



Mémoire élaboré en vue d'obtention d'un MASTER

En Science Biologique.

Spécialité : Protection des Ecosystèmes

Thème

**Effet de la salinité sur les propriétés mécaniques
du sol de la limite d'Es sebikha (El Mahmel),
Khenchela**

Présenté par : Mebarkia Djihane

Abdelhamid Bouthaina

Devant le jury :

Président :	BOULABAIZ Mahrez	MCA	Université de Khenchela
Examinatrice :	BERKANI Cherifa	MCB	Université de Khenchela
Encadrant :	DIB Dounia	MCA	Université de Khenchela

Année 2021/2022.

Dédicace

-À qui je le préfère à moi-même, car elle s'est sacrifiée pour moi et n'a ménagé aucun effort pour me rendre heureux (ma chère mère).

-Nous marchons sur les chemins de la vie, et celui qui contrôle nos esprits reste celui avec un joyeux visage (mon cher père).

-À mes frères "Badie" et "Badreddine"

-À mes sœurs "Zaineb" et "Ibtissem" que Dieu me bénisse.

-À le Mari de ma soeur et l'ensemble de ma famille.

-À toutes mes amies et surtout à Nadjwa, Halima, Rahil, Djihane et Ilham.

-À mon encadrante: Mme Dib Dounia que je remercie pour sa confiance.

-Grâce à Dieu, à mes professeurs Boulabaiz Mahrez et Berkani Cherifa et à lui j'aurai le mérite d'être parmi ceux et celles qui ont pu achever leurs études dans de bonnes conditions.

-À toutes les personnes qui m'aiment et qui m'encouragent.

-À toutes la promotion de 2022

Bouthaina

Dédicace

Au nom de Dieu, le Très Miséricordieux,

Je dédie cette note à mon honorable famille, en particulier à mon frère Ahmed et à ma sœur Yakin et Hiba, qui m'ont soutenu à chaque étape de mon parcours et m'ont soutenu.

Je dédie également à ma chère mère, en la remerciant de m'avoir encouragé à terminer mon travail

, ainsi qu'à mes amies Ilham et Halima et Buthaina, et Hadjer merci pour vos conseils,

Et je le dédie à la personne la plus proche de moi, qui m'a également soutenu à chaque pas, Seif El-Din.

Enfin, je dédie ce mot à mon cher père, que Dieu lui fasse miséricorde, qui a toujours rêvé de me voir diplômé universitaire

Djihane

Remerciement

Le début de nos remerciements à Dieu Tout-Puissant, qui nous a aidés et a renforcé notre détermination à compléter cette note. Nous Le remercions à genoux, qui nous a donné patience, défi et persévérance. Faisons de cette recherche une connaissance utile.

Le Messager de Dieu, que Dieu le bénisse et lui accorde la paix, a dit: "Celui qui ne remercie pas les gens ne remerciera pas Dieu."

Nous adressons les plus belles expressions de remerciement et de gratitude des cœurs débordant d'amour, de respect et d'appréciation pour lui. Nous vous adressons nos salutations les plus aimables et les plus belles et nous vous en adressons les deux avec toute notre affection, notre amour et notre sincérité, en vous remerciant pour tout ce que vous avez fourni et ce que vous nous avez conseillé de faire dans votre supervision de ce mémorandum. Et gratitude, Dr Dib Dounia, membres du corps professoral du collège.

Remerciements particuliers à l'ingénieur de laboratoire de l'Université de Tébessa Hamaydiya Hassan pour nous avoir donné un coup de main dans notre cheminement pour accomplir ce mémoire.

Table de matière

	Titre	page
	Dédicace	
	Remerciements	
	01. Introduction générale	01
	Partie Bibliographie	
	Chapiter01 Les propriétés mécaniques du sol	
	Introduction	02
	1. Définition du sol	02
	2. Principaux composants du sol	03
	2.1. La fraction minérale	03
	2.2. Les organismes vivants	03
	2.3. L'humus	03
	3. Caractéristique physiques du sol	03
	3.1. Poids volumique, teneur en eau, indice des vides	03
	3.2. Granulométrie	05
	3.3. Propriétés colloïdales des sols fins	06
	3.4. Rôle de l'eau	06
	3.5. Matières organiques	07
	3.6. Compactage des sols	07
	4. Classifications des sols	08
	5. Identification du sol	12
	6. Mécaniques des sols	12
	7. Sciences proches de la mécanique des sols	12
	8. Historique succinct	12
	9. Les propriétés du sol	13
	9.1. Propriété physiques	13

9.1.1. Texture	13
9.1.2. Structure du sol	14
9.1.3. Porosité	15
9.1.3.1. La porosité d'altération	16
9.1.3.2. La porosité texturales	16
9.1.3.3. La porosité structurale	16
9.1.4. Résistance mécanique	16
9.2. Propriétés chimiques	17
9.2.1. PH du sol	17
9.2.2. L'échange ionique	17
Chapiter02 Effet de la salinité sur la texture du sol	20
1. Introduction general	21
2. Généralité sur la salinité du sol	21
2.1. Définition	21
2.2. Les origines de la salinité	22
2.2.1. Marine	22
2.2.2. Lagunaire	22
2.2.3. Géologiques	22
2.2.4. Volcanique	23
2.2.5. Anthropique	23
2.3. Les type de la salinité des sols	24
2.3.1. La salinité primaire	24
2.3.2. La salinité secondaire	24
3. Développement de la salinité dans le sol	25
4. Les méthodes de mesures de la salinité du sol	26
4.1. Mesure sur le terrain	26
	26

4.1.1. La méthode électrique	
4.1.2. La méthode électromagnétique	27
4.1.3. Analyse au laboratoire	27
4.1.4. Extrait de la pâte saturée	28
4.1.5. Méthodes de détection et de mesure de la salinité	28
4.1.6. La méthode de laboratoire	28
4.1.7. Méthode in situ	28
4.1.8. La méthode à distance	28
4.1.9. Les captures électromagnétiques et électriques	28
5. La salinité dans le monde et en Algérie	29
5.1. Dans le monde	29
5.2. En Algérie	30
6. Les classes de la salinité	32
7. Facteurs influençant la salinité	33
8. La texture du sol	35
8.1. Définition	35
9. Impact de la salinité sur le sol	36
9.1. Effet de la salinité sur les propriétés physiques des sols	36
9.2. Effet de la salinité sur les propriétés chimiques des sols	36
9.3. Effet de la salinité sur l'environnement	37
10. Méthodes de lutte contre la salinité	37
Partie expérimentale	
1. Présentation générale de cadre d'étude (Sebkhet El Mahmel)	42
1.1. Localisation générale	42
Partie01 travaux sur terrain	
1. Matériel d'étude sur terrain	43
2. Méthode d'étude sur le terrain	43

Partie02 travaux dans laboratoire	44
1. Matérielles	44
2. Les appareille	44
3. Méthodes (modes opératoires)	45
3.1. Détermination de PH	45
3.2. Détermination de la conductivité, salinité, TDS	45
3.3. Détermination de chlorure, sulfates	46
3.4. Détermination de sodium, Potassium	47
3.5. Détermination de calcium et magnésium	47
3.6. Détermination de carbonate et bicarbonate	48
3.7. Analyse granulométrique	49
3.8. Matière organique	50
3.9. Détermination de la perméabilité	50
3.10. Détermination de la porosité	50
Discussion et Résultats	
I- Statistique descriptive	53
II- Granulométrie	54
III- La matière organique	55
IV- La perméabilité et la porosité	56
V-Faciès géochimiques du sol	56
VI-La relation salinité/ porosité	57
L'analyse en composantes principales	58
Conclusion	61
Références	
Annexe	
Résumé	

Liste des figures

Chapiter01 Les propriétés mécaniques du sol

Figure01 schéma simplifié des trois phases du sol	p4
Figure02 courbe granulométrique	P5
Figure03 courbes Proctor	P8
Figure04 classification triangulaire des sols fins	P9
Figure05 abaque de plasticité de Casa grande	P10
Figure06 quelque exemple de structure de sol	P15
Figure07 origine des différents types de porosité du sol	P16
Figure08 le complexe adsorbant du sol	P18
Figure09 un complexe argilo-humique	p19

Chapiter02 Effet de la salinité sur texture du sol

Figure01 superficie affectée par la salinité dans les différences régions	P29
Figure02 répartition des sols salins du nord de l'Algérie	P30
Figure03 les pourcentages de niveau du la salinité	P33
Figure04 processus de salinisation des sols et les facteurs influençant	P33
Figur05 schéma explicatif de processus de salinisation des sols	P35
Figure06 effet de sodium sur le complexe adsorbant	P37

Partie expérimentales

Figure01 Sebkhel El Mahmal	P42
Figure02 Prélèvement sur terrain	P43
Figurs03 Déterminations de PH	P45
Figures04 Détermination de la conductivité, salinité, TDS	P46
Figures05 Déterminations des éléments chimiques.	P48
Figure06 Spectrophotomètre de flamme	P48
Figure07 analyse granulométrique par tamisage	P49
Figure08 résultats de l'analyse granulométrique	P49
Figure09 Détermination de matière organique par l'étuve.	P50
Figure10 le lien salinité/porosité avant et après l'élimination	p57
Figure11 projection des variables et individus sur le plan	p59

Liste des tableaux

Chapiter01 Les propriétés mécaniques du sol

Tableau01 classification des sols	P11
Tableau02 les différentes structures du sol et leurs propriétés	P18

Chapiter02 Effet de la salinité sur la texture du sol

Tableau01 pourcentages des terres affectées par salinisation suite l'irrigation	P24
Tableau02 superficies des zones arides d'Algérie	P31
Tableau03 les superficies affectées par la salinité dans quelque périmètre	P31
Tableau04 les classes de la salinité du sol par rapport à la conductivité	P32
Tableau05 classe de salinité en fonction de la conductivité de l'extrait1/5	P32
Tableau06 classe de salinité en fonction de la conductivité de l'extrait1/10	P33
Tableau07 échelle granulométrique de la texture du sol	P36

Partie expérimentale

Tableau01 Les coordonnées des points entête georeferencie	P44
Tableau02 statistique descriptive	P53
Tableau03 classe de salinité en fonction du deux sels dessous et là CE	P54
Tableau4 résultats de la granulométrie	P55
Tableau05 résultats de la MO	P55
Tableau06 résultats de la perméabilité et porosité	P56
Tableau07 calcules des rapports caractéristiques	p57
Tableau08 Matrice de corrélation de n-Pearson	p58

Liste de l'abréviation

Dx la dimension de grain correspond à x%

WL limite de liquidité

WP limite de plasticité

Ws limite de retrait

IP indice de saturation

VBS valeur de bleu de méthylène

WOPN teneur en eau à l'optimum Proctor normal

YDOPN poids volumique sec à l'optimum Proctor normal

RTR recommandations pour les terrassements routières

TDS total dissolved solids

FAO organisme des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

USSL: United States Salinity Laboratory

Ha hectare.

Kg Kilogramme

CO₂ le dioxyde de carbone

H₂O L'eau

CO₃H₂ l'acide carbonique

HCO₃ le bicarbonate

H Hydrogen

CO₃ carbonate

Na AlSiO₃ albite

% pourcentage

NaCl chlorure de sodium

EM Ecole de ménagement

EM38 électromagnétique 38

ACE Enzyme de conversion de l'angiotensine

INSID institut national des sols de l'irrigation et drainage

Introduction générale

Introduction générale

Dans les régions arides, les sols d'une manière générale posent d'énormes problèmes de mise en valeur. Ils présentent souvent des accumulations calcaires ou gypseuses et sont la plupart du temps. Salés et sujet à l'érosion et à une salinisation secondaire (**AUBERT, 1960**). La majorité des sols salés observés en Algérie, sont rencontrés surtout sous climat aride (**DAOUD, 1983 ; HALITIM, 1988**). Cette aridité est due à la rareté des pluies qui ne pénètrent pas suffisamment profondément dans le sol pour provoquer une infiltration appréciable. C'est le cas remarquable de la région d'Ouargla où les sels affleurent à la surface du sol (**HALILAT, 1998**). La modification des propriétés du sol par les sels peut influencer la croissance des plantes et le développement du système racinaire. La réussite des cultures en sols salés ou par irrigations avec des eaux diversement minéralisées dépend d'une part des facteurs physiologiques tels que la résistance des plantes aux sels, et d'autre part, des propriétés des sols modifiées par les taux de sodium ou de magnésium échangeables et par la concentration saline de la solution du sol (**SIGALA et al, 1988 in DJAMAI, 1993**)

Sebkhet El Mahmel localisé dans la Wilaya de Khenchela, servira de terrain expérimental pour notre investigation et échantillonnages.

L'objectif de notre travail d'étudier l'action de la salinité sur une des propriétés physique limite de sebkha du sol. Pour cela, les démarches adoptées reposent, sur la collecte des échantillons, le traitement et l'analyse au laboratoire portant sur la salinité limites de sebkha. Le présent document est structuré en quatre parties :

- La première partie est une généralité bibliographique sur les propriétés mécaniques du sol.
- La deuxième partie sur la salinité sur la texture du sol.
- Dans la troisième partie: méthodes de travail, les résultats, discussion.
- En fin nous terminons ce travail par une conclusion générale dans laquelle nous présentons l'essentiel des résultats et les recommandations pour l'avenir.

Chapiter01 Les propriétés mécaniques du sol

Introduction

D'après (Stengel, et Gelin, 1999), le géologue et l'hydrogéologue appliquent le nom de sol aux couches meubles superficielles notamment à toute l'épaisseur surmontant les nappes souterraines, non saturée d'eau en permanence. C'est dans cette zone que les échanges d'eau et des solutés surviennent. Le sol se forme par l'action directe de l'atmosphère, de la biosphère et du climat sur la lithosphère, il se situe donc à l'interface entre ces différentes composantes de l'environnement et c'est ce qui rend son rôle si important et sa pollution si dangereuse

1. Définition du sol

Les définitions du sol sont liées à son utilisation. Pour un ingénieur civil le sol est un support sur lequel sont construites les routes et sont fondés les bâtiments. Pour un ingénieur d'assainissement le sol est un récipient d'égouts domestiques et municipaux. Pour l'hydrologiste ou l'hydrogéologue le sol est un manteau vivant et végétalisé permettant le cycle de l'eau. Pour l'écologue le sol est un habitat et un élément de l'écosystème qui est le produit et la source d'un grand nombre de processus et interactions chimiques, biochimiques et biologiques. On a d'ailleurs de plus en plus tendance à considérer le sol comme un écosystème à part entière, et non plus comme une composante d'un écosystème dont la base serait la végétation (Mouffok, 2003). La science qui étudie les sols, leur formation, leur constitution et leur évolution, est la pédologie. Plus généralement, aujourd'hui, on parle de science du sol, englobant ainsi toutes les disciplines (biologie, chimie, physique) qui s'intéressent pro parte au sol. De nombreux processus, autrefois considérés comme purement physico-chimiques, sont aujourd'hui attribués à l'activité des êtres vivants, comme l'altération des minéraux ou la mobilisation du fer par les sidérophores bactériens (Alzouma, 2005)

Le sol est défini par opposition au mot roche, dans sa définition géotechnique. C'est un agrégat naturel de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère. Le sol est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. On conçoit donc que la limite entre un sol altérée ne soit pas définie nettement. Le sol est un matériau et une roche meuble, ce caractère étant fondamental. Il ne suffit cependant pas à définir un sol naturel car certains matériaux produits par l'homme présentent aussi ce caractère. Par exemple les sous-

produits miniers et les granulats concassés (sable, gravier, ballast...) sont aussi des matériaux meubles. Le mécanicien des sols étudie donc aussi bien des sols naturels que des matériaux fabriqués artificiellement à partir de sols ou de roches et présentant un caractère meuble.

2. Principaux composants du sol

Le sol est un système complexe formé de très nombreux composants minéraux et Organiques soumis à des phénomènes physique, chimique et biologique en constante Interaction. Il comprend :

2.1 La fraction minérale

Un sol est une pellicule d'altération recouvrant une roche, il est formé d'une fraction Minérale et de matière organique (humus). Un sol prend naissance à partir de la roche puis il évolue sous l'action des facteurs du milieu, essentiellement le climat et de la Végétation. La pédologie est l'étude des sols. Faite de fragment de roche issus du sous-sol comprenant, du plus fins au plus gros, des argiles, des limons, des sables, et d'ions comme les anions phosphate $(\text{Po}4^{3-})$, sulfates $(\text{So}4^{2-})$ et le nitrate $(\text{No}3^-)$ les silicates tels les argiles, constituent 95% des roches de la croute terrestre ; quant au grain de sable, il s'agit d'un cristal de quarte, forme cristallines de la silice (**Ghelid, 1996**)

2.2 Les organismes vivants

Racines, champignons, invertébrés, quelques vertébrés et une multitude de microorganismes qui transforment la matière minérale (**Baize ,1989**).

2.3 L'humus

Matière organique en cours de minéralisation essentiellement issue de la feuille morte, Cadavres, excréments.

3. Caractéristiques physiques des sols

3.1 Poids volumique, teneur en eau, indice des vides

Les valeurs suivantes sont obtenues en laboratoire à partir d'essais très simples tels que pesée et passage à l'étuve.

γ_h	[kN/m ³]	le poids volumique du sol humide dans l'état où il se trouve ;
γ_d	[kN/m ³]	le poids volumique sec (après expulsion de l'eau libre) ;
γ_w	[kN/m ³]	le poids volumique de l'eau, égal à 9,81 kN/m ³ ;
γ_s	[kN/m ³]	le poids volumique des grains solides (en général compris dans la fourchette 26 à 28 kN/m ³) ;
w	[%]	la teneur en eau : rapport du poids d'eau au poids de sol sec ;
w_{sat}	[%]	la teneur en eau à saturation : l'eau garnit tous les vides ;
e		l'indice des vides, rapport du volume des vides (air + eau) au volume des grains ;
n		la porosité, rapport du volume des vides au volume total ;
S_r	[%]	le taux de saturation, rapport du volume d'eau au volume des vides ;
γ_{sat}	[kN/m ³]	le poids volumique du sol saturé ;
γ'	[kN/m ³]	le poids volumique immergé : $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$.

Le petit schéma de la figure 1 permet de retrouver facilement les relations suivantes
(En considérant que le poids de l'air est nul).

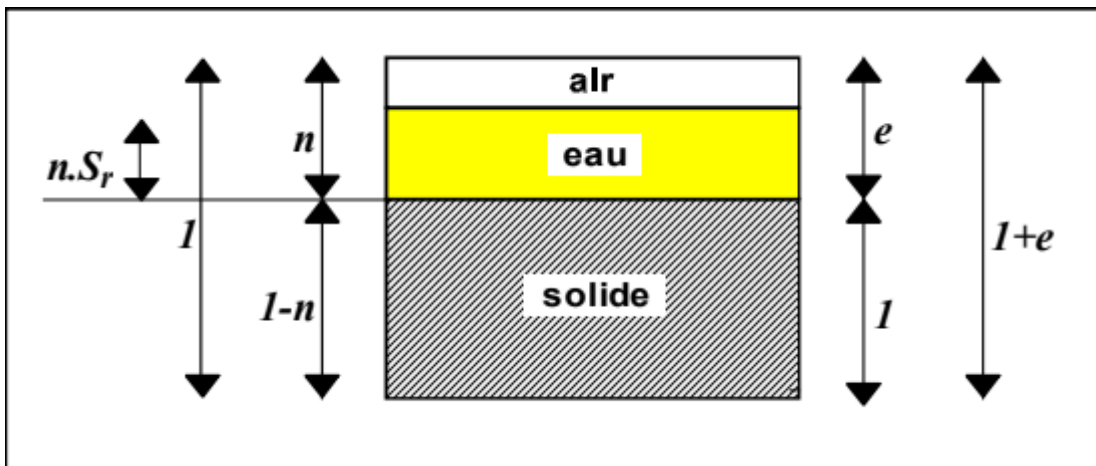


Figure 1- schéma simplifié des trois phases du sol

3.2 Granulométrie

La courbe granulométrique représente le pourcentage en poids des grains de dimension inférieure à D en fonction de la dimension D d'un grain. On l'obtient par tamisage pour les grains de dimension supérieure à 80 μm et par densimétrie pour les grains de dimension inférieure à 80 μm . En densimétrie, D est le diamètre d'une sphère de même poids que le grain. En tamisage c'est la maille du tamis Soit Dx la dimension de grain correspondant à x % en poids de tamisât (ce qui passe au travers du tamis). On appelle coefficient d'uniformité (ou de HAZEN) le rapport D_{60} / D_{10} Un sol tel que $D_{60} / D_{10} < 3$ est dit à granulométrie uniforme ; un sol tel que $D_{60} / D_{10} > 3$ est dit à granulométrie étalée Par exemple, sur la courbe de la figure 2 ci-après : $D_{60} = 0,5 \text{ mm}$ et $D_{10} = 4 \mu\text{m}$. D'où $D_{60} / D_{10} = 125$

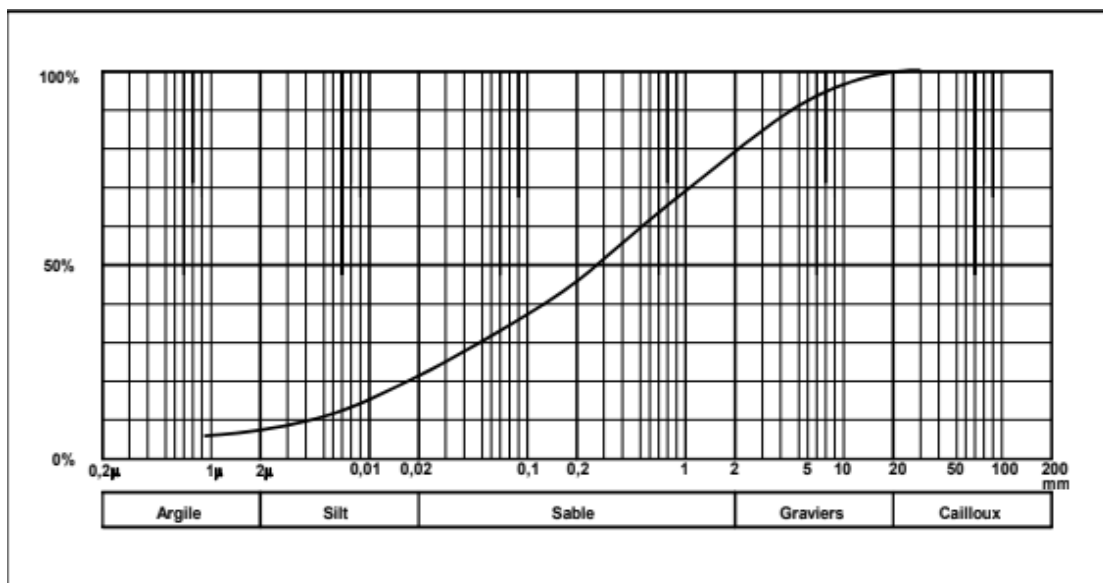


Figure 2 - courbe granulométrique

3.3 Propriétés colloïdales des sols fins

On appelle sol fin un sol comportant au moins 50 % (en poids) de grains de dimension inférieure à 80 μm . Le comportement d'un sol fin est très lié à sa teneur en eau, mais aussi à sa structure cristalline et à sa composition minéralogique

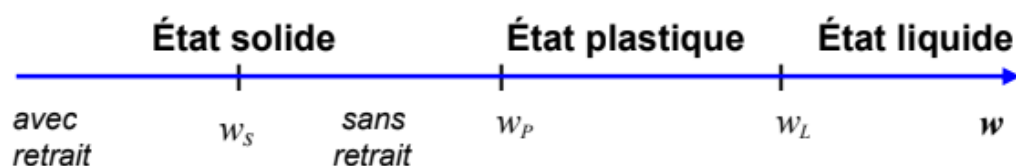
3.4 Rôle de l'eau

Plus un sol est fin, plus la surface spécifique des grains est grande et plus l'eau, molécule polarisée, a un rôle important en étant à l'origine de forces d'attraction électrique entre les grains. L'eau adsorbée est de l'eau attirée par polarité par les particules d'argiles. Elle constitue une fine pellicule qui entoure le grain, et qui peut être éliminée totalement seulement par un chauffage très intense (200 à 300°). Cette eau, très visqueuse, joue le rôle de lubrifiant des grains. L'eau libre, qui circule

librement entre les grains, et que l'on peut éliminer à l'étuve à 100° environ crée des attractions dues au phénomène de capillarité. En laboratoire, ce rôle de l'eau est couramment apprécié par des essais qui mesurent les teneurs en eau de changement d'état liquide, plastique, solide aussi appelées limites d'Atterberg:

WL = limite de liquidité, WP = limite de plasticité On appelle indice de plasticité la valeur

IP = $w_L - w_P$ Un essai, moins courant, mesure w_S = limite de retrait qui permet de distinguer l'état solide sans retrait où l'eau capillaire est présente et un état Solide avec retrait où l'eau capillaire est en partie éliminée. L'élimination de l'eau capillaire entraîne une diminution de volume (fentes de retrait). Ce phénomène de retrait, plus ou moins sensible selon les argiles, a une importance fondamentale dans les problèmes d'étanchéité des bassins : un bassin étanché par un sol argileux peut voir son étanchéité compromise par les fentes de retrait s'il est maintenu vide pendant une certaine période surtout par climat chaud.



L'indice de plasticité $IP = w_L - WP$ a un intérêt tout à fait fondamental. Ainsi pour les chantiers de terrassement, des matériaux pour lesquels $IP > 30$ sont difficiles à mettre en place et à compacter. Un autre essai caractérise l'argilosité des sols : la valeur de bleu de méthylène du sol (VBS). Il mesure la quantité de méthylène adsorbée sur les grains de sol. La VBS s'exprime en grammes de bleu pour 100 grammes de sol. Comme l'indice de plasticité, l'essai au bleu est utilisé pour qualifier le sol au sens de la norme AFNOR NF P 11-300 (**cf. paragraphe 2.6**).

3.5 Matières organiques

Certains sols, issus de dépôts géologiquement récents, peuvent contenir de la matière organique. On les identifie in situ à leur couleur grise à noire, à la présence de débris végétaux et à leur odeur. Au laboratoire, la teneur globale en matière organique se mesure sur le résidu passant à 0,4 mm, préalablement séché à 65° , que l'on fait réagir à l'eau oxygénée. Un deuxième étuvage permet par différence de connaître le poids et donc la teneur en matière organique. Au-delà de 2 à 3 % de matière organique, l'utilisation des sols en remblais peut engendrer des problèmes de tassements à long terme. Les sols contenant plus de 5 % de matière organique sont à proscrire.

3.6 Compactage des sols

L'essai Proctor permet de tracer la courbe du poids volumique sec en fonction de la teneur en eau, pour une énergie de compactage donnée. Cette courbe permet de mettre en évidence un optimum de poids volumique (cf. figure 3). En construction de remblai en grande masse (barrages remblais routiers...) on se réfère presque exclusivement à l'essai Proctor Normal ; en couches de chaussée on se réfère presque exclusivement à l'essai Proctor Modifié, réalisé avec une énergie supérieure. Cet essai permet de déterminer deux grandeurs fondamentales, en particulier pour le déroulement et le contrôle des chantiers de terrassement:

- w_{OPN} (ou w_{OPM}) teneur en eau à l'Optimum Proctor Normal (ou Modifié)

Γ_{dOPN} (ou γ_{dOPM}) poids volumique sec à l'Optimum Proctor Normal (ou Modifié)

Si l'énergie de compactage croît, les courbes deviennent plus pointues. L'eau étant

Incompressible, ces diverses courbes ont pour enveloppe l'hyperbole

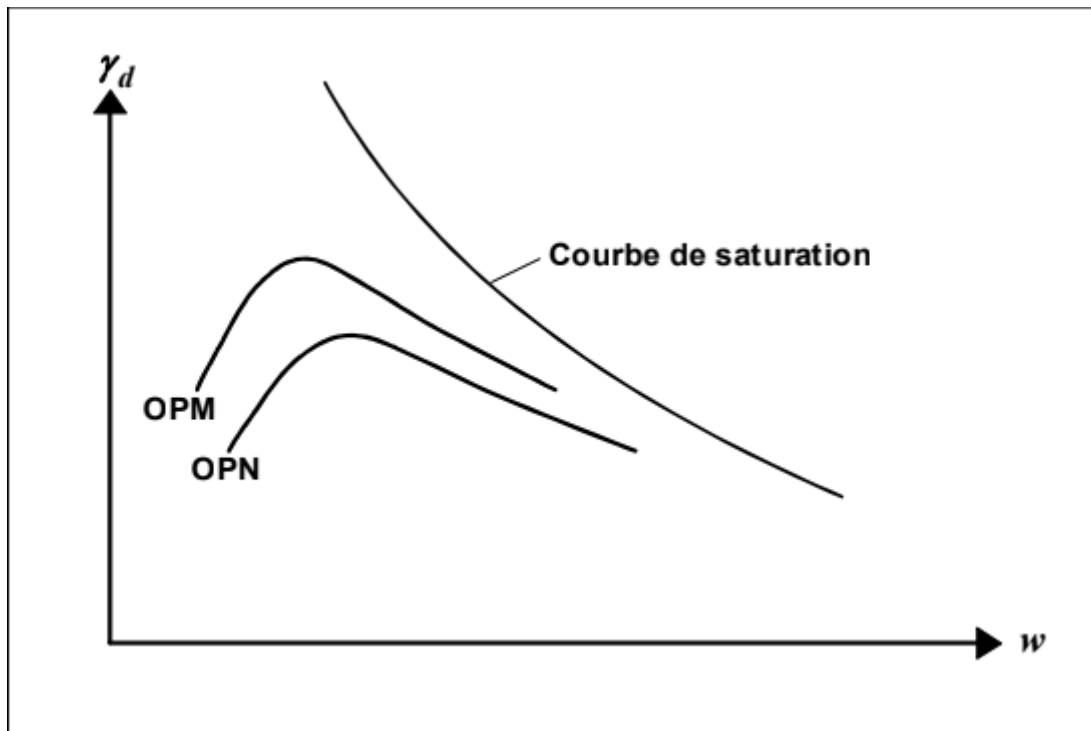


Figure 3 - courbes Proctor

4. Classifications des sols

Nous présentons ci-après trois types de classifications très couramment utilisées:

-l'abaque triangulaire de Taylor, qui utilise seulement la granulométrie, et qui permet de baptiser un sol (argile, limon, sable, limon argilo sableux...) (voir figure 4)

-le diagramme de Casa grande qui concerne les seuls sols fins et qui fait intervenir les limites d'Atterberg (figure 5).

-la classification normalisée NFP 11.300 de septembre 1992 (tableau 1 qui remplace l'ancienne classification dite RTR (Recommandations pour les Terrassements Routiers) réalisée par le LCPC et le SETRA, très utilisée en géotechnique routière et qui donne des renseignements pratiques sur l'aptitude des sols à être utilisés en remblai. Les sols d'indice faible (par exemple A1) sont les plus sensibles à l'eau.

Exemple : le sol dont la courbe granulométrique a déjà été montrée en figure 2 possède 7% d'argile, 15% de silts, 57% de sable et 21% d'éléments plus grossiers. Ramenés aux éléments de dimension inférieure à 2 mm, les pourcentages deviennent 9% pour l'argile, 19% pour les

silts et 72% pour les sables. Ce sol est donc un limon sableux au sens de la classification triangulaire de la figure 4. Si l'on dispose en outre de la valeur de son indice de plasticité (supposons $IP = 20$) ce sol est dans la catégorie A2 de la classification NFP 11.300. Remarquons que, son d_{35} étant proche de 0,08 mm, une faible variation de sa granulométrie pourrait le faire passer dans la

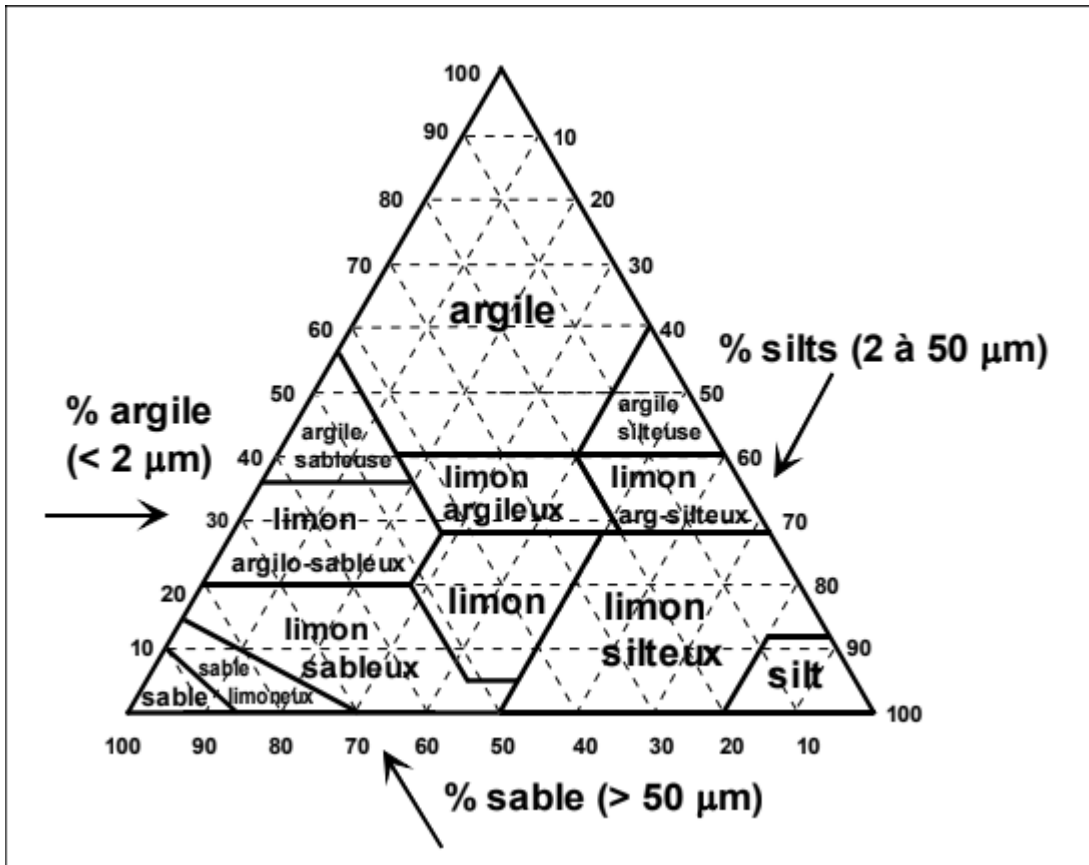


Figure 4 - classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre supérieur à 2 mm)

Pour appliquer le diagramme ci-dessus, on détermine les pourcentages des trois catégories de sol par rapport à la fraction inférieure à 2 mm

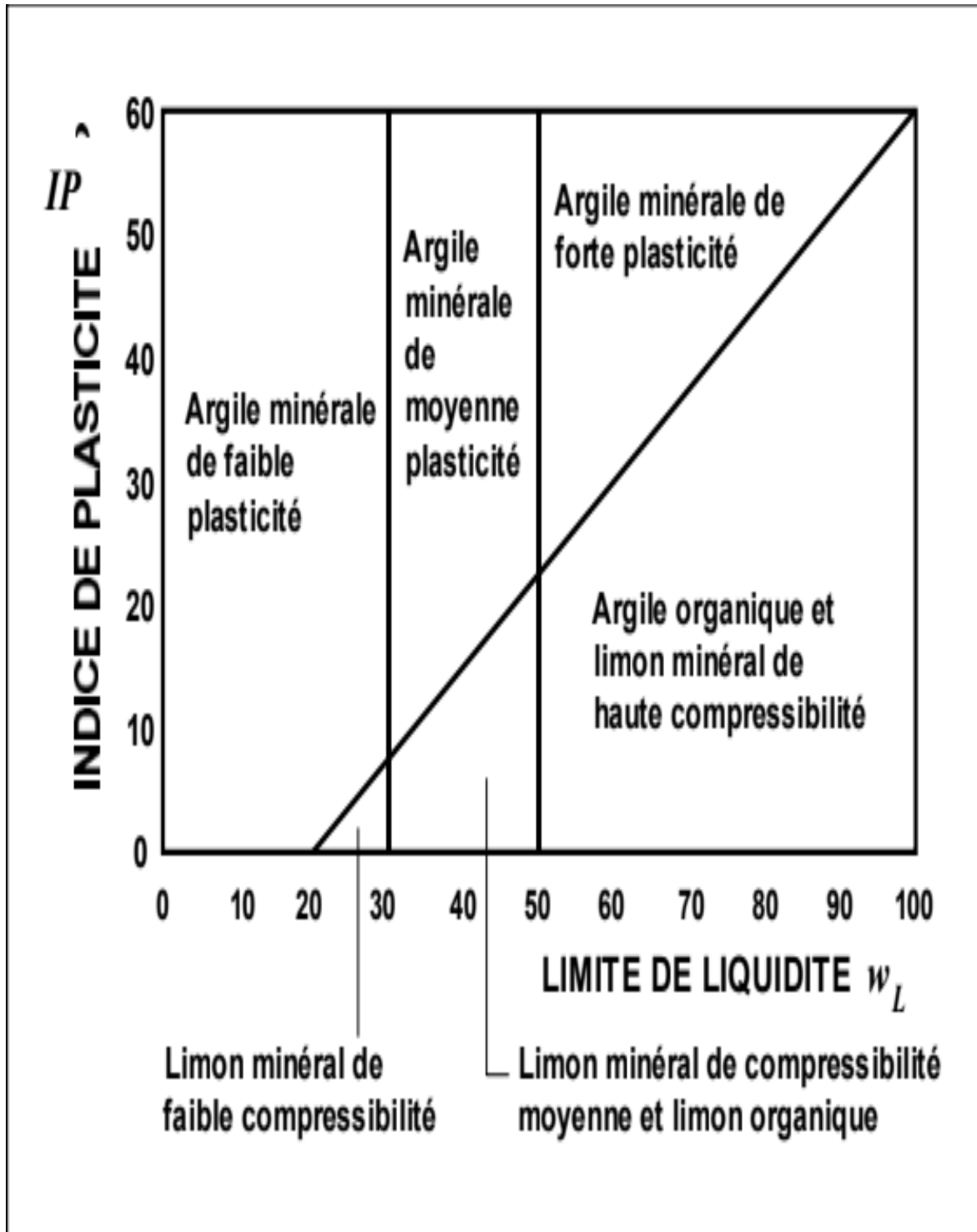


Figure 5 - abaque de plasticité de Casa grande

Tableau 1 - classification des sols (NFP 11-300) - Tableau simplifié

<p>Sols FINS A</p> <p>$d_{max} \leq 50$ mm et $d_{35} < 0,08$ mm</p>	<p>$VBS \leq 2,5^*$ ou $IP \leq 12$</p>	<p>A₁ : limons peu plastiques, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...</p>
	<p>$12 < IP \leq 25^*$ ou $2,5 < VBS \leq 6$</p>	<p>A₂ : sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...</p>
	<p>$25 < IP \leq 40^*$ ou $6 < VBS \leq 8$</p>	<p>A₃ : argiles et argiles mameuses, limons très plastiques...</p>
	<p>$IP > 40^*$ ou $VBS > 8$</p>	<p>A₄ : argiles et argiles mameuses très plastiques</p>
<p>Sols sableux ou graveleux avec fines B</p> <p>$d_{max} \leq 50$ mm et $d_{35} \geq 0,08$ mm</p>	<p>$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} < 2$ mm $0,1 \leq VBS \leq 0,2$</p>	<p>B₁ : sables silteux...</p>
	<p>$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} < 2$ mm $VBS > 0,2$</p>	<p>B₂ : sables argileux (peu argileux)...</p>
	<p>$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} \geq 2$ mm $0,1 \leq VBS \leq 0,2$</p>	<p>B₃ : graves silteuses...</p>
	<p>$d_{12} \geq 0,08$ mm $d_{70} \geq 2$ mm $VBS > 0,2$</p>	<p>B₄ : graves argileuses (peu argileuses)...</p>
	<p>$d_{12} < 0,08$ mm $\leq d_{35}$, $VBS \leq 1,5^*$ ou $IP \leq 12$</p>	<p>B₅ : sables et graves très silteux...</p>
	<p>$d_{12} < 0,08$ mm $\leq d_{35}$, $VBS > 1,5^*$ ou $IP > 12$</p>	<p>B₆ : sables et graves argileux à très argileux.</p>
<p>Sols comportant des fines et des gros éléments C</p> <p>$d_{max} > 50$ mm</p>	<p>$d_{12} < 0,08$ mm ou $d_{12} > 0,08$ mm et $VBS > 0,1$</p>	<p>C : Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières.</p>
<p>Sols insensibles à l'eau D</p> <p>$VBS \leq 0,1$</p> <p>$d_{12} \geq 0,08$ mm</p>	<p>$d_{max} \leq 50$ mm $d_{70} < 2$ mm</p>	<p>D₁ : sables alluvionnaires propres, sables de dune...</p>
	<p>$d_{max} \leq 50$ mm $d_{70} \geq 2$ mm</p>	<p>D₂ : graves alluvionnaires propres, sables...</p>
	<p>$d_{max} > 50$ mm</p>	<p>D₃ : graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires...</p>

Paramètre dont le choix est à privilégier.

5. Identification des sols

Tous ces essais (granulométrie, teneur en eau, Proctor, limites d'Atterberg essai au bleu) sont des essais d'identification. Parmi ceux-ci, granulométrie et teneur en eau concernent le squelette du sol et ne renseignent absolument pas sur les relations entre grains. Les limites d'Atterberg, l'essai au bleu et l'essai Proctor sont au contraire des essais qui tiennent compte des relations inter granulaires Mais tous ces essais d'identification sont effectués en remaniant le sol. Ils ne sont donc pas suffisants pour étudier un sol en place - une fondation d'ouvrage par exemple.

Surtout, ils ne peuvent pas renseigner sur l'histoire du sol (au sens géologique). D'autres essais le permettront.

6. Mécanique des sols

La mécanique des sols est l'application des lois mécaniques et hydrauliques au matériau sol. Comparé aux nombreux autres matériaux étudiés en mécanique, les bétons, les aciers, les plastiques, le bois..., le sol présente deux originalités. C'est tout d'abord un milieu discontinu qu'il faudra donc étudié à la fois dans sa globalité et dans sa composition élémentaire. D'autre part, c'est un matériau tri phasique formé de grains solides, d'eau et d'air. Nous verrons que les phases non solides jouent un rôle fondamental.

7. Sciences proches de la mécanique des sols

Par certains aspects, la mécanique des sols est proche de la mécanique des milieux continus qui étudie de nombreux matériaux comme l'acier, le bois, les bétons, les plastiques dont la plupart sont artificiels et donc de constitution bien connue. Par d'autres aspects, elle est proche des disciplines qui étudient les milieux minéraux naturels : la géologie l'hydrogéologie, la mécanique des roches. La géotechnique regroupe ces dernières disciplines.

8. Historique succinct

La mécanique des sols est une science jeune. Les premiers fondements peuvent être attribués à **Coulomb (1773)**, mais **Terzaghi** a véritablement initié la mécanique des sols

moderne (**1936**), La mécanique des roches est une science encore plus jeune dont on peut dater les réels débuts dans les années soixante, en particulier suite à la Catastrophe de Fréjus (barrage de Mal passet).

9. Les propriétés du sol

Les sols sont différents d'un endroit à un autre. Ceci est dû aux facteurs qui ont conduit à la formation de chaque type de sol. Des facteurs pédogénétiques différents impliquent des processus pédogénétiques différents. Ceci, attribue au sol des caractéristiques différentes d'un endroit à un autre. Les différences sont d'ordres physiques, chimiques et biologiques.

9.1. Propriétés physiques

Les propriétés physiques du sol interviennent sur la croissance végétale par le biais de l'enracinement et l'alimentation hydrique et minérale de la plante (**SOUTY, 1987**)

9.1.1. Texture

La texture ou la granulométrie fait référence à la répartition des sédiments en fonction de leur taille. C'est une propriété fixe du sol qui est de loin la propriété la plus importante (**GOBAT et al, 2010**). La texture a une influence dominante sur les propriétés physiques et chimiques des sols .plus de sol est argileux, plus sa fertilité chimique est élevée .plus le sol est sableux, il présente une bonne fertilité physique.

Les limites exactes qui distinguent une fraction texturale d'une autre varient en fonction du système de classification. Celles qui sont souvent utilisées sont définies selon l'échelle d'ATHERBERG qui classe la fraction fine du sol (partie dont le diamètre est inférieur à 2 mm) en 5 fractions. Les fractions de sédiments sont les suivantes :

Argile diamètre inférieur à 2 μm (0,002 mm) ;

Limon fin diamètre de 0,002 mm à 0,02 mm ;

Limon grossier diamètre de 0,02 mm à 0,05 mm ;

Sable fin diamètre de 0,05 mm à 0,2 mm ;

Sable grossier diamètre de 0,2 mm à 2 mm

Même si la granulométrie repose uniquement sur la taille des sédiments, les différentes fractions sont souvent constituées de différents minéraux :

- **Sable** surtout du quartz, aussi des feldspaths et micas. Peu de minéraux secondaires.
- **Limon** 50% quartz, autre 50% sont des feldspaths, des micas et des minéraux secondaires - des oxydes de Fe et d'Al.
- **Argile** surtout des minéraux secondaires, et à très forte dominance les phyllo silicates ; dans les milieux humides tropicaux il y a beaucoup d'oxydes de Fe et d'Al

La fraction grossière (partie du sol dont le diamètre est supérieur à 2 mm exemple des graviers et Caillaux) ont un impact très important pour l'aération, la circulation de l'eau et l'érodabilité du sol. La texture du sol est une propriété stable, elle conditionne directement la structure et donc la porosité et le régime hydrique du sol (**ARAGNO et al, 2003**).les textures fin sont évidemment les plus perméable que les textures grossiers. La texture du sol influence l'enracinement des plantes, elle favorise ou limite le développement spatial de l'appareil racinaire (**CALLOT et al ,1982 ; ARAGNO et al, 2003**), et on admet que la croissance des racines est favorisée par une texture grossière (**CALLOT et al, 1981**).

9.1.2. Structure du sol

La structure est un état du sol vivant à court terme. C'est le mode d'agencement des différents agrégats du sol. C'est derniers résultants de l'assemblage des particules entre-elle. En fonction de la présence ou non présence des agrégats, il y a deux (2) types de structures. Une structure avec agrégats dite fragmentaire et qui peut être arrondie, anguleuse ou feuilletés. Une structure sans agrégats dite continue (**cours pédologie, 2004**). La formation de la structure du sol résulte principalement de perturbations physiques d'origine anthropique ou climatique (**OADES, 1993 ; EL TITI, 2003**). Les pores créés par ces perturbations sont généralement allongés ; ce sont les fissures. L'activité biologique des organismes du sol participe aussi à la formation de la structure mais joue surtout un rôle majeur dans sa stabilisation. La dégradation de la structure résulte quant à elle de l'action de l'homme ou du climat (**YOUNG et al. 1998**). Dans les systèmes labourés, la structure du sol est principalement créée par les opérations de travail du sol tandis que dans les systèmes non travaillés (semis direct) la structure est principalement créée par l'action du climat (en surface dans les régions tempérées) et par des processus biologiques (**OORTS, 2006**). D'une manière générale, dans les milieux à structure continue, les racines sont peu nombreuses, droites et

présentent un aspect filiforme. Au contraire, dans les sols à structure construite, elles sont sinueuses, ramifiées et garnies de nombreux poils absorbants (HENIN, et al, 1969; CALLOT et al, 1981).

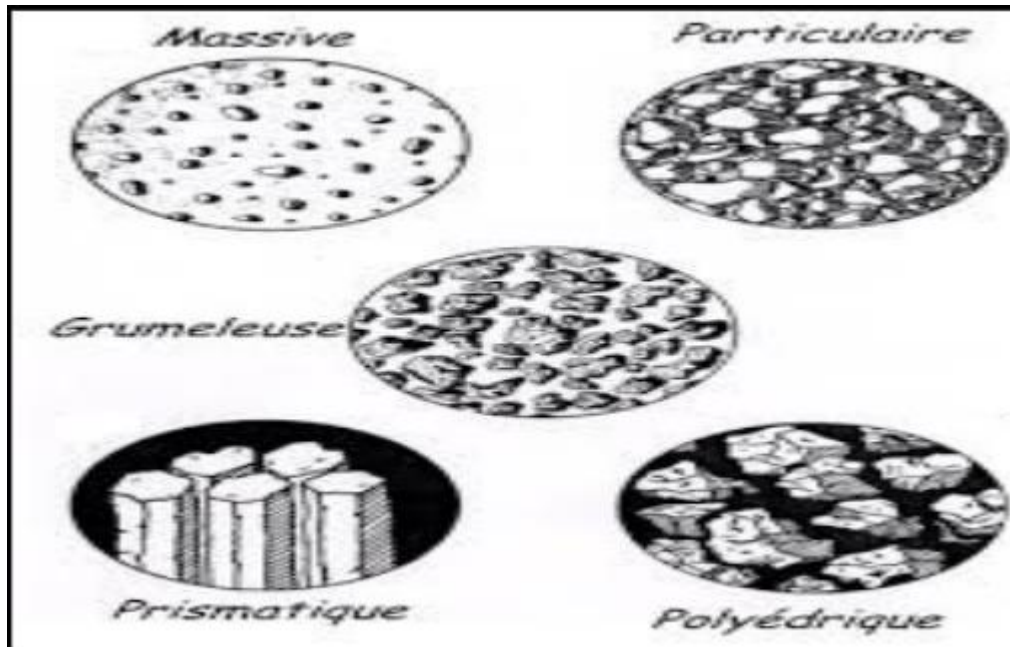


Figure 06 Quelques exemples de structure de sol (GOBAT et al, 2010)

9.1.3. Porosité

Selon le degré d'humectation, les vides du sol sont occupés en majeure partie, soit par l'eau, soit par l'air.

La porosité donc reflète le volume des vides et renseigne sur les capacités hydriques ou atmosphériques (GOBAT et al, 2010), la porosité donne une bonne idée de l'état structurel. Selon la taille des pores, elle est subdivisée en macroporosité (vides $>50 \mu\text{m}$, pouvant être remplis par l'eau de gravité, rapidement drainée et seront colonisées par les racines moyennes) en méso porosité ou porosité capillaire constituée des vides de $0,2$ à $50 \mu\text{m}$ retenant l'eau utilisable par les plantes, et en microporosité dont les vides inférieures à $0,2 \mu\text{m}$ retiennent l'eau inutilisables (ARAGNOU et al, 2003). La méso porosité dépend beaucoup de la texture, tandis que la macroporosité de la structure. Selon l'origine, la porosité peut être classée ainsi :

⊗ Porosité d'altération

⊗ Porosité texturale

⊗ Porosité structurale

9.1.3.1. La porosité d'altération

Les porosités d'altération sont celles qui se développent à l'intérieur et à la surface des minéraux des roches, par dissolution et transformation de ces minéraux, ces porosités ne sont pas visibles ni à l'œil nu ni à l loupe, sauf celles qui affectent les surfaces des graviers et des sables. Toutefois, elles sont observables au microscope. REF

9.1.3.2. La porosité texturales

Les porosités texturales sont celles qui subsistent entre les particules une fois que celles – ci au contact entre elles : on peut dire qu'il s'agit des vides qui résultent de l'entassement des particules.

9.1.3.3. Les porosités structurales

Les porosités structurales sont celles qui résultent de l'organisation des particules entre elle, il n'y a plus simplement entassement, avec ou sans contrainte, mais aussi structuration (formation d'agrégats) et déplacement de particules (Site1).

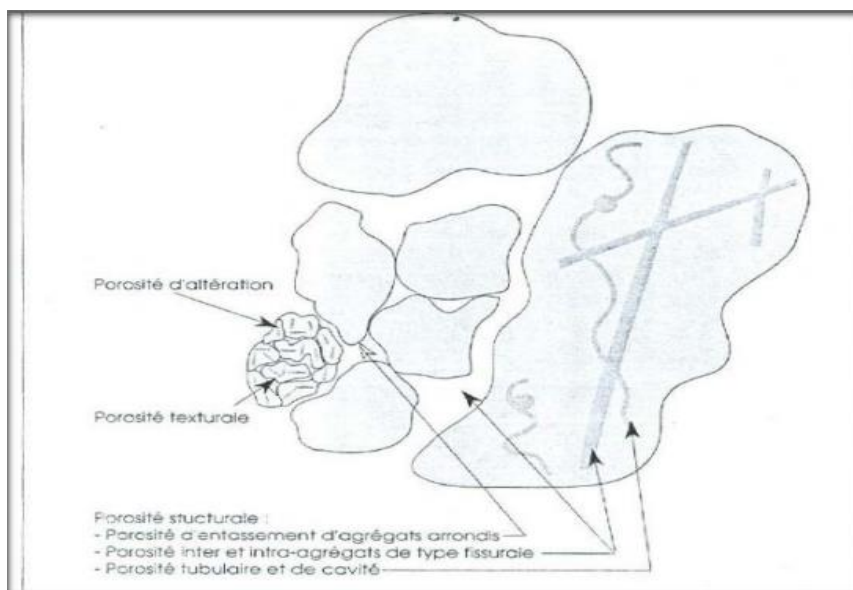


Figure 07 Origine des différents types de porosité du sol

9.1.4. Résistance mécanique

La résistance mécanique du sol à la pénétration et les voies de circulation pour la progression des racines dépendent des différentes caractéristiques du sol, dont les principales sont la texture, la porosité, la structure et la stabilité structurale et aussi l'humidité du sol. Elle est variable dans le temps et l'espace (**DEMOLON, 1968; CALLOT et al, 1981**). La racine s'adapte aux variations de résistance mécanique du sol, en abaissant le potentiel total qui reste constant. Cela se traduit par une augmentation de la pression de la turgescence (**BOIFFIN et MARIN- LAFLECHE ,1990**).

9.2. Propriétés chimiques

9.2.1. PH du sol

(Potentiel hydrogéné) du sol exprime le degré d'acidité ou d'alcalinité de ce sol sur une échelle de 01 à 14. C'est un facteur qui joue sur la dynamique des éléments et sur leur absorption d'où l'importance de sa détermination. Un sol neutre et bien équilibré présente un pH de 07, alors qu'un pH inférieur à 07 caractérise le sol à tendance acide. Au contraire, un pH supérieur à 07 atteste une terre basique et donc contenant du calcaire. Il est à noter que les sols saoudiens (caractérisés par une forte présence des ions Na^+ sur le complexe adsorbant du sol) présentent toujours des valeurs du pH beaucoup plus élevées atteignant facilement les chiffres de 10 (**AUBERT, 1982**).

9.2.2. L'échange ionique

Le sol possède la propriété de retenir diverses substances. En effet, les cations et les anions peuvent être retenus par le complexe adsorbant du sol, c'est-à-dire l'ensemble des colloïdes dotés de charges négatives ou positives. Les ions y seront retenus sous forme échangeable une solution contenant des ions différents de ceux retenus par le sol, il y aura échange entre les ions du complexe, adsorbant et ceux de la solution :



L'adsorption ionique dans le sol peut être considérée comme réversible : Les ions échangeables du complexe adsorbant sont en équilibre avec la solution du sol : toute modification de la composition de solution du sol provoque un changement de cet équilibre par échange : certains ions du complexe passent en solution (désorption) et sont remplacés par d'autres ions, qui étaient auparavant en solution (adsorption).

Le pouvoir adsorbant et la propriété qui possède le complexe adsorbant du sol, de retenir à sa surface des ions provenant de la solution du sol, cette définition est illustrée dans le schéma ci-dessous :

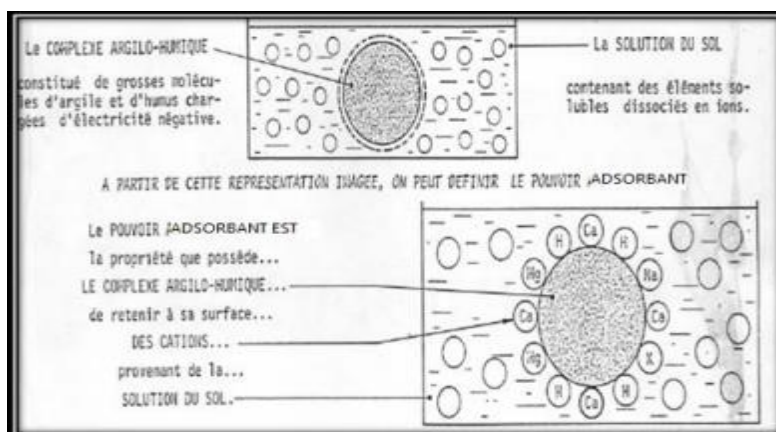


Figure 08 Le complexe adsorbant du sol (Site 2)

Les différentes structures du sol et leurs propriétés

Structure	Texture	Complexes argilo-humiques	Propriétés
Particulaire	Éléments grossiers (sables)	Peu nombreux	- Faible rétention de l'eau - Porosité élevée - Faible rétention des ions
Compacte	Éléments fins (argiles, limons fins)	Peu nombreux	- Forte rétention de l'eau - Porosité faible, résistance à la pénétration des racines - Faible rétention des ions
Grumeleuse ou fragmentaire	Mixte	Très nombreux	- Forte rétention de l'eau - Bonne porosité, permet une bonne pénétration des racines - Forte rétention des ions

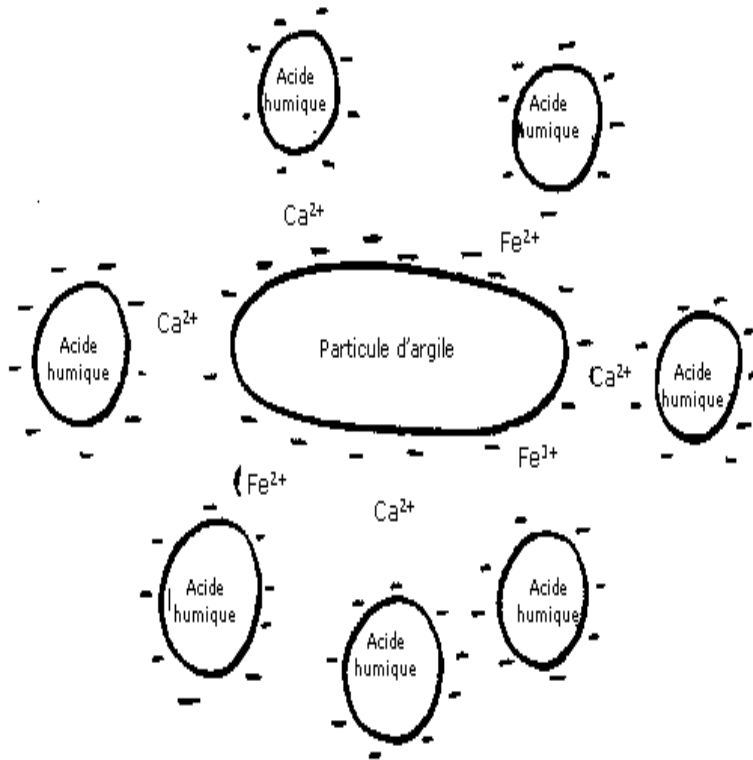


Figure09 Schéma : un complexe argilo-humique

Chapiter02

Effet de la salinité sur la texture du sol



Chapiter02 Effet de la salinité sur la texture du sol

1. Introduction general

Le problème des sols salés n'est pas spécifique d'une région particulière du monde. Il est connu en Europe aussi bien qu'en zones arides. Cependant ce problème est particulièrement répondeu au zones arides et semi -arides. Tous les sols contiennent une certaine quantité de sels solubles, cependant ils ne sont pas tous considère comme étant sales. Ils ne sont considérés comme tel que lorsque l'accumulation dans le sol des sels solubles atteint un niveau de concentration portant préjudice à la croissance des plantes. La salinisation des sols constitue un processus important, notamment dans les zones arides et semi-arides (**Saidi, et al, 2004**), provoquant une dégradation des propriétés physiques, chimiques, et biologiques des sols. Les conséquences de cette dégradation est la diminution de la fertilité des sols qui entraîne une réduction des rendements des cultures, et parfois la disparition du couvert végétal naturel. La salinité devient de plus en plus importante d'une année à l'autre. Les zones humides nommées « Sebket » sont des sites de transition entre les milieux terrestres et les milieux aquatiques. Elles se distinguent par des sols engorgés d'eau et une végétation dominante composée de plantes qui exige milieu humide. Les propriétés mécaniques des couches supérieures du sol changent rapidement en fonction du taux de la salinité du sol, c'est-à-dire de sa texture et de structure.

2. Généralité sur la salinité du sol

2.1 Définition

La salinité se réfère à la quantité des sels solubles qui se trouve dans le sol (**Chesworth, 2008**). Les sels solubles englobent une large gamme d'anions et de Cations présents dans le sol soit sous forme cristallisée, ou une forme dissoute dans la solution du sol, ou bien sous une forme adsorbée sur la surface des colloïdes (**Douaik, 2005**). Ils sont constitués principalement par le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium pour les cations et par les chlorures, les sulfates, les carbonates et les bicarbonates et nitrates pour les anions (**Chesworth, 2008**). Plusieurs processus géochimiques peuvent avoir lieu comme conséquence à l'action des sels solubles dans le sol. Le processus suivant lequel le sol s'enrichit en sels solubles est la salinisation (**IPTRID, 2006**). L'autre processus qui est

l'alcalinisation se produit lorsque le pH du sol augmente à des valeurs supérieures à 8,5 (USSL, 1954).

Ce processus est souvent accompagné du processus de sodisation lorsque le sodium échangeable est l'élément majoritaire adsorbé sur le complexe colloïdal (IRD, 2008).

2.2. Les origines de la salinité

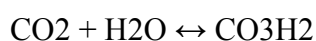
La première question que l'on se pose naturellement est : d'où vient le sel sur les continents ? La salinisation peut avoir plusieurs origines à savoir : géologique, marine, lagunaire, volcanique et anthropique.

2.2.1 Marine Le mot « salinisation » évoque inmanquablement les bords de mer. Certes, le sel peut être véhiculé sur la terre par les embruns (jusqu'à 750 kg par ha en une seule année) ; certes, la mer peut envahir la terre par forte marée (côtés basses) et saler les terres ; certes au niveau des côtes sableuses, l'eau de mer s'infiltré et peut créer une nappe salée qui détermine des milieux particuliers réservés aux halophytes (plantes tolérantes au sel). La Camargue est l'exemple type de ces phénomènes (Diakhate, 1986). Mais tout cela n'est pas l'essentiel car seule une faible bande côtière est affectée. Ce qui est grave, à l'échelle de notre planète, c'est la salinisation continentale.

2.2.2 Lagunaire Cette salinisation correspond à un héritage marin. Il y a eu colmatage alluvial d'une côte basse lagunaire, où se sont formés des aquifères complexes comprenant des lentilles d'eau sursaturées. La nappe se trouve, en général, à une faible profondeur et elle contamine la surface par les remontées capillaires.

2.2.3 Géologiques Les sels peuvent provenir soit de l'altération des minéraux primaires de croûte terrestres (Bryssine, 1961), soit de la dissolution des évaporites et la libération des Chlorures, Sulfates, Carbonates de Sodium et de Magnésium. Les évaporites se localisent essentiellement dans les bassins sédimentaires. D'après (Szabolcs, 1989), la superficie totale concernée par la salinisation naturelle est proche de mille millions d'hectares, soit 5% de la superficie du globe. Celle-ci, loin de la mer, conduit à la stérilisation progressive de surfaces

Considérables. L'eau de pluie, en traversant l'atmosphère, se charge de gaz carbonique. On obtient les réactions ci-après



Puis $\text{CO}_3\text{H}_2 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ et $\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$

On voit qu'il y a production de proton H^+ c'est-à-dire d'acidité. Celle-ci est renforcée des protons fournis par les agents biologiques du sol qui respirent et rejettent donc du CO_2 . La matière organique intervient aussi. Au total, l'eau du sol est donc légèrement acide et agressive dans la durée. En conséquence, les minéraux des roches sont attaqués. C'est la réaction d'hydrolyse. Par exemple, le feldspath albite, très commun en milieu granitique, se transforme en argile au sein du sol et libère le sodium qu'il contient



Quand il y a très peu d'eau, le sodium précipite sur place avec le CO_3^- avec lequel il coexistait en solution, ceci pour donner un sel, ici un carbonate de sodium. Ainsi observe-t-on des cristallisations de sel à la surface des terres, dans les zones désertiques, en absence de pluie pour les éliminer. D'après (**Legros, 2009**), il y a 2,27% de sodium (en nombre d'atomes) dans la croûte terrestre. Donc la plupart des terres sont théoriquement susceptibles de se saler. La question est donc de comprendre pourquoi certains sols se salent effectivement et d'autres non.

2.2.4 Volcanique Cette salinisation est liée à des manifestations généralement posthumes du volcanisme qui comprennent essentiellement les fumerolles contenant les anhydrites sulfureux et sulfhydrique et l'acide chlorhydrique. Ces manifestations comprennent la présence de gypse et de soufre au sein des volcans. Elles comprennent également l'abondance des sources thermales à minéralisation chlorurée ou sulfatée (**Servant J., 1975**).

2.2.5 Anthropique Près de 20% des terres salinisées ont une origine humaine ou anthropique. Cet équilibre salinisation anthropique entraîne l'apparition du

Caractère halomorphe sur des sols. Elle modifie l'équilibre hydrologique du sol entre l'eau d'irrigation et/ou l'eau de pluie et l'eau utilisée par les cultures. Elle est également appelée salinisation secondaire et c'est la voie la plus importante et la plus rapide. Cette salinisation est due essentiellement à l'irrigation avec une eau de mauvaise qualité et/ou à un drainage insuffisant.

Tableau 1 - classification des sols (NFP 11-300) - Tableau simplifié

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

2.3. Les Types de la salinité des sols

La salinisation des sols peut avoir une origine primaire ou une origine secondaire (Aubert, 1975).

2.3.1. La salinité primaire (ou Naturelle) Les sels solubles responsables de la salinisation primaire d'un sol ont diverses origines. Ainsi, l'altération des roches contenant des minéraux sodiques, potassiques ou magnésiques donne des sels souvent solubles, en particulier les chlorures, les sulfates, les carbonates, les bicarbonates et parfois les silicates de ces métaux (Zahow et Amrhein, 1992). Lorsque la roche est gypso-salifère, c'est souvent des sulfates et des chlorures qui sont libérés. Cette phase de salinisation correspond à la salinisation primaire (Gaucher et Burdin, 1974). En Algérie, il existe des couches géologiques salifères comme le Trias qui est formé d'argiles schistosités gypseuses et salées et qui constituent une source importante de sels solubles et de gypse dans les régions arides. Le rocher de sel au Nord de Djelfa en est un exemple typique à côté de nombreux petits massifs des séries jurassiques. Le Trias apparaît en diapir ou en injection dans les fractures au niveau des hautes plaines steppiques entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Il existe d'autres couches géologiques salifères comme l'Helvétien par exemple qui se localise dans la vallée du Cheliff. Ou encore le Pliocène continental, l'Albien, le Sénonien et d'autres couches qu'on rencontre dans d'autres endroits d'Algérie (Gaucher, 1947). La salinisation peut être aussi provoquée par une invasion marine liée aux marais du territoire concerné. Dans ces conditions, la solution du sol présente une composition proche de celle de l'eau de mer, donc riche en Na Cl et peut provoquer par des phénomènes d'échange cationique un enrichissement du complexe d'échange en sodium (Cherbouy, 1991).

2.3.2. La salinité secondaire (ou d'origine humaine) La salinisation secondaire est un processus ultérieur à la formation du sol et le caractère salin du sol est induit par plusieurs mécanismes. En effet, la salinisation peut être due à la remontée d'une nappe salée peu profonde, ou à la remonté capillaire et pendant les périodes sèches (**Durand, 1983**). L'holomorphie peut provenir aussi des eaux d'irrigation salines en milieu mal drainé (**Durand, 1983**). Dans le grand Sud de l'Algérie, la non maîtrise des techniques d'irrigation par pivot, et l'absence de systèmes de drainage (**Daoud et Halitim, 1994 ; Mouhouche ,2000 ; Djili et Daoud 2003**) sont souvent les causes qui provoquent la diminution de la productivité agricole. De même la salinisation secondaire se produit lorsque l'eau d'irrigation est distribuée en quantité trop faible pour qu'il y ait percolation ; le terrain retient alors toute l'eau distribuée qui y dépose ses sels (**Durand, 1974 in Noomene. 2011**). Les superficies irriguées ont connu un accroissement très rapide depuis 1950 et, malgré un ralentissement observé depuis 1980, elles s'atteignent aujourd'hui près de 300 millions d'hectares dans le Monde. Les évaluations indiquent que, selon les situations, de 15 à 50% des terres aménagées et environ 50% des systèmes d'irrigation sont affectés par la salinité et plus particulièrement dans les zones arides (**Rhoades, 1997**). Au-delà des risques spécifiques liés à la qualité des eaux d'irrigation, les mécanismes de salinisation sont la résultante du fonctionnement hydrologique du milieu et des processus de concentration des sels apportés par l'irrigation, ou présents dans les nappes aquifères (**Gupta, 2000**). La répartition des sels qui en découle n'est pas homogène en raison des interactions complexes entre les propriétés variables des sols et des aquifères, et de l'existence de modalités et performances variables de la gestion de l'irrigation et du drainage aux différentes échelles dans les périmètres irrigués. Ces évolutions ne sont pas linéaires et sont soumises à d'incessantes modifications et adaptations dans la gestion hydraulique et agronomique des périmètres irrigués (**Marlet, 2004**). Enfin, la salinisation secondaire peut être provoquée par une incursion de la mer vers les plaines littorales et mêmes en contact direct, cette salinisation affecte des sols dont la pédogénèse est déjà prononcée.

3. Développement de la salinité dans le sol

Selon **FAO (1972)**, Dans les régions sèches où l'eau d'irrigation est souvent minéralisée, les risques de salinisation secondaire sont plus importants. Le développement de l'agriculture irriguée à l'eau minéralisée et sans drainage efficient a souvent comme conséquence l'apparition de manifestations salines secondaires.

D'après le processus d'accumulation du sel (**Kenfaoui, 1997**), Les sels solubles contenus dans les eaux souterraines ou superficielles, sont susceptibles, de contaminer les sols par une accumulation des produits solubles dans le milieu poreux ainsi que par une modification du complexe adsorbant. Il en résulte une transformation profonde des propriétés physiques et chimiques du sol, avec pour conséquence la création d'un milieu stérile vis-à-vis de la production agricole. L'irrigation ne fait qu'aggraver ce problème, en effet, les sels sont apportés dans le sol à chaque irrigation, la culture prélève dans le sol ses besoins en eau en laissant sur le sol une solution très concentrée en sel. Cette concentration sera encore très importante par l'irrigation suivante.

-80% des terres salinisées ont une origine naturelle. On parle alors de salinisation "**primaire**", due aux sels se formant lors de l'altération des roches ou à des apports naturels externes.

-20% des terres salinisées, soit près de 15 millions d'hectares (Mha) sur le continent Africain, ont une origine « anthropique ». On parle alors de salinisation "**secondaire**", induite par l'activité humaine, liée aux pratiques agricoles et en particulier à l'irrigation (**IPTRID 2006**).

-La salinisation du sol à partir de la nappe n'est pas directe et totale, mais souvent partielle (**Ben Hassine, 2005**).

Si l'eau d'irrigation appliquée contient des quantités relativement significatives d'ions sodium (Na^+) par rapport aux quantités présentes d'ions magnésium (Mg^{2+}) et d'ions calcium (Ca^{2+}), et en particulier si l'ion bicarbonate (HCO_3^-) est aussi présent ; les ions sodium peuvent alors saturer la majeure partie des sites d'échanges colloïdaux, ce qui est à l'origine de la formation de sols sodiques. C'est un type de sol extrêmement peu fertile. (**IPTRID 2006**).

4. Les méthodes de mesure de la salinité du sol

4.1. Mesure sur le terrain Les méthodes de mesurer de la conductivité électrique apparente d'un sol sont basées sur la mesure de la résistivité électrique, ou bien sur l'induction électromagnétique (**RHOADES et al. 1999**).

4.1.1 La méthode électrique La méthode électrique de sol est une technique géophysique non destructive qui est réalisée à partir d'électrodes plantées dans le sol. C'est une mesure intégrante qui est représentatif à certain volume sur terrain (**GOULET et BARBEAU, 2004**).

Les méthodes de résistivité électrique consistent en l'injection d'un courant électrique entre deux électrodes disposées à la surface du sol et à la mesure du potentiel électrique par un second jeu d'électrodes disposées au voisinage des électrodes d'injection (**SCHNEIDER, 2010**). La mesure électrique est effectuée avec une résistivité électrique. S'exprime en $\Omega.m$ (**BOTTRAUD et al. 2010**). Les méthodes de résistivité sont fondées sur la mesure des champs électriques et calculer par la suite les caractéristiques du milieu, qu'on appelle "résistivité apparente".

4.1.2 La méthode électromagnétique La méthode d'induction électromagnétique peut renseigner sur la structure interne de la terre et aussi, sur la présence d'eau dans les premiers décimètres du sol. Une bobine localisée à une extrémité de l'appareil EM crée un courant induit dans le sol, dont l'intensité est proportionnelle à la conductivité électrique du sol. C'est donc une mesure active de la conductivité électrique apparente du sol, dont l'avantage est d'être totalement non-invasif. En revanche, le traitement mathématique est beaucoup plus complexe que celui de la mesure par résistivité électrique (**SCHNEIDER, 2010**). La conductivité électromagnétique (CEM) est une technique géophysique récemment adaptée à l'étude des sols (**DE JONC et al. 1979 in JOB et al. 1990**). Elle est rapide de mesure « in situ » de la conductivité électrique globale de sol (**BOIVIN et al. 1989**). Elle permet entre autres d'évaluer la salinité globale apparente des sols intégrés sur une profondeur d'à peu près deux mètres. Elle se fait en soumettant le sol à un champ magnétique de haute fréquence. Ce champ induit des courants qui sont d'autant plus intenses que le sol est conducteur.

4.1.3 Analyse au laboratoire Le principe de base des méthodes de laboratoire repose sur la mesure de la conductivité électrique. Lorsqu'on applique un champ électrique à un milieu conducteur, un courant électrique parallèle et proportionnel à ces champs y apparaît selon la loi d'Ohm ($= \sigma$). Étant la densité du courant, le champ électrique, et σ la conductivité électrique ($dS.m^{-1}$) Cette dernière est définie comme étant la capacité d'un matériau de 1 m de long à laisser passer un courant électrique (**Schneider, 2010**). Elle est représentée par la formule suivante : $\sigma = 1 / 2\pi aR$ Où a est la distance inter-électrodes, et R la résistance (Ω) Les méthodes de laboratoire utilisées pour mesurer la CE des sols comprennent la mesure de la CE de l'extrait de pâte saturée (**Richards, 1954**).

I.5.1. Extrait non saturée Dans cette méthode, une quantité d'échantillon de sol est mélangée avec une quantité d'eau suffisante pour obtenir de fortes dilutions. Le rapport poids sol/poids eau est en général de 1/5 ou 1/10 (**Mathieu et Pieltain, 2003**). La mesure de la conductivité électrique (CE) se fait le plus souvent sur des extraits dilués selon un rapport sol/eau : 1/2 ; 1/5 ; 1/10, ou bien à partir de l'extrait de la pâte saturée. Cette méthode de l'extrait saturé, outre le fait qu'elle est la méthode internationale de référence, présente de nombreux avantages, dont celui de représenter le mieux la solution du sol et donc de se rapprocher de plus près de la réalité agronomique ; l'humidité étant à proximité de la capacité de rétention la plus efficace pour la plante (**LE BRUSQ et LOYER, 1982 ; RHOADES et al., 1999**).

4.1.4 Extrait de la pâte saturée Cette méthode a été mise au point par les chercheurs américains de l'U.S. Salinity Laboratory. Pour extraire les sels on amène le sol préalablement séché à saturation, c'est à dire à sa limite de liquidité d'Atterberg par malaxage avec de l'eau distillée. En opérant ainsi on cherche à se rapprocher au mieux de ce qui se passe dans le sol, tout en opérant dans des conditions standardisées. Cette façon de faire permet notamment de se rapprocher d'une réalité agronomique, l'humidité étant à proximité de la capacité de rétention, la plus efficace pour la plante (**Le Brusq et Loyer, 1982**).

4.1.5 Méthodes de détection et de mesure de la salinité des sols Le choix d'une méthode d'évaluation de la salinité dépendent de plusieurs facteurs tels que le but de la mesure, le nombre d'échantillons, le temps et les possibilités dont nous disposons pour effectuer notre travail. Il existe différentes méthodes pour la mesure de la salinité au niveau des périmètres irrigués :

4.1.6 La méthode de laboratoire Elle consiste aux mesures de la conductivité électrique (ou électrochimique) de l'extrait de la pâte saturée ou des extraits aqueux (rapport sol/eau : 1/2, 1/5 et 1/10). C'est une méthode destructive (destruction des sols) lors d'un forage à tarière de plusieurs échantillons.

4.1.7 Méthodes In situ Il s'agit de La méthode électrique à l'aide d'un capteur de salinité constitué d'une paire d'électrodes incrustées dans un élément de céramique poreux. La méthode électromagnétique est utilisée dans notre travail. Le prélèvement de la solution du sol in situ, est largement répandu lorsqu'on souhaite suivre des évolutions temporelles. Cette méthode non destructrice présente l'avantage d'être proche des conditions réelles du milieu.

4.1.8. La méthode à distance Une méthode non destructive qui consiste à l'utilisation des ondes électromagnétiques des capteurs optiques et radiométriques. Elle est basée sur le

développement et l'interprétation de données radiométriques et de la réponse spectrale des ondes réfléchies par le sol.

4.1.9 Les capteurs électromagnétiques et électriques Les capteurs électriques et électromagnétiques sont utilisés pour mesurer la capacité des particules du sol à la conduite et / ou à l'accumulation de charge électrique. Le sol devient une partie de circuit électromagnétique formant une condition d'échange locale. Le signal enregistré sera affiché immédiatement par l'enregistreur de données. Les instruments les plus connus sont : Technologies Veris, (**Salina, KS**) et GEONICS Limited (Mississauga, Ontario, Canada), Geocarta (Paris, France), Geometrics, (San Jose, CA), Dualem, (Milton, Ontario, Canada) et Crop Technology, (Bandera, TX). Pour mesurer la salinité des sols dans notre parcelle d'étude, nous avons utilisé, parmi ces capteurs, le GEONICS Limited EM38 pour calculer la conductivité électrique du sol (ECa) par induction électromagnétique.

5. La salinité dans le monde et en Algérie

5.1 Dans le monde

La salinité des sols est présente dans la plupart des grands systèmes d'irrigation à travers le monde sous l'effet conjugué d'une mauvaise qualité des eaux d'irrigation, de l'aridité et d'un drainage insuffisant du sol et des aquifères (**Marlet et al, 2005**). Les superficies irriguées ont connu un accroissement très rapide depuis 1950, elles atteignent aujourd'hui près de 300 millions hectares (**Marlet et al, 2005**). D'après **Rhoades (1997)**, les évaluations indiquent que, selon les situations, de 15 à 50% des terres aménagées et environ 50% des systèmes d'irrigation seraient affectés par la salinité, plus particulièrement dans les zones arides (**Marlet et al, 2005**). Au Pakistan, plus de 25% des surfaces irriguées sont salinisées, en Tunisie 25%, aux USA 23%, en Inde près de 17%, en Chine près de 15% et en Afrique du Sud près de 9% (**FAO, 2006**).

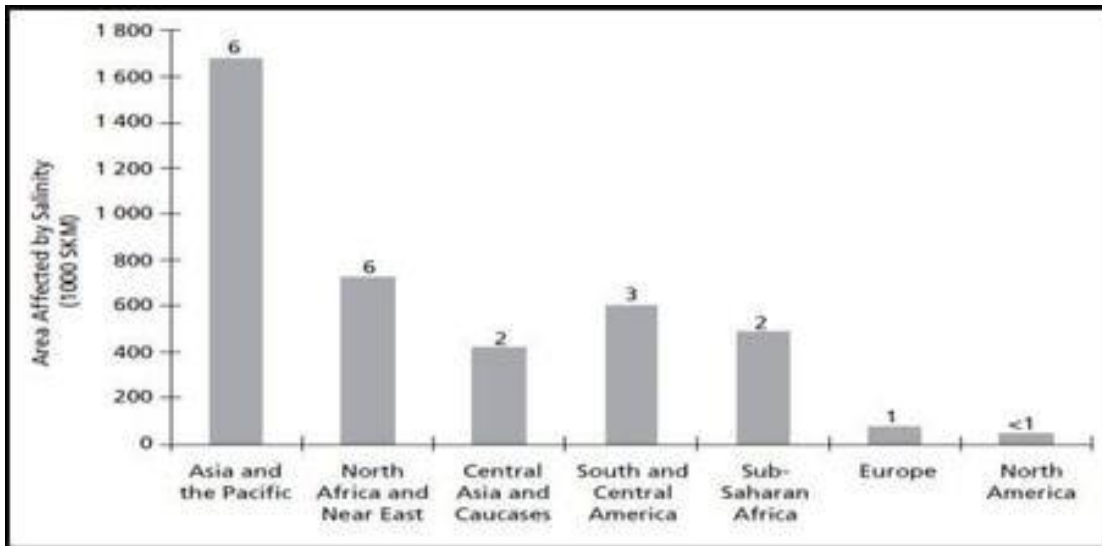


Figure01 superficie affectée par la salinité dans les différences régions

5.2 En Algérie En Algérie

Les sols agricoles sont danser 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**). 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 (Figure1).

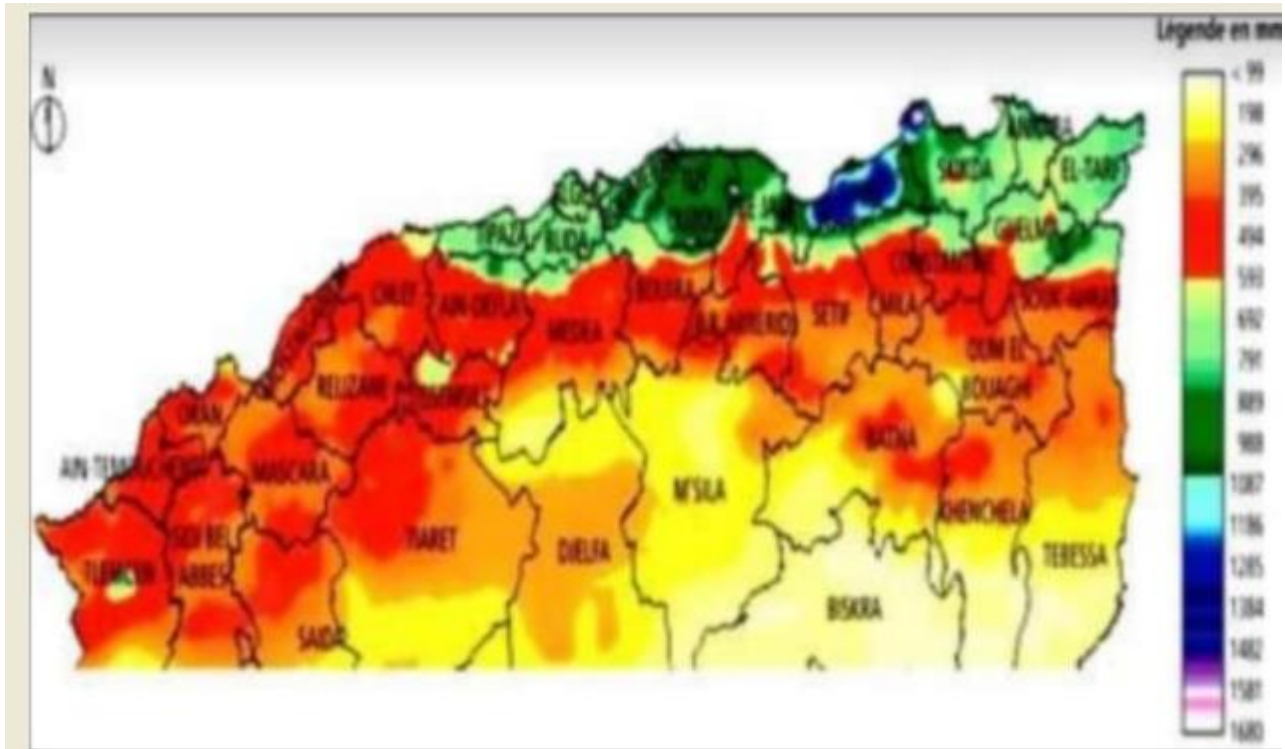


Figure02- Répartition des précipitations dans le nord de l'Algérie (FAO, 2005) On distingue

- 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 supérieures (Tableau 2).

Tableau 2 - Superficiés 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

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**). D'après les études spécialisées réalisées par l'INSID pour le Bas Chéiff (40 000 hectares et la Mina (sur près de 5 000 ha) en 1997, près de 11 000 ha (soit 27 % de la surface étudiée) sont affectés par un degré de salinité de plus de 8 ds.m⁻¹ Dans le tableau suivant il est donné un aperçu sur les superficies affectées par la salinité dans quelques périmètres de l'ouest du pays.

Tableau 3 - les superficies affectées par la salinité dans quelques périmètres de l'Ouest du pays (ONID (ex AGID) 2003)

Périmètre	Superficie Irrigables (ha)	Superficie affectée (ha)	pourcentage□
Haut cheliff	20000	6400	32
Moyen cheliff	21000	8700	41
Bas cheliff	22500	15000	67
Mina	8250	4190	51
Habra	19000	8100	42

6. Les classes de la salinité

Tableau 04 Les classes de la salinité du sol par rapport à la conductivité électrique de la pâte saturé l'USSL (1954)

Echantillons	CE mS/cm	classe de salinité
/	<2	Sol non salé
13, 14, 15	2<CE<4	Sol Peu salé
8, 9, 10, 11, 12	4<CE<8	Sol Moyennement Salin
/	8<CE<16	Sol salé
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	CE<16	Sol très salé

Selon les normes de l'USSL (1954), aucun échantillon n'est classé dans les classes sol non salés et sol salé, 3 échantillons sont peu salés, 5 échantillons sont moyennement salés, et

7 échantillons sont très salés ($CE > 16$ dS/m) (tableau4). La salinité suit un gradient décroissant en s'éloignons de la sebkha (Sol très salé, sol moyennement salé, sol peu salé). Selon Mathieu et Platin (2003), on peut classer la salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait aqueux à 25 C° :

Tableau 05: Classe de salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait 1/5 à 25C°

Echantillons	CE(mS/cm)	Classe de salinité
13	$1 < CE < 2$	Sol salé
2-3-4-7	$CE > 4$	Extrêmement salé
1-5-6-8-9-10-11-12-14-15	$2 < CE < 4$	Très salé

Tableau 06 Classe de salinité en fonction de la conductivité électrique de l'extrait 1/10à 25C°

Echantillons	CE(mS/cm)	Classe de salinité
13	$< 0,6$	Légèrement salé
11	$0,6 < CE < 1$	salé
8-9-12-14-15	$1 < CE < 2$	Très salé
1-2-3-4-5-6-7-10	> 2	Extrêmement salé

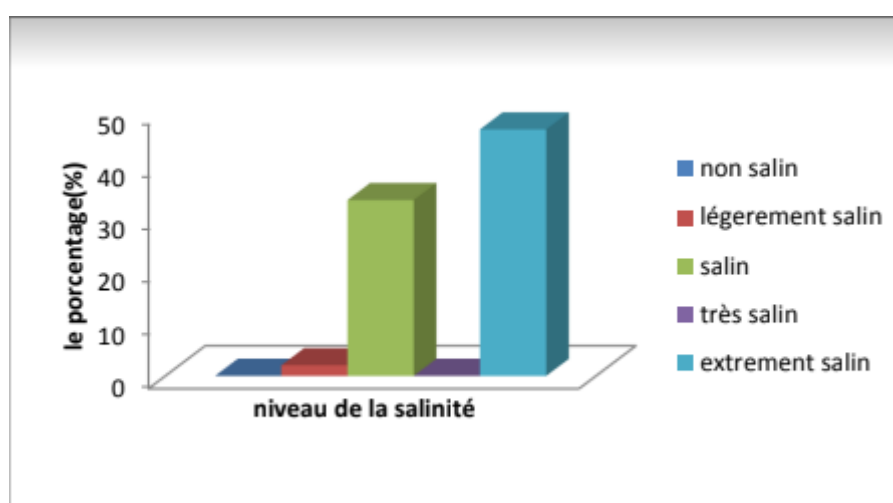


Figure03. Les pourcentages de niveau du la salinité (CEps)

7. Facteurs influençant la salinité

Généralement les facteurs qui conduisent à une accumulation excessive de sels dans le sol peuvent être naturels ou anthropogènes

Dans le quelle 80% des terres salinisées ont une origine naturelle. On parle alors de salinisation primaire”, due aux sels se formant lors de l’altération des roches ou à des apports naturels externes. (01)

7.1. Facteurs environnementaux (naturels) provoquant une salinisation ou une sodification: (01)

-Événements géologiques, qui peuvent augmenter la concentration en sel dans les nappes souterraines et par conséquent dans les sols.

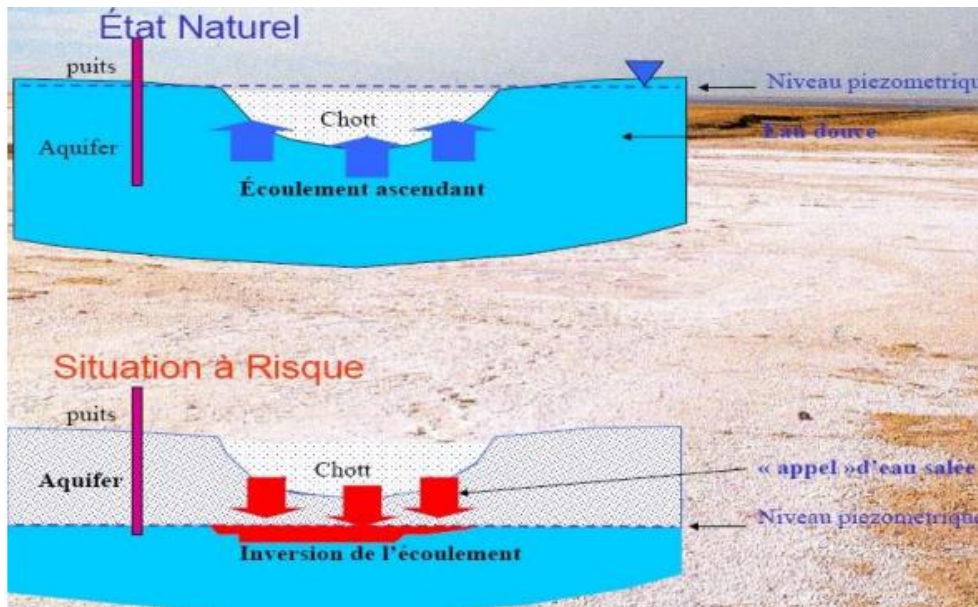
-facteurs naturels, qui peuvent diriger des nappes souterraines riches en sel vers la surface, de la surface ou vers des couches au-dessus du niveau de la nappe phréatique;

-infiltration des eaux souterraines dans des zones se trouvant en-dessous du niveau de la mer à savoir des micro-dépressions avec peu de drainage ou sans drainage.

-eaux d’inondation provenant de zones qui comportent des substrats géologiques libérant de grandes quantités de sels.

-action du vent qui, dans les zones côtières, peut souffler des quantités modérées de sel vers les terres.

D’autre part, les 20% des terres salinisées, soit près de 15 Mha sur le continent Africain, ont une origine « anthropique ». On parle alors de salinisation “secondaire”, induite par l’activité humaine, liée aux pratiques agricoles et en particulier à l’irrigation.



Figur04 processus de salinisation des sols et les facteurs influençant(01)

7.2. Facteurs induits par l'homme pouvant entraîner une salinisation ou une sodification irrigation avec des eaux riches en sels(01)-

-élévation de la nappe phréatique due aux activités humaines (filtration de canaux et réservoirs non doublés, répartition irrégulière des eaux d'irrigation, mauvaises pratiques d'irrigation drainage inadapté.

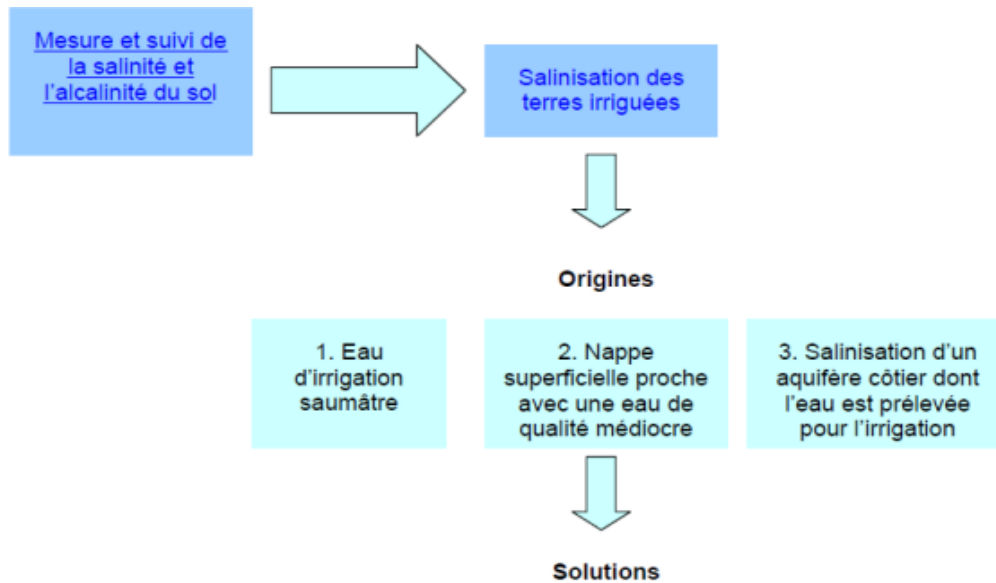
-utilisation d'engrais et autres apports, en particulier quand les terres soumises à une agriculture intensive ont une faible perméabilité et des possibilités limitées de lessivage.

-Utilisation d'eaux usées riches en sels pour l'irrigation.

-Rejet d'eaux usées riches en sel sur les sols.

-Contamination des sols par des eaux riches en sel et des sous-produits de l'industrie

Les facteurs induits par les humains dont l'influence est la plus forte sont l'utilisation des sols les systèmes d'exploitation, la gestion des sols et la dégradation des sols. Les pratiques d'irrigation inadéquates (utilisation d'une eau d'irrigation riche en sel par exemple) et l'insuffisance de drainage provoquent une salinisation.



Figur05 schéma explicatif de processus de la salinisation des sols(01)

8. La texture du sol

8.1. Définition

La texture indique l'abondance relative, dans le sol, de particules de dimensions variées : sable, limon ou argile. De la texture dépend la facilité avec laquelle le sol pourra être travaillé, la quantité d'eau et d'air qu'il retient, et la vitesse à laquelle l'eau peut entrer et circuler dans le sol. (FAO, 2006).

La texture du sol est caractérisée par la taille et la distribution des particules. La composition granulométrique du sol permet de déterminer sa texture. La composition s'exprime en pourcentage des trois principales fractions minérales, 2 mm de diamètre. La texture du sol est une propriété constante dans le temps et peu

Tableau 07 Echelle granulométrique de la texture du sol

Terre fine					Terre grossière	
argile	Limons fins	Limons grossiers	Sable fins	Sable grossiers	Graviers	Cailloux
<2µm	2µm à 20 µm	20 µm a 50 µm	50µm a 200µm	200µm a 2mm	2mm a 20mm	>20 mm

Source: (U.S.D.A., 1996).

Certains spécialistes, notamment agronomes et pédologues, savent déterminer approximativement, après humidification, si le sol est plutôt argileux, limoneux ou sableux. En effet, l'argile colle aux doigts au toucher, le limon est doux et le sable rugueux. Pour déterminer plus finement la texture on évalue au laboratoire pour un échantillon de sol la teneur en sable, en argile et limon. Ensuite on utilise un diagramme qui permet de déterminer la classe texturale du sol

9. Impacts de la salinité sur le sol

9.1 Effet de la salinité sur les propriétés physiques des sols: Lorsque le sodium est présent en quantité importante sur le complexe d'échange, le sol devient instable et acquière une capacité de gonflement. Ce dernier entraîne une diminution de la porosité et la dispersion conduit au colmatage des pores par les particules colloïdales (**Reguig et Larroussi., 2007**). La formation de la croûte de battance

Entraîne une modification de la structure du sol susceptible de se répercuter sur les écoulements des eaux et par la suite elle influence sur le métabolisme et le développement des végétaux. L'humectation rapide du sol provoque la compression de l'air dans les pores fermés et l'éclatement des agrégats et par conséquent l'érosion et l'imperméabilisation des surfaces (**Mimoune., 1995**). La perméabilité est liée à la texture, à l'état du complexe adsorbant et aussi au taux de matière organique et de calcaire (**Durand, 1954 in Mimoune., 1995**).

9.2 Effet de la salinité sur les propriétés chimiques des sols La salinité agit sur le complexe adsorbant par les cations échangeable (Na^+ et Mg^{++}) ce qui provoque le lessivage des bases, la destruction des ponts calciques et comme conséquence une forte vitesse d'infiltration des eaux. Le complexe adsorbant devient saturée en Na^+ et qui provoque la dispersion d'argiles (fraction fine) diminuant ainsi la porosité (aération) et emmagasinement de l'eau (figure 1) (**Madjid N, Tair K, 2012**).

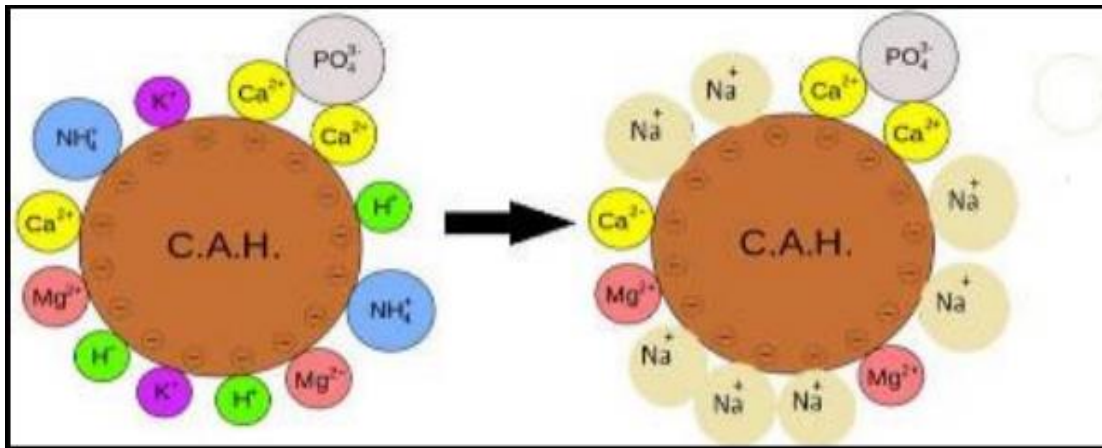


Figure06. Effet de sodium sur le complexe adsorbant (Madjid N, Tiare K., 2012)

9.3 Effet de la salinité sur l'environnement Faouzi et Larbi (2001) ont montré que les remontées du niveau de la nappe au-delà d'un certain niveau, soit 2 m de profondeur par rapport à la surface du sol, engendrent de nombreux problèmes d'ordre environnemental (l'accumulation de sels dans les sols), agricole (l'asphyxie de plantes), et sanitaire (l'accumulation de sels et de nitrates dans les eaux souterraines).

10. Méthodes de lutte contre la salinité

En général, le recours à la jachère augmente la teneur en eau de la rhizosphère, ce qui peut entraîner une élévation de la nappe phréatique et une augmentation de la concentration des sels solubles à la surface du sol ou à proximité. Par contre, la conservation de terres sous couverture végétale permanente et en culture continue sont deux pratiques qui facilitent l'utilisation de l'eau de la rhizosphère, abaissent la nappe phréatique et réduisent le risque de salinisation. On a mis au point l'Indicateur du risque de salinisation du sol (IRSS) pour évaluer les variations du risque de salinisation du sol dans les terres arides des Prairies en fonction du changement de l'utilisation des terres et des pratiques de gestion qui influent sur l'abondance et le déplacement de l'eau et des sels dans la rhizosphère (A.A.C en ligne).

On peut traiter le problème de la salinisation liée à l'irrigation par :

La "prévention": le drainage des terres irriguées

Le drainage permet d'éviter la concentration des sels qui diminueraient les potentialités productives de terres irriguées mais génère des effluents qu'il faut gérer. Les externalités associées à la salinisation ne sont pas immédiates, en général, il faut au moins une décennie

pour qu'elles se manifestent (baisse des rendements, etc.) (**IPTRID, 2006**). Alors, l'installation de drains ouverts ou enterrés ou de puits drainants est nécessaire pour entraîner une partie de l'eau salée vers une zone où le sel peut être stocké sans risque (**Kenfaoui, 1997**).

La "guérison": la réhabilitation des terres salinisées.

La réhabilitation des terres salinisées est coûteuse : elle peut représenter de 65% à 100% des coûts d'investissement. Elle est parfois impossible techniquement (**IPTRID, 2006**).

Le contrôle de la salinité a pour but le maintien de rendements acceptables, plusieurs solutions nous sont offertes pour atteindre cet objectif (**Kenfaoui, 1997**) :

A) Le lessivage

Lorsque la formation des sels solubles dans le sol devient où sur le point de devenir trop importante, les sels peuvent être lessivés en appliquant une dose d'eau plus importante aux besoins de la plante. Cette eau supplémentaire entraîne au moins une partie de sel en dessous de la zone racinaire.

B) La tolérance des cultures à la salinité

Toutes les plantes ne réagissent pas de la même manière à la salinité. Certaines cultures peuvent fournir des rendements acceptables avec une salinité du sol beaucoup plus grande que d'autres, Le degré de tolérance au sel des plantes peut varier de 1 à 10. Cette gamme étendue de tolérance permet un emploi des eaux jugées inutile auparavant; en effet, lorsqu'il n'est pas possible de maintenir la salinité du sol à un niveau acceptable pour la culture, on peut choisir une spéculation de remplacement qui à la fois tolère mieux la salinité prévue et présente une bonne rentabilité économique.

C) Méthodes de culture

-Surfaçage ou planage

Le contrôle de la salinité est difficile à réaliser si le terrain n'est pas suffisamment nivelé pour permettre une distribution d'eau uniforme. Les sels se concentrent dans les points hauts où l'infiltration et le lessivage sont trop faibles alors que l'eau s'accumule dans les dépressions générant un engorgement du terrain et d'éventuels problèmes de drainage. Les problèmes les plus délicats apparaissent lors de l'irrigation par ruissellement, le planage ou le

surfaçage n'est nécessaire en aspersion ou en irrigation localisée que pour empêcher une accumulation excessive d'eau dans les zones basses.

-Calendrier des irrigations

Le choix des dates d'irrigation pour empêcher l'apparition du déficit hydrique améliorera les chances de succès lorsqu'on fera usage d'une eau plus salée. Ce choix peut consister à augmenter la fréquence des arrosages, à irriguer avant un hiver pluvieux, à recourir à la pré-irrigation ou à d'autres méthodes pour faciliter la croissance de la culture.

-Fumures

Les engrais chimiques, les fumiers et les amendements du sol contiennent beaucoup de sels solubles à des concentrations élevées. La localisation de la fumure et l'époque de son application doivent être pris en compte pour ne pas nuire au développement de la jeune plantule. En outre, l'utilisation d'une fumure à faible indice de salinité peut être envisagée. Si la salinité et une faible fertilité limitent à la fois les rendement, la correction, séparée ou simultanée, des deux facteurs limitant améliorera la production.

A) Modification des méthodes d'irrigation

La méthode d'irrigation a une incidence directe à la fois sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau et sur la façon dont les sels s'accumulent. L'irrigation par submersion ou par aspersion sont conçues pour distribuer l'eau uniformément sur toute la surface considérée. Il en résulte une accumulation de la plupart des sels dans les horizons inférieure de la zone racinaire. L'ampleur de l'accumulation dépend de la fraction de lessivage.

B) Aménagements et contrôle de la salinité

Ce sont des opérations réalisées une seule fois, ou rarement répétées, et ont pour objectif la restauration des terres. Ces opérations sont très coûteuses et nécessitent des études spéciales. On peut citer les opérations suivantes:

-Nivellement du terrain

-Amélioration du drainage souterrain

Le drainage doit être pris en compte car il constitue une donnée essentielle pour assurer le succès à long terme de tout projet d'irrigation. Il est nécessaire d'élaborer un projet permettant de contrôler les problèmes de drainage lorsqu'ils sont prévisibles.

-Labour profond

Les sols stratifiés sont difficiles à irriguer de façon efficace. Les horizons durcis gênent ou empêchent souvent la percolation profonde de l'eau, qu'est essentielle au contrôle de la salinité. Un labour profond s'impose alors pour rendre plus perméable les couches du sol. Cette opération est très coûteuse.

-Restauration par lessivage

Si la salinité dépasse de loin la tolérance des cultures, il peut s'avérer nécessaire, afin de rendre la culture possible, de procéder à un lessivage important pour abaisser la concentration en sels (restauration).

La hauteur d'eau nécessaire pour assurer une restauration convenable dépend de la salinité du sol et de la méthode de lessivage utilisée. Un lessivage non continu réduira la salinité du sol de façon plus efficace qu'un lessivage continu (submersion), mais il faudra plus de temps pour mener cette opération. L'efficacité est accrue si l'eau de percolation se déplace lentement (écoulement non saturé).

C) Changement ou mélange des eaux

Changer une eau d'irrigation constitue une solution simple mais radicale à un problème de qualité d'eau. Ce n'est possible que lorsqu'on dispose d'une eau de meilleure qualité et en quantité suffisante. Or, les problèmes de salinité sont souvent rencontrés dans des régions où l'eau fait défaut. On peut être amené à utiliser un mélange d'eaux de qualités différentes, ce mélange ne diminuera pas la charge totale en sel, mais il permet d'accroître la surface irriguée. La qualité de l'eau résultant du mélange est:

Le mélange des approvisionnements en eau ne constitue pas une pratique courante pour le contrôle de la salinité. La plupart des utilisateurs emploient alternativement les deux ressources. Cette aptitude des utilisateurs est due au fait que le mélange de deux ou plusieurs eaux de qualité différentes nécessitent un équipement supplémentaire et une demande en temps non négligeable.

Partie expérimentale

1/ Présentation générale du cadre d'étude Sebkha El Mahmel

1.1. Localisation générale

La Wilayat de Khenchela est caractérisée par une zone naturelle humide appelée Sebkhat El Mahmal, située dans la commune d'El Mahmal, arrondissement d'Oued Rashach, située entre les coordonnées 15 7° E et 20 35° N. la zone d'étude fait partie de complexe écologique de l'Est Algérien ,et la zone humide de Sebkhet ElMahmel se situe a une dizaine de kilomètre de la wilaya de Khenchela et a 3 kilomètre vers l'Est de la commune d'El Mahmel cette plaine s'étale sur une superficie de 371km2 Caractérisée par un climat semi-aride.

La zone humide de Sebkhet El Mahmel (Wilaya de Khenchela) couvrant d'environ 1.290 Hectares, un lac salé allongé et connus (sebkhet Ouled Amara). La plage a des plantes résistantes au sel, ce qui en fait un habitat pour la migration de certains oiseaux de toutes sortes et variétés à la recherche de nourriture et de moyens de subsistance.



Figur01 Sebkhet EL Mahmel

Partie 01 Travaux sur terrain

1. Matérielle d'étude sur terrain

- GPS pour déterminer les point de prélèvement.
- Carte routière de localisé la zone.
- Tarière de prélèvement.
- Règle incluse.

2. Méthode d'étude sur le terrain

L'échantillonnage des sol a été effectué sur 5 échantillons(E1,E2,.....E5) . nous avons prélevé des échantillon en tenant compte leur cordonnées lombaire à une profondeur de 15 cm ; le prélèvement à été effectué les limite de sebkha (Nord, Sud, Est, West, zone d'entrée les eaux usées).



Figure02 prélèvement des échantillons sur terrains

Tableau01 Les coordonnées des points entête georeferencie

Les échantillons	profondeur	Nord	Est	Le coté
01	15cm	35° 21' 14"	7° 16' 23"	Est
02	15cm	35° 20'47"	7° 15' 57"	Nord
03	15cm	35° 20' 31"	7° 15' 36"	West
04	15cm	35° 20' 54"	7° 15'43"	Sud
05	15cm	35° 21' 20"	7° 15' 35"	Zone d'entrée des eaux usée

Partie02 traveaux de laboratoire**1. Matérielles de laboratoire**

- Bécher.
- pipette graduée.
- Bouteille en plastique propre.
- Fiole jaugée.
- Eprouvette.
- Burette.
- Tube à essai.

2. Appareilles:

- PH mètre.
- Conductimètre.
- Chronomètre.
- Agitateur magnétique.
- Spectrophotomètre de flamme.

- Balance.
- L'étuve.
- Tamis.

3. Méthodes (Mode opératoire)

3.1. Détermination de PH

Peser 10 g de sol sec (déshydraté en atmosphère de laboratoire) dans un bécher en verre de 50 ml. Ajouter 50 ml d'eau distillée à l'aide d'une éprouvette graduée. Bien mélanger la suspension à l'aide d'une tige de verre et laisser reposer 30 minutes. Agiter la suspension toutes les 10 minutes pendant cette période. Après une heure, agiter la suspension. Bien et directement mettre l'électrode commune de la suspension à une profondeur d'environ 3 cm. Prendre la lecture après 30 secondes



Figure03 Détermination de PH.

3.2. Détermination de la conductivité, salinité, TDS

Préparation de la suspension 1 : 1 (sol : eau)

- filtrer la suspension à l'aide d'une pompe à vide (utiliser du papier Whatman n° 42 dans un entonnoir Buechner, puis l'humidifier avec de l'eau distillée et s'assurer qu'il recouvre tous les trous de l'entonnoir).
- mettre la pompe à vide en marche
- ouvrir le bec de la pompe et verser la suspension dans l'entonnoir Buechner
- poursuivre la filtration jusqu'à ce que le sol dans l'entonnoir commence à se fissurer
- refiltrer si la lixiviation est clair - transférer la lixiviation dans un bécher de 50 ml
- la lecture est faite en immergeant la cellule conductrice dans la solution
- sortir La cellule a été retirée du filtrat et lavée directement avec de l'eau distillée et séchée avec du papier hygiénique doux
- les lectures ont été enregistrées en mscm à une température de 25 ° C. La précision de là La conductivité électrique du dispositif a été vérifiée à l'aide d'une solution de KC1 0,01 N pour donner 1 413 ms/m à une température de 25°C.



Figure04 Détermination de la conductivité, Salinité, TDS

3.4. Détermination de chlorure; sulfates

-chlorure Introduire 50 ml d'eau à analyser préalablement filtrée dans un erlen Meyer. Ajouter 1ml de bichromate de potassium. Puis verser alors au moyen d'une burette la solution de nitrate d'argent (N/10) jusqu'à apparition d'une teinte rougeâtre. Soit V le nombre de ml de nitrate d'argent (0.1,N) utilisé.

$V_1 * 7.1 = \text{cl-mg/l}$

- sulfates

Dans un erlen Meyer, introduire successivement 50 ml d'eau à analyser préalablement filtrée, 2 ml d'HCl à 10% et 10 ml de BaCl₂ (chlorure de baryum). Préparer dans les mêmes conditions un tube témoin en remplaçant l'eau à analyser par l'eau distillée. Agiter énergiquement et laisser reposer pendant 10 minutes. Faire les lectures au spectrophotomètre à la longueur d'onde 420 nm et se reporter à la courbe d'étalonnage.

3.4. Détermination de sodium, Potassium

-Sodium

Allumez le spectrophotomètre avec flamme selon les instructions jointes à l'appareil. Lisez la série de solutions étalons appropriées pour le sodium et tracez le graphique.

- Lire la concentration en sodium dans les échantillons (extraits de sol) sous une longueur d'onde de 589 nm.

-Potassium

Peser 5 g de sol séché à l'air (moins de 2 mm) dans un erlenmeyer de 250 ml, ajouter 100 ml d'eau distillée, agiter pendant 1 heure, filtrer et lire la concentration en potassium dissous dans un spectromètre à flamme.

Calcul du potassium dissous ($K \text{ ppm} \times A / P = \text{ppm K}$) La lecture se fait à partir du graphique.

3.5. Détermination calcium et magnésium

_Calcium

A l'aide d'une pipette, introduire 50 ml de l'échantillon préparé dans une fiole conique de 250ml. Ajouter 2 ml de la solution de NaOH et environ 0,2 g de l'indicateur HSN. Mélanger et doser immédiatement. Ajouter la solution d'E.D.T.A tout en continuant d'agiter, verser lentement. Le virage est atteint lorsque la couleur ne doit plus changer avec l'ajout d'une goutte supplémentaire de la solution d'E.D.T.A

$C \text{ ca } C1 \times V3 / V0 C1$: est la concentration en E.D.T.A exprimée en mole / l

V_0 : est le volume en ml de la solution de l'EDTA utilisé pour le dosage.

V_3 : est le volume en ml de la solution de l'E.D.T.A utilisé pour le dosage

-Magnésium

Dans un erlen Meyer verser 100 ml d'eau à Analyser et 10 ml d'oxalate d'ammonium, puis agiter et laisser reposer 30 minutes puis sur filtre Récupérer 50 ml exactement mesuré du filtrat exact et opérer comme précédemment'.

3.6. Détermination de carbonate et bicarbonate

TAC : Le titre alcalimétrique complet correspond à la teneur de l'eau en alcalis libres, carbonates et bicarbonates. Utilisez l'échantillon traité précédemment ou le prélèvement primitif s'il n'y a pas eu de coloration. Ajouter 2 gouttes de solution d'hélianthine, une coloration jaune apparaît. Titrer avec le même acide HCl (N/50) jusqu'au virage du jaune au jaune orangé (pH = 4,4). S'assurer qu'une goutte d'acide en excès provoque le passage de la coloration du jaune orange rose orange (pH = 4), Soit (V_2) le nombre de ml d'HCl utilisé. Retrancher de ce volume 0,5ml, quantité HCl nécessaire pour le virage de l'indicateur, qui est un peu plus faible que le pH de neutralisation exacte du bicarbonate.

$$N=n_2-0.5$$

$$\text{HCO}_3^- = \text{TAC} (F^\circ) * 12.2.$$



Figure05 Détermination des éléments chimiques



Figure06 spectrophotomètre de la flamme

3.7. Analyse granulométrique

Analyse granulométrique par tamisage.

Cette analyse est utilisée pour les sols dont la granulométrie est supérieure à 100 micromètres tels que le gravier et le sable grossier. Le procédé consiste à placer l'échantillon dans une étuve à une température de 105° - 110° puis à le peser pour l'obtenir puis à le faire passer dans une série de masses sèches. Les tamis de sol standard contiennent des toiles successives plus petites. Le poids du sol retenu dans chaque tamis est déterminé et le pourcentage cumulé passant par les tamis est calculé. Le tamisage à sec ne convient que pour les matériaux sans cohésion, c'est-à-dire uniquement pour le sable ou le gravier. Dans le cas des sols argileux ou argileux, le tamisage se fait sous l'eau à l'aide d'agents chimiques pour séparer les particules du sol. Mesure de granularité par sédimentation.



Figure07 Analyse granulométrique par tamisage



Figure08 résultats d'analyse granulométrique

3.8. Matière organique

Carbonisation : On prend un échantillon de terre et on la pèse 5 g, on la met dans une étuve à 700°C, et au bout de 24 heures on la repese. La terre perd de son poids après combustion. Ainsi, elle perd l'eau qui entre dans sa composition, ainsi qu'une oxydation totale de la matière organique et perd également la chaux qui se désagrège.



Figure09 Détermination de matière organique.

3.9. Détermination de la perméabilité

Nous mettons au fond du tube une quantité de gravier (diamètre 2-4 mm) à une hauteur de 2 cm.

- Ajouter lentement sur les parois du tube une quantité d'eau à une hauteur de 2 cm afin de niveler le gravier horizontalement. Mettre dans 5 gélules 10 g d'échantillon de sol.
- Nous mettons un entonnoir sec sur le tube et vidons le contenu des capsules (chacune séparément), et chaque fois nous nivelons le sol avec de l'eau comme nous l'avons fait pour le gravier.
- Le tuyau est relié à une source d'eau (eau distillée), de sorte que la hauteur de l'eau appliquée à la surface du sol soit constante (tension constante). Il reçoit l'eau pénétrant à travers le sol dans un récipient gradué.
- Nous nous débarrassons de l'eau pénétrante dans les 5 premières minutes, puis mesurons l'eau pénétrante toutes les 10 minutes ou 15 minutes pendant une heure

3.10. Détermination de la porosité

Prenez un cylindre de volume connu (V) [hauteur (h), rayon] puis pesez-le et supposez son poids.

- Insérez le cylindre verticalement dans le champ, à l'aide d'un maillet en bois, jusqu'à ce qu'il soit complètement rempli de terre.
- Retirez la terre autour du cylindre, couvrez-le par le haut et coupez l'excès de terre en dessous avec un couteau.
- Pesez le cylindre rempli de terre humide.
- Insérez le cylindre rempli dans le four électrique à une température de 105°C pendant 24 heures afin de le sécher. Après séchage, pesez le cylindre rempli de terre sèche

Résultats et Discussion

I- Statistiques descriptive

Les résultats analytiques des échantillons de sol auprès de la Sebkhet El Mahmel sont résumés dans le tableau02

Les résultats du pH de la solution du sol montrent que ce dernier est neutre à légèrement alcalin (entre 7.61 et 8.44). Ceci est due à la prédominance des sels alcalins, et aussi à la faiblesse du pouvoir tampon intiment liée à la texture du sol ce qui conduit à une capacité d'échange cationique faible

La conductivité électrique varie entre 3.03 et 6.93 ms/cm, elle est relativement plus importante dans les horizons présentant une croute, cependant sa variation horizontale est fonction uniquement de la distance par rapport à la cuvette salée et la situation géographique par rapport aux vents dominants ainsi l'accumulation en surface du sol de sels est due à l'effet de l'évaporation intense.

Tableau 02 Statistiques descriptives

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH	7,61	8,44	8,03	0,40
Salinité %	1,70	4,30	2,90	1,09
TDS (mg/l)	1663,00	3000,00	2329,20	626,90
CE (ms/cm)	3,03	6,93	4,86	1,64
Cl ⁻ ppm	397,00	518,00	458,00	54,25
Ca CO ₃ %	2,25	3,40	2,58	0,47
HCO ₃ ⁻ ppm	25,41	37,51	29,04	5,13
SO ₄ ²⁻ ppm	40,93	53,36	46,58	5,41
Na ⁺ ppm	140,04	206,09	173,74	31,32
K ⁺ ppm	15,71	29,50	22,53	5,19
Mg ²⁺ ppm	1,36	2,72	2,03	0,60
Ca ²⁺ ppm	15,33	31,44	20,22	6,72

Le calcaire total est très faible au niveau des cinq échantillons. La solution du sol est dominée par le Na^+ suivi des SO_4^{2-} . Cette dominance constatée est la conséquence d'un phénomène de sodisation du complexe absorbant. Pour le Ca^{2+} c'est la concentration ionique élevée qui engendre une dissolution du gypse et la libération dans la solution de ce cation.

Tableau03 Classes de salinité en fonction du Taux de sels dissous et la CE

Les Echantillons	Salinité %	Conductivité (ms/cm)	Classe de la salinité
1	3,7	6,08	Moyennement salé
2	2,7	4,66	Moyennement salé
3	4,3	6,93	Moyennement salé
4	2,1	3,61	Peu salé
5	1,7	3,03	Peu salé

Selon les normes de l'USSL (1954), aucun échantillon n'est classé dans les classes sol non salés et sol salé, 2 échantillons sont peu salés, 3 échantillons sont moyennement salés, (tableau03). La salinité suit un gradient décroissant en s'éloignons de la sebkha (sol moyennement salé, sol peu salé)

II- La Granulométrie

Les résultats de la granulométrie des échantillons sont présentés dans le tableau04

L'étude granulométrique a permis de déterminer deux classes granulométriques. Il s'agit des argiles et de l'argile sableuse.

Ce sont les sols alluvionnaires caractéristiques des sebkhas Algériennes.

Tableaux04: résultats de la granulométrie

Les échantillons	Pourcentage de l'argile%	Pourcentage de sable%	type de sol
1	76%	22%	Argile
2	82%	16%	Argile
3	50%	50%	argile sableuse
4	100%	0%	Argile
5	56%	43%	argile sableuse

III- La Matière Organique

Les sols des sebkhas et les sols adjacents sont pauvres en matière organique. Pour nos échantillons les teneurs ne dépassent pas 2g.

Tableaux05: résultats de la matière organique

les échenillions	Mo g
1	0.6g
2	0.6g
3	0.6g
4	1.1g
5	2g

IV- La perméabilité et la porosité

Tableaux06: résultats de la perméabilité et porosité

les échantillons	Perméabilité (mm/s)	porosité%
1	400	50
2	900	52.3
3	1225	54.5
4	784	56.5
5	999	58.3

D'après les résultats obtenus, on constate que les échantillons ont des porosités qui varient entre 50% et 58.3 %. Cette variation des limites constatée, à tendance de s'augmenter en allant vers les limites de sebkha de l'échantillons 1 à 5.

Les valeurs varient entre 400 et 1225, ou l'on note la différence de perméabilité d'un échantillon à l'autre et cela du au lieu de prélèvement.

V-Faciès géochimique du sol

Le calcul du rapport ($Mg^{2+}/Na^+ : SO_4^{2-}/Cl^-$), nous donne une vue d'ensemble sur la répartition spatiale des faciès géochimiques au niveau du sol de la sebkha. Un rapport inférieur à 1 des deux couples montre un seul faciès dominant : le chloruré sodique.

Tableau 07 calcul des rapports caractéristiques (les teneurs sont convertis en milliéquivalent/l)

	Mg ²⁺ /Na ⁺	SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻
E1	0,02	0,08
E2	0,02	0,07
E3	0,02	0,08
E4	0,03	0,08
E5	0,02	0,08

VI-La relation salinité/ porosité

Il y a un manque des études qui traitent l'effet des sels sur les caractéristiques géotechniques des sols salés malgré que ce phénomène de salinité ait un impact négatif. Dans cette partie on va montrer à travers les relations caractéristiques le lien entre la porosité et la salinité. La figure ci- dessous montre à gauche le résultat de l'établissement du lien des cinq échantillons et à droite en éliminant le point E3. L'analyse montre une corrélation inverse entre la porosité et la salinité ce qui signifie que au fur et à mesure que les sels se transforment en cristaux la porosité diminue. Ces cristaux de sels diminuent ainsi la perméabilité des sols. L'élimination du point E3 a augmenté le coefficient de corrélation entre les deux paramètres.

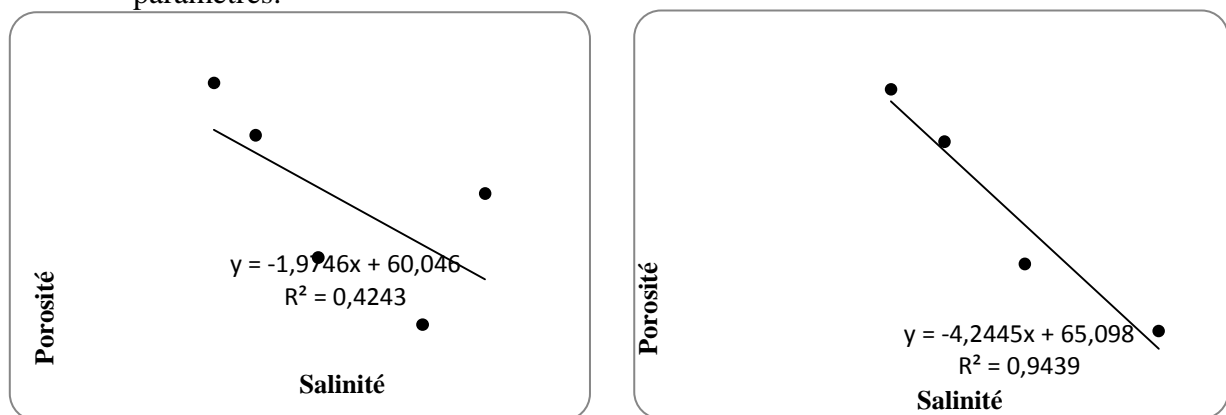


Figure 10 Le lien Salinité-Porosité avant et après l'élimination de l'échantillon E3

L'analyse en composantes principales

L'ACP est une méthode d'analyse des données multidimensionnelles, basée sur le changement du référentiel des variables brutes (canaux de télédétection) dans un nouveau référentiel de variables synthétiques (les composantes principales).

Pour la salinité du sol, l'ACP permet de mieux caractériser les corrélations entre les éléments d'un groupe d'individus (Echantillons).

L'observation de la matrice de corrélation de n-Pearson (Tableau08), montre plusieurs corrélations. La matière organique est négativement corrélée au pH en raison que les acides humiques libèrent le proton H⁺ responsable de sa diminution.

La salinité est due essentiellement à la présence des ions sodium et potassium caractéristiques des sels dominants des chotts et sebkhas. La présence de sels en excès dans le sol est un facteur limitant de la vie biologique. Pour cela la présence de sels diminue la matière organique (sols infertiles).

Tableau 08 Matrice de corrélation de n-Pearson

Variables	pH	salinité	TDS	CE	Mo	Cl	Ca CO3	HCO3-	SO4--	Na+	K+	Mg2+	Ca2+
pH	1												
salinité	0,74	1,00											
TDS	0,56	0,96	1,00										
CE	0,76	1,00	0,96	1,00									
Mo	<u>-0,82</u>	-0,78	-0,72	-0,80	1,00								
Cl	0,08	-0,09	-0,03	-0,07	0,10	1,00							
Ca CO3	-0,02	0,37	0,57	0,37	-0,20	0,62	1,00						
HCO3-	-0,41	-0,54	-0,51	-0,55	0,07	-0,52	-0,47	1,00					
SO4--	-0,07	-0,07	0,05	-0,05	0,20	<u>0,97</u>	0,74	-0,58	1,00				
Na+	0,81	<u>0,97</u>	0,93	0,98	<u>-0,81</u>	0,12	0,45	-0,61	0,11	1,00			
K+	0,85	<u>0,95</u>	0,85	0,95	<u>-0,87</u>	-0,25	0,10	-0,36	-0,29	0,92	1,00		
Mg2+	0,12	0,52	0,54	0,50	-0,46	-0,83	-0,12	0,28	-0,75	0,33	0,58	1,00	
Ca2+	-0,50	-0,25	-0,19	-0,28	0,12	-0,84	-0,40	<u>0,79</u>	-0,77	-0,44	-0,15	0,69	1,00

La projection des variables et individus sur le plan I-II exprime 85.54% de la variance. Le cercle de corrélation permet de visualiser les variables corrélées entre elles et par conséquent leurs dissemblances et ressemblances. Les deux figures qui suivent montrent deux groupes d'éléments : pH, salinité, TDS, CE, Mo, Na⁺ et K⁺ corrélés à l'axe I avec un total de 52.72%. Les individus présentant cet axe au même temps sont les échantillons : E1, E3 et E5 caractérisés par de fortes teneurs en sels. Le deuxième axe est corrélé à l'échantillon E4.

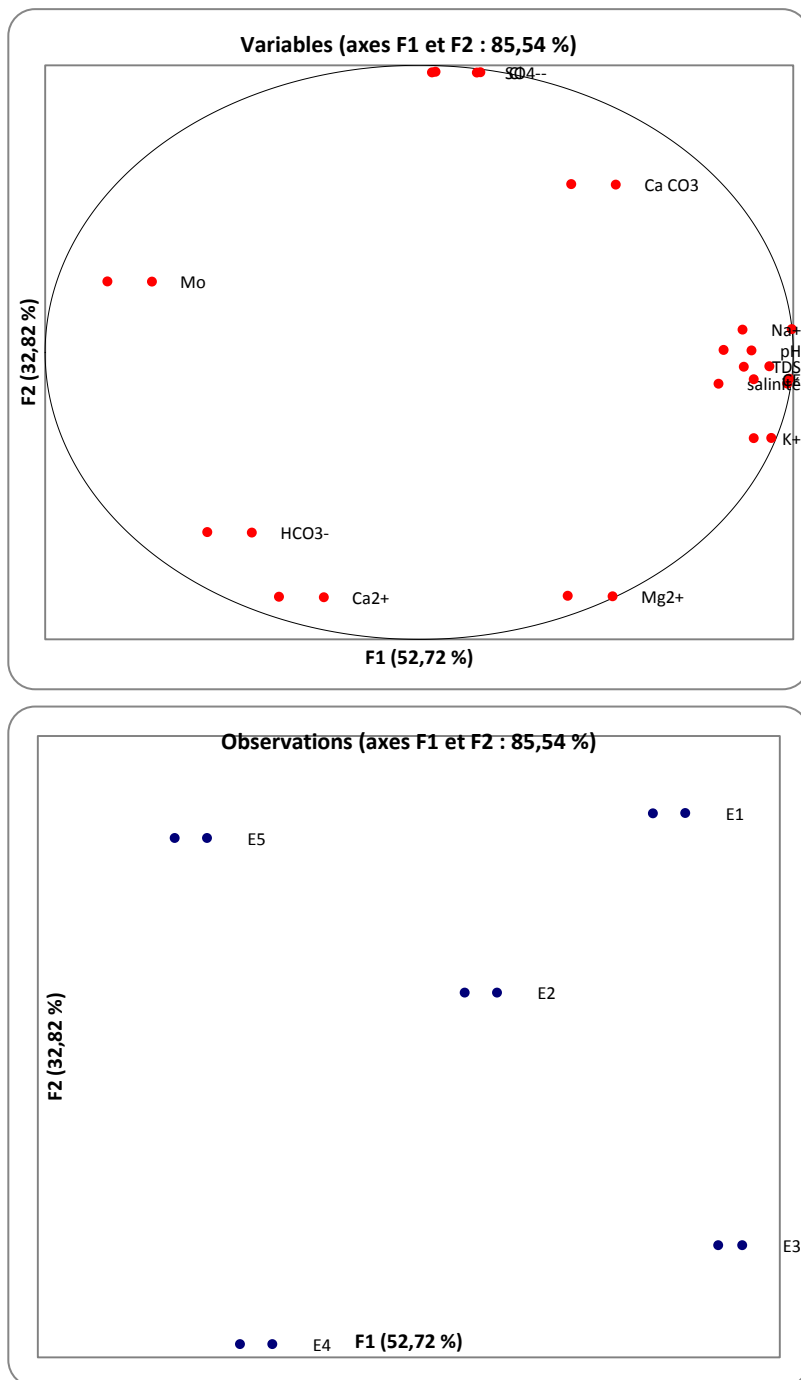


Figure : 11 Projection des variables et individus sur le plan I-II

La dispersion des échantillons dans le plan factoriel indique qu'elles proviennent d'endroits différents. L'échantillon E5 coïncide avec l'aire de la matière organique. C'est un échantillon issu d'un sol proche d'un point de rejet d'eaux usées brutes.

2. Conclusion générale

La salinisation de la sebkha est d'abord primaire, comme pour la plupart des sols de l'Algérie, la concentration des sels dans la zone d'étude est importante, voir presque toute la surface.

On observe des teneurs élevée (3.03à6.93) ; des sols salés au périphérie de la sebkha et des sols extrêmes salés au limites de cette dernière (selon l'échelle de la salinité), ce qui influe sur les propriétés mécaniques du sol.

Des valeurs comprises entre 50% et 58.3 % pour la porosité et de 400mm/s et 1225mm/s pour la perméabilité, en particulier des échantillons qui ont une texture argileuse. Ce qui confirme que le sol argileux a une tendance a fixé le sel plus que les autres types de sols ; notamment le sable qui perd sa consistance surtout lorsqu'il est exposé à L'eau.

Nos résultats obtenus peuvent être exploités comme référence pour des travaux ultérieurs ; reste à définir et à améliorer par des études approfondies sur les mêmes paramètres avec un nombre d'échantillon plus important.

3. Les Références

- ARAGNO M, GOBAT. JM. MATTHEY W. 2003. Le sol vivant, base pédologie /Biologie des sols. 2ed, imprimé en France, 568 p
- AUBERT G.1950.les sols des régions semi- arides d'affrique el leur mise en valeur-in encyclopédie colonial vol .A.O.F.
- Aubert. G., 1975. Les sols sodiques en Afrique du nord. Annales de l'I.N.A. Alger, N° 6, pp. 185-195.
- Baize D, Jabial B, 1995, Guide pour la description des sols. Ed INRA.
- BOIFFIN J et MARIN – LAFLECHE A.1990. La structure du sol et son évolution, Conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur. Ed INRA, Paris, 215 p.
- Bottraud J.C., Bornan M., & Serva E., 2010. Mesures de résistivité appliquée à la cartographie en pédologie. Association Française pour l'Etude du Sol. Laboratoire Science du Sol. INRA., ENSA., pp 279-293.
- Boivin P., Hachicha M., Job J.O. & Loyer Y., 1989. Une méthode de cartographie de la salinité des sols « Conductivité électromagnétique et interpolation par krigeage ». Science du sol. Vol.27, n°1, pp 69-72.
- Bryssine. (1961). La salinité des sols et ses problèmes. Les cahiers de la recherche Agronomique, 12, 37-57.
- BIAREZ J. et al. 1995 - Du matériau discontinu granulaire au milieu continu fictif. Localisation des grandes déformations. Cinématique de suivi des ouvrages. Disques compacts et Vidéo cassette VHS. Ecole Centrale de Paris.
- CHESWORTH W., 2008. Encyclopedia of Soil Science, Ed. Springer Dordrecht, Berlin, 902 p.
- Cherbuy. B., 1991. Les sols salés et leur réhabilitation. Etude bibliographique. CEMAGREF, école. Nat. Renne, 170p.
- COSTET J., SANGLERAT G. - Cours pratique de mécanique des sols DUNOD éditeur.

- CASSAN M., 1994 - Aide-mémoire d'hydraulique souterraine, Presses des Ponts et Chaussées.
- Collectif, 1995 - Fondations et soutènements. Techniques de l'ingénieur,
- CALLOT G. 1981. Les interactions sol – racine, incidences sur la nutrition minérale. Ed. INRA, Paris, 305 p.
- DOUAIK A., 2005. Evaluation of the space-time variability of soil salinity: By statistical, geostatistical, and Bayesian maximum entropy methods. Doctor (PhD.) thesis, Université Gent, 211 p.
- Durand J.H., 1983. Les sols irrigables, Agence de coopération culturelle et technique. P.U. France, 190 p.
- Daoud Y et Halitim A., 1994. Irrigation et Salinisation au Sahara Algérien. Sécheresse. 3 (5), pp : 151- 160.
- Djili K., Daoud Y., Touaf L., 2003. La salinisation et la sodisation des sols d'Algérie. Congrès scientifique sur l'apport de la recherche scientifique et des nouvelles technologies dans le développement et la mise en valeur des régions arides et semi-aride climat. 2-3 octobre. El-Oued, 9 p;
- Durand J.H., 1983. Les sols irrigables, Agence de coopération culturelle et technique. P.U. France, 190 p.
- De Jonc E., Balantyne A.K., CmeronD.R. Read D.W.L., 1979.Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic induction probe to aid salinity surveys. Soil Sci. Soc.Am.J., 43:810- 812.
- Diakhate, M. (1986). Le barrage de Diama: essai sur l'évaluation de ses impacts potentiels. Revue de Géographie de Lyon, 61, 43-61.
- DEMOLON A. 1968. Croissance des végétaux cultivés, Ed DUNOD, 6eme édition, Tome II, paris, 520 p.
- FAO., 2006. Conférence électronique sur la salinisation extension de la salinisation et stratégies de prévention et réhabilitation, organisée et coordonnée par le programme International pour la technologie et la recherché en irrigation et drainage. 12p

- FAO., 2006. Conférence électronique sur la salinisation. Extension de la salinisation et stratégies de réhabilitation. Organisée et coordonnée par Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et Drainage, du 6 février au 6 Mars 2006. 12p.
- F.A.O., 1972. La salinité .Doc. FAO. N°7, Rome, 272p.
- FAOUZI M., LARABI A., 2001. Problématique de la remontée, de la salinité et de la pollution par les nitrates des eaux de la nappe phréatique des Beni-Amir (Tadla, Maroc). Ingénieries, n° 27, pp 23-36.
- Gaucher. G., Burdin., 1974. Géologie et géomorphologie et hydrologie des terrains salés. Ed Presses universitaires de France, Paris. 230 p
- Gaucher.G., 1947. Méthodes actuelles d'étude des terrains salés en Afrique du Nord. Conférence de pédologie Méditerranéenne, Bull. AFES, Paris.
- Gupta. I. C., 2000. Assessment of quality of irrigation waters and industrial effluents discharged on land for irrigation. Industrial waste waters and environmental pollution .I.C
- Goulet E., et Borbeau G., 2004. Apports des mesures de résistivité électrique du sol dans les études sur le fonctionnement de la vigne et dans la spatialisation parcellaire. Congrès « Viticultural Terroir Zoning », pp 1-8.
- Hamdi A, 1999. Saline irrigation and management for sustainable use In: Advanced Short Course on saline irrigation Proceeding, Agadir.152-227.
- Halitim A, 1988. Sols des régions arides d'Algérie. OPU, Alger, 384 p
- HABIB P., 1997 - Génie géotechnique - Applications de la mécanique des sols et des roches, ELLIPSES, 222 p.
- HEAD, 1992 - Manuel of Soil Laboratory Testing – Vol. 1, 2 ET 3; Second Edition; Pentech Press. -HENIN S, GRAS R, MONNIER G. 1969. Le profil cultural, l'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Ed. Masson ET Cie, Paris, 332p.
- Hans. (2003). Dryland salinity: A key environmental issue in southern Australia. Plant and soils, 257, 5-7.
- IPTRID, 2006. Conférence électronique sur la salinisation : Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation, 12p.

- IRD, 2008. Les dossiers thématiques de l'Institut de recherche pour le développement. Les sols sont fragiles. 21p.
- IPTRID, 2006. Extension de la salinisation et Stratégies de prévention et réhabilitation Thèse d'Etat de l'Université d'Alger Conférence électronique sur la salinisation, IPTRID (Programme International pour la Technologie et la Recherche en Irrigation et Drainage), FAO, CISEAU : Etude des sols des Plaines du Chéelif., 582p
- JOB J.O., HACHICHA M., Loyer J.Y., 1990 : conductivité électromagnétique et cartographie de la salinité des sols. Rapport Ministère de l'agriculture et center ORSTOM.pp.4, 5.
- Kenfaoui A., 1997. La salinité des eaux d'irrigation. Synthèse bibliographique réalisée par les élèves ingénieurs de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts de Montpellier. kenfaoui@engref.fr
- Le brusq J.Y., et Loyer J.Y., 1982. Relations entre les mesures de conductivités sur des extraits de sols de rapports sol/solution variables, dans la vallée du fleuve Sénégal. Cah., ORSTOM., sér. Pédol., vol. XIX, no 3, pp293-301.
- 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 ; Ciheam. Montpellier, 397 p.
- Legros, J.-P. (2009, 06 22). LA SALINISATION DES TERRES DANS LE MONDE. Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, 40, 257-269.
- Mouhouche. B., 2000. L'avenir de l'agriculture saharienne dépend de la maîtrise de la salinisation des sols et de la valorisation de l'eau d'irrigation. Actes du premier Symposium International sur la filière blé – Enjeux et Stratégie. (Blé 2000, Alger), (O.A.I.C.). ALGER 7 – 9 février 2000, pp. 213-220.
- MARLET. S., 2004. Hommes, terre et eaux (130, sp): pp 32-38. Séminaire sur la modernisation de l'agriculture irriguée, 2004-04-19/2004-04-23, Rabat, Maro Mathieu C., et Pieltain F., 2003. Analyse chimique des sols. Ed. Tec et doc. Lavoisier, Paris, 292 p.
- Mathieu C. et Pieltain F., 2003. Analyse chimique des sols. Ed. Tec et doc. Lavoisier, Paris, 146 p.

- Marlet S., Vincent B, Vidal A, Bouarfa S, Wu J, Yang J, N'Diaye M.K, Kuper M, Zimmer D., 2005. Gestion de l'eau et de la salinité et redistribution des sels dans les périmètres irrigués. Congress, Symposium R. 12. International Commission on irrigation and drainage. Beijing. Revue 12- 18p.c.
- Mimoune., 1995. Gestion des sols salés et désertification dans une cuvette endoréique d'Algérie (sud du chott El Hodna). Thèse de Doc. Univ. D'Aix Marseille É. 204p.
- Madjid N, Tiare K., 2012. Mémoire online géographie impact de la salinité due au traitement de sol sur l'environnement. Cas d ENASEL EL-OUTAYA wilaya de Biskra par Nacer Madjid Tiare Khaled ; Université Mohamed khider Biskra-Algérie ingénieur d'état en écologie et environnement ,41p.
- Mouffok. M, 2003. Mémoire ING d'état I.N.F.S.A Mostaganem, l'espace littoral ouest de Mostaganem cas de la zone des sablettes-Ouréah en vue d'une orientation touristique, p34et 35
- Ministère de l'Equipement, du Logement et des Transports, 1993 - Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil (CCTG applicables aux marchés publics de travaux), Fascicule n° 62 - Titre V, imprimerie des journaux officiels, 182 p.
- OADES J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 56, 377-400.
- OORTS K... 2006. Effect of tillage system on soil organic matter stocks and C and N fluxes in cereal cropping systems on a silt loam soil in Northern France, PhD thesis, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris
- PELTIER R., 1969 - Manuel du Laboratoire Routