

ملخص

كعملية الرئيسية لتدهور التربة المرورية في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. قد سلوك sodisation يتم تحديد الملوحة و إذا تم حل مسألة التجبير تقنيا واقتصاديا. sodisation الري والتنمية المائية الزراعية في تدابير كبيرة تقليل عملية التملح و ويهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير نوعين من التعديلات على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه والتربة المالحة من غليزان). (Hmadena محطة تجريبية شركة

لا تؤثر على الخواص المائية والفيزيائية كمؤشرات جد مختلفة مع DS وأظهرت النتائج أن جرعات التعديل بالجبس و عمق التربة التي شملتها الدراسة. التغييرات في هذه المؤشرات مختلفة جداً بين مستويات عمق التربة الأفقي والمتوسط والأدنى.

، sol gypseux، مؤشرات نوعية التربة : salsodique تعديل الجبس التربة ، sodisation الكلمات الرئيسية: التملح، salsodique, indicateurs de qualité des sols.

Summary

Salinization and sodisation are identified as a major process of degradation of irrigated soils in arid and semi-arid areas. The conduct of irrigation and hydro-agricultural development may, in large measures, minimize salinization process and sodisation if the question of liming is resolved technically and economically.

The work aims to study the effect of two types of amendments on the physicochemical and hydric characteristics in a salty soil of the experimental station of INRAA El Hmadena (Relizane).

The results show that the amendment doses gypsum and DS advocated affect very slightly different physicochemical and water indicators of the studied soils. Changes in these indicators are very exposed area between the horizons, intermediate and lower soil profile.

Key words: salinization, sodisation, gypsum amendment, salsodic soil, soil quality indicators.

Résumé

La salinisation et la sodisation sont identifiées comme un processus majeur de la dégradation des sols irrigués dans les régions arides et semi arides. La conduite de l'irrigation et l'aménagement hydro-agricole peuvent dans de larges mesures minimiser le processus de salinisation et sodisation, si la question de l'amendement calcique est bien résolue sur les plans technique et économique.

Le travail a pour but d'étudier l'effet de deux types d'amendement sur les caractéristiques physico-chimiques et hydriques d'un sol salé de la station expérimentale l'El Hmadena (Relizane).

Les résultats obtenus montrent que les doses d'amendement en gypse et en DS préconisées affectent très faiblement les différents indicateurs physico-chimiques et hydriques des sols étudiés. Les variations de ces indicateurs sont très apparentes entre les horizons superficie, intermédiaire et inférieure du profil du sol.

Mots clés : salinisation, sodisation, amendement gypseux, sol salsodique, indicateurs de qualité des sols.

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah, notre Dieu tout puissant de me donner la patience, le courage et le savoir pour venir à bout de ce modeste travail.

En premier lieu je remercie Monsieur Benkhelifa Mohammed, Professeur au Département d'Agronomie de l'université de Mostaganem, pour son encadrement, son aide et sa bonne volonté.

Je remercie aussi Monsieur Larid Mohamed, Professeur au Département d'Agronomie de l'université de Mostaganem, pour avoir bien voulu présider le jury de soutenance de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Nemiche Saïd, Maître de conférences A au Département d'Agronomie de l'université de Mostaganem, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je profite de cette occasion pour remercier l'ensemble des enseignants du département d'Agronomie qui ont contribué à ma formation.

Mes vifs remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel de l'INRAA d'El Hmadena (Relizane) et particulièrement Monsieur Gorine Mohamed, Directeur de la station ainsi que Kheire El Dinne et Lariche Azziz pour leurs conseils et leurs encouragements qui m'ont beaucoup aidée à la réalisation de ce travail.

Je voudrais remercier, encore une fois, tout particulièrement mes parents, mes sœurs et surtout ma gémeau, mes frères qui ont toujours été prêts à m'aider et à me soutenir surtout pendant les moments les plus difficiles.

Enfin, je remercie toute personne qui a contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes parents, qui sont pour moi l'exemple du sacrifice de compréhension, d'encouragement et qui m'ont donné tous les moyens d'aller aussi loin.

Spécialement à ma chère gémeau Saida pour tout son aide.

A mes chères sœurs : Fatima, Sabrina, Rima

A mes chers frères : Mohamed, Hamid, Djamel

A mes nièces et neveux : Rihab, Aya, Zahr Eldinne, khaoula, Iyad

A toute la famille : SAADOUNE et BELHADEF

A mes amies : Saada, Nabila, Assia, Malika, Lamia, Radjaâ, Djemaia, Yamna, Imen, Naima.....

A tout mes amis de promo agronomie surtout spécialité GDE

A tous ceux que j'aime

Et à tous ceux qui m'ont apporté un soutien moral ou matériel.

Fatma Zahra

Sommaire

ملخص	1
Summary	2
Résumé	3
Remerciements	4
Dédicace	5
Sommaire	6
Liste des figures	9
Liste des Photos	10
Liste des tableaux	10
Introduction	11
PREMIERE PARTIE – SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	13
CHAPITRE I - GENERALITES SUR LES SOLS SALES	14
I.1. Les sols salés dans le monde et en Algérie	15
I.1.1. Sols salés dans le monde	15
I.1.2. En Algérie	16
I.1.3. Causes de la salinité des sols	17
I.2. Formes de salinisation des sols	18
I.2.1. Salinisation primaire	18
I.2.2. Salinisation secondaire	18
I.3. Classification des sols salés	19
I.3.1. Sols salés	19
I.3.2. Sols sodiques et à alcali	20
I.4. Effets de la salinité et de la sodicité sur le sol et sur la plante	21
I.4.1. Effets sur les sols	22
I.4.1.1. Effets sur les propriétés physiques	23
I.4.1.2. Effets sur les propriétés chimiques	23
I.4.2. Effets sur la plante	23

I.5. Mise en valeur des sols salés	24
I.5.1. Etat d'évacuation des eaux de drainage	24
I.5.2. Qualité de l'eau d'irrigation et doses de lessivage	26
I.5.3. Amélioration des sols salés par amendements chimiques	26
I.5.3.1. Amendements calciques	27
I.5.3.2. Techniques d'application des amendements calciques	27
I.5.4. Choix des cultures	28
CHAPITRE II - PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE	29
II.1. Présentation du site d'étude	30
II.2. Conditions climatiques	30
II.2.1. Précipitations et températures	30
II.2.2. Humidité	31
II.2.3. Vent	32
II.3. Ressources en sols	32
II.3.1 Sols peu évolués	32
II.3.2 Vertisols et sols calcimagnésiques	32
II.3.3. Sols salsodiques	33
II.4. Occupation des sols	33
II.5. Ressources en eau	34
II.5.1. Ressources superficielles	34
II.5.2. Ressources souterraines	35
DEUXIEME PARTIE - ETUDE EXPERIMENTALE	36
CHAPITRE III - MATERIELS ET METHODES	37
III.1. Objectif de l'étude	38
III.2. Matériels	39
III.2.1. Parcelles expérimentales	39
III.3. Méthodes	40
III.3.1. Prélèvement et extraction de la solution de pâte saturée	40
III.3.2. Méthodes d'analyse	41
III.3.2.1. Granulométrie	41
III.3.2.2. Humidité	42
III.3.2.3. Densité réelle, densité apparent et porosité totale	42

III.3.2.4. Matière organique-----	42
III.3.2.5. Calcaire total-----	42
III.3.2.6. Calcaire actif-----	42
III.3.2.7. pH eau du sol -----	42
III.3.2.8. Conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée -----	42
III.3.2.9. Capacité d'échange cationique (CEC)-----	42
III.3.2.10. Bilan ionique-----	43
III.3.2.11. Réserve utile RU et potentiels matriciels pF-----	43
CHAPITRE IV - RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	44
IV.1. Caractéristiques physiques et hydriques des sols-----	45
IV.1.1. Humidité du sol-----	45
IV.1.2. Densité apparente-----	46
IV.1.3. Densité réelle-----	46
IV.1.4. Porosité-----	47
IV.1.5. Réserve utile-----	47
IV.1.6. Matière organique -----	48
IV.1.7. Calcaire totale-----	48
IV.1.8. Calcaire actif -----	48
IV.2. Caractéristiques chimiques des sols -----	49
IV.2.1. pH-----	49
IV.2.2. Conductivité électrique -----	49
IV.2.3. Capacité d'échange cationique -----	50
IV.2.4. Bilans ioniques-----	50
IV.2.4.1. Bilan cationique-----	50
IV.2.4.2. Bilan anionique-----	51
IV.2.5. SAR-----	52
Conclusion-----	53
Références bibliographiques-----	54
ANNEXES.....	60

Liste des figures

FIGURE 1 : CARTE DES ZONES ARIDES DANS LE MONDE (WRI, 2002)	16
FIGURE 2 - REPARTITION DES PRECIPITATIONS DANS LE NORD DE L'ALGERIE (FAO, 2005)	17
FIGURE 3 - PROCESSUS DES DIFFERENTES VOIES DE LA SALINISATION ET LEURS IMPACT SUR LA DEGRADATION DES SOLS ET SUR LES CULTURES. (TABET, 1999)	22
FIGURE 5 : LOCALISATION DE SITE D'ETUDE (GOOGLE EARTH, 2016).....	30
FIGURE 9 - SCHEMA DU MODE OPERATOIRE POUR LES ANALYSES DES ECHANTILLONS DE SOL	38
FIGURE 10 - LOCALISATION DU TERRAIN D'ETUDE	39
FIGURE 11 – SCHEMA DE PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS DE SOL SUR LES 12 PARCELLES EXPERIMENTALES.....	40
FIGURE 12 - HUMIDITE EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS	45
FIGURE 13 -DENSITE APPARENT EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS	46
FIGURE 14 -DENSITE REELLE EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS	46
FIGURE 15 -POROSITE EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS.....	47
FIGURE 16 -RESERVE UTILE EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS.....	47
FIGURE 17 -MATIERE ORGANIQUE EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS.....	48
FIGURE 18 -CALCAIRE TOTAL EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS	48
FIGURE 19 -CALCAIRE ACTIF EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS	49
FIGURE 20 -POTENTIEL HYDRIQUE EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS.....	49
FIGURE 21 -CONDUCTIVITE ELECTRIQUE EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS	50
FIGURE 22 -CAPACITE D'ECHANGE CATIONIQUE EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS	50
FIGURE. 23 – EVOLUTION DE LA CONCENTRATION CATIONIQUE EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS	51
FIGURE 24 -EVOLUTION DE LA CONCENTRATION ANIONIQUE EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS	52
FIGURE 25 -SODIUM ABSORPTION RATIO EN FONCTION DES TRAITEMENTS ET DES HORIZONS.....	52

Liste des Photos

PHOTO 1 – PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS ET SECHAGE A L’AIR LIBRE.....	40
PHOTO 2 – TAMISAGE DES ECHANTILLONS A 2 MM ET PREPARATION DE L’EXTRAIT DE PATE SATUREE	41
PHOTO 3 - EXTRACTION DE L’EXTRAIT DE PATE SATUREE PAR CENTRIFUGATION	41
PHOTO 4 – VUE SUR LA PARCELLE D’EXPERIMENTATION	45

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : SUPERFICIE AFFECTEE PAR LA SALINITE DANS LE MONDE (FAO, 2008)	16
TABLEAU 2 : SUPERFICIES DES ZONES ARIDES D’ALGERIE EN 103 KM ² (LE HOUEROU, 1995)	17
TABLEAU 3 : MOYENNES MENSUELLES DES PRECIPITATIONS ET TEMPERATURES DE LA STATION D’EL HMADENA EN 2015 ET 2016	31
TABLEAU 4 : HUMIDITE DE LA STATION DE H’MADNA (2015-2016).	31
TABLEAU 5 : LE VENT DE LA STATION DE D’EL HMADENA (2015-2016).....	32

Introduction

Les sols salés contiennent des sels plus solubles que le gypse susceptibles de passer dans la solution du sol en quantité assez importante pour affecter la croissance des plantes. En conséquence, les sols calcaires ne sont pas des sols salés, même si le carbonate de calcium est un sel comme un autre au plan chimique (Jean Paul Legros, 2007).

On parlera en général de sol salé lorsque la concentration en sels des solutions dépasse 0,5 g.l⁻¹, cette concentration est le plus souvent mesurée par la conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée qui correspond à 4 dS.m⁻¹ (Robert, 1996).

La salinisation est un processus majeur de la dégradation des terres irriguées en zones arides et semi-arides. En moyenne, le monde perd 10 hectares de terres cultivables chaque minute, dont 3 hectares du fait de la salinisation. En effet, 10 à 15% des surfaces irriguées sont soumises au phénomène de salinisation à des degrés divers (Mermoud, 2006). Elles sont estimées à environ 400 millions d'hectares (Bot et *al.*, 2000). D'après la FAO in Legros (2007), les sols salés représentent à eux seuls près de 2% des terres cultivables, ce qui correspond approximativement à 300 millions d'hectares. A l'échelle régionale, la salinité affecte au Moyen-Orient près de 92 millions d'hectares, soit 5% environ de la totalité des terres cultivées et près de 40 millions d'hectares en Afrique, ce qui représente près de 2 % de la surface totale cultivable (Mashali et *al.*, 2005). Sur les six millions et demi d'hectares cartographiés en Algérie, un million est concerné par sols salés (Chabane et Benreda, 1997). Selon le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, 4 % de la S.A.U est affectée par la salinisation secondaire (M.A.P, 1998). Dès lors, ce phénomène ne cesse de se développer rapidement.

Vue l'importance de ce phénomène, de nombreux travaux ont étudié la salinité et la sodicité des sols d'Algérie (Durand, 1954 ; Halitim, 1973 ; Daoud, 1983 ; Daoud et *al.*, 1993 ; Djili, 2000 ; Touaf, 2002). Il ressort de ces travaux que la salinité en Algérie est d'origine primaire et que la salinisation secondaire contribue à son extension spatio-temporelle. De même, les différents travaux concordent sur le fait qu'il s'agit de sols salés par la voie saline neutre et que la salinité des sols s'accompagne généralement d'une sodisation du complexe adsorbant.

L'essentiel des recherches sur les sols salés a été axée principalement sur leur fonctionnement salin et les processus physico-chimiques qui les régissent. Ainsi, malgré l'importance des sols salés en Algérie et leur impact sur la production agricole, peu de travaux se sont intéressés à leur typologie et à leur caractérisation morphologique et analytique fine. Dans ce cas, leur étude est confrontée à des difficultés de classement et de délimitation des unités pédologiques. Ceci n'est pas sans effet sur le diagnostic de leur contamination et par conséquent sur la gestion de leur mise en valeur agricole (Hadj Miloud, 2010).

L'objectif du présent travail est d'étudier les effets de plusieurs types d'aménagement des sols salés de la plaine d'El Hmadena sur leurs caractéristiques physico-chimiques et hydriques. Pour cela, le document est présenté sous forme de quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur la présentation des sols salés et de leur situation dans le monde et en Algérie.

Le deuxième chapitre porte essentiellement sur la présentation de la zone d'étude.

Dans le troisième chapitre, nous avons abordé la méthodologie de travail choisie et le matériel utilisé en cours d'expérimentation.

Enfin dans le dernier chapitre, nous avons présenté et discuté les résultats obtenus achevés par une conclusion.

**Première partie –
Synthèse
bibliographique**

Chapitre I - Généralités sur les sols salés

Les sols salés ou sols halomorphes appelés actuellement sols salsodiques représentent un pourcentage important de la surface totale des sols dans le monde (Cherbuy, 1991). Les sols salins sont naturellement présents sous tous les climats et sur tous les continents. Ils sont là où l'évaporation excède les précipitations de façon permanente ou temporaire. Ils sont étroitement liés à une source de salinité d'ordre géologique (évaporites), hydrogéologique (eaux souterraines), hydrologique (eaux marines) ou anthropique (gestion hydroagricole) (Girard et *al.*, 2005).

La salinisation est l'accumulation de sels solubles dans la solution du sol. Ces sels sont formés à partir de cations tels que le potassium, le magnésium, le calcium et le sodium. Le phénomène d'accumulation du sodium est aussi appelée sodisation. Les sels se dissolvent et se déplacent avec l'eau à travers le profil du sol et se concentrent sous les actions combinées de l'évaporation et l'absence partielle ou entière de drainage (S.O.C.O., 2009).

Les zones arides et semi-arides couvrent une grande partie des pays de la frange méridionale du pourtour méditerranéen. Dans ces régions, la disponibilité des eaux, leur salinité et celle des sols sont parmi les principaux facteurs limitant la productivité végétale (Zid et Grignon, 1991). L'introduction des espèces tolérantes au stress salin est l'une des techniques utilisées pour faire face à ce problème (Tellah, 2005). Selon Calvet (2003), un sol est dit salé quand la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée est supérieure ou égale à 4 dS.m^{-1} . Cependant la salinité d'un sol s'apprécie plus par le comportement des plantes de sorte que cette limite peut être très différente selon la sensibilité des espèces végétales.

I.1. Les sols salés dans le monde et en Algérie

I.1.1. Sols salés dans le monde

A l'échelle mondiale, les sols salés occupent des surfaces étendues et constituent une grande ampleur pour l'agriculture. Leurs distribution géographique se superpose presque entièrement à celle des zones arides et semi arides et des zones côtières (Durand, 1983 ; FAO, 2005). La surface affectée par la salinité dans le monde est évalué à 954,8 millions d'hectares (Tableau 1), soit 23 % des terres cultivés (FAO, 2008). Wri (2002), propose un classement des zones arides basé sur les valeurs du rapport ratio précipitation annuelle/évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (Figure 1), le monde est de ce fait, divisé en :

- Zone hyper aride couvrant environs 11 millions de Kilomètres carrés, soit 8% des terres totales et elle correspond principalement au désert du Sahara.
- Zones arides, semi-arides et subhumides sèches qui couvrent près de 54 kilomètres carrés principalement concentrées en Asie et Afrique.

Tableau 1 : Superficie affectée par la salinité dans le monde (FAO, 2008)

Région	Superficie (millions d'hectares)
Afrique	80,5
Europe	50,8
Amérique du Nord	15,7
Amérique du Sud	129,2
Australie	357,3
Mexique et Amérique centre	2
Asie du Sud Est	20
Asie du centre et du Nord	211,7
Asie du sud	87,6
Total	954,8

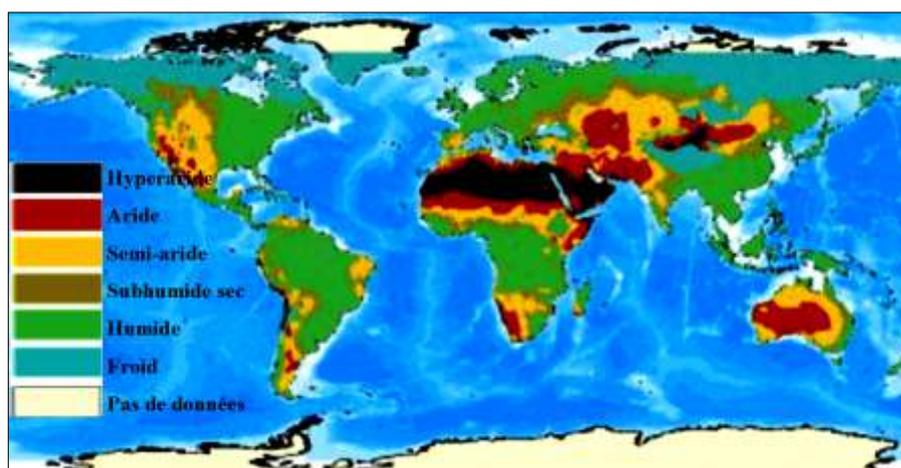


Figure 1 : Carte des zones arides dans le monde (wri, 2002)

I.1.2. En Algérie

En Algérie, les sols agricoles sont dans leur majorité affectés par la salinité ou susceptibles de l'être (Durand, 1983). Les sols salins sont répandus dans les basses plaines de l'Oranie, dans la vallée de la Mina près de Relizane, sur les hautes plaines Sud de Sétif et de Constantine et aux bords de certains chotts comme le chott Melghir. Ils ont aussi une grande extension dans les régions sahariennes au sud de Biskra jusqu'à Touggourt, Ouargla et au-delà (Durand, 1983).

D'après Halitim (1988), dans les régions arides, les sols représentent environ 25 % de la surface cartographiée. Soit 3,2 millions d'hectares (Hamdi, 1999). Les sols situés au Sud sont nettement plus sodiques que ceux du Nord (Daoud, 1999).

La classification bioclimatique d'Emberger et sauvage a été largement adoptée en régions méditerranéennes. Cinq étages du bioclimat méditerranéen ont été définis pour l'Algérie : Saharien, aride, semi-aride, subhumide et humide (Figure 2).

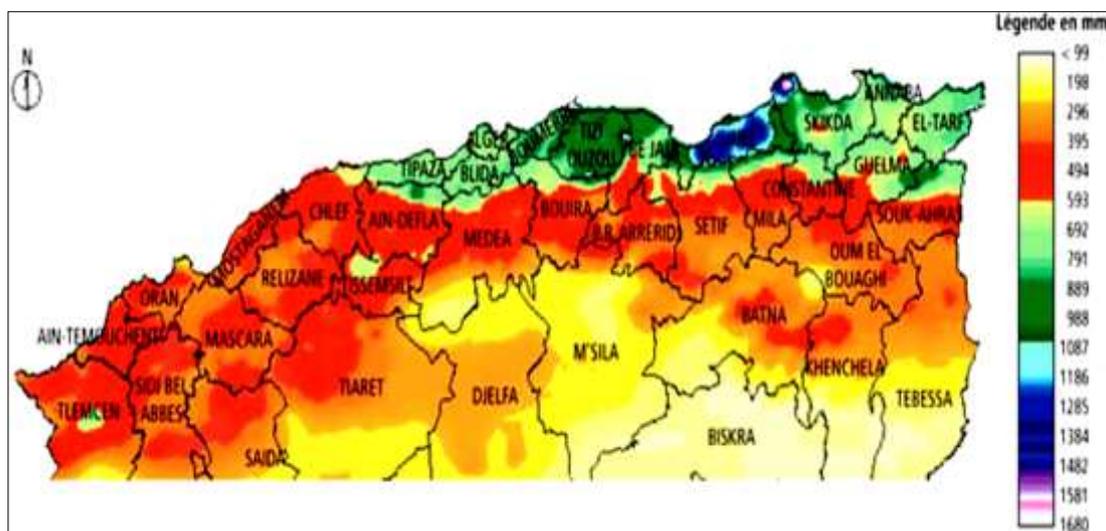


Figure 2 - Répartition des précipitations dans le nord de l'Algérie (FAO, 2005)

On distingue selon Nedjraoui (2003) :

- Le semi- aride : 300- 600 mm.
- L'aride : 300- 100 mm.
- Le Saharien < 100 mm qui occupe 89,5% la superficie totale de l'Algérie. La superficie des zones arides en Algérie selon Le Houerou (1995) est de 216000 Km², et 386000 Km² de zones hyper arides supérieur (Tableau 2).

Tableau 2 : Superficies des zones arides d'Algérie en 103 Km² (Le Houerou, 1995)

Pluviosité moyenne	Superficie
Semi- aride à humide P> 400	181
Aride supérieur 400> P> 300	59
Aride moyenne 300> P> 200	70
Aride inférieur 200> P> 100	87
Zone aride total	216
Hyper aride supérieur	386

I.1.3. Causes de la salinité des sols

Les rares précipitations, l'évaporation élevée, l'irrigation avec de l'eau saline et les pratiques culturales sont parmi les facteurs principaux qui contribuent à la salinité croissante. La salinisation

secondaire, en particulier, aggrave le problème où une fois que les superficies agricoles productives deviennent impropres à la culture due à la qualité inférieure de l'eau d'irrigation (Ashraf et Foolad, 2007 in Hammia, 2012).

La salinité excessive affecte la rhizosphère et limite la répartition des plantes dans leur habitat naturel. Le fort éclaircissement et les rares pluies dans les régions semi-arides et arides accentuent la salinisation des périmètres irrigués et les rendent impropres aux cultures (Denden et *al.*, 2005 in Hammia, 2012).

L'eau saline occupe 71% de la surface de la terre. Environ la moitié des systèmes d'irrigation existant du monde sont sous l'influence de la salinisation. De tels sols défavorables, de faible fertilité sont généralement peu convenables pour la production agricole, entraînant la réduction des rendements. En raison du besoin accru de distribution de la production alimentaire et de l'augmentation des sols affectés par la salinité, (Hammia, 2012). La recherche sur des réponses des plantes à la salinité a rapidement augmenté en quelques dernières décennies (Madhava Rao et *al.*, 2006).

I.2. Formes de salinisation des sols

I.2.1. Salinisation primaire

Près de 80 % des terres salinisées ont une origine naturelle « édaphique », on qualifie alors la salinisation de « primaire ». Dans ce cas, celle-ci est due à la formation des sels pendant l'altération des roches ou à des apports naturels externes :

- Dans les régions côtières, intrusion de l'eau salée ou submersion des terres basses. - Inondation périodique par de l'eau de mauvaise qualité.

- Remontée d'une nappe phréatique salée près de la zone racinaire (Mermoud, 2006). Ce type de sol est très fréquent dans les zones arides dû à une évapotranspiration potentielle qui dépasse largement la quantité d'eau arrivée au sol (Antipolis, 2003).

D'origine géologique, elle résulte de la combinaison des facteurs climatiques, hydrogéologiques, morphologiques, et morphopédologiques. Sa localisation se limite à l'ouest du pays d'après la cartographie du 1/500.000 élaborée par Durand en 1953 et couvrant toute la partie septentrionale de l'Algérie.

I.2.2. Salinisation secondaire

Près de 20% des terres salinisées ont une origine humaine ou anthropique ; sont qualifiées de « secondaires » dû principalement à l'irrigation des terres avec une eau de mauvaise qualité (eau saline), un lessivage insuffisant et un drainage défaillant (Anonyme, 2006 et Le goupil, 1974), ou

bien présence d'une nappe phréatique salées proche de la surface (Duchaufour, 1983 ; Cherbuy, 1991 ; Girard et al, 2005).

Dans ce cas, le sol avait déjà formé et avait acquis une personnalité pédologique. Par exemple, si une partie d'une plaine littorale est envahie par la mer, bien que le contact soit direct, la salinisation reste secondaire. Il en est de même d'un sol alluvial qui se sale sous l'effet de la remontée d'une nappe chlorurée.

Cette distinction tend à faire préciser à quel moment de son histoire, un sol a acquis le caractère halomorphie SANDA (Abbani et Abde-Lali , 2005).

Induite par l'activité humaine, liée fréquemment à des pratiques agricoles inappropriées (Memoud, 2006).

I.3. Classification des sols salés

Basé sur la concentration en sel et le rapport en concentration $\text{Na}/(\text{Ca} + \text{Mg})$, les sols sont classés comme salin, sodique ou salin-sodique. La concentration totale en sels est habituellement mesurée par la conductivité électrique (CE) exprimée en dS.m^{-1} . Si elle égale ou supérieure à 4 dS.m^{-1} , le sol est salé. Les sols sodiques sont définis comme étant des sols qui ont un rapport d'adsorption de sodium (SAR) supérieur à 15. Le SAR est calculé comme suit : $\text{SAR} = [\text{Na}^+]/ [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2]^{1/2}$ (Cramer, 2002).

I.3.1. Sols salés

On distingue deux grands groupes :

- Les sols à complexe calcique dominant (solontchaks) : le Ca^{++} (sous des formes diverses : bicarbonates, carbonates, nitrates) existe en proportion importante par rapport à NaCl . Vu l'adsorption préférentielle de Ca^{++} sur Na^+ , l'ion Na minoritaire et bloqué dans le complexe absorbant. L'ion Na est représenté à raison de moins de 15% dans la capacité d'échange. La structure est bonne et ces sols sont alors stables.
- Les sols à complexe sodique dominant : présentent la tendance inverse. Il faut toutefois faire une distinction suivant leur origine.

Les sols à alcali non salés : proviennent d'une roche éruptive riche en minéraux sodiques, en climat sec où l'élimination de Na^+ est insuffisante par lessivage. Dans ce cas, la saturation en Na^+ du complexe absorbant est plus de 15 %. Il y a hydrolyse en période pluvieuse d'où l'augmentation du pH et la destruction de la structure du sol.

Les sols à alcali salés : sont des sols à nappe salée avec une faible proportion de Ca^{++} . Le Ca^{++} bloque Na^+ aussi longtemps que la nappe salée reste proche de la surface. Dans ce cas, les argiles

s'hydrolysent peu, le pH ne monte pas plus que 8-8,5 et la dégradation de la structure n'est que partielle.

I.3.2. Sols sodiques et à alcali

La Classification des sols sodiques est délicate du fait des variations saisonnières ou sous l'action de l'homme qu'ils peuvent subir. Plusieurs noms sont utilisés : Sols salés, Sols halomorphes, Sols sodiques ; aucun ne recouvre l'ensemble des sols concernés.

La dénomination de Sols Salsodiques que proposa Servant en 1975 semble bien meilleure. Deux sous-classes y sont distinguées en fonction de la présence ou de l'absence d'un horizon à structure dégradée. Dans une première sous-classe, de sols salsodiques, à structure non dégradée, on peut distinguer deux groupes :

Celui des sols salins à complexe calcimagnésique dont la teneur en sodium du complexe d'échange est inférieur à 15%. Les sous-groupes peuvent y être les suivants :

- modal, friable et sursalé en surface (hyper-solontchak, profil salin A ou C) (Servant, 1975).
- modal, friable en surface, sursalé en profondeur (crypto-solontchak à profil salin de type B ou D (Servant, 1975)
- friable en surface, mais hydromorphe en profondeur,
- à croûte saline en surface (en pratique, toujours hydromorphe).
- à horizon d'accumulation gypseuse (en pratique, toujours hydromorphe).
- à salant hygroscopique,
- à sulfures acidifiants.

La deuxième sous-classe comprend les sols sodiques, dont un horizon sur au moins 20 cm présente une structure dégradée, une forte compacité, sous l'influence de la teneur élevée du complexe en sodium échangeable. Suivant les sols (teneur en argile et type de celle-ci, teneur en matière organique et type de celle-ci) la valeur critique de Na/T varie. Elle est toujours au moins de 10%. Actuellement K et Mg ne sont pas pris en compte : le premier est normalement en quantité faible, l'action du second est encore mal élucidée.

La classification Française paraît la plus appropriée dans les zones arides et en particulier pour les sols salés, puisque selon Halitim (1988), la classification Américaine est pragmatique et classe les sols dans des ordres différents en fonction d'une faible variation de l'évapotranspiration ou de la pluviométrie.

Dans la classification Française, les sols salés sont rangés dans la classe des sols salsodiques, elle – même subdivisée en deux sous classes :

A. Sous classe des sols sodiques à structure non dégradée : ce sont des sols salins (solontchak), soumis à l'influence d'une nappe salée peu profonde, riches en sels de sodium, caractérisés par une conductivité électrique supérieure à 4 dS.m^{-1} (Duchauffour, 1988).

A-1. Sols salins à complexe calcique (solontchaks) : très fréquents en Algérie (FAO, 2005), caractérisés par un ESP $< 15\%$ et un profil peu différencié (Servant, 1975 ; Duchauffour, 1976). Ils se rencontrent dans les zones steppiques ou désertiques dans lesquelles des nappes salées contiennent à l'instar des sels solubles, une quantité importante de calcium qui alimente le profil (Halitim, 1973).

A-2 Sols salins à complexe sodique (Solontchaks sodique) : ce type de sol est caractérisé par un ESP $> 15\%$, il se rencontre en bordure de mer, ou dans les lagunes côtières, sa structure tend à se dégrader et devient poudreuse (Duchauffour, 1988).

B. Sous classe des sols sodiques à structure dégradée : ce sont des sols alcalins à structure détruite (Duchauffour, 1976). Selon Duchauffour (1988), on distingue trois (03) groupes selon les étapes d'évolution des profils :

B- 1 : Sols alcalins non lessives (solontchaks solonetz) : leur profil est de type AC ou A (B) C. Ils sont fréquents en Algérie (Durand, 1983).

B-2. Sols alcalins lessives de type ABC. L'horizon de surface A, pauvre en argile (migration par l'effet de lessivage) (Duchauffour, 1983). Ces sols existent en Algérie, mais sont très localisés dans les zones humides (Durand, 1983).

B-3. Sols alcalins dégradés (Solonetz) : ils présentent une structure dégradée complètement en surface avec un pH de 4 à 5 et en profondeur un pH élevé de 9 à 10.

Selon Loyer (1995), on distingue selon le référentiel pédologique Français (Baize et Girard, 1995), sept références : Sali sols (1 référence), salisodisols (1 référence), Salisols (2 références), sodisols (3 références).

I.4. Effets de la salinité et de la sodicité sur le sol et sur la plante

Les sols salés contiennent suffisamment des sels solubles dans leur solution (électrolytes) pour nuire à la croissance de la plupart des plantes. Ces sels solubles, sont principalement le sodium (Na^+), le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}) et de potassium (K^+) et aussi les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les carbonates (CO_3^{2-}).

Le développement d'une gestion efficace des pratiques de lutte contre la salinité nécessite une bonne compréhension des effets de la salinité sur les sols et sur les plantes.

I.4.1. Effets sur les sols

Dans les sols salins, la présence excessive de sels solubles neutres floccule la fraction argileuse, mais les maintient stable, alors que dans les sols alcalins, un excès en sodium échangeable favorise la dispersion de l'argile et rend la structure du sol instable. Ces sols sont ainsi sensibles aux encroûtements de surface qui favorisent le ruissellement de surface (Hassan, 2005). Une prise en masse du sol peut également réduire fortement l'infiltration de l'eau dans le sol et conduire à une hydromorphie plus ou moins importante du sol selon sa texture et sa position topographique dans le paysage (Douaoui *et al*, 2004).

