

**Ecole nationale Supérieure agronomique**  
These en vue de l'obtention du diplôme de magistère en Sciences Agronomiques  
Option : Science du sol

***Contribution à l'étude de la réhabilitation  
au laboratoire des sols salsodiques des  
palmeraies de la région d'In Salah par  
l'utilisation du phosphogypse***

**Présentée par: Melle OMOURI Ourdia**

Promoteur: M. TOUMI Mohamed Maître de conférences

Année Universitaire 2008 /2009

Soutenu publiquement le devant le jury composé de : Président: M. DAOUD Youcef Professeur  
Examineurs: M. DRIDI Bachir Maître de conférences Mme BOURAYOU Khadidja Docteur es  
Sciences à l'INRAA Invité : M. NADJEMI Boubakeur Professeur



# Table des matières

Dédicace . . .	5
Remerciements . . .	6
Résumé . . .	7
ص غ ل م ل ا . . .	8
Summary . . .	9
Liste des symboles et abréviations . . .	10
INTRODUCTION . . .	11
PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE . . .	13
Chapitre I. Les sols salsodiques . . .	13
Introduction . . .	13
1. Répartition et importance des sols salsodiques . . .	13
2. Origine de la salinité et type de salinisation . . .	14
3. Les facteurs de salinisation en zones arides . . .	16
4. La formation des sols salsodiques . . .	18
5. Les paramètres de caractérisation des sols salsodiques . . .	19
6. Les formes du sodium dans les sols salés . . .	20
7. Evolution de la salinisation et de la sodisation dans les sols salsodiques . . .	20
8. Classification des sols salsodiques . . .	21
9. Effets pédologiques et agronomiques de la salinisation et de la sodisation . . .	21
Chapitre II. Mise en valeur des sols salsodiques . . .	23
Introduction . . .	23
1. Les méthodes de la réhabilitation . . .	24
2. Les étapes de la mise en valeur des sols salsodiques . . .	24
3. Le phosphogypse et son utilisation dans la réhabilitation des sols salsodiques . . .	26
DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES . . .	32
1- Matériels . . .	32
1-1- Les sols des palmeraies de la région d'In Salah . . .	32
2. Méthodologie . . .	35
2.1. Essai expérimental . . .	35
2.2. L'analyse chimique des percolats . . .	36
2.3. Les traitements statistiques . . .	36
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS . . .	37
1. Evolution de la conductivité électrique dans les sols étudiés sous l'effet du phosphogypse . . .	37
1.1. Dans le sol de l'ancienne palmeraie à orientation nord (P10A) . . .	37
1.2. Dans le sol de l'ancienne palmeraie à orientation sud (P10B) . . .	37
1.3. Dans le sol de la palmeraie de sebkha Ezzabara (P12) . . .	38
1.4. Discussion . . .	39
1.5. Conclusion . . .	39

<b>2. Evolution du sodium dans les sols étudiés sous l'effet du phosphogypse . .</b>	<b>40</b>
2.1. Dans le sol de l'ancienne palmeraie à orientation nord . .	40
2. 2. Dans le sol de l'ancienne palmeraie à orientation sud . .	41
2.3. Dans le sol de la palmeraie de sebkha Ezzabara . .	41
2.4. Discussion . .	42
2.5. Conclusion . .	42
<b>3. Evolution du pH dans les sols étudiés sous l'effet du phosphogypse . .</b>	<b>44</b>
3.1. Dans le sol de l'ancienne palmeraie à orientation nord . .	44
3. 2. Dans le sol de l'ancienne palmeraie à orientation sud . .	44
3.3. Dans le sol de la palmeraie de sebkha Ezzabara . .	44
3.4. Discussion . .	45
3.5. Conclusion . .	46
<b>4. Relation entre la salinité et le sodium dans les sols étudiés . .</b>	<b>47</b>
4.1. Résultats et discussions . .	47
4.2. Conclusion . .	47
<b>5. Discussions générales . .</b>	<b>51</b>
<b>CONCLUSION GENERALE . .</b>	<b>54</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES . .</b>	<b>56</b>
<b>Annexes . .</b>	<b>64</b>
Annexe A . .	64
ANNEXE. B . .	64
Annexe C . .	64
Annexe D . .	69
Annexe E . .	71
Annexe F . .	72
Annexe G . .	73
Annexe H . .	74
Annexe I . .	75
Annexe J . .	76
Annexe K . .	77

## Dédicace

*Je dédie ce travail à : Mes très chers parents Mon frère Mes sœurs : Fatma, Noucia et surtout Sabrina Ma très chère grand-mère M Mahdi Youcef Tous les amis (es) et spécialement Nadia, son mari et ses enfants Yacine, Ania et Mustapha Mes tantes et leurs familles qui m'ont soutenu le long de mon parcours A mon adorable petite cousine khadidja qui pense toujours à moi*

## **Remerciements**

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à Mr TOUMI Maître de conférence à l'ENS de Kouba pour m'avoir proposé le sujet au bon moment, c'est par ses encouragements et son aide en m'accueillant et en m'offrant tout les moyens nécessaires dans le laboratoire de Chimie à l'ENS de Kouba, que j'ai repris ma volonté pour la réalisation de cette thèse. Qu'il trouve ici mes sincères remerciements pour la confiance qu'il m'a accordé.

Je remercie Mrs : Redouane, Ahmed Amar et Nour Eddine; techniciens et ingénieur d'application au département de Pédologie INA El-Harrach, pour leurs qualités humaines, leur générosité et leur disponibilité au service des étudiants. Je n'oublie pas de remercier aussi Mr. Said de département de la DPGR de l'INA. Qu'ils trouvent tous ici, l'expression de ma gratitude et de satisfaction.

## Résumé

Les systèmes irrigués dans les zones arides constituent la seule possibilité d'une production agricole. Le contexte physique dans lequel évolue cette agriculture est sévère et entraîne la salinisation secondaire des sols par remontée capillaire des sels. Ce phénomène de dégradation des sols est de plus en plus important avec l'augmentation des surfaces irriguées et constitue un danger pour les sols, les cultures en place, l'environnement et la santé humaine.

Notre étude au laboratoire est portée sur la réhabilitation des sols salsodiques des palmeraies d'In Salah par un apport de phosphogypse.

Un suivi de trois sols représentatifs des horizons de surface des palmeraies affectées à des degrés différents par la salinisation et la sodisation est réalisé par un essai d'incubation au laboratoire.

Les résultats montrent une évolution décroissante de la CE et du sodium au cours de l'essai. Le test de corrélation montre une relation significative, indiquant que l'évolution de la salinité des trois sols étudiés est liée à la présence de l'ion sodium. Par contre, l'évolution du pH est non significative, elle est marquée par la neutralité des solutions percolées au premier lessivage, les autres valeurs tendent à l'alcalinisation. L'évolution du pH témoigne de la présence dans les sols des sels sodiques solubles de type NaCl et Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Un apport de doses du phosphogypse appropriées aux sols, suivi de lessivage et drainage efficaces sont trois étapes essentielles dans la réhabilitation des sols salsodiques.

**Mots-clés :** Régions hyper arides, salinisation secondaire, sols salés, sols sodiques, sodium échangeable, conductivité électrique, phosphogypse

## ص خل مل ا

تعتبر أنظمة الري في المناطق الجافة الوميلة الوحيدة للإنتاج الفلاحي. المجال الفيزيائي الذي يتطور فيه هذا النوع من الفلاحة صعب مما يؤثر سلبا على التربة فيسبب لها تملحا ثانويا نتيجة صعود الأملاح وفق الخاصية الشعرية. إن ظاهرة تدهور التربة أصبحت تدريجيا مهمة وذلك مع تكاثر المساحات المصفية حيث تشكل خطر على الأراضي وعلى الزراعات المحلية وعلى البيئة بما فيها صحة الإنسان. إن دراستنا في المختبر ترمي إلى إمتصلاح الأراضي المالحة في واحات النخيل بمنطقة عين صالح بإستعمال مادة الفوسفوجيبس.

تم في هذا العمل دراسة و متابعة إحتضان ثلاثة أنواع من التربة داخل المختبر، تنتمي كلها إلى الأفاق السطحية و متأثرة بدرجات مختلفة بالملوحة و التثبيح بالصوديوم.

تبين النتائج المتحصل عليها تناقص ملحوظ للتوصيل الكهربائي و تركيز الصوديوم أثناء الإحتضان. إن فحص معامل التوافق تبين علاقة معتبرة، تشير إلى أن الزيادة في ملوحة عينات التربة المدرومة مرتبطة مع تركيز أيون الصوديوم. في نفس الوقت فإن تزايد في قيم الأس الهيدروجيني غير معتبرة. وهذا ما يترجم بتعادل المحاليل المجمعة عند أول غسل للتربة. أما بقية القيم الأخرى فتتجه نحو قيم أساسية، تبين قيم pH تواجد أملاح الصوديوم الذائبة من نوع (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaCl).

إن إضافة كميات مدرومة من مادة الفوسفوجيبس لهذه الأتربة متبوعة بغسل و صرف جديدين تعد خطوات أساسية للإمتصلاح التربة المالحة و المثبحة بالصوديوم.

الكلمات المفتاحية: مناطق تديدة الجفاف، ملوحة ثانوية، تربة مالحة، تربة تديدة الملوحة، صوديوم متبادل، توصيل كهربائي، فوسفوجيبس.

## Summary

The systems irrigated in the arid zones constitute the only possibility of an agricultural production. The physical context in which evolves this agriculture is stern and drag the secondary salinisation of soils by capillary ascent of salts. This phenomenon of deterioration of soils is more and more important with the increase of the surfaces irrigated, and constitutes a danger for soils, cultures in place, environment and the human health.

Our survey to the laboratory is carried on the rehabilitation of the soils salsodiques of the palm groves of In Salah by a contribution of phosphogypsum. A follow-up of three representative soils of the horizons of surface of the palm groves affected to different degrees by the salinization and the sodisation is achieved by a test of incubation in the laboratory.

The results show a decreasing evolution of electric conductivity and sodium during the test. The test of interrelationship shows a meaningful relation indicating that evolution of the salinity of three soils studies is bound to the presence of ion sodium. On the other hand, the evolution of pH is non-meaningful; it is marked by the neutrality of the solutions percolees to the first washing, the other securities aim to the alkalization. The evolution of reveals the presence in soils of the soluble sodium salts of type: NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

A contribution of doses of the phosphogypsum appropriated to soils, flowed of washing and efficient drainage are three essential stages in the rehabilitation of the soils salsodiques.

**Key-words:** regions aridhyper, secondary salinisation, salty soils, sodium extangeable, electric conductivity, phosphogypsum

## Liste des symboles et abréviations

- **P10A** : Profil de l'ancienne palmeraie à orientation nord
- **P10B** : Profil de l'ancienne palmeraie à orientation sud
- **P12** : Profil de la palmeraie de sebkha ezzabara
- **H1** : Horizon de surface
- **Hzs** : Horizons
- **T** : Témoin
- **TRS** : Amendé ou traité en surface avec le phosphogypse
- **TRM** : Amendé en mélange avec le phosphogypse
- **ANOVA** : Analyse de la variance à deux critères de classification
- **P10AH1** : Sol de l'horizon de surface de l'ancienne palmeraie à exposition Nord
- **P10BH1** : Sol de l'horizon de surface de l'ancienne palmeraie à exposition Sud
- **P12H1** : Sol de l'horizon de surface de Sebkha Ezzabara
- **SoIP10AT** : Sol témoin de l'horizon de surface l'ancienne de l'ancienne palmeraie à orientation Nord
- **SoIP10ATRS** : Sol de l'horizon de surface de l'ancienne palmeraie à orientation Nord traité avec le phosphogypse en surface
- **SoIP10ATRM** : Sol de l'horizon de surface de l'ancienne palmeraie à orientation Nord traité avec le phosphogypse en mélange
- **SoIP10BT** : Sol témoin de l'horizon de surface de l'ancienne palmeraie à orientation Sud
- **SoIP10BTRS** : Sol de l'horizon de surface de l'ancienne palmeraie à orientation Sud traité avec le phosphogypse en surface
- **SoIP10BTRM** : Sol de l'horizon de surface de l'ancienne palmeraie à orientation Sud traité avec le phosphogypse en mélange
- **SoIP12T** : Sol témoin de l'horizon de surface de Sebkha Ezzabara
- **SoIP12TRS** : Sol de l'horizon de surface de Sebkha Ezzabara traité avec le phosphogypse en surface
- **SoIP12TRM** : Sol de l'horizon de surface de Sebkha Ezzabara traité avec le phosphogypse en mélange
- **Mha** : Million d'hectares
- **Pfd** : Profondeur

---

# INTRODUCTION

Les périmètres irrigués au Sahara Algérien sont sujets aux problèmes de salinisation du à l'utilisation inadéquate des ressources en eaux dans l'irrigation. Les conséquences s'accroissent dans le temps et dans l'espace. Selon Hamdy et *al.* in Cheverry et Robert (1998), le pourcentage des terres atteint par la salinisation secondaire en Algérie se situe entre 10 et 15 %.

La réhabilitation et la mise en valeur des sols salsodiques dans les conditions du Sahara ne sont pas faciles à réaliser, sachant aussi que l'étude est très onéreuse, mais malgré cela, dans un pays à fort croissance démographique et où la superficie occupée par le Sahara représente plus de 85 % du territoire national rendent nécessaire de mettre en valeur ses sols, qui constituent un espoir pour l'Algérie et aussi pour la fixation de la population locale qui est d'environ 2,2 millions (Halitim, 1988).

D'après Mahdi et *a l.* (1999), suite à l'étude préliminaire faite à In Salah, laquelle a porté sur la caractérisation des sols de palmeraies, la salinisation secondaire induite par l'irrigation a été constaté dans les sols, en partant de l'amant (Igotène, 273m) à l'aval (Sebkha Ezzabara, 256m), ce qui a entraîné l'abandon de l'activité agricole au centre des palmeraies et l'agrandissement des superficies se fait en périphérie (Mahdi, 2006). Selon le même auteur, en plus du problème de salinisation, le taux du sodium échangeable dans les horizons de surface représente plus de 15%, le problème confronté est donc conjugué (salinité et sodicité).

Afin d'empêcher l'extension de la salinité et la stérilisation des sols des palmeraies dans cette région, il faut choisir des méthodes appropriées, or à chacune des manifestations de ce phénomène, correspond des méthodes de réhabilitation différentes (Cherbuy, 1991).

Dans le cas des sols étudiés, le moyen de réhabilitation est l'utilisation d'un amendement chimique à base de calcium. Or, en Algérie le produit disponible et dont l'efficacité a été déjà prouvée est le phosphogypse. En effet, son apport au sol salé et alcalin a donné des résultats très encourageant, notamment sur la baisse de la conductivité électrique et du pourcentage du sodium échangeable (Halitim, 1988 ; Hamoudi et *al.*, 1990 ; Robert, 1996). D'autres chercheurs ont confirmé la fiabilité de ce sous produit dans l'élimination du sodium échangeable (Dominguez et *al.* 2001 ; Masmoudi, 2000). Il présente aussi un effet positif sur l'augmentation du taux du phosphore assimilable pour les cultures et la réduction du phénomène de résorption de ce dernier dans le sol (Delgado et *al.*, 2002).

Notre étude expérimentale porte sur l'effet du phosphogypse apporté sous deux modes (surface et mélange) sur l'évolution de la conductivité électrique, du taux du sodium et du pH des sols salsodiques des palmeraies les plus affectés de la région d'In Salah. Pour mieux contrôler les paramètres étudiés, le lessivage est réalisé avec une eau distillée. Cette étude permettra de valider l'effet du phosphogypse additionnés aux sols salsodiques sur l'évolution de la salinité, de la sodicité et de l'alcalinité. En suite, voir la possibilité de sa valorisation, ce qui devrait faire l'objet de futurs travaux au champ.

Notre travail a pour objectif la réhabilitation au laboratoire des sols salsodiques des palmeraies de la région d'In Salah en présence du phosphogypse.

Cette étude présente trois parties :

- la première abordera la synthèse bibliographique
- la deuxième traitera les matériels et méthodes
- les résultats et discussions seront présentés dans la troisième partie.
- une conclusion générale clôt ce travail.

---

# PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

## Chapitre I. Les sols salsodiques

### Introduction

---

Les sels ont été connus comme un problème depuis des milliers d'années, particulièrement dans les régions arides et semi-arides où il n'y a pas suffisamment de pluie pour lessiver les sels au delà de la zone racinaire (Miller et Donahue, 1995). Les sols salés sont à évolution influencée par l'ion sodium présent sous forme de sels solubles dans la solution du sol tels que NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> et NaHCO<sub>3</sub>, soit sous forme échangeable, liée au complexe adsorbant, soit les deux à la fois (Duchaufour 1983). Ils sont, selon le degré de salure, soit nus, soit occupés par une végétation d'espèces adaptées dites halophytes. Ce sont des salsodisols ou sols salsodiques (Servant, 1975) et appelés auparavant par CPCS (1967) sols halomorphes. Génétiquement, ils sont constitués par deux unités très différentes: les salisols, dans lesquels les sels de sodium, de calcium ou de magnésium sont sous la forme soluble de sels simples ou complexes, et les sodisols à complexe sodique, dans lesquels les cations essentiellement le sodium, sont sous la forme échangeable, les sels solubles étant très peu abondants (Halitim, 1988).

Les sols salsodiques sont rencontrés dans les régions arides, tempérées, maritimes et continentales, ils se différencient naturellement, sous climat caractérisé par l'excès de l'évaporation par rapport aux précipitations.

### 1. Répartition et importance des sols salsodiques

---

#### 1.1. Dans le monde

Les sols salés ont un caractère azonal, ils se distribuent dans toutes les parties du monde (Servant, 1976 ; Mihai et Dinco, 1976 ; Durand, 1983 *in* Djili, 2000). Ils couvrent près du tiers des sols cultivables. Selon Doly *in* Daoud (1981) ces sols occupent 24 % des terres de la planète. Les solonchaks se trouvent au Sahara Africain, Namibie, Asie Centrale, Australie et Amérique de Sud. Leur extension mondiale varie de 260 à 340 millions d'ha (WRB, 2006). Les sols salsodiques représentent le pourcentage le plus important de la superficie du monde, sous l'effet de l'agriculture intensifiée, les surfaces tendent à augmenter d'une façon considérable dans les pays en voie de développement, surtout en régions sèches, arides et semi-arides (Cherbuy, 1991). Selon Mermoud (2005), les faits de la salinisation sous l'irrigation sont de 3 à 4 %, sur 100 000 km<sup>2</sup> des sols irrigués près de la moitié de toutes les surfaces irriguées sont menacées à long terme. Hans, (2003) estime que près de 7 % des terres au monde sont atteintes par la salinisation, soit une surface de 920 millions d'hectares irrigués. Dans le Maltèse d'Island, l'augmentation du pourcentage des terres irriguées de 3,9 à 10,7 %, a entraîné la réduction des surfaces agricoles de

moitié (soit de 20,43 à 10,71 hectares), la cause principale de ce phénomène est la qualité médiocre des eaux d'irrigation (Vella et Camilleri, 2003).

En Afrique, les sols salés sont représentés dans le Fossé Est Africain, la Vallée du Nil, la dépression du lac Tchad et aussi dans les régions arides d'Afrique de sud ainsi que d'une façon plus ponctuelle dans les plaines, les sebkhas et les oasis méditerranéennes. Ils sont en outre présents dans les pays du Maghreb, leur extension dans ces zones est due aux conditions climatiques (arides et semi-arides) où les phénomènes d'évaporation sont considérables et les précipitations sont limitées (Aubert, 1975 ; Robert et Cheverry, 1996).

## **1. 2. En Algérie**

Les sols salés sont très répandus en zones arides (Halitim, 1988), ils sont aussi rencontrés dans quelques régions des chotts et sebkhas, en particulier sur les hauts plateaux et dans les régions semi-arides (Dogar, 1978). Différents auteurs ont étudiés la salinité des sols de l'Afrique du nord (Aubert, 1943 ; Gaucher et Boulaine, 1954 ; Durand, 1958) et en Algérie (Halitim, 1973 ; Daoud, 1983 ; Ziza, 1992 ; Daoud, 1993, Mahdi et *al.*, 1999). Ces sols occupent plusieurs zones pédoclimatiques. Sur les hauts plateaux, ils prennent une plus grande extension dans les régions sahariennes (Aubert, 1978). Les sols salés rencontrés en Algérie sont essentiellement des sols salins et des sols à alcali appelés solonchaks, et rarement des solonetz. Ces solonchaks sont abondants et se trouvent à l'ouest dans les basses plaines et les vallées d'Oranie, la vallée de la Mina près de Relizane et à l'Est du pays, dans les hautes plaines au sud de Sétif, Constantine et aux abords de quelques chotts et aussi dans la région d'Annaba. Ils ont une grande extension dans les régions sahariennes, de sud de Biskra jusqu'à Touggourt, Ouargla et au-delà (Aubert, 1976). D'après la carte des sols (Durand, 1954), les sols salés sont bien représentés dans les régions Est, mais tous les pédologues s'accordent à dire que les sols de l'Ouest sont plus salés que ceux de l'Est (Djili, 2000).

L'introduction de l'agriculture intensifiée au sud du pays a conduit à l'extension des surfaces salées. En effet, plusieurs auteurs ont signalés leur présence : Daoud (1981) à Chélif ; Ziza (1992) à Gassi-Touil, Ziza (2006) à Adrar ; Bradai (1991) ; Mamouni (1988) ; Mahdi et *al.* (1999 et 2000) à In Salah. Selon (MAP, 1996 *in* Douaoui et *al.*, 2000), 28 wilayas sont sérieusement affectées par les sels et environ 25 % de la surface cartographiée des sols arides en Algérie représentent les salsodiques.

## **2. Origine de la salinité et type de salinisation**

---

Dans les régions Sahariennes, la salinité peut être d'origine géologique par altération des roches salifères, mais selon les diverses recherches mondiales, dans toutes les zones arides

caractérisées par des conditions climatiques extrêmes et par la présence des eaux saumâtres ont lié la salinité à l'action anthropique, où souvent la mauvaise pratique d'irrigation (Cherbuy, 1991).

En fonction de l'origine de la salinité, deux types de salinisation sont distingués (Cherbuy, 1991). La salinisation primaire, définie comme étant le processus naturel d'enrichissement du sol en sels. Elle est due aux sels se formant lors de l'altération des roches ou à des apports naturels externes (Mermoud, 2005). La superficie des terres affectée par ce type de salinisation est d'environ 955 millions d'hectares (Mettermicht et Zinck, 2003). La salinisation secondaire par contre, est due à l'activité humaine; liée

fréquemment à des pratiques agricoles inappropriées (Mermoud 2005). La superficie des terres affectées par ce type est de 77 millions d'hectares avec 58 % dans les sols irrigués (Mettermicht et Zinck, 2003).

## 2.1. Salinisation d'origine anthropique

C'est l'apparition du caractère halomorphe sur des sols exempts de salinité, elle est induite par les activités humaines (mise en jachère, déforestation, apport d'engrais mais surtout à l'irrigation). Ce processus de salinisation est le plus rapide (Loyer, *in* Cherbuy, 1991). Des millions d'hectares de sols se dégradent annuellement par le phénomène de salinisation surtout de type secondaire, dont la cause principale est la pratique inadéquate de l'irrigation (Redly et Cheverry, 2000). Dans le monde, le pourcentage des terres atteintes par la salinisation suite à l'irrigation est significatif et variable, il est de 8,8 en Australie et 33,70 en Argentine (voir tableau 1) ainsi que dans les pays du sud de la Méditerranée (World Resources, 1987) voir tableau 2. En effet, pour l'Algérie, le pourcentage est compris entre 5 et 10 %. L'irrigation génère un apport supplémentaire d'eau et de sels, au fil du temps et sous l'effet de l'évaporation, les sels s'accumulent jusqu'à atteindre des dépôts d'ordre de 6t/ha/an (IPIRID, 2006). Ce type de salinisation dépend de la qualité de l'eau d'irrigation, des conditions climatiques et du faible niveau de la nappe phréatique.

Tableau 1. Le pourcentage des terres affectées par la salinité suite à l'irrigation

Pays	% de terres atteintes	Pays	% de terres atteintes
Chine	15	Pakistan	26,20
Inde	16,60	Iran	30
USA	23	Egypte	33
Australie	8,80	Thaïlande	10
Afrique de sud	8,90	Argentine	33,70

Hans, (2003)

Tableau 2 : Estimation du pourcentage des terres irriguées atteinte par la salinisation dans certains pays de la Méditerranée

Pays	% de terres atteintes	Pays	% de terres atteintes
Algérie	5-10	Grèce	7
Chypre	25	Jordanie	16
Egypte	30-40	Maroc	10-15
Espagne	10-15	Portugal	10-15
Palestine	13	Syrie	30-35

World Resources, (1987)

### 2.1.1. Processus de la salinisation liée à l'irrigation

L'irrigation a joué un rôle clé pour subvenir aux besoins de la croissance mondiale des populations (Qadir et Oster, 2004), elle augmente significativement la production en régions arides et semi-arides (Meni Ben-Hur, 2001). Selon Bertrand et *al.*, (1994) c'est une pratique délicate qui exige une bonne maîtrise car elle est efficace à la production agricole de base dans les pays soumis à une très forte aridité mais, elle a aussi pour inconvénient majeur d'entraîner la salinisation des sols. Dans les pays de sud de la méditerranée, la salinisation secondaire s'étend à un taux accéléré à cause de l'utilisation de plus en plus des eaux

salées dans l'irrigation (Word Resources, 1987). Différents travaux ont traité la salinisation par l'irrigation (Daoud et Halitim, 1994 ; Hachicha et *al.*, 1996 ; Bahri, 1993 ; Cheverry et Bourrié, 1993 ; Tedeschi et Dell'aquila, 2005). Actuellement, un grand pourcentage de terres dans le monde est affecté par ce type de salinisation, les chiffres étaient de 10 millions d'hectares Szalbocs, 1989) et actuellement de 250 millions d'hectares (Mermoud, 2005). En Algérie, l'irrigation est le principal processus de dégradation des terres agricoles sahariennes notamment au sud (Daoud et Halitim, 1994 ; Bennadji et Bennadji, 1998 ; Masmoudi, 2000 ; Mouhouche, 2000).

