX, montrent que pour les deux rayons 1 et 2 ainsi qu'au niveau des deux horizons, les paramètres chimiques se distribuent selon les 3 classes suivantes :

- $CV < 12.5 \%$: Variation faible, c'est le cas du pH
- $12.5 < CV < 25 \%$: Variation modérée, c'est le cas du $CaCO_3$
- $CV > 25 \%$: Variation très élevée, c'est le cas de la CE

Tableau IX. Résultats des statistiques descriptives

Rayon 1	Horizons	Minimum	Maximum	Moyenne	CV %
CE (dS/m)	1 2	0.196 0.20	0.584 0.9	0.308 0.505	29.22 37.65
pH	1 2	7.12 7.4	7.94 8	7.65 7.65	3.38 2.46
$CaCO_3$ %	1 2	14 14.8	23.2 21.5	17 19.15	16.4 22.39
Rayon 2	Horizons	Minimum	Maximum	Moyenne	CV %
CE (dS/m)	1 2	0.55 0.585	1.48 1.41	0.917 1.07	27.06 53.36
pH	1 2	7.27 7.27	8.28 8.3	7.90 7.96	5.50 4.66
$CaCO_3$ %	1 2	13.6 13.6	28.8 24	15.8 17.48	21.65 16.7

2.2. la variabilité verticale

Le paramètre statistique retenu pour l'étude de la variabilité verticale est la comparaison des moyennes. Les résultats du tableau X montrent que la distribution du pH et du calcaire total se fait d'une manière homogène au niveau des deux profondeurs et pour les

deux rayons ; la différence entre les deux profondeurs est statistiquement non significative (Probabilité > 5 %). En revanche, la conductivité électrique présente une différence significative au niveau du rayon 1 et une différence non significative au niveau du rayon 2.

Tableau X. Variabilité verticale entre les horizons 1 et 2

Rayon 1	Probabilité	Signification à 5%
pH	0.983	NS
CE	0.010	S
CaCO ₃ (%)	0.084	NS
Rayon 2	Probabilité	Signification à 5%
pH	0.665	NS
CE	0.484	NS
CaCO ₃ (%)	0.073	NS

Conclusion

Cet essai préliminaire réalisé avec un nombre élevé de sondage (20 sondages par horizon et par rayon) a montré une variabilité faible pour le pH, modérée pour le CaCO₃ et très élevée pour la CE. Une telle variation très élevée de la salinité est signalée par les travaux de nombreux auteurs (Vauclin, 1982 ; Valles, 1988 ; Hachicha., *et al* ; 1996 ; Cheverry et Bourrié, 1998 ; Douaoui *et al.*, 2000 ; Saidi, 2004). En effet, ils ont montré que la distribution des sels solubles dans les sols présente une variabilité spatiale et temporelle très élevée. Cette variabilité spatiale et verticale de la salinité nécessite un mode d'échantillonnage adapté avec un échantillon moyen par horizon ; l'horizon moyen doit être constitué d'un nombre de prélèvements suffisamment élevé pour être représentatif.

2.3. Méthode d'échantillonnage des trois sites d'étude

Les résultats qui découlent de l'essai préliminaire permettent d'orienter la méthode d'échantillonnage vers un nombre élevé de prélèvements pour être représentatif. Même si statistiquement la salinité présente une grande variabilité

au niveau des deux transecte ; elle reste faible sur l'aspect agropédologique,

A cet effet, et pour l'étude des trois sites, dont l'objectif principal est d'étudier la dynamique des sels solubles dans les périmètres de mise en valeur lors d'une campagne agricole. Une caractérisation de l'évolution de l'état de salinité a été réalisée au début et à la fin de la campagne agricole. Les paramètres retenus pour cette caractérisation sont la conductivité électrique, le pH, le SAR, les cations solubles et les anions solubles.

Il s'agit de trois périmètres cultivés en céréales depuis 2, 3 et 4 ans qui correspondent respectivement aux sites 1, 2 et 3. Ces derniers sont irrigués avec une eau provenant de trois forages de la nappe albienne. L'irrigation se fait par aspersion sous pivot.

Les trois sites ont une surface circulaire de 40 ha chacun. L'échantillonnage est réalisé sur les 4 rayons du pivot et sur deux profondeurs. Le premier échantillonnage est réalisé au stade tallage et le deuxième échantillonnage est réalisé au stade maturation. Les valeurs obtenues de la salinité sont comparées à un site témoin non cultivé qui constitue l'état de référence. L'échantillonnage du témoin est fait de la même manière que les 3 autres sites, sauf qu'il s'est limité au premier horizon qui correspond à une profondeur de 0–30 cm.

Les paramètres analysés pour le témoin sont la conductivité électrique, le pH et le calcaire.

3. Caractérisation de quelques paramètres chimiques et physiques du sol témoin

Le sol témoin non cultivé se trouve à proximité des trois sites d'étude. Il a été échantillonné de la même manière que les trois sites, mais l'échantillonnage s'est limité à la profondeur 0 – 30 cm sur les 4 rayons.

3.1. Caractéristiques chimiques

Les résultats du tableau XI montrent que l'horizon 0-30 cm se caractérise par une texture sablo-limoneuse, la faible teneur en argile lui confère une faible capacité de rétention en eau et une capacité d'échange cationique limitée, elle est en moyenne de 6.5 meq /100g de terre. C'est un sol dépourvu de toute végétation, très exposé à l'érosion éolienne.

La salinité moyenne de l'extrait aqueux (1 / 2) est de 0.51 dS/m. La valeur correspondant à l'extrait de la pâte saturée est de 2.55 dS/m. Selon la classification de USSI (1954), il s'agit d'un sol peu salé.

Les teneurs en calcaire total sont relativement élevées, elles sont en moyenne de 12 %, ce qui favoriserait l'insolubilisation du phosphore et diminuerait son assimilabilité par la plante. La réaction du sol est légèrement alcaline, ce qui influence directement la nutrition minérale en limitant considérablement la mise en solution des éléments nutritifs tels que le phosphore et certains oligo-éléments : Cu, Zn et le molybdène.

Tableau XI. Données analytiques du sol témoin de l'horizon (0 - 30 cm)

Horizons ¹	pH	CE dS/m	CaCO ₃ total (%)	CaSO ₄ .2H ₂ O (%)
H1 (R1)	7.8	0.507	9.870	0.355
H1 (R2)	7.64	0.573	14.78	0.230
H1 (R3)	7.50	0.486	13.03	0.293
H1 (R4)	7.88	0.500	10.28	0.167
Moyenne	7.70	0.51	12.00	0.260
Ecart type	0.16	0.03	2.33	0.08

3.2. Description du profil

Le site se trouve sur le plateau de Ba-amar, le paysage est tabulaire, dépourvu de toute végétation. La profondeur du profil est limitée à 50 cm, il s'agit d'un seul horizon sec qui repose sur la roche mère qui est du calcaire dur gréseux. Le profil est caractérisé par :

- Le profil est de type A/C, la couleur de l'horizon est : 7.5 YR 6 / 8
- La structure est particulière, la texture est sablo-limoneuse
- Sol très poreux, pas de racine ni activité biologique dans tout le profil.
- La charge en éléments grossiers est variable en surface et dans tout le profil.
- La réaction à HCl (6N) est moyenne en surface et forte en profondeur.

Tableau XII. Caractéristiques de quelques paramètres chimiques et physiques du sol témoin de l'horizon supérieur (0 – 30cm)

Paramètres chimiques	Résultats
PH CE (dS/m) : -de l'extrait dilué -de l'extrait de pâte saturée Calcaire total en % Gypse en % CEC meq/ 100 g de terre de terre	7.70 0.51 2.55 12 0.26 6.4
Paramètres physiques	Résultats
Densité apparente Teneur en eau au pF= 2.2 Teneur en eau au pF= 4.2 Texture Argiles (%) Limon fin (%) Limon grossier (%) Sable fin (%) Sable grossier (%)	1.3 22 % 10 % Pourcentage des fractions 8.00 3.75 3.45 71.25 13.48

4. Evolution de la salinité à l'échelle d'une campagne agricole dans le Site 1

4.1. Etat Initial : Stade tallage

Ce site à été cultivé depuis déjà 1 année en blé. L'échantillonnage est réalisé au début de la 2^{ème} année, au stade tallage. Les résultats sont présentés dans le tableau XIII.

Tableau XIII. Les résultats analytiques des horizons H1 et H2

Horizons et rayons	pH	CE dS/m	SAR	K ⁺ meq/l	Na ⁺ meq/l	Ca ⁺⁺ meq/l	Mg ⁺⁺ meq/l	Cl ⁻ meq/l	SO ₄ ⁻⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	Na ⁺ / K ⁺	Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻
H1(R1)	8.00	0.33	1.57	0.22	1.21	0.69	0.48	1.00	2.98	1.00	5.53	1.44	0.33
H1(R2)	8.07	0.62	1.68	0.25	1.45	0.92	0.57	1.10	8.18	1.10	5.75	1.614	0.13
H1(R3)	8.10	0.33	1.74	0.22	1.29	0.66	0.43	0.70	5.00	1.30	5.91	1.53	0.14
H1(R4)	8.03	0.70	1.62	0.23	1.45	0.93	0.66	1.00	5.21	1.00	6.36	1.40	0.19
H2(R1)	8.13	0.66	1.58	0.18	1.20	0.70	0.45	0.70	5.21	1.00	6.58	1.55	0.34
H2(R2)	8.10	1.04	1.54	0.29	1.37	0.91	0.68	2.20	8.18	1.00	6.29	1.34	0.24
H2(R3)	7.92	0.64	1.51	0.18	1.12	0.56	0.54	1.80	4.46	0.70	6.13	1.04	0.15
H2(R4)	8.05	1.20	1.77	0.39	1.71	1.10	0.75	2.00	9.67	1.20	4.35	1.46	0.22

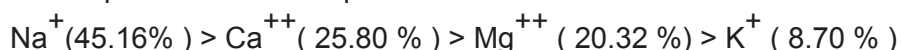
4.1.1. Horizon 1

Les résultats du tableau XIV, montrent qu'au stade tallage, l'état de salinité est équivalent à celui du témoin. La comparaison des moyennes entre l'état actuel du site 1 et le témoin, donne pour les trois paramètres une différence non significative.

Tableau XIV. Comparaison des moyennes entre le site 1 et le témoin

Paramètres	Témoin Horizon 1	Site 1 Horizon 1	Probabilité	Signification à 5 %
CE (dS/m)	0.516 + - 0.03	0.50 + -0.19	0.83	NS
pH	7.76 + - 0.43	8.05 + -0.04	0.24	NS
CaCO ₃ (%)	11.99 + - 2.32	14.46 + - 1.9	0.15	NS

Le tableau XV présente les caractéristiques chimiques de la solution du sol à l'état initial. Les résultats montrent que la composition cationique de la solution du sol se caractérise par un faciès sodique :



La composition anionique de la solution du sol se caractérise par un faciès sulfaté : $\text{SO}_4^{--} > (72.25\%) > \text{HCO}_3^- (14.88\%) > \text{Cl}^- (12.85\%)$.

Les données analytiques portées sur le diagramme de Piper indiquent que le faciès géochimique de la solution est Sulfaté sodique (figure 5).

Le rapport $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$ est compris entre 0.2 et 1, il confirme la prédominance des sulfates par rapport aux chlorures. Le rapport $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++} > 1$ est favorable à la

prédominance du calcium dans la solution du sol.

L'analyse de la variabilité spatiale des paramètres chimiques analysés dans l'horizon 1 au niveau des 4 rayons aboutit aux résultats suivants :

- Variation faible : pH, SAR, Ca^{++} / Mg^{++} , Na^{+} / K^{+} , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{+}
- Variation modérée : K^{+} , HCO_3^{-}
- Variation élevée : CE, SO_4^{--} , Cl^{-} , Cl^{-} / SO_4^{--}

Tableau XV. Paramètres statistiques de l'horizon 1

Paramètres	Moyenne	Coefficient de variation %
pH	8.05	0.60
CE	0.50	38.00
SAR	1.65	4.22
Na^{+} / K^{+}	5.88	5.77
Ca^{++} / Mg^{++}	1.49	6.01
Na^{+}	1.40	7.14
K^{+}	0.27	14.80
Ca^{++}	0.80	8.75
Mg^{++}	0.63	7.90
SO_4^{--}	5.34	40.00
Cl^{-}	0.95	51.20
Cl^{-} / SO_4^{--}	0.20	45.00
HCO_3^{-}	1.10	12.72

4. 1.2. Horizon 2

La salinité enregistrée est faible, elle est en moyenne de 0.89 dS/m, et le SAR obtenu est de 1.67. La composition ionique de la solution du sols est caractérisée par un cortège ionique qui va dans le sens suivant :

Cations : Na^{+} (45.76%) > Ca^{++} (27.80 %) > Mg^{++} (18.302 %) > K^{+} (8.13%)

Anions : SO_4^{--} > (72.26 %) > Cl^{-} (17.54%) > HCO_3^{-} (10.18 %).

Les données analytiques portées sur le diagramme de Piper indiquent que la solution du sol est sulfatée -sodique (figure 5).

Le rapport Cl^{-} / SO_4^{--} appartient à la classe $0.2 < Cl^{-} / SO_4^{--} < 1$, il confirme la prédominance des sulfates dans la solution du sol par rapport aux chlorures. Le rapport $Ca^{++} / Mg^{++} > 1$ est favorable à la prédominance du calcium dans la solution du sol.

L'analyse de la variabilité spatiale des paramètres chimiques analysés dans l'horizon 2 pour les 4 rayons, aboutit aux résultats suivants (tableau XVI) :

- Variation faible : pH, CE, SAR, Ca^{++} , Mg^{++} , Na^{+} , K^{+}
- Variation modérée : , HCO_3^{-} Ca^{++} / Mg^{++} , Na^{+} / K^{+} ,

- Variation élevée : SO_4^{--} , Cl^- , Cl^- / SO_4^{--}

Tableau XVI. Paramètres statistiques de l'horizon 2

Paramètres	Moyenne	Coefficient de variation %
PH	8.05	0.60
CE	0.89	9.00
SAR	1.60	6.86
Na^+ / K^+	5.84	17.12
Ca^{++} / Mg^{++}	1.35	16.30
Na^+	1.35	3.10
K^+	0.24	8.33
Ca^{++}	0.82	7.30
Mg^{++}	0.54	3.70
SO_4^{--}	6.88	35.61
Cl^-	1.67	40.11
Cl^- / SO_4^{--}	0.24	28.80
HCO_3^-	0.97	20.61

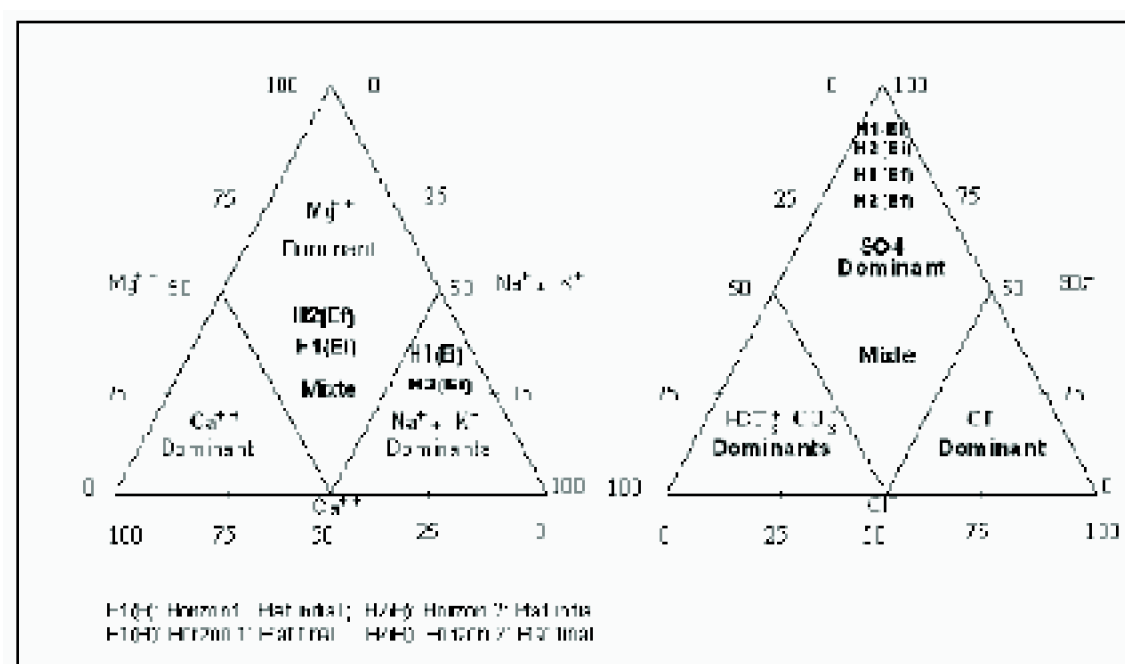


figure 5. Diagramme de PIPER pour les solutions du sol au site 1

4.1.3. Variabilité verticale

Le paramètre statistique retenu pour l'analyse de la distribution verticale des paramètres chimiques, est la comparaison des 4 moyennes entre les horizons 1 et 2. Les résultats du tableau XVII, montrent que la probabilité calculée est supérieure à 5%, ce qui signifie que la différence est non significative pour l'ensemble des paramètres chimiques. Les valeurs obtenues dans l'horizon 1 sont donc comparables à celles de l'horizon 2.

Tableau XVII. Comparaison des moyennes entre les horizons 1 et 2 (H1et H2)

Paramètres chimiques	Moyenne Horizon 1	Ecart type	Moyenne Horizon 2	Ecart type	Probabilité	Signification à 5%
pH	8.05	0.09	8.05	0.05	0.88	NS
CE	0.50	0.19	0.89	0.28	0.96	NS
SAR	1.65	0.07	1.60	0.11	0.44	NS
Na ⁺ / K ⁺	5.88	0.34	5.84	1.00	0.93	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.49	0.09	1.34	0.22	0.26	NS
Na ⁺	1.40	0.08	1.35	0.26	0.75	NS
K ⁺	0.23	0.02	0.24	0.10	0.77	NS
Ca ⁺⁺	0.80	0.14	0.82	0.24	0.90	NS
Mg ⁺⁺	0.63	0.12	0.54	0.11	0.32	NS
SO ₄ ⁻⁻	5.34	2.14	6.88	2.45	0.38	NS
Cl ⁻	0.95	0.17	1.67	0.67	0.08	NS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.20	0.09	0.24	0.07	0.50	NS
HCO ₃ ⁻	1.10	0.14	0.97	0.20	0.35	NS

Conclusion

Au stade tallage, la solution du sol est caractérisée par un niveau de salinité équivalent à celui du témoin dans l'horizon de surface. Une légère augmentation est enregistrée dans l'horizon sub-surface. La comparaison des moyennes montre que les niveaux de salinité sont comparables et la différence est non significative.

La variabilité spatiale de la salinité est élevée au niveau de l'horizon de surface, elle est faible au niveau de l'horizon de sub-surface. La distribution des autres paramètres chimiques est homogène et les valeurs obtenues sont équivalentes et par conséquent présentent le même faciès géochimique, il est sulfatée-sodique.

4.2. Etat final : Stade maturation

A la fin du cycle végétatif du blé, qui correspond au stade maturation de la 2^{ème} année de mise en irrigation.

Les résultats des analyses chimiques sont présentés dans le tableau XVIII.

Tableau XVIII. Les résultats analytiques des 2 horizons

EVOLUTION DE LA SALINITE DES SOLS IRRIGUES DANS UNE REGION SAHARIENNE.

Horizons et rayons	pH	CE dS/m	SAR	K ⁺ meq/l	Na ⁺ meq/l	Ca ⁺⁺ meq/l	Mg ⁺⁺ meq/l	Cl ⁻ meq/l	SO ₄ ⁻⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	Na ⁺ / K ⁺	Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻
H1(R1)	7.95	0.46	2.80	0.20	2.06	0.83	0.64	1.45	2.73	1.70	10.25	1.29	0.53
H1(R2)	7.50	1.47	1.17	0.36	2.86	3.01	1.86	2.55	12.50	1.50	7.89	1.62	0.20
H1(R3)	8.36	0.49	3.24	0.20	2.06	0.66	0.61	1.65	1.74	1.90	10.25	1.08	0.95
H1(R4)	7.83	1.30	2.08	0.36	4.05	2.36	1.54	3.55	5.85	1.30	11.20	1.53	0.60
H2(R1)	7.95	0.46	3.58	0.20	2.86	0.71	0.56	1.45	5.24	1.50	14.21	1.27	0.28
H2(R2)	7.08	2.74	1.51	0.51	3.66	10.71	0.90	4.35	28.90	1.30	7.15	11.90	0.15
H2(R3)	7.87	0.68	1.98	0.28	2.06	1.25	0.90	1.55	5.21	1.30	7.30	1.39	0.29
H2(R4)	7.60	1.48	4.88	0.44	5.05	1.86	0.28	6.25	6.70	1.30	11.45	6.64	0.93

4.2.1. Horizon 1

Les résultats du tableau XIX, montrent qu'en fin de campagne agricole, une légère augmentation de la salinité est enregistrée par rapport au témoin. Pour la conductivité électrique, le pH et le calcaire total, la probabilité calculée est supérieure à 5%, la différence entre le témoin et l'état final est non significative.

Tableau XIX. Comparaison des moyennes de l'horizon 1 entre le témoin et le site 1

Paramètres chimiques	Témoin Horizon 1	Site 1 Horizon 1	Probabilité	Signification à 5 %
CE dS/m	0.51 + - 0.03	0.94 + - 0.52	0.16	NS
PH	7.76 + - 0.43	7.91 + - 0.35	0.63	NS
CaCO ₃ %	12.00 + - 2.32	13.46 + - 1.9	0.16	NS

Le tableau XX, présente les résultats analytiques moyens de la solution du sol de l'horizon 1 en fin de campagne. La composition chimique se caractérise par la distribution ionique suivante.

Cations : Na⁺ (46.98 %) > Ca⁺⁺ (28.76 %) > Mg⁺⁺ (19.56 %) > K⁺ (4.68 %)

Anions : SO₄⁻⁻ (59.33 %) > Cl⁻ (23.98 %) > HCO₃⁻ (16.68 %)

Le sodium et les sulfates demeurent les ions dominants dans la solution du sol.

Le faciès géochimique de la solution du sol, selon le diagramme de Piper est Sulfaté mixte (figure 5).

Le rapport $\frac{Cl^-}{SO_4^{--}} < 1$ confirme la prédominance des sulfates dans la solution du sol. Le rapport $\frac{Ca^{++}}{Mg^{++}} > 1$ est favorable à la prédominance du calcium dans la solution du sol.

L'analyse de la variabilité spatiale des paramètres chimiques analysés dans l'horizon 2 pour les 4 rayons, aboutit aux résultats suivants (tableau XX) :

- Variation faible : pH, CE, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺.
- Variation modérée : HCO₃⁻, Ca⁺⁺ / Mg⁺⁺, Na⁺ / K⁺.

- Variation élevée : SO_4^{--} , Cl^- , $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$ et SAR

Tableau XX. Les paramètres statistiques de l'horizon 1

Paramètre chimiques	Moyenne	Coefficient de variation %
PH	7.91	3.66
CE	0.94	5.30
SAR	2.32	38.70
Na^+ / K^+	9.90	14.24
$\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$	1.38	17.36
Na^+	2.81	1.42
K^+	0.28	0.70
Ca^{++}	1.72	6.80
Mg^{++}	1.17	5.10
SO_4^{--}	5.69	85.06
Cl^-	2.30	41.73
$\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$	0.57	52.44
HCO_3^-	1.60	15.62

4.2.2. Horizon 2

Les résultats du tableau XXI montrent, qu'en fin de campagne, soit au stade maturation, la salinité moyenne de l'horizon 2 est de 1.43 dS/m. La composition ionique se caractérise par une prédominance de l'ion calcium par rapport à la somme de cations et les sulfates prédominant avec 70.76 % par rapport à la somme des anions.

Cations : Ca^{++} (41.41%) > Na^+ (38.8%) > Mg^{++} (15.69 %) > K^+ (4.09 %)

Anions : SO_4^{--} (70.76%) > Cl^- (20.92%) > HCO_3^- (8.30%).

Le faciès géochimique de la solution du sol, selon le diagramme de Piper est Sulfaté mixte (figure 5).

Le rapport $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--} < 1$ confirme la prédominance des sulfates dans la solution du sol. Le rapport $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++} > 1$ est favorable à la prédominance du calcium dans la solution du sol

L'analyse de la variabilité spatiale des paramètres chimiques analysés dans l'horizon 2 à l'état final (tableau XXI), aboutit aux résultats suivants :

Variation faible : pH, CE, Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+

Variation élevée : SAR, Na^+ / K^+ , $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$, SO_4^{--} , Cl^- , HCO_3^- , $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$

Tableau XXI. Les paramètres statistiques de l'horizon 2

EVOLUTION DE LA SALINITE DES SOLS IRRIGUES DANS UNE REGION SAHARIENNE.

Paramètres	Moyenne	Coefficient de variation %
PH	7.64	2.30
CE	1.43	4.90
SAR	2.99	51.50
Na^+ / K^+	10.03	34.09
$\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$	5.30	95.47
Na^+	3.41	0.10
K^+	0.36	0.60
Ca^{++}	3.64	10.40
Mg^{++}	1.38	10.30
SO_4^{--}	11.50	100
Cl^-	3.40	68.23
$\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$	0.41	85.36
HCO_3^-	1.35	74.07

4.2.3. Variabilité verticale

Concernant les variations verticales, les analyses statistiques montrent que la comparaison des moyennes de l'ensemble des paramètres chimiques entre l'horizon 1 et l'horizon 2, donne une différence non significative ($P > 0.05$) (Tableau XXII).

Tableau XXII. Comparaison des moyennes entre l'horizon 1 et l'horizon 2 de l'état final

Paramètres	Moyenne Horizon 1	Ecart type	Moyenne Horizon 2	Ecart type	probabilité	Signification à 5 %
PH	7.91	0.35	7.64	0.41	0.35	NS
CE	0.94	0.45	1.43	1.26	0.39	NS
SAR	2.32	0.90	2.99	1.54	0.48	NS
Na^+ / K^+	9.11	1.52	8.82	2.31	0.83	NS
$\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$	1.38	0.24	5.30	5.06	0.17	NS
Na^+	2.80	0.90	3.41	1.28	0.47	NS
K^+	0.29	0.10	0.38	0.12	0.23	NS
Ca^{++}	1.71	1.15	3.63	4.74	0.46	NS
Mg^{++}	1.16	0.63	0.66	0.30	0.20	NS
SO_4^{--}	5.69	4.84	11.50	11.60	0.39	NS
Cl^-	2.30	0.96	3.40	2.33	0.42	NS
$\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$	0.57	0.30	0.41	0.35	0.52	NS
HCO_3^-	1.60	0.25	1.35	1.00	0.12	NS

Conclusion

En fin de campagne agricole soit au stade maturation, les irrigations ont engendrées une légère augmentation de la salinité dans les deux horizons. Elle est en moyenne de 0.94 dS/m dans l'horizon 1, et 1.43 dS/m dans l'horizon 2. Mais statistiquement, la

comparaison des moyennes donne une différence non significative.

La variabilité spatiale de la salinité est faible au niveau de l'horizon de surface et au niveau de l'horizon de sub-surface.

Les caractéristiques chimiques des horizons de surface et de Subsurface sont comparables et le faciès géochimique de la solution du sol est sulfaté-mixte.

4.3. Comparaison entre l'Etat initial et l'Etat final

L'objectif de cette comparaison est d'évaluer l'évolution de la salinité et ses différents paramètres chimiques qui caractérisent la solution du sol entre le stade tallage et le stade maturation (figure 6).

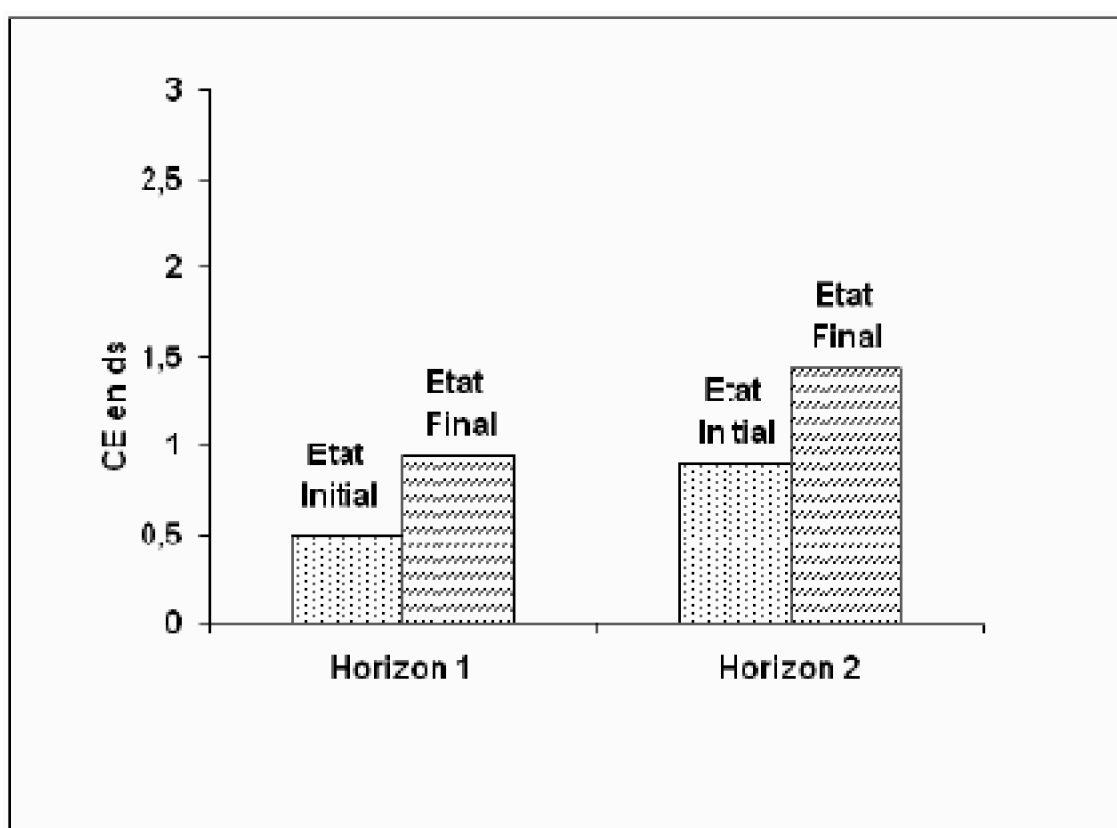


Figure 6. Evolution de la salinité (Extrait aqueux 1/2) dans le site 1 entre l'état initial (stade tallage) et l'état final (stade maturation).

4.3.1. Horizon 1

Les résultats du tableau XXIII présentent, l'évolution des paramètres chimiques entre l'état initial et l'état final. Celle-ci est marquée par un enrichissement en sodium et en chlorures dans l'horizon 1 en fin de campagne. En effet, l'analyse statistique enregistre une différence significative pour le sodium, et les chlorures, et une différence hautement significative pour le rapport Na^+ / K^+ . Par contre, l'état de salinité du sol reste comparable entre l'état initial et l'état final.

Tableau XXIII. Comparaison des moyennes entre l'Etat initial et l'Etat final de l'horizon 1

Paramètres	Moyenne Etat initial	Ecart type	Moyenne Etat final	Probabilité	Signification à 5 %
PH	8.05	0.09	7.91	0.47	NS
CE	0.50	0.19	0.94	0.16	NS
SAR	1.66	0.07	2.32	0.19	NS
Na ⁺ / K ⁺	5.25	0.43	9.11	0.003	DHS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.49	0.09	1.38	0.41	NS
Na ⁺	1.40	0.08	2.80	0.02	DS
K ⁺	0.23	0.02	0.29	0.31	NS
Ca ⁺⁺	0.80	0.14	1.71	0.16	NS
Mg ⁺⁺	0.63	0.12	1.16	0.14	NS
SO ₄ ⁻⁻	5.34	2.14	5.69	0.89	NS
Cl ⁻	0.95	0.17	2.30	0.03	DS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.20	0.09	0.57	0.05	NS
HCO ₃ ⁻	1.10	0.14	1.60	0.14	NS

4.3. 2. Horizon 2

Les résultats de la comparaison des moyennes des paramètres analysés entre le stade tallage et le stade maturation sont présentés dans le tableauXXIV.

Ils enregistrent une augmentation significative des teneurs en sodium, en bicarbonates, ainsi que les valeurs du rapport Na⁺ / K⁺. En revanche, une augmentation de la salinité de 0.50 dS /m à l'état initial à une moyenne 1.43 dS/m est enregistrée en fin de campagne. Cette valeur moyenne a été multiplié par 3, même si statistiquement la différence n'est pas significative.

Tableau XXIV. Comparaison entre le stade tallage et la stade maturation de l'horizon2

Paramètres	Moyenne Etat initial	Ecart type	Moyenne Etat final	Probabilité	Signification à 5%
pH	8.05	0.09	7.64	0.104	NS
CE	0.50	0.19	1.43	0.314	NS
SAR	1.60	0.11	2.99	0.121	NS
Na ⁺ / K ⁺	5.48	0.97	8.82	0.036	S
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.34	0.22	5.299	0.170	NS
Na ⁺	1.35	0.26	3.41	0.019	S
K ⁺	0.24	0.10	0.38	0.207	NS
Ca ⁺⁺	0.82	0.24	3.63	0.280	NS
Mg ⁺⁺	0.54	0.11	0.66	0.471	NS
SO ₄ ⁻⁻	6.88	2.45	11.5	0.464	NS
Cl ⁻	1.67	0.67	3.40	0.204	NS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.221	0.15	0.414	0.412	NS
HCO ₃ ⁻	0.97	0.20	1.35	0.016	S

4.4. Corrélation entre la conductivité électrique et les éléments en solution

Les paramètres qui permettent de calculer les coefficients de corrélation se présentent comme suit :

r (critique) = 0.7067 avec un risque d'erreur = 5 %, $n = 8$ observations ;

P : correspond à la puissance de x , de l'équation linéaire de type $y = ax + b$

$ddl = (n - 1 - P) = (8 - 1 - 1) = 6$ et $n = 8$.

Il s'agit de comparer le r observé avec le r critique.

Les résultats du tableau XXV montrent qu'à l'état initial, le calcium présente une corrélation significative avec la salinité, par contre le magnésium, les chlorures et les sulfates, la corrélation est hautement significative.

Au stade maturation, la majorité des paramètres sont corrélés avec la salinité. Le calcium et le potassium présentent une corrélation hautement significative, les sulfates, les chlorures et les bicarbonates la corrélation est hautement significative.

Ces résultats suggèrent que pour les ions qui sont significativement corrélés avec le CE, les phénomènes de précipitations des minéraux ne semblent pas être importants dans ces conditions et dans cette gamme de salinité (0.33-2.74dS/m) (Daoudet *al.*, 1993).

Le coefficient de corrélation du pH avec la salinité n'est pas significatif à l'état initial par contre à l'état final, la corrélation est hautement significative.

Tableau XXV. Corrélation des éléments solubles avec la conductivité électrique

CE - éléments Stade tallage	Coefficient de Corrélation R	Signification à 5 %
Na ⁺ K ⁺ Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺ -- Cl ⁻ HCO ₃ ⁻	0.67 0.62 0.74 0.87 0.82 0.82	NS NS S HS S S NS
CE - pH	0.44	NS
C.E - éléments Stade maturation	Coefficient de corrélation R	Signification à 5 %
Na ⁺ K ⁺ Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺ -- Cl ⁻ HCO ₃ ⁻	0.67 0.94 0.92 0.42 0.70 0.70	NS HS HS NS S S S
CE - pH	0.92	HS

Conclusion

Au bout de deux années de mise en irrigation, l'évolution de la salinité (CE) et de la sodicité (SAR) entre le stade tallage et le stade maturation est faible. En effet, la comparaison des moyennes donne une différence non significative. En revanche, pour

les autres paramètres l'évolution est importante. Elle est marquée par un enrichissement de la solution du sol au stade maturation de tous les éléments chimiques et au niveau des deux horizons. Cette augmentation est statistiquement significative pour le sodium et les chlorures dans l'horizon 1, et pour le sodium et les bicarbonates dans l'horizon2.

La variabilité spatiale de la salinité au stade tallage est élevée dans l'horizon de surface, elle est faible dans l'horizon de subsurface. Au stade maturation, elle est faible au niveau des deux horizons. Quant à la variabilité verticale, les paramètres chimiques se distribuent d'une manière homogène au niveau des deux profondeurs à l'état initial et à l'état final

Le faciès géochimique de la solution du sol au stade tallage est sulfaté-sodique au niveau des deux horizons. Au stade maturation, il est sulfaté sodique dans l'horizon de surface, et sulfaté - calcique dans l'horizon de subsurface.

5. Evolution de la salinité à l'échelle d'une campagne agricole dans le Site 2

5.1. Etat Initial : Stade tallage

Ce site à été cultivé depuis déjà 2 années en blé. L'échantillonnage est réalisé au début de la 3^{ème} année, au stade tallage. Les résultats sont présentés dans le tableau XXVI.

Tableau XXVI. Les résultats analytiques des horizons 1 et 2

Horizons et rayons	PH	CE	SAR	K ⁺ meq/l	Na ⁺ meq/l	Ca ⁺⁺ meq/l	Mg ⁺⁺ meq/l	Cl ⁻ meq/l	SO ₄ ⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	Na ⁺ / K ⁺	Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻
H1(R1)	8.10	0.44	1.97	0.21	1.58	0.59	0.71	1.80	3.79	1.00	7.58	0.83	0.47
H1(R2)	8.25	0.24	1.54	0.16	0.95	0.41	0.34	1.00	1.42	1.00	5.91	1.19	0.70
H1(R3)	8.14	0.41	2.11	0.16	1.52	0.54	0.49	1.20	1.89	1.00	9.45	1.09	0.63
H1(R4)	8.15	0.33	1.55	0.16	1.08	0.53	0.43	2.00	2.37	1.10	6.69	1.24	0.84
H2(R1)	8.11	0.67	1.94	0.23	1.65	0.94	0.49	2.20	4.26	1.40	7.07	1.90	0.52
H2(R2)	8.05	0.39	1.53	0.18	0.95	0.43	0.34	1.45	2.84	1.00	5.14	1.25	0.51
H2(R3)	8.02	0.58	2.0	0.25	1.58	0.62	0.56	1.80	3.31	1.20	6.17	1.11	0.54
H2(R4)	8.05	0.50	1.77	0.25	1.20	0.53	0.39	1.50	3.80	1.00	4.68	1.34	0.39

5.1.1. Horizon 1

Les résultats du tableau XXVII montrent qu'au début de la de la 3^{ème} année de mise en culture soit au stade tallage, les irrigations ont conduit à une diminution significative de la salinité par rapport au site témoin.

Concernant le pH et le calcaire total, les valeurs obtenues sont très proches, les

différences ne sont pas significatives entre le témoin le site 2 au stade tallage.

Tableau XXVII Comparaison des moyennes au niveau de l'horizon 1 entre le témoin et le site 2

Paramètres chimiques	Témoin Horizon 1	Site 2 Horizon 1	Probabilité	Signification à 5 %
CE (dS/m)	0.51 □ 0.03	0.35 □ 0.08	0.01	DS
PH	7.76 □ 0.43	8.16 □ 0.06	0.12	NS
% CaCO ₃ total	11.99 □ 2.32	13.76 □ 1.02	0.21	NS

Le tableau XXVIII donne les résultats des caractéristiques chimiques de la solution du sol. Ils révèlent une prédominance du sodium et des sulfates et la distribution ionique se fait dans l'ordre suivant :

Cations : Na⁺ (52.15%) > Ca⁺⁺ (21.01%) > Mg⁺⁺ (20.04%) > K⁺ (7.03%).

Anions : SO₄⁻⁻ (48.40%) > Cl⁻ (30.64%) > HCO₃⁻ (20.94%).

Les données analytiques portées sur le diagramme de Piper donnent un faciès géochimique de la solution du sol mixte- sodique (figure 7).

le rapport Cl⁻ / SO₄⁻⁻ est compris entre 0.2 et 1, il confirme la prédominance des sulfates par rapport aux chlorures. Le rapport Ca⁺⁺ / Mg⁺⁺ > 1 est favorable à la prédominance du calcium dans la solution du sol.

Concernant la variabilité spatiale, la distribution des différents paramètres chimiques en fonction du coefficient de variation est la suivante .

Coefficient de variation faible : pH, K⁺ et HCO₃⁻

Coefficient de variation modéré : CE, SAR, Na⁺ / K⁺, Ca⁺⁺ / Mg⁺⁺, Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺

Coefficient de variation très élevé: Mg⁺⁺, SO₄⁻⁻, Cl⁻, Cl⁻ / SO₄⁻⁻

Tableau XXIX. Les paramètres statistiques descriptifs de l'horizon 1

Paramètres chimiques	Moyenne	Ecart type	Coefficient de Variation en %
PH	8.16	0.06	0.73
CE	0.35	0.08	22.53
SAR	1.80	0.28	15.60
Na ⁺ / K ⁺	7.40	1.52	20.52
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.09	0.18	16.52
Na ⁺	1.28	0.31	24.16
K ⁺	0.17	0.02	11.56
Ca ⁺⁺	0.52	0.07	13.53
Mg ⁺⁺	0.49	0.15	30.42
SO ₄ ⁻⁻	2.37	1.02	43.05
Cl ⁻	1.50	0.47	31.33
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.66	0.15	22.62
HCO ₃ ⁻	1.02	0.05	4.87

5.1.2. Horizon 2

La composition ionique de la solution du sol est caractérisée par une légère augmentation de la salinité par rapport au témoin. Le sodium prédomine avec 50.67 % par rapport à la somme des cations et les sulfates prédominent avec 55.18 % par rapport à la somme des anions. Le cortège ionique se distribue comme suit :

Cations: Na^+ (50.67%) > Ca^{++} (23.77%) > Mg^{++} (16.85%) > K^+ (8.76%)

Anions: SO_4^{--} (55.18%) > Cl^- (26.96%) > HCO_3^- (17.85%).

Les données analytiques portées sur le diagramme de Piper enregistrent un faciès géochimique de la solution sulfaté sodique (figure 7).

Le rapport $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$ est compris entre 0.2 et 1, il confirme la prédominance des sulfates par rapport aux chlorures. Le rapport $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++} > 1$ est favorable à la prédominance du calcium dans la solution du sol .

Les résultats tableau XXX montrent que la variabilité spatiale des paramètres chimiques se caractérise par :

Un coefficient de variation faible pour le pH,

Un coefficient de variation modéré pour le SAR, CE, Na^+ / K^+ , $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$,

Na^+ , K^+ , Mg^{++} , SO_4^{--} , Cl^- , HCO_3^- , $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$

Un coefficient de variation très élevé pour le Ca^{++}

Tableau XXX. Les paramètres statistiques descriptifs de l'horizon 2

Paramètres chimiques	Moyenne	Ecart type	Coefficient de Variation (%)
PH	8.05	0.03	0.37
CE	0.535	0.11	20.56
SAR	1.82	0.23	12.59
Na^+ / K^+	5.76	1.06	18.38
$\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$	1.40	0.35	25.00
Na^+	1.35	0.32	23.75
K^+	0.23	0.03	12.87
Ca^{++}	0.63	0.22	34.92
Mg^{++}	0.45	0.09	20.08
SO_4^{--}	3.55	0.61	17.51
Cl^-	1.74	0.34	19.57
$\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$	0.49	0.06	12.24
HCO_3^-	1.15	0.19	16.52

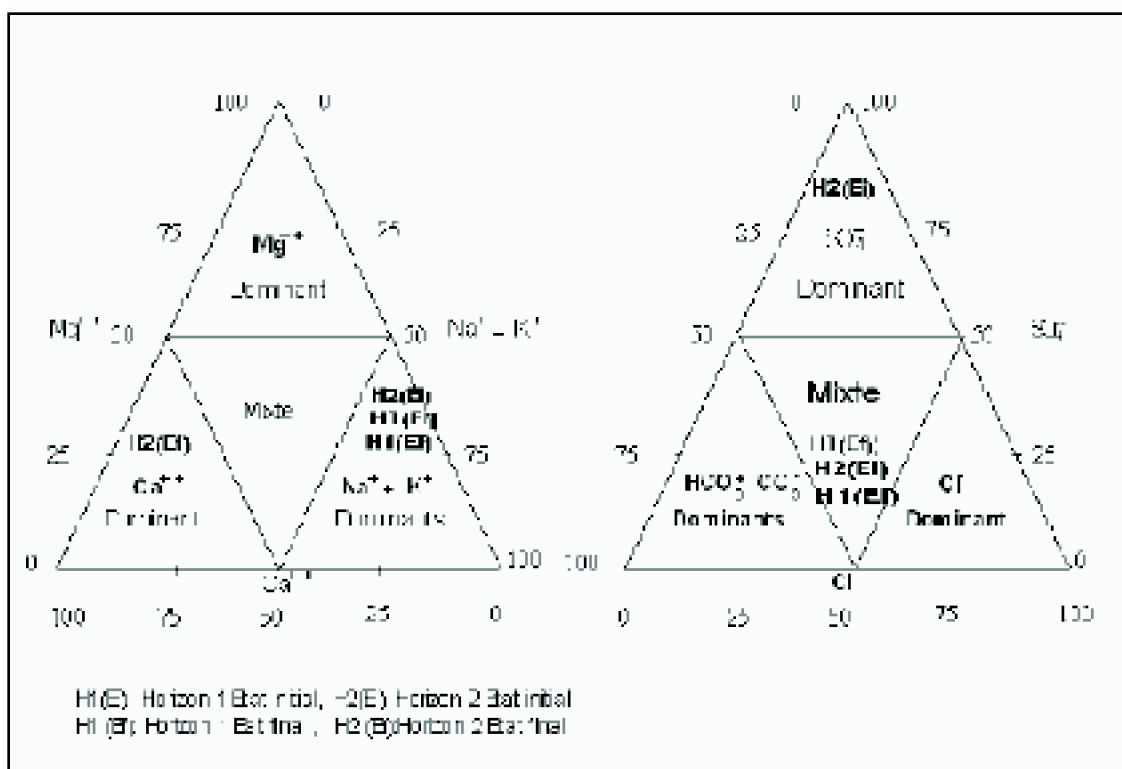


Figure 7. Diagramme de PIPER pour les solutions du sol du site2

5.1.3. La variabilité verticale

Concernant la variabilité verticale des paramètres chimiques, les résultats de la comparaison des moyennes entre les horizons 1 et 2 sont présentés dans le tableau XXXI. Il ressort, que pour la majorité des paramètres chimiques, la probabilité calculée est supérieur 5 %. Ce résultat signifie que la différence n'est pas significative. Seul le pH et le Potassium présentent une différence significative entre l'horizon 1 et l'horizon 2.

Tableau XXXI. La comparaison des moyennes entre l'horizon 1 et l'horizon 2

EVOLUTION DE LA SALINITE DES SOLS IRRIGUES DANS UNE REGION SAHARIENNE.