Un taux de sodium échangeable élevé a pour effet une dispersion des agrégats, ce qui conduit à une réduction de la perméabilité, de la porosité et un tassement des sols. Du point de vue agricole, cela se traduit d'une part par la prise en masse du sol qui devient très compact, dur, difficile à labourer, et d'autre part, par des difficultés de germination, et d'enracinement des plantes (Fig. 3). Par ailleurs le sol devient totalement asphyxiant, ce qui s'accompagne d'une atrophie du système racinaire, de son développement de plus en plus superficiel, avec des conséquences défavorables sur la nutrition minérale des plantes, et la baisse considérable des rendements.

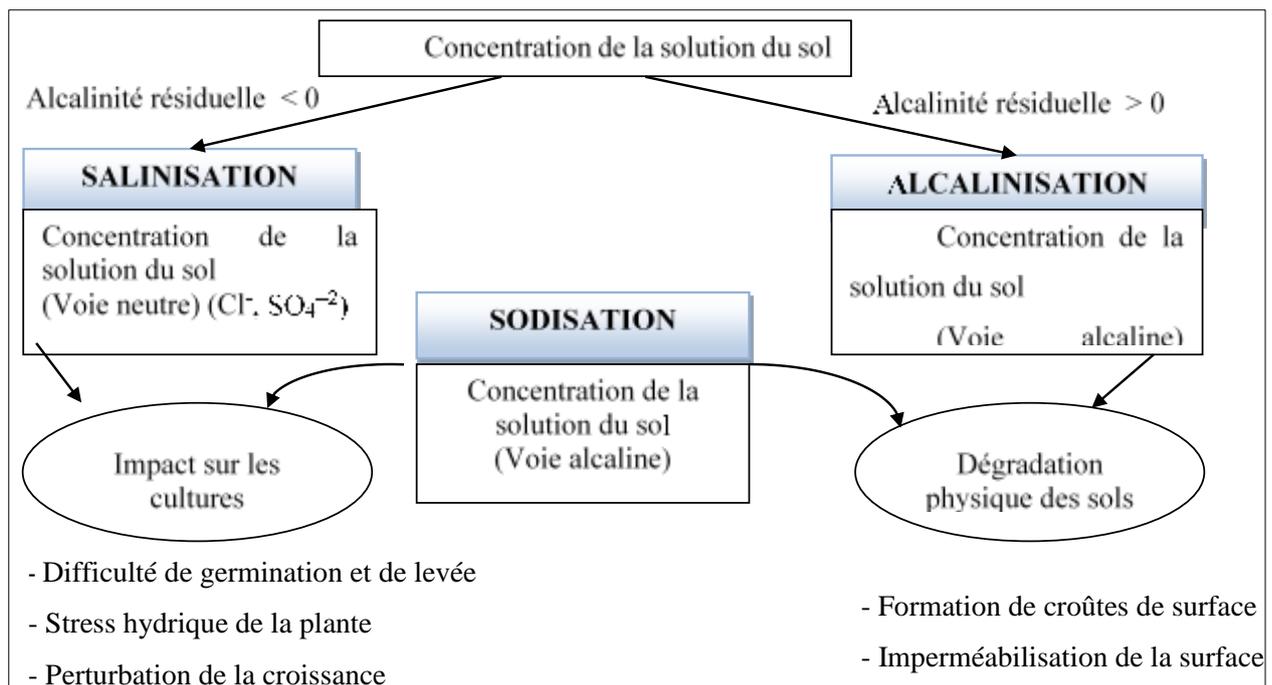


Figure 3 - Processus des différentes voies de la salinisation et leurs impacts sur la dégradation des sols et sur les cultures. (Tabet, 1999)

Une grande quantité de sels solubles peut affecter les propriétés pédologiques, notamment la dispersion des colloïdes, la stabilité structurale et la chute de la perméabilité hydraulique (Servant, 1970 ; Cheverry, 1972 ; Agassi *et al* 1981 ; Aubert 1983 ; Halitim, *et al* 1984 ; Daoud, 1993).

L'excès de sels dans un sol modifie les propriétés physiques et chimiques. Cette altération des conditions édaphiques constitue un stress indirect pour la croissance des plantes (Gregory, 2005).

I.4.1.1. Effets sur les propriétés physiques

C'est par leurs cations que les sels solubles affectent les propriétés du sol. Il s'agit essentiellement de l'ion sodium. L'action défavorable de cet ion à l'état échangeable se traduit par la dispersion des colloïdes du sol et par conséquent :

- **Structure dégradée** : La structure soit complètement dégradée lorsque la teneur de sodium échangeable est de 12 à 15 % dans les sols salés (Derdour, 1981 in Kidari, 1991). La structure du sol est complètement dégradée, lorsque la teneur en Na échangeable est très élevée, ou il y aura une dispersion des argiles et la destruction de la structure (Duchaufour, 1983 ; Robert, 1996).
- **Réduction de la perméabilité** : L'influence du sodium sur la perméabilité du sol dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquelles le pourcentage d'argile et la nature minéralogique du sol, la concentration de la solution de celle-ci (Revee et al., 1954 ; Brooks, 1956 ; Gadnet et al., 1959, Kemper et Kock, 1956 in Kidari, 1991)
- **Mauvaise stabilité structurale** ;
- **Faible disponibilité de l'eau à la plante** (Halitim, 1973 ; Duchuffour, 1976).

I.4.1.2. Effets sur les propriétés chimiques

L'excès de sels présente un effet sur les propriétés chimiques, notamment sur le pH et l'ESP (Oustani, 2006).

- **pH** : la réaction du sol est influencée par la nature des sels. Alors que certains sels sont acidifiants (CaSO_4 , KCl , MgSO_4), d'autres sont alcalinisant (NaHCO_3 , CaCO_3 , NaCO_3).
- **ESP**: le taux de sodium échangeable à une grande importance dans les sols alcalins, vu que ces derniers retiennent de faible concentration en sels solubles et la grande quantité de sodium se trouve sous la forme échangeable. Tandis que dans le cas des sols salés, la grande partie du sodium se trouve dans la solution du sol.

I.4.2. Effets sur la plante

La salinité constitue un facteur limitant non négligeable pour l'agriculture mondiale (Hillel, 2000). L'effet de la salinité se manifeste généralement chez la plupart des plantes cultivées par une réduction de la croissance et le développement (Munns et al., 1983). Cet effet néfaste se traduit par des changements morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires qui affectent négativement la croissance et la productivité végétale (Ashraf et Harris, 2004).

L'accumulation des sels dans les sols est un grave problème environnemental menaçant les processus physiologiques de la plante et la fertilité des sols (Halitim, 1988). Les sels constituent aussi

un obstacle physique à l'enracinement à cause de la diminution de la disponibilité en eau et de l'instabilité structurale du sol. Ils sont aussi à l'origine des déséquilibres nutritionnels observés chez les plantes. Seules les plantes tolérantes aux sels peuvent se développer. Dans certains cas, la salinité est tellement élevée que le sol devient stérile et dépourvu de toute végétation y compris de plantes halophytes. Dans ce cas, des problèmes de toxicité surviennent aussi ; outre le sodium et le chlore, d'autres éléments à l'état de traces tels que le bore peuvent aussi être toxiques pour les plantes (Ayers et Westcot, 1988).

I.5. Mise en valeur des sols salés

La restauration des sols salins et leur mise en valeur nécessitent des investissements très importants qu'il faille l'évaluer afin de justifier sur le plan de rentabilité des investissements nécessaires pour les différentes phases (Oustani, 2006).

Une bonne utilisation agricole des sols salée nécessite :

- L'élimination des excès de sels (lixiviation) et la suppression de la source de sodium (drainage de la nappe salée). Ces pratiques seront d'autant plus aisées que le sol est perméable et que l'eau (pluie, irrigation) est abondante et de bonne qualité.
- L'utilisation des plantes résistantes à la salinité.
- La reconstitution de la fertilité par des amendements organiques et minéraux.

I.5.1. Etat d'évacuation des eaux de drainage

La mise en œuvre d'un programme type d'amélioration du système d'évacuation des eaux dans un quartier passe par quatre phases principales :

- Lancement
- Planification
- Construction
- Entretien

Les deux premières phases revêtent une importance capitale, car elles sont déterminantes pour la suite des opérations.

Le lancement d'un programme d'amélioration du système d'évacuation des eaux peut avoir pour origine la prise de conscience, par la communauté, de la nécessité d'améliorer le système existant, éventuellement à la suite d'une inondation particulièrement grave ou d'améliorations entreprises dans d'autres quartiers. Bien souvent toutefois, le catalyseur est une instance extérieure : municipalité, parti politique, organisation non gouvernementale, ou personne privée soucieuse des intérêts de la communauté, telle qu'un professeur ou un membre du personnel de santé. Cette phase

suppose l'identification des besoins, la formation d'un consensus concernant l'étendue du problème et la solution souhaitée, et la création d'un comité spécial, du moins à titre provisoire. Lorsque l'initiative est due à une intervention extérieure, il est probable aussi qu'il faudra entreprendre un travail d'information auprès de la communauté pour la sensibiliser au problème et mobiliser son soutien (Cairncross, 1986).

Le drainage selon la FAO, est une technique de suppression naturelle ou artificielle des excès d'eau souterraine et de surface des sels dissous dans les terres afin d'améliorer la production agricole. Dans le cas du drainage naturel, l'excès d'eau s'évacue des champs jusqu'aux lacs, fleuves et rivières. Dans le système artificiel, l'excès d'eau souterraine ou de surface est éliminé par des canalisations souterraines ou de surface.

Le drainage a pour objectif :

1. d'évacuer l'excès d'eau de pluie par les drains de surface qui recueillent essentiellement l'écoulement de surface.
2. de contrôler la profondeur de la nappe et de lessiver les sels dans la rhizosphère.
3. de transporter l'eau récupérée dans les drains secondaires jusqu'au collecteur.
4. de transporter l'eau des collecteurs jusqu'à l'exutoire du système ou au site d'évacuation.

Quelques observations de base sur le drainage :

- La nappe doit être rabattue à plus de 1 m de profondeur dans les sols argileux. Les drains devront donc avoir une profondeur supérieure lorsque c'est possible en fonction de la topographie de la zone ;
- En saison sèche les drains devront être vidés soit naturellement (topographie suffisante) soit mécaniquement (motopompes) pour être parfaitement efficaces et rabattre correctement la nappe phréatique ;
- Les drains pour fonctionner correctement ne devront pas être remplis d'eau pendant la culture. Il faudra en particulier s'assurer qu'ils soient propres pour permettre l'évacuation des eaux de drainage chargées en sels ;
- Il ne faut jamais utiliser l'eau des drains pour l'irrigation ;
- Etant donné la faible perméabilité des sols, les drains devront être assez nombreux et rapprochés les uns des autres ;
- En générales pour choisir le circuit des drains, on le calque sur les zones d'écoulement des eaux de surface (les talwegs). Cela est particulièrement vrai pour les collecteurs principaux.

I.5.2. Qualité de l'eau d'irrigation et doses de lessivage

La dégradation de la qualité des sols suite à l'irrigation avec des eaux, même peu chargées, constitue un danger sérieux pour la durabilité du système d'exploitation des terres. Il est bien connu que la conduite non optimisée d'une mise en valeur agricole sous irrigation en zones semi-arides et arides conduit le plus souvent à une dégradation de la qualité des sols (Mathieu et Ruellan, 1980; Larson et Pierce, 1991; Robert, 1992; 1996; Umali, 1993; Badraoui et Merzouk, 1994; Farhat, 1995; Badraoui et al., 1998a; 1998b). Les principaux impacts sont :

- La salinisation secondaire des sols ;
- La recharge de la nappe par les eaux salées de drainage ;
- La remontée de la nappe salée ;
- La stagnation d'eau en surface dans le cas de sols à mauvais assainissement et drainage.

Le besoin en lessivage est calculé en fonction de la salinité de l'eau d'irrigation, l'ET, les pluies et le niveau de salinité possible de la solution du sol, lui-même fonction du type de culture à mettre en place et le type de sol :

$$L = (ET - P) [C_i / (f \cdot C_{sm} - C_i)] \text{ avec } L : \text{ besoin en lessivage (mm)}$$

ET: évapotranspiration (mm)

P : pluviométrie (mm)

C_i : CE de l'eau d'irrigation ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)

C_{sm} : CE de l'extrait de pate saturée du sol ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)

f : efficience du lessivage. Cet indice indique le ratio entre la salinité de l'eau de drainage et celle de la solution d'un sol. Ce coefficient varie avec la texture du sol : 0,4 pour les sols lourds, 0,6 pour les sols moyens et 0,8 pour les sols sableux.

Le lessivage est efficace lorsque l'eau de drainage salée est déversée à travers des drains souterrains transportant cette eau à l'extérieur de la zone racinaire. Il peut être également efficace en l'absence de drains souterrains quand le drainage naturel est effectif et n'augmente pas le niveau de la nappe adjacente. Il est préférable d'effectuer le lessivage lorsque l'humidité du sol est faible et la nappe phréatique adjacente suffisamment basse.

I.5.3. Amélioration des sols salés par amendements chimiques

Les amendements agrochimiques sont réservés aux sols alcalins (Solonetz) ayant leur complexe saturé de plus de 15% en sodium a au plus 0,25% de sels (Yaggodine, 1984).

Les sols salins à alcalins (Solontchaks – Solonetz) ayant un taux de sodium de plus de 15% et leur solution contient plus de 0,25% de sels nécessitent les mêmes amendements que les sols alcalins car ils peuvent évoluer en sols alcalins.

Les différents types d'amendements chimiques sont groupés en trois catégories :

- Les sels solubles de calcium : $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CaCl_2 , et les phospho-gypses.
- Les sels peu solubles de calcium : calcaire et CaCO_3 .
- Les acides ou éléments fortement acides : H_2SO_4 , sulfates d'Al ou de fer, les sulfates de chaux et la pyrite.

1.5.3.1. Amendements calciques

Une petite quantité de sulfate de sodium ne constitue aucun danger pour les plantes. Mais lorsque le sol amélioré par le gypse présente un taux de sodium échangeable de plus de 20 %, le sulfate de sodium devient nocif et doit être lessivé. Le calcul du besoin en gypse X tient compte principalement du taux de saturation en sodium et de la C.E.C du sol (FAO 1984) :

$$X = \frac{\text{ESP}_i - \text{ESP}_f}{100} \times \text{CEC} \quad \text{avec} \quad - X = \text{quantité de gypse en meq.}100\text{g}^{-1} \text{ de sol.}$$

- ESP_i = ESP initial avant l'amélioration en %

- ESP_f = ESP final (doit être < 5 %)

- CEC = capacité d'échange cationique en meq.100g⁻¹

En tonnes.ha⁻¹ : $X = (\text{ESP}_i - \text{ESP}_f) \times \text{CEC} \times 86 \times 10^{-6} \times Z \times da$

avec - Z = profondeur du sol en mètres

- da = densité apparente en Kg/m³

1.5.3.2. Techniques d'application des amendements calciques

L'effet de l'amélioration dépend du degré de mélange du gypse avec le sol. Le gypse est souvent incorporé par labour profond en automne. Dans ce cas, l'horizon alcalin doit être bien mélangé avec le gypse. Les sols alcalins à encroutement superficiel sont traités après labour, le gypse est incorporé à l'aide d'un cultivateur.

Dans le cas des solonetz à structure colonnaire moyenne ou profonde, où l'horizon alcalin est à une profondeur de 7 à 20 cm, le gypse est appliqué suite au labour profond, par incorporation à l'aide d'un cultivateur.

Une autre option est l'utilisation de l'acide sulfurique, quand le sol contient du CaCO_3 . Le principe est de dissoudre du CaCO_3 pour libérer du calcium. Cette option, utilisée à grande échelle en URSS et aux Etats Unis, est en cours de développement rapide dans certains pays comme le Maroc (Messar, 2007).

I.5.4. Choix des cultures

La sélection des cultures et des variétés dépend de l'état de contamination du sol par la salinité/sodicité et la qualité de l'eau d'irrigation. Dans tous les cas, un système de drainage en état de fonctionnement normal est fondamental pour escompter mettre en valeur un sol salsodiques.

Chapitre II - Présentation de la région d'étude

II.1. Présentation du site d'étude

Le champ étude, la station de l'Institut National de Recherche Agronomique d'El H'madena fait partie des terres de la station expérimentale de l'INRAA. D'une surface de 77 ha, elle est située à 3 km de la partie nord-ouest de la ville de H'Madena. Elle se trouve dans la plaine du Bas-Cheliff au nord-ouest de l'Algérie. Elle se trouve à 35° 54° Nord et 0° 45° avec une altitude maximale de 79m. par route (RN4). Elle se situe à 270 km d'Alger, à environ 70 km de la ville de Chlef et 30 km de la Relizane.