Le pourcentage de terres affectées par la salinisation secondaire est de 10 à 15 % (Hamdy et *al.* in Cheverry et Robert, 1998). D'après Cherbuy (1991), Le processus de salinisation liée à l'irrigation des sols peut être du à l'utilisation d'une eau d'irrigation très salée ou faiblement salée, mais dont les répétitions des apports sans lessivage et drainage des sels, ou bien à des apports d'eau en quantités très importantes, responsables d'une remontée de niveau de la nappe originellement salée, ce niveau devient alors suffisant pour permettre des remontées capillaires et imprégner les horizons de surface. L'utilisation d'irrigation sans lessivage peut mobiliser par dissolution les sels contenus en profondeur, lesquels peuvent être soumis à la dynamique

saisonnaire de l'eau, en particulier la remontée capillaire pendant la saison sèche et entraînent la salinisation de surface du sol.

Selon Wyn-Jones et Gunston, in Djili (2000), les causes de la salinisation des sols cultivés sont : la qualité médiocre des eaux d'irrigation, l'insuffisance d'eau pour le lessivage des sels, le mauvais drainage des sols et la faible profondeur de la nappe phréatique.

### **2.1.2. La variation du niveau de salinité sous l'influence de l'irrigation**

La distribution des sels dans le sol est intimement liée au mouvement de l'eau (Herrero, 1992). Cependant, quand les teneurs en eau diminuent, la salinité du sol augmente (Dheghanisani et *al.*, 2006). L'irrigation influence d'une manière directe l'évolution du profil salin (Servant, 1975). En effet, en zones sahariennes, il y'a entrée des solutions salines mais sortie d'eau pur uniquement par évapotranspiration, raison pour laquelle la concentration en sels est plus importante en surface. Le profil salin caractérisant ces régions, témoigne d'un processus de salinisation de type ascendant sous l'effet de l'évaporation (Servant, 1978).

## **3. Les facteurs de salinisation en zones arides**

---

En Algérie, où 4/5 de la superficie représente le Sahara, l'extension des sols salés résulte de l'omniprésence des facteurs de salinisation : aridité du climat, eau d'irrigation salée, drainage déficient et remontée de la nappe salée.

### **3.1 Le climat**

Le domaine aride occupe environ 1/3 de la surface terrestre (Robert, 1996). En Algérie, plus de 95 % du territoire est à climat aride (Halitim, 1988), 80 % représente le Sahara dont la superficie est estimée à près de 2 millions km<sup>2</sup> (Mediouni, 1997). Le milieu aride se définit à partir de critères climatiques. Selon Daoud et Halitim (1994), les rapports entre phases solides du sol et l'eau au Sahara sont contrôlés par les paramètres climatiques. Selon Djili (2000), les sols du sud d'Algérie sont plus sodiques que ceux du nord et la hauteur des pluies influence la variation de l'ESP, ses calculs ont révélé que plus la hauteur des pluies

augmente plus les valeurs de l'ESP diminuent. Le climat au Sahara peut intervenir dans l'aggravation du processus de salinisation par ses composantes :

- la pluviométrie, où la moyenne au Sahara est généralement inférieure à 150mm par an. Ces faibles pluies ne permettent pas le lessivage des sels hors profil. La région d'In Salah est caractérisée par un climat hyperaride et un déficit hydrique important (14,6 mm est la moyenne des précipitations durant la période 1991-2001). Ces faibles précipitations et le déficit hydrique quasi-permanent ne permettent pas l'infiltration en profondeur et le lessivage des sels hors zone racinaire.

- la température et l'évaporation qui caractérisent les régions sahariennes sont élevées avec des maximums en juillet et août, la période sèche s'étale sur toute l'année. L'effet des températures additionnées aux vents notamment chauds et asséchants sur l'accentuation de l'évaporation est déterminant, ce qui favorise les remontées des eaux chargées en sels et leur accumulation en surface (processus de salinisation de type ascendant par remontée capillaire des sels).

- Le vent, est aussi est un agent de transport des sels (Aubert, 1976), donc il est responsable d'une partie de l'extension et de contamination des sols avoisinants par les sels (Nahai, 1975).

### 3.2. L'eau d'irrigation

Le développement de l'irrigation est dans la majorité des situations, accompagnée de l'apparition de salinisation, de la sodisation ou d'alcalinisation du sol à des degrés d'importance divers (Marlet, 2004). L'extension de ce phénomène résulte de la non maîtrise des irrigations avec les eaux salées sous un climat évaporant et sans système de drainage (Servant, 1978). Selon Summer, 1995 *in* Rietz (2003), dans les régions à faible pluviométrie et à forte évaporation la salinité et la sodisation sont des problèmes communs des terres irriguées. L'eau d'irrigation par sa composition peut avoir une influence sur le sol, car dans les régions arides la qualité des sols est étroitement liée à la qualité de l'eau d'irrigation (Halilat, 1998). Dans les régions sèches, l'eau utilisée fréquemment dans l'irrigation est d'une mauvaise qualité (Navarro et *al.*, 2006). En Algérie, la qualité des eaux utilisées dans l'irrigation au Sahara se détériore du nord au sud à cause des changements lithologiques du réservoir, et leur salinité augmente avec le temps de pompage (Daoud et Halitim, 1994). Selon les mêmes auteurs, toutes les eaux d'irrigation du Sahara contiennent une certaine quantité de sels solubles, un tel milieu est le siège d'une salinisation secondaire. Ainsi, Bennadji et Bennadji, (1998) déclare que l'irrigation est génératrice de salinisation en zones arides.

La question de la qualité des eaux d'irrigation est centrale dans toutes les zones arides (Halilat, 1998). Certains auteurs ont classés les eaux en fonction de leur salinité et alcalinité en

cinq classes (tableau 3). A In Salah, les eaux d'irrigation utilisées (tableau 1 annexe A) ont un faciès géochimique chlorurés sodiques (Mahdi, 2006). Selon la classification de Richard (1954), ces eaux sont classées en C<sub>4</sub> S<sub>4</sub> donc le danger d'alcalinisation est très fort, normalement non recommandée à l'irrigation sauf si les cultures en place sont tolérantes aux sels, mais le lessivage et le drainage sont impératifs dans cette région.

**Tableau 3 : Classification de l'eau d'irrigation basée sur la concentration totale en sels selon différentes sources**

Classe de salinité	US Salinity Laboratory de Riverside (1954)	Thorn et Peterson (1954)	Carter (1969)	Ayers et Westcot (1976)
	CE (dS/m)	CE (dS/m)	CE (dS/m)	CE (dS/m)
C <sub>1</sub>	0,1 - 0,25	< 0,25	< 0,4	< 0,75
C <sub>2</sub>	0,25 - 0,75	0,25 - 0,75	0,4-1 - 2	0,75-1
C <sub>3</sub>	0,75 - 2,25	0,75 - 2,25	1,2 - 2,25	1,5 - 3
C <sub>4</sub>	>2,25	2,5 - 4	2,25 - 4	>3
C <sub>5</sub>		4 - 6		

### 3.3. Le sol

En fonction de sa composition granulométrique et de sa structure, le sol peut influencer le mouvement des sels. Dans le cas de la texture sableuse, les sels sont facilement lessivés en profondeur et remontent en surface par capillarité, contrairement aux sols à texture argileuse. La texture du sol joue un rôle important dans la migration des sels due à la remontée capillaire (You et *al.*, in Djili, 2000). Pour Cherbuy (1991), les sols limoneux sableux sont les plus vulnérables car les vitesses de remontée sont plus importantes.

### 3.4. L'activité humaine

Beaucoup de travaux ont montrés que la salinisation des sols est une conséquence de la négligence de l'homme du périmètre irrigué. Le mauvais entretien du réseau d'irrigation au Sahara est l'un des facteurs qui génère la salinisation des sols. L'action de l'homme est déterminante par la mauvaise gestion des ressources en eau et en sols, choix des cultures d'une façon aléatoire, absence de drainage et de contact entre les décideurs, les scientifiques et les producteurs (Beldjoudi et Daoud, 2000). Toutes ces interventions sans étude préalable, induisent la salinisation des sols.

## 4. La formation des sols salsodiques

La formation des sols salsodiques est en relation étroite avec la présence de l'ion sodium, sous forme soluble (NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ou sous forme échangeable. Elle nécessite une condition de station avec existence d'une source locale de sodium (nappe salée, dépôt sédimentaire salin) et

une condition climatique permettant la conservation du Na<sup>+</sup> dans le profil, cet ion étant très mobile, est éliminé par drainage (Duchaufour, 1995). Dans les régions arides et semi-arides, sont surtout les chlorures, les sulfates de sodium et les sulfates de magnésium qui sont fréquents et à moindre degré les bicarbonates de sodium (Servant, 1978 ; Halitim, 1988).

### 4.1. Processus de salinisation et de sodisation des sols

Les sols reçoivent des sels d'autres lieux ou de l'eau d'irrigation, le degré avec lequel la salinisation se produit dépend de la composition de l'eau d'irrigation et aussi du bilan entre l'apport d'eau à la surface du sol et le déplacement de l'eau de drainage de la limite inférieure du profil. Si les quantités d'ions apportés par l'eau d'irrigation pendant plusieurs années

dépassent les quantités adsorbées par le sol, à long terme la composition de la solution du sol va devenir identique à celle de l'eau d'irrigation. Ce processus est accompagné par un ajustement graduel de la composition du complexe adsorbant, donc le pourcentage de sodium échangeable final peut être estimé à partir de l'eau d'irrigation et de la concentration totale de la solution du sol (Moughli, non daté). En Algérie, les travaux de recherches menées au nord par Djili et *al.* (2000) et Touaf (2001) ont confirmé que la salinisation dans les régions arides induit la sodisation.

## 5. Les paramètres de caractérisation des sols salsodiques

Le niveau de salinité des sols est apprécié par un ensemble de paramètres.

### 5. 1. La conductivité électrique

Elle traduit la concentration de la solution du sol en électrolytes. Elle est exprimée en mS/cm à 25°C et actuellement par dS/m, les mesures s'effectuent sur l'extrait de pâte saturée ou sur l'extrait aqueux de rapport 1/5. Plusieurs échelles de salinité ont été établies (USSL, 1954 ; Servant, 1975). Selon la CES, (2000), les sols sont considérés salés quand la CE de l'extrait de pâte saturée est  $\geq 4$  dS/m.

### 5. 2. Le taux de sodium échangeable (ESP)

Il représente le pourcentage de sodium présent sur le complexe d'échange par rapport à la capacité d'échange cationique totale. Il est exprimé par la formule suivante :

$$\text{ESP \%} = 100 \text{ Na (cmol (+)/kg)} / \text{CEC (cmol (+)/kg)}$$

L'ESP est le critère le plus important dans la classification des sols salés. Sa limite est fixée à 15 %. D'après Summer, 1995 *in* Rietz (2003), un sol est considéré sodique quand l'ESP est supérieur à 15 %, mais selon d'autres auteurs, cette valeur est discutée et varie en fonction de la nature du sol et des matériaux argileux. En Australie, l'ESP limite est de 6 % et même 5 % (Robert, 1996).

### 5. 3. Le taux d'absorption du sodium (SAR)

C'est un indice utile pour prédire l'ESP d'un sol résultant de l'irrigation. D'après WRB (2006), le SAR et l'ESP peuvent être estimés à partir de la concentration des cations dissous.

Beaucoup de chercheurs ont exprimés l'ESP en fonction du SAR en faisant ressortir des relations entre les résultats de ces deux paramètres :

- $\text{ESP} = 1 + (-0,0126 + 0,0147 \text{ SAR})$  (USSL, 1954)
- $\text{ESP} = 0,988 \text{ SAR} - 0,81$  (CRUESI, 1970)

Ce paramètre est exprimé par la formule :

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

(Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> en méq/l)

## **5. 4. Le pH**

Selon Duchaufour (1983) le pH des sols salés ne dépasse pas 8,5 contrairement pour les sols alcalins. Le pH n'est pas stable dans le sol car il dépend de certaines de ses caractéristiques. L'un des efforts de l'agriculteur sera précisément de le maintenir entre des limites compatibles avec la vie des microbes et des plantes (Soltner, 1987). Il a aussi un impact considérable sur le contrôle des nutriments des plantes, particulièrement, la disponibilité des micronutriments tels que : le Zn, Cu, Fe, et le Mg (Page et *al.*, 1990 ; Rengazamy, 1993 *in* Murtaza et *al.*, 2006).

## **6. Les formes du sodium dans les sols salés**

---

Tout sol contenant des sels solubles en quantité anormalement élevée est qualifié de sodique (Servant, 1978). L'ion sodium existe sous deux formes, soluble et échangeable. La concentration de la solution du sol en  $\text{Na}^+$  et le sodium adsorbé sur le complexe d'échange ont des effets différents sur les propriétés physico-chimiques (WRB, 2006).

### **6. 1. Forme soluble**

Les sels solubles peuvent se trouver sous la forme cristallisée (cristaux, efflorescences), c'est le cas de sels peu solubles comme le gypse, il s'agit de sels sous forme dissoute, des anions et cations étant présents dans la solution du sol. Les sels solubles présents habituellement dans les sols : Les chlorures, les sulfates, les bicarbonates, les carbonates, les borates, les nitrates de sodium et de magnésium et le fluorure de sodium. La concentration globale de ces sels solubles est généralement exprimée par la conductivité électrique (Servant, 1978).

### **6. 2. Forme échangeable**

Elle est exprimée par le taux de sodium échangeable par rapport à la somme des cations fixés sur le complexe adsorbant appelé (ESP), qui alcalinise le sol en présence des sels alcalins comme les carbonates et les bicarbonates du sodium, ce qui entraîne une dégradation de la structure et une élévation du pH (Servant, 1978).

## **7. Evolution de la salinisation et de la sodisation dans les sols salsodiques**

---

Au cours du temps, la salinisation évolue (Condon, 2000), la solution du sol devient riche en sels solubles et le complexe d'échange s'enrichit en sodium, c'est pourquoi plusieurs auteurs se sont accordés à donner le nom de salsodiques à ces sols.

L'élévation de la concentration des sols en sels solubles et leur saturation en sodium leur offrent des propriétés particulières :

- l'alcanisation qui est le processus lié à la présence de concentration élevées de sels alcalins tel que le carbonate de calcium dans la solution du sol. C'est aussi, la saturation du complexe adsorbant par l'ion sodium qui indique une augmentation du pH vers des valeurs basiques.

- la sodisation qui est l'enrichissement du complexe d'échange par l'ion sodium. Ce processus est exprimé par le SAR.

L'alcalinisation et la sodisation confèrent aux sols des propriétés défavorables au bon développement des cultures. En effet, les observations menées au Mali et au Sénégal montrent que des superficies considérables de terres sont actuellement dégradées par ces deux phénomènes (Bertrand, 1986 ; Bertrand et *al.*, 1994).

Selon l'origine du sodium, Duchaufour (1983) envisage trois cas fondamentaux :

- Nappe salée, contenant des sels de sodium avec une forte proportion de sels de calcium et de magnésium c'est la salinisation sans alcalinisation.

- Nappe salée contenant une dominance marquée d'ions sodium, une alcalinisation progressive se produit dans certaines conditions c'est l'alcalinisation indirecte, il s'agit donc d'une nappe dont la composition est proche de celle de l'eau de mer. Dans ce cas, l'ion sodium adsorbé représente 30 % de la capacité d'échange. La présence de sels de sodium à forte concentration dans la solution du sol peut freiner le processus d'alcalinisation, elle peut intervenir qu'à la suite d'une désalinisation du profil se produisant au moins saisonnièrement.

- Si le sodium provient de l'altération des minéraux sodiques, il y'a alcalinisation rapide et formation d'un horizon natrique, c'est l'alcalinisation directe. Dans ce cas, l'alcalinisation est immédiate et il est évident que la phase saline n'existe pas.

## 8. Classification des sols salsodiques

---

Les recherches en matière de sols salés ont été très actives, ce qui a donné lieu à la mise au point de plusieurs types de classifications (Djemai, 1993). Leur classification est délicate du fait des variations saisonnières ou sous l'action de l'homme, d'où le problème de divergences qui existe entre les différentes écoles : Russe, Américaine et Française (Aubert, 1975). Duchaufour (1983) a distingué deux groupes de sols salsodiques, l'un riche en sels sodiques solubles et l'autre caractérisé par une alcalinisation permanente ou temporaire (sols alcalins). Ce sont des sols qui se forment souvent à partir d'une nappe phréatique salée et peu profonde, d'origine naturelle ou anthropique. Pour la classification Américaine, l'USSL (1954) distingue trois groupes de sols salés : sols salés (salines soils), sols alcalins non salés (sodic soils) et sols salés à alcali (saline-sodic soils). Ce dernier groupe est caractérisé par deux processus, salinisation et alcalinisation, se sont des sols auto améliorants, avec une CE > 4 dS/m à 25 °C, un pH < 8,5 et un ESP > 15 % (USDA, 1985). Ainsi, Richard (1954) et Summer (1993), ont considéré un sol salsodique quand la CE est > à 4mS/m, l'ESP est > 15 % et le pH < 8,5. La WRB (2006), classe les sols salsodiques selon les horizons diagnostiques (horizon salic) en deux groupes, les solonchaks et les solonetz.

## 9. Effets pédologiques et agronomiques de la salinisation et de la sodisation

---

### 9.1. Pédologiques

La salinisation est le facteur principal de la dégradation des sols. En fonction de la quantité et de la chimie des sels accumulés dans le sol, les effets de ce processus sur les traits essentiels du sol (physique, chimique et biologique) peuvent être diverses, mais toutes conduisent à la dégradation du sol et à une diminution de sa productivité (Redly et Chevery, 2000).

L'effet sur les propriétés physiques du sol est marqué par la destruction, la perte de la porosité, la diminution de la perméabilité qui entraîne par conséquent l'augmentation de la compacité du sol induisant des croûtes en surface (Daoud et Halitim, 1994). En sol à texture argileuse et argilo limoneuse, plus le rapport Na/Ca est élevé, plus le risque de dispersion est important. Selon (Halitim et al., in Salim et Tessier, 1998), plus l'ESP est élevé et plus la conductivité hydraulique est faible ; c'est ainsi que les forts taux de sodium échangeable qui accompagnent l'accumulation des sels solubles dans le sol affectent les propriétés des sols, notamment la structure et la conductivité hydraulique (Graclev et al., 2000 ; Amrhein et al., 1992 ; Zahow et Amrhein, 1992 in Djili et al., 2000). Les sols salsodiques sont caractérisés par un excès de sels, lesquels modifient leurs propriétés physico-chimiques (Guarnieri et al., 2005). Tejada et Gonzalez (2005) ont montré l'effet de l'augmentation de la CE des sols sur la diminution de la stabilité structurale, la densité apparente et la perméabilité des sols.

Quant à son effet sur les propriétés chimiques, il est surtout remarquable dans deux types de sols ; dans les sols salins à complexe sodiques où le taux de sodium est élevé, ce qui réduit la disponibilité du complexe d'échange pour les autres éléments indispensables aux plantes, et dans les salisols carbonatés, où elle entraîne l'élévation du pH, donc l'alcalinisation, ce qui immobilise les éléments nutritifs nécessaires au développement du végétal tels que l'azote et quelques oligo-éléments (Cu, Zn, Fe, etc.). En plus, l'addition des sels au profil du sol peut entraîner l'altération de la composition chimique du complexe d'échange (augmentation du taux du sodium échangeable, ceci va entraîner la formation de sols sodiques). La vitesse de sodicité dépend de la composition de l'eau utilisée, de la quantité d'eau apportée par an et de la CEC du sol (Miller et Donahue, 1995).

En outre, l'effet sur les propriétés biologiques est marqué par la réduction de la biomasse microbienne (Rietz et al., 2003) et un ralentissement de l'activité microbienne, car les milieux

salés sont défavorables aux micro-organismes en raison de la présence d'ions toxiques, du pH parfois basique, d'une structure asphyxiante et d'une tension osmotique élevée (Dommergues et Mangenot, 1970). Selon Gallali (1980), la présence des sels en quantités élevées, ralentit la nutrition minérale des végétaux, la diminution de la nitrification et de la production de CO<sub>2</sub>. L'augmentation des valeurs de la CE, de l'ESP et du SAR dans le sol entraîne la diminution du % du carbone organique (Rietz et al., 2003).

**La salinisation confère aux sols des propriétés physico-chimiques et biologiques défavorables à la croissance végétale en provoquant des déséquilibres nutritionnels par l'élévation de la pression osmotique de la solution du sol.**

## **9. 2. Agronomiques**

Les effets agronomiques de la salinité sont constatés par les baisses de rendements (Warrence et al., 2003 ; ParanyChianakis et Chartzoulakis, 2005). Selon Haq et al., 1997 in Kahloum et Azam (2003), environ 25 % de la réduction des rendements des cultures est attribuée à la salinité des sols. Les effets sont parfois spectaculaires et marqués par l'élévation de pression osmotique qui limite la quantité d'eau pour le végétal, l'effet de salinité est fort semblable à celui suscité par le stress de sécheresse et résulte de la différence des concentrations des sels entre les végétaux et le sol, cet effet réduit la capacité de croissance des cultures et diminue les rendements annuels (Acton et Gregorich, 1995 ; Eiler et al., 1995). Les effets de la salinité peuvent être marqués par la réduction générale de la croissance causée par une nutrition

déséquilibrée en éléments essentiels et une réduction de la croissance causée par des ions

toxiques (Bore), mais il n'y pas de limites entre ces différents effets, la suppression de la croissance peut être le résultat d'effets combinés.

Les concentrations des solutions du sol élevées en sels dont l'effet est toxique, entraînent le dépérissement des plants. Cet effet est observé par Daoud et Halitim (1994) dans certaines oasis à Guassi-Touil qui se sont transformées en sebkhas et aussi par Mahdi et *al.* (1999) à In Salah (voir photo 4 et 5 annexe C).

## Chapitre II. Mise en valeur des sols salsodiques

### Introduction

---

Les sols salsodiques se heurtent à trois types de problème: la difficulté d'absorption de l'eau qui est liée à la pression osmotique des solutions riches en sels dissouts, la dégradation des propriétés physiques du sol due à la fixation du sodium sur le complexe adsorbant et la toxicité des sels. Les cultures pâtissent et souffrent d'un excès de sels ou du sodium échangeable. Les conséquences sur l'état végétatif dépendent de la qualité des eaux d'irrigation, de la tolérance des espèces et variétés végétales et de la conduite des irrigations (Valles, 1988).

La mise en valeur des sols salsodiques est délicate, les méthodes diffèrent selon le type de salure identifié (salinité ou alcalinité) ou les deux au même temps. Un bon diagnostic s'avère indispensable avant toute intervention (Cherbuy, 1991).

L'utilisation et la récupération des sols salés constituent un travail d'autant plus long et délicat quand ces terrains sont situés en zones arides (Nahai, 1975). Les sols salins agissent par leur pression osmotique élevée, qui nuit à l'absorption d'eau, les sols à sulfato-réduction sont souvent asphyxiants, et les sols alcalins sont impropres à toute végétation, en raison de leur pH très élevé (Duchaufour, 1995). Seules les méthodes d'amélioration qui s'attaquent aux causes des phénomènes sont capables d'être efficaces d'une façon durable (Gaucher et *al.*, 1975).

**Les premiers travaux de mise en valeur ont entraîné de nombreuses erreurs, en particulier pour les sols sodiques. Les recherches en matière de sol salés et l'analyse des erreurs commises lors des grands travaux d'aménagement, ont permis de mieux maîtriser les précautions à prendre lors de la mise en irrigation de nouvelles terres, ainsi que les principaux moyens à mettre en œuvre pour la réhabilitation des zones halomorphes (Cherbuy, 1991).**

Le choix d'une méthode de mise en valeur des sols salsodiques, suppose évidemment une connaissance approfondie du problème. En effet, la productivité de la majorité des terres mises en valeur devient de plus en plus précaire et souvent insignifiante à cause des conditions climatiques, la connaissance superficielle du milieu physique, la non maîtrise des techniques d'irrigation nouvelles, le gaspillage des eaux et l'absence de systèmes de drainage, le choix aléatoire des sites, la salinisation secondaire, l'application inadéquate de la fertilisation, le développement rapide des mauvaises herbes et l'absence d'encadrement

et d'appui technique aux agriculteurs. Toutes ces contraintes font qu'actuellement un grand nombre de pivots est non fonctionnel (Beldjoudi et Daoud, 2000).

Le dessalage par irrigation et drainage simultané est une opération délicate, précisément en raison du danger d'alcalinisation par les eaux douces. Il est nécessaire, dans le cas échéant de le combattre par des apports de sulfate de calcium. Si le milieu n'est pas calcaire, tout danger d'acidification doit être combattu par des apports d'amendements calciques solubles (Duchaufour, 1995).