Paramètres Chimiques	Moyennes Horizon 1	Ecart type	Moyenne Horizon 2	Ecart type	Probabilité	Signification à 5%
pH	8.16	0.06	8.05	0.04	0.03	DS
CE	0.35	0.09	0.53	0.12	0.05	NS
SAR	1.80	0.28	1.83	0.23	0.88	NS
Na ⁺ / K ⁺	7.40	1.52	5.76	1.06	0.13	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.09	0.18	1.40	0.35	0.16	NS
Na ⁺	1.28	0.31	1.35	0.33	0.79	NS
K ⁺	0.17	0.02	0.23	0.03	0.03	DS
Ca ⁺⁺	0.52	0.08	0.63	0.22	0.37	NS
Mg ⁺⁺	0.49	0.15	0.45	0.09	0.63	NS
SO ₄ ⁻⁻	2.37	1.02	3.55	0.61	0.09	NS
Cl ⁻	1.50	0.47	1.74	0.34	0.45	NS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.66	0.15	0.49	0.06	0.08	NS
HCO ₃ ⁻	1.02	0.05	1.15	0.19	0.25	NS

Conclusion

Au stade tallage, dans l'horizon supérieur, le niveau de salinité est faible par rapport au témoin et la différence est statistiquement significative. Au niveau de l'horizon 2, une faible augmentation est enregistrée pour la salinité (C.E) et la sodicité (SAR). Le pH varie de 8.16 à 8.05 et statistiquement la différence est significative.

D'autre part, la composition ionique de la solution du sol présente des caractéristiques comparables au niveau des deux horizons. Le sodium et les sulfates sont les ions prédominants. Toutefois, une accumulation en potassium est enregistrée dans l'horizon 2 avec une différence significative par rapport à l'horizon 1. La majorité des paramètres chimiques se distribuent d'une manière homogène dans les deux horizons. Toutefois le potassium enregistre des teneurs élevées dans l'horizon 2 et la différence est significative.

La variabilité spatiale de la salinité est modérée au niveau des deux horizons. Le faciès géochimique de la solution du sol est mixte sodique pour l'horizon 1 et Sulfaté sodique pour l'horizon 2.

5.2. Etat Final : Stade maturation

Les résultats des analyses chimiques qui correspondent au stade maturation, du site cultivé pour la 3^{ème} année sont présentés dans le tableau XXXII.

Tableau XXXII. Les résultats analytiques des horizons 1 et 2

Horizons et Rayons	pH	CE	SAR	K ⁺ meq/l	Na ⁺ meq/l	Ca ⁺⁺ meq/l	Mg ⁺⁺ meq/l	Cl ⁻ meq/l	SO ₄ ⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	Na ⁺ / K ⁺	Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	Cl ⁻ / SO ₄ ⁻
H1(R1)	7.66	1.55	3.22	0.363	2.97	0.95	0.75	4.16	3.53	2.40	8.18	1.28	1.18
H1(R2)	8.22	0.60	1.53	0.21	1.37	0.99	0.61	2.30	2.64	2.70	6.59	1.62	0.87
H1(R3)	7.84	0.65	1.51	0.28	1.37	0.92	0.71	1.85	5.30	2.20	4.81	1.30	0.35
H1(R4)	7.55	0.94	1.89	0.28	1.77	1.03	0.75	2.15	6.77	2.10	6.21	1.38	0.32
H2(R1)	8.00	1.30	2.57	0.36	2.77	1.44	0.88	3.80	4.41	2.30	7.63	1.64	0.86
H2(R2)	7.08	0.50	2.03	0.13	1.23	0.43	0.31	1.76	2.35	2.00	9.47	1.39	0.74
H2(R3)	7.87	0.93	1.50	0.36	1.24	0.62	0.75	2.36	3.53	2.20	3.42	0.83	0.67
H2(R4)	7.60	3.57	0.77	0.44	2.10	13.30	1.62	2.63	5.72	1.60	4.76	8.19	0.45

5.2.1. Horizon 1

Les résultats du tableau XXXIII, montrent qu'en fin de cycle végétatif, une augmentation de la salinité est enregistrée dans l'horizon supérieur par rapport au site témoin; bien que statistiquement, cette augmentation n'est pas significative car la probabilité calculée est supérieur à 5%. Les valeurs obtenues pour le pH et le calcaire total, sont également comparables à ceux du témoin (tableau XXXIII)

Tableau XXXIII. Comparaison des moyennes entre le témoin et le site 2

Paramètres chimiques	Témoin Horizon 1	Site 2 Horizon 1	Probabilité	Signification à 5 %
CE (dS/m)	0.51 □ 0.03	0.93 □ 0.43	0.10	NS
pH	7.76 □ 0.43	7.81 □ -0.29	0.85	NS
CaCO3 total %	11.99 □ 2.32	13.33 □ 0.09	0.55	NS

Les résultats de la composition chimique de la solution du sol de l'horizon 1 sont présentés dans le tableau XXXIV. Elle est caractérisée par une prédominance du sodium avec 48.81 % par rapport à la somme des cations, et les sulfates prédominent à 47,86% par rapport à la somme des anions. Les différents ions se distribuent dans l'ordre suivant :

Cations : Na⁺ (48.81%) > Ca⁺⁺ (25.38%) > Mg⁺⁺ (18.36%) > K⁺ (7.43%)

Anions : SO₄⁻ (47.86 %) > Cl⁻ (27.45 %) > HCO₃⁻ (24.67 %)

Les données analytiques portées sur le diagramme de Piper déterminent le faciès géochimique de la solution du sol, il est mixte sodique (figure 7).

Le rapport Cl⁻ / SO₄⁻ est compris entre 0.2 et 1, il confirme la prédominance des sulfates par rapport aux chlorures. Le rapport Ca⁺⁺ / Mg⁺⁺ > 1 est favorable à la prédominance du calcium dans la solution du sol.

Le coefficient de variation présente la répartition suivante (tableau XXXIV) :

Coefficient de variation faible : pH, Ca⁺⁺ / Mg⁺⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, et HCO₃⁻

Coefficient de variation modéré : Na⁺ / K⁺, K⁺,

Coefficient de variation très élevé : CE, SAR, Na⁺, SO₄⁻, Cl⁻, Cl⁻ / SO₄⁻

Tableau XXXIV. Les paramètres statistiques descriptifs de l'horizon 1 de l'état final

Paramètres chimiques	Moyenne	Ecart type	Coefficient de Variation en %
pH	7.81	0.29	3.71
CE	0.93	0.43	45.98
SAR	2.04	0.80	39.27
Na^+ / K^+	6.447	1.38	21.40
Ca^{++} / Mg^{++}	1.39	0.15	10.79
Na^+	1.871	0.75	40.08
K^+	0.28	0.06	21.05
Ca^{++}	0.97	0.04	4.11
Mg^{++}	0.70	0.06	8.52
SO_4^{--}	4.56	1.84	40.35
Cl^-	2.61	1.04	39.77
Cl^- / SO_4^{--}	0.68	0.41	60.47
HCO_3^-	2.35	0.26	11.06

5.2.2. Horizon 2

Les résultats du tableau XXXV montrent, une augmentation de la salinité par rapport au témoin. la solution du sol se caractérise une prédominance du calcium qui représente 56,45 % par rapport à la somme des cations et des sulfates restent dominants à 46.18% . la distribution ionique se fait dans l'ordre suivant :

Cations : Ca^{++} (56.45%) > Na^+ (26.26%) > Mg^{++} (12.58%) > K^+ (4.63%) .

Anions : SO_4^{--} (46.18%) > Cl^- (30.45 %) > HCO_3^- (23.38 %).

Les résultats analytiques portés sur le diagramme de Piper déterminent le faciès géochimique de la solution du sol, il est mixte calcique (figure 7).

Le rapport Cl^- / SO_4^{--} est compris entre 0.2 et 1, il confirme la prédominance des sulfates par rapport aux chlorures. Le rapport $Ca^{++} / Mg^{++} = 3,0.1 > 1$ est favorable à la prédominance du calcium dans la solution du sol.

Le coefficient de variation obtenu pour les paramètres chimiques, est le suivant (tableau XXXV)

Coefficient de variation faible : pH

Coefficient de variation modéré : Cl^- / SO_4^{--} , et HCO_3^-

Coefficient de variation très élevé: CE, SAR, Na^+ / K^+ , Ca^{++} / Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^{--} et Cl^- .

Tableau XXXV. Les paramètres statistiques descriptifs de l'horizon 2

Paramètres chimiques	Moyenne	Ecart type	Coefficient de Variation %
PH	7.64	0.40	5.23
CE	1.58	1.36	86.34
SAR	1.72	0.77	44.79
Na ⁺ / K ⁺	6.32	2.73	43.18
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	3.01	3.46	114.8
Na ⁺	1.84	0.74	40.30
K ⁺	0.32	0.13	40.12
Ca ⁺⁺	3.95	6.25	158.38
Mg ⁺⁺	0.89	0.54	60.81
SO ₄ ⁻⁻	4.00	1.42	35.45
Cl ⁻	2.64	0.85	32.23
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.68	0.17	24.96
HCO ₃ ⁻	2.02	0.30	14.81

5.2.3. La variabilité verticale

Le paramètre statistique retenu pour l'étude des variations verticales entre l'horizon 1 et l'horizon 2 est la comparaison des moyennes. Pour tous les paramètres chimiques analysés, les résultats du tableau XXXVI enregistrent une probabilité supérieur à 5 %. Ce résultat signifie que la différence des moyennes des paramètres chimiques des horizons 1 et 2 n'est pas significative .

Tableau XXXVI. Comparaison des moyennes entre l'horizon (1) et l'horizon (2) de l'état final

Paramètres	Moyennes Horizon 1	Ecart type	Moyenne Horizon 2	Ecart type	Probabilité	Signification à 5%
PH	7.81	0.29	7.64	0.40	0.50	NS
CE	0.93	0.43	1.57	1.36	0.40	NS
SAR	2.04	0.80	1.72	0.77	0.59	NS
Na ⁺ / K ⁺	6.45	1.38	6.32	2.73	0.93	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.39	0.15	3.01	3.46	0.38	NS
Na ⁺	1.87	0.75	1.84	0.74	0.94	NS
K ⁺	0.28	0.06	0.32	0.13	0.61	NS
Ca ⁺⁺	0.97	0.04	3.95	6.25	0.37	NS
Mg ⁺⁺	0.70	0.06	0.89	0.54	0.52	NS
SO ₄ ⁻⁻	4.56	1.84	4.00	1.42	0.65	NS
Cl ⁻	2.61	1.04	2.64	0.85	0.97	NS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.68	0.41	0.68	0.17	0.99	NS
HCO ₃ ⁻	2.35	0.26	2.02	0.30	0.161	NS

5.3. Comparaison entre l'Etat initial et l'Etat final de l'horizon 1

L'objectif de cette comparaison est d'évaluer l'évolution de l'état de salinité et ses paramètres entre l'état initial et l'état final. Le graphique est représenté dans la figure 8.

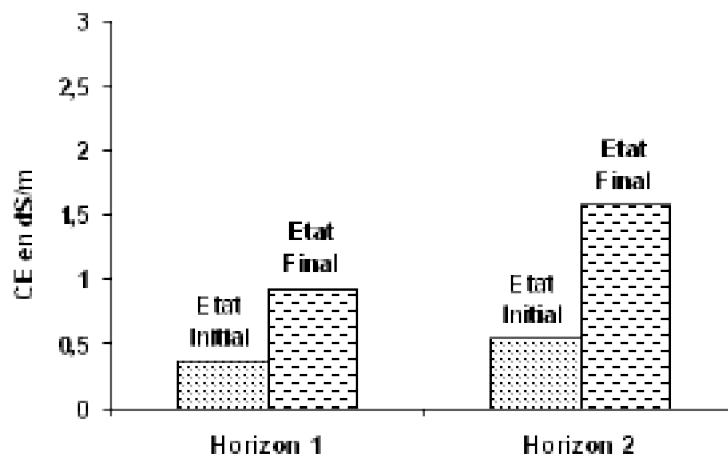


Figure 8. Evolution de la salinité (Extrait aqueux 1 / 2) entre l'état initial (stade tallage) à l'état final (stade maturation)

5.3.1. Horizon 1

La comparaison des moyennes entre l'état initial et l'état final au niveau de l'horizon 1, enregistre une augmentation significative (tableau XXXVI) de la salinité (CE), du calcium, du magnésium, du potassium, des bicarbonates et le rapport Ca^{++} / Mg^{++} ; les autres paramètres varient peu entre l'état initial et l'état final

Tableau XXXVII. Comparaison entre l'Etat initial et l'Etat final de l'horizon

Paramètres	Moyenne Etat initial	Ecart type	Moyenne Etat final	Ecart type	Probabilité	Signification à 5%
pH	8.16	0.06	7.91	0.29	0.06	NS
CE	0.35	0.08	0.93	0.43	0.04	DS
SAR	1.79	0.28	2.03	0.80	0.59	NS
Na^{+} / K^{+}	7.40	1.52	6.45	1.38	0.38	NS
Ca^{++} / Mg^{++}	1.09	1.80	1.39	0.15	0.04	DS
Na^{+}	1.28	0.31	1.871	0.75	0.20	NS
K^{+}	0.17	0.02	0.28	0.06	0.01	DS
Ca^{++}	0.52	0.07	0.97	0.04	0.00	THS
Mg^{++}	0.49	0.15	0.70	0.06	0.04	DS
SO_4^{--}	2.37	1.02	4.56	1.84	0.08	NS
Cl^{-}	1.50	0.47	2.61	1.04	0.10	NS
Cl^{-} / SO_4^{--}	0.66	0.15	0.68	0.41	0.94	NS
HCO_3^{-}	1.02	0.05	2.35	0.26	0.00	THS

5.3.2. Horizon 2

Le tableau XXXVIII donnent les résultats de la comparaison des moyennes ente l'état initial et l'état final au niveau de l'horizon 2. Il ressort, une augmentation des valeurs de la salinité et de tous ses paramètres à l'état final, bien que statistiquement cette augmentation n'est pas significative car la probabilité calculée est supérieur à 5%. Seuls les bicarbonates présentent une augmentation hautement significative à l'état final.

Tableau XXXVIII Comparaison entre l'Etat initial et l'Etat final de l'horizon 2

Paramètres	Moyenne Etat initial	Ecart type	Moyenne Etat final	Ecart type	Probabilité	Signification à 5%
pH	8.05	0.03	7.64	0.40	0.08	NS
CE	0.53	0.11	1.57	1.36	0.18	NS
SAR	2.73	0.32	1.72	0.77	0.05	NS
Na ⁺ / K ⁺	5.76	1.06	6.32	2.73	0.71	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.21	0.23	3.01	3.46	0.33	NS
Na ⁺	1.35	0.32	1.83	0.74	0.27	NS
K ⁺	0.23	0.03	0.32	0.13	0.23	NS
Ca ⁺⁺	0.63	0.22	3.95	6.25	0.32	NS
Mg ⁺⁺	0.45	0.09	0.89	0.54	0.16	NS
SO ₄ ⁻⁻	3.55	0.61	4.00	1.42	0.58	NS
Cl ⁻	1.74	0.34	2.64	0.85	0.09	NS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.49	0.06	0.68	0.17	0.08	NS
HCO ₃ ⁻	1.15	0.19	2.02	0.30	0.00	DHS

5. 4. Corrélation entre la conductivité électrique et les éléments en solution

Les paramètres statistiques qui permettent de calculer les coefficients de corrélation se présentent comme suit : n = 8, p = 1 correspond à la puissance de x égale à 1 de l'équation de corrélation linéaire de type y = ax + b, ddl = (n- 1 - P) = (8 - 1- 1)= 6 et r (critique) = 0.7067. Les résultats des corrélations de la conductivité électrique avec les autres éléments de la salinité sont présenté dans le tableau XXXVIII.

A l'état initial soit au stade tallage, le sodium, le potassium, les sulfates et les bicarbonates présentent une corrélation significative avec la conductivité électrique ; la corrélation est hautement significative pour le calcium. En revanche, le magnésium, les chlorures présentent une corrélation non significative.

A l'état final, soit au stade maturation, le potassium présente une corrélation significative avec la CE. Le calcium et le magnésium sont très bien corrélés avec la CE et la corrélation est très hautement significative. En revanche, les sulfates et les chlorures présentent une corrélation non significative.

Ces résultats signifient que les ions corrélés significativement avec la CE augmentent d'une manière significative avec la CE, demeurent en solution et ne semblent pas participer aux phénomènes de précipitations.

EVOLUTION DE LA SALINITE DES SOLS IRRIGUES DANS UNE REGION SAHARIENNE.

Le pH présente une corrélation non significative ; Ce qui signifie que la salinité n'influe pas vraiment sur les variation du pH à l'état initial et à l'état final.

Tableau XXXIX Corrélation entre CE et les éléments de la salinité

CE- éléments solubles Stade tallage	Coefficient de corrélation r	Signification à 5%
Na ⁺ K ⁺ Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺ SO ₄ ⁻ Cl ⁻ HCO ₃ ⁻	0.75 0.81 0.84 0.41 0.83 0.64	NS NS NS S NS S
CE – pH	0.43	NS
CE - éléments solubles Stade maturation	Coefficient de corrélation r	Signification à 5 %
Na ⁺ K ⁺ Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺ SO ₄ ⁻ Cl ⁻ HCO ₃ ⁻	0.45 0.75 0.94 0.94 0.41 0.33	NS NS THS THS NS NS NS
CE – pH	0.54	NS

5.5. Mesure de l'humidité dans le sol entre deux irrigations

Les mesures des profils hydriques ont été réalisées en fin avril au stade maturation. L'échantillonnage a été réalisé 1 /2 heure avant et après irrigation, sur deux profondeurs H1 = 0- 20 cm et H2 20 – 40 cm, du centre vers la périphérie du pivot. Cinq profils hydriques (P1, P2, P3, P4 et P5,) ont été échantillonnés. Chaque profil échantillonné au niveau de chaque travet du centre vers la périphérie du pivot.

L'objectif est de caractériser l'efficacité de la pratique actuelle des irrigations au niveau de la parcelle au stade maturation (en fin de culture). Il est important de préciser que cette mesure est ponctuelle est n'est pas représentative de la conduite des irrigations durant tout le cycle végétatif du blé.

Les résultats (tableau XXXX) mettent en évidence un déficit hydrique enregistré au niveau des 5 profils à la fin du cycle végétatif du blé. La dose ainsi programmée n'est pas suffisante pour ramener les deux profondeurs à la capacité au champ. Il s'agit d'une mesure ponctuelle qui n'est pas représentatif de l'état hydrique pendant la durée du cycle végétatif du blé.

Les teneurs en eau enregistrées sont très inférieurs à la teneur en eau à la capacité de rétention. Des résultats similaires ont été obtenus au niveau du site 3, où les mesures de l'humidité ont été réalisées sur uniquement trois profils à la même période. Ces résultats obtenus Corroborent ceux de Attalah (2000) qui a mit en évidence un déficit hydrique au niveau de l' horizon de surface durant la période mars– Avril. Selon le même auteur, ce déficit hydrique s'explique par une perte en eau de l'ordre 30 % du volume d'arrosage avant d'arriver au sol.

Ces résultats suggèrent que la pratique actuelle des irrigations au niveau des périmètres irrigués à Adrar n'est pas maîtrisé, elle se fait d'une manière très empirique.

Tableau XXXX. Teneurs en eau (%) avant et après irrigation au stade maturation

Horizons	Teneur en eau	Teneur en	Teneur en eau (%)	Teneur en eau
----------	---------------	-----------	-------------------	---------------

	(%) avant irrigation	eau (%) pF = 4.2	après irrigation	(%) pF = 2.2
Horizon 1 (P1) Horizon 2	5.65 6.1	12.11 11.6	12.53 10.12	21.22 21.54
Horizon 1 (P2) Horizon 2	7.16 7.8	12.11 11.6	12.3 8.6	21.22 21.54
Horizon 1 (P3) Horizon 2	3.8 3.2	12.11 11.6	9.4 6.8	21.22 21.54
Horizon 1 (P4) Horizon 2	5.26 3.45	12.11 11.6	9.01 6.88	21.22 21.54
Horizon 1 (P5) Horizon 2	4.2 4.34	12.11 11.6	10.37 7.9	21.22 21.54

Conclusion

La mise en irrigation pour la troisième année du site 2, a conduit au stade tallage dans l'horizon de surface à une diminution de la salinité par rapport au témoin. Une légère augmentation est enregistrée dans l'horizon subsurface,.

Au stade maturation, l'état de salinité est élevé dans l'horizon supérieur et la différence par rapport au stade tallage est significative. Cette augmentation de la salinité s'est traduite par un enrichissement de la solution du sol en potassium, en calcium, en magnésium, et en bicarbonates. Au niveau de l'horizon de subsurface, la variation de la salinité est faible entre le stade tallage et le stade maturation, et statistiquement elle n'est pas significative.

La sodicité (SAR), présente de faibles valeurs et varie peu au niveau des deux horizons et entre l'état initial et l'état final.

La variabilité spatiale de la salinité, est modérée au stade tallage et élevée au stade maturation. Quant à la variabilité verticale, la salinité se distribue d'une manière relativement homogène entre les deux profondeurs à l'état initial et à l'état final.

Le faciès géochimique de la solution du sol à l'état initial est mixte sodique à sulfaté sodique. A l'état final, le faciès la solution est sulfaté mixte à mixte sodique.

un déficit hydrique est enregistré au niveau des 5 profils de la parcelle au stade maturation du blé. La dose ainsi programmé est très suffisante pour ramener les deux profondeurs à la capacité au champ.

6. Evolution de la salinité à l'échelle d'une campagne agricole dans le Site 3

Ce site à été cultivé depuis déjà 3 années en blé. L'échantillonnage est réalisé au début

de la 4^{ème} année, au stade tallage. Les résultats sont présentés dans le tableau XXXXI.

Tableau XXXXI. Les résultats analytiques des horizons 1 et 2

Horizon et rayons	pH	CE dS/m	SAR	K ⁺ meq/l	Na ⁺ meq/l	Ca ⁺⁺ meq/l	Mg ⁺⁺ meq/l	Cl ⁻ /meq/l	SO ₄ ⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	Na ⁺ / K ⁺	Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻
H1(R1)	8.30	0.46	4.39	0.17	1.31	0.68	0.45	1.3	2.40	1.10	7.50	1.52	0.54
H1(R2)	7.87	2.61	1.92	0.34	3.10	3.58	1.85	2.00	33.82	1.20	9.21	1.93	0.05
H1(R3)	8.24	1.91	1.52	0.31	2.18	2.23	1.85	2.00	8.98	1.00	6.87	1.20	0.22
H1(R4)	8.03	0.98	1.65	0.21	1.43	0.33	1.17	1.30	5.40	1.00	6.61	0.21	0.24
H2(R1)	8.25	1.62	1.89	0.34	2.10	1.70	0.77	3.40	11.37	1.00	6.08	2.21	0.29
H2(R2)	7.74	3.16	3.46	0.43	4.23	1.90	1.08	4.00	14.67	1.10	9.81	1.74	0.27
H2(R3)	8.00	2.07	3.20	0.34	3.62	1.56	0.98	2.70	12.50	1.00	10.49	1.58	0.21
H2(R4)	8.00	1.64	2.71	0.33	2.57	0.90	0.90	2.70	12.27	1.10	7.67	1.01	0.22

6.1. Etat initial : Stade tallage

6.1.1. Horizon 1

La comparaison des moyennes présentée dans le tableau XXXXII, montre que la conductivité électrique des deux sites est comparable et la différence est non significative. Bien que la salinité du site 3 est trois fois supérieurs à celle du témoin. En revanche, les teneurs en calcaire total du site 3 sont très élevées par rapport au témoin et la différence est hautement significative. Les valeurs du pH restent dans le domaine de l'alcalinité.

Tableau XXXXII. Comparaison des moyennes entre le témoin et le site 3

Paramètres chimiques	Témoin Horizon 1	Site 3 (4 ans) Horizon 1	Probabilité	Signification à 5 %
CE (ds/m)	0.516 □ 0.03	1.49 □ 0.95	0.08	NS
pH	7.76 □ 0.43	8.11 □ 0.19	0.20	NS
% CaCO ₃ total	11.99 □ 2.32	17.01 □ 3.22	0.00	DHS

Le tableau XXXXIII, présente les résultats de la composition chimique de la solution du sol, dans l'horizon 1 au stade tallage. Elle se caractérise, par une augmentation de la conductivité électrique, un faible SAR et un pH alcalin.

Les ions qui prédominent dans la solution du sol sont le sodium et les sulfates.