Figure 5 : Localisation de site d'étude (Google Earth, 2016)

II.2. Conditions climatiques

Le climat de la région d'étude est spécifique, il est rude et très contrasté par ses étés très chauds et ses hivers très froids.

II.2.1. Précipitations et températures

La zone d'étude a connu des cycles de sécheresse allant de juillet à octobre en 2015 et d'avril à juin en 2016. Généralement, la pluie tombe sous forme d'averse de courte durée donc de forte intensité causant ainsi des inondations en quelques endroits de la plaine. L'analyse pluviométrique sur la région d'El H'Madena durant les deux dernières années 2015 et 2016 (Tableau 3), montre que le mois de mars est le mois le plus pluvieux (110,74 mm). La période estivale qui s'étale de juin à août est considérée comme étant la moins pluvieuse de l'année. Globalement, les précipitations moyennes annuelles restent inférieures à 111 mm.

Le régime thermique de la région est caractérisé par des températures élevées en été et relativement basses en hiver. Les températures les plus élevées sont enregistrées durant les mois de

juillet et aout, où elles atteignent un maximum de 40,5°C en moyenne, ce qui correspond à une forte évaporation et une remontée capillaire de la nappe qui se trouve parfois à un mètre de profondeur. Les bases températures se manifestent au mois de janvier avec une température moyenne de 14,4°C et une minimale moyenne de 8,2°C.

Tableau 3 : Moyennes mensuelles des précipitations et températures de la station d'El H'Madena en 2015 et 2016

Mois		Température (°C)			Précipitations (mm)
		Moy	Max	Min	
7	Juillet	33,8	40,5	22,7	0
8	Août	32,4	37,5	24,7	0
9	Septembre	27,3	32,5	19,6	8,13
10	Octobre	22,8	28,5	15,7	21,59
11	Novembre	16,7	22	9,8	56,39
12	Décembre	13,5	20,1	6,0	0
1	Janvier	14,4	19,4	8,2	13,96
2	Février	14,9	19,5	8,9	46,24
3	Mars	14,9	19,4	7,4	110,74
4	Avril	18,8	24	10,6	41,39
5	Mai	23,1	28,9	13,5	12,46
6	Juin	28,9	34,9	17,8	3,05

L'évapotranspiration (ETP) est définie comme étant la valeur maximale possible de l'évaporation dans les conditions climatiques données. Elle résulte de deux phénomènes l'un physique : l'évaporation, l'autre biologique : la transpiration. L'évapotranspiration potentielle estimée selon la formule de PENMAN est de 1500 mm/an (Douaoui, 2005).

II.2.2. Humidité

L'humidité relative de l'air est généralement plus élevée le matin durant toute l'année, elle est de l'ordre de 60 à 70% en hiver et près de 45% en été (Tableau 4). Elle peut compenser relativement l'absence ou la rareté des précipitations en favorisant le développement des plantes.

Tableau 4 : Humidité de la station de H'madna (2015-2016).

mois	juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avrl	Mai	Juin
H %	37,2	44,2	46,5	61,6	71,4	66,8	68,5	62	68,8	61,6	48,1	36,6

II.2.3. Vent

Le vent agit soit directement par une action mécanique sur le sol et les végétaux, soit indirectement en modifiant l'humidité et la température (Ozenda, 1982). D'après les observations effectuées à la station de d'El Hmadena (Tableau 5), il ressort que le vent dominant est le vent de l'ouest. Sa vitesse moyenne varie de 3,6 à 11 Km/h, jouant le rôle de la dégradation mécanique du sol et agit sur l'amplitude de la température.

Tableau 5 : Le vent de la station de d'El Hmadena (2015-2016).

ois	uil	out	ep	ct	ov	ec	an	év	ars	vrl	ai	uin
	,8	,1	,3	,7	,5	,6	,7	6	1,5	,7	,9	1

II.3. Ressources en sols

Les principaux sols qui caractérisent la région sont :

II.3.1 Sols peu évolués

Les peu évolués d'apport alluvial sont des sols dont les caractéristiques physico-chimiques sont très variées au vu des conditions différentes de leurs dépôts et de leurs migrations. Leur granulométrie peut être argileuse, limoneuse ou sableuse. On les rencontre le plus souvent sur les terrasses des lits d'oued. Ils peuvent présenter une nappe temporaire qui est à l'origine des taches d'oxydoréduction qu'on retrouve dans certains profils.

Les sols peu évolués d'apport colluvial sont des sols qui se localisent sur les bordures de la plaine à la rupture des pentes entre les piémonts et les glacis. On les retrouve aussi au niveau des cônes de déjection des oueds tels qu'Oued Rhiou et Djidiouia. Ils sont caractérisés le plus souvent par des dépôts de cailloux et de graviers à la surface et en profondeur du profil. Leur texture peut être très variée.

II.3.2 Vertisols et sols calcimagnésiques

Les vertisols sont riches en argiles gonflantes (smectites). Ils se définissent comme des sols à mauvais drainage. On les retrouve sur les alluvions des terrasses Rharbiennes. Ils présentent souvent le caractère salin avec une hydromorphie en profondeur.

Les sols calcimagnésiques sont présents le long des limites Nord et Sud de l'aire d'étude. Ils sont carbonatés, plus ou moins différenciés et présentent parfois des accumulations

calcaires continues sous forme d'encroustement et de croûte. Ils montrent parfois des caractères verticaux.

II.3.3. Sols salsodiques

Les sols salsodiques sont définis comme étant des sols dont l'évolution est influencée par la présence de sels solubles et en particulier un pourcentage en sodium échangeable. Lorsque la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée d'un dépasse les 4 dS.m^{-1} , il est considéré comme étant salé (USSL, 1954). Souvent dans le Bas-Chéouf, la présence des sels est tellement importante qu'ils deviennent apparents à l'examen visuel sous forme d'efflorescences salines. Lorsque l'ESP $>15\%$ et le pH $>8,5$ on parle de sols à alcali.

Dans beaucoup de cas, on peut rencontrer des sols hydromorphes profonds avec un drainage imparfait du à la position basse qu'ils occupent formant généralement des dépressions fermées telles que les sols de la Gaa.

II.4. Occupation des sols

La plus grande partie de la vallée du Bas-Chéouf est cultivée. Et est caractérisée par un ensemble de champs ouverts avec par endroits des brise-vent de conifère (Tamarix, Casuarina et Eucalyptus). Les cultures principales dans l'aire d'étude sont les céréales et les cultures maraîchères notamment les artichauts. L'arboriculture est basée sur les oliviers et les agrumes. Certaines cultures fourragères sont présentes. En général, la plupart des parcelles à pentes faibles sont cultivées (BNEDER, 1990).

La carte d'occupation des sols établie par Douaoui (2005), à partir de données recueillies directement sur le terrain lors de l'échantillonnage, montre que les sols sont occupés à 10% par les cultures maraîchères, 1% par l'arboriculture, 22% par les céréales, 21% par la jachère, 43% par la végétation halophyte et 3% sont des sols labourés. Les sols très salés abandonnés sont couverts par une végétation halophyte dont la densité de recouvrement est très variable dans l'espace et dans le temps.

En été, certains types de sols, tels que ceux de la Gaa sont totalement dépourvus de végétation. L'espèce halophyte la plus abondante est *Suaeda fructuosa* qui peut se développer sur des sols très salés. On peut aussi rencontrer *Salicornia fructuosa* qui est abondante dans les sols très salés des bas-fonds. D'autres espèces plus ou moins fréquentes sont recensées telles que *Salsola vermiculata*, *Avena serilas*, *Cyaodon dactylon*, *Heta maritima*, *Calendola arvenais*, *Phalaris paradoxa*, *Atriplex halimus*.

II.5. Ressources en eau

II.5.1. Ressources superficielles

Le réseau hydrographique de la plaine (Figure 8), comprend l'oued principal du Cheliff et les oueds avoisinants de Razzaz, Tarhia, Ouarizane et Asfar. Le régime hydrique de l'oued Cheliff est déterminé par les conditions climatiques et physiographiques du bassin de l'oued. L'alimentation hydrique de l'oued se produit pendant la saison pluvieuse, les grandes crues ont lieu en automne et en hiver.

En hiver des débordements réguliers inondent les bourrelets alluviaux de l'oued, le niveau d'eau peut atteindre jusqu'à 7 à 8 m. Pendant ce temps, les eaux de l'oued sont chargées, elles emportent et redéposent de grandes quantités d'éléments fins. La variabilité du cours d'eau et l'accumulation des alluvions sont les deux facteurs essentiels qui conditionnent le tracé sinueux du lit et le sapement des berges.

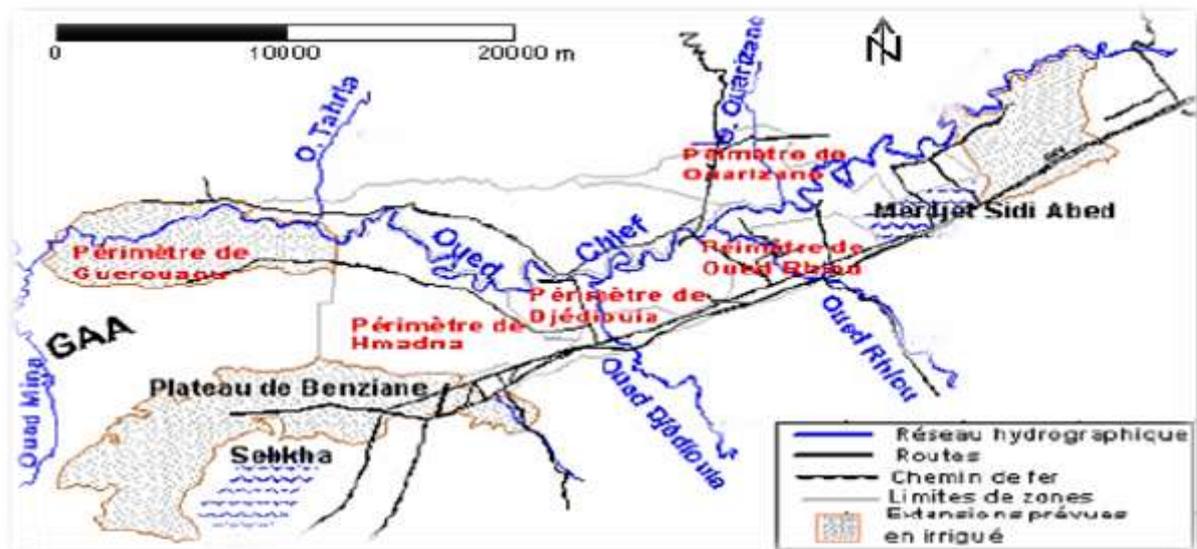


Figure 8 - Réseau hydrographique et principaux périmètres irrigués de la plaine du Bas-Chélif

La qualité physique des eaux du Bas Chélif est variable, la salinité des eaux de l'Oued Rhiou, par exemple, varie au cours de l'année entre 0,8 -2,0 g.l⁻¹. Selon le débit, on peut s'attendre à ce que la salinité moyenne de l'eau des retenues, atteigne l'ordre de 1 g.l⁻¹. Pour cela ces eaux ne peuvent pas être utilisées sur des zones à mauvais drainage. Il faut savoir que des grandes superficies du Bas Cheliff contiennent des sols salés à drainage insuffisant, ce qui limite drastiquement leur utilisation pour la production agricole.

II.5.2. Ressources souterraines

Le miocène, formé presque exclusivement de marnes, peut être considéré comme totalement imperméable. Les quelques niveaux de grés inter stratifiées ; surtout vers le sommet de la série, sont assez minces, et offrent, en raison de leur pendage assez fort, des impluviums très réduits. D'autre part, les nappes qui peuvent exister dans ces grés, doivent être salées, par suite du lessivage des marnes par ruissellement, avant l'infiltration.

Les marnes du plaisancier forment également un niveau imperméable, et les grés de base du pliocène présentent, autres les caractères défavorables des grés miocènes, l'inconvénient d'être très profonds au centre du bassin.

Seul le pliocène marin gréseux et le pliocène continental présentent dans la région un intérêt hydrogéologique par suite de leurs faciès principalement gréseux et sableux, et de leurs grandes surfaces d'affleurement.

La série astienne, étant constituée exclusivement dans la partie moyenne de sables assez bien classées et de grés souvent grossières et friables donc très perméable, doit constituer un très bon réservoir. Le substratum imperméable est formé par la série marneuse miocène plaisancier dont l'épaisseur totale atteinte plusieurs milliers de mètres.

La nappe des grés astiens ; mise en évidence par des sources suintement au contact des marnes plais anciennes dans la partie Nord ; s'écoule en direction de la plaine du Cheliff. Des bombements du substratum marneux, orientés NNW-SSE provoquent des discontinuités dans la nappe, vers l'amont.

Les exutoires de la nappe sont également mal connus, l'un d'eux apparaît à côté sous forme de plusieurs sources sur la rive droite du Cheliff à un kilomètre au sud-ouest de Sidi Brahim. Les autres exutoires pourraient être les alluvions du Cheliff. Si les niveaux inférieurs du pliocène continental forment un toit imperméable continu à la nappe astienne, nous pourrions obtenir de l'eau artésienne par forage dans les basses vallées de certains oueds.

Au sein du pliocène continental, un certain nombre de nappes perchées se manifestent par sources le long des oueds qui ont entaillé la série. Cependant à la base de cet étage doit exister une nappe qui est soit indépendante de celle de l'Astien si la séparation entre les deux niveaux est imperméable soit confondue. Cette nappe s'écoule vers la plaine du Cheliff et devient captive sous le villafranchien. Ses exutoires peuvent être également l'alluvion du Cheliff et les niveaux perméables du villafranchien.

Deuxième partie - Etude Expérimentale

Chapitre III - Matériels et méthodes

III.1. Objectif de l'étude

L'objectif de ce travail expérimental est d'étudier les effets de types d'aménagement sur les caractéristiques physico-chimiques et hydriques d'un sol salé de la plaine de la Mina. Il s'agit d'effectuer un diagnostic de l'état de salinité et de sodicité actuelles des sols du site étudié et de voir dans quelles mesures les aménagements hydroagricoles appliqués affectent les propriétés des sols. Ce chapitre est consacré à la présentation du matériel d'étude et des méthodes d'analyses des sols utilisées lors de l'expérimentation.

Sur le plan méthodologique, la figure suivante (Fig. 9), résume les différentes étapes de préparation et d'analyses physiques et chimiques des échantillons de sol.

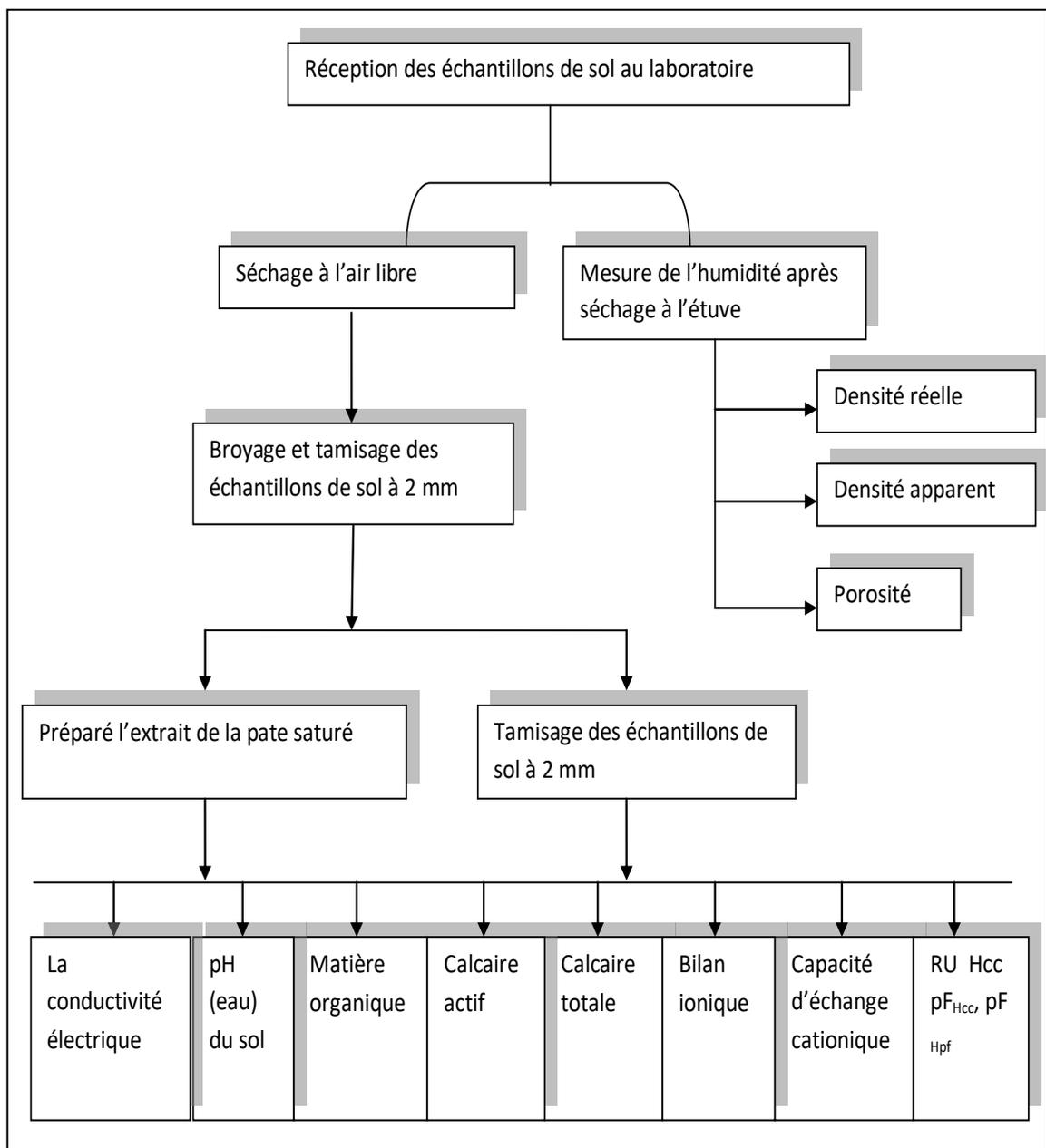


Figure 9 - Schéma du mode opératoire pour les analyses des échantillons de sol

III.2. Matériels

III.2.1. Parcelles expérimentales

Le terrain choisi pour ce travail est identifié par F5 N13 (Fig. 10). Il s'étend sur (96×30) m² et est composé de 12 parcelles expérimentales de $(24 \times 7,5)$ m². Dans chacune d'elles le prélèvement des échantillons de sol se fait à l'aide de la tarière sur trois horizons : 0-10, 20-20 et 20-40 cm et en trois répétitions (Fig. 11).