La salinisation est un processus de dégradation des sols dont l'importance augmente dans le monde (Keren, 2000 ; Liang et al, 2000 in Bing-Cheng Yuan et al, 2007). La dégradation saline ou alcaline des sols, provoquée par l'irrigation, constitue un risque qui va croissant sur la planète avec la forte augmentation des superficies irriguées destinées à couvrir les besoins des populations, en complément des cultures pluviales. Les méthodes de récupération sont toujours délicates et onéreuses; elles nécessitent plusieurs années de travail pour un résultat souvent précaire. Des solutions techniques existent pour chaque situation particulière qui nécessite un diagnostic précis et un suivi continu de son évolution. Il est essentiel, sur le plan économique de procéder en outre à une étude préalable de rentabilité à long terme. Différents efforts ont été couronnés de succès dans beaucoup de pays, la réhabilitation d'un territoire irrigué est quoique possible, généralement difficile et coûteuse (Redly et Cheverry, 2000).

L'objectif à viser dans tout projet de réhabilitation est de ramener la salinité du sol à une valeur tolérée par les cultures et le déplacement du sodium échangeable et son évacuation hors de la zone racinaire.

## **1. Les méthodes de la réhabilitation**

---

Dans le cadre de la réhabilitation des sols salsodiques, plusieurs méthodes existent. C'est en fonction du type de sol (salin, à alcali ou sulfato-acide) qu'elles sont choisies. Actuellement, les chercheurs préconisent des études préliminaires concernant l'inventaire pédologique, hydrogéologique, climatique, origine et types de sels, les exigences des cultures à envisager et leur tolérance aux sels. L'objectif à viser est de ramener la salinité au seuil toléré par les cultures, de conserver le sol, ainsi d'amélioration de la composition chimique du complexe adsorbant en éliminant l'excès du sodium échangeable. Le choix de type d'amendement est important selon que le sol est calcaire ou non et aussi la détermination de la dose de lessivage efficace, laquelle est fonction des conditions pédoclimatiques et des exigences culturales.

## **2. Les étapes de la mise en valeur des sols salsodiques**

---

L'amélioration des sols salsodiques peut commencer par le dessalage ou la désodisation. Le choix dépend de la perméabilité du sol, si cette dernière est bonne, le choix existe, par contre si elle est faible, il est nécessaire de déplacer le sodium échangeable d'abord afin d'améliorer les propriétés physiques.

Pour récupérer les sols salins à complexe sodique, il faut apporter des amendements chimiques au sol ou bien à l'eau d'irrigation (Keren et Miyamoto, 1990 in Nadler et al., 1996). Mais l'apport d'amendements ne suffit pas, c'est ainsi que (Cherbuy, 1991) a récapitulé trois étapes essentielles :

## 2.1. Isolation de la zone salée de la source de contamination

Après avoir déterminé l'origine de la salinité (dans le cas des sols d'In Salah c'est l'eau d'irrigation), donc la première étape consiste à la mise en place d'un réseau de drainage efficace ou de récupérer l'ancien système de drainage afin de maintenir la nappe en dessous de la profondeur critique et surveiller son niveau en périodes d'irrigation.

## 2. 2. Evacuation des sels sodiques et du Na échangeable

Les sols salins à complexe sodique sont caractérisés par des taux de sodium échangeable supérieur à 15 % dont l'effet est déjà cité. Pour éliminer l'excès du sodium de la solution, il suffit d'irriguer avec des doses de lessivage calculées. Par contre, pour éliminer le sodium fixé sur le complexe adsorbant du sol, deux étapes sont à réaliser.

### 2.2.1. Amendement du sol

Il existe divers types d'amendements, les principaux sont : gypse, phosphogypse, plâtre, sulfate de fer, soufre, chrome de calcium, la chaux et le nitrate de chaux. Ces divers types d'amendements sont tous pour objet de déplacer le sodium échangeable par le calcium (Gupta et Abros, 1990). L'apport d'amendements chimiques à base de calcium pour le déplacement de sodium échangeable ou bien par un apport d'une eau d'irrigation riche en cations bivalents sont deux stratégies de remédiation des sols salés (Nelson et Oades, 1998 ; Garcia et al, 2000 in Tejada et al, 2006). Ces amendements chimiques sont des matières d'approvisionnement des sols en cations bivalents (généralement  $Ca^{+2}$ ) et aussi pour le déplacement du Na échangeable, donc leur désodisation. Par ailleurs, l'utilisation simultanée de deux amendements (minéral et organique) a plus d'impact sur les propriétés physiques et chimiques des sols salés où ils provoquent un dessalement rapide (Halitim, 1973). Les sols sodiques réclament l'utilisation des amendements calciques pour diminuer le taux de saturation en sodium des sols agricoles (Dominguez et al., 2001).

### 2.2.2. Le lessivage

Le meilleur moyen du contrôle de la salinité est le lessivage, afin de maintenir un bilan de sels favorable dans la zone racinaire ou dans tout le profil du sol irrigué. C'est une opération délicate, qui a fait l'objet de plusieurs recherches (Rhoades, 1974 ; Valles et Dosso, 1979 ; Valles, 1988 ; Ismailov et Mamedov, 2000). Dans les zones sahariennes, le lessivage conduit les

sels dans la nappe superficielle, donc dégrade la qualité de l'eau et du sol (Daoud et Halitim, 1994). C'est selon les conditions du milieu, la nature du sol, la qualité d'eau d'irrigation et les exigences en eau de la culture à installer que les doses de lessivage sont déterminées.

Dans le cas des sols salsodiques du Sahara, où la composition granulométrique est à dominance sableuse induisant une forte infiltration et la saturation difficile à détecter, les apports en eau doivent être dosés en fonction des besoins réels des cultures et de la fraction lessivante minimale. Selon Valles (1988), un apport d'eau supérieur aux besoins des cultures est nécessaire pour lessiver les sels en profondeur.

## 2.3. Le contrôle et le suivi de l'évolution du système sol-nappe

Après avoir réalisé les deux premières étapes, il faut un contrôle permanent de la composition chimique des eaux d'irrigation, de la salinité de la zone racinaire ainsi que

des couches sous-jacentes et de l'évolution de la nappe en profondeur. Donc, l'irrigation doit être raisonnée et le drainage doit être efficace. Sachant que la salinisation ne peut être corrigée que par une bonne maîtrise du couple irrigation drainage et une bonne valorisation du pouvoir de lixiviation (Hachicha *et al.*, 1998). C'est ainsi, que Szabolcs (1989) propose une méthode d'amélioration des sols salés, basée sur le contrôle de l'irrigation, lessivage et drainage afin de réduire les teneurs en sels solubles à 0,05 % dans la solution des sols et à 2g/l dans les eaux souterraines.

### 3. Le phosphogypse et son utilisation dans la réhabilitation des sols salsodiques

---

Le phosphogypse contribue à la mise en valeur des sols salés en vue d'une meilleure productivité. Il peut être apporté à un sol salé ou solonchaks caractérisé par une CE > 4dS/m et un ESP > 15 % et un pH < 8,5, à un sol salé à alcali, caractérisé par une CE > 4dS/m, un ESP > 15 % et un pH > 8,5 et aussi à un sol à alcali, caractérisé par une CE < 4dS/m, un ESP > 15 % et un pH variant entre 8,5 et 10 (Zouggari *et al.*, 1987).

Le phosphogypse, lequel contient une proportion élevée en CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O, est un amendement efficace et largement utilisé dans les sols salsodiques ( [Dominguez et al.](#), 2001 ). Son utilisation dans la mise en valeur des sols salés en Inde et au Etats-Unis d'Amérique a donné des résultats très encourageants (Zouggari, 1987). Il a aussi l'effet d'augmenter les teneurs en phosphore assimilable pour les cultures et de réduire sa résorption dans les sols ( [Delgado et al.](#), 2002 ). Son utilisation dans la mise en valeur des sols salés du Bas Chéiff (Benamar, 1991), a montré des effets importants sur le déplacement du sodium échangeable par le calcium. Pour le cas des sols étudiés à In Salah, le type d'amendement retenu en tenant compte d'absence d'une source de calcaire dans la région sont les sels solubles de calcium et plus précisément le gypse ou le phosphogypse dont l'effet est prouvé par beaucoup de travaux antérieurs (Summer, 1996 ; Bialecka, 2003).

#### 3.1. Origine et production du phosphogypse

##### 3.1.1. Dans le monde

Le phosphogypse est un sous produit de l'industrie d'engrais phosphatés (El-Merabet *et al.*, 2003 ; Zvomuya *et al.*, 2005). Il est obtenu lors de la fabrication de l'acide phosphorique à partir de phosphate naturel par l'attaque de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, à 80 °C (voie humide) selon la réaction suivante :



De grandes quantités de phosphogypse sont produites dans le monde, et estimées de 200 à 250 millions t/an à l'échelle mondiale. 58 % sont déposées dans les décharges, 28 % sont rejetées en mer, et seulement 14 % sont réutilisées. Sa production mondiale actuelle est estimée à 100 millions t/an (Bialecka, 2003).

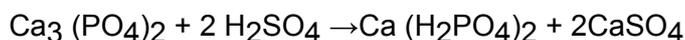
##### 3.1.2. En Algérie

En Algérie, la fabrication d'une tonne de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> engendre la production d'environ cinq tonnes de phosphogypse et la libération de 81,6kg de fluor sous forme de fluorapatite. Asmidal d'Annaba évacue quotidiennement près de 2500 t/an de phosphogypse à la mer (Halitim,

1986). Selon le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (2005), cette unité rejette 5160t/an de poussière d'engrais et 1281t/an de poussière de nitrate d'ammonium et plus 2000t/an de phosphogypse. Elle est classée 2<sup>ème</sup> entreprise polluante en Algérie. La nécessité de trouver des installations appropriées pour stocker ces quantités aussi importantes de phosphogypse à cause des problèmes de pollution que pose le rejet de ce sous produit à la mer, incite de plus en plus l'étude des possibilités de sa valorisation (Hammoudi et *al.*, 1990).

### 3.2. La compositions et propriétés du phosphogypse

Le phosphogypse produit par le complexe des engrais phosphatés d'Annaba se présente sous forme pâteuse (environ 20 % d'humidité). Son pH acide est de 2 à 3 et varie en fonction de la nature des roches phosphatées (Asmidal, 1984). Il est riche en éléments nutritifs, surtout en sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) dont le pourcentage est de 76,55 à 79,22 %. Ce dernier se rencontre sous forme de deux procédés (di hydrate et héli hydrate). L'unité reçoit les phosphates semi-finis qu'elle transforme en superphosphate simple par l'attaque à l'acide sulfurique selon la réaction suivante :



On aboutit à un mélange de gypse et de phosphate mono calcique avec 18 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . On obtient aussi du superphosphate triple avec une teneur de 44 à 48 % de  $\text{P}_2\text{O}_5$  en utilisant de l'acide phosphorique au cours du processus de transformation.



En réalité, le principal minerai est le phosphate calcique naturel ou fluorapatites dont la formule chimique est  $\text{Ca}_{10} (\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ .

La composition chimique du phosphogypse produit par le complexe des engrais phosphatés Asmidal d'Annaba est donnée par le tableau 4.

La solubilité du phosphogypse a été étudiée par Halitim (1986) et les résultats ont montré que, plus la concentration en sels augmente, plus le phosphogypse est soluble (tableau 5).

### 3.3. Utilisation du phosphogypse comme amendement des sols salins

L'utilisation du phosphogypse comme amendement, nécessite le séchage et le broyage, car plus il est fin, plus il est soluble et efficace. C'est ainsi que, les travaux de Keren et Shainberg (1981) ont montré que le phosphogypse est plus efficace que le gypse grâce à ses particules fines et à sa dissolution rapide, ainsi Peter et Kelling (2002) ont rapporté que plusieurs effets de remédiation suite à l'utilisation du phosphogypse grâce à sa grande solubilité laquelle est dix fois plus grande que le gypse. La partie qui passe en solution réagit par l'intermédiaire du calcium, lequel remplace progressivement le sodium fixé sur le complexe adsorbant, ce dernier est alors évacué par les eaux de lessivage sous forme de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  selon la réaction suivante:



Le phosphogypse contient un pourcentage élevé de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , c'est un amendement efficace, largement utilisé dans l'amélioration des sols salsodiques ( [Domínguez et al., 2001](#) ).

C'est aussi une source d'approvisionnement en soufre et en calcium, il peut être utilisé dans l'amendement des sols salins (Clur, 1988 ; Morris, 1985). Son utilisation reste conditionnée par :

- la détermination des superficies à amender et les quantités de phosphogypse à mettre en œuvre
- la proximité des terres à traiter par rapport à l'industrie d'engrais phosphatée. Pour les régions distantes, il faut tenir compte des frais du transport
- un traitement préalable du phosphogypse est nécessaire, notamment le séchage et le broyage
- utilisation au niveau des périmètres irrigués et dans les régions à forte pluviométrie ( $p > 400\text{mm/an}$ )
- existence d'un réseau de drainage efficace est indispensable.

**Tableau 4 : Composition chimique du phosphogypse algérien**

Composés	Formules	Analyse du 21/01/84 en %	Analyse du 30/05/84 en %
Eau de cristallisation	H <sub>2</sub> O	20,33	18,69
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> soluble dans l'eau	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	0,50
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> cristallisé	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,53	0,52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> insoluble	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,277	1,25
Acide phosphorique	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0,11	0,68
Phosphate tricalcique	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0,16	1,81
Oxyde de Mg	MgO	0,086	0,035
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,075	--
Oxyde de Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0,09
Sulfate de Ca	CaPO <sub>4</sub>	76,55	79,22
Silice	SiO <sub>2</sub>	0,90	0,78
Fluor	F	0,48	0,62

Source : Asmidal, (1984)

**Tableau 5 : Solubilité du phosphogypse du complexe Asmidal à différentes concentrations en NaCl**

Concentration en sel NaCl en g/l	0,00	1,16	3,50	7,01	10,50	14,02	17,52
Solubilité du phosphogypse en g/l	2,50	3,33	3,33	5,0	5,0	6,67	7,12

Halitim, (1986)

La richesse du phosphogypse en calcium et son pH bas, a amené plusieurs pays à valoriser ce sous produit en agriculture, comme amendement des sols salins à complexe sodique. Les travaux menés par l'USSS (1954) ont démontré que le phosphogypse est plus performant que le gypse usuellement utilisé. Son application plus fréquemment à petites quantités que le gypse

produit les mêmes effets que ce dernier (Zouggari et al., 1987).

### **3.3.1. Le calcul des doses d'apport**

L'amendement des sols salso-diques par le phosphogypse implique la détermination de la dose à apporter, les modes d'incorporation, la durée de contact avec le sol et la période d'application. Dans le cas des sols salso-diques, la dose dépend du taux initial du Na échangeable ( $ESP_i$ ) et de ( $ESP_f$ ) auquel on veut aboutir (lequel est généralement inférieur ou égale à 6 %)

et aussi en fonction de la tolérance des espèces végétales à mettre en place. Le calcul donne :  $(ESP_i - ESP_f) \cdot CEC / 100 = m \text{ cmol (+) / kg de sol}$

$(ESP_i - ESP_f) \cdot CEC \cdot Pe \cdot da / 100 = t \text{ (tonnes / ha)}$

Où :

- m est le poids équivalent de  $Ca^{2+}$  nécessaire pour le déplacement du sodium échangeable.
- Pe est le poids moléculaire divisé par la valence des ions actifs de l'amendement.
- da est la densité apparente du sol.

Le calcul du besoin en gypse est facile quand on connaît le taux initial de sodium échangeable et celui auquel on veut aboutir après traitement (USSS, 1954). La dose à apporter doit être supérieure de 25 % à la dose calculée, donc il faut la multiplier par 1,25 (Job *in* Cherbuy, 1991).

Elles existent d'autres méthodes de détermination des besoins en phosphogypse du sol, telle que :

La méthode de SCHOONOVER (U.S.S.L., 1954) et modifiée par Abrol et *al.*, (1975) dont la formule est la suivante :

$Q = 0,172 \times 104 \times da \times h \times n \times (C.E.C) \times (N_{ai} - N_{af})$

Où :

- Q est la quantité du gypse en tonnes / ha
- Da densité apparente en  $kg / m^3$
- H profondeur du sol en m
- N facteur de mesure égal à 1,20 pour le gypse
- C.E.C capacité d'échange cationique en mole / kg de sol
- $N_{ai}$  pourcentage du sodium échangeable initial
- $N_{af}$  pourcentage du sodium échangeable final

La méthode établie par les russes (Karoutchev, 1992) dont la formule est :

- $A = Na \cdot 100 / T$
- $X = 0,086 \cdot Na \cdot H \cdot d$
- La quantité du gypse =  $X \cdot 100 / A$

Où :

- 0,086 sont les milliéquivalents de gypse (en g).
- A est le degré de sodicité (en % de la capacité d'absorption).
- X est la dose de gypse (en t/ha).
- H est l'épaisseur de la couche arable (en cm).
- d est la masse volumétrique de l'horizon amendée (en  $g/cm^3$ ).

La dose du phosphogypse calculée doit être rapportée au pourcentage ou à la teneur massique du gypse.

### 3.4. Effet du phosphogypse sur les propriétés physico-chimiques des sols salsodiques

Le phosphogypse est l'un des amendements dont l'effet sur la salinité, la sodicité et sur l'amélioration des propriétés physico-chimiques est confirmé par plusieurs auteurs (Bedjou, 1989 ; Benamar, 1991 ; Oularbi et Charnai, 1991 ; Adada, 1994 ; Al-Oudat et Kanakri, 1998 ; Miller, 1998 ; Masmoudi, 2000 ; Tang et al, 2006).

#### 3.4.1 Sur les propriétés physiques

Beaucoup de travaux relatifs à l'effet du phosphogypse sur les propriétés physico-chimiques des sols (Benamar, 1991; Hussein, 1999 ; Peter et Kelling, 2002). Son apport entraîne l'amélioration de la structure. Les études de (Agassi et al., 1982 ; Kazman et al., 1983 ; Adada, 1994) ont aussi montré son effet sur l'augmentation de la perméabilité, la conductivité hydraulique ainsi que la réduction de l'érosion du sol). Le  $\text{Ca}^{2+}$  provenant de la dissolution du phosphogypse empêche la dispersion des colloïdes et par le jeu de dissolution et précipitation, il cimente les particules et forme des agrégats, d'où le phosphogypse a un rôle de cimentation des particules du sol (Servant, 1978).

#### 3.4.2. Sur les propriétés chimiques

Le phosphogypse agit sur les propriétés physiques et au même temps induit des effets sur la fertilité chimique, car il constitue une source de calcium soluble, susceptible d'améliorer l'état du complexe adsorbant par le remplacement du sodium déplacé et évacué par le drainage.

Dominguez et al., (2001) ont montré son effet sur la diminution du taux de  $\text{Na}^+$  échangeable des sols et l'augmentation de celui de  $\text{Ca}^{2+}$ . La libération du  $\text{Ca}^{2+}$  déplacera le  $\text{Na}^+$

échangeable fixé sur le complexe adsorbant selon la réaction suivante :



Ce processus d'échange permettra l'amélioration de la composition chimique du sol, et la diminution du taux du sodium échangeable. Selon (Xiyang et al., 2005), le phosphogypse a un effet sur la diminution des pertes en azote du compost. (Zvomuya et al., 2005) a montré qu'un apport de 1kg/m de profondeur en phosphogypse entraîne une diminution de perte en azote total de 0,11%. Son apport en association avec du compost aux sols alcalins a entraîné une diminution de pH (Zougari et al., 1987). Ainsi, Delgado et al (2001) a montré son effet sur l'augmentation des teneurs en phosphore assimilable du sol et la diminution de sa résorption est significative. Il est aussi une source de Soufre et de calcium pour les plantes (Alcordero et Rechcigl, 1993 ; FIPR, 1996).

### 3.5. Effet du phosphogypse sur les rendements des cultures

L'amendement des sols salsodiques avec le phosphogypse permet l'amélioration de leurs propriétés physico-chimiques et aussi l'augmentation des rendements des cultures (Mehta et Yadah, 1879 in Zougari et al., 1987 ; Hunter, in FIPR, 1989 ; John et Keith, 2002).

### 3.6. Impact du phosphogypse sur l'environnement

Le phosphogypse occupe de vastes surfaces de terres, les contaminants qui proviennent de son stock peuvent avoir un impact sur l'environnement, il présente aussi une contrainte d'utilisation par la présence de fortes concentrations en métaux. Selon El-Merrabet et *al.* (2003), sa concentration en radium 226 et en d'autres éléments radioactifs est relativement forte. Selon les types de minerais phosphatés, le phosphogypse renferme des teneurs importantes en métaux lourds et sa radioactivité est 3 à 4 fois supérieure que celle du minerai phosphaté (Billal et *al.*, 2002). Par contre, sa composition en fluor qui est de 0,5 % ne représente pas de danger sur l'environnement, et son utilisation n'a montré aucun effet sur l'assimilabilité du fluor et que les teneurs du végétal en cet élément sont inférieures aux normes fixées par le (CNRA, 1971 *in* Zougari et *al.*, 1987). Ainsi, des études ont montré que son utilisation raisonnée avec des doses de 1,5 tonnes/ha n'a pas d'effet significatif sur la radioactivité (Hunter, *in* FIPR, 1989 ; Summer, 1996). L'hypothèse de l'apparition de la fluorose chez les êtres humains consommant des plantes cultivées sur sols amendés en phosphogypse est rejetée et l'essai a confirmé que le fluor contenu dans le phosphogypse n'est pas assimilable par les plantes (Mehta et Yadah, 1979 *in* Zougari et *al.*, 1987).

# DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES

## 1- Matériels

### 1-1- Les sols des palmeraies de la région d'In Salah

---

#### 1.1.1. Etats des sols

La phoeniciculture occupe une superficie d'environ 3671 ha, dont 2271 ha par les anciennes palmeraies et 1400 ha par celles dans le cadre de mise en valeur. Le rendement moyen est estimé à 26747qx/ha. Les variétés de palmier dattier cultivées sont nombreuses (Aggaz, Tinasser, Takarboucht, Tigaza, Ahartane, El-ghrana etc.). Cette spéculation produit sous l'irrigation avec une eau du continental intercalaire dont l'extension géographique est illustrée par la figure1. L'eau est conduite par gravité; c'est Le type d'irrigation traditionnelle.

D'après les travaux pédologiques de Mahdi et *al.* (1999 et 2000) et ceux de Mahdi (2006), les sols des palmeraies de la région d'In Salah se dégradent sous l'effet de la salinisation secondaire, dont l'origine est liée à l'irrigation avec les eaux minéralisées d'origine albiennaise. Ce processus a entraîné l'abandon de l'activité agricole au centre des palmeraies et l'agrandissement se fait en périphérie (Mahdi et *al.* 1999).

#### 1.1.2. Le choix et la caractérisation des sols étudiés

Les sols étudiés sont choisis en fonction des résultats de Mahdi et *al.* (1999) et selon l'objectif de l'étude. Les sites d'étude sont illustrés par la figure 2. Les trois profils pédologiques sont localisés selon les coordonnées Lambert suivantes :

- P10A : X = 02° 27 736 E, Y = 27° 11 43 N, Z = 280,04m.
- P10B : X = 02° 27 491 E, Y = 27° 11 6 N, Z = 271,64m
- P12 : X = 02° 24 232 E, Y = 27° 11 036 N, Z= 268,48m

Ils sont illustrés par les photos (1, 2, 3 annexe C) et leurs caractéristiques physico-chimiques sont récapitulées dans les tableaux (1, 2, 3 et 4 annexe D). Les profils salins (figures 1, 2, 3 annexe F) et les profils sodiques (figures 1, 2, 3 annexe G) sont de types ascendants, expliquant le processus de salinisation par remontée capillaire des sels solubles et leur accumulation en surface sous forme de croûtes ou d'efflorescences salines (photos 4 et 5). L'observation des résultats montre que la salinité est élevée à très élevée aux niveaux des horizons de surface (figure 1 annexe E), le taux de sodium échangeable dans les horizons de surface est largement supérieur à 15% (figure 2 annexe E) et les valeurs de pH sont aussi supérieures à 8 (figure 3 annexe E).