La distribution ionique sont fait dans l'ordre suivant :

Cations : Na⁺ (38.03%) > Ca⁺⁺ (32.03 %) > Mg⁺⁺ 25 %) > K⁺ (4.93 %),

Anions: SO₄⁻⁻ (82.41 %) > Cl⁻ (10.74 %) > HCO₃⁻ (6.84 %).

Les données analytiques portées sur le diagramme de Piper (figure 9) déterminent le faciès géochimique de la solution du sol, il est sulfaté-mixte.

Le rapport $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$ est compris entre 0.2 et 1, il confirme la prédominance des sulfates par rapport aux chlorures. Le rapport $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++} > 1$ est favorable à la prédominance du calcium dans la solution du sol.

La distribution des paramètres chimiques en fonction du coefficient de variation se fait comme suit (tableau XXXXIII) :

Coefficient de variation faible : pH, et HCO_3^-

Coefficient de variation modéré : Cl^-

Coefficient de variation très élevé : CE, SAR, Na^+ / K^+ , $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$, Mg^{++} , SO_4^{2-} et $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$

Tableau XXXXIII. Les paramètres statistiques descriptifs de l'horizon 1

Paramètres chimiques	Moyennes	Ecart type	Coefficient de Variation en %
PH	8.11	0.19	2.34
CE	1.50	0.95	63.33
SAR	2.37	1.35	56.84
Na^+ / K^+	7.55	1.17	15.5
$\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$	1.22	0.73	59.88
Na^+	2.03	0.85	41.91
K^+	0.26	0.08	30.41
Ca^{++}	1.71	1.50	87.82
Mg^{++}	1.33	0.67	50.26
SO_4^{--}	12.65	14.36	113.5
Cl^-	1.65	0.40	24.24
$\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$	0.27	0.20	74.34
HCO_3^-	1.07	0.09	8.37

6.1.2. Horizon 2

Les caractéristiques chimiques de la solution du sol de l'horizon 2 sont présentées dans le tableau XXXIV. Ils sont comparables à celles de l'horizon de surface. Une augmentation de la CE est enregistrée par rapport au témoin, un SAR faible et un pH alcalin.

Une prédominance du sodium et des sulfates par rapport aux autres ions dans la solution du sol est enregistrée. La distribution ionique se fait dans l'ordre suivant :

Cations : Na^+ (52.71%) > Ca^{++} (25.48%) > Mg^{++} (15.67%) > K^+ (6.12%) .

Anions : SO_4^{--} (74.93 %) > Cl^- (18.87 %) > HCO_3^- (6.19 %) .

Le rapport $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$ est compris entre 0.2 et 1, il confirme la prédominance des sulfates par rapport aux chlorures. Le rapport $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++} > 1$ est favorable à la prédominance du calcium dans la solution du sol.

Les données analytiques portées sur le diagramme de Piper déterminent le faciès

géochimique de la solution du sol, il est sulfaté sodique (figure 9).

La variabilité spatiale des paramètres chimiques est la suivante :

Coefficient de variation faible : pH, K^+ et SO_4^{--}

Coefficient de variation modéré : SAR, , Na^+ / K^+ .

Coefficient de variation élevé : Ca^{++} / Mg^{++} , Cl^- / SO_4^{--} , Cl^- , Mg^{++} , HCO_3^- , CE, Na^+ , et Ca^{++} .

Tableau XXXIV. Les paramètres statistiques descriptifs de l'horizon 2

Paramètres chimiques	Moyenne	Ecart type	Coefficient de variation %
PH	8	0.20	2.50
CE	2.12	0.72	33.96
SAR	2.82	0.69	24.47
Na^+ / K^+	8.52	2.01	23.6
Ca^{++} / Mg^{++}	1.64	0.5	30.52
Na^+	3.13	0.97	30.95
K^+	0.36	0.04	10.98
Ca^{++}	1.51	0.43	28.49
Mg^{++}	0.93	0.13	13.94
SO_4^{--}	12.70	1.39	10.94
Cl^-	3.20	0.62	19.37
Cl^- / SO_4^{--}	0.25	0.04	15.93
HCO_3^-	1.05	0.05	4.76

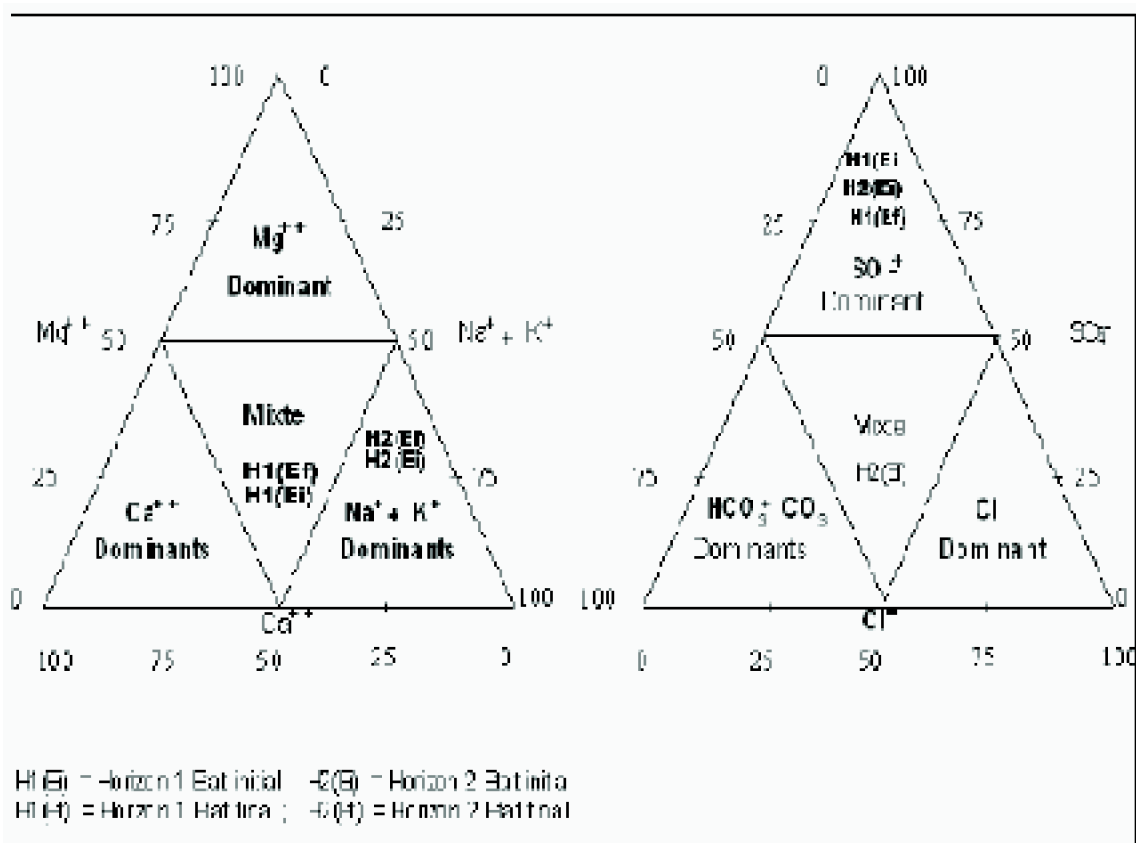


Figure 9. Diagramme de PIPER pour les solutions du sol du site 3

6.1.3. La variabilité verticale

La distribution verticale des paramètres chimiques se fait d'une manière homogène entre l'horizon 1 et l'horizon 2. La comparaison des moyennes donne une différence non significative ; exception faites pour les chlorures qui enregistrent une accumulation importante dans l'horizon 2 et la différence est significative (tableau XXXXV).

Tableau XXXXV. Comparaison des moyennes entre l'horizon 1 et l'horizon 2

EVOLUTION DE LA SALINITE DES SOLS IRRIGUES DANS UNE REGION SAHARIENNE.

Facteur de Variation	Moyennes Horizon 1	Ecart type	Moyenne Horizon 2	Ecart type	Probabilité	Signification à 5%
PH	8.11	0.19	8	0.20	0.46	NS
CE	1.50	0.95	2.12	0.72	0.33	NS
SAR	2.37	1.35	2.81	0.70	0.58	NS
Na^+ / K^+	7.55	1.17	8.51	2.01	0.43	NS
$\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$	1.21	0.73	1.63	0.50	0.38	NS
Na^+	2.02	0.85	3.13	0.97	0.13	NS
K^+	0.26	0.08	0.36	0.04	0.07	NS
Ca^{++}	1.70	1.50	1.51	0.43	0.81	NS
Mg^{++}	1.33	0.67	0.93	0.13	0.28	NS
SO_4^{--}	12.65	14.36	12.70	1.39	0.99	NS
Cl^-	1.65	0.40	3.20	0.62	0.00	DS
$\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$	0.26	0.20	0.25	0.04	0.89	NS
HCO_3^-	1.07	0.09	1.05	0.05	0.67	NS

Conclusion

La mise en irrigation du site cultivé pour la 4^{ème} année au stade tallage enregistre une faible augmentation de la salinité au niveau de l'horizon 1 et l'horizon 2 car statistiquement elle n'est pas significative. La distribution des paramètres chimiques se fait d'une manière homogène et les valeurs sont comparables.

Le faciès géochimique de la solution du sol est sulfaté-mixte au niveau de l'horizon 1 et sulfaté-sodique au niveau de l'horizon 2.

L'analyse de la variabilité spatiale de la salinité est élevée dans les deux horizons.

6.2. Etat Final : Stade maturation

A la fin du cycle végétatif du blé, qui correspond au stade maturation, les résultats des analyses chimiques sont présentés dans le tableau XXXXVI.

Horizon et points	pH	CE dS/m	SAR	K ⁺ meq/l	Na ⁺ meq/l	Ca ⁺⁺ meq/l	Mg ⁺⁺ meq/l	Cl ⁻ meq/l	SO ₄ ⁻ meq/l	HCO ₃ ⁻ meq/l	Na ⁺ EC ⁺	Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺	Cl ⁻ / SO ₄ ⁻
H1(H1)	7.82	3.63	2.43	0.44	5.72	9.22	1.82	12.6	17.64	3.00	12.90	5.06	0.71
H1(H2)	7.89	2.41	2.40	0.36	4.69	4.68	2.94	9.50	11.76	2.20	12.92	1.59	0.80
H1(H3)	7.90	2.49	2.68	0.44	4.89	3.77	2.88	8.90	12.6	2.90	11.08	1.30	0.70
H1(H4)	8.14	1.44	2.98	0.44	3.97	1.85	1.67	6.00	12.47	3.10	9.00	1.10	0.48
H2(H1)	7.83	1.90	1.79	0.44	3.14	3.79	2.30	6.2	10.64	1.60	7.12	1.64	0.58
H2(H2)	7.66	2.42	3.12	0.51	5.00	2.88	2.23	11.6	8.96	2.60	9.65	1.28	1.29
H2(H3)	7.74	1.56	2.34	0.44	3.24	2.01	1.81	7.10	3.64	1.60	7.34	1.11	1.95
H2(H4)	7.73	2.20	3.30	0.51	6.44	1.44	1.50	10.6	4.76	2.40	12.43	0.95	2.22

Tableau XXXXVI. Les résultats analytiques des horizons 1 et 2

6.2.1. Horizon 1

Les résultats du tableau XXXXVII montrent qu'à l'état final, le sol cultivé pour la 4^{ème} année enregistre une accumulation importante en sels solubles au niveau de l'horizon de surface. La comparaison des moyennes avec le témoin donne une différence hautement significative. Le pH et le calcaire total varie peu par rapport au témoin.

Tableau XXXXVII. Comparaison des moyennes entre le témoin et le site 3

Paramètres chimiques	Témoin Horizon 1	Site 3 Horizon 1	Probabilité	Signification à 5 %
CE (dS/m)	0.516 □ 0.03	2.49 □ 0.89	0.004	DHS
PH	7.76 □ 0.43	7.937 □ 0.13	0.483	NS
CaCO ₃ total %	11.99 □ 2.32	14.5 □ 0.20	0.389	NS

Les résultats de la composition chimique de la solution du sol au niveau de l'horizon 1 à l'état final sont présentés dans le tableau XXXXVIII. Elle est caractérisée par une salinité moyenne de 2.49 dS/m, un SAR faible et un pH alcalin.

Une prédominance du calcium et du sodium est enregistrée dans les proportions respectives de 39,19% et 38,67%. Les ions de distribuent dans l'ordre suivant :

Cations : Ca⁺⁺ (39.19 %) > Na⁺ (38.67 %) > Mg⁺⁺ (18.72 %) > K⁺ (3.38 %)

Anions : SO₄⁻ (53.03 %) > Cl⁻ (36.04 %) > HCO₃⁻ (10.91 %).

Les données analytiques portées sur le diagramme de Piper déterminent

(figure 9) un faciès géochimique de la solution du sol, sulfaté-mixte.

Le rapport Cl⁻ / SO₄⁻ est compris entre 0.2 et 1, il confirme la prédominance des sulfates par rapport aux chlorures. Le rapport Ca⁺⁺ / Mg⁺⁺ > 1 est favorable à la prédominance du calcium dans la solution du sol.

La variabilité spatiale des paramètres chimique est la suivante :

Coefficient de variation faible : pH, SAR et K^+

Coefficient de variation modéré : Na^+ / K^+ , Na^+ , SO_4^{--} , Cl^- / SO_4^{--} et HCO_3^-

Coefficient de variation très élevé : CE, Ca^{++} / Mg^{++} , Ca^{++} , Mg^{++} et Cl^- .

Tableau XXXXVIII. Les paramètres statistiques descriptifs de l'horizon 1

Paramètres chimiques	Moyenne Horizon 1	Ecart type	C.V %
PH	7.94	0.13	1.63
CE	2.49	0.89	35.60
SAR	2.63	0.27	10.28
Na^+ / K^+	11.49	1.87	16.26
Ca^{++} / Mg^{++}	2.26	1.87	82.56
Na^+	4.82	0.71	14.73
K^+	0.42	0.03	7.12
Ca^{++}	4.88	3.12	63.93
Mg^{++}	2.33	0.67	28.74
SO_4^{--}	13.61	2.70	19.83
Cl^-	9.25	2.70	29.18
Cl^- / SO_4^{--}	0.67	0.13	19.40
HCO_3^-	2.80	0.40	14.28

6.2.2. Horizon 2

Les résultats du tableau XXXXIX donne la composition chimique de la solution du sol de l'horizon 2. Il ressort, qu' à l'état final, la salinité moyenne est de 2.02 dS/m, le pH est légèrement alcalin et le SAR est faible.

Le sodium prédomine à 47,25% ; et un enrichissement en chlorures est enregistré. La distribution des ions se fait dans l'ordre suivant :

Cations : Na^+ (47.25 %) > Ca^{++} (26.83 %) > Mg^{++} (20.82 %) > K^+ (5.08 %)

Anions Cl^- (49.5 %) > SO_4^{--} (39.06 %) > HCO_3^- (11.43 %)

Les données analytiques portées sur le diagramme de Piper (figure 9) indiquent que le faciès géochimique de la solution du sol est mixte-sodique.

Le rapport Cl^- / SO_4^{--} est inférieur à 2, il confirme la prédominance des sulfates par rapport aux chlorures. Le rapport $Ca^{++} / Mg^{++} > 1$ est favorable à la prédominance du calcium dans la solution du sol.

La distribution spatiale des paramètres chimiques est la suivante:

Coefficient de Variation faible : pH, K^+

Coefficient de Variation moyen : CE, Ca^{++} / Mg^{++} , Mg^{++} , et HCO_3^-

Coefficient de Variation élevé : Na^+ / K^+ , SO_4^{--} , Cl^- et Cl^- / SO_4^{--}

Tableau XXXIX . Les paramètres statistiques descriptifs de l'horizon 2

Paramètres Chimiques	Moyenne	Ecart type	C.V %
PH	7.74	0.06	0.77
CE	2.02	0.37	18.31
SAR	3.14	1.54	48.99
Na ⁺ / K ⁺	9.13	2.47	27.05
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.249	0.29	23.21
Na ⁺	4.45	1.57	35.24
K ⁺	0.47	0.04	8.35
Ca ⁺⁺	2.53	1.02	40.31
Mg ⁺⁺	1.96	0.37	18.84
SO ₄ ⁻⁻	7,00	3.33	47.57
Cl ⁻	8.87	2.62	29.53
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	1.51	0.73	48.24
HCO ₃ ⁻⁴	2.05	0.52	25.36

6.2.3. Variabilité verticale

Les résultats d'analyse de la variabilité verticale montrent que pour la majorité des paramètres chimiques, la probabilité calculée est supérieur à 5 %. Ce résultat signifie que la différence est non significative. En revanche, un enrichissement en sulfates est enregistrée dans l'horizon supérieur et la différence est significative. Aussi le pH présente une diminution dans l'horizon sous jacent et la différence significative.

Tableau L. Comparaison des Moyennes entre l'horizon 1 et l'horizon 2

Paramètres Chimiques	Moyennes Horizon 1	Ecart type	Moyennes Horizon 2	Ecart type	Probabilité	Signification à 5%
PH	7.98	0.13	7.74	0.06	0.04	DS
CE	2.49	0.89	2.02	0.37	0.37	NS
SAR	2.63	0.27	3.14	1.54	0.53	NS
Na ⁺ / K ⁺	11.49	1.87	9.13	2.47	0.18	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	2.26	1.87	1.24	0.29	0.32	NS
Na ⁺	4.82	0.71	4.45	1.57	0.69	NS
K ⁺	0.42	0.03	0.48	0.04	0.09	NS
Ca ⁺⁺	4.88	3.12	2.53	1.03	0.20	NS
Mg ⁺⁺	2.33	0.67	1.96	0.37	0.37	NS
SO ₄ ⁻⁻	13.61	2.70	7.00	3.33	0.02	DS
Cl ⁻	9.25	2.70	8.87	2.62	0.84	NS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.67	0.13	1.51	0.73	0.06	NS
HCO ₃ ⁻⁴	2.80	0.40	2.05	0.52	0.06	NS

6.3. Comparaison des moyennes entre l'Etat initial et l'Etat final

L'objectif de cette comparaison est d'évaluer l'évolution de la salinité et ses paramètres qui caractérisent la solution du sol entre l'état initial et l'état final.

Le graphique est présenté dans la figure 10.

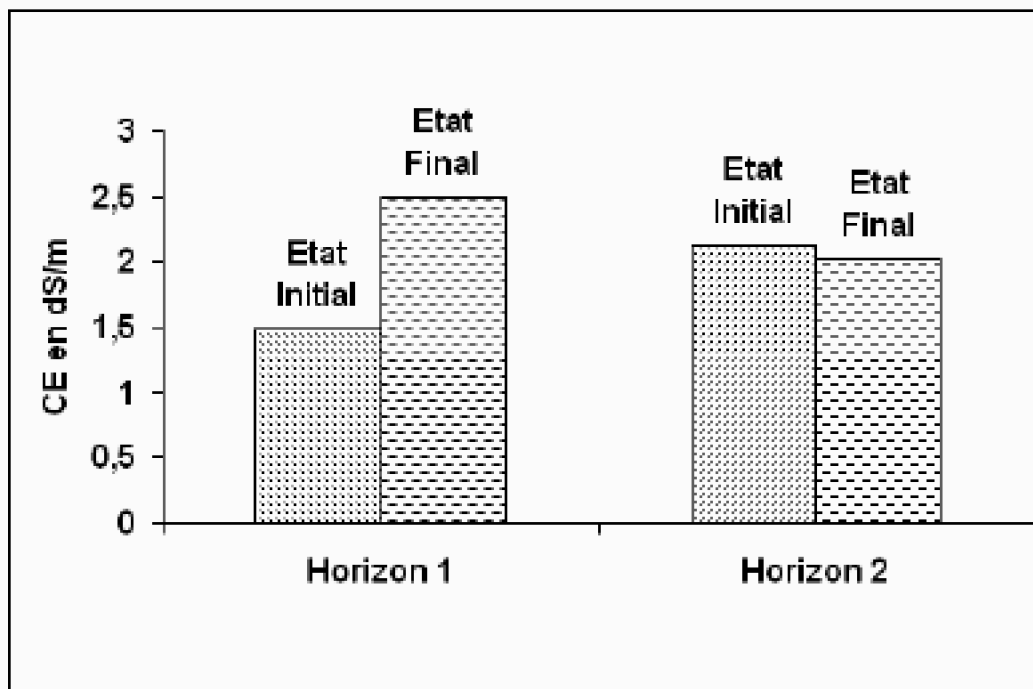


Figure 10. Evolution de la salinité (extrait aqueux 1/2) dans le site 3 entre l'état initial (stade tallage) et l'état final (stade maturation)

6.3.1. Horizon 1

La comparaison des moyennes des paramètres chimiques au niveau de l'horizon 1 entre l'état initial et l'état final, montre qu'il y a une augmentation de la salinité (figure 10) et de l'ensemble de ses paramètres en fin de cycle végétatif

néanmoins, cette augmentation n'est pas significative pour tous les paramètres.

En effet, les augmentations sont importantes pour les paramètres suivants :

- le sodium dont les teneurs ont doublées en fin de cycle et la différence est hautement significative ;
- les teneurs en chlorures ont été multipliées par 5.5 en fin de cycle et la différence est hautement significative.
- Le rapport $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$ présentent aussi une différence hautement significative.
- Le potassium et le rapport Na^+ / K^+ présentent une différence significative.
- Les teneurs en bicarbonates ont doublées et la différence est très hautement significative.

Tableau L I. Comparaison des moyennes entre l'état initial et état final de l'horizon 1

Paramètres	Moyennes Horizon 1 Etat initial	Ecart type	Moyennes Horizon 1 Etat final	Ecart type	Probabilité	Signification à 5%
pH	8.11	0.19	7.94	0.13	0.20	NS
CE	1.50	0.95	2.49	0.89	0.17	NS
SAR	2.37	1.35	2.63	0.27	0.73	NS
Na ⁺ / K ⁺	7.55	1.17	11.49	1.87	0.01	DS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.22	0.73	2.26	1.87	0.33	NS
Na ⁺	2.03	0.85	4.82	0.71	0.00	DHS
K ⁺	0.26	0.08	0.42	0.03	0.01	DS
Ca ⁺⁺	1.71	1.50	4.88	3.12	0.11	NS
Mg ⁺⁺	1.33	0.67	2.33	0.67	0.08	NS
SO ₄ ⁻⁻	12.65	14.36	13.61	2.70	0.57	NS
Cl ⁻	1.65	0.40	9.25	2.70	0.00	DHS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.27	0.20	0.67	0.13	0.00	DHS
HCO ₃ ⁻	1.07	0.09	2.80	0.40	0.00	THS

6.3.2. Horizon 2

Les résultats du tableau LII, montrent l'évolution des paramètres chimiques au niveau de l'horizon 2 entre l'état initial et l'état final. Celle-ci est marquée par une augmentation significative du potassium, des sulfates et du rapport Cl⁻ / SO₄²⁻. Aussi, l'augmentation est hautement significative pour les bicarbonates, le magnésium et les chlorures. En revanche, l'état de salinité de sodicité (SAR) ainsi que les autres paramètres présentent des valeurs comparables à celles obtenues à l'état initial.

Tableau L II. Comparaison des moyennes l'état initial et l'état final de l'horizon 2

Paramètres Chimiques	Moyennes Horizon 2 Etat initial	Ecart type	Moyenne Horizon 2 Etat final	Ecart type	Probabilité	Signification à 5%
pH	8,00	0.20	7.74	0.06	0.057	NS
CE	2.12	0.72	2.02	0.37	0.809	NS
SAR	2.82	0.69	3.14	1.54	0.714	NS
Na ⁺ / K ⁺	8.51	2.01	9.13	2.47	0.711	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.63	0.49	1.25	0.29	0.226	NS
Na ⁺	3.13	0.96	4.45	1.57	0.202	NS
K ⁺	0.36	0.04	0.48	0.04	0.010	DS
Ca ⁺⁺	1.51	0.43	2.53	1.03	0.118	NS
Mg ⁺⁺	0.93	0.13	1.96	0.37	0.002	DHS
SO ₄ ⁻⁻	12.70	1.39	7,00	3.33	0.019	DS
Cl ⁻	3.20	0.62	8.87	2.62	0.005	DHS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.251	0.04	1.51	0.73	0.013	DS
HCO ₃ ⁻	1.05	0.05	2.05	0.52	0.009	DHS

Conclusion

La mise en irrigation du site cultivé en céréales pour la quatrième année conduit à une augmentation de la salinité au stade maturation dans les deux l'horizons, bien que la comparaison des moyennes avec le stade tallage n'est pas significative.

6.4. Corrélation entre la conductivité électrique et les éléments en solution

Les paramètres statistiques qui permettent de calculer les coefficients de corrélation se présentent comme suit : $n = 8$, $ddl = (n - 1 - P) = (8 - 1 - 1) = 6$ et r (critique) = 0.7067. Les résultats des corrélations de la conductivité électrique avec les autres éléments de la salinité sont présenté dans le tableau LIII.

A l'état initial soit au stade tallage, le sodium et le potassium présentent une corrélation hautement significative avec la conductivité électrique, l'ion calcium présente une corrélation significative. Par contre, le magnésium, les chlorures, les sulfates et les bicarbonates présentent une corrélation non significative avec la CE.

A l'état final soit au stade maturation, seul le calcium et les chlorures présentent une corrélation hautement significative avec la CE. les autres ions enregistrent une corrélation non significative.

Tableau LIII. Résultats des corrélations

CE - éléments solubles (Etat initial)	Coefficient de corrélation r	Signification à 5 %
Na ⁺ K ⁺ Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺ SO ₄ ⁻ Cl ⁻ HCO ₃ ⁻	0.91 0.92 0.71 0.51 0.69 0.69	HS HS S NS NS NS NS
CE - pH	0.46	NS
CE - éléments solubles (Etat final)	Coefficient de corrélation r	Signification à 5 %
Na ⁺ K ⁺ Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺ SO ₄ ⁻ Cl ⁻ HCO ₃ ⁻	0.64 0.05 0.86 0.17 0.63 0.84	NS NS HS NS NS HS NS
CE - pH	0.28	NS

Conclusion

La mise en irrigation du sol cultivé pour la quatrième année (site 3) à conduit, au stade tallage à une augmentation de la salinité au niveau de l'horizon de surface et de l'horizon de subsurface.

En fin de campagne, au stade maturation, l'état de salinité de l'horizon de surface et de l'horizon de subsurface est comparable à celui du stade tallage.

Le faciès géochimique de la solution du sol est sulfaté mixte au niveau de l'horizon de surface, il est sulfaté sodique au niveau de l'horizon de subsurface .

La sodicité (SAR), varie faiblement dans les deux horizons entre le stade tallage et le stade maturation.

Les résultats concernant la variabilité verticale montrent que la majorité des paramètres chimiques se distribuent d'une manière homogène au niveau des deux profondeurs.

La variabilité spatiale de la salinité est élevée dans les deux horizons à l'état initial et à l'état final.

7. Comparaison des 3 sites étudiés

Cette comparaison porte sur l'état de salinité du sol des 3 sites étudiés, elle évaluera l'état initial correspondant au stade tallage du blé et l'état final correspondant au stade maturation

Le site 1, est à sa seconde année d'irrigation, le site 2 est à sa troisième année d'irrigation, et le site 3 est à sa quatrième année d'irrigation.

7.1. Etat initial : Stade tallage

7.1.1. Horizon 1

7.1.1.1. Comparaison des moyennes entre le site 1 et le site 2

Les résultats du tableau LIV montrent que le niveau de salinité (C.E) et de sodicité de la solution du sol du site 1 cultivé pour la 2^{ème} année est comparable à celui du site 2 cultivé pour la 3^{ème} année .

Le pH est plus élevé dans le site 2.

Pour les éléments en solution, le potassium, le calcium, et les sulfates présentent des concentrations plus élevées dans le site 1

Le rapports $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$ est plus élevé dans le site 1, tandis que le rapport

$\text{Cl}^{-} / \text{SO}_4^{--}$ est plus élevé dans le site 2.

Tableau LIV. Comparaison des moyennes des paramètres chimiques du Site 1 et du site 2

EVOLUTION DE LA SALINITE DES SOLS IRRIGUES DANS UNE REGION SAHARIENNE.

Paramètres chimiques	Moyenne Site 1	Ecart type	Moyenne Site 2	Ecart type	Probabilité	Signification à 5 %
PH	8.05	0.04	8.16	0.06	0.02	DS
CE	0.50	0.19	0.35	0.08	0.23	NS
SAR	1.66	0.07	1.80	0.28	0.38	NS
Na ⁺ / K ⁺	5.89	0.34	7.40	0.21	0.10	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.45	0.09	1.09	0.18	0.00	DHS
Na ⁺	1.35	0.12	1.28	0.316	0.70	NS
K ⁺	0.23	0.01	0.17	0.02	0.00	DHS
Ca ⁺⁺	0.80	0.14	0.52	0.12	0.01	DS
Mg ⁺⁺	0.53	0.10	0.49	0.15	0.66	NS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.20	0.09	0.66	0.15	0.00	DHS
Cl ⁻	1.10	0.14	1.50	0.47	0.15	NS
SO ₄ ⁻⁻	5.34	2.14	2.37	1.02	0.04	DS
HCO ₃ ⁻	1.10	0.14	1.02	0.05	0.35	NS

7.1.1.2. Comparaison des moyennes entre le Site 1 et le Site 3

Les résultats du tableau LVI montrent que les valeurs moyennes de la CE, du SAR, et du pH du site 3 cultivé pour la 4^{ème} année sont comparables à celles du site 1 cultivé pour la 2^{ème} année.

Pour les éléments en solution, seul le chlore présente une concentration plus élevée dans le site 3.

Le rapport Na⁺ / K⁺ présente une valeur plus élevée dans le site 3.

Tableau LVI. Comparaison des moyennes des paramètres chimiques des Site 1 et 3

Paramètres chimiques	Moyenne Site 1	Ecart type	Moyenne Site 3	Ecart type	Probabilité	Signification à 5%
PH	8.05	0.04	8.11	0.19	0.57	NS
CE	0.50	0.19	1.49	0.95	0.08	NS
SAR	1.66	0.07	2.37	1.35	0.33	NS
Na ⁺ / K ⁺	5.89	0.34	7.55	1.17	0.03	DS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.45	0.09	1.22	0.73	0.48	NS
Na ⁺	1.35	0.12	2.03	0.85	0.16	NS
K ⁺	0.23	0.01	0.26	0.08	0.43	NS
Ca ⁺⁺	0.80	0.14	1.71	0.15	0.27	NS
Mg ⁺⁺	0.53	0.1	1.33	0.67	0.05	NS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.20	0.09	0.26	0.18	0.59	NS
Cl ⁻	1.10	0.14	1.65	0.40	0.04	DS
SO ₄ ⁻⁻	5.34	2.14	12.6	14.36	0.35	NS
HCO ₃ ⁻	1.10	0.14	1.07	0.09	0.77	NS

7.1.1.3. Comparaison des moyennes entre le Site 2 et le Site 3

Les résultats du tableau LVII montrent que le site 3 cultivé pour la 4^{ème} année présente des valeurs de CE, du SAR, et du pH comparables à celles du site 2 cultivé pour la 3^{ème} année. Le rapport $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$ présente une valeur plus élevée dans le site 2 cultivé pour la 3^{ème} année .

Tableau LVII. Comparaison des moyennes des paramètres chimiques des Sites 2 et 3

Paramètres chimiques	Moyenne Site 2	Ecart type	Moyenne Site 3	Ecart type	Probabilité	Signification à 5%
PH	8.16	0.06	8.11	0.2	0.64	NS
CE	0.35	0.08	1.49	0.95	0.56	NS
SAR	1.80	0.28	2.37	1.35	0.43	NS
Na^+ / K^+	7.40	0.74	7.55	1.17	0.88	NS
$\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$	1.09	0.18	1.22	0.73	0.74	NS
Na^+	1.28	0.316	2.03	0.85	1.55	NS
K^+	0.17	0.02	0.26	0.08	0.07	NS
Ca^{++}	0.52	0.13	1.71	0.149	0.16	NS
Mg^{++}	0.49	0.15	1.33	0.67	0.50	NS
$\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$	0.66	0.15	0.26	0.18	0.01	DS
Cl^-	1.50	0.47	1.65	0.40	0.64	NS
SO_4^{--}	2.37	1.02	12.6	14.36	0.20	NS
HCO_3^-	1.02	0.05	1.07	0.09	0.39	NS

7.1.2. Horizon 2

7.1.2.1. Comparaison des moyennes entre le site 1 et le site 2

Le tableau LVIII montre que les valeurs de la CE, du SAR, et du pH sont comparables entre les 2 sites. Les sulfates présentent une teneur plus élevée dans le site 1, et le rapport $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$ est plus élevé dans le site 2.

Tableau LVIII. Comparaison des moyennes des paramètres chimiques des Sites 1 et 2

EVOLUTION DE LA SALINITE DES SOLS IRRIGUES DANS UNE REGION SAHARIENNE.

Paramètres chimiques	Moyenne Site 1	Ecart type	Moyenne Site 2	Ecart type	Probabilité	Signification à 5 %
PH	8.05	0.09	8.05	0.03	0.89	NS
CE	0.49	0.2	0.53	0.11	0.74	NS
SAR	1.60	0.11	1.82	0.23	0.13	NS
Na ⁺ / K ⁺	5.84	1.0	5.76	1.06	0.92	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.35	0.22	1.40	0.35	0.80	NS
Na ⁺	1.35	0.25	1.35	0.32	0.98	NS
K ⁺	0.24	0.10	0.23	0.03	0.84	NS
Ca ⁺⁺	0.82	0.23	0.63	0.22	0.29	NS
Mg ⁺⁺	0.60	0.13	0.45	0.09	0.11	NS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.24	0.7	0.49	0.06	0.00	DHS
Cl ⁻	1.67	0.67	1.74	0.34	0.87	NS
SO ₄ ⁻⁻	6.88	2.45	3.55	0.61	0.04	DS
HCO ₃ ⁻	0.97	0.20	1.15	0.25	0.26	NS

7.1.2.2. Comparaison des moyennes entre le Site 1 et le Site 3

Le tableau LIX montre que le site 3 est relativement plus salé que le site 1. En effet, la CE, le SAR, le sodium, le calcium, le magnésium, le chlore, et les sulfates présentent des valeurs plus élevées dans le site 3.

Tableau LIX. Comparaison des moyennes des paramètres chimiques des Sites 1 et 3

Paramètres chimiques	Moyenne Site 1	Ecart type	Moyenne Site 3	Ecart type	Probabilité	Signification à 5 %
pH	8.05	0.09	7.99	0.20	0.66	NS
CE	0.49	0.2	2.12	0.72	0.00	DHS
SAR	1.60	0.11	2.82	0.70	0.01	DS
Na ⁺ / K ⁺	5.84	1.0	8.52	2.01	0.05	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.35	0.22	1.64	0.49	0.32	NS
Na ⁺	1.35	0.25	3.13	0.96	0.01	DS
K ⁺	0.24	0.10	0.36	0.04	0.07	NS
Ca ⁺⁺	0.82	0.23	1.51	0.43	0.03	DS
Mg ⁺⁺	0.60	0.13	0.93	0.13	0.01	DS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.24	0.7	0.25	0.04	0.84	NS
Cl ⁻	1.67	0.67	3.20	0.62	0.01	DS
SO ₄ ⁻⁻	6.88	2.45	12.70	1.39	0.00	DHS
HCO ₃ ⁻	0.97	0.20	1.05	0.05	0.50	NS

7.1.2.3. Comparaison des moyennes entre le Site 2 et le Site 3

Le tableau LX montre que le site 3 est relativement plus salé que le site 2. En effet, la CE, le SAR, le sodium, le potassium, le calcium, le magnésium, le chlore, et les sulfates présentent des valeurs plus élevées dans le site 3.

Tableau LX. Moyennes des paramètres chimiques des Sites 2 et 3

Paramètres chimiques	Moyenne Site 2	Ecart type	Moyenne Site 3	Ecart type	Probabilité	Signification à 5 %
PH	8.05	0.03	7.99	0.2	0.59	NS
CE	0.53	0.11	2.12	0.72	0.00	DHS
SAR	1.82	0.23	2.82	0.7	0.03	DS
Na ⁺ / K ⁺	5.76	1.06	8.52	2.01	0.05	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.40	0.35	1.64	0.49	0.46	NS
Na ⁺	1.35	0.32	3.13	0.96	0.01	DS
K ⁺	0.23	0.03	0.36	0.04	0.00	DHS
Ca ⁺⁺	0.63	0.22	1.51	0.43	0.01	DS
Mg ⁺⁺	0.45	0.09	0.93	0.13	0.00	DHS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.49	0.06	0.25	0.04	0.00	DHS
Cl ⁻	1.74	0.34	3.20	0.62	0.00	DHS
SO ₄ ⁻⁻	3.55	0.61	12.70	1.39	0.00	THS
HCO ₃ ⁻	1.15	0.25	1.05	0.05	0.35	NS

7.1.3. Synthèse des résultats de l'état initial

Le tableau LXI montre qu'au niveau du premier horizon, l'état de salinité (CE) et l'état de sodicité (SAR) de la solution du sol semblent indépendants du nombre d'années d'irrigation.

Les variations significatives portent sur une augmentation du pH et une diminution des concentrations en potassium, en calcium, et en sulfates entre le début de la deuxième année et le début de la troisième année d'irrigation ; la concentration en chlorures augmente entre le début de la deuxième année et le début de la quatrième année d'irrigation. Les évolutions les plus remarquables concernent le second horizon dans lequel les phénomènes semblent dynamiques. L'état de salinité de la solution du sol augmente de façon hautement significative au niveau de l'horizon 2 au début de la quatrième année d'irrigation, il varie peu entre le début de la deuxième année et le début de la troisième année d'irrigation (figure 11.)

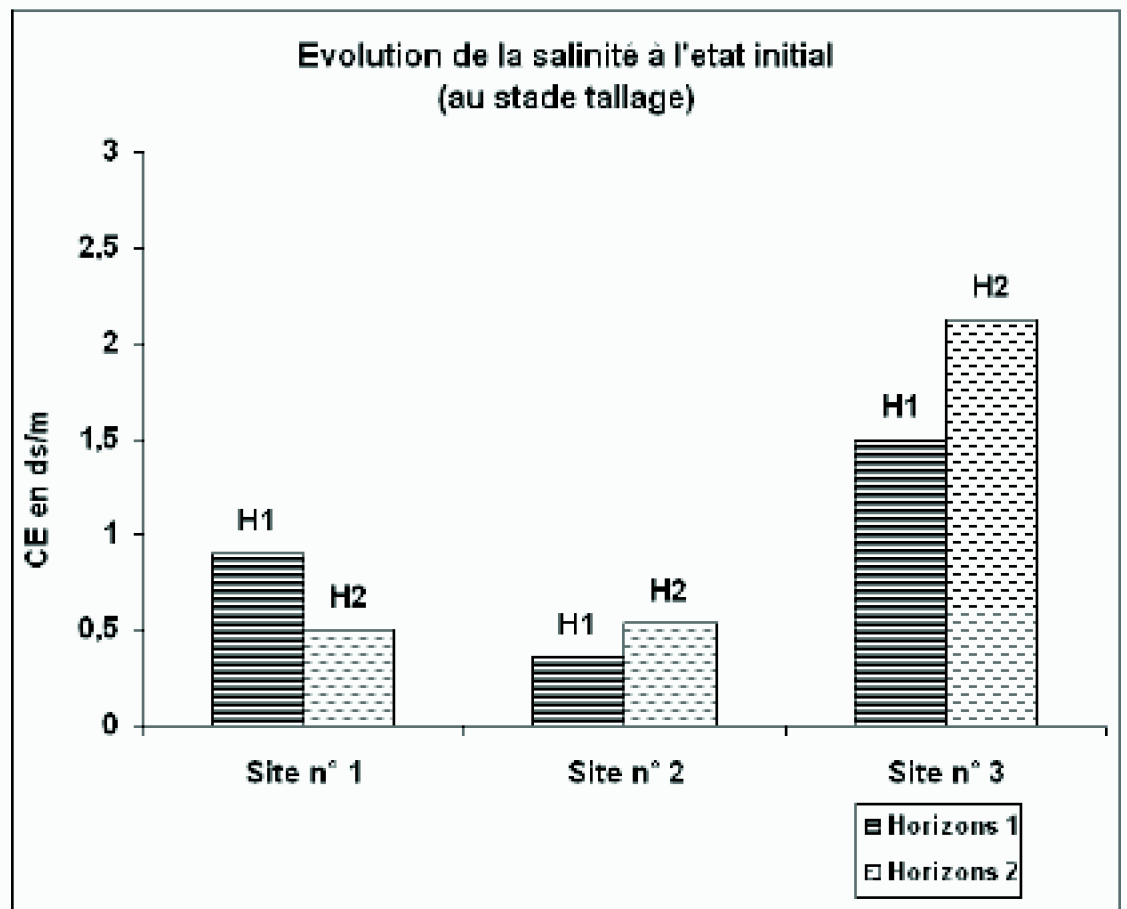


Figure 11. Evolution de la salinité (Extrait aqueux 1 /2) dans les 3 Sites A l'état initial (stade tallage)

Horizon 1			
Paramètres	Site 1 et Site2	Site 1 et Site 3	Site 2 et Site3
pH	DS	NS	NS
CE	NS	NS	NS
SAR	NS	NS	NS
Na ⁺	NS	NS	NS
K ⁺	DHS	NS	NS
Na ⁺ / K ⁺	NS	DS	NS
Ca ⁺⁺	DS	NS	NS
Mg ⁺⁺	NS	NS	NS
Ca ⁺⁺ /Mg ⁺⁺	DHS	NS	NS
Cl ⁻	NS	DS	NS
SO ₄ ⁻⁻	DS	NS	NS
Cl ⁻ /SO ₄ ⁻⁻	DHS	NS	DS
HCO ₃ ⁻	NS	NS	NS
Horizon 2			
Paramètres	Site 1 et Site2	Site 1 et Site 3	Site 2 et Site3
pH	NS	NS	NS
CE	NS	DHS	DHS
SAR	NS	DS	DS
Na ⁺	NS	DS	DS
K ⁺	NS	NS	DHS
Na ⁺ / K ⁺	NS	NS	NS
Ca ⁺⁺	NS	DS	DS
Mg ⁺⁺	NS	DS	DHS
Ca ⁺⁺ /Mg ⁺⁺	NS	NS	NS
Cl ⁻	NS	NS	DHS
SO ₄ ⁻⁻	DS	DHS	DHS
Cl ⁻ /SO ₄ ⁻⁻	DHS	NS	DHS
HCO ₃ ⁻	NS	NS	NS

Tableau LXI. Synthèse des résultats de l'état initial (stade tallage)

7.2. Etat final : Stade maturation

7.2.1. Horizon 1

7.2.1. 1. Comparaison des moyennes entre le Site 1 et le Site 2

Le tableau LXII, montre les résultats de la comparaison des moyennes de l'ensemble des paramètres chimiques. Le site 1, irrigué pendant 2 années, présente des valeurs comparables à celles du site 2 irrigué pendant 3 années. Cependant une accumulation en bicarbonates est enregistrée dans le site 2 et la comparaison des moyennes avec le site 1 donne une différence hautement significative.

Tableau LXII. Comparaison des moyennes des sites 1 et 2

EVOLUTION DE LA SALINITE DES SOLS IRRIGUES DANS UNE REGION SAHARIENNE.

Paramètres chimiques	Moyenne Site 1	Ecart type	Moyenne Site 2	Ecart type	Probabilité	Signification à 5%
pH	7.91	0.35	7.81	0.3	0.702	NS
CE	0.93	0.53	0.935	0.43	0.988	NS
SAR	2.47	0.45	2.03	0.80	0.386	NS
Na ⁺ / K ⁺	9.11	1.52	6.44	1.38	0.041	DS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.39	0.23	1.38	0.15	0.998	NS
Na ⁺	2.758	0.94	1.871	0.75	0.192	NS
K ⁺	0.281	0.09	0.285	0.06	0.948	NS
Ca ⁺⁺	1.715	1.15	0.973	0.04	0.245	NS
Mg ⁺⁺	1.162	0.63	0.704	0.06	0.200	NS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.572	0.30	0.678	0.41	0.695	NS
Cl ⁻	2.30	0.96	2.615	1.04	0.673	NS
SO ₄ ⁻⁻	5.698	4.84	4.559	1.84	0.675	NS
HCO ₃ ⁻	1.60	0.25	2.35	0.26	0.006	DHS

7.2.1. 2. Comparaison des moyennes entre le site 1 et le site 3

Le tableau LXIII, montre que le site cultivé pour la 4^{ème} année présente un niveau de salinité supérieur à celui du site cultivé pour la 2^{ème} année. Certains éléments en solution, dont le sodium, le potassium, le magnésium, le chlore, les sulfates et les bicarbonates présentent des concentrations plus élevées pour la 4^{ème} année d'irrigation.

Tableau LXIII. Comparaison des moyennes des paramètres chimiques des sites 1 et 3

Paramètres chimiques	Moyenne Site 1	Ecart type	Moyenne Site 3	Ecart type	Probabilité	Signification à 5 %
pH	7.91	0.35	7.937	0.13	0.908	NS
CE	0.93	0.53	2.495	0.89	0.024	DS
SAR	2.47	0.45	2.62	0.27	0.576	NS
Na ⁺ / K ⁺	9.11	1.52	11.49	1.87	0.096	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.39	0.23	2.265	1.87	0.390	NS
Na ⁺	2.758	0.94	4.817	0.71	0.013	DS
K ⁺	0.281	0.09	0.421	0.03	0.032	DS
Ca ⁺⁺	1.715	1.15	4.880	3.12	0.106	NS
Mg ⁺⁺	1.162	0.63	2.331	0.67	0.003	DHS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.572	0.30	0.677	0.13	0.554	NS
Cl ⁻	2.30	0.96	9.25	2.7	0.002	DHS
SO ₄ ⁻⁻	5.698	4.84	13.61	2.7	0.022	DS
HCO ₃ ⁻	1.60	0.25	2.80	0.4	0.002	DHS

7.2.1. 3. Comparaison des moyennes entre le site 2 et le site 3

Les résultats de la comparaison des moyennes qui figurent dans le tableau LXIV montrent que le site 3 cultivé pour la 4^{ème} année présente un niveau de salinité supérieur au site 2

cultivé pour la 3^{ème} année et la différence est significative. Par ailleurs, les concentrations en sodium, en potassium, en calcium, en magnésium, en chlore, et en sulfates sont plus élevées dans le site 3 et la différence est hautement significative .

Tableau LXIV. Comparaison des moyennes des paramètres chimiques des sites 2 et 3

Paramètres chimiques	Moyenne Site 2	Ecart type	Moyenne Site 3	Ecart type	Probabilité	Signification à 5 %
pH	7.81	0.3	7.937	0.13	0.488	NS
CE	0.935	0.43	2.495	0.89	0.020	DS
SAR	2.03	0.80	2.62	0.27	0.216	NS
Na ⁺ / K ⁺	6.44	1.38	11.49	1.87	0.004	DHS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.38	0.15	2.265	1.87	0.388	NS
Na ⁺	1.871	0.75	4.817	0.71	0.001	DHS
K ⁺	0.285	0.06	0.421	0.03	0.010	DS
Ca ⁺⁺	0.973	0.04	4.880	3.12	0.036	DS
Mg ⁺⁺	0.704	0.06	2.331	0.67	0.006	DHS
Cl ⁻ /SO ₄ ⁻⁻	0.678	0.41	0.677	0.13	0.994	NS
Cl ⁻	2.615	1.04	9.25	2.7	0.003	DHS
SO ₄ ⁻⁻	4.559	1.84	13.61	2.7	0.001	DHS
HCO ₃ ⁻	2.35	0.26	2.80	0.4	0.113	NS

7.2.2. Horizon 2

7.2.2.1. Comparaison des moyennes entre le sites 1 et le site 2

Les résultats de la comparaison des moyennes du tableau LXV, montrent que le site cultivé pour la 2^{ème} année et le site cultivé pour la 3^{ème} année présentent des valeurs de salinité comparables.

Tableau LXV. Comparaison des moyennes des paramètres chimiques des sites 1 et 2

EVOLUTION DE LA SALINITE DES SOLS IRRIGUES DANS UNE REGION SAHARIENNE.

Paramètres chimiques	Moyenne Site 1	Ecart type	Moyenne Site 2	Ecart type	Probabilité	Signification à 5 %
PH	7.64	0.41	7.63	0.40	0.986	NS
CE	1.43	0.94	1.575	1.36	0.871	NS
SAR	2.772	1.26	1.719	0.77	0.204	NS
Na ⁺ / K ⁺	8.815	2.30	6.321	2.73	0.212	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.985	1.25	3.012	3.46	0.597	NS
Na ⁺	3.406	1.27	1.836	0.74	0.077	NS
K ⁺	0.358	0.14	0.324	0.13	0.736	NS
Ca ⁺⁺	3.632	4.74	3.946	6.25	0.938	NS
Mg ⁺⁺	0.66	0.29	0.888	0.54	0.491	NS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.414	0.35	0.681	0.17	0.221	NS
Cl ⁻	3.400	2.32	2.637	0.85	0.561	NS
SO ₄ ⁻⁻	11.505	11.59	4.00	1.42	0.246	NS
HCO ₃ ⁻	1.350	0.10	2.025	0.30	0.006	DHS

7.2.2.3. Comparaison des moyennes entre le site 1 et le site 3

Les résultats du tableau LXVI, montre que le site cultivé pour la 4^{ème} campagne présente un niveau de salinité comparable à celui du site cultivé pour la 2^{ème} année. En revanche, les concentrations en magnésium, en chlore, en bicarbonates, et le rapport chlore/sulfates présentent des valeurs plus élevées pour le site 3.

Tableau LXVI. Comparaison des moyennes des paramètres chimiques des sites 1 et 3

Paramètres chimiques	Moyenne Site 1	Ecart type	Moyenne Site 3	Ecart type	Probabilité	Signification à 5 %
PH	7.64	0.41	7.74	0.06	0.658	NS
CE	1.43	0.94	2.020	0.37	0.291	NS
SAR	2.772	1.26	3.143	1.54	0.722	NS
Na ⁺ / K ⁺	8.815	2.30	9.137	2.47	0.855	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	1.985	1.25	1.249	0.3	0.298	NS
Na ⁺	3.406	1.27	4.455	1.57	0.340	NS
K ⁺	0.358	0.14	0.479	0.04	0.156	NS
Ca ⁺⁺	3.632	4.74	2.532	1.03	0.666	NS
Mg ⁺⁺	0.66	0.29	1.963	0.37	0.001	DHS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.414	0.35	1.513	0.73	0.035	DS
Cl ⁻	3.400	2.32	8.875	2.62	0.020	DS
SO ₄ ⁻⁻	11.505	11.59	7.00	3.8	0.483	NS
HCO ₃ ⁻	1.350	0.10	2.025	0.52	0.039	DS

7.2.2.3. Comparaison des moyennes entre le site 2 et le site 3

Les résultats du tableau LXVII, montrent que le niveau de salinité du site cultivé pour la 4^{ème} année est comparable à celui du site cultivé pour la 3^{ème} année. Les

concentrations en sodium, en magnésium, et en chlore sont plus élevées pour le site 3.

Tableau LXVII. Comparaison des moyennes des paramètres chimiques entre le sites 2 et le site3

Paramètres chimiques	Moyenne Site 2	Ecart type	Moyenne Site 3	Ecart type	Probabilité	Signification à 5 %
pH	7.63	0.40	7.74	0.06	0.637	NS
CE	1.575	1.36	2.020	0.37	0.553	NS
SAR	1.719	0.77	3.143	1.54	0.149	NS
Na ⁺ / K ⁺	6.321	2.73	9.137	2.47	0.177	NS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	3.012	3.46	1.249	0.3	0.350	NS
Na ⁺	1.836	0.74	4.455	1.57	0.023	DS
K ⁺	0.324	0.13	0.479	0.04	0.071	NS
Ca ⁺⁺	3.946	6.25	2.532	1.03	0.670	NS
Mg ⁺⁺	0.888	0.54	1.963	0.37	0.017	DS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻⁻	0.681	0.17	1.513	0.73	0.069	NS
Cl ⁻	2.637	0.85	8.875	2.62	0.004	DHS
SO ₄ ⁻⁻	4.00	1.42	7.00	3.8	0.149	NS
HCO ₃ ⁻	2.025	0.30	2.025	0.52	0.937	NS

7.2.3. Synthèse des résultats du stade maturation

Les principaux résultats présentés dans le tableau LXVIII, montrent qu'à l'état final, le premier horizon est nettement plus réactif que le second horizon.

En effet, l'état de salinité de la solution du sol, évaluée par la CE, augmente en fonction du nombre d'années d'irrigation au niveau de l'horizon de surface (figure 12) ; au niveau du second horizon, le nombre d'années d'irrigation n'affecte pas l'état de salinité de la solution du sol.

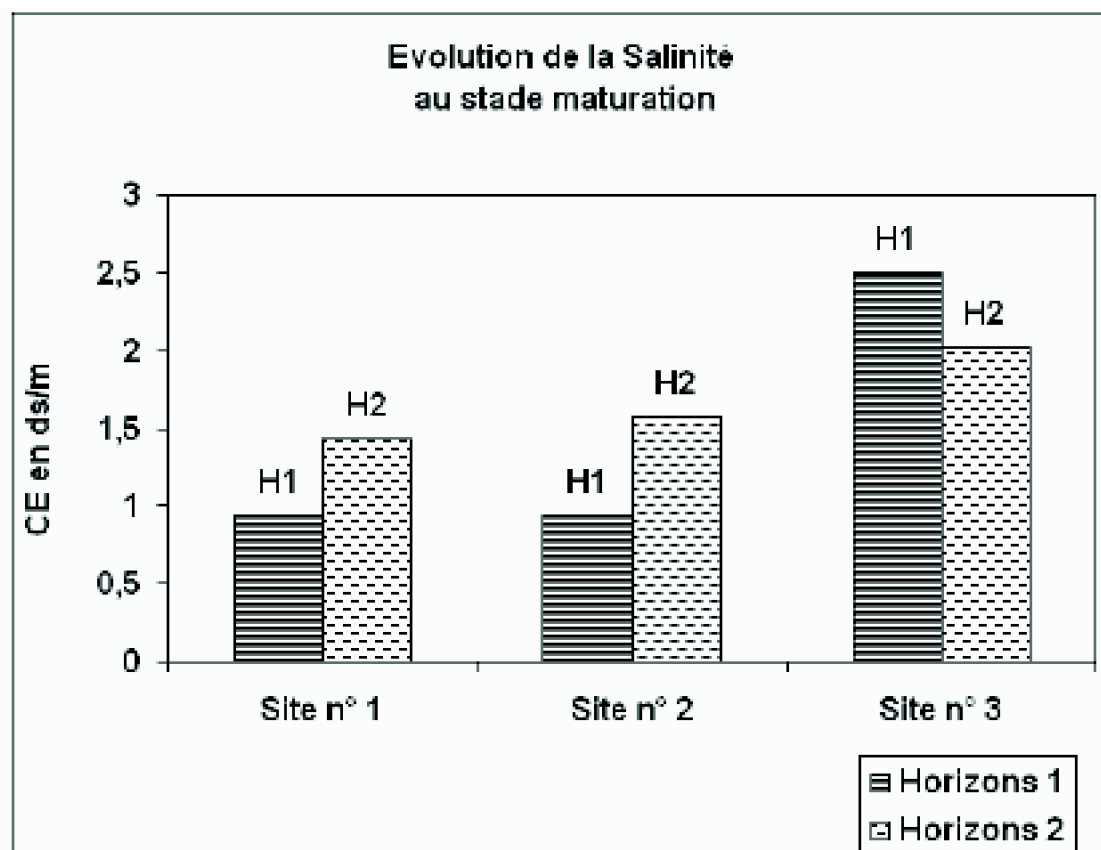


Figure 12. Evolution de la salinité (extrait aqueux 1/2) dans les trois sites d'étude à l'état final (au stade maturation)

Horizon 1			
Paramètres	Site 1 et Site2	Site 1 et Site 3	Site 2 et Site3
pH	NS	NS	NS
CE	NS	DS	DS
SAR	NS	NS	NS
Na ⁺	NS	DS	DHS
K ⁺	NS	DS	DS
Na ⁺ / K ⁺	DS	NS	DHS
Ca ⁺⁺	NS	NS	DS
Mg ⁺⁺	NS	DHS	DHS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	NS	NS	NS
Cl ⁻	NS	DHS	DHS
SO ₄ ⁻²	NS	DS	DHS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻²	NS	NS	NS
HCO ₃ ⁻	DHS	DHS	NS
Horizon 2			
Paramètres	Site 1 et Site2	Site 1 et Site 3	Site 2 et Site3
pH	NS	NS	NS
CE	NS	NS	NS
SAR	NS	NS	NS
Na ⁺	NS	NS	DS
Na ⁺ / K ⁺	NS	NS	NS
K ⁺	NS	NS	NS
Ca ⁺⁺	NS	NS	NS
Mg ⁺⁺	NS	DHS	DS
Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺	NS	NS	NS
Cl ⁻	NS	DS	DHS
SO ₄ ⁻²	NS	NS	NS
Cl ⁻ / SO ₄ ⁻²	NS	DS	NS
HCO ₃ ⁻	DHS	DS	NS

Tableau LXVIII. Synthèse des résultats de l'état final (Stade maturation)

8. Discussion

8. 1. Evaluation de l'état de salinité des sols

Avant de discuter les résultats de notre étude il nous a parut nécessaire de présenter les différentes approches et les résultats obtenus relatif à l'évaluation de la salure des sols.

L'évaluation de l'état de la salinité d'un sol, serait essentiellement basée sur la CE de l'extrait de pâte saturée. Celle –ci constitue l'approche agronomique de référence, car elle permet d'approcher l'état de salinité du sol d'une façon plus proche des conditions de croissance des plantes (USDA, 1954 ; Hogg et Henry, 1984 ; Montoroi, 1997 ; Zhang, 2005). En revanche, l'approche chimique qui se base sur la méthode des extraits dilués

de différents rapports terre / eau sont proposés (1/1, 1/2 et 1/5) est une méthode facile et rapide, l'inconvénient qu'elle présente c'est qu'elle ne tient pas compte des caractéristiques texturales et hydriques des sols d'une part, et des phénomènes de dissolution et de précipitation des sels d'autre part (USDA, 1954 ; Servant, 1978 ; Hogg et Henry, 1984 ; Montoroi , 1997 ; Hamed *et al.*, 2003).

Par ailleurs, les études de Zhang *et al.* (2005) ont montré une corrélation significative entre les valeurs de la CE et les différents ions de l'extrait de la pâte saturée avec ceux de l'extrait dilué 1/1. La concentration ionique et la CE de l'extrait dilué sont inférieures à la concentration ionique de l'extrait de la pâte saturée à cause de la dilution. La concentration moyenne des ions (Cl^- , SO_4^{--} , K^+ , Ca^{++} , et Mg^{++}) de l'extrait de la pâte saturée serait deux fois plus élevée que celle de l'extrait dilué 1/1. Par contre les travaux de Hong et Henry (1984) ont trouvé que les concentrations en chlorures et en sodium sont équivalentes pour l'extrait de la pâte saturée et l'extrait dilué 1/1. Les travaux de Hogg et Henry (1984) sur une grande variété de sols ont montré qu'il existe une corrélation étroite entre la CE de l'extrait de pâte saturée et la CE de l'extrait dilué des rapports 1/1 et 1/2. Le coefficient de régression établi entre les méthodes diminue de la texture grossière à la texture fine, la CE de l'extrait de pâte saturée est 1.75 fois plus élevée que la CE de l'extrait dilué 1/1.

Le type de sels solubles et la texture du sol déterminent l'intensité de la corrélation entre la CE de l'extrait de la pâte saturée et la CE de l'extrait dilué des différents rapports 1 /1, 1/2 et 1/5.

Il est important de signaler que dans le cas des sols peu salés et gypseux, la CE de la pâte saturée peut être inférieure à la CE de l'extrait dilué 1/2 à cause du phénomène de dissolution du gypse.

Dans ce travail, pour mieux interpréter les résultats de la salinité mesurée sur les extraits aqueux (1/2), et évaluer le facteur de concentration de la solution du sol, il est nécessaire de faire un calcul sommaire de conversion, des valeurs de la CE des extraits aqueux (1/2) aux valeurs correspondantes des extraits de pâtes saturées. Une méthode d'estimation de la CE de l'extrait de pâte saturée, à partir de la CE de l'extrait dilué est proposée par Montoroi (1997) pour les sols sableux qui ne s'y prêtent pas à la préparation de la pâte saturée.

Dans ce travail, l'extrait dilué 1/2 a été utilisé, or la conductivité électrique de la solution du sol obtenue est fonction de sa composition ionique et de sa teneur en eau à saturation (Lahlou *et al.*, 1998). Selon les travaux de Van Hoorn (1995), et Hamed *et al.* (2003), la teneur en eau de l'extrait de pâte saturée varie en fonction de la texture du sol. La teneur en eau de l'extrait de pâte saturée correspond à environ 2 fois la teneur en eau correspondant à la capacité au champ. Il est important de préciser que la notion de capacité au champ est imprécise, car le phénomène de ressuyage est un mouvement d'eau continue et progressif, l'arrêt de l'écoulement de l'eau est difficile à situer précisément dans le temps. La capacité au champ est souvent remplacée par des valeurs fixes, précises et arbitraires (Pagès *et al.*, 1998

Pour un sol sableux-limoneux, la teneur en eau à la capacité de rétention mesurée au laboratoire à pF 2.2 donnent une moyenne de 20 % pour les deux profondeurs des trois

sols étudiés. Cette valeur est très proche de celle de Rowell (1994), qui montre que dans un sol à texture sableuse, la teneur en eau à la capacité au champ est de 22 %. Dans le même sens, Jensen *et al* (1990) in Delcourt (1998) donnent plus de détail quant à la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement pour un sol à texture sableuse ; des valeurs indicatives sont présentées dans le tableau LXIX

Texture	Teneur en eau %		Texture		
	Capacité au champ	Point de flétrissement	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)
Sableuse	12	4	92	4	4
	14	6	84	6	10
	23	10	65	25	10

Tableau LXIX. Valeurs indicatives de la teneur en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement selon la texture sableuse (Jensen *et al.*, 1990 in Delcourt)

D'autres part, d'après les travaux de Bruand *et al.* (1996), la teneur en eau des échantillons prélevés à la capacité au champ pour un sol sableux serait proche de celle mesurée in situ à pF 2.5. La différence entre les deux mesures est plus élevée pour les sols à texture argileuse et limoneuse par rapport à la texture sableuse, la teneur en eau ne dépend pas uniquement de la texture du sol mais aussi de la structure du sol (mode d'agencement des agrégats) .

Les résultats relatifs à la teneur en eau pondérale en % à la capacité de rétention pF égale à 2.2 et qui seraient très proches de la teneur en eau à la capacité au champ pour les trois parcelles sont mentionnés dans le tableau LXX.

Sites	Minimal	Maximal	Moyenne	Ecart type
Horizon de surface				
1	20.16	24.12	22.06	1.89
2	17.09	20.5	19.05	1.30
3	18.9	23.72	21.24	2.39
Moyenne des 3 sites	19.03	22.06	20.77	1.56
Horizon de Sub-Surface				
Sites	Minimal	Maximal	Moyenne	Ecart type
1	20.10	21.34	20.76	0.50
2	17.09	19.8	18.57	1.38
3	19.43	23.21	21.55	1.88
Moyenne des 3 sites	18.57	21.55	20.29	1.54

Tableau LXX. Teneurs en eau pondérales (%) correspondants aux valeurs du pF =2.2 des deux horizons H1 et H2

D'autre part, la conversion des valeurs de la CE de l'extrait aqueux (1/2) en valeurs correspondantes à celles de l'extrait de pâte saturée est réalisée ainsi :

Extraits aqueux = 1 / 2 : 100 g de terre + 200 ml d'eau .

A la capacité au champ, la teneur en eau à pF 2.2 est en moyenne de 20 %.

La teneur en eau à saturation correspondrait à 2 fois la teneur en eau à la capacité au champ, soit $2 \times 20 \% = 40 \%$. Ce résultat signifie qu'à saturation, 100 g de terre contiennent 40 ml d'eau. Le rapport terre / eau de l'extrait aqueux 1 / 2 correspond à 200 ml d'eau par 100 g de terre. Le rapport de dilution est de $200 \text{ ml} / 40 \text{ ml} = 5$, cela signifie que les extraits aqueux 1 / 2 ont été dilués 5 fois par rapport à l'extrait de pâte saturée.

Pour obtenir les valeurs de la CE correspondants à l'extrait de pâte saturée, les valeurs de la CE du rapport 1 / 2 seront multipliées par 5. Ce calcul néglige les risques éventuels de solubilisation des sels peu solubles qui peuvent se produire dans l'extrait aqueux 1/2 (USSL, 1954).

Les valeurs obtenues seront interprétées selon les classes de salure en dS/m à

25 °C proposées par l'USSL (1954) :

< 2 dS/m : non salé

2 à 4 dS/m : peu salé

4 à 8 dS/m : salé

> 8 dS/m : très salé

Selon l'échelle d'interprétation de USSL (1954), les niveaux de salinité enregistrés à l'état initial et à l'état final sont présentés dans le tableau LXXI.

	Site (1) 2 années	Site (2) 3 années	Site (3) 4 années
<i>Etat initial</i>	CE en dS/m de l'extrait de pâte saturée		
Horizon 1 (0-20 cm)	2.5	1.77	7.5
Horizon 2 (20-40 cm)	4.5	2.67	10.6
Classe de salure	Peu salé	Non salé	Très salé
<i>Etat final</i>	CE en dS/m de l'extrait de pâte saturée		
Horizon 1 (0-20 cm)	4.7	4.67	12.5
Horizon 2 (20-40 cm)	7.15	7.67	10.1
Classe de salure	Salé	Salé	Très salé

Tableau LXXI. Etats de salinité des horizons selon leur CE de la pâte Saturée (dS/m à 25°C) et selon les normes de l'USSL (1954)

A l'état initial, pour la deuxième année d'irrigation (Site1), la CE varie entre 2.5 et 4.5 dS/m, elle correspond aux classes peu salée et salée. Lors de la troisième année (Site 2), la CE varie de 1.77 à 2.67 dS/m, elle correspond aux classes non salées et peu salées. La comparaison de cet état de salinité avec le témoin qui est de 2.55 dS/m (extrait de la pâte saturée) donne une différence non significative. L'irrigation des sols cultivés pour la 2 et 3 années ne provoque pas une salinité importante ; les valeurs de la CE obtenues sont comparables à celles du témoin.

A partir de la quatrième année d'irrigation, le site 3 se différencie nettement du témoin

et des deux autres sites (1 et 2) par une forte accumulation saline. Celle-ci passe de 2.55 dS/m (témoin) à de 7.5 dS/m dans l'horizon de surface et à 10.6 dS/m dans l'horizon sous jacent. Lors de la quatrième année (site 3), la CE varie de 7.5 à 10.6 dS/m, les 2 horizons appartiennent à la classe très salée.

A l'état final, les valeurs de la CE équivalentes à l'extrait de la pâte saturée enregistrent des valeurs comprises entre 4.67 dS/m et 7.87 dS/m pour les deux horizons des sites 1 et 2, ces valeurs appartiennent à la classe salée et correspondent 2 à 3 fois la valeur de la CE du témoin.

Le site 3 présente des valeurs comprises entre 12.5 dS/m et 10.1 dS/m l'horizon de surface et dans l'horizon sous jacent, ces 2 horizons sont très salés. La comparaison des moyennes avec le témoin donne une différence très significative.

Le sol témoin est classé peu salé, la salinité moyenne de l'horizon supérieur est de 2.55 dS/m. La comparaison avec les sols cultivés montre que les 3 premières années de mise en irrigation affectent faiblement la salinité des sols. En revanche, c'est lors de la quatrième année que l'augmentation de la salinité par rapport au témoin est très significative.

L'effet cumulé des irrigations a conduit à une salinisation secondaire des sols (Feng *et al.*, 2003). Cette salinisation est une caractéristique qui a peu d'importance sur l'évolution de ce type de sols sableux. En effet, les sables et la plupart des limons sont chimiquement inactifs, et les propriétés chimiques des sols dépendent essentiellement de la nature et du pourcentage des particules d'argiles et de la teneur en matière organique.

8. 2. Evolution des paramètres de la salinité dans les sols

La distribution des cations et des anions solubles dans les 3 sites

Pour caractériser l'évolution de la salinité au niveau du sol, les échantillons ont été prélevés 1 / 2 heure après irrigation, car la concentration ionique de la solution du sol est fonction de la teneur en eau du sol (Mengel et Kirkby, 1978 ; Hamed *et al.*, 2003 ; Hook *et al.*, 2004).

L'analyse de la solution du sol de l'extrait aqueux (1/2) dans les trois sites montre une distribution des cations dans le sens croissant suivant $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$ et les pour anions $\text{SO}_4^{--} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$. Le sodium et les sulfates sont les ions qui prédominent dans la solution, ce qui est caractéristique des solutions salines neutres (Duchaufour, 1983 ; Sparks, 1995). Les sels les plus abondants sont représentés par les chlorures de sodium (NaCl) et les sulfates de sodium ($\text{Na}_2 \text{SO}_4$).

Les conséquences de cette salinité enregistrent un effet direct sur la nutrition minérale et hydrique de la plante par suite des modifications du potentiel osmotique. Ceci se traduit par la diminution de la disponibilité en eau pour la nutrition hydrique (augmentation du potentiel osmotique), par le déséquilibre de la balance ionique et aussi par des effets de toxicité de certains ions en solution

(Cheverry et Bourrier, 1998 ; Katerji, 1995 ; Cheverry, 1995 ; Hamdy *et al.*, 1995 ;

Van Hoorn, 1995 ; Ayers et wescot, 1994).

D'après Blumwald *et al* (2000) dans les sols salés le NaCl présente le principal effet de stress salin pour les plantes. Par contre Mengel et Kirgby (1978) suggèrent que les sulfates de sodium sont aussi néfastes que les chlorures de sodium pour la plante.

D'autre part, les résultats montrent, que dans la majorité des cas, la somme des cations bivalents est inférieure à la somme des cations monovalents. Cette observation pourrait s'expliquer par le fait que la concentration des solutions du sol par évaporation provoquerait la précipitation de certains sels peu solubles tels que le gypse et la calcite (Daoud, 1983 ; Boivin, *et al.*, 1998 ; Van Hoorn, 1995).

Le changement de faciès au cours de la concentration de la solution du sol provoque une faible augmentation du SAR qui ne modifierait pas d'une manière significative les propriétés physiques fonctionnelles de ces sols sableux (Daoud et Halitim, 1994).

Les données analytiques du bilan ionique, portées sur le diagramme de Piper ont permis, d'identifier les différents faciès géochimiques des 3 sites d'étude, ces faciès sont sulfaté-sodique, sulfaté-mixte, mixte-sodique, mixte-calcique. Ces résultats, suggèrent une prédominance dans la solution du sol en sodium, en sulfates et en chlorures.

· La sodicité (SAR)

Les résultats des valeurs du SAR de la solution du sol des trois sites, montrent que la sodicité varie faiblement dans les deux profondeurs entre le stade tallage et le stade maturation, les valeurs obtenues sont généralement inférieures à 4. Ce niveau de sodicité ne présente pas de risque de dégradation des propriétés physiques des sols étudiés (USSL, 1954 ; Daoud et Halitim, 1994).

· Le pH

Le pH est légèrement basique et dans tous les cas, ses valeurs varient entre 7.08 et 8.36. Son évolution serait influencée par la salinité et par la présence du calcaire.

La part de la salinité, se traduit par l'effet de l'ensemble des cations et des anions présents dans la solution du sol (Warrence *et al.*, 2003). Les variations du pH dans les sols au niveau des deux profondeurs et au cours du cycle végétatif ne sont pas statistiquement significatives ; les valeurs obtenues restent dans le domaine de l'alcalinité. Concernant l'effet de la phase calcaire, les teneurs en calcaire total sont relativement élevées dans les trois sols, elles varient entre 10 et 25 %, avec une moyenne de 15 %. Les travaux de Djili et Daoud (1999) ont montré que des teneurs en carbonates de calcium de l'ordre de 2,5 % suffisent à tamponner le pH à un niveau relativement alcalin. Les résultats du pH obtenus dans les sols étudiés sont caractéristiques des sols modérément calcaires (Fardeau et Stengel, 1998 ; Baize, 2000).

Le pH est un facteur qui influence considérablement la composition de la solution du sol, il agit différemment sur la solubilité des éléments nutritifs. Les valeurs enregistrées constituent un facteur limitant quant à la biodisponibilité de certains éléments nutritifs tels que les oligo-éléments comme le fer, le manganèse, le cuivre, et le zinc qui ont un rôle physiologique important au niveau de la plante (Rognon, 1994). Le molybdène pour les

oligo-éléments, le soufre et l'azote pour les macroéléments ont une biodisponibilité qui est favorisée par ces valeurs de pH (Bohn *et al.*, 1985).

Le rapport Na^+ / K^+

Le rapport Na^+ / K^+ présente, dans la majorité des cas des valeurs très élevées qui engendreraient des problèmes de déséquilibres ioniques par rapport aux exigences de la plante, avec des problèmes d'antagonismes ioniques (Hamdy, 2002 ; Blunwald *et al.*, 2000). En effet, des teneurs élevées en sodium bloquent l'assimilation du potassium et du calcium. Ce déséquilibre conduit à une déficience en potassium, qui se traduit par des symptômes de nécrose et de chlorose qui n'apparaissent que tardivement sur les feuilles âgées de la plante (Mengel et Krikby, 1978).

Les travaux de Zid et Grignon (1991) ont montré que chez le blé, en conditions de stress salin, il se produit une accumulation du sodium dans les parties aériennes au détriment du potassium. D'autre part, Bouaouina *et al.*, (2003) révèlent que le blé dur dispose de mécanismes de régulations permettant la restriction du transport et de l'accumulation du sodium dans les jeunes feuilles. L'accumulation du sodium, présente un gradient décroissant des feuilles âgées vers les jeunes feuilles.

Le rapport $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$

Dans tous les cas, le rapport $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$ est supérieur à 1. Les solutions du sol, constituent donc des milieux présentant une prédominance en calcium. Un milieu bien pourvu en calcium est favorable aux phénomènes d'antagonismes marqués avec le magnésium, le potassium (Lesaint et Coic, 1983). Ce déséquilibre ionique pourrait engendrer des troubles dans l'assimilation des éléments majeurs, ce qui entraînerait un déséquilibre dans l'assimilation des oligo-éléments et aboutirait ainsi aux phénomènes de chlorose avec un ralentissement de la photosynthèse. Les conséquences se traduiraient par une diminution de la vitesse de croissance (Snoussi et Halitim, 1996).

Les sels de magnésium sont nettement plus nocifs pour les plantes par rapport aux sels de calcium à la même concentration. Cette toxicité du magnésium est réduite en présence de teneurs relativement élevées en ions calcium dans la solution du sol (USSL, 1954).

Le rapport $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^-$

Le rapport $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^-$ est compris entre 0.2 et 1, ce qui montre une prédominance des sulfates par rapport aux chlorures. Dans ces conditions, les ions SO_4^{--} sont susceptibles de se lier avec les ions calcium pour précipiter et former le gypse (Mengel et Kirby, 1978 ; Halitim, 1988). La proportion des sulfates prédomine largement par rapport à la somme des anions. Elle est en moyenne de 70 %.

Des études ont montré que de fortes teneurs en sulfates réduisent l'absorption du molybdène, limitent l'assimilation du calcium par les plantes et augmentent l'assimilation du sodium et du potassium ; ce qui engendreraient un déséquilibre dans la balance cationique (USSL, 1954). Mengel et Kirby (1978) rapportent que les sulfates sont souvent plus toxiques que les chlorures dans les sols salés et des teneurs de 50 mM dans les sols

salés peuvent affecter la croissance de la plante.

· **Les ions CO_3^{--} et HCO_3^-**

Une absence des teneurs en carbonates est observée. Ce résultat est expliqué par les valeurs de pH qui sont inférieures à 8.36 dans les sols étudiés et qui sont incompatibles avec leur présence (carbonates) (Warrence *et al.*, 2003). Les bicarbonates existent à de faibles teneurs. Ils représentent moins de 12 % de la somme des anions.

8.3. La vitesse de salinisation des sols

Les sols non irrigués (témoin) de la région de Adrar sont initialement peu salés selon la classification de USSL (1954), ils se salinisent à partir des sels solubles contenus dans les eaux d'irrigation. Le degré avec lequel le processus de salinisation se produit dépend :

- de la salinité de l'eau d'irrigation,
- du bilan entre l'apport d'eau d'irrigation à la surface du sol et le déplacement de drainage de la limite inférieure du profil.

Dans le cas étudié, le calcul de la vitesse de salinisation se fait en fonction du nombre d'année des sites, à partir de la conductivité électrique de la solution du sol témoin et de la conductivité électrique des solutions des sols obtenus en fin de cycle végétatif du blé.

Les valeurs de la salinité exprimées par la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée ont été ramenées à l'horizon de surface 0 – 30 cm. Cette conversion se justifie par l'accumulation croissante et la dynamique importante des sels solubles lors des irrigations avec des eaux salées dans les couches supérieures 0- 30cm (Singh, 1994 ; Saidi, 2004).

Le calcul de la CE correspondant à l'extrait de la pâte saturée dans la couche 0 – 30 cm se fait comme suit :

$$\frac{(\text{CE de l'extrait de la pâte saturée} \times 20 + \text{CE de l'extrait de la pâte saturée} \times 10) \times 30}{100}$$

20 : Correspond à la profondeur de la couche supérieure 0 - 20 cm

10 : Correspond à la profondeur de couche sous-jacente 20 - 30 cm

30 : Correspond à la profondeur utile prospectée par es racine en irrigué 0-30cm

La vitesse de salinisation (V_s) qui exprime l' augmentation de la salinité en dS/m / nombre d'année se calcule comme suit :

$$V_s = \frac{(\text{CE du sol irrigué}) - (\text{CE du témoin non irrigué})}{\text{nombre d'année d'irrigation}}$$

Les résultats du tableau LXXII montrent que la vitesse de salinisation des sols est variable en fonction du nombre d'années d'irrigation. En effet, les sites cultivés pendant 2 et 3 ans présentent une vitesse de salinisation relativement plus faible, respectivement de 1.50 dS / 2 ans et 1.66 dS/m / 3 ans, par rapport au site irrigué pendant 4 années et dont la vitesse est de 2.3 dS/m/ 4 ans. Ce résultat suggère que la pratique actuelle des irrigations au niveau des trois périmètres irrigués avec des eaux de même qualité (CE comprise entre 1.5 et 1.66 dS/m) conduit à une salinisation variable dans le temps. La quatrième année d'irrigation semble la plus favorable à l'accumulation des sels solubles dans le sol.

Tableau LXXII. Vitesse de salinisation des sols dans la couche : 0-30 cm

Sites	CE (dS/m)	CE du témoin (dS/m)	Vitesse de Salinisation (dS/m)/année
1 (2ans)	5. 51	2.55	1.50
2 (3ans)	5.73	2.55	1.06
3 (4ans)	11.7	2.55	2.3

La qualité de l'eau d'irrigation, la perméabilité et la texture des sols qui pourtant présentent des propriétés satisfaisantes quant à la salinisation des sols (Daoud et Halitim., 1994 ; Siemens et Kaupenjohann, 2004)) mais ne permettent pas d'éviter la salinisation secondaire à long terme des sols sans un système de drainage et avec une topographie qui ne permet pas un lessivage naturel des sels solubles.

De nombreux travaux ont montré que l'effet conjugué des irrigations avec des eaux salées sous un climat évaporant, conduisent à une salinisation des sols à

long terme dans les régions arides et semi-arides et à la diminution des rendements des cultures (Rognon, 1996 ; Daoud et Halitim, 1994 ; Ghassemi *et al.*, 1995 ; Bedraoui *et al.*, 1998 ; Djili *et al.*, 2003).

Par ailleurs, la réhabilitation des sols salés par une opération de lixiviation des sels solubles est très possible pour réhabiliter des terres salées. En effet, le cas d'une ferme expérimentale en Syrie est un exemple édifiant : différentes pratiques d'irrigation avec l'installation d'un système de drainage y ont été testées et ont permis de diminuer la salure des sols et de les rendre à nouveau fertiles (Hachicha, 1998; Salim et Tessier, 1998).

8. 4. Facteur de concentration de l'eau d'irrigation

La salinité de l'eau d'irrigation influence l'accumulation des sels solubles dans le sol (Ghassemi *et al.*, 1995 ; Warrence *et al.*, 2003), en effet, après des irrigations répétées, les sels contenus dans l'eau d'irrigation peuvent s'accumuler dans le sol et réduire les disponibilités en eau de la plante. Cette présence de sel se traduit par une réduction de la disponibilité de l'eau d'autant plus importante que le sol est sec et que la salinité est assez forte.

Par ailleurs, étant donné que l'échantillonnage du sol s'est réalisé 1/2 heure après

irrigation et s'agissant d'un sol à texture Sablo-limoneuse, Van Hoorn (1995) considère que l'eau d'irrigation s'est mélangée complètement avec la solution du sol. Le potentiel hydrique de l'eau diminue progressivement au niveau de la rhizosphère et la salinité augmente en fonction de l'absorption hydrique de la plante et de l'évapotranspiration (Shannon, 1993 ; Warrence *et al.*, 2003) ce qui entraîne une concentration de la solution du sol.

L'augmentation de la salinité des sols irrigués correspond à une concentration de l'eau d'irrigation (Valles, 1988 ; Robert, 1992).

Le calcul réalisé ici tente de déterminer le facteur de concentration de l'eau d'irrigation dans les sols étudiés. Ce dernier est le résultat du rapport de la CE de l'extrait de pâte saturée de la solution du sol avec celui de l'eau d'irrigation (rappelons que la CE de l'extrait de pâte saturée est calculé à partir de l'extrait aqueux (1/2).

Le site cultivé pour la quatrième campagne se distingue des deux autres sites par le niveau élevé du facteur de concentration. Dans ce site, la solution du sol des deux profondeurs correspondrait à une eau d'irrigation concentrée, respectivement, 7.53 fois pour l'horizon de surface et 6.1 fois pour l'horizon de subsurface.

Tableau LXXIII. Le facteur de concentration de l'eau d'irrigation

Sites	CE (sol)dS/m	CE de l'eau d'irrigation dS/m	Facteur de Concentration
Site1 (2 ans) Etat initial H1 H2 Etat final H1 H2	2.5 4.5 4.7 7.15	1.5	1.66 3.0 3.13 4.76
Site 2 (3ans) Etat initial H1 H2 Etat final H1 H2	1.77 2.67 4.67	7.8760	1.10 1.66 2.91 4.91
Site 3 (4 ans) Etat initial H1 H2 Etat final H1 H2	7.5 10.6 12.5 10.1	1.66	4.51 6.4 7.53 6.1

8.5. Variabilité spatiale

La variabilité spatiale d'un sol cultivé est inhérente aux facteurs du milieu, essentiellement la topographie, le climat et l'itinéraire technique réalisé (Iqbal *et al.*, 2005 ; Mzuku, 2005). Cette variabilité spatiale des propriétés physiques et chimiques des sols se traduit par une variabilité des rendements obtenus (Maynard et David, 1992 ; Mzuku, 2005).

L'étude de la variabilité spatiale au niveau des trois parcelles étudiées, enregistre une différence significative pour l'ensemble des paramètres chimiques analysés ; les plus fortes variations sont enregistrées pour la conductivité électrique, les sulfates, les chlorures et le rapport Cl^-/SO_4^{2-} avec un Coefficient de Variation supérieur à 25 %.

En revanche, la variabilité verticale au niveau les deux profondeurs (H1 et H2) pour la salinité et l'ensemble des paramètres chimiques analysés, montre qu'il n'y a aucune

différence significative ; les deux horizons sont assez homogènes.

Par ailleurs, des études sur la variabilité spatiale de la salinité dans un périmètre irrigué à texture fine montrent que le fonctionnement géochimique du sol a induit une variabilité spatiale élevée de la salinité ; celle-ci est atténuée en profondeur par la présence d'une nappe (Hachicha *et al.*, 1996).

Les résultats obtenus au niveau des trois parcelles, suggèrent que cette variabilité spatiale pourrait s'expliquer par l'effet conjugué d'un ensemble de facteurs dont la résultante induit une variabilité élevée de la salinité en surface.

Ces facteurs sont liés au climat, au mode d'irrigation, et aux facteurs intrinsèques au sol. Pour l'effet climat, le paramètre qui influe sur la distribution de l'eau par aspersion est le vent dont la fréquence et la vitesse évaluée à 5m/s pour les 45 à 50 % d'entre eux, sont importantes dans cette région. Ce phénomène est sous-estimé et souvent ignoré dans la conception et la conduite des irrigations par pivot. Une enquête réalisée en France montre une diminution des rendements des cultures irriguées sous pivot est estimé entre 25 à 30 % causé par l'effet du vent (Delcourt, 1998). Dans le même sens, des études de Mouhouche (2000) ont montré que dans la région de Adrar, il y a une très mauvaise répartition de l'eau au niveau des travets ; elle se traduit par une forte hétérogénéité des rendements en blé, de 9.5 q/ha à 30 q/ha, suivant le rayon d'action du pivot.

Parmi les facteurs intrinsèques au sol observés sur le terrain, se manifestent d'une part par la présence d'une charge caillouteuse non négligeable en surface et dans tout le profil du sol et d'autre part par l'existence d'un microrelief, ce qui influe considérablement sur le mouvement de l'eau et des solutés dans du sol.

8. 6. L'effet de la salinité sur la diminution des rendements du blé

Chez la majorité des plantes cultivées même si elles sont tolérantes aux sels, présentent une diminution des rendements lorsqu'elles croient sous des conditions salines (Mass et Hoffman, 1977 ; Maas, 1986).

Chez les céréales, l'effet dépressif du sel se manifeste à partir d'un seuil critique de concentration caractéristique de l'espèce et de la variété (Kingsbury *et al.*, 1984 ; Cramer *et al.*, 1994). D'une manière générale les céréales sont modérément tolérantes à la salinité (Lelang *et al.*, 1994 ; Ayers et wescot, 1988). Cette tolérance aux sels varie en fonction des stades de développement végétatif. Cependant, le stade le plus sensible est le stade germination où la conductivité électrique ne doit pas dépasser 4 dS/m (USSL, 1954).

Tableau LXXIV. Diminution des rendements en blé sous l'effet de l'augmentation de la salinité selon (FAO, 1986)

CE de la solution du sol extrait de pâte saturée (dS/m)	6	7.4	9.5	13	20
Chute du rendement (%)	0	10	25	50	100

Au niveau des parcelles étudiées, la céréale cultivée est la variété Waha, du blé dur, plus exigeant que le blé tendre, et donc relativement plus sensible à l'effet de la salinité

(Maas, 1990 ; Oujida *et al.*, 2002).

Des études de Daoud et Halitim (1994) ont montré que pour cette céréale le seuil critique est évalué à une concentration entre 1.3 et 1.4 g/l donc très sensible, pour une concentration de 2 g / l il y a une diminution de 50 % de matière sèche ; alors que Mas (1986) montre que le seuil de sensibilité pour cette céréale est plus élevé est de 4 g/l pour une diminution du rendement de l'ordre de 10 % .

Afin de quantifier la contrainte salinité, qui affecte une diminution des rendements au niveau des parcelles étudiées, nous considérons la moyenne de la conductivité électrique équivalente à celle de l'extrait de la pâte saturée à 25°C obtenue aux stades tallage et maturation. Cette valeur est calculée sur une profondeur de 0-30 cm, celle-ci correspond d'une part à la profondeur utile d'enracinement maximum et où l'alimentation hydrique est la plus favorable en irrigué (Callot *et al.*, 1982 ; Valles, 1988) et d'autre part à l'accumulation des sels solubles (Singh *et al.*, 1994).

Le calcul de la CE sur une profondeur utile de 0 – 30 cm

$$[CE (H1) * 20 + CE (H2) * 10] / 30$$

CE(H1) = CE de l'horizon 1 sur une profondeur de 0 – 20 cm

CE (H2) = CE de l'horizon 2 sur une profondeur de 0 – 20 cm

30 = Profondeur utile d'enracinement en cm

Les résultats relatifs à l'état de salinité dans les trois parcelles au stade tallage, montre que l'état de salinité est comparable à celui du témoin pour les sites 1 et le site 2. A ce stade, la salinité ne peut constituer une contrainte à l'élaboration des composantes du rendement, car la CE est inférieure à 4 dS/m au niveau de l'horizon de surface (0-30 cm); par contre, pour le site 3, la CE est égale à 8.53 dS/m et cette valeur est suffisamment élevée pour affecter le rendement.

En revanche, au stade maturation, les irrigations ont favorisé une faible augmentation de la salinité dans les sites 1 et 2, et une augmentation significative dans le site 3 où la CE passe de 2.55 dS/m à 10.11 dS /m dans l'horizon de surface (0 –30 cm).

D'autre part, les composantes du rendement se forment pendant des phases du cycle bien délimitées. Chaque composante est influencée par les facteurs du milieu (Maynard et David, 1992). Dans le cas étudié, la salinité est le principal facteur limitant la phase de formation des composantes du rendement. En effet, pour le blé, le nombre de grains /m² est déterminé à quelques jours près de l'anthèse. Le poids moyen du grain se détermine entre l'anthèse et la maturité.

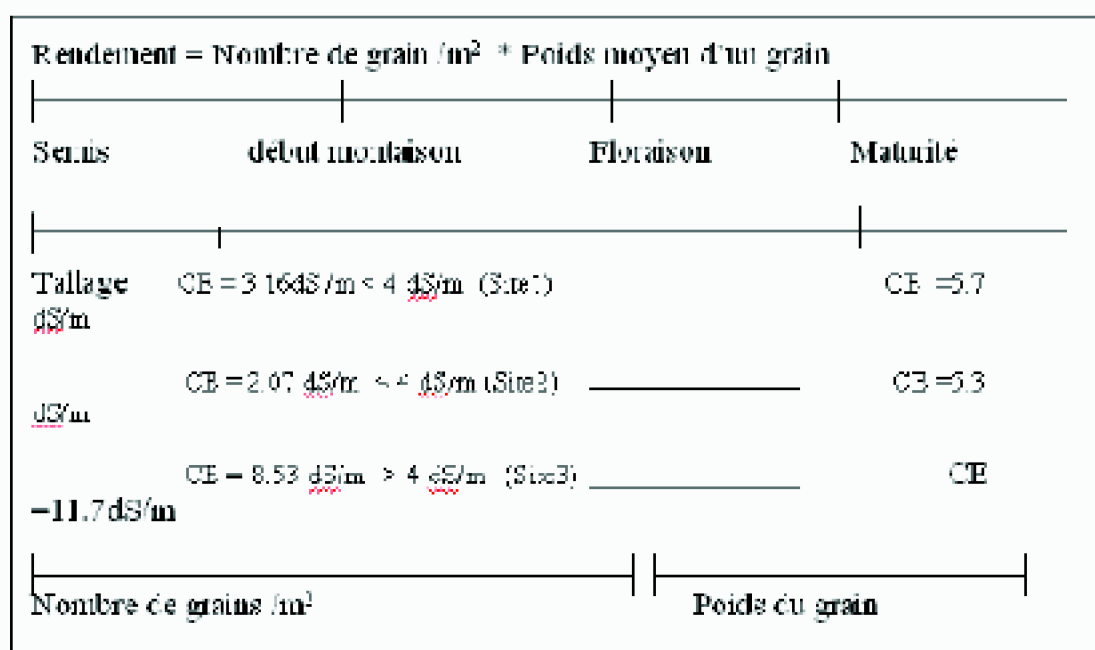


Figure 13. Période de formation des composantes du rendement du blé

D'autre part, les résultats présentés relatifs à l'état de salinité moyenne des trois parcelles (moyenne de la CE correspondant à l'extrait de pâte saturée entre les 2 horizons et entre le stade tallage et le stade maturation) et aux rendements obtenus en grains de blé (l'information est collectée auprès du producteur) sont présentés dans le tableau LXXV.

Tableau LXXV Variation du rendement (q/ha) en fonction de la salinité de l'horizon 0-30 cm

Sites	CE moyenne (dS/m)	CE dS/m Témoin)	Rendement q/ha	Seuil de tolérance
1	4.33	2.55	26	6
2	3.87	2.55	22	6
3	10.11	2.55	8	6

Pour les deux sites cultivés pendant 2 et 3 années, ils présentent une salinité qui est en moyenne respectivement, de 4.33.5 dS/m et 3.87 dS/m au niveau de l'horizon 0 – 30 cm ; les rendements obtenus sont de l'ordre de 26 q/ha et 22 q/ha. Bien que les deux sites présentent un même niveau de salinité, les rendements obtenus diffèrent d'une parcelle à une autre. Cette différence est attribuée, en partie, à l'hétérogénéité au niveau de la parcelle et entre les parcelles (Mzuku, 2005). En effet, des études ont montré que quelque soit la culture, la quantité de produit récolté est extrêmement variable d'une parcelle à l'autre, d'une année à l'autre et d'un agriculteur à l'autre (Meynard et David, 1992).

Pour le site cultivé pendant 4 années, la salinité est en moyenne de 10.11dS/m (extrait de la pâte saturée), affecte fortement le rendement du site 3 qui est évalué à 8 q/ha.

Pour les Sites 1 et 2, la $CE < 6$ dS / m ne provoque pas de chute de rendements.

Le rendement moyen des sites 1 et 2 = $(26 + 22) / 2 = 24$ q / ha

Le rendement du site 3 = 8 q / ha.

Le niveau de rendement entre les sites 1 et 2 non salé et le site 3 salé a diminué de $24 - 8 = 16$ q/ha

Cette diminution du rendement est provoquée par une augmentation de la salinité de $10.11 - 6 = 4.11$ dS/m.

Ce résultat signifie qu'une augmentation de la salinité de 4.11dS /m provoque une chute de rendement de 16 q / ha, soit une chute de rendement de 3.89 q/ha pour une augmentation de la salinité de 1 dS/m.

Chaque 1 dS/m provoque une chute de rendement de 3.89 q / ha

- $CE < 6$. dS/m → Rendement = 24 q/ha
- $CE = 7$. dS/m → Rendement = $24 - 3.89 = 21.2$ q / ha
- $CE = 8$. dS/m → Rendement = $21.20 - 3.89 = 18.4$ q / ha
- $CE = 9$. dS/m → Rendement = $18.40 - 3.89 = 15.6$ q / ha
- $CE = 10$. dS/m → Rendement = $15.60 - 3.89 = 12.8$ q / ha
- $CE = 10.11$ dS/m → Rendement = $12.80 - 3.89 (2.8 * 0.11) = 11.61$

Pour une $CE = 10.11$ dS/m à 25 °C, il y a une diminution de rendement = 11.61 q / ha.

Par ailleurs, la tolérance au sel s'exprime en terme de croissance, de développement et de survie (USSL, 1954 ; Mass, 1990 ; Zid et Grignon, 1991).

Pour la plupart des plantes étudiées, elle peut être exprimée par une équation linéaire simple de type :

- $Y = 100 - B (CE_e - A)$
- 100 : Rendement maximum
- Y: Rendement
- CE_e : CE de l'extrait de pâte saturée de la zone racinaire de la culture
- A : Seuil de tolérance de la culture, égal à 6 dS/m
- B : Le pourcentage de réduction de la croissance par unité d'augmentation de la CE au-delà du seuil de tolérance A.

L'application de cette équation aux résultats obtenus dans la région de Adrar serait la suivante :

- 100 : Correspond au rendement maximum = 24 q/ha
- CE_e : Correspond à la salinité du site 3 = 10.11 dS/m à 25 °C.
- $B : (24 - 8) * 100 / 24 (10.11 - 6) = 16.21\%$.

Dans ce cas, $Y = 100 - 16.21 (CEe - 6)$

$$Y = 100 - 16.21CEe + 97.26 = 197.26 - 16.21 CEe$$

$$Y = 197.26 - 16.21 CEe$$

CONCLUSION GENERALE

Depuis environ une vingtaine d'années, les zones sahariennes ont connu une extension de la céréaliculture irriguée par aspersion. Cette agriculture est confrontée à un climat saharien sévère caractérisé par des paramètres climatiques à valeurs extrêmes, le régime hydrique climatique est hyper aride

(pluviométrie < 50 mm /an), les vents sont violents et fréquents (vitesse > 5 m/ s pour 40 à 50 % d'entre eux), et les températures sont élevées. Ces facteurs favorisent l'évapotranspiration. Celle-ci est évaluée en moyenne à 960 mm pour un cycle végétatif des céréales de décembre à fin avril.

Le sous-sol recèle des ressources hydriques importantes mais non renouvelables contenues dans la nappe Albienne peu profonde. Ces eaux sont relativement chargées en sels solubles (2g/l) et sont de qualité médiocre pour l'irrigation.

Les sols de la région de Adrar présentent un faible niveau de fertilité chimique, physique et biologique à cause de leur texture sableuse. Ils sont peu salés, pauvres en matière organique, relativement riches en calcaire total, perméables et peu profonds.

L'objectif principal de ce travail est de caractériser l'état de salinité des sols irrigués par pivot depuis quelques années et d'évaluer les conséquences sur les rendements du blé.

Pour évaluer l'état de la salinité des sols et son évolution dans le temps, trois parcelles irriguées respectivement depuis 2, 3 et 4 années sont étudiées.

Les résultats obtenus relatifs aux caractéristiques chimiques des eaux d'irrigation de

la nappe albiennne mettent en évidence un fort risque de salinité et un faible danger de sodicité, les teneurs en sodium et en chlorures contenus dans ces eaux sont excessives en mode d'irrigation par aspersion.

Les résultats relatifs aux profils hydriques mesurés avant et après irrigation ont mit en évidence un déficit hydrique permanent au niveau des deux profondeurs du sol de profondeur. Ce résultat signifie que la dose d'arrosage au stade maturation est très insuffisante pour humecter les horizons.

La caractérisation de la salinité au début et à la fin du cycle végétatif dans les trois parcelles montre une nette accumulation significative des sels solubles dans le sol à partir de la quatrième année de mise en irrigation.

En effet, dans l'horizon de surface, la salinité passe de 2.55 dS/m dans le site du témoin à 12.5 dS/m au niveau du site cultivé pour la quatrième année.

Les faciès géochimiques au niveau des trois sites d'étude sont sulfatée-sodique, sulfatée-mixte, mixte-sodique et mixte-calciue. Le changement de faciès au cours de la concentration de la solution du sol provoque une faible augmentation du SAR qui ne modifie pas d'une manière significative les propriétés physiques fonctionnelles de ces sols sableux.

L'évolution de la salinité est étudiée entre deux périodes du cycle végétatif du blé, l'état initial correspond au stade tallage du blé, et l'état final au stade maturation.

A l'état initial, au niveau du premier horizon, l'état de salinité de la solution du sol semble indépendant du nombre d'année d'irrigation. Les évolutions les plus remarquables concernent le second horizon, l'état de salinité de la solution du sol augmente de façon significatif au début de la quatrième année d'irrigation, il varie peu entre le début de la deuxième année et le début de la troisième année d'irrigation.

A l'état final, soit au stade maturation du blé, le premier horizon est nettement plus réactif que le second horizon. En effet, la salinité augmente en fonction du nombre d'année d'irrigation au niveau de l'horizon de surface ; par contre, au niveau du second horizon, le nombre d'année d'irrigation n'affecte pas de façon significative le niveau de salinité de la solution du sol.

La vitesse de salinisation des sols est variable en fonction du nombre d'année d'irrigation. En effet, les sites cultivés pendant 2 et 3 années présentent une vitesse de salinisation relativement plus faible par rapport au site cultivé pendant 4 années. La conductivité électrique de la solution du sol du site cultivé pendant 4 années correspond à celle de l'eau d'irrigation qui se serait concentrée 7.5 fois dans l'horizon de surface et 6 fois dans l'horizon de sub-surface, la vitesse de salinisation annuelle calculée pour le profil serait de l'ordre 2.23 dS/m / an.

Le niveau de salinité atteint après 4 années d'irrigation au niveau de l'horizon de surface dépasse le seuil de tolérance à la salinité du blé dur. La salinisation constituerai donc l'un des principaux facteurs responsables de la diminution des rendements en blé généralement observés après quelques années d'irrigation dans la région d'Adrar.

La pratique empirique actuelle des irrigations par pivot avec une eau minéralisée et sous un climat Saharien très évaporant engendre dès la quatrième année, une

salinisation secondaire suffisante pour affecter le rendement du blé dur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Atia, A. et Abdelly, C. (2005).** Effet du froid sur la germination et la réversibilité de germination chez une halophyte à graines oléagineuses *Crithmum Maritimum*L. Actes du Séminaire International sur l'amélioration des productions végétales. APV :163-165.
- Attalah, S. (2000).** Evaluation de la performance de l'irrigation par pivot dans une région Saharienne : Cas de Ourgla. Thèse de Magister en Sciences Agronomiques. INA 54p.
- Ayers, R. S et Wescot, D.W. (1988).** La qualité de l'eau en Agriculture. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, Ed. FAO. N° 29 Rev. Rome, 180p.
- Ayers, R. S et Wescot, D.W. (1994).** Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Rev. 1 Food and agriculture Organisation of the united Nations Rome.
- Badraoui, M., Soudi, B., et Ferhat, A. (1998).** Variation de la qualité des sols Rev : Etude et Gestion des Sols. 5, 4 : 227-234.
- Baise, D. (2000).** Guide des analyses en pédologie. 2ème Ed INRA. Techniques et Pratiques.
- Bauder, R.Mw et Davis, J.G .(2000).** Water quality for irrigation n° 0506. Colorado State University. CSU Cooperative Extension – Agriculture.
- Ben-Ascher, J. (1994).** Simplified of integrated water and solute Uptake by salt and

- selenium accumulating Plants. Soil Sci . Am. J. 58 : 1012-1016.
- Bernstein, N., Lauchli, A et Silk, W. K. (1993).** Kinematics and dynamics of Sorghum (Sorghum bicolor L.) leaf development at various Na/Ca I. Elongation and growth. Plant. Physiol. 103: 1107 - 1114.
- Bertrand, R., Mammadou, K ., N'diaye et Keita, B. (1994).** L'alcalinisation / Sodisation , un danger pour les périmètres irrigués sahéliens. Sécheresse. 3, 5 : 161- 171.
- Blumwald, E., Aharon,G.S et Apse. M.P (2000).** Sodium transport in plant celles. Biochemica et Biophysica acta 1465, 140- 151.
- Bonilla, I., El-Hamdaoui, A et Bolanos, L. (2004).**Boron and calcium in crease Pisum sativum seed germination and seedling development under salt stress. Plant and Soil. 267 :97- 107.
- Bohn, H.L ., MCNeal, B et O'Connor, G. (1985).** Soil Chemistry, 2 nd Ed John Wiley & Sons, pp 244 – 259.
- Boivin, P., Favre, F et Maeght (1998).** Les sols de la moyenne vallée du fleuve du Sénégal : Caractérisation et évolution sous irrigation. Etude et Gestion des Sols. 5, 4 : 235 - 245
- Bouraoui, N., Grignon, C., Zid, E. (1998).** Effet de NaCl sur la croissance et la respiration racinaire du triticales (X- Triticosecale wittmack). Cahiers Agriculture. 7, 5, : 372-376.
- Bouaouina, S ., Zid, E et Hajji, M. (2003).** Tolérance à la salinité, transports ioniques et fluorescence chlorophyllienne chez le blé dur (Triticum ligitum L). CIHEAM.
- Bruand, A., Duval, O., Gaillard, H., Darthout, R et Jamagne, M. (1996).** Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols : importance de la densité apparente.
- Callot, G., Chamayou, H ., Maertens, C., Salsac, L.. (1982).** Mieux comprendre les interactions Sol- Racine : incidence sur la nutrition minérale. INRA.
- Chaulet,C. (1999).** Pour une approche intégrée de l'agriculture Saharienne. Les 2ème journées Scientifiques de l'INRAA sur l'Agriculture Saharienne. Touggourt les 11, 12 et 13 Octobre.
- Cheverry, C et Robert, M. (1993) .** Salure des sols Maghrébins : Influence sur les propriétés physiques et physico-chimiques des sols. Répercussion des modifications de ces dernières sur la fertilité, notamment azotée. Rapport final du contrat CEE STD TS2- 108 –F, 34p.
- Cheverry, C. (1995).** Comportement des plantes en milieu salé. Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France. 81, 2 : 42-46
- Cheverry, C et Bourrié, G. (1998).** La salinisation des sols in Sol: Interface fragile. Stengel, P ; Gelin, S, Coord. INRA. Paris. 213 p.
- Cheverry, C et Robert, M. (1998).**La dégradation des sols irrigués et la ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la méditerranée. Etude et Gestion des sols. 5, 4 : 217-225
- Cramer, G.R ; Alberico, G.J et Schmidt,C. (1994).** Salt tolerance is not associated with the sodium accumulation of two maize hybrids. Aust. J. Plant Physio., 21: 675 - 692

-
- Daoud, Y. (1983)** .Contribution à l'étude de la dynamique des sels dans un sol irrigué du périmètre du haut Cheliff (Algérie). Thèse de Docteur Ingénieur de l' ENSA de Rennes, 194p.
- Daoud, Y., Cheverry, C., Robert. M. (1993)**. Rôle physico-chimique du magnésium dans les sols des plaines du Cheliff (Algérie). *Science du Sol*. 31, 4 : 281- 293.
- Daoud, Y et Halitim, A. (1994)**. Irrigation et Salinisation au Sahara Algérien. *Sécheresse*. 5,3: 151-160.
- Debez, A., Ben Hamed, K., Grignon, C et Abdelly, C. (2004)**.Salinity effet on germination, growth, and seed production of the halophyte *Cakile maritime*. *Plant an soil*. 262 : 179-189
- Delcourt, A. (1998)**.Aspects environnementaux, in : *Traité d'irrigation*. Ed. Technique et documentation ISBN : 2- 7430 – 0244 – 1pp
- Djili, K et Daoud, Y. (1999)**. Relation entre le pH et la teneur en carbonates de calcium des sols. Cas des sols du Nord Algérien. *Agrochimica*, Vol . XLIII- N, 3-4
- Djili, K ., Daoud, Y., Gaouar, A et Beldjoudi, Z . (2003)**. La salinisation secondaire des sols au sahara. Conséquences sur la durabilité de l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur. *Sécheresse*. 4, 14 : 241- 246.
- Douaoui, A., Gaouar, A., Benbouali, E . (2000)**. Variabilité temporelle de la salinité dans le périmètre de Hamadna (Relizane). *Congrès Scientifique Arabe, El Oued*, 224 -233.
- Dubost, D. (1992)**. Aridité, agriculture et développement : le cas des oasis Algériennes . *Sécheresse* ; 3 : 85- 96
- Duchaufour, Ph. (1983)**. 1- Pédologie : Pédogenèse et Classification. 2 éme 2dition Masson 491p.
- Dutuit, R., Pourrat, Y et Dutuit, J.M. (1994)**. La notion de stress de la cellule à l'écosystème. *Sécheresse* 1 , 5 : 23 - 31.
- FAO . (1986)**. Les besoins en eau des cultures . *Irrigation et drainage . Bulletin n° 24*. 81 p.
- FAO .(1987)**. Les besoins en eau des cultures. *Irrigation et drainage. Bulletin n° 29* : p. 201- 209.
- Fardeau, J.C et Stengel, P. (1998)**. Sol et Echange avec le couvert végétal in : *Sol Interface Fragile*. INRA . Paris. 41-62 pp
- Feng, G.L., Meiri, A et Letey, J. (2003)**. Evaluation of a Model for Irrigation Management Under Saline Conditions : Effet on Plant Growth. *Soil. Sci. Am. J.* 67: 71- 76.
- Ghassemi, F., Jakeman, AJ et Nix, HA . (1995)**. Salinisation of land and water Ressources. Human causes, Extent, Management and case studies. Centre for resource and environmental Studies. The Australian National University. Canberra ACT 0200 Australia.
- Hachicha, M., M'hiri, A., Bouksila, F., et Bach Hamba,I. (1997)**. Variabilité et répartition de l'argile et de la salinité dans les périmètre de Kalaât Landelous (Tunisie). *Etude et Gestion des sols*. 4, 1 : 53-66.
-

- Halitim, A. (1988).** Les sols des régions arides d'Algérie. OPU Alger, 384 p.
- Hamdy, A. (2002).** Soil Salinity, Crop Salt Response and Crop Salt tolerance Mechanisms. in : Advances in Soil Salinity And Drainage Management To save Water and Protect the environment. October 15- 27. Ministry of Agriculture- Alger, Algeria. 508p
- Hamdy, A., Lasram, M et Lacirignola, C. (1995).** Les problèmes de salinité dans la zone méditerranéenne. Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France. 81, 2 : 47 – 60.
- Hans (2003) .** Dryland salinity : A key environmental issue in southern Australia. Plant and soil. 257 : 5-7
- Hogg, T.J., et Henry, J.I. (1984).** Comparison of 1 :1 and 1 :2 suspension and extract with the saturation extract in estimating salinity in Saskatchewan soils. Can . J. Soil. Sci. 64 : 669- 704.
- Hook, W.R ., Ferré, T.P.A et Livingston, N.J. (2004).**The effects of salinity on the Accuracy and Uncertainty of water content Measurement. Soil Sci . Am. J. 68 : 47 - 56.
- Iqbal, J ., Thomasson, J.A ., Jenkins, J.N., Owens, P.R ., et Whister, F.D. (2005).**Spatial Variability Anays of soil properties of alluvial soils. Soil Sci . Am. J. 69 : 1338 - 1350.
- Job, J.O (1998).** Les milieux sales, in : Traité d'irrigation. Ed. Technique et documentation ISBN : 2- 7430 – 0244 – 1. pp 667 - 674.
- Katerji, N. (1995).**Réponse des cultures à la contrainte hydrique d'origine saline : approches empiriques et mécanistes. Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France. 81, 2 : 73 – 86.
- Kingsbury, R.w ; Epstein, E et Percy, R.w (1984).** Physiological reponses to salinity in select lines of wheat. Plant Physiol., 74: 417 – 423.
- Laboudi, A. (2001).**Détermination des besoins en eau de la culture du blé dans la zone d'Adrar : Utilisation des cases lysimétriques. Thèse de Magister en Science agronomiques INA. 82p.
- Lahlou, M ; Badraoui, M et Soudi, B. (1998).** SMSS : Un logiciel de simulation du mouvement de sels dans le sol. Etude et Gestion des Sols, 5,4 :247 – 256
- Lesaint, C. et Coic, Y. (1983).**Cultures hydroponiques. La maison rustique, 119p
- Leland, E.F ; Grieve, C.M ; Maas, E.V et Lesh, S.M. (1994).** Time of salt Stress affects Growth and yield Components of Irrigated Wheat. Agron. J . 86: 100 - 107
- Mass, E.V et Hoffman, G.H. (1977).** Crop Salt tolerance-current assessment. J. Irrg. Drain Div Am. Soc. Civ. Eng. 103, 115- 134.
- Mass, E.V . (1985) .**Crop tolerance to saline sprinkling water.
- Mass, E.V . (1990).** Crop salt tolerance . Engigneering practice 71. New York : ASCE : 262- 304.
- Mengel, K. et Kirkby, E..A. (1978).** Principles of plants nutrition. Potash inst 3^e Ed. Worblanfen Bern Switzerland, 655 p.
- Montotroi, J.P. (1997).** Conductivité électrique de la solution du sol et d'extrait aqueux

- de sol. Application à un sol sulfaté salé de Basse-Casamance (Sénégal). *Etude et Gestion des sols*. 4, 4 : 279-298.
- Morgan (1984)**. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Ann . Rev. Plant. Physiol.*, 35 : 299-550
- Mouhouche, B. (2000)**. l'avenir de l'agriculture Saharienne dépend de la maîtrise de la salinisation des sols et de la valorisation de l'eau d'irrigation et du drainage. Congrès Scientifique Arabe, El Oued, 191- 201.
- N'diaye, M. K et Guindo, D. (1998)**. Evolution des sols irrigués de la vallée du Niger (Mali) sodisation et alcalinisation sous riziculture. *Etude et Gestion des Sols*. 5, 4 : 269 - 276.
- Oudija, F., Ismail, M. (2002)**. Effet du NaCl sur l'embryogenèse somatique et sur la capacité de régénération chez le blé. *Etude de la compétence embryogénèse de blé initiées directement en présence de NaCl. African Crop Science Journal*. 10, 3, : 221 : 229
- Page, I., Dousson, C., Vercambe, G., Brucker, L et Habib, L. (1998)**. Relation Sol-Plante et absorption hydrique, in : *Traité d'irrigation*. Ed. Technique et documentation ISBN : 2- 7430 – 0244 – 1. pp 88 - 95.
- Palta, J.A. (2005)**. Adaptation of plants to water limited mediterranean environments. *Australian . Journal of agricultural* , 56
- Ramos , J., Lopez, M.J et Benlloch, M. (2004)** .Effet on NaCl Salt on the growth and solute accumulation of the halophyte *Atriplex nummularia*. *Plant and Soil*. 259 : 163 - 168.
- Robert, M. (1992)**. Le sol, une ressource naturelle à préserver pour la production et l'environnement. *Cahiers Agricultures* 1 : 20 - 34.
- Rognon, P. (1994 a)**. La sécheresse sur la pédogenèse. *Sécheresse*. 5 , 173 - 184.
- Rognon, P. (1996)**. Sécheresse et aridité : leurs impact sur la désertification au Maghreb. *Sécheresse*. 4, 7 : 287 - 287.
- Rognon, P. (1994)**. Les conséquences de la sécheresse sur la pédogenèse. *Sécheresse*. 3, 5 : 173 - 18451.
- Rhoades, J.D. (1984)**. New strategy in using waters for irrigation. U.S. Salinity Lab., Riverside, Calif.
- Rowell, D.L. (1994)**. Methodes and applications. *Soil Sciences*. Longman
- Saidi, J. (2004)**. Influence de la phase saline sur les propriétés physiques des matériaux argileux du bas Cheliff. Thèse de Doctorat d'Etat en Science Agronomiques, Spécialité : Science du Sol. 181p.
- Salim, S et Tessier, D. (1998)**. Evolution des propriétés physiques et physico-chimiques de sols salés de la basse vallée de l'Euphrate (Syrie). *Etude et Gestion des Sols*. 5, 4 : 277 - 287.
- Servant, J.M. (1978)**. La salinité dans le sol et les eaux caractérisation et problème d'irrigation et drainage. *Bulletin du B.R.G.M (Deuxième série) Section III*. 2 : 123 - 142.
- Shannon, M.C., Dalton, F.N et Sayed, S.F. (1993)**. Physiological responses of crops to sea water: Minimizing constraints that limit yield. *Towards the rational use of high*

- salinity tolerant plant. Vol. 2: 3-12 (*H.Lieth and A. Al Masoom (eds.)*)
- Siemens, J. et Kaupenjohann, M. (2004).** Comparaison of three methods for field measurement of solute leaching in a sandy soil. *Soil Sci. Am. J.* 68 : 1191- 1196.
- Singh, R.B., Minhas, P.S., Chauhan, C.P.S et Gupta, R.K. (1994).** Salt leaching with Monsoons and yield on Indian Mustard as affected by saline Irrigation waters of varying Cl/ SO₄⁻² ration. *Journal of Indian Society of Soil Science*, 42, 3 : 436-441
- Snoussi, S. A et Halitim, A. (1998).** Valorisation des eaux salines pour la nutrition minérale des plantes cultivées cas de la tomate et de l'haricot. *Etude et Gestion des Sols*. 5, 4 : 289 - 297.
- Sparks, D. L. (1995).** *Environmental Soil Chemistry*. Ed. Kingdom Edition Published by academic Press Limited. 267p
- Szabolcs, T. (1994).** Prospects of soil salinity for the 21 st. Century Acapulco Mexique: Trans. 15th Wold Congress of Soil Science; Vol1: 123-41
- Tessier, D. (1994).** Rôle de l'eau dans les propriétés physiques des sols. *Sécheresse*. 3, 5 : 143 - 150.
- Unesco. (1972).** Etude des ressources en eau du Sahara septentrional rapport de synthèse 79p.
- U.S.Salinity Laboratory.Staff. (1954).** Diagnostic and improvement of saline and alkali Saline and alkali soils , U.S.D.A. Hand book n°60 ; 160p.
- Valles, V., Bourgeat, E., Guiresse, M. (1988).** Calcul des doses d'irrigation pour les sols salés application d'une méthode géochimique de calcul à un sol tunisien en collaboration avec ORSTOM, Ser. Pedol. Vol. XXIV, 2 : 155 - 122.
- Van Hoorn, J.w. (1995).** Développement de la salinité du sol dans la zone racinaire. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France*. 81, 2 : 61- 86.
- Vauclin, M. (1982).** Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol . In : les colloques de l'INRA, Variabilité spatiale des processus de transfert dans le sol. Ed. INRA Paris, n° 15, pp. 9-43
- Villa-Castorena, M ., Ulery, A.L ., Catalan-Valencia, E.A et Remmenga, M.D. (2003).** Salinity and Nitrogen Rate Effets on the Growth and yield of Chile Pepper Plants. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1781- 1789
- Warrence, N.J., Bauder, J.W., Pearson, K.E. (2003).** *Water Quality & Irrigation Management: Basics of Salinity and Sodicty effets on soil Physical Proprieties*. Department of land Ressources and Environmental Science.
- Zhang, N., Fan, G., Lee, K.H., Kluitenberg, G.J., et Loughin, T.M. (2004) .** Simultaneous Mesurement of soil water content and salinity using a frequency-reponse method. *Soil Sci. Am. J.* 68 : 1515 – 1525.
- Zhang, H., Schroder, L., Pittman, J.J., Wang, J.J et Payton, M.E .(2005).** Soil Salinity Using Satured paste and 1:1 soil to water extracts. *Soil Sci. Am. J.* 69: 1146 - 1151.
- Zid, E et Grignon, C. (1991).** Les testes de sélection précoce pour la résistance des plantes aux stressés cas du stress salin et hydrique. *Rev. Amélioration des plantes pour l'adaptation en milieu arides* Ed. AUPELE- UREF John Libbey. Eurotext. Paris, 91 - 108p.
- Zhu, J.K. (2001).** Plant Salttolerance. *Plant Science*. 2: 66-71.

Ziza, F.Z. (1992). Dynamique de l'eau et des selssous irrigation par pivot en milieu Saharien. Essai d'optimisation de la conduite des irrigations. Mémoire d'ingénieur. INA. 98p.