Figure 10 - Localisation du terrain d'étude

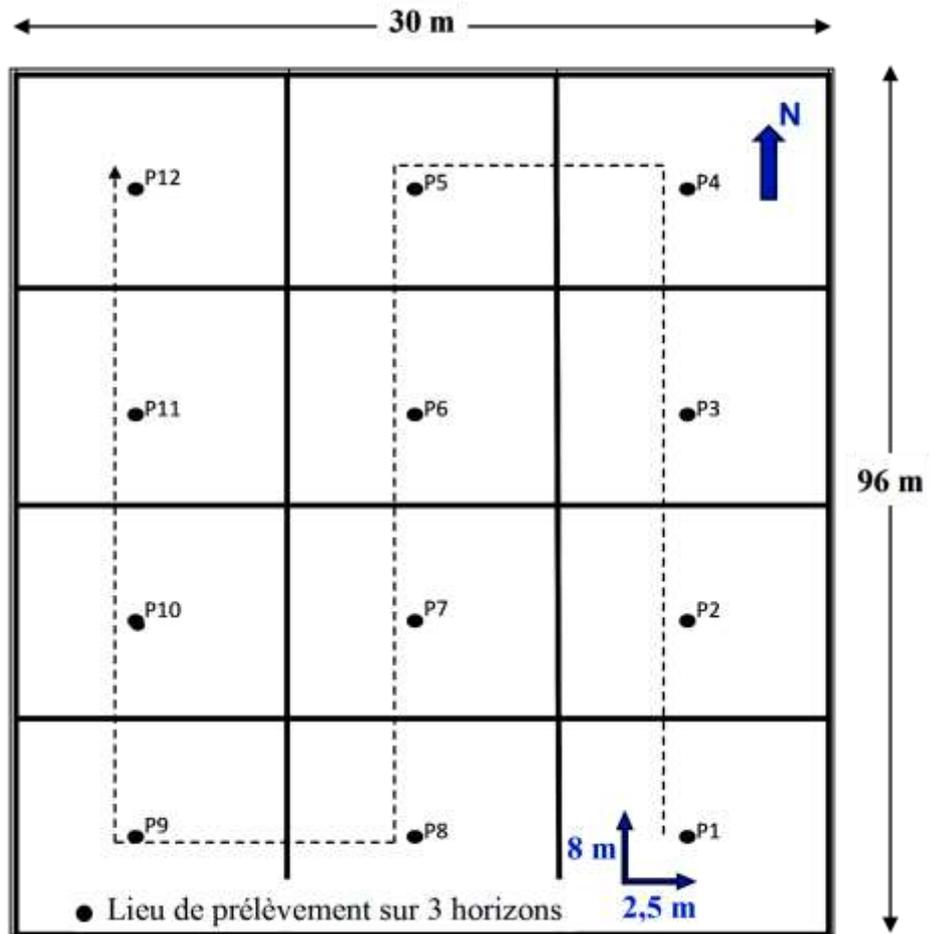


Figure 11 – Schéma de prélèvement des échantillons de sol sur les 12 parcelles expérimentales

III.3. Méthodes

III.3.1. Prélèvement et extraction de la solution de pâte saturée

Le prélèvement des échantillons de sol a été effectué le 30 Mars 2016 à l'aide d'une tarière hélicoïdale sur les 12 parcelles expérimentales (Photo 1).



Photo 1 – Prélèvement des échantillons et séchage à l'air libre

Les échantillons de sol de près de 1 à 1,6 kg chacun sont mis dans des sachets hermétiquement fermés et étiquetés (nom, parcelle, date, heure et sol ou sous-sol). Après séchage à l'air libre ils sont tamisés à 2 mm (Photo 2).



Photo 2 – Tamisage des échantillons à 2 mm et préparation de l'extrait de pâte saturée

La pâte saturée est préparée sur un échantillon de 200 g. L'ajout d'eau distillée à cet échantillon de sol se fait très minutieusement de manière à obtenir une surface brillante et lisse de la pâte qui se détache facilement de la spatule. Un sillon ouvert à la surface de la pâte, doit être fermé au bout de dix coups de vibration. La pâte repose une nuit sur les cristallisoirs pour être transférée dans les godets de la centrifugeuse où l'extraction est obtenue sous 3000 tours/mn (Photo 3).



Photo 3 - Extraction de l'extrait de pâte saturée par centrifugation

III.3.2. Méthodes d'analyse

III.3.2.1. Granulométrie

L'analyse granulométrique avec la méthode internationale de pipette de Robinson n'était pas possible étant donné la contrainte de floculation du gypse. Pour cela nous avons adopté la technique de tamisage qui a permis de prélever les 3 fractions : Sable grossier, sable fin et argile + limon.

III.3.2.2. Humidité

Conformément à la norme internationale ISO 16586 (**Meynard et al., 1997**), l'humidité est obtenue par différence de poids d'un échantillon de sol avant et après passage à l'étude à 105°C pendant 24 h.

III.3.2.3. Densité réelle, densité apparente et porosité totale

La densité réelle d_r est obtenue par la méthode du pycnomètre. La densité apparente d_a est mesurée in situ par la méthode du cylindre de Sieghrist. La porosité totale P est obtenue par calcul selon la relation suivante : $P (\%) = \frac{d_r - d_a}{d_r} \times 100$

III.3.2.4. Matière organique

La matière organique MO est déterminée par la méthode Walkley et Black Modifiée.

III.3.2.5. Calcaire total

Le calcaire total est obtenu par la méthode du Calcimètre de Bernard.

III.3.2.6. Calcaire actif

Le calcaire actif est obtenu par la méthode Drouineau-Galet Modifiée.

III.3.2.7. pH eau du sol

Le pH eau est déterminé par la méthode potentiométrique. Il est déterminé à l'aide d'un pH-mètre de paillasse sur un extrait de sol aqueux de 1/2,5.

III.3.2.8. Conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée

Selon la méthode conventionnelle de l'USDA (**Richards, 1954**) sur un conductimètre de paillasse.

III.3.2.9. Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique CEC est déterminée par la méthode de Bower par centrifugation suite à une saturation de l'échantillon par une solution d'acétate de sodium à pH= 8,2. Le déplacement du sodium est obtenu par une solution d'acétate d'ammonium.

III.3.2.10. Bilan ionique

Les cations Na^+ et K^+ sont dosés par spectrophotométrie à flamme. Les cations Ca^{2+} et Mg^{2+} sont dosés par spectrométrie à absorption atomique.

Les anions sont dosés à partir du rapport sol/eau : 1/5 et 1/10. Les anions HCO_3^- et CO_3^- sont dosés par titrimétrie au H_2SO_4 et le Cl^- par titrimétrie au nitrate d'argent (méthode de Mohr). Le SO_4^{2-} est par la méthode gravimétrique au BaCl_2 (Colorimétrie).

III.3.2.11. Réserve utile RU et potentiels matriciels pF

Les potentiels matriciels en termes de pF sont mesurés respectivement à l'humidité à la capacité au champ pF_{HCC} et à celle au point de flétrissement pF_{HpF} en utilisant le dispositif de la marmite de Richard. La réserve utile RU est obtenue par calcul suivant la formule suivante :

$$\text{RU (m}^3\cdot\text{ha}^{-1}) = (\text{HCC} - \text{HpF}) \times \text{da} \times \text{Z} \times \text{S} \text{ avec HCC humidité à la capacité au champ (\%)}$$

HpF : humidité au point de flétrissement (%)

da : densité apparente

Z : profondeur du sol (m)

S : surface de la parcelle (m^2)

Chapitre IV - Résultats et discussions

IV.1. Caractéristiques physiques et hydriques des sols

IV.1.1. Humidité du sol

Sachant que l'humidité du sol est un paramètre qui varie spatialement et temporellement dans un sol, il est important de préciser dans quelles conditions sa mesure a été effectuée. En effet, la mesure était réalisée en date du 30 mars 2016 sur une parcelle de 2880 m² (0,288 ha). Ce jour-là, le ciel était clair, il n'a pas plu depuis au moins 4 jours. La topographie du terrain est plate. Il s'agit d'un terrain non labouré contenant des céréales (Photo 4).



Photo 4 – Vue sur la parcelle d'expérimentation

Les résultats de l'humidité du sol (Fig. 12), montrent qu'elle augmente légèrement de l'horizon de surface vers les couches inférieures. Néanmoins, les variations de ce paramètre semblent faibles entre les différents traitements en Gypse et en DS. Dans ce cas, nous avons besoin de connaître les parts d'influences relatives du traitement et de la profondeur sur les variations globales de l'humidité du sol. En effet, l'analyse de la variance

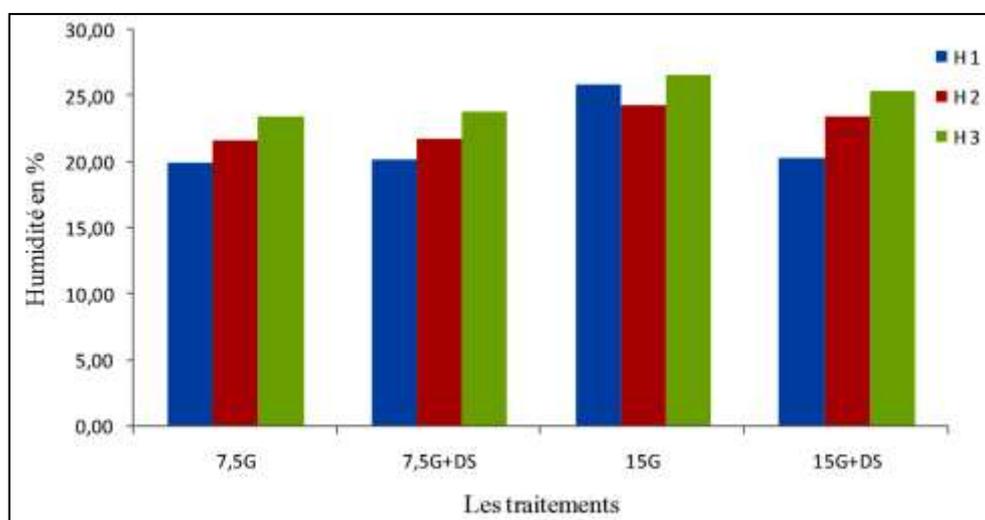


Figure 12 - Humidité en fonction des traitements et des horizons

à deux critères de classification (tableau 14, annexe 2), montre que la part d'influence des traitements par le gypse et le DS est de 24% alors que celle liée aux horizons est de 18% (CV = 12,39%).

IV.1.2. Densité apparente

Les résultats de la densité apparente (Fig. 13), montrent qu'il n'y pas pratiquement pas d'effet du traitement sur son évolution. Cependant, nous remarquons que la densité apparente augmente de l'horizon superficiel à l'horizon inférieur, ce qui est conforme à la littérature.

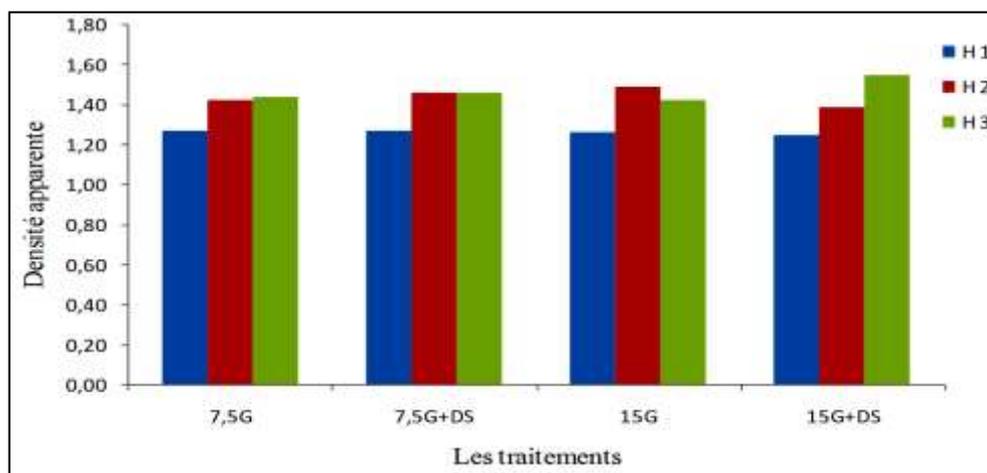


Figure 13 -Densité apparente en fonction des traitements et des horizons

IV.1.3. Densité réelle

Les résultats de la densité réelle (Fig. 14), semblent évoluer de manière similaire à ceux de la densité apparente. Les valeurs obtenues avec le 3^{ème} traitement sont faibles. Cela est vraisemblablement dû à une erreur de manipulation. La densité réelle diminue de la couche superficielle à la couche inférieure. Une légère diminution de ce paramètre est remarquée pour le 4^{ème} traitement.

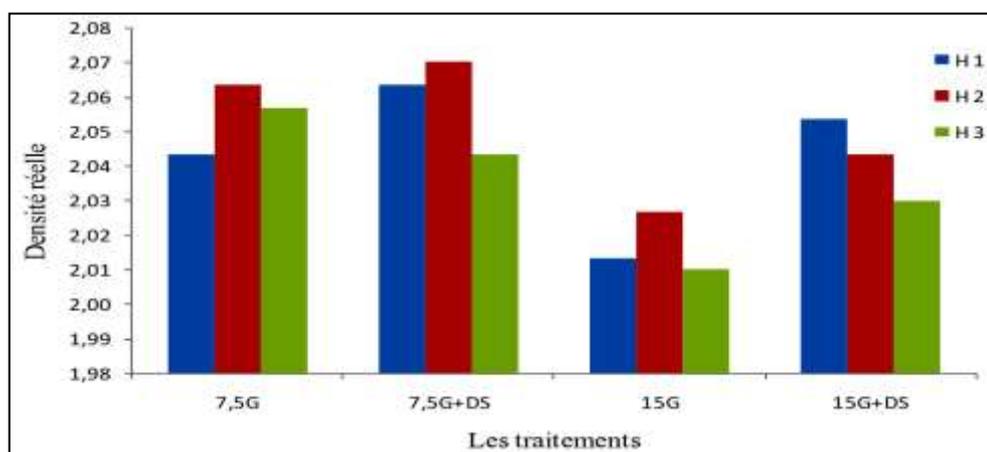


Figure 14 -Densité réelle en fonction des traitements et des horizons

IV.1.4. Porosité

Les résultats de la porosité (Fig. 15), montrent qu'il n'y pas un effet de traitement sur ce paramètre. La porosité diminue de la couche supérieure à la couche inférieure. Il est évident que c'est l'horizon de surface qui jouit d'une porosité importante (supérieure à 50 %) en raison de la présence d'une culture sur place qui joue un rôle structural par sa densité racinaire et biologique par le développement d'une faune spécifique.

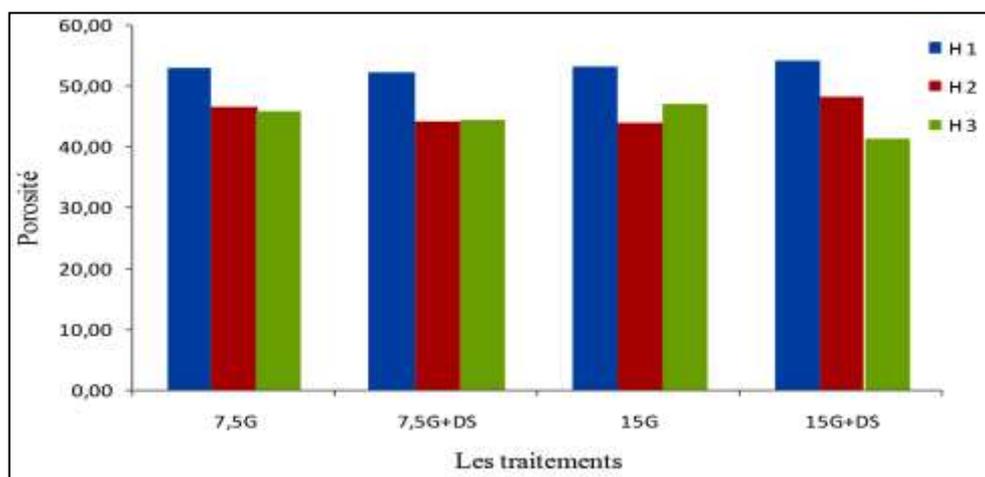


Figure 15 -Porosité en fonction des traitements et des horizons

IV.1.5. Réserve utile

Les résultats de la réserve utile RU (Fig.16), montrent qu'elle est plus importante dans les horizons inférieurs par rapport à l'horizon superficiel. Les trois derniers traitements semblent diminuer la RU du sol par rapport au premier.

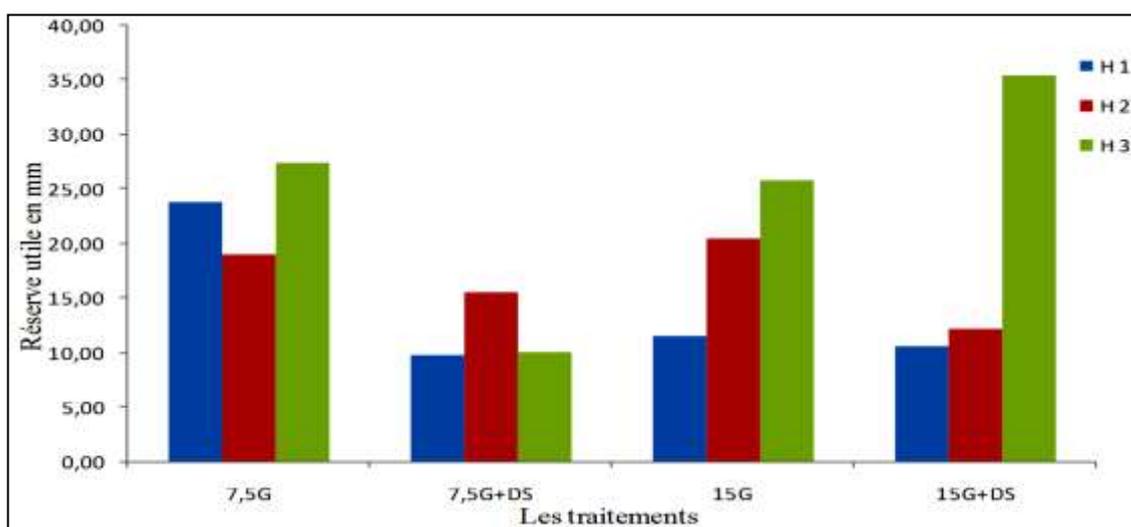


Figure 16 -Réserve utile en fonction des traitements et des horizons

IV.1.6. Matière organique

Globalement le taux de matière organique (Fig.17), varie entre 2,4 à 3 %. Les résultats de ce paramètre montrent que les 4 traitements ont légèrement augmenté le taux de matière organique dans les trois horizons. Il n'y a pas de variation importante entre les horizons.

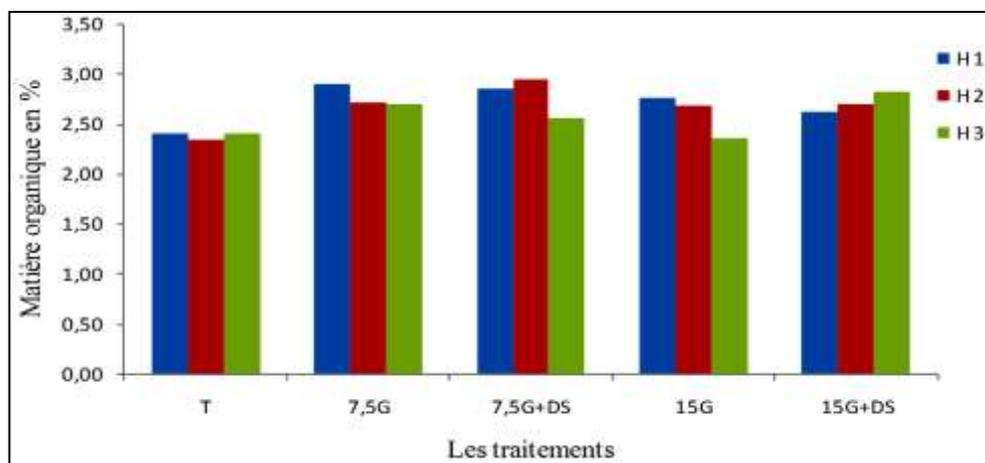


Figure 17 -Matière organique en fonction des traitements et des horizons

IV.1.7. Calcaire totale

Les résultats de la teneur en calcaire total (Fig.18), est très variable en fonction des traitements. Le DS semble augmenter la teneur en calcaire total par rapport au gypse qui semble la diminuer. La répartition du calcaire total à travers les horizons montre globalement l'horizon intermédiaire défavorisé pour les traitements avec uniquement le gypse.

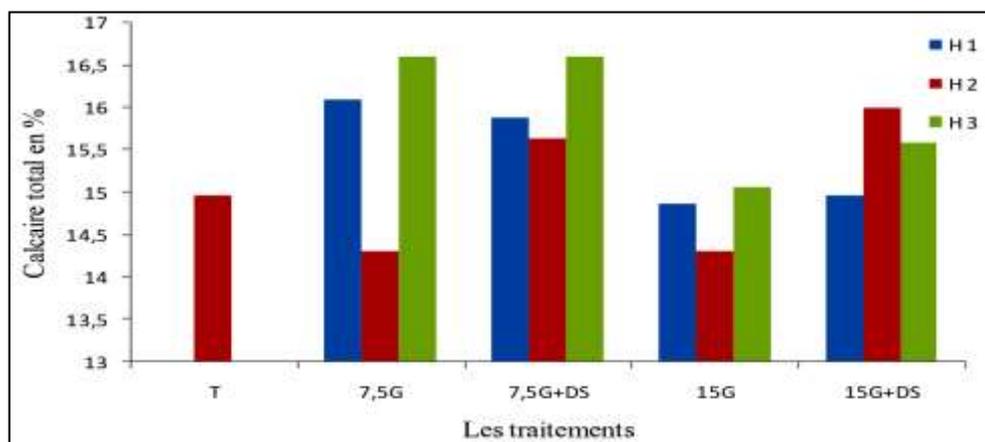


Figure 18 -Calcaire total en fonction des traitements et des horizons

IV.1.8. Calcaire actif

Nous remarquons (Fig. 19), que le calcaire actif diminue globalement sous l'effet des amendements par rapport au témoin. Il apparaît que la dose de gypse de 15t élève le taux de calcaire actif par rapport à la dose de 7,5.

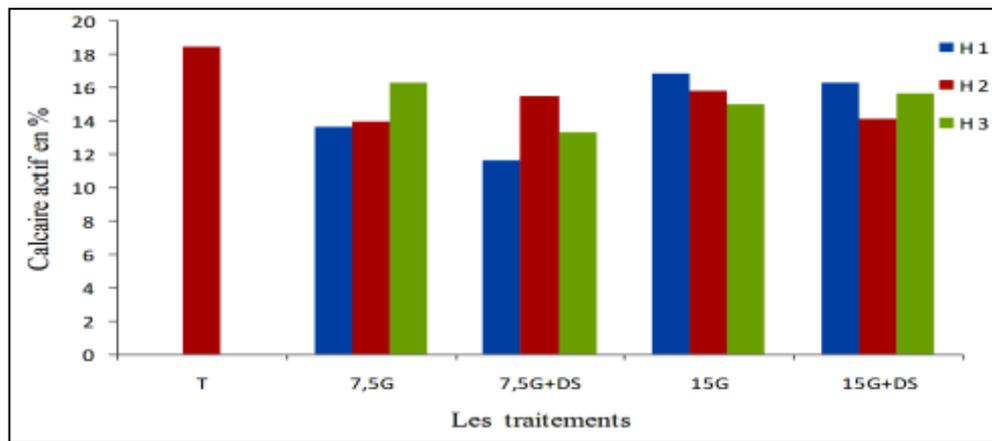


Figure 19 -Calcaire actif en fonction des traitements et des horizons

IV.2. Caractéristiques chimiques des sols

IV.2.1. pH

Dans la parcelle témoin (Fig.20), le pH est particulièrement élevé pour la couche superficielle et intermédiaire. Dans la couche inférieure il enregistre la plus petite valeur du pH. Les quatre autres traitements par le gypse et le DS ne semblent pas affecter les valeurs de ce paramètre. Globalement le pH de tous les profils et horizons varie entre 7 à 7,7, c'est-à-dire dans la gamme proche du pH neutre.

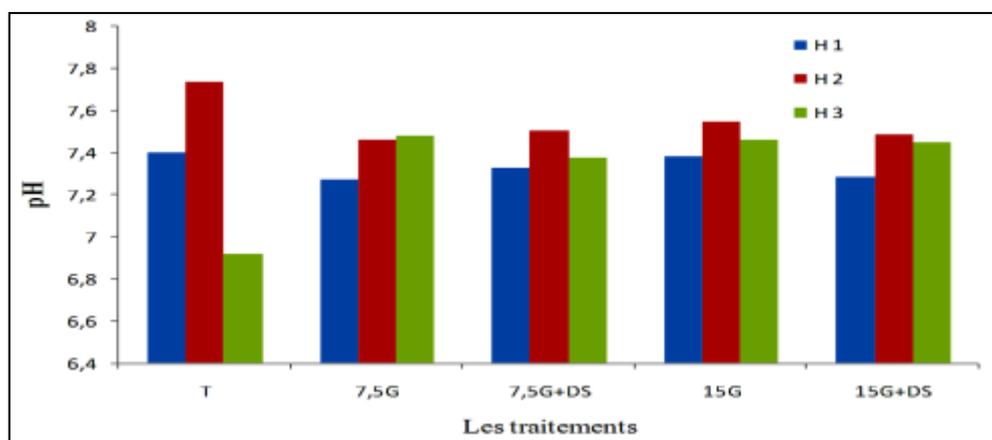


Figure 20 -Potentiel hydrique en fonction des traitements et des horizons

Dans les variations du pH (tableau 6 annexe 2), la part d'influence des traitements est de 5% et celle des horizons de 41% (CV = 1,38%).

IV.2.2. Conductivité électrique

La conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CE) dans les trois horizons du profil (Fig. 21), montre que l'essentiel des sels est concentré dans la couche inférieure du sol. Par rapport au témoin, la CE augmente pour les horizons supérieure et intermédiaire sous l'effet du gypse. Pour

l'horizon inférieur la CE diminue pour tous les traitements par rapport au témoin. L'ajout de DS ne semble pas changer de manière importante la répartition des sels à travers les horizons. Néanmoins, la CE diminue légèrement pour le 4^{ème} traitement (15G+DS).

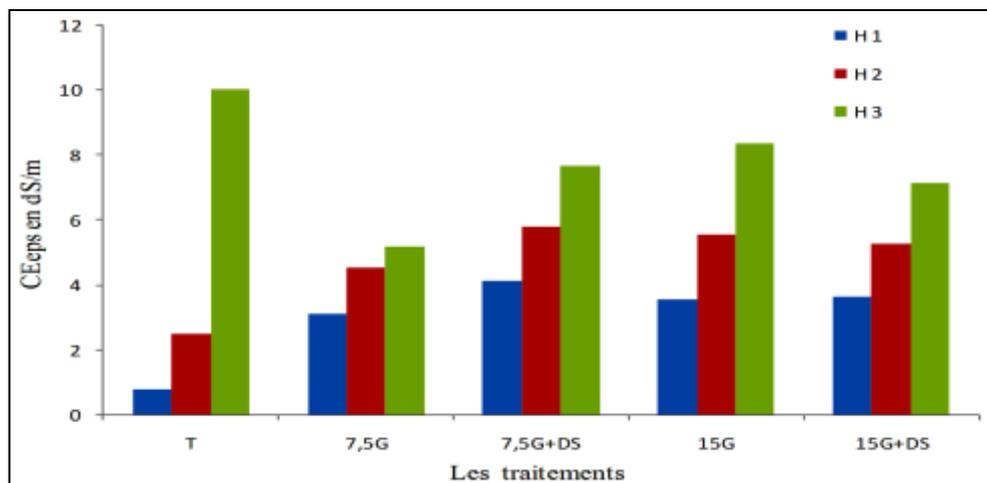


Figure 21 -Conductivité électrique en fonction des traitements et des horizons

IV.2.3. Capacité d'échange cationique

Par rapport au témoin (Fig. 22), les quatre traitements en gypse et en DS ne montrent pas d'effets sur l'évolution de CEC dans le profil du sol (les valeurs faibles enregistrées dans les deux derniers traitements (H1-15G et H3-15G+DS) sont vraisemblablement des erreurs de mesure).

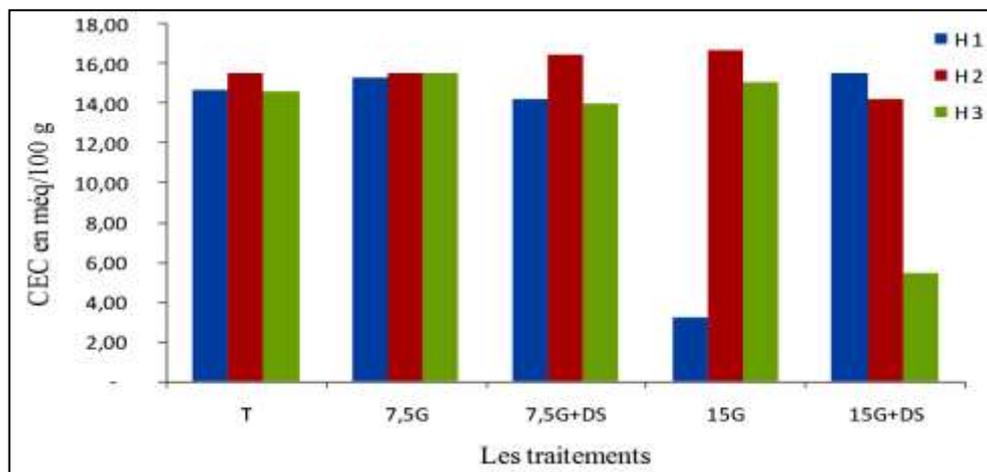


Figure 22 -Capacité d'échange cationique en fonction des traitements et des horizons

IV.2.4. Bilans ioniques

IV.2.4.1. Bilan cationique

Pour le traitement témoin (Fig. 23), la concentration en cations est importante dans l'horizon inférieur H3 par rapport aux horizons intermédiaire H2 et supérieur H1. Suite à la dose de 7,5 t.ha⁻¹ de gypse, les concentrations en cations augmentent pour H1 et H2 et diminuent pour H3.

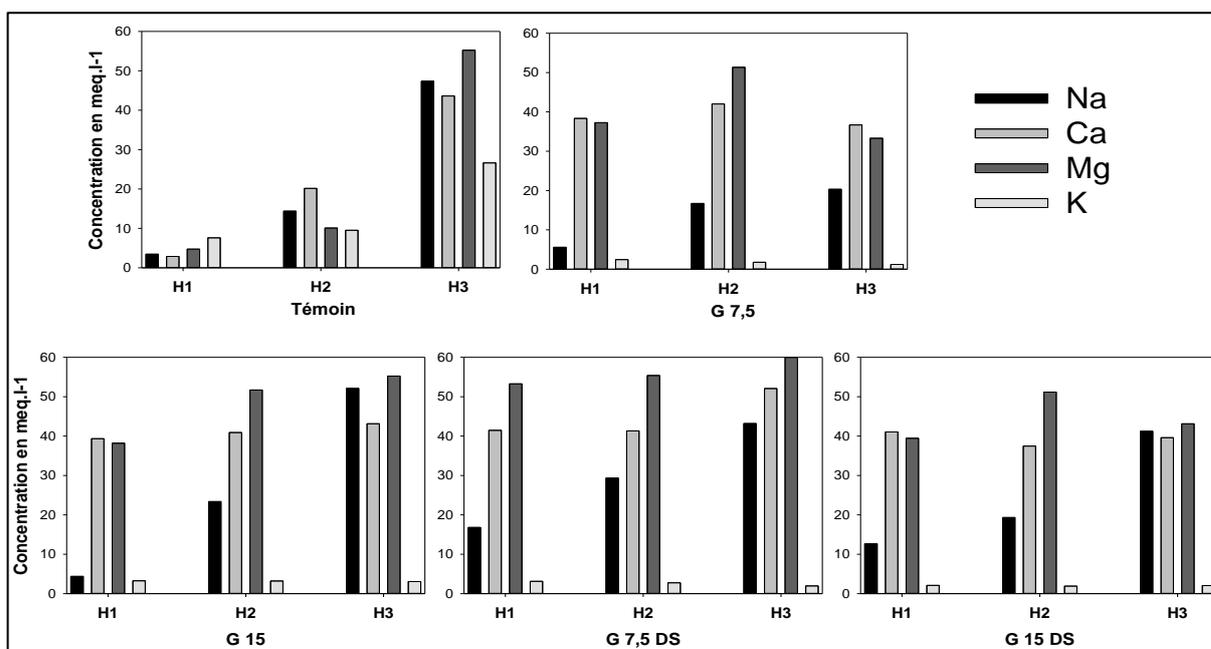


Figure. 23 – Evolution de la concentration cationique en fonction des traitements et des horizons

La concentration de K diminue fortement pour les trois horizons. Les deux traitements de G15 et G7,5+DS n'enregistrent pas de modifications importantes par rapport au traitement G7,5. Néanmoins, les concentrations relatives de Na, Ca et Mg augmentent dans le troisième horizon H3.

Le traitement G15+DS, semble entrainer une diminution de la concentration en Ca, Mg et Na. Ce dernier, semble marquer un début de diminution de la concentration en ces différents éléments particulièrement pour l'horizon de surface H1.

L'analyse de la variation de la concentration du Na dans la couche superficielle H1 arable, montre une forte augmentation due aux deux derniers traitements. Dans ce cas le DS semble augmenter la concentration de cet élément dans le profil du sol.

IV.2.4.2. Bilan anionique

La concentration en chlorures (Fig. 24), diminue de la couche superficielle H1 à la couche inférieure H3 pour tous les traitements. Nous remarquons une augmentation de la concentration en sulfate sous l'effet de tous les traitements par rapport au témoin. Il n'y a pas de différences importantes en concentration de cet élément entre les traitements

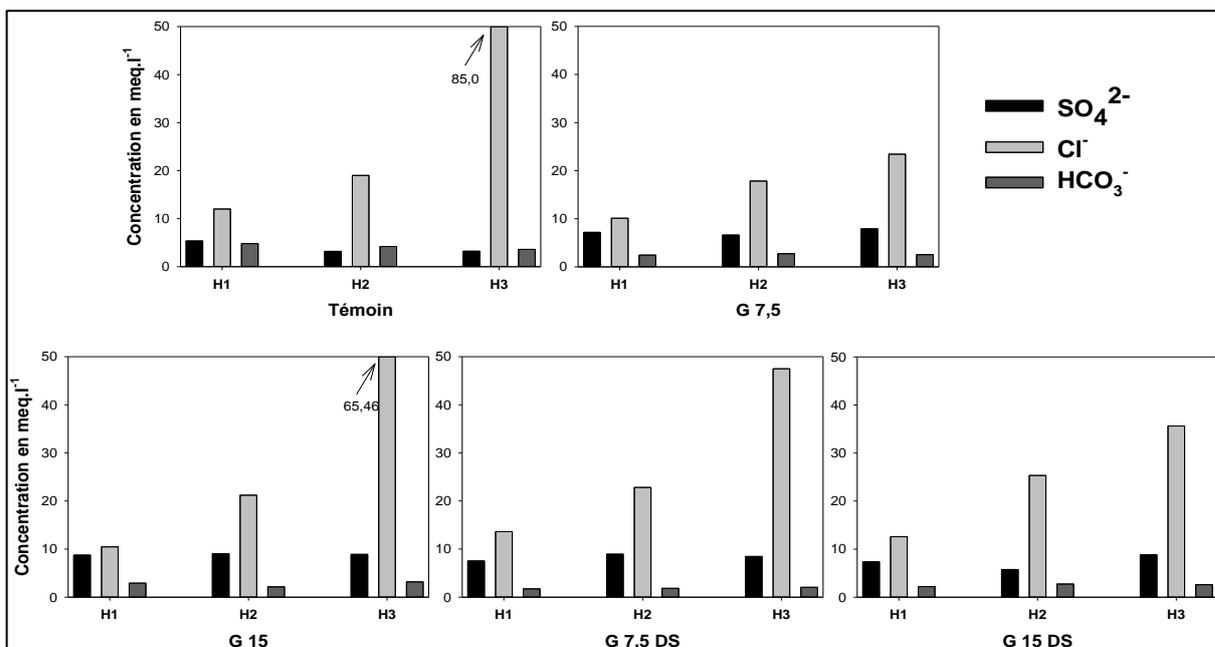


Figure 24 -Evolution de la concentration anionique en fonction des traitements et des horizons

Dans tous les cas, la concentration en HCO_3^- enregistre des variations très faibles entre les traitements par rapport au témoin. Dans les variations du HCO_3^- (tableau 22 annexe 2), la part d'influence des traitements de 35% et celle des horizons de 4%, $\text{CV} = 18,46\%$.

IV.2.5. SAR

Par rapport au témoin (Fig. 25), la dose de 7,5t de gypse diminue légèrement les valeurs du SAR. L'addition du DS à cette dose augmente les valeurs des SAR dans les trois horizons. Une dose double du gypse (15G) sans DS, entraîne une diminution du SAR dans les horizons superficiel et intermédiaire et une augmentation dans l'horizon inférieur. Cette même dose ajoutée au DS augmente le SAR dans l'horizon superficielle et le diminue dans les couche intermédiaire et inférieure.

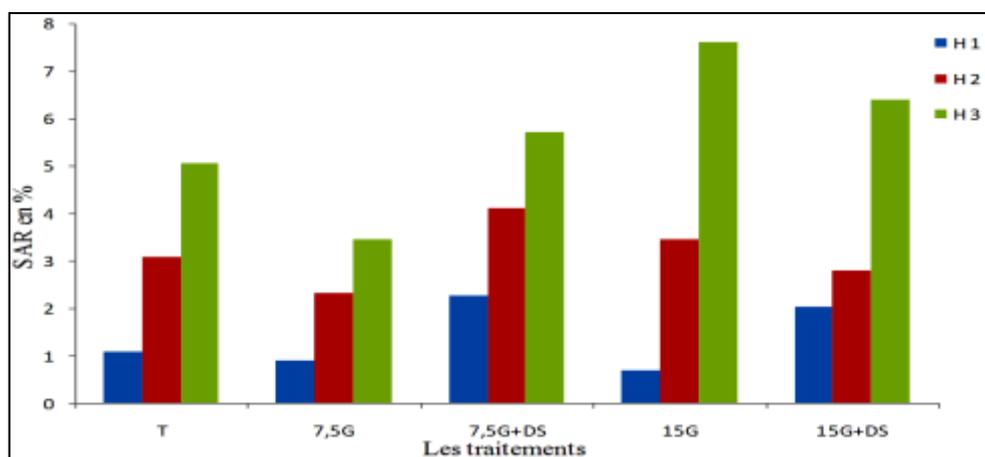


Figure 25 -Sodium Absorption Ratio en fonction des traitements et des horizons

Conclusion

Dans ce travail expérimental, nous avons essayé d'évaluer les effets d'amendements à base de gypse et de DS pour la mise en valeur des sols salés de la station expérimentale de l'INRAA El H'Madena constitués d'une forte teneur d'argile dépassant les 60% (Tableau 4, annexe1).

Les paramètres physico-chimiques que nous avons utilisés pour effectuer un diagnostic de l'état des sols, montrent que leurs variations sont beaucoup plus influencées par la profondeur de mesure à travers les trois horizons du profil de sol que par les différentes doses de gypse et de DS.

Les indicateurs les plus pertinents de qualité des sols salsodiques que nous avons utilisé sont le pH, la conductivité électrique (CE) de l'extrait de pâte saturée, les bilans cationique et anionique et le taux d'adsorption du sodium (SAR).

Le pH se situe pour tous les traitements et les horizons dans une gamme proche de la neutralité.

La CE ne montre pas de réponse vis-à-vis des différentes doses d'amendement (gypse/DS). Cependant elle varie fortement avec la profondeur, le gradient de salinité est croissant de l'horizon de surface vers l'horizon inférieur.

Le bilan cationique montre une bonne réponse des amendements qui favorisent la concentration de Ca^{2+} et Mg^{2+} par rapport à Na^+ au fur et à mesure que la dose augmente à l'exception du dernier traitement qui semble marquer un début de diminution du rapport $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) / \text{Na}^+$.

Le bilan anionique montre une prédominance des chlorures en concentration qui demeure inchangée par rapport au témoin. Sous l'effet des amendements, l'horizon inférieur se concentre fortement en chlorures.

Le SAR ne semble pas influencer par les différentes doses d'amendement et augmente fortement de l'horizon de surface vers les horizons intermédiaire et inférieur.

Ces résultats militent en faveur d'effets opposés entre le gypse et le DS, qui est présenté par les initiateurs du projet Algéro-Chinois comme un amendement organique sans donner sa composition précise. Tel que le dispositif expérimental est conçu, il est pratiquement impossible d'évaluer les effets relatifs de chacun des deux matériaux sur l'état des sols étudiés. En plus, l'usage des doses à appliquer est lui-même problématique étant donné qu'il est nécessaire d'optimiser les proportions de chacun des constituants dans le mélange. Il réside aussi la question du coût de cet amendement pour son usage à grande échelle.

Ce travail se présente comme une analyse pertinente pour l'installation d'un essai où les deux types d'amendement, le gypse et le DS, soient conduit séparément pour maîtriser les effets relatifs de chacun avant d'escompter les utiliser dans le cadre d'une association qu'il importe de bien maîtriser expérimentalement.

Références bibliographiques

ABBANI B, et ABDE-LALI Y, 2005. Contribution à l'étude de la qualité des eaux phréatiques sur l'état de dégradation de la palmeraie d'Ouagla. Mémoiring. Unvi d'Ouargla. p21.

Agassi M., Shainberg I ET Morni J., 1981: Effet of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. Soil sci. Soc. Am. j. 45, pp: 848- 851.

ANONYME a., (2006) : Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation . Conférence électronique sur la salinisation : Organisée et coordonnée par: IPTRID du 6 février au 6 Mars 2006, 20 p.

ANTIPOLIS S., 2003 : Les menaces sur les sols dans les pays Méditerranéens. Les cahiers du plan bleu, Vol.2 :44-49.

ASHRAF M et HARRIS., 2004: Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants.Plant Sci., 166: 3-6.

Ashraf, M., Foolad M.R. (2005): Pre-sowing seed treatment-a shotgun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions. Advances in Agronomy, 88: 223-271.

Aubert G., 1983. Observation sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodiques. Cah. ORSTOM. Ser. ped.Vol xxx n°1, pp = 73-78.

Ayers et Westcot, 1988 : La qualité de l'eau en agriculture. Bul. FAO d'Irrig. Et de Drain. 29 Rev. 1, Rome, 180 p.

Badraoui M. et Merzouk A. (1994). Changes of soil qualities under irrigation: the effect of salt accumulation on water retention by Vertisols. In CIHEAM ed, farm water management techniques, Rabat, Morocco.

Badraoui M., Soudi B., Lahlou M., Kabbassi M., Aniba K. (1998a). Evaluation de la salinité des sols dans le périmètre irrigué des Doukkala: Suivi et diagnostic dans les zones vulnérables. In Soudi B. ed., Etude de l'impact de l'intensification de la mise en valeur agricole sur la qualité des sols et des eaux: proposition de pratiques rationnelles. Projet d'initiatives propres, AGCD-UCL-IAV.

Badraoui M., Soudi B., Merzouk A., Farhat A., M'hamdi A. (1998b). Changes of soil qualities under irrigation in the Bahira region of Morocco: Salinization. Advances in GeoEcology 31.

Baize D et Girard B., 1995 : Guide pour la description des sols. INRA. Paris, 375p.

BELLAGUE D et al., 2011 :Séminaire Eau et Environnement dynamique spatio –temporelle de la salinité des sols du bas–Cheliff : Cas de la station INRAA Hmadna (Relizane) .

BOT A., NACHTERGAELE, F. et YOUNG, A. (2000). Land resource potential and constraints at regional and country levels. World Soil Resources Report N° 90. Rome: FAO of UN.

C.P.C.S., 1967. Classifications des sols. Lab Geol.-Pedol., E.N.S.A., Paris-Grignon, 87 p.

CHERBUY B., 1991. Les sols sal's et leur réhabilitation. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie., Agrocontact, Rennes, 90p.

Chevery C., 1972 : Exemple d'application des travaux de l'U.S.S.L (1963 – 1968) sur l'alcalinisation des sols soumis à l'action bicarbonatée. Cah. ORSTOM. Sér. pédo. 10 (2), pp : 193-203.

Cramer GR. (2002): Sodium-calcium interactions under salinity stress. In: "Salinity. Environment-Plants-Molecules". Eds. A. Läuchli and U. Lüttge. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 205-227 (2002).

DAOUD Y. 1993- Contribution à l'étude des sols plaines du cheliff. Le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux, thèses Doct d'Eta. INA Alger, 233p.

DAOUD Y. et CHEVERRY C. et ROBERT M., 1993. Rôle physico-chimique du magnésium dans les sols sales des plaines du Cheliff (Algérie). Sci. Sol. Vol – 31, n 4, pp. 151 – 160.

DAOUD Y., 1983. Contribution à l'étude de la dynamique des sels dans un sol irrigué du périmètre de Haut Cheliff (Algérie). Thèse doc. ING., RENNE, 194p.

Denden M., Bettaieb T., Sahli A., Mathlouthi M. (2005): Effet de la salinité sur la fluorescence chlorophyllienne, la teneur en proline et la production florale de trois espèces ornementales. Tropicultura. Vol. 23 N°4, pp220-226.

DJILI K., 2000. Contribution a la connaissance des sols du Nord de l'Algérie : Création d'une banque de données informatises et l'utilisation d'un système d'information géographique pour la spatialisation et la vectorisations des données pédologique. Thèse doc. INA. Alger. 384p.

Douaoui A., (2004) : Infiltrabilité et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas Chélif (Algérie). Mesures au laboratoire sous simulation de pluie. EGS, Vol. 11, N°4, 2004, 379-392.

Douaoui A., 2005. Variabilité spéciale de la salinité et relation avec certain caractéristiques des sols du plain du bas Chélif approche de la géostatistique et de la télédétection. Thèse de doctorat d'état en agronomie, INA, Alger. 255 p.

Duchauffour ph., 1976 : Principes d'une classification écologique des sols. Agrochimica, XX, 4-5, pp : 313 – 323.

Duchauffour ph., 1983 : Pédogénèse et classification. 2 eme édition. Masson. Paris, 466 p.

Duchauffour ph., 1988 : Abrèges de pédologie. 2 eme édition. Masson. Paris. Milan. Barcelone. Mexico, 224 p.

DURAND J.H, RENTY Y., 1983 Les sols irrigables. Etude pédologique. 190P

Durand J.H., 1953 : étude géologique, hydrogéologique et pédologique des croutes en Algérie. S.E.S. Alger, 209 p.

Durand J.H., 1983 : Les sols irrigables, Agence de coopération culturelle et technique. P.U. France, 190 p.

F.A. O, 2005: Annuaire statistique de la FAO

F.A.O., 2008: Annuaire statistique de la FAO

FAO., 1984- Mise en valeur et amélioration des terres; Traitements physiques, chimiques et organiques, amendements chimiques et organique.

Farhat A. (1995). Effets de l'irrigation par pivot sur la qualité des sols dans la Bahira: situation actuelle et perspectives de développement. Thèse de 3ème cycle, IAV Hassan II, Département Sci. Sol, Rabat, Maroc.

GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTBEL J, MOREL J.L., 2005. Sols et environnements, cours, exercices et étude de cas. Edi : Dunod, Paris. 475p.

Girard P., Prost J., Bassereau P., 2005. Passive or Active Fluctuations in Membranes Containing Proteins Phys. Rev. Lett. 94: 60-64.

GREGORY B, 2005. Ecophysiologie de semis de coniferes ectomycorhizes en milieu salin et sodique. Thèse de doctorat en science forestières 190p.

HADJ Miloud Samir., 2010. Morphologie et propriétés des Solonchaks références.

HALITIM A., 1973. Etude expérimentale de l'amélioration des sols sodiques d'Algérie en vu de leur mise en valeur. Thèse doct. 3 cycles, Univ. RENNE, 170p.

Halitim A., 1988. Sols des régions arides d'Algérie. OPU, Alger, 384 p

HALITIM A., ROBERT M., TESSIER D ET PROST R., 1984 : Influence des cations échangeables (Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++}) et la concentration saline sur le comportement physique (rétention en eau, conductivité hydraulique de la mont morillonite agronomie. 4 (5), pp : 451 – 459.

HAMDI A, 1999. Saline irrigation and management for sustainable use In: Advanced Short Course on saline irrigation Proceeding, Agadir.152-227.

HAMMIA I, 2012., Impact de l'irrigation sur la salinisation des sols dans les palmeraies de Oued Righ. Mém. Ing. Agro, université de ouargla, p18

Hassan G, Persaud N, Reneau R.B., 2005. Utility of hydrus-2D in modeling profile soil moisture and salinity dynamics under saline water irrigation of soybean. Soil sciences,170, 1, 28 –37.

HILLEL D., 2000: Salinity Management for Sustainable Irrigation. The World Bank, Washington, D.C.

Kidari H., Contribution à l'étude de l'influence de l'ESP, sur le compactage. Thèse de Magister, INRAA. Alger.

Larson W.E. and Pierce F.J. (1991). Conservation and enhancement of soil quality. In evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol. 2: Technical papers. Bangkok, Thailand, Inter. Board for Soil Research and Management, 1991, IBSRAM Proceedings No 12(2).

Le Houerou H.N, 1995: Bioclimatologie et Biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. Diversité biologique, développement durable et désertification. Option méditerranéenne. Série B : études et recherches n 10 ; Cheam. Montpellier, 397 p.

LEGROS J.P., 2007. Les grands sols du Monde. Presses polytechniques et universitaires romandes, 574 p.

Loyer J.Y, 1995: Solums salsodiques, salisols et sodisols, In referential pédologique. AFES INRA. Paris, pp: 241- 249.

Mâalem S., Rahmoune C. (2009): Toxicity of the Salt and Pericarp Inhibition on the Germination of Some *Atriplex* Species. American-Eurasian Journal of Toxicologic Sciences 1 (2): 43-49.

Madhava Rao K.V ., Raghavendra A.S., Janardhan Reddy K. (2006): Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants. P41-99.

MASHALI, A., SUAREZ, D.L NABHAN H. et RABINDRA R. (2005). Integrated management for sustainable use of salt-affected soils. Rome: FAO Soils Bulletin, now printing.

Mathieu C. Et Ruellan A. (1980). Evolution morphologique des sols irrigués en région méditerranéenne semi aride. Cahier ORSTOM, Série pédologie, 13, 3-25.

MERMOUD A ., 2006 : Cours de physique du sol : Maîtrise de la salinité des sols. Ecole polytechnique fédérale de lausanne, 23p.

MESSAR Mohamed Fawzi, 2007, thèse d'ingénieur, institut de sciences, filière: Agronomie. Traitement de quelques sols salés dans le périmètre de la MINA par voie chimique et organique. Mir publishers. Moscow.

Morsli B. (2007): Étude de l'intrusion marine et de ses répercussions sur la dégradation des sols : cas des zones côtières d'Alger Est. Actes des JSIRAUF

MUNNS R et al ., 1983 : Halotolerante ukaryotes. In Physiological Plant Ecology. III. Responses to the Chemical and Biological Environment. Encycl. Plant Physiol., pp. 59-135 New Series, Vol. 12C. Springer, Berlin.

Nedjraoui D., 2003: country pasture, forage resource profils. ed. FAO. Grassland and pasture crops Algérie, pp: 1-29.

OUSTANI M, 2006. Contribution à l'étude de l'influence des amendements organiques sur les propriétés microbiologiques des sols sableux non salés et salés dans les régions Sahariennes (Cas de Ouargla) .Thèse Magister. Uuniversité .Ouargla. 187p

- Ozenda P., (1982).** Les végétaux dans la biosphère. Ed : Edoine. Paris. pp431.
- Robert M. (1996).** Le sol: interface dans l'environnement, ressource pour le développement. Masson, Paris, p.241
- S.O.C.O, 2009.** Sustainable Agriculture and soil conservation : Salinisation et codification <http://soco.jrc.ec.europa.eu>
- SERVANT (J.), 1978.** - La salinité dans les sols et les eaux. Caractérisation et problèmes d'irrigation-drainage. Bull. du BRGM, section IV, n° 2.142p.
- Servant J.M., 1975 :** Etude pédologique des sols halomorphes. Thèse. Doc. Uni. Montpellier, 194p.
- Servant J.M., 1970.** Etude expérimentale de l'influence des conditions salines sur la perméabilité des sols sales de la région méditerranéenne Française. Ann de l'I.N.A., El Harrach, Vol. VI, pp. 225-245.
- SERVANT J.M., 1971-** Le profil salin des sols, méthodes d'études et signification. Application aux sols halomorphes du midi de la France. Ann. Agro. 24.3, 392 p.
- Tabet. 1999 :** Intérêt d'une approche spatiale pour le suivi de la salinité des sols dans les systèmes irrigués. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Montpellier, 435pages.
- TOUAF L., 2002.** Evaluation du niveau de salinité des sols du Nord de l'Algérie. Mémoires de magister, INA, Alger, 71 p.
- U.S Salinity Laboratory, 1954-** Diagnosis and improvement of saline and alkali soil. USDA, Handbook N°60, Washington, 160p.
- Umali D.L. (1993).** Irrigation-induced salinity. A growing problem for development and the environment. World Bank technical paper 215, p.78
- Wri, 2002:** World resources institute. Drylands, people, and ecosystem goods and services: a web-based geospatial analysis.
- YAGGODINE, 1984.** Translate from the Russian by V.G. Vopyan. Agricultural Chemistry.

Annexes

Annexe 1

Tableau 01 : Résultats obtenus de l'analyse de la conductivité électrique, pH, SAR, capacité d'échange cationique, calcaire actif et calcaire totale.

	Horizons	CEeps dS.m ⁻¹	pH	SAR	CEC meq.100g ⁻¹	calcaire actif %	CaCO ₃ total%
Gy 7,5	H1	3,12	7,27	0,91	15,33	13,67	16,08
	H2	4,54	7,46	2,34	15,55	14,00	14,30
	H3	5,23	7,48	3,47	15,55	16,33	16,59
Gy 15	H1	3,57	7,38	0,72	3,20	16,83	14,86
	H2	5,55	7,55	3,46	16,67	15,83	14,30
	H3	8,37	7,46	7,60	15,10	15,00	15,06
Gy 7,5+DS	H1	4,14	7,33	2,29	14,21	11,67	15,88
	H2	5,80	7,51	4,12	16,45	15,50	15,62
	H3	7,71	7,38	5,72	13,98	13,33	16,59
Gy 15 +DS	H1	3,65	7,28	2,04	15,55	16,33	14,96
	H2	5,28	7,49	2,82	14,21	14,17	15,98
	H3	7,17	7,45	6,39	5,44	15,67	15,57

Tableau 02 : Résultats obtenus de l'analyse de la matière organique, réserve utile, densité apparente, densité réelle, porosité et l'humidité.

	Horizons	MO%	RU	da	dr	Porosité	Humidité
Gy 7,5	H1	2,89	23,92	1,27	2,04	52,94	20,02
	H2	2,71	19,03	1,43	2,06	46,38	21,71
	H3	2,69	27,51	1,44	2,06	45,66	23,51
Gy 15	H1	2,76	11,64	1,27	2,01	53,05	25,93
	H2	2,68	20,53	1,49	2,03	43,90	24,35
	H3	2,36	25,88	1,42	2,01	46,87	26,63
Gy 7,5+DS	H1	2,85	9,86	1,28	2,06	52,08	20,15
	H2	2,94	15,64	1,47	2,07	44,05	21,79
	H3	2,56	10,14	1,46	2,04	44,26	23,84
Gy 15 + DS	H1	2,62	10,63	1,25	2,05	53,98	20,30
	H2	2,69	12,26	1,39	2,04	48,09	23,45
	H3	2,82	35,49	1,55	2,03	41,24	25,45

Tableau 03 : Résultats obtenus de l'analyse de l'évolution de la concentration bilan ionique (cationique et anionique) en fonction des traitements et des horizons.

	Horizons	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
		meq.l ⁻¹				meq.100g ⁻¹		
Gy 7,5	H1	5,56	38,35	37,27	2,43	7,18	10,12	2,45
	H2	16,71	42,03	51,33	1,74	6,62	17,84	2,73
	H3	20,31	36,69	33,31	1,22	7,89	23,44	2,53
Gy 15	H1	4,38	39,34	38,19	3,27	8,74	10,46	2,91
	H2	23,36	40,91	51,71	3,22	9,03	21,2	2,15
	H3	52,12	43,13	55,25	3,08	8,9	65,46	3,18
Gy 7,5+DS	H1	16,79	41,47	53,26	3,13	7,53	13,61	1,73
	H2	29,34	41,33	55,39	2,76	8,94	22,82	1,85
	H3	43,18	52,08	60,38	1,95	8,45	47,5	2,05
Gy 15 + DS	H1	12,66	41,06	39,45	2,1	7,35	12,58	2,21
	H2	19,32	37,46	51,18	1,9	5,77	25,33	2,75
	H3	41,22	39,61	43,13	2,04	8,82	35,63	2,6

Tableau 04: Composition granulométrique les échantillons prélevés

Granulométrie (%)		
Argile	Limon	Sable
68,5	30,26	1,24

Annexe 2

Tableau 05 : Analyse de variance de la conductivité électrique

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	%age S.C.E
Effet gypse	14,598	35	4,162						10%
Effet horizon	73,442	3	4,866	2,266	0,10546			NS	50%
Interaction	6,097	2	36,721	17,101	0,00003			HS	4%
Var Résiduelle	51,534	6	1,016	0,473	0,82235			NS	35%
Var Totale	145,671	24	2,147			1,465	27,42%		100%

Tableau 06 : Analyse de variance du pH

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	%age S.C.E
Effet gypse	0,024	35	0,015						5%
Effet horizon	0,213	3	0,008	0,756	0,53257			NS	41%
Interaction	0,029	2	0,107	10,181	0,00069			HS	6%
Var Résiduelle	0,251	6	0,005	0,459	0,83234			NS	49%
Var Totale	0,517	24	0,01			0,102	1,38%		100%

Tableau 07: Analyse de variance du Sodium Absorption Ratio

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	%age S.C.E
Effet gypse	19,086	35	7,409						7%
Effet horizon	112,973	3	6,362	1,41	0,26375			NS	44%
Interaction	18,942	2	56,487	12,517	0,00022			HS	7%
Var Résiduelle	108,309	6	3,157	0,7	0,65409			NS	42%
Var Totale	259,311	24	4,513			2,124	60,87%		100%

Tableau 08: Analyse de variance de la matière organique

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	%age S.C.E
Effet gypse	0,185	35	0,123						4%
Effet horizon	0,206	3	0,062	0,424	0,74053			NS	5%
Interaction	0,438	2	0,103	0,707	0,50738			NS	10%
Var Résiduelle	3,491	6	0,073	0,502	0,802			NS	81%
Var Totale	4,32	24	0,145			0,381	14,06%		100%

Tableau 09: Analyse de variance du calcaire total

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	%age S.C.E
Effet gypse	7,927	35	1,653						14%
Effet horizon	4,922	3	2,642	1,703	0,19207			NS	9%
Interaction	7,773	2	2,461	1,586	0,22435			NS	13%
Var Résiduelle	37,247	6	1,296	0,835	0,55625			NS	64%
Var Totale	57,87	24	1,552			1,246	8,05%		100%

Tableau 10: Analyse de variance du calcaire actif

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	29,028	35	6,809						12%
L'effet de l'horizon	1,264	3	9,676	1,433	0,25705			NS	1%
Interaction	46,014	2	0,632	0,094	0,9105			NS	19%
VAR Résiduelle	162	6	7,669	1,136	0,37208			NS	68%
VAR Totale	238,306	24	6,75			2,598	17,48%		100%

Tableau 11: Analyse de variance de la densité réelle

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	0,01	35	0,008						4%
L'effet de l'horizon	0,002	3	0,003	0,303	0,82441			NS	1%
Interaction	0,002	2	0,001	0,071	0,93153			NS	1%
VAR Résiduelle	0,256	6	0	0,024	0,99			NS	95%
VAR Totale	0,269	24	0,011			0,103	5,05%		100%

Tableau 12: Analyse de variance de la densité apparente

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	0,003	35	0,018						0%
L'effet de l'horizon	0,293	3	0,001	0,069	0,97512			NS	45%
Interaction	0,046	2	0,147	11,588	0,00034			HS	7%
VAR Résiduelle	0,303	6	0,008	0,603	0,72685			NS	47%
VAR Totale	0,645	24	0,013			0,112	8,08%		100%

Tableau 13: Analyse de variance de la porosité

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	11,448	35	75,726						0%
L'effet de l'horizon	513,598	3	3,816	0,045	0,98649			NS	19%
Interaction	83,294	2	256,799	3,018	0,06641			MS	3%
VAR Résiduelle	2042,077	6	13,882	0,163	0,98271			NS	77%
VAR Totale	2650,418	24	85,087			9,224	19,33%		100%

Tableau 14: Analyse de variance de l'humidité

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	90,857	35	10,845						24%
L'effet de l'horizon	69,453	3	30,286	3,714	0,02496			S	18%
Interaction	23,538	2	34,727	4,258	0,02569			S	6%
VAR Résiduelle	195,715	6	3,923	0,481	0,81677			NS	52%
VAR Totale	379,562	24	8,155			2,856	12,39%		100%

Tableau 15: Analyse de variance de réserve utile

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	421,709	23	106,162						17%
L'effet de l'horizon	495,255	3	140,57	1,825	0,19559			NS	20%
Interaction	600,474	2	247,627	3,215	0,07519			MS	25%
VAR Résiduelle	924,288	6	100,079	1,299	0,32836			NS	38%
VAR Totale	2441,725	12	77,024			8,776	47,33%		100%

Analyse de bilan ionique

Tableau 16: Analyse de variance du Ca²⁺

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	199,674	35	41,124						14%
L'effet de l'horizon	56,372	3	66,558	1,726	0,18728			NS	4%
Interaction	257,801	2	28,186	0,731	0,49587			NS	18%
VAR Résiduelle	925,49	6	42,967	1,114	0,38364			NS	64%
VAR Totale	1439,338	24	38,562			6,21	15,10%		100%

Tableau 17: Analyse de variance du Na⁺

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	1226,146	35	372,875						9%
L'effet de l'horizon	5216,189	3	408,715	1,746	0,1833			NS	40%
Interaction	990,161	2	2608,095	11,141	0,00042			HS	8%
VAR Résiduelle	5618,133	6	165,027	0,705	0,65006			NS	43%
VAR Totale	13050,63	24	234,089			15,3	64,43%		100%

Tableau 18: Analyse de variance du Mg²⁺

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	1211,914	35	270,917						13%
L'effet de l'horizon	649,032	3	403,971	1,395	0,26797			NS	7%
Interaction	671,971	2	324,516	1,121	0,34349			NS	7%
VAR Résiduelle	6949,169	6	111,995	0,387	0,88043			NS	73%
VAR Totale	9482,086	24	289,549			17,016	35,83%		100%

Tableau 19: Analyse de variance du K⁺

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	10,583	35	0,75						40%
L'effet de l'horizon	2,596	3	3,528	7,584	0,00104			TS	10%
Interaction	1,895	2	1,298	2,79	0,07988			MS	7%
VAR Résiduelle	11,164	6	0,316	0,679	0,6695			NS	43%
VAR Totale	26,238	24	0,465			0,682	28,40%		100%

Tableau 20: Analyse de variance du SO₄⁻

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	17,435	35	3,206						16%
L'effet de l'horizon	6,161	3	5,812	1,857	0,16264			NS	5%
Interaction	13,503	2	3,08	0,984	0,3902			NS	12%
VAR Résiduelle	75,099	6	2,251	0,719	0,63949			NS	67%
VAR Totale	112,199	24	3,129			1,769	22,29%		100%

Tableau 21: Analyse de variance du Cl⁻

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	1119,524	35	387,907						8%
L'effet de l'horizon	6131,416	3	373,175	2,014	0,13757			NS	45%
Interaction	1879,237	2	3065,708	16,547	0,00004			HS	14%
VAR Résiduelle	4446,575	6	313,206	1,691	0,16604			NS	33%
VAR Totale	13576,75	24	185,274			13,612	53,38%		100%

Tableau 22: Analyse de variance du HCO₃⁻

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.	Significatif	Pourcentage de S.C.E
l'effet de gypse	3,95	35	0,321						35%
L'effet de l'horizon	0,485	3	1,317	6,552	0,00223			TS	4%
Interaction	1,969	2	0,243	1,207	0,31694			NS	18%
VAR Résiduelle	4,823	6	0,328	1,633	0,18077			NS	43%
VAR Totale	11,228	24	0,201			0,448	18,46%		100%