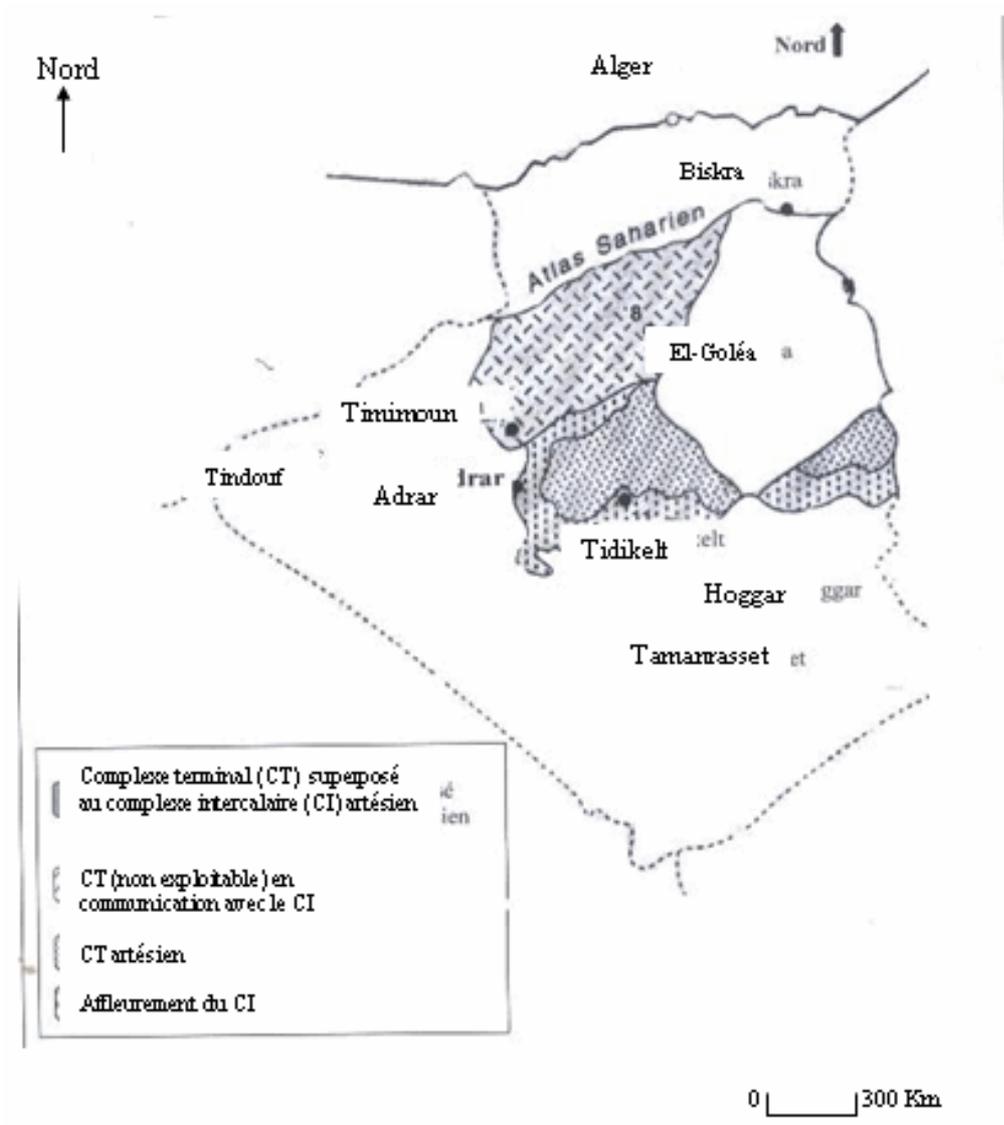


Figure1: Les ressources hydriques du Sahara d'après Dubost (1992)

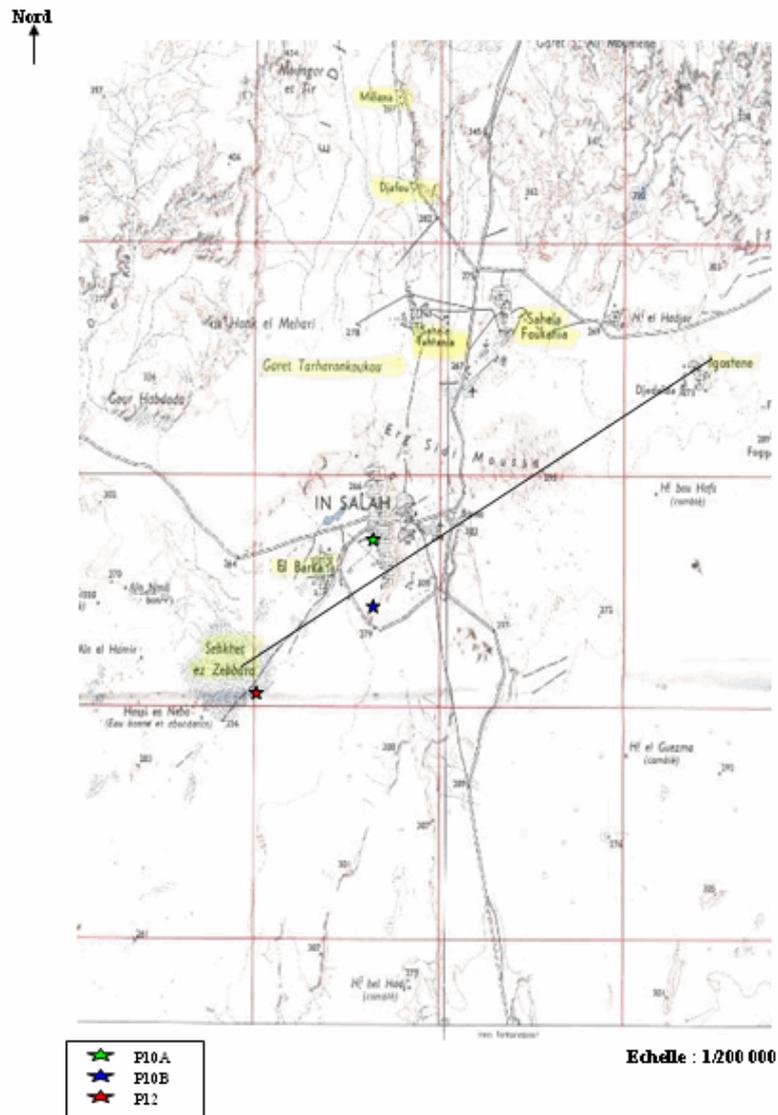


Figure 2 : localisation des sites d'étude

Selon la composition chimique des solutions des sols étudiés, la classification des cations et des anions se fait comme suit :

- $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$  pour les sols P10AH1 et P12H
- $Na^+ > Mg^{2+} > K^+ > Ca^{2+}$  pour le sol P10ABH1 (figure 4 annexe E)
- $Cl^- > SO_4^{--}$  pour les sols P10AH1 et P10BH1
- $Cl^- > SO_4^{--}$  pour le sol P12H1 (figure 5 annexe E)

A partir de ces résultats que notre choix est limité aux horizons de surface.

En considérant les seuils de salinité et de sodicité, et en se basant sur les critères de classification de l'USSS (1954), Mahdi (2006) a classé les sols étudiés en sols salsodiques et les eaux d'irrigation en  $C_4 S_4$  c'est-à-dire à danger d'alcalinisation très fort et à très forte salinité.

### 1. Le phosphogypse

Parmi les amendements chimiques utilisés dans la réhabilitation des sols salés non calcaires, le phosphogypse est l'un dont l'effet est considérable (Robert, 1996). Le phosphogypse utilisé dans notre étude provient de l'unité de production d'engrais phosphatés d'Annaba Asmidal. Sa composition chimique est déjà donnée par le (tableau 4, partie 1). Ce sous produit sous forme pâteux à la production, devient sec, d'où la nécessité de le broyer lors de son utilisation comme amendement. Son pH acide et sa richesse en ion  $\text{Ca}^{2+}$  le rendent un amendement prometteur en sols salins à complexe sodique.

### 1. L'eau de lessivage

Pour mieux contrôler les paramètres de salinité nous avons utilisé de l'eau distillée pour lessiver les sels présents dans les sols étudiés et pour solubiliser le phosphogypse.

### 1. Le sable calciné

Pour éviter tout tassement des sols, permettre une bonne percolation et un lessivage efficace, on préconise l'utilisation d'une quantité de sable calciné mélangée au sol.

## 2. Méthodologie

### 2.1. Essai expérimental

---

#### 2.1.1. L'objectif de l'essai

A l'heure actuelle, des milliers d'ha de terres se dégradent avec l'introduction de l'agriculture saharienne suite au phénomène de salinisation. Pour éviter à terme la perte des terres agricoles dans la région d'In Salah par ce phénomène, et pour assurer une production agricole durable sans compromettre la qualité des ressources naturelles (sols et eaux), notre étude expérimentale est consacrée essentiellement à la réhabilitation des sols salsodiques des palmeraies les plus salées, à savoir ceux des horizons de surface. L'objectif de notre étude est le suivi de l'évolution au laboratoire, de la conductivité électrique, du sodium et du pH des sols amendés avec le phosphogypse selon deux modes d'apport, donc de valoriser ce sous produit dans la réhabilitation des solssalsodiques.

#### 2.1.2. Le choix du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental retenu est de type factoriel avec deux facteurs en randomisation totale (photo 1), chaque traitement est répété trois fois.

#### 2.1.3. La mise en place et le suivi de l'essai

L'expérimentation a été réalisée au laboratoire dans des colonnes de percolation (26,2cm de longueur et 4,5cm de diamètre). Suivant le dispositif expérimental déjà établi théoriquement, nous avons fait des mélanges sol séché, broyé et tamisé à 2mm additionné du sable calciné et du phosphogypse séché, broyé et tamisé à 2mm pour le mode d'apport en mélange. Pour celui en surface, nous avons procédé d'abord par l'introduction du sol et du sable calciné et en suite, le phosphogypse en surface. Au total, 18 objets amendés en surface

et en mélange. Pour les objets témoins, nous avons mélangé que les sols avec du sable calciné. Tous les mélanges sont introduits dans des colonnes de percolation. Le modèle choisi présente l'avantage d'utiliser le même sol durant toute la durée de l'essai d'une part, et les colonnes ressemblent à un profil naturel qui obéit aux phénomènes de lessivage et de lixiviation des éléments minéraux d'autre part. Sur un support, les colonnes sont disposées d'une manière aléatoire et dans des conditions ambiantes de laboratoire (photo. 1). Dès le premier jour de l'installation, tous les objets ont subi 9 lavages à l'eau distillée à raison de 100ml par objet et à des temps non cinétiques. Au total, nous avons recueilli dans des bouteilles en plastique 243 solutions de percolation.

## **2.2. L'analyse chimique des percolats**

---

Chacune des solutions de percolation a fait l'objet des analyses suivantes :

- mesure de conductivité électrique à  $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1$  avec le conductivimètre
- mesure de pH à  $20^{\circ}\text{C} \pm 2$  par la méthode à électrode de verre
- dosage du sodium par le spectrophotomètre à flamme.

## **2.3. Les traitements statistiques**

---

Le dispositif expérimental réalisé par le logiciel STATITCF est de type factoriel avec deux facteurs en randomisation totale. L'essai est conduit dans des conditions ambiantes du laboratoire. Il présente l'avantage d'utiliser le même sol au cours de l'essai. Le traitement statistique appliqué aux résultats est l'analyse de la variance à deux facteurs de classification, qui est une méthode efficace permettant de montrer l'effet de chaque facteur à part et l'effet de l'interaction des deux facteurs.



*Photo1 : Le dispositif expérimental*

---

# TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS

## 1. Evolution de la conductivité électrique dans les sols étudiés sous l'effet du phosphogypse

### 1.1. Dans le sol de l'ancienne palmeraie à orientation nord (P10A)

---

#### 1.1.1 : Les résultats

L'examen des résultats de la conductivité électrique au cours de neuf semaines (tableau 2 annexe D) montre que les percolats issus du premier lavage, sont caractérisés par des CE très élevées et trois fois plus supérieures à celles des solutions des sols avant les lavages, elles sont en moyenne de 21,42 dS/m pour les témoins, de 23,41 dS/m pour les amendés en surface et de 24,78 dS/m pour ceux en mélange. Au deuxième lavage, les percolats récupérés sont d'une CE moyenne de 3,18 dS/m pour les témoins, de 2,97 dS/m pour les amendés en surface et de 3,01 dS/m pour les amendés en mélange. Pour les lavages qui suivent, la CE diminue progressivement jusqu'à atteindre des valeurs d'ordre de 0,18 dS/m pour les témoins, 1,74 dS/m pour les amendés en surface et 1,58 dS/m pour ceux amendés en mélange. Nous remarquons un maintien d'une certaine charge saline dans les percolats des sols amendés par le phosphogypse par rapport à ceux des sols témoins, ceci est probablement dû à la précipitation de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , maintenant une certaine concentration saline et une pression osmotique (Oster, 1982). L'évolution de la CE dans ce sol est illustrée par la figure 3a. La moyenne des conductivités électriques des solutions issues du sol P10AH1 est représentée par le tableau 6, elle est de  $3,62 \pm 0,081$  dS/m pour les témoins, elle subit une augmentation significative pour les percolats du sol amendé avec le phosphogypse en surface ( $4,75 \pm 0,044$  dS/m) et pour ceux amendés en mélange ( $4,82 \pm 0,041$  dS/m).

### 1. 2. Dans le sol de l'ancienne palmeraie à orientation sud (P10B)

---

#### 1.2.1 : Les résultats

Les résultats de l'évolution de la conductivité électrique dans ce sol (tableau 3 annexe D) indiquent que les concentrations en sels des premiers percolats sont très élevées, les moyennes des CE sont de l'ordre de 26,16 dS/m pour ceux issus des sols témoins, 29,47 dS/m pour ceux issus des sols amendés par le phosphogypse en surface et 31,31 dS/m pour ceux des sols amendés en mélange. Il est à noter que la CE moyenne des percolats issus du premier lavage est trois fois plus supérieure que celle de la solution du sol, nous constatons aussi que son évolution au cours de l'essai est de la même allure que celle du sol P10AH1. Au deuxième lavage, les valeurs de la CE ont chuté d'une manière remarquable à 2,89 dS/m pour les percolats issus des sols témoins, 3,10 dS/m pour ceux des sols amendés en

surface et 3,18 dS/m pour ceux des sols amendés en mélange. A partir du deuxième lavage, les valeurs diminuent de manière progressive jusqu'à atteindre à la neuvième percolation des valeurs moyennes d'ordre de 0,25 dS/m pour les témoins, 2,13 dS/m pour les sols amendés en surface et 1,81 dS/m pour ceux amendés en mélange, avec une élévation des valeurs des CE des percolats issus des sols amendés par rapport à ceux issus des sols témoins. L'évolution de la CE dans ce sol est illustrée par la figure 3b. La moyenne des conductivités électriques des percolats issus de ce sol (tableau 6) est de  $3,9 \pm 0,094$  dS/m pour les sols témoins, elle subit une augmentation significative pour ceux issus des sols amendés avec le phosphogypse en surface ( $5,37 \pm 0,10$  dS/m) et pour ceux amendés en mélange ( $5,32 \pm 0,098$  dS/m).

### **1.3. Dans le sol de la palmeraie de sebkha Ezzabara (P12)**

#### **1.3.1 : Les résultats**

Après observation des résultats de la CE des différents percolats recueilli (tableau 4 annexe D), nous constatons que les valeurs des CE issus du premier lavage sont très élevées jusqu'à atteindre 61,27 dS/m pour les sols témoins, 60,34 dS/m pour ceux amendés avec le phosphogypse en surface et 68,28 dS/m pour ceux amendés en mélange. Ces valeurs témoignent d'une concentration très élevée en sels solubles dans ce sol situé à l'aval des terres irriguées de la région d'étude par rapport aux sols des anciennes palmeraies à orientation nord et sud situées à l'amant. Au deuxième lavage, les valeurs chutent d'une façon considérable jusqu'à atteindre 2,78 dS/m pour les sols témoins, 3,28 dS/m pour les ceux amendés en surface et 2,90 dS/m pour ceux amendés en mélange, ce qui confirme l'efficacité du premier lavage sur le lessivage de la majorité des sels solubles présents dans le sol. A partir du troisième lavage, les valeurs diminuent progressivement jusqu'à atteindre à la neuvième percolation 1,69 dS/m pour les sols témoins, 2,54 dS/m pour ceux amendés en surface et 2,47 dS/m pour ceux amendés en mélange, donc nous remarquons que les valeurs des CE des percolats issus des sols amendés sont élevées par rapport à celles des témoins. L'évolution de la CE dans ce sol est illustrée par la figure 3c. La moyenne des conductivités électriques des percolats issus du sol P12H1 (tableau 6) est de  $8,59 \pm 0,12$  dS/m pour les sols témoins, une augmentation peu significative est observée pour les sols amendés en surface ( $9,08 \pm 0,05$  dS/m) et pour les amendés en mélange ( $9,87 \pm 0,07$  dS/m).

**Tableau 6 : Les valeurs moyennes de CE dans les percolats des sols étudiés**

Sols	Moyenne CE (dS /m)
Sol P10AH1	
<b>P10AH1T</b>	<b><math>3,62 \pm 0,081</math></b>
<b>P10AH1TRS</b>	<b><math>4,75 \pm 0,044</math></b>
<b>P10AH1TRM</b>	<b><math>4,82 \pm 0,041</math></b>
Sol P10BH1	
<b>P10BH1T</b>	<b><math>3,94 \pm 0,094</math></b>
<b>P10BH1TRS</b>	<b><math>5,37 \pm 0,107</math></b>
<b>P10BH1TRM</b>	<b><math>5,32 \pm 0,098</math></b>
Sol P12H1	
<b>P12H1T</b>	<b><math>8,59 \pm 0,125</math></b>
<b>P12H1TRS</b>	<b><math>9,08 \pm 0,052</math></b>
<b>P12H1TRM</b>	<b><math>9,87 \pm 0,071</math></b>

---

## 1.4. Discussion

---

D'après les résultats obtenus, les concentrations très élevées des premiers percolats issus des trois sols étudiés expliquent l'efficacité du premier lavage, ainsi que celle de l'amendement sur le lessivage de la grande partie des sels solubles présents dans les sols étudiés. La chute remarquable des valeurs de la CE au deuxième lavage explique que la majorité des sels solubles présents dans les solutions des sols sont lessivés au premier lavage. Par contre la diminution des CE des percolats qui suivent, où nous remarquons un maintien de la charge saline dans les solutions percolées à travers les colonnes des sols amendés en phosphogypse par rapport à celles des sols témoins, peut être expliquée par la précipitation des sels sodiques suite au mécanisme d'échange entre le  $\text{Ca}^{2+}$

libéré par la solubilisation progressive du phosphogypse et le  $\text{Na}^+$  fixé sur le complexe adsorbant (Oster, 1982), ou peut être lié à la facilité des mouvements des solutés à travers les colonnes des sols suite à l'amélioration de l'infiltration due à l'apport de  $\text{Ca}^{2+}$  par l'amendement du sol par le gypse contenu dans le phosphogypse (Qadir et al., 1996). Les traitements statistiques montrent des effets hautement significatifs pour le facteur sol, significatifs pour le facteur mode d'apport et l'interaction des deux sur l'évolution de la CE dans les sols étudiés (tableau 1annexe K).

---

## 1.5. Conclusion

---

De l'étude de l'évolution de la conductivité électrique sous l'effet de l'apport du phosphogypse, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Les sels présents dans les sols des palmeraies étudiées sont très lessivables et de types solubles ( $\text{NaCl}$  et  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Le phosphogypse est d'un apport efficace sur la diminution de la salinité des sols vu les différences des valeurs de CE des solutions issues des sols témoins par rapport à celles issues des sols amendés avec le phosphogypse.

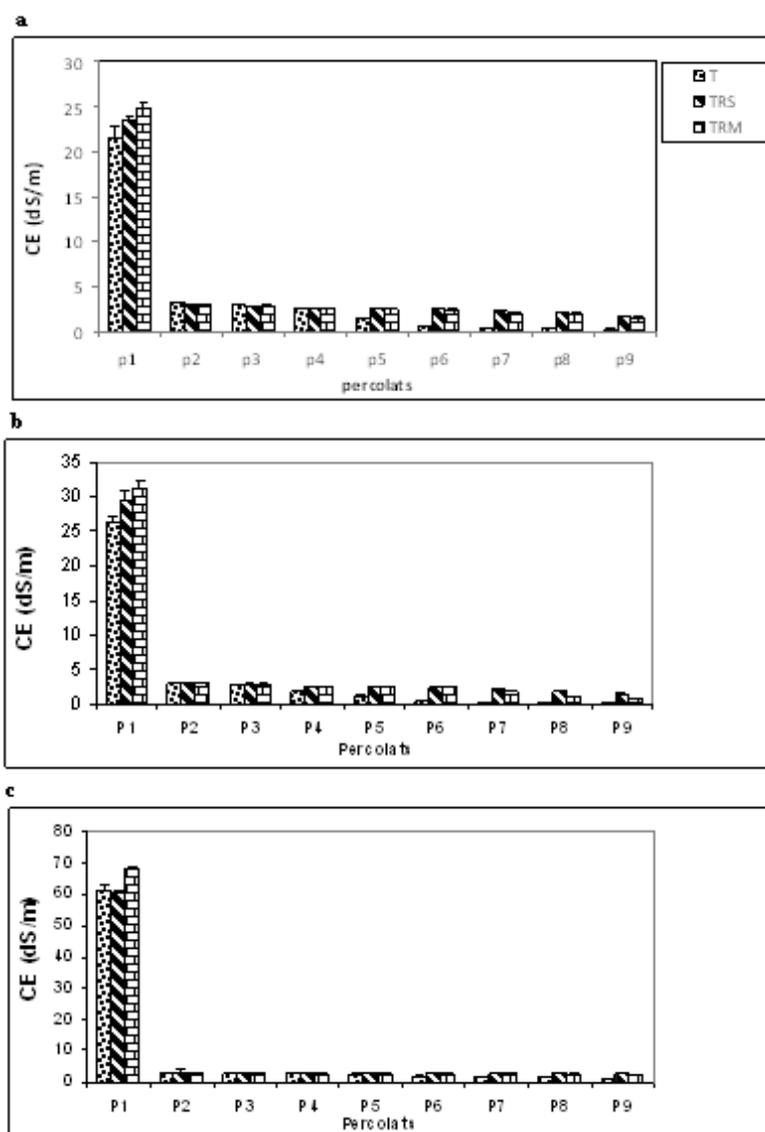


Figure 3 : Evolution de la conductivité électrique dans les percolats des sols étudiés au cours de l'essai

## 2. Evolution du sodium dans les sols étudiés sous l'effet du phosphogypse

### 2.1. Dans le sol de l'ancienne palmeraie à orientation nord

#### 2.1.1 : Les résultats

L'observation et l'analyse des résultats présentés dans le tableau 1 annexe I montre que les concentrations moyennes en  $\text{Na}^+$

des percolats issus du premier lavage sont très élevées, avec 8,94 cmol (+)/kg pour les percolats des sols témoins, par contre celles des percolats des sols amendés en surface, elles sont de 9,59 cmol (+)/kg et de 10,13 cmol (+)/kg pour celles des amendés en mélange.

A partir du deuxième lavage, les concentrations en Na<sup>+</sup>

diminuent jusqu'à atteindre à la septième percolation des valeurs moyennes d'ordre de 0,14 cmol (+)/kg pour les percolats des sols amendés en surface, 0,11 cmol (+)/kg pour ceux amendés en mélange et des valeurs très faible (0,01 cmol (+)/kg) pour ceux issus des sols témoins. La totalité du sodium lessivé du sol non amendé avec le phosphogypse est de 9,76 cmol (+)/kg, elle est inférieure à celles des sols amendés avec le phosphogypse en surface et en mélange qui sont respectivement 10,95 cmol (+)/kg et 11,40 cmol (+)/kg (voir tableau 7). L'évolution du sodium dans ce sol est illustrée par la figure 4a.

## 2. 2. Dans le sol de l'ancienne palmeraie à orientation sud

---

### 2.2.1 : Les résultats

Les résultats du suivi du sodium dans ce sol (tableau 2 annexe I) indiquent que les premiers percolats sont marqués par des concentrations élevées en cet élément, tout en notant des différences entre celles des percolats issus des sols témoins par rapport à celles des percolats issus des sols amendés. A partir du deuxième lavage, les concentrations en Na<sup>+</sup>

diminuent jusqu'à atteindre à la septième percolation, des valeurs moyennes d'ordre de 0,11 cmol (+)/kg pour les percolats des sols amendés en surface et 0,10 cmol (+)/kg pour ceux amendés en mélange et 0,01 cmol (+)/kg pour ceux des sols témoins. La totalité du sodium lessivé du sol non amendé avec le phosphogypse est de 11,80 cmol (+)/kg, elle est inférieure à celles des sols amendés avec le phosphogypse en surface et en mélange qui sont respectivement 14,15 cmol (+)/kg et 14,30 cmol (+)/kg (voir tableau 7). L'évolution du Na<sup>+</sup> dans ce sol est illustrée par la figure 4b.

## 2.3. Dans le sol de la palmeraie de sebkha Ezzabara

---

### 2.3.1 : Les résultats

Les résultats du suivi de l'évolution du sodium dans ce sol (tableau 3 annexe I) indiquent des concentrations très élevées en Na<sup>+</sup> des percolats issus du premier lavage avec une moyenne de 15,47 cmol (+)/kg pour ceux des témoins et de 15,57 cmol (+)/kg pour ceux des amendés en surface et de 17,54 cmol (+)/kg pour ceux amendés en mélange. Au deuxième lavage, tous les percolats sont marqués par une diminution remarquable jusqu'à atteindre des valeurs d'ordre de 0,21 cmol (+)/kg pour les témoins, 0,31 cmol (+)/kg pour les amendés en surface et 0,22 cmol (+)/kg pour les amendés en mélange. Au cours des sept percolations qui suivent, les concentrations en cet élément diminuent progressivement jusqu'à atteindre à la neuvième percolation des valeurs nulles dans les percolats témoins et des concentrations faibles dans les percolats issus des sols amendés en surface (0,18 cmol (+)/kg) et (0,12 cmol (+)/kg) dans ceux issus des sols amendés en mélange. La totalité du sodium lessivé du sol non amendé avec le phosphogypse est de 16,74 cmol (+)/kg, elle est inférieure à celles des sols amendés avec le phosphogypse en surface et en mélange qui sont respectivement

17,26cmol (+)/kget 19,03 cmol (+)/kg (voir tableau 7). L'évolution du  $\text{Na}^+$  dans ce sol est illustrée par la figure 4c.

## 2.4. Discussion

---

L'évolution des concentrations du sodium dans les différents percolats des sols étudiés au cours de l'essai montre que celles de ceux issus du premier lavage sont élevées pour les sols des anciennes palmeraies et très élevées pour celui de la palmeraie de sebkha Ezzabara. Les résultats témoignent de la présence des sels de nature sodique, confirmée par les résultats d'analyses de Mahdi et *al.* (1999). Les différences de concentrations entre les premiers percolats issus des sols témoins et ceux issus des sols amendés sont probablement dues à la solubilisation du phosphogypse par l'eau distillée, lequel libère le  $\text{Ca}^{2+}$  dans la solution du sol et par le mécanisme d'échange ( $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ ), ce dernier fait déplacer les ions  $\text{Na}^+$  fixés sur le complexe adsorbant lesquels sont lessivés sous formes de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Au deuxième lavage, les chutes de concentrations en  $\text{Na}^+$  de tous les percolats s'expliquent par le lessivage de la majorité des sels sodiques au cours du premier lavage, aussi elles nous renseignent sur la solubilité des sels sodiques présents dans les sols étudiés. La diminution des concentrations en  $\text{Na}^+$  est progressive, et atteint à la septième percolation des valeurs nulles dans les percolats issus des sols témoins, donc le lessivage complet des sels sodiques solubles, par contre dans ceux issus des sols amendés, il y a un maintien de faibles concentrations jusqu'à la neuvième percolation, lesquelles sont le résultat de la solubilisation progressive du phosphogypse et du mécanisme d'échange  $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ . Halitim et *al.*, (1993) explique que l'amendement chimique à base de calcium, agit par l'intermédiaire de deux mécanismes; le premier est physico-chimique (échange  $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$ ) et permet l'enrichissement du complexe adsorbant en calcium en diminuant le taux de sodium échangeable, quant au deuxième, il est osmotique, résultant de la dissolution des sulfates de calcium, maintient une certaine concentration saline des solutions des sols (Oster, 1982). Ceci est confirmé par les résultats de la CE obtenu au cours de l'essai.

L'évolution du sodium dans les percolats du sol de l'ancienne palmeraie à orientation nord est différente de celle de ceux du sol de l'ancienne palmeraie à orientation sud et celle de ceux du sol de sebkha Ezzabara diffère par rapport à celle des deux premiers. Les traitements statistiques montrent des effets hautement significatifs pour le facteur sol et significatifs pour le mode d'apport d'amendement (tableau 2 annexe K).

## 2.5. Conclusion

---

A l'issue des résultats obtenus, le sodium présent dans les trois sols étudiés est sous forme soluble et échangeable. Le lessivage des sels sodiques par l'utilisation d'une eau distillée est efficace et a permis la percolation de tous les sels solubles. Par contre, la forme échangeable du sodium dans les sols amendés est très faible, du au fait que l'échange  $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$  prend un peu plus du temps à cause de la faible dose du phosphogypse, d'où il serait souhaitable de l'augmenter dans d'autres travaux.

Tableau 7 : La somme du  $\text{Na}^+$  dans les percolats des sols étudiés

---

Sols	La somme du Na (cmol (+)/kg)
Sol P10AH1	
<b>P10AH1T</b>	<b>9,76</b>
<b>P10AH1TRS</b>	<b>10,95</b>
<b>P10AH1TRM</b>	<b>11,40</b>
Sol P10BH1	
<b>P10BH1T</b>	<b>11,80</b>
<b>P10BH1TRS</b>	<b>14,15</b>
<b>P10BH1TRM</b>	<b>14,30</b>
Sol P12H1	
<b>P12H1T</b>	<b>16,74</b>
<b>P12H1TRS</b>	<b>17,26</b>
<b>P12H1TRM</b>	<b>19,03</b>

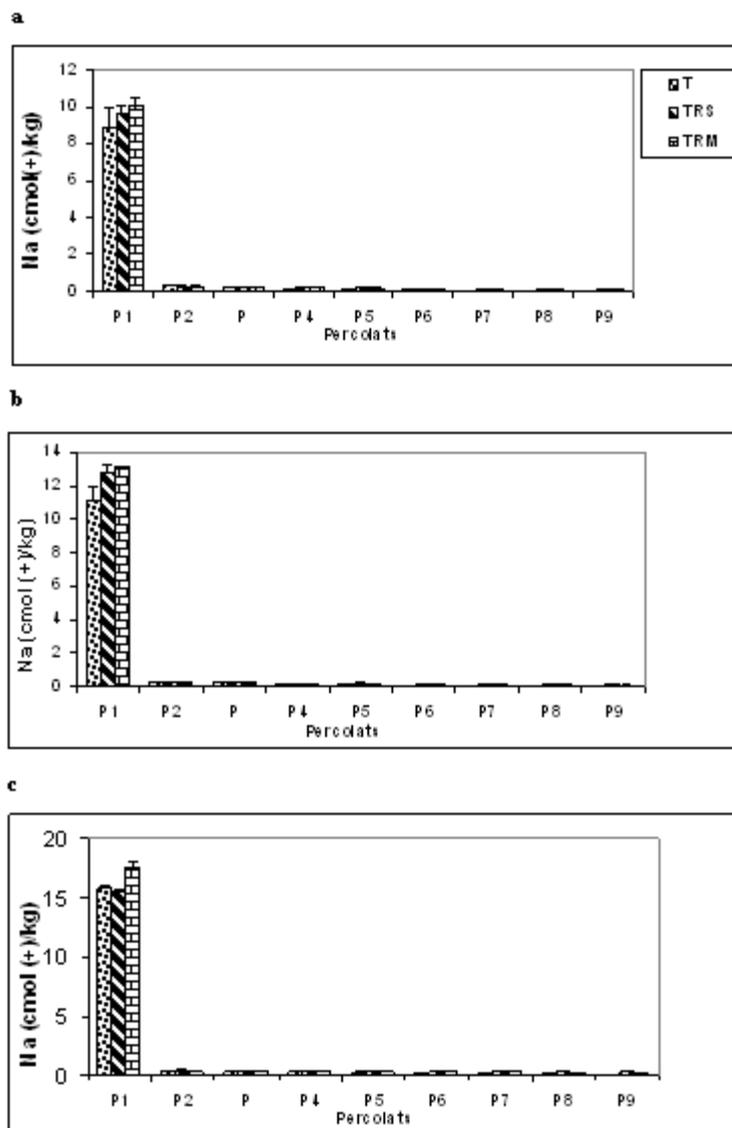


Figure 4 : Evolution du sodium dans les percolats des sols étudiés au cours de l'essai

## 3. Evolution du pH dans les sols étudiés sous l'effet du phosphogypse

### 3.1. Dans le sol de l'ancienne palmeraie à orientation nord

---

#### 3.1.1 : Les résultats

Le suivi du pH a fait aussi l'objet de l'essai expérimental, les résultats de son évolution dans ce sol caractérisé par un pH d'ordre de 8,19 (Mahdi, 2006) sont récapitulés dans le tableau 1 annexe J. L'évolution de ce paramètre est fluctuante. Les premiers percolats sont caractérisés par un pH moyen d'ordre de 6,67 pour les sols témoins, de 6,6 pour ceux issus des sols amendés avec le phosphogypse en surface et de 6,54 pour ceux en mélange, selon la classification de la CES (2000), ces pH sont neutres. A partir du deuxième lavage, les pH de tous les percolats augmentent et à tendance à l'alcalinisation mais ne dépassant pas 7,8. Nous notons que les percolats les plus alcalins sont observés à partir de la septième, huitième où à la neuvième percolation où il atteint 7,95 pour le témoin, 8,09 pour les traités en surface et 8,36 pour les traités en mélange. L'évolution de la CE de ce sol est illustrée par la figure 5a. La moyenne des pH des solutions issues du sol P10AH1 (tableau 8) est de  $7,53 \pm 0,063$  pour les témoins,  $7,47 \pm 0,027$  pour les amendés en surface et  $7,66 \pm 0,024$  pour ceux amendé en mélange.

### 3. 2. Dans le sol de l'ancienne palmeraie à orientation sud

---

#### 3.2.1 : Les résultats

L'examen des valeurs de pH (tableau 2 annexe J) montre que les premiers percolats ont des pH neutres de 6,36 pour les témoins, 6,66 pour les traités avec le phosphogypse en surface et 6,53 pour ceux traités en mélange. Pour les autres percolats qui suivent, les valeurs augmentent jusqu'à atteindre à la neuvième percolation des pH moyens d'ordre de 8,05 pour les témoins, de 8,16 pour ceux traités avec le phosphogypse en surface et de 8,36 pour ceux traités en mélange, l'évolution du paramètre pH dans ce sol est fluctuante. Selon la classification de CES (2000), le pH des premiers percolats sont neutres et ceux des huit percolats qui suivent sont neutres à alcalins. L'évolution du pH dans ce sol est illustrée par la figure 5b. La moyenne des pH des percolats issus du sol P10AH1 (tableau 8) est de  $7,6 \pm 0,028$  pour les témoins,  $7,64 \pm 0,03$  pour les amendés en surface et  $7,76 \pm 0,013$  pour ceux amendé en mélange.

### 3.3. Dans le sol de la palmeraie de sebkhah Ezzabara

---

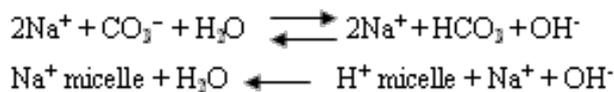
#### 3.3.1. Les résultats

Le sol de sebkhah est caractérisé par un pH alcalin de 8,43 a fait aussi l'objet d'évolution de ce paramètre sous l'effet du phosphogypse. Les résultats du suivi (tableau 3 annexe J) indiquent que les pH des premiers percolats sont neutres et les valeurs sont de 6,41 pour les témoins, de 6,49 pour les traités en mélange et de 6,33 pour ceux traités en mélange. Les résultats confirment la neutralité des sels présents dans ce sol. A partir de la deuxième percolation, l'évolution est fluctuante et tend à l'alcalinisation. A la neuvième percolation les

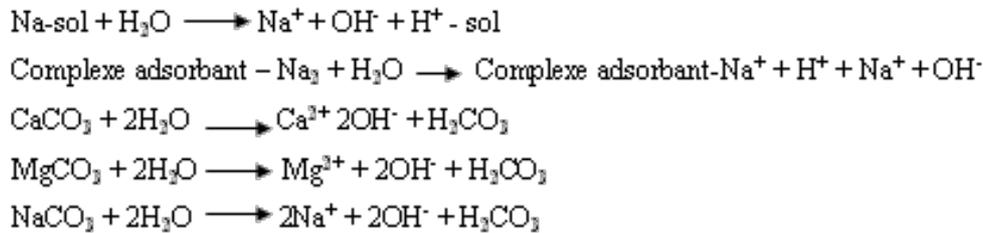
valeurs moyennes sont de 8,12 pour les témoins, 7,32 pour les traités en surface et 7,88 pour ceux traités en mélange. L'évolution du pH de ce sol est illustrée par la figure 5c. La moyenne des pH des solutions issues du sol P12H1 (tableau 8) est de  $7,70 \pm 0,041$  pour les témoins,  $7,57 \pm 0,056$  pour les amendés en surface et  $7,47 \pm 0,026$  pour ceux amendé en mélange.

### 3.4. Discussion

L'évolution du pH dans les trois sols étudiés au cours de l'essai expérimental indique selon la classification de la CES (2000) que les valeurs de pH caractérisant tous les premiers percolats sont neutres, ce qui signifie que les sels présents dans les trois sols étudiés sont solubles, neutres et facilement lessivables. L'élévation des valeurs de pH et leur tendance alcaline dans tous les percolats qui suivent peut être attribué à l'hydrolyse des carbonates de sodium ou à celle du sodium présent sur le complexe d'échange (Brady et Weil, 1996 *in* Mzezewa et al., 2003) selon les réactions suivantes :



Ainsi, Mahdi (2006) lie cette augmentation du pH à l'hydrolyse des ions échangeables de sodium et de calcium ou des sels alcalins sous l'effet d'eau douce tels que :  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Les équations d'hydrolyse proposées sont :



Les traitements statistiques montrent des effets significatifs pour le facteur sol et mode d'apport (surface et mélange) sur l'évolution de pH dans les sols étudiés (tableau 3 annexe K).

Tableau 8 : Les valeurs moyennes de pH dans les percolats des sols étudiés

Sols	Moyenne pH
Sol P10AH1	
<b>P10AH1T</b>	<b>7,53 ± 0,063</b>
<b>P10AH1TRS</b>	<b>7,47 ± 0,027</b>
<b>P10AH1TRM</b>	<b>7,66 ± 0,024</b>
Sol P10BH1	
<b>P10BH1T</b>	<b>7,60 ± 0,028</b>
<b>P10BH1TRS</b>	<b>7,64 ± 0,030</b>
<b>P10BH1TRM</b>	<b>7,76 ± 0,013</b>
Sol P12H1	
<b>P12H1T</b>	<b>7,70 ± 0,041</b>
<b>P12H1TRS</b>	<b>7,57 ± 0,056</b>
<b>P12H1TRM</b>	<b>7,47 ± 0,026</b>

### 3.5. Conclusion

---

L'évolution de paramètre pH au cours de l'essai est fluctuante, la différence entre les valeurs des percolats issus des sols témoins et celles des percolats issus des sols amendés est peu significative. Néanmoins, les résultats expliquent les valeurs élevées de CE et de Na<sup>+</sup> des premiers percolats, laquelle est liée à la lixiviation des sels neutres et solubles et de nature sodique tels que : NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>.

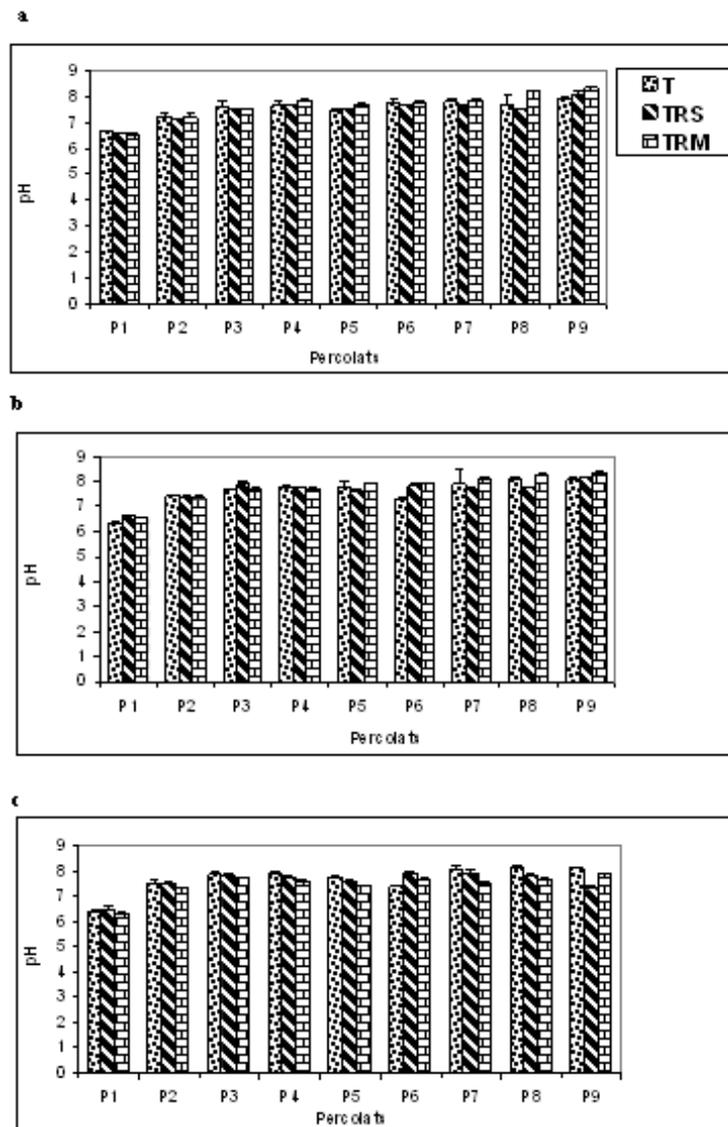


Figure 5 : Evolution du pH dans les percolats des sols étudiés au cours de l'essai

## 4. Relation entre la salinité et le sodium dans les sols étudiés

Les variables pédologiques sont souvent liées entre elles, dans beaucoup de cas, les valeurs des unes déterminent celles des autres. Ce genre de relation est déterminé par les pédologues pour vérifier la qualité de l'information (Legros et *al.*, 1992).

### 4.1. Résultats et discussions

### 4.2. Conclusion

La salinité des sols étudiés est en relation avec la présence de sels de nature sodique. La CE des sols étudiés est étroitement liée à la présence de l'ion sodium dans les solutions des sols. L'évolution de la conductivité électrique dans les trois sols étudiés suit celle du sodium, donc les sels présents sont de nature sodique et la salinité des sols étudiés est proportionnelle aux sels sodiques, cette relation montre que la salinisation induit la sodisation.

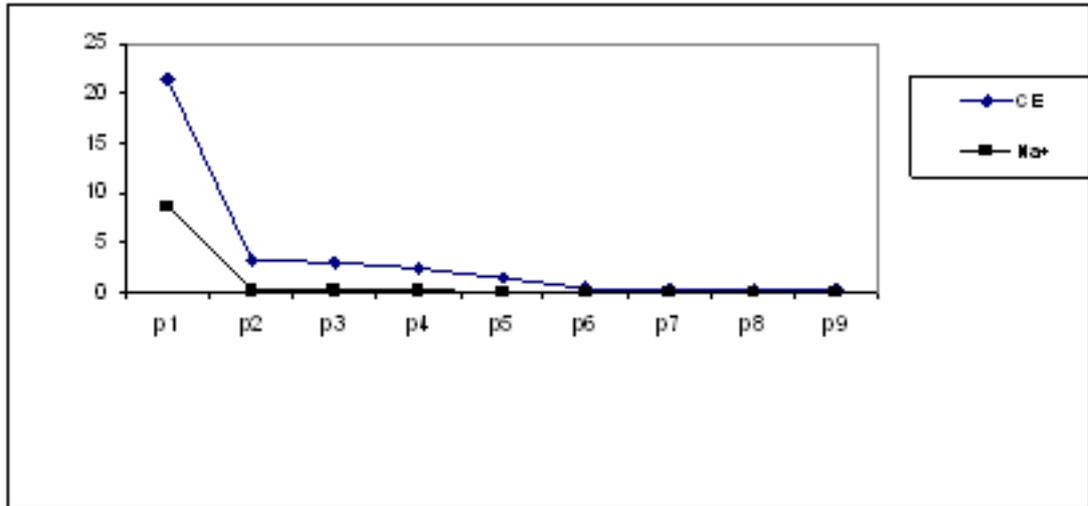


Figure 6 : Evolution de la CE et du Na<sup>+</sup> dans le sol P10AH1T

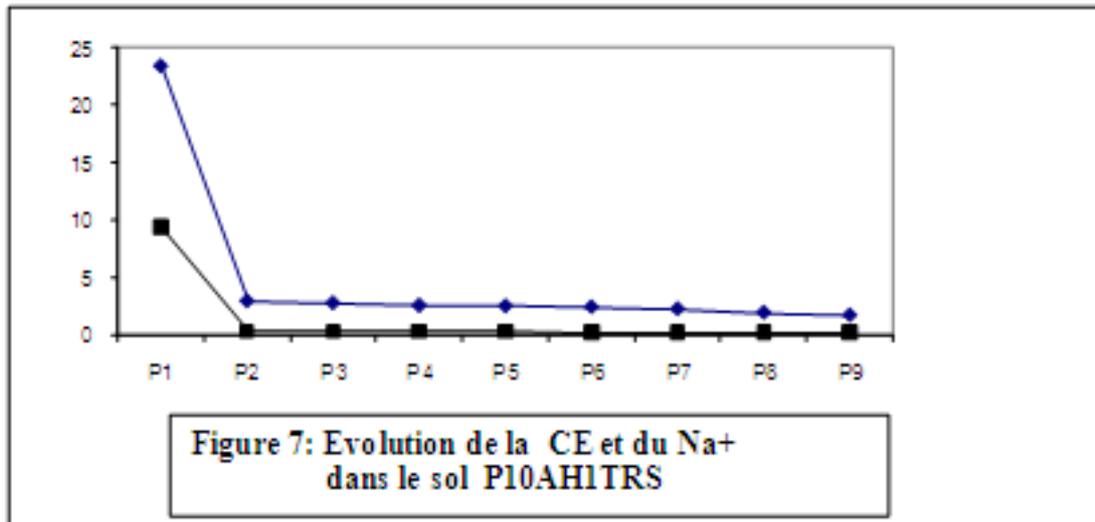


Figure 7 : Evolution de la CE et du Na<sup>+</sup> dans le sol P10AH1TRS

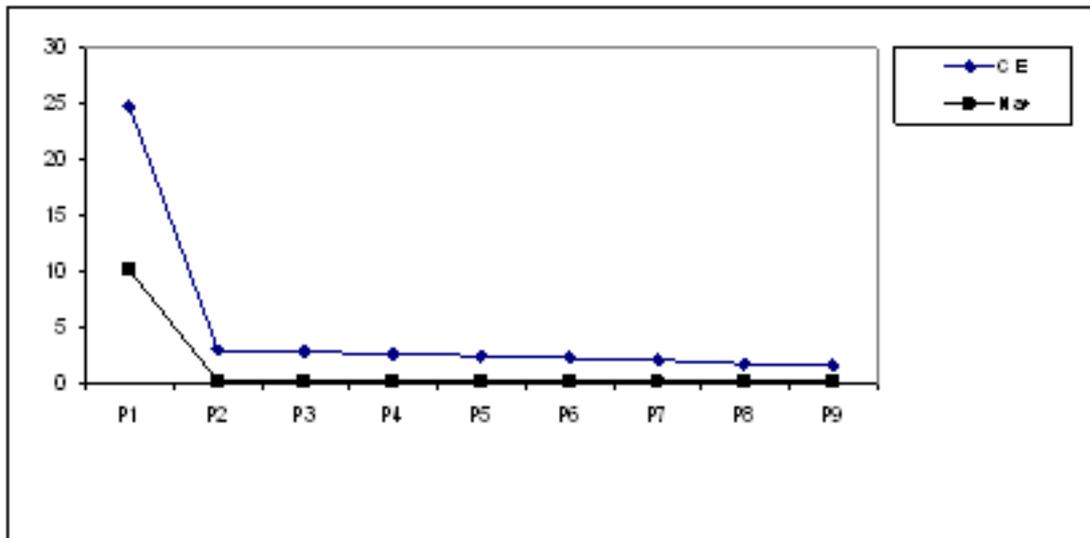


Figure 8 : Evolution de la CE et du Na<sup>+</sup> dans le P10AH1TRM

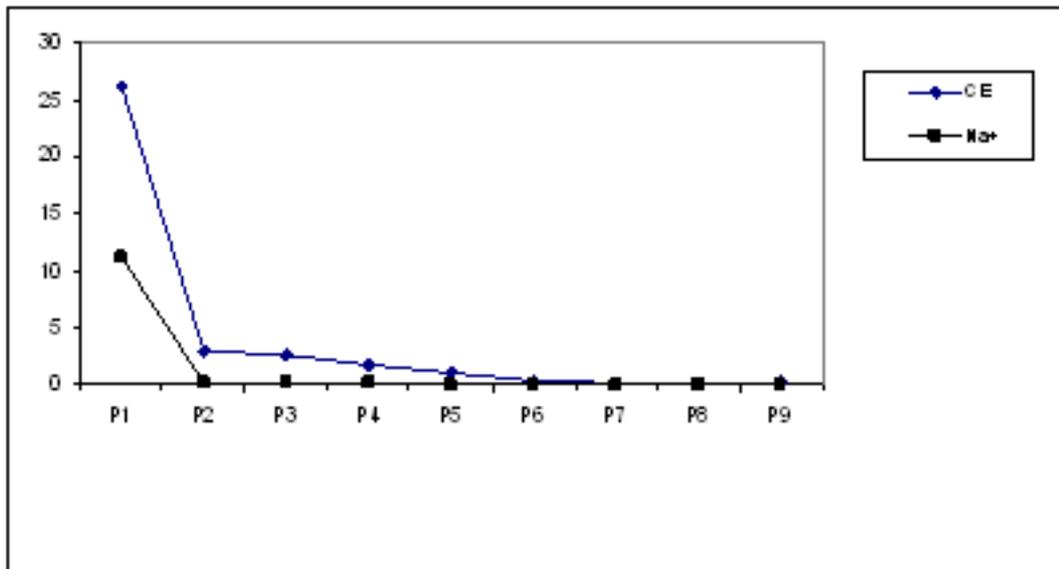


Figure 9 : Evolution de la CE et du Na<sup>+</sup> dans le sol P10BH1T

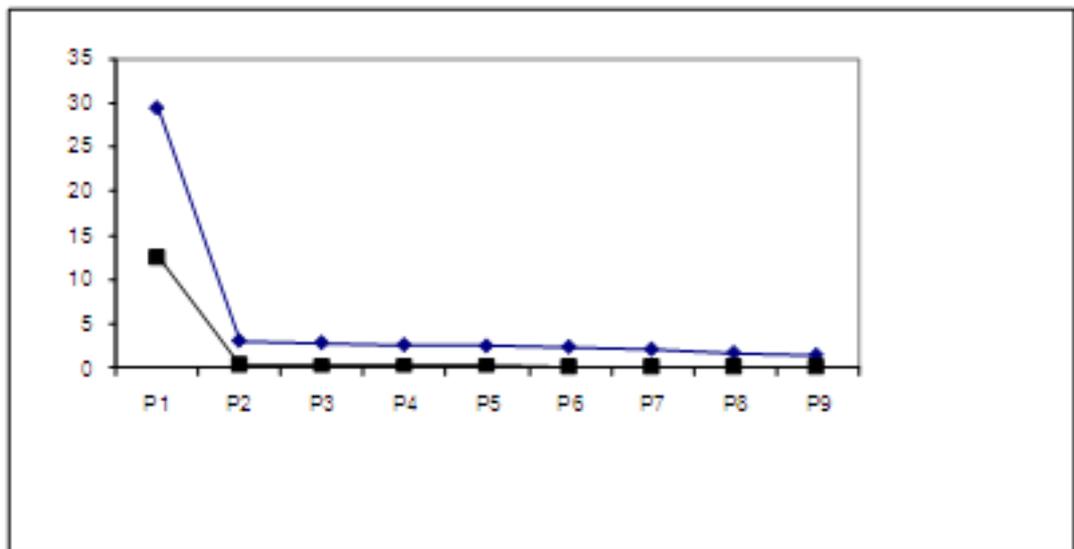


Figure 10 : Evolution de la CE et du Na<sup>+</sup> dans le sol P10BH1TRS

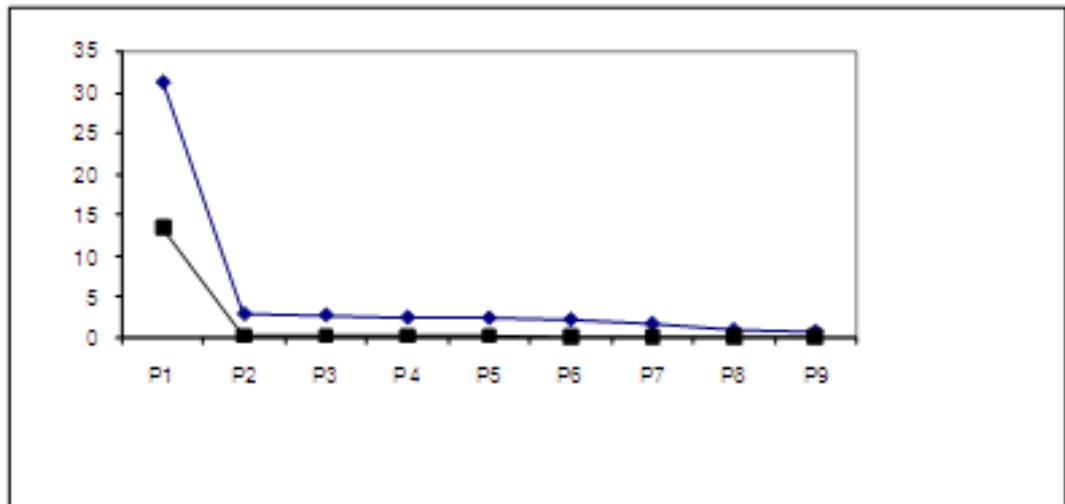


Figure 11: Evolution de la CE et du Na<sup>+</sup> dans le sol P10BH1TRM

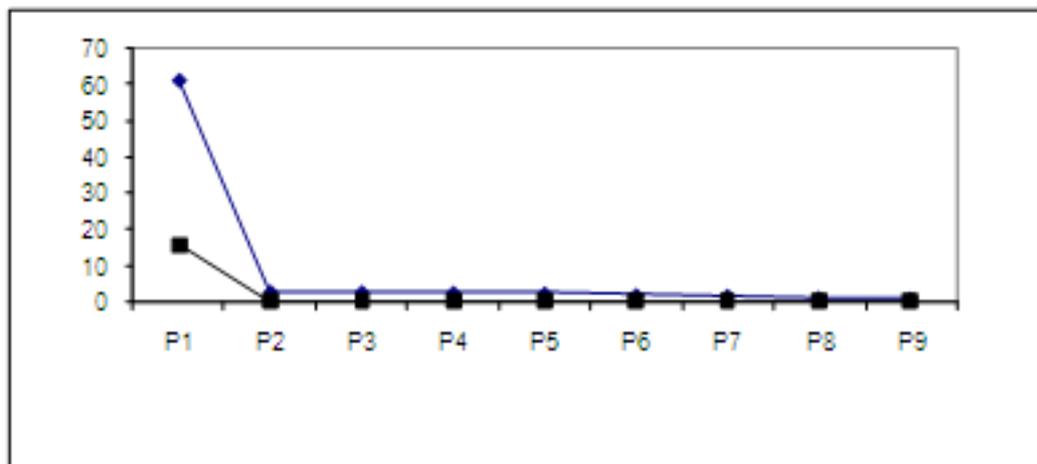


Figure 12 : Evolution de la CE et du  $\text{Na}^+$  dans le sol P12H1T

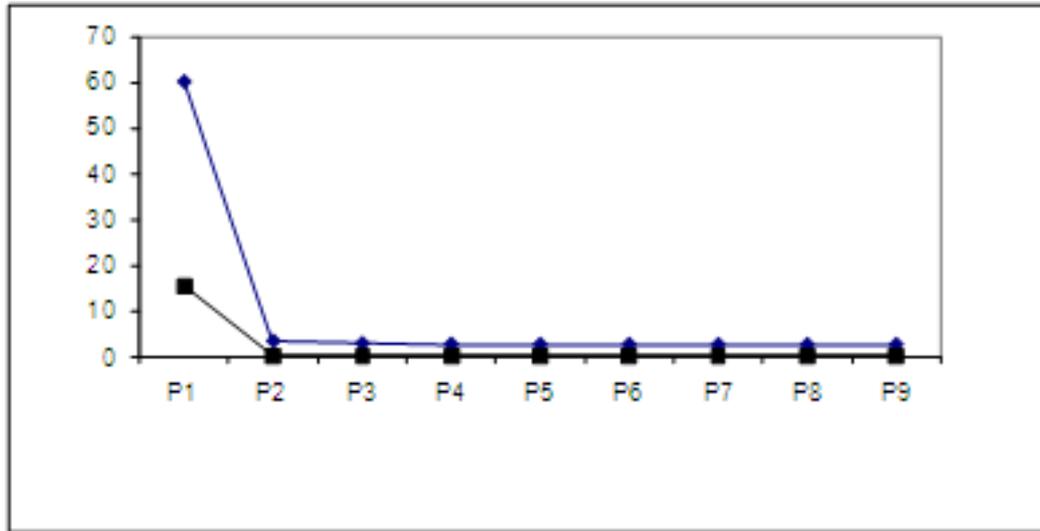


Figure 13 : Evolution de la CE –  $\text{Na}^+$  dans le sol P12H1TRS

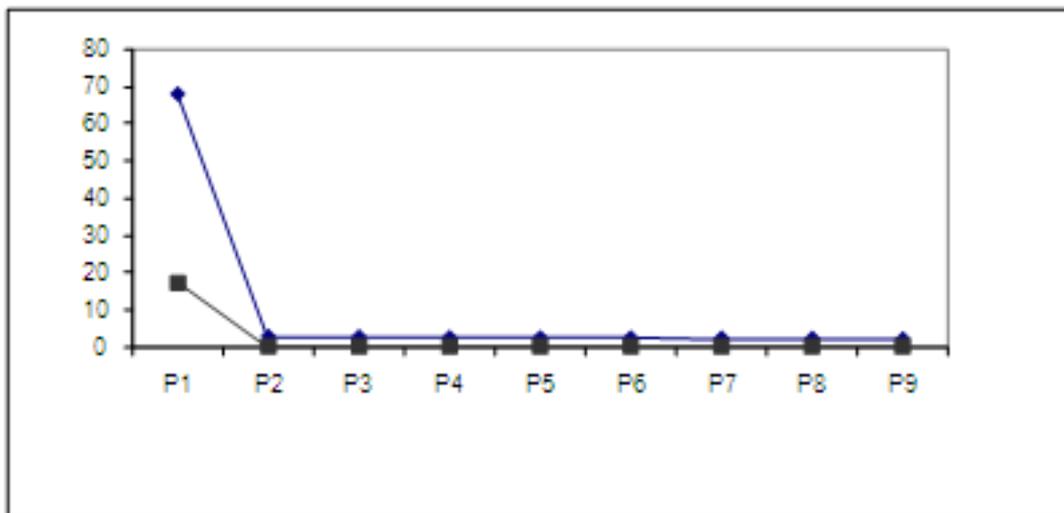


Figure 14 : Evolution de la CE –  $\text{Na}^+$  dans le sol P12H1TRM

## 5. Discussions générales

L'étude de l'effet du phosphogypse sur l'évolution de la conductivité électrique, du sodium et du pH dans les trois sols de surface étudiés a montré que :

La composition chimique des solutions ayant percolé à travers les sols étudiés évolue d'une façon décroissante du premier au neuvième lessivage.

Les résultats indiquent que les valeurs de conductivité électrique issues du premier lessivage sont très élevées pour tous les objets (témoins et traités par le phosphogypse), ce qui explique l'élimination de la grande partie des sels présents dans les sols étudiés et aussi

leur solubilité. A partir du deuxième, l'évolution des CE des solutions percolées au cours de l'essai montre une chute considérable au deuxième lessivage et progressive pour ceux qui suivent, tout en notant que les valeurs de celles issues des sols témoins sont très faibles par rapport à celles des sols traités. Cette différence est probablement due au maintien des sols traités par le phosphogypse une certaine charge saline provenant probablement de la précipitation des sels après la dissolution du phosphogypse (libération des ions  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) et du phénomène d'échange entre les sols (saturés en sodium échangeable) et leurs solutions.

L'évolution du sodium au cours de l'essai, fait apparaître d'une façon remarquable une décroissance des valeurs dans tous les percolats des sols (témoins et traités). L'effet revient au lessivage des sels sodiques solubles suite à leur lessivage avec l'eau distillée utilisée. Quant au phosphogypse, son effet est surtout apparu à partir de la sixième et la septième percolation, où nous remarquons pour les sols témoins, les concentrations en  $\text{Na}^+$  des percolats sont nulles ou traces, par contre celles de ceux traités par le phosphogypse, elles contiennent une certaine concentration en  $\text{Na}^+$  jusqu'à la neuvième percolation. Dans ce sens, Zouggar et al. (1987) a aboutit à des résultats où ils expliquent que l'effet du phosphogypse est important sur la lixiviation des sels quand le débit de percolation est lent (c'est-à-dire que l'eau percolée à travers le sol a plus de temps pour solubiliser le maximum de sels). Ces concentrations sont probablement issues de l'effet de la dissolution simultanée du phosphogypse sous l'effet de l'eau apportée et du phénomène d'échange entre la solution du sol et le complexe adsorbant (saturé en  $\text{Na}^+$  échangeable). Le  $\text{Ca}^{2+}$  provenant de la dissolution du phosphogypse permet de maintenir une concentration en sels (Servant, 1978).

L'évolution de  $\text{Na}^+$  suit celle de la CE, les valeurs des percolats du premier lessivage sont aussi élevées, et elles tendent à diminuer progressivement jusqu'à atteindre des valeurs très faibles pour celles des sols traités, et nulles pour celles des témoins.

A partir de l'observation et d'analyses des résultats des deux paramètres (CE et  $\text{Na}^+$ ), nous pouvons conclure que :

La salinité des sols étudiés est liée à la présence des sels sodiques solubles. Les concentrations en ion sodium des solutions suivent celles des CE, donc l'étude de cette évolution permet de mettre en évidence que celle l'ion  $\text{Na}^+$  est directement proportionnelle à celle de la CE, ce résultat est similaire à celui trouvé par (Droubi, *in* Daoud, 1990). Aussi, l'étude réalisée par Mahdi et al. (1999) a montré que les sols étudiés sont caractérisés par une salinité modérée à élevée, selon la topographie elle augmente de l'amont à l'aval suivant le drainage naturel des eaux d'irrigation. Les profils salins potentiels et les profils sodiques sont de types ascendants, expliquant le processus de salinisation secondaire par remontée capillaire sous l'effet d'évaporation intense (Servant, 1978) et confirment la relation existant entre  $\text{Na}^+$  et CE dans ces sols.

L'évolution des deux paramètres au cours de l'essai est décroissante, dénotant un enrichissement des sols en  $\text{Ca}^{2+}$  (Mahdi et al., 1999), donc l'amélioration de leur capacité d'échange cationique et la diminution de la salinité et du pourcentage du sodium échangeable dont l'effet négatif sur les propriétés physiques des sols a fait l'objet de plusieurs travaux.

L'application du test de corrélation aux deux paramètres (CE – Na<sup>+</sup>) montre que la CE augmente d'une façon proportionnelle à la concentration en Na<sup>+</sup>, la corrélation est significativement positive et confirme la relation de ces deux paramètres pédologiques dans les sols étudiés. Quant à l'évolution du pH, elle est fluctuante mais tend à l'alcalinisation, ceci peut être expliqué par l'hydrolyse des ions sodiques au cours de l'essai (non pris en considération dans notre étude) ou bien à l'effet de l'utilisation de l'eau distillée, laquelle après hydrolyse libère le OH<sup>-</sup> dans la solution du sol et en présence du Na<sup>+</sup> libéré par le Ca<sup>2+</sup>, la solution du sol devient alors alcaline.

La réhabilitation et la mise en valeur des sols salsodiques dans les zones hyperarides (cas d'In Salah) ne sont pas faciles à réaliser, sachant aussi que l'étude est très onéreuse.

## CONCLUSION GENERALE

L'étude de la réhabilitation des sols affectés par les sels sodiques est une opération très délicate est difficile à entreprendre, surtout dans les conditions climatiques extrêmes. Dans le cas des sols étudiés dans la région d'In Salah, l'analyse de l'évolution de la salinité des sols au sein des profils (Mahdi et al, 1999) et celle de la qualité de l'eau utilisée dans leur irrigation (Mahdi, 2006) nous permet de conclure que l'origine principale de cette salinité est la mauvaise gestion de l'irrigation dans les périmètres.

Dans notre étude expérimentale, où on a mis l'action du phosphogypse sur l'évolution de la salinité, du sodium, et du pH, les résultats montrent que cet amendement a permis :

- le désalinisation des trois sols d'une manière efficace à partir du premier lavage.
- le lessivage efficace du sodium, environ 90 % du sodium est lessivé au premier lavage.

L'effet de ce lavage sur le lessivage des sels sodiques présents dans les sols est positif.

A partir du septième lavage, les percolats des sols amendés conservent une certaine concentration en sodium, probablement, issue du déplacement par le calcium libéré suite à la dissolution simultanée du phosphogypse, à l'opposé de ceux issus des sols témoins, dont les concentrations sont sous forme de traces ou nulles. Ce mécanisme d'échange permet l'amélioration de la fertilité chimique des sols amendés et leur enrichissement en calcium et en phosphore et par conséquent, l'amélioration de leurs propriétés physico-chimiques.

A coté de l'évolution du sodium, celle de la conductivité électrique est, dès le premier lessivage a marqué un effet positif avec des chutes considérables, donc une désalinisation efficace des sols étudiés. La similitude du comportement des deux phénomènes laisse penser que la sodicité serait en relation avec la salinité. Ainsi, la relation CE-Na révèle une liaison importante entre les deux paramètres, ce qui confirme que la sodisation est induite par la salinisation. Ce résultat est aussi confirmé par Daoud, (1990) lors de ses travaux sur les sols du bas Chélif.

- Quant à l'évolution du pH des sols, nous notons que les solutions issues du premier lessivage ont des pH neutres, ceci confirme la neutralité des sels et leur type sodique NaCl et Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Par la suite, les valeurs du pH des percolats qui suivent, tendent vers l'alcalinisation.

À côté de l'évolution du Na, celle de la CE est dès le premier lessivage a marqué un effet positif avec des chutes considérable.

A partir des résultats obtenus en cours de l'essai, et de ceux obtenus sur les mêmes sols par les travaux antérieurs, nous pouvons dire que les types de sels présents dans les sols étudiés dans la région d'In Salah sont neutres à alcalins et que leur nature chimique est chloruro-sodique ou sulfato-sodique. Ces relations ont permis de conclure est de confirmer aussi, que l'origine de la salinisation dans les sols étudiés est l'irrigation, et que les sels des eaux utilisées sont saumâtres et de faciès chimiques chlorurés-sodiques.

L'utilisation du phosphogypse dans la réhabilitation des sols salsodiques est donc efficace vu sa composition en calcium qui est le meilleur échangeur du Na échangeable,

c'est l'amendement qu'on doit valoriser. Néanmoins, sa teneur en fluor (0,5%) et en d'autres impuretés doit être prise en considération, pour en minimiser l'impact sur l'environnement, les doses à apporter doivent être aussi calculées et appropriées aux taux de Na échangeables des sols à amender. Son apport aux sols de palmeraies doit être suivi de lessivage et drainage efficace pour éliminer l'excès des  $SO_4$  dont l'effet est toxique pour le palmier dattier (Jahel, 1989).

Les résultats des tests statistiques montrent des effets significatifs de l'amendement phosphogypsiques sous les deux modes d'apport (surface et mélange) sur l'évolution du Na et de la CE, Son effet sur le pH et insignifiant.

La réhabilitation de sols salsodiques étudiés et l'empêchement de l'extension de la salinité dans la région d'In Salah est possible en mettant tous les moyens humains, techniques et surtout tenir compte des conditions naturelles du milieu. Les travaux doivent être conjugués (amendements organo- minéraux, lessivage et drainage).

Cette approche semble une contribution intéressante dans l'étude de la réhabilitation des sols des milieux hyper arides, sujets à la salinisation secondaire dont l'origine est l'irrigation avec les eaux saumâtres.

Dans un travail futur, il serait souhaitable de multiplier les essais au laboratoire et au champ, tout en étudiant les paramètres intervenants, dans le but de pouvoir établir des modèles mathématiques, applicables sur le terrain et pouvant prévoir l'évolution de la salinité des sols irrigués dans la région d'étude, et même peuvent être extrapolé dans des régions sahariennes de conditions semblables.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adada B., 1994 - Contribution à l'étude de l'influence du phosphogypse sur les propriétés d'un sol salé du bas Cheliff. Mémoire d'Ingénieur. INA., El- Harrach, Alger, 97 p (adopter pour toutes les références).
- AFNOR. 1987 - Qualité des sols. Méthodes d'analyses. Ed. AFNOR. 33p.
- Agassi M., Shainberg I. et Morin J., 1981 - Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crustformation. Soil Sci. Soc. Am. J. 45 : 848-851.
- A.N.R.H. 1992 -Programme de recherche sur les forages au sud algérien. Rapport de recherche, 100p.
- Alcordero I.S. et Rechcigl J.E., 1995 - Phosphogypsum and other By-product Gypsums. Soil Amendments and Environmental Quality, J.E. Rechcigl, ed. CRC Lewis Publishers, New York, pp. 365-425.
- Al-Oudat M., Arslan A. et Kanakri S., 1998 - Physical and chemical properties, plant growth and radionuclide accumulation effects from mixing phosphogypsum with some soils. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 29, pp. 2515- 2525.
- Aubert G. et Boulaine J., 1967 - La pédologie. Ed. PUF. Paris
- Aubert G., 1975 - Les sols sodiques en Afrique du Nord. Ann. INA El-Harrach. Vol.VI , 1, pp. 181-196.
- Aubert G., 1983 - Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodiques. Cahier. ORSTOM. Série. Pédol., 20, 1, pp. 73-78
- Ayers R.S et Westcot D.W., 1976 - Water quality for agriculture – Food and Agricultural Organization (FAO) of the United Nation. FAO irrigation and drainage paper 29.
- Bahri A., 1993 - Evolution de la salinité dans un périmètre irrigué de la basse vallée de la Medjerda en Tunisie. Science du sol. 31, n° 3, pp. 125-140.
- Bedjou S., 1989 - Etude du retrait des sols salés : Influence du phosphogypse. Mémoire d'Ingénieur INA. El-Harrach. Alger. 68p.
- Beldjoudi Z. et Daoud Y., 2000 – Contribution à l'étude de l'effet de la salinité sur le développement végétatif de dix cultivars de blé dur. Congrès National El-Oued, pp. 452- 458.
- Bellal E., Guilhot B., Moutte J., Gruffat J.J., Perreira F. et Albert B., 2002- Valorisation des déchets de phosphogypse issus de l'industrie des fertilisants. Centre SPIN, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Benamar A., 1991 - Contribution à l'étude des conditions d'utilisation du phosphogypse dans la mise en valeur des sols salés des plaines du Bas Chélif. Thèse de Magister INA, El-Harrach. Alger. 124p.
- Bennadji H. et Bennadji A., 1998 - Création d'oasis dans le Sahara algérien : le projet de Gassi -Touil. Sécheresse, 9, 4, pp. 289-298.

- Bertrand R., 1986 – Sodisation et alcalinisation des sols à l'Office du Niger. Tunisie : ITAT, 25p.
- Bertrand R., N'diaye M. Keith B., 1994 - L'alcalinisation et la sodisation, un danger pour les périmètres irrigués sahéliens. Sécheresse, 5, pp. 161-173.
- Bialecka B., 2003 - Assessment of phosphogypsum use in underground hard coal mines in Poland. Mining Technology: IMM Transaction Section A, 112, 3, pp. 149-157.
- Bing-Cheng Yuan Zhenli Zi., Hua Liu, Meng Gao, Yan Yu Zhang., 2007 – Microbial biomass and Activity in salt affected soils under arid conditions. Applied Soil Ecology (35), pp. 319-328.
- Boulaine J., 1957- Etudes des sols des plaines de Chélif. Thèse d'Etat. Univ. D'Alger. 582p.
- Bradai A., 1991 – Projet sur l'alimentation en eau de la future briqueterie silico-calcaire d'In Salah. Organisme : UREG de Boumerdès. Rapport 47p.
- Brada M., 1993 – Contribution à l'étude de la valorisation du phosphogypse Algérien. Thèse de Mag. E.N.P. Alger. 95p.
- CES, 2000 - Soil Test Interpretations, guide A- 122. Cooperative Extension Service. College of Agriculture and Home Economics. 4p
- Cherbuy B., 1991- Les sols salés et leur réhabilitation. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie Rennes. 124p.
- Cheverry C., 1972- Exemple 'application des travaux de l'USSL (1963- 1968) sur l'alcalinisation des sols soumis à l'action d'eaux bicarbonatées. Cahier ORSTOM, Sér. Pédol. 10, 2, pp. 193-203.53
- Cheverry C. et Robert M., 1998 - La dégradation des sols irrigués et de 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, pp. 217- 226.
- Clur D. A., 1988 - FEDMIS sulphuric acid / Cement from phosphogypsum process. In Proc. Second Int. Symp. On phosphogypsum (Miami, FL, Dec. 1986); Florida Institute of phosphate research: Bartow, FL, Jan. 1988; 2: 39-49.
- Condon N., 2000 - Hydro geochemical analysis and modelling of the salinization process, case study of irrigated rice soil in Office of Niger (Mali).Thèse de doctorat. ENSAM.
- CPCS, 1967 - Classification des sols. Laboratoire de géologie pédologie de l'ENSA. Paris Grignon, 87p
- CRUESI, 1970 - Recherches et formation en matière d'irrigation et des eaux salées. Tech. Rpt., UNESCO UNDP (SF), TUNS, Paris, 243p.
- Daoud Y., 1981 - Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des sels dans un sol irrigué du périmètre du Haut Cheliff. Thèse de Magister, INA. El-Harrach. Alger. 123p.
- Daoud Y., 1990 - Evolution de la salinité d'un sol irrigué dans le périmètre du Haut Cheliff. Ann. INA. El-Harrach, vol. 14, n° 1 – 2 : 45 – 57.

- Daoud Y., 1993 - Contribution à l'étude des sols des plaines du Cheliff. Le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. Thèse de Doctorat d'Etat. INA. El-Harrach. Alger, 277p.
- Daoud Y. et Halitim A., 1994 - Irrigation et salinisation au Sahara Algérien. Sécheresse. 5, 3, pp. 151-160.
- Delgado A., Madri S., Kasem L., Andreu, and Del Campillo M.C., 2002 - Phosphorus fertilizer recovery from calcareous marsh soils amended with humic and fulvic acids. Plant Soil. 245, pp. 277-286.
- Dheghanisani H., Agassi M., Anyoji H. et Yamamoto T., 2006 - Improvement of saline water use under drip irrigation système. Agricultural Water Management 85: 233-242.
- Djemai R., 1993 - Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du lac Fetzara (Annaba). Thèse de Magistère INA. El-Harrach. Alger. 78p.
- Djili K., Daoud Y., et Touaf L., 2000 - La salinisation et la sodisation des sols en Algérie. Proceeding of the Congress. 1, 2, 3 et 4 octobre, El-Oued, pp. 215-223.
- Djili K., 2000 - Contribution à la connaissance des sols du Nord de l'Algérie. Création d'une banque de données informatisées et utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la valorisation des données pédologiques. Thèse d'Etat, INA. El-Harrach. Alger.
- Dogar M.A., 1978 - Méthodes d'analyse des sols salés alcalins. Cours, INA, Alger, 35p.
- Dommergues Y. et Mangenot F., 1970 - Ecologie microbienne du sol. Ed. Masson et Cie. Paris
- Dominguez R. M.C., Del Campillo F.P. et Delgado A., 2001 - Effect of soil properties and reclamation practices on phosphorus dynamics in reclaimed calcareous marsh soils from the Guadalquivir Valley, SW Spain. Arid Land Res. Manage. 15 : 203-221
- Douaoui A., Gaouar A. et Benbouali E., 2000 - Variabilité temporelle de la salinité dans le périmètre de Hmadena (Relizane). Proceeding of the Congress. 1, 2, 3 et 4 octobre, pp. 224 -233
- Duchaufour Ph., 1983 - Pédologie et classification. 2<sup>ème</sup> Edition. Masson, Paris, 466p.
- Duchaufour Ph., 1995 - Sol, végétation, environnement. 4<sup>ème</sup> Edition Masson. 324p.
- Dubost D., 1992 - Aridité, agriculture et développement : le cas des oasis algériennes. Sécheresse, 2, 3, pp. 85-96
- Durand J.H., 1958 - Recherches sur les sels apportés au sol par les pluies. Travaux des sections pédologie et agrologie. Bull. n°4, Et. Gén. n°5 ; Services des Etudes Scientifiques. Bir Mourrad Rais. Algérie
- Durand J.H., 1983 - Les sols irrigables. SES ; Alger, 190p.
- Eilers et al., 1995 - Salinisation du sol. Santé des sols. Chapitre 8.
- El-mrabet R., Abril J.M., Perianez R., Manjon G., Garcia-Tenorio R., Delgado A. et Andreu L., 2003 - Phosphogypsum Amendment Effect on Radionuclide Content in Drainage Water and Marsh Soils from Southwestern Spain. *Journal of Environmental Quality* 32, pp. 1262-1268

- FIPR, 1996 - Influence of phosphogypsum on forage yield and quality on the Environment in Typical Florida Spodosol Soils. Volume I. Forage Yield and Quality of Bahiagrass and Annual Ryegrass Pastures Fertilized with phosphogypsum as a source of Sulfur and Calcium. 1, pp. 85-127
- Gallali T., 1980 - Transport sels-matière organique en zones arides Méditerranéennes. Thèse d'Etat. INPL. Université de Nancy. 202p.
- Guarnieri A., Fabri A. et Molari G., 2005 - Influence of sodicity and salinity on the mechanical properties of two Italian Soils: Biosynthèse Engineering. 91, 2, pp. 239-243
- Gupta et Abros, 1990 - Salt Affected Soils, their reclamation and management for crop production. C.S.S.R.I.Karmal Pall. 232p.
- Hachicha M. 1998 - Les sols salés et leur mise en valeur en Tunisie.
- Halilat T., 1998 - Etude expérimentale de sable additionné d'argile. Comportement physique et organisation en conditions saline et sodiques. Thèse d'état. INA. Paris- Grignon. 229p.
- Halitim A., 1973 - Etude expérimentale de l'amélioration des sols sodiques d'Algérie vue de leur mise en culture. Thèse doct. 3<sup>ème</sup> cycle, Unni. Rennes, 176p.
- Halitim A. et al., 1986 - Projet de programme de recherche sur l'utilisation des rejets de l'industrie phosphatée (phosphogypse et phosphates naturels) en Algérie. 137p.
- Halitim A., 1988 - Sols des régions arides d'Algérie. OPU, 384p.
- Hamoudi N. et Ouar S., 1990 - Etude de l'influence du phosphogypse sur la disponibilité des éléments NPK apportés par les engrais appliqués sur le Ray-grass d'Italie. Projet de fin d'études, FSSSA. Tizi-Ouzou.
- Hans, 2003 - Dryland salinity: A key environmental issue in southern Australia. Plant and Soil. 257, pp. 5-7
- Herrero J., 1992 - Dégradation de sols et salinité associée à l'irrigation. Corrections apportées en Aragon. Concilier d'Agriculture et d'environnement, pp. 127-138.
- Huntel A. H., 1989 - Use of Phosphogypsum Fortified with Other Selected Essential Elements as a Soil Amendment on Low Cation Exchange Soils. FIPR. 1, pp. 34 - 81
- Hussein A., 1999 - Effet du phosphogypse sur les propriétés physiques des sols salés. (Cas des sols de la plaine d'El-Hamadana). Séminaire n°2, Institut d'Agronomie et d'Hydraulique en zones arides du 8 à 10 novembre, Ouargla.
- Ismailov M. et Mamedov A., 2000 - Analyse des processus de lessivage des différents sels affectant les sols selon le type et le taux de salinité. 29<sup>ème</sup> symposium. 16<sup>ème</sup> Congrès international de la pédologie. Montpellier. France.
- IPIRID, FAO, CISEAU, 2006 - Conférence électronique sur la salinisation : Extension de la salinisation et stratégie prévention et réhabilitation, 6 Février - 6 Mars.
- Kahloum M.A. et Azam M., 2003 - Effect of saline drainage effluent on soil health and crop yield. Agricultural Water Management, 62, pp. 127-138.
- Kaouratchev I. et coll., 1983 - Manuel pratique de pédologie. Ed. Mir, Traduction Française. 273p.

- Keren R. et Hainberg I., 1981 - Effect of dissolution rate on the efficiency of gypsum in improving infiltration on sodic soil. *Soil Science Society America. J.* 45, pp. 102- 107.
- Legros J. P., Falipou P. et Dunand-Divol F., 1992 - Vérification de la qualité de l'information dans les bases de données de sol. *Science du sol*, 30, 2, pp. 117-131.
- Mahdi Y., Nadjemi B. et Toumi M., 1999 – Contribution à la caractérisation du sol d'une palmeraie d'In Salah. Séminaire National sur la salinisation des terres agricoles en Algérie.
- Mahdi Y., Nadjemi B. et Toumi M., 2000 - Etude préliminaire du choix d'un sol agricole dans la région de Tidikelt (In Salah) pour un amendement chimique (phosphogypse et gypse). Congrès Scientifique Arabe El-Oued. Algérie. pp. 459 - 463
- Mahdi Y., 2006 - Etude de la salinisation des sols agricoles d'une région hyperaride (In Salah). Thèse de Magistère. ENS de Kouba. Alger. 110p.
- Mamouni S., 1989 - Projet céramique carreaux In Salah. Gisement Igostène. Rapport géologique final- Etude détaillée. Organisme : UREG de Boumerdes. Rapport. 61p.
- Marlet S., 2004 -Evolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres sahariennes. Actes du séminaire « Modernisation de l'agriculture irriguée » à Rabat. p11.
- Masmoudi A., 2000 - Salinité des sols et des eaux d'irrigation au Sahara : possibilités d'utilisation rationnelles. Séminaire national sur la salinisation de terres en Algérie. p17.
- Mediouni K., 1997 - Organisation et Potentialités de la diversité biologique algérienne. Min. Envi. , Tome II, Projet Alg. / 97/G31 / FEM / PNUD, 158p.
- Mettemicht G.I. et Zinck J.A., 2003 - Remote Sensing of Soil Salinity: Potentials and Constraints. *Remote Sensing of Environment* 85, pp. 1-20
- Mhiri A., Tarhouni J., Hachicha M. et Lebdi F., 1998 - Approche systémique des risques de salinisation par endoreisation anthropique. *Etude et Gestion des Sols*. Vol 5, n° 4, pp. 257-268.
- Meni Ben-Hury 2001- Soil conditioner Effects on run off and potato yield under sprinkler irrigation. *Agronomy Journal* 93, pp. 1163 - 1196
- Mermoud A., 2005 - Cours de chimie du sol. Ecole Polytechnique de Lausanne. 6p.
- Miller, R.W et Donahue R.L, 1995 -Soils in Our Environment, Seventh Edition. Prudence Hall, Englewood, Cliffs, NJ. 323p.
- Morris C.E., Wheelock T.D., 1985 – Processing waste gypsum in a fluidized bed reactor. *Aiche symposium*. N° 255, vol 83. Chicago, Illinois.
- Moughli L., non daté - Chimie et Minéralogie environnementales du sol. Chapitre salinité et sodicité du sol. Institut Agro vétérinaire. Hassan II. Rabat.Maroc.
- Mouhouche M., 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 de drainage. Acte du premier symposium international sur la filière blé. Enjeux et Stratégie (OAIC).
- Murtaza G., Ghafoor A. et Qadir M., 2006 - Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in cotton-wheat rotation. *Agricultural Water Management* 81, pp. 98-114

- 
- Mzezewa J., Gotosa J. et Nyamwanza B., 2003 - Characterisation of a sodic soil Catena for reclamation and improvement strategies. *Geoderma*. 113, pp. 161-175
- Nadler A., Levy G.J., Keren R. et Eisenberg H., 1996 - Sodic Calcareous Soil Reclamation as Affected by Water Chemical Composition and Flow Rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, pp. 252-257
- Nahai, 1975 - Principe de conservation des sols. 143p.
- NavarroA., BanonS., Olmos E. et Sanchez-BlancoM.J., 2006 - Effects of sodium chloride on water potential components hydraulic conductivity, gas exchange and leaf ultrastructure of *Arbutus unedo* plants. *Plant Science*
- Oularbi O. et Charnai M., 1991- Etude expérimentale de l'évolution des paramètres physiques d'un sol sale amendé en phosphogypse. Thèse d'Ing. I.N.E.S d'Agronomie. Université Mouloud mammeri. Tizi-Ouzou. 60p.
- Oster J.D., 1982 - Gypsum dissolution usage in irrigated agriculture. *Review fertilizer. Res.* 3, pp. 78-89
- Paranychianakis N.V. et Chartzoulakis K.S., 2005 - Irrigation of Mediterranean crops with saline water: from physiology to management practices. *Agriculture. Ecosystems and Environment* 106, pp. 171-187
- Peters J. et Kelling K., 2002 - Should Calcium be applied to Wisconsin Soils? *Focus on Forage.* 4, 3, pp. 1-3
- Qadir M., Qureshi R.A. et Ahmad N., 1996 - Reclamation of a saline-sodic soil by gypsum and *leptochloa fusca*. *Géoderma* 74, pp. 207-217
- Qadir M. et Oster J.D., 2004 - Crop and irrigation management strategies for salin-sodic soils and waters aimed at environmentally sustainable agriculture. *Sci. Total Environ.* 5. 323 (1-3), pp. 1-19
- Redly M. et Cheverry C., 2000 - Durabilité des systèmes irrigués vis à vis de la salinisation Réhabilitation des sols affectés par les sels. 29<sup>ème</sup> symposium. 16<sup>ème</sup> Congrès international de la pédologie. Montpellier. France
- Richard L. A. et *al.*, 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agric. Handb.*, 60, vol. 1, USDA, Washington, 160p.
- Rietz D. N. et Haynes R. J., 2003 - Effects of irrigation induced salinity and sodicity on soil Microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry* 35, pp. 845-854
- Rhoades J.D., 1972 – Quality of water for irrigation. *Soil Sci.* 113, 4, pp. 277-284
- Robert M., 1996 - Le sol : interface dans 'environnement, ressources pour le développement. Ed. Masson. 244p.
- Robert M. et Cheverry C., 1996 - Les ressources mondiales en eaux et en sols : une limitation pour l'avenir. *Cahier Agriculture* 5, pp. 243. 248
- 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, pp. 277-288
-

- Summer M.E., 1996 - Sodic Soil : New perspectives. Ed. Australian Sodic Soils. Distribution : Properties and management. CSIRO. Melbourne, pp. 1-34
- Servant J., 1975 - Contribution à l'étude de terrains halomorphes. L'exemple de sols salés du sud et du sud-ouest de la France. Thèse Doct. es Sciences naturelles. Univ. Languedoc, 194p.
- Servant J., 1978 - La salinité dans le sol et les eaux : caractéristiques et problèmes d'irrigation- drainage Bull. B.R.G.M., section III (2) : pp. 123 -142
- Soltner D., 1987 - Les bases de la production végétale. Ed. Sol.
- Szabolcs I., 1989 - Amelioration of soils in salts affected areas: Soil Technology. 2: pp. 331-344
- Tang Z., Lei T., Yu J., Shainberg I., Mamedov A.I., Ben-Hur M. et Levy G.I., 2006 - Runoff and Interrill Erosion in Sodic Soils treated with Dry PAM and Phosphogypsum. Soil Science Society America J. 70, pp. 679-690
- Tedeschi et Dell'aquila, 2005 - Effects of irrigation with sature and different concentrations on soil physical and chemical characteristics. Agricultural Water Management. V. 77, 1-3, pp. 308-322.
- Tejada M. et Gonzalez J.L., 2005 - Beet vinasse applied to wheat under dry land conditions affects soil properties and yield. European Journal of Agronomy 23, pp. 336-347
- Tejada M., Garcia C., Gonsalez J.L., Hernandez M.T., 2006 – Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation influence of the physical, chemical and biological properties on soil. Soil biology and biochemistry, 38, pp. 1413 - 1421
- Toma M., Sumner M.E., Weeks G. et Saigusa M., 1999 - Long-term Effects of Gypsum on Crop Yield and Subsoil Chemical Proprieties. Soil Science Society America J. 63, pp. 891- 895
- Touaf L., 2001- Evaluation du niveau de salinité des sols du Nord d'Algérie. Thèse de Mag. INA. El-Harrach. 71p.
- U.S. Salinity Laborotory Staff, 1954 - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.
- U. S. Dept. Agric. Handbook 60, Washington, VIII, 160p.
- Valles V., 1988 - Modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation. Mémoire, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Institut de géologie.
- Valles V., Valles A.M. et Dosso M., 1983 – Irrigation des sols salés et doses de lessivage. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., vol. XX, n° 2, pp. 119- 127.
- Vella S.J. et Camilleri S., 2003 - Irrigated agriculture and soil salinisation in the Maltese Islands. J. Environ. Sci. Health. Aug. 38. (8), pp. 1569-1585
- Warrence, N. J., Bauder, J.W. et Pearson, K.E., 2003 - Water Quality and irrigation management: Basics of Salinity and Sodicity effects on soil Physical Proprieties. Department of land Ressources and Environmental Science

- Word Resources, 1987 - World Resources Institute and the International Institute for Environment and Development, Basics Books, New York
- Word reference base for soil resources, 2006 - A framework for international classification, correlation and communication. 128p.
- Xiying Hao., Larney F.J., Chang C., Travis G R., Nichol C. K., and Bremer E. 2005 - The effect of phosphogypsum on greenhouse gas emissions during cattle manure composting, *Journal of Environmental Quality*, 34 (3), pp. 774-781.
- Ziza F.Z., 1992 - Dynamique de l'eau et des sels sous irrigation par pivot en milieu saharien. Essai d'optimisation de la conduite des irrigations. Mémoire d'ingénieur. INA. El Harrach. 98p.
- Ziza F.Z., 2006 - Evolution de la salinité des sols irrigués dans une région saharienne. Cas de la région d'Adrar. Thèse de Magister. INA. 105pp.
- Zouggari H., 1987 - Valorisation du phosphogypse en sols salés. Séminaire national sur la fertilisation, INRA, Chélif, Alger.
- Zouggari H., Djallem M. et Aghiri A., 1987 - Rapport relatif à la possibilité d'utilisation du phosphogypse en Agriculture. 34p.
- Zvomuya F., Larney F.J., Nichol C.K., Olson Andrew F., Miller Jim J. and Demaere Paul R. 2005: Chemical and physical changes Following CO-Composition of Beef Cattle Feedlot Manure with phosphogypsum. *Journal of Environmental Quality* 34 (3), pp. 2318-2327.

# Annexes

## Annexe A

Tableau 1 : Composition chimique des eaux d'irrigation utilisées dans les sols étudiés

Eau d'irrigation	CE (dS/m)	pH eau	K <sup>+</sup> (méq/l)	Na <sup>+</sup> (méq/l)	Mg <sup>2+</sup> (méq/l)	Ca <sup>2+</sup> (méq/l)
Sebkha Ezzabara (P12)	3,64	7,58	1,35	56	/	2,63
Ancienne Palmeraie à orientation Nord (P10 <sub>A</sub> )	3,5	7,49	1,35	58	/	2,6
Ancienne Palmeraie à orientation Sud (P10 <sub>B</sub> )	3,95	7,42	1,45	60	/	2,6

Mahdi, (2006)

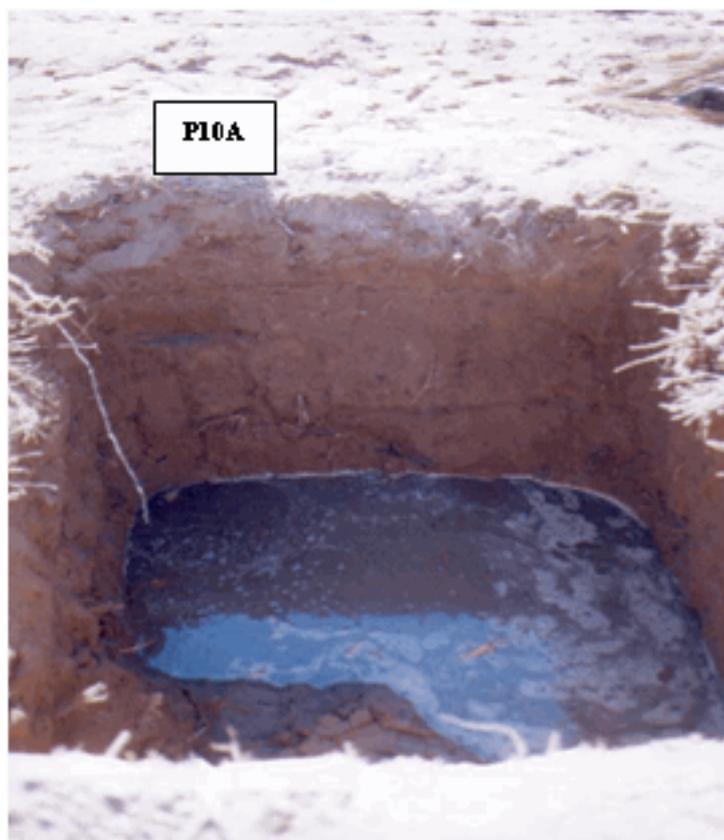
## ANNEXE. B

Tableau 1 : Ressources en eau et en sols à In Salah

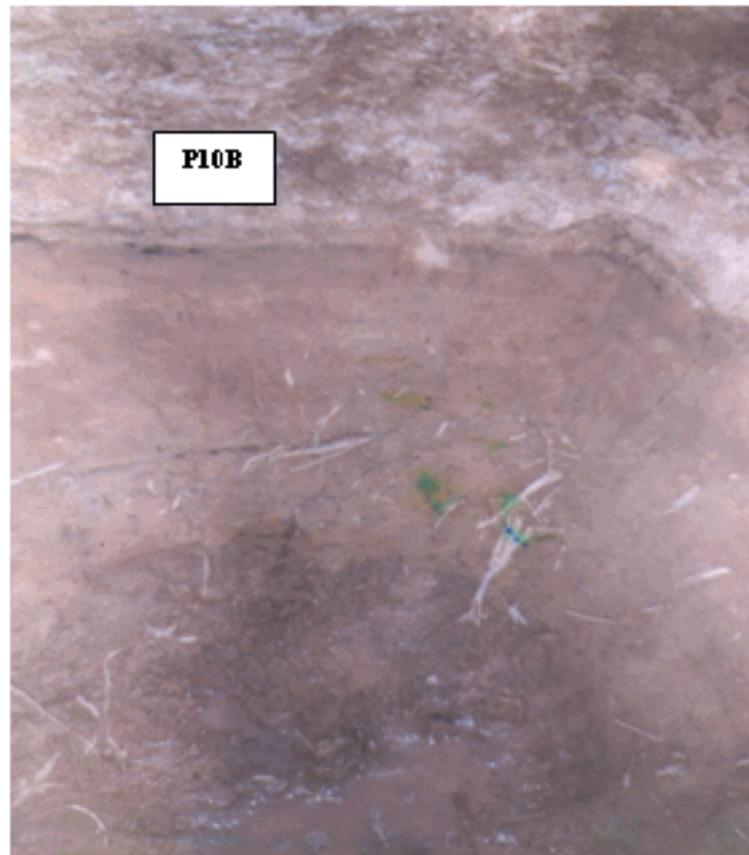
Superficies cartographiées (ha)	Superficies irriguées	Potentialités			prélèvements			Remarques
		C.I	C.T	Total	C.T	C.I	Total	
Néant		5860	0	5860	1000	0	1000	Absence d'étude pédologique

Ministère de l'équipement, (1991)

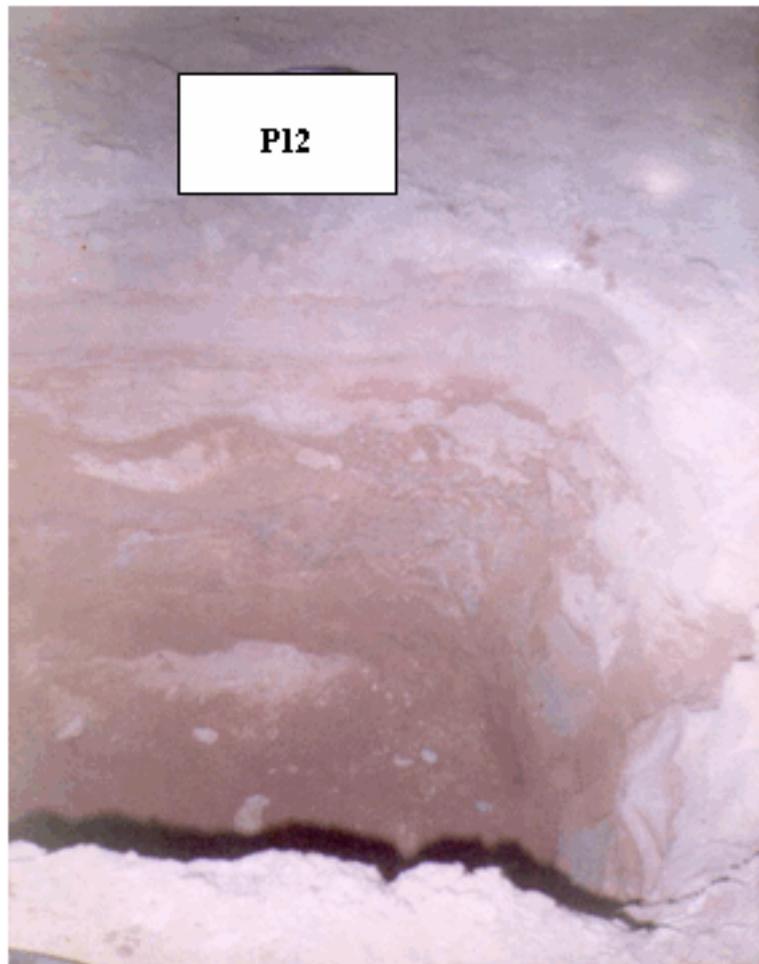
## Annexe C



*Photo 2 : Etat du profil P10A*



*Photo 3 : Etat du profil P10B*



*Photo 4 : Etat du profil P12*



*Photo 4 : Efflorescences salines au niveau bas des palmeraies (Sebkha Ezzabara)*



*Photo 5 : Effet des sels sur les palmeraies*

## Annexe D

Tableau 1 : Regroupement des résultats de la granulométrie des trois sols étudiés

Horizons	(A+ L) %	(SF + SG) %
P10AH1	9 + 8,84	78,20 + 3,96
P10AH2	9,75 + 12,48	73,88 + 3,89
P10AH3	11 + 9,97	62,34 + 16,69
P10AH4	8 + 12,62	76,04 + 3,34
P10AH5	6 + 16,25	72,93 + 4,72
P10BH1	7,5 + 12,07	78,21 + 2,12
P10BH2	11,75 + 11,52	74,67 + 2,06
P10BH3	5,50 + 5,07	86,81 + 2,62
P10BH4	5 + 11,79	78,89 + 5,32
P12H1	13,5 + 8,74	68,42 + 9,34
P12H2	6,25 + 10,50	63,25 + 20
P12H3	6,25 + 8,01	65,20 + 20,54

Mahdi et al. (1999)

Tableau 2 : Résultats d'analyses physico-chimiques du sol P10A

Caractéristiques des sols	Hzs	P10AH <sub>1</sub>	P10AH <sub>2</sub>	P10AH <sub>3</sub>	P10AH <sub>4</sub>	P10AH <sub>5</sub>
	Pfd (cm)	0 – 11	11 - 41	41 - 53	53 - 62	> 62
Matière organique	C (%) N (%) MO(%) N	0,56 0,36	0,92 1,52	0,39 0,15	0,32 0,31	0,35 0,36
<b>Solution du sol</b>	<b>pH</b>	<b>8,19</b>	<b>7,84</b>	<b>8,05</b>	<b>7,92</b>	<b>7,45</b>
<b>Conductivité Electrique</b>	<b>CE (dS/m)</b>	<b>6,81</b>	<b>3,27</b>	<b>2,39</b>	<b>2,35</b>	<b>1,60</b>
Réserves Minérales (%)	CaCO <sub>3</sub> total CaCO <sub>3</sub> actif	3,77 -	2,52 -	2,22 -	1,48 -	0,21 -
Humidité résiduelle	H (%)	0,36	0,76	0,98	1,91	3,05
Complexe adsorbant (cmol (+)/kg)	Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup> Mg <sup>2+</sup> + Ca <sup>++</sup> C E C	0,85 0,11	0,50 0,10	0,02 0,02	0,20 0,20	0,30 0,05
Les anions (cmol (+)/kg)	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> Cl <sup>-</sup>	12,39 10,80	7,21 4,70	7,72 2,90	3,84 2,30	17,78 2,80
<b>Sodium échangeable (%)</b>	<b>ESP</b>	<b>47,23</b>	<b>13,51</b>	<b>9,21</b>	<b>5,12</b>	<b>9,30</b>
da (g/cm <sup>3</sup> ) dr (g/cm <sup>3</sup> ) Pt (%)		1,64 2,64 31,06				

Mahdi, (2006)

Tableau 3 : Résultats d'analyses physico-chimiques du sol P10B

**Contribution à l'étude de la réhabilitation au laboratoire des sols sal sodiques des palmeraies de la région d'In Salah par l'utilisation du phosphogypse**

Caractéristiques des échantillons	Hzs	P10BH <sub>1</sub>	PB10 H <sub>2</sub>	P10BH <sub>3</sub>	P10B H <sub>4</sub>
	Pfd (cm)	0 – 30	30 - 50	50 - 68	> 68
Matières organiques	C (%) N (%) MO (%) C/N	0,67 0,038	0,16 0,036	0,11 0,015	0,18 0,031
<b>Solution du sol</b>	<b>pH</b>	<b>8,18</b>	<b>8,08</b>	<b>8,09</b>	<b>8,02</b>
<b>Conductivité électrique</b>	<b>CE (dS/m)</b>	<b>9,47</b>	<b>3,71</b>	<b>3,28</b>	<b>3,12</b>
Réserves minérales (%)	CaCO <sub>3</sub> total Ca CO <sub>3</sub> actif	9,46 6,75	11,82 6,50	11,67 3,93	10,28 9,06
Humidité résiduelle	H (%)	0,65	1,90	3,41	3,71
Complexe adsorbant (cmol (+)/kg)	Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup> Mg <sup>+</sup> + Ca <sup>++</sup> CEC Σ cations	2,20 0,08	0,35 0,073	0,25 0,023	0,20 0,02
<b>Sodium échangeable (%) échangeable</b>	<b>E.S P</b>	<b>57,89</b>	<b>18,18</b>	<b>12,50</b>	<b>15,38</b>
Les anions (cmol (+)/kg)	Cl <sup>-</sup> So <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	7,90 18,03	4,40 16,21	2,50 9,96	2,60 19,98
da (g/cm <sup>3</sup> ) dr (g/cm <sup>3</sup> ) Pt (%)	da dr Pt	1,34 2,69 50,48-		----	----

Mahdi, (2006)

**Tableau 4 : Résultats d'analyses physico-chimiques du sol P12**

Caractéristique des échantillons	Hzs	P12 H <sub>1</sub>	P12H <sub>2</sub>	P12H <sub>3</sub>
	Pfd (cm)	0 – 23	23 - 58	>58
Matière Organique	C (%) N (%) MO (%) C/N	0,46 0,07	0,80 0,05	0,22 0,02
<b>Solution du Sol</b>	<b>pH</b>	<b>8,43</b>	<b>8,01</b>	<b>8,05</b>
<b>Conductivité électrique</b>	<b>CE (dS/cm)</b>	<b>20,00</b>	<b>5,97</b>	<b>5,25</b>
Réserve minérale (%)	Caco <sub>3</sub> total Caco <sub>3</sub> actif	1,61 -	1,26 -	1,31 -
Humidité Résiduelle	H ( % )	,75	1,36	2,56
Complexe adsorbant (cmol (+)/kg)	Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup> Mg <sup>+</sup> + Ca <sup>+</sup> + CEC	4,04 0,08	0,37 0,05	0,18 0,02
<b>Sodium échangeable (%)</b>	<b>ESP</b>	<b>60,12</b>	<b>33,56</b>	<b>29,16</b>
Les anions (cmol (+)/kg)	Cl <sup>-</sup> So <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	33,24 14,56	14,80 13,51	17,00 4,70
da (g/cm <sup>3</sup> ) dr (g/cm <sup>3</sup> ) Pt (%)	da dr Pt	1,61 2,75 41,45-		---

Mahdi, (2006)

## Annexe E

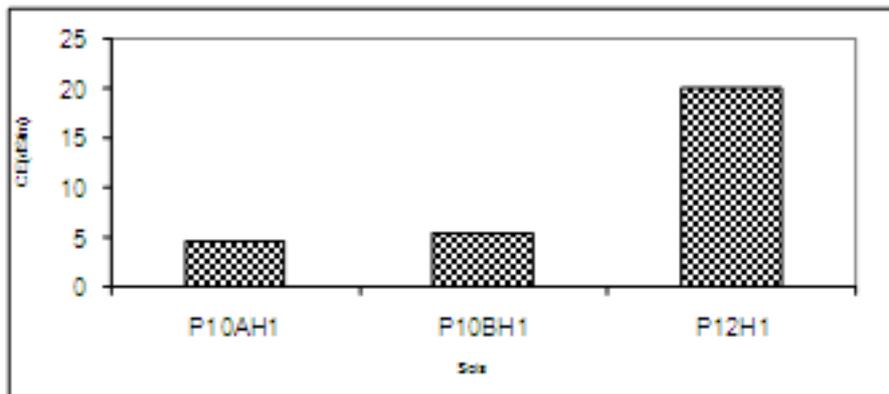


Figure 1 : Niveaux de salinité dans les horizons de surface

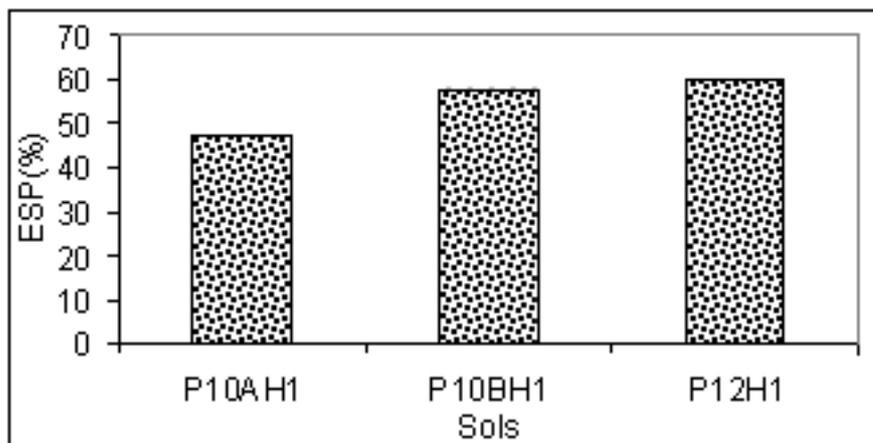


Figure 2 : Niveaux de l'ESP dans les horizons de surface

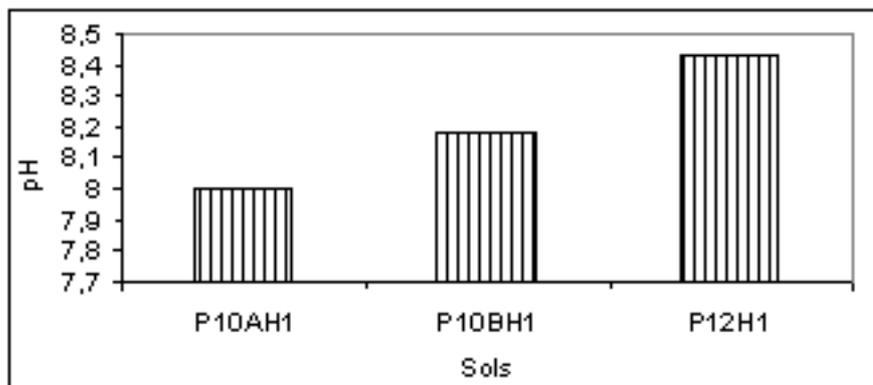


Figure 3 : Le pH des solutions des sols des horizons de surface

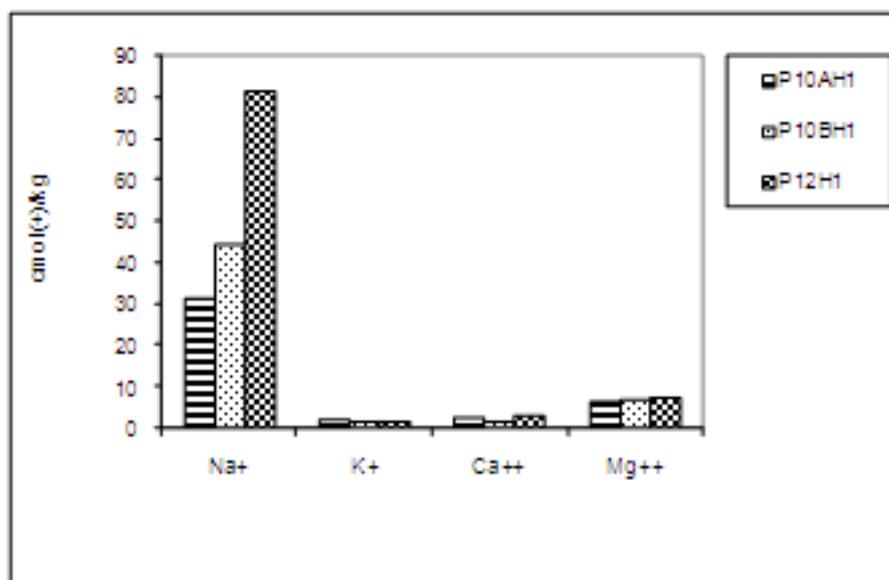


Figure 4 : Composition cationique des solutions des sols des horizons de surface

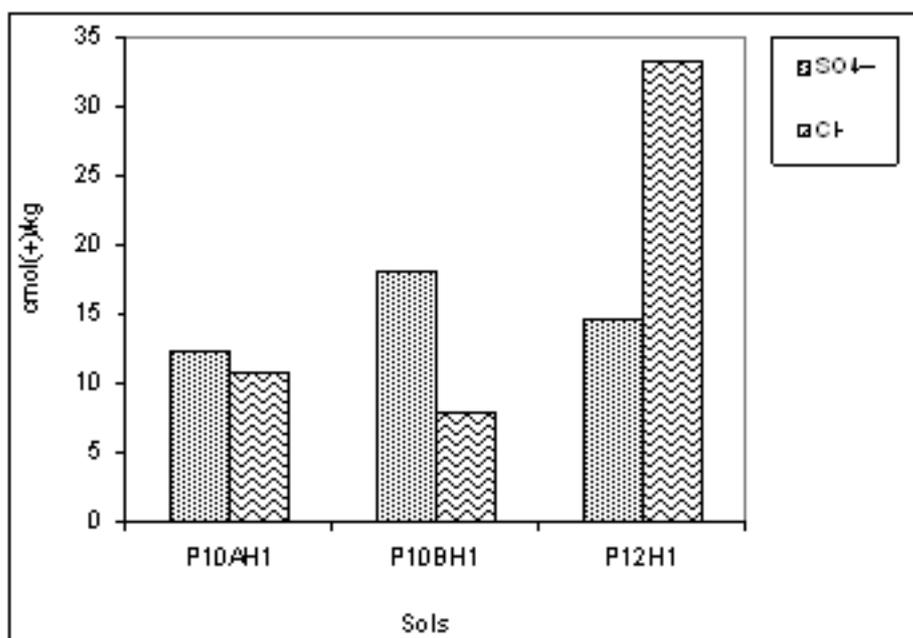


Figure 5 : Composition anionique des solutions des sols des horizons de surface

## Annexe F

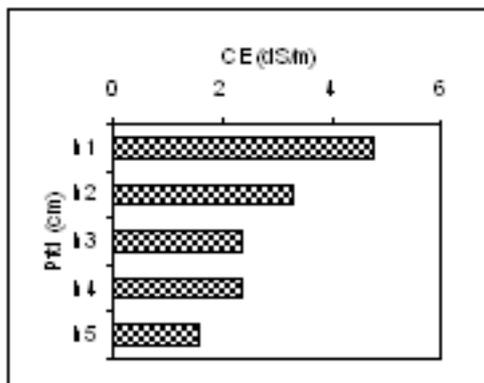


Figure 1 : Profil salin du sol P10A

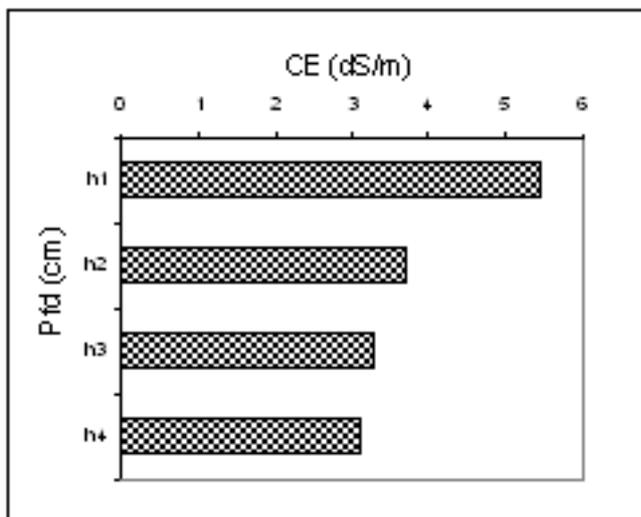


Figure 2: Profil salin du sol P10B

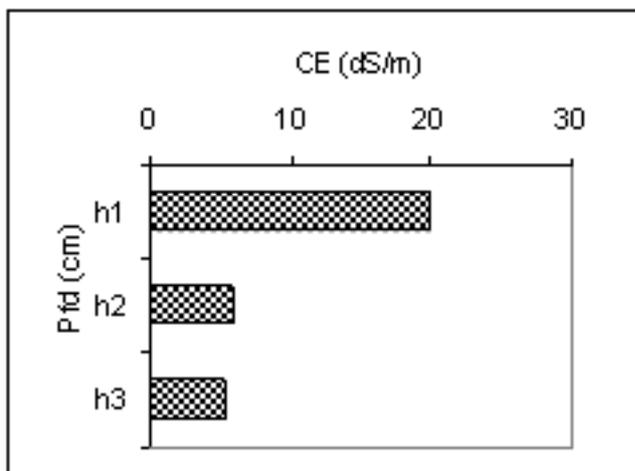


Figure 3: Profil salin du sol P12

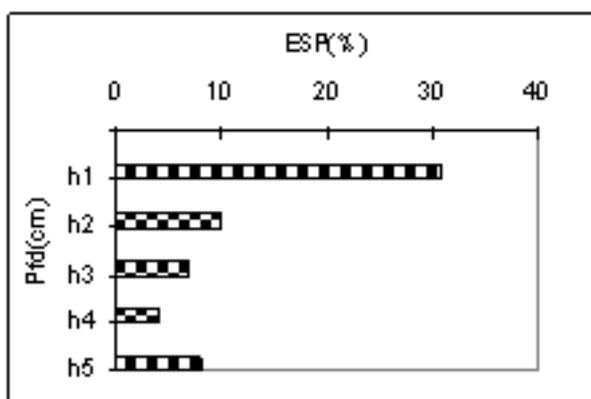


Figure 1: Profil sodique du sol P10A

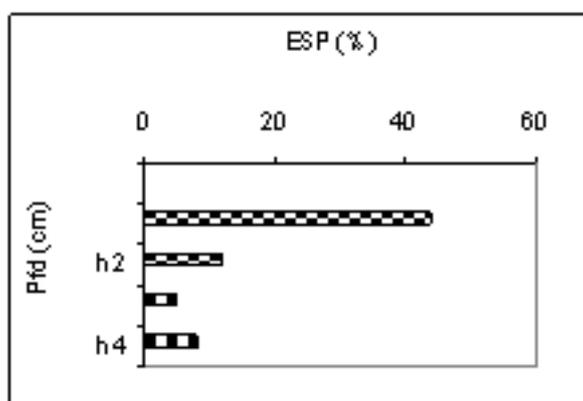


Figure 2: Profil sodique du sol P10B

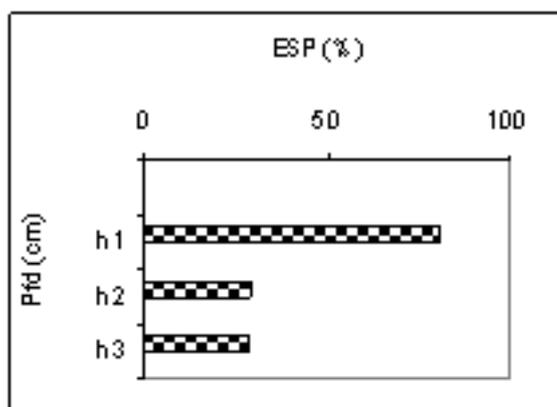


Figure 3: Profil sodique du sol P12

## Annexe H

Tableau 1 : Evolution de la CE dans le sol P10AH1 au cours de l'essai

Percolations	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P10AH1T	19,54	3,19	3,06	2,42	1,54	0,72	0,3	0,2	0,14
P10AH1T	22,39	3,07	2,76	2,37	1,38	0,47	0,24	0,3	0,28
P10AH1T	22,33	3,28	2,9	2,49	1,47	0,25	0,17	0,23	0,21
P10AH1S	22,84	2,85	2,81	2,53	2,51	2,49	2,3	1,88	1,73
P10AH1S	23,58	3,08	2,82	2,66	2,54	2,45	2,27	2,04	1,75
P10AH1S	23,82	2,97	2,75	2,54	2,54	2,42	2,26	2	1,74
P10AH1M	25,04	2,85	2,79	2,55	2,27	2,14	1,87	1,72	1,69
P10AH1M	25,6	3,04	2,85	2,59	2,56	2,46	2,05	1,49	1,47
P10AH1M	23,71	3,13	2,85	2,62	2,5	2,36	2,25	2,11	1,57

Tableau 2 : Evolution de la CE dans le sol P10BH1 au cours de l'essai

Percolations	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P10BH1T	26,16	2,86	2,61	1,57	0,95	0,35	0,27	0,18	0,16
P10B H1T	25,27	2,81	2,7	2,1	0,55	0,29	0,26	0,23	0,19
P10B H1T	27,06	3,01	2,78	1,65	1,4	0,25	0,21	0,20	0,18
P10B H1S	29,28	3,14	2,78	2,63	2,39	2,27	2,05	1,58	1,4
P10B H1S	30,92	3,11	2,85	2,61	2,56	2,46	2,23	1,75	1,42
P10B H1S	28,22	3,06	3,02	2,59	2,58	2,46	2,11	1,86	1,63
P10B H1M	30,6	2,77	2,67	2,55	2,44	2,37	2,09	1,02	0,87
P10B H1M	30,71	2,32	3,09	2,55	2,51	2,24	1,58	1,06	0,88
P10B H1M	32,62	2,89	2,84	2,32	2,51	2,27	1,77	1,04	0,81

Tableau 3 : Evolution de la CE dans le sol P12H1 au cours de l'essai

Percolations	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P12H1T	59,63	2,78	2,69	2,49	2,32	2,06	1,73	1,1	0,9
P12H1T	61,2	2,84	2,72	2,50	2,19	1,95	1,67	1,24	0,91
P12H1T	62,97	2,72	2,65	2,52	2,51	1,75	1,68	1,1	0,98
P12H1S	59,94	3,99	2,74	2,58	2,58	2,57	2,52	2,51	2,5
P12H1S	61,09	2,89	2,86	2,67	2,58	2,57	2,54	2,53	2,49
P12H1S	59,98	2,95	2,72	2,59	2,57	2,56	2,55	2,53	2,51
P12H1M	68,8	2,95	2,78	2,66	2,58	2,55	2,49	2,43	2,24
P12H1M	67,4	2,91	2,84	2,63	2,55	2,53	2,44	2,41	2,11
P12H1M	68,64	2,85	2,77	2,61	2,58	2,55	2,49	2,43	2,35

## Annexe I

Tableau 1 : Evolution du sodium dans le sol P10AH1 au cours de l'essai

Percolations	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P10AH1T	7,89	0,3	0,25	0,16	0,09	0,05	0,02	0	0
P10AH1T	9,98	0,25	0,21	0,15	0,07	0,03	0,02	0,02	0
P10AH1T	8,96	0,32	0,22	0,18	0,08	0,02	0	0	0
P10AH1S	9,08	0,21	0,21	0,2	0,19	0,19	0,14	0,11	0,10
P10AH1S	9,98	0,28	0,21	0,20	0,20	0,17	0,14	0,11	0,10
P10AH1S	9,7	0,22	0,2	0,2	0,2	0,16	0,14	0,10	0,10
P10AH1M	10,24	0,21	0,21	0,2	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09
P10AH1M	10,46	0,23	0,22	0,2	0,2	0,17	0,11	0,08	0,08
P10AH1M	9,68	0,29	0,22	0,2	0,18	0,15	0,13	0,12	0,09

**Tableau 2 : Evolution du sodium dans le sol P10BH1 au cours de l'essai**

Percolations	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P10BH1T	11,48	0,22	0,2	0,09	0,06	0,02	0,02	0	0
P10BH1T	10,32	0,22	0,21	0,12	0,03	0,02	0	0	0
P10BH1T	11,78	0,23	0,21	0,09	0,05	0,02	0	0	0
P10BH1S	12,98	0,27	0,21	0,20	0,15	0,14	0,10	0,09	0,05
P10BH1S	13,20	0,26	0,22	0,20	0,20	0,18	0,12	0,10	0,05
P10BH1S	12,38	0,25	0,23	0,20	0,20	0,18	0,11	0,10	0,09
P10BH1M	13,08	0,21	0,21	0,20	0,18	0,16	0,11	0,07	0,05
P10BH1M	13,14	0,23	0,20	0,20	0,15	0,12	0,09	0,07	0,05
P10BH1M	13,21	0,22	0,22	0,20	0,19	0,14	0,10	0,07	0,03

**Tableau 3 : Evolution du sodium dans le sol P12H1 au cours de l'essai**

Percolations	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P12H1T	15,47	0,21	0,19	0,19	0,14	0,12	0,10	0,07	0
P12H1T	15,78	0,22	0,20	0,19	0,15	0,11	0,08	0,08	0
P12H1T	15,92	0,20	0,20	0,18	0,18	0,09	0,08	0,06	0
P12H1S	15,51	0,48	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,18	0,18
P12H1S	15,68	0,22	0,22	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,18
P12H1S	15,53	0,23	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,18
P12H1M	17,81	0,23	0,21	0,20	0,20	0,20	0,18	0,16	0,12
P12H1M	17,03	0,22	0,21	0,20	0,20	0,20	0,17	0,16	0,10
P12H1M	17,77	0,22	0,21	0,20	0,20	0,20	0,18	0,16	0,14

## Annexe J

**Tableau 1 : Evolution du pH dans le sol P10AH1 au cours de l'essai**

Percolations	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P10AH1T	6,62	7,13	7,78	7,66	7,54	7,52	7,98	8,1	7,96
P10AH1T	6,69	7,38	7,61	7,86	7,52	7,96	7,61	7,6	8
P10AH1T	6,69	7,18	7,47	7,41	7,36	7,77	7,74	7,38	7,88
P10AH1S	6,60	7,1	7,48	7,67	7,49	7,61	7,58	7,51	8,21
P10AH1S	6,62	7,14	7,46	7,61	7,45	7,65	7,51	7,54	7,88
P10AH1S	6,58	7,15	7,49	7,69	7,52	7,72	7,66	7,57	8,17
P10AH1M	6,60	7,20	7,48	7,8	7,59	7,62	7,81	8,18	8,35
P10AH1M	6,54	7,12	7,54	7,92	7,71	7,77	7,85	8,21	8,38
P10AH1M	6,49	7,34	7,51	7,88	7,73	7,82	7,89	8,22	8,34

Tableau 2 : Evolution du pH dans le sol P10BH1 au cours de l'essai

Percolations	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P10BH1T	6,31	7,41	7,67	7,74	7,64	7,22	8,22	8,12	7,94
P10BH1T	6,43	7,45	7,71	7,81	7,85	7,18	8,23	8,05	8,1
P10BH1T	6,34	7,44	7,66	7,85	7,98	7,37	7,25	8,15	8,1
P10BH1S	6,66	7,31	7,99	7,65	7,53	7,79	7,66	7,74	8,1
P10BH1S	6,65	7,38	7,82	7,77	7,52	7,8	7,7	7,82	8,22
P10BH1S	6,67	7,45	7,94	7,8	7,72	7,92	7,74	7,77	8,16
P10BH1M	6,49	7,22	7,64	7,62	7,84	7,94	8,12	8,38	8,44
P10BH1M	6,53	7,34	7,71	7,73	7,94	7,96	8,16	8,26	8,36
P10BH1M	6,58	7,42	7,76	7,77	7,88	7,92	7,98	8,12	8,28

Tableau 3 : Evolution du pH dans le sol P12H1 au cours de l'essai

Percolations	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
P12H1T	6,34	7,41	7,72	7,86	7,74	7,37	7,97	8,15	8,12
P12H1T	6,45	7,61	7,92	7,98	7,82	7,43	8,1	8,25	8,1
P12H1T	6,43	7,61	7,96	7,84	7,73	7,48	8,21	8,08	8,15
P12H1S	6,35	7,36	7,74	7,69	7,51	7,82	7,85	7,79	7,23
P12H1S	6,55	7,57	7,82	7,77	7,65	7,96	7,99	7,92	7,38
P12H1S	6,57	7,59	7,86	7,78	7,64	7,94	7,99	7,8	7,36
P12H1M	6,37	7,32	7,77	7,67	7,47	7,71	7,61	7,73	7,91
P12H1M	6,31	7,35	7,7	7,6	7,42	7,69	7,57	7,69	7,86
P12H1M	6,3	7,36	7,69	7,6	7,38	7,66	7,45	7,59	7,87

## Annexe K

Tableau 1 : Comparaison de l'effet de phosphogypse sur l'évolution de la CE dans trois types de sols : Analyse de la variance à deux facteurs.

**Contribution à l'étude de la réhabilitation au laboratoire des sols salsodiques des palmeraies de la région d'In Salah par l'utilisation du phosphogypse**

Source de variance	Somme des carrés	DDL	Moyenne des carrés	F	P	Erreur critique de F
Sol	124,88	2	62,444	4118,19	1,115	3,554
Amendement	8,36	2	4,181	275,78	3,144	3,554
Interaction	0,88	4	0,222	14,66	1,707	2,927
A l'intérieur du groupe	0,27	18	0,015			
Total	134,41	26				

**Tableau 2 : Comparaison de l'effet de phosphogypse sur l'évolution du sodium dans trois types de sols : Analyse de la variance à deux facteurs.**

Source de variance	Somme des carrés	DDL	Moyenne des carrés	F	P	Erreur critique de F
Sol	2,717	2	1,35	399,62	1,21	3,554
Amendement	0,258	2	0,12	37,95	3,49	3,554
Interaction	0,044	4	0,01	3,30	0,033	2,927
A l'intérieur du groupe	0,061	18	0,003			
Total		26				

**Tableau 3 : Comparaison de l'effet de phosphogypse sur l'évolution du pH dans trois types de sols : Analyse de la variance à deux facteurs.**

Source de variance	Somme des carrés	DDL	Moyenne des carrés	F	P	Erreur critique de F
Sol	0,061	2	0,0308	10,70	0,00086	3,554
Amendement	0,023	2	0,0118	4,09	0,0343	3,554
Interaction	0,150	4	0,0376	13,04	3,691	2,927
A l'intérieur du groupe	0,051	18	0,0028			
Total	0,287	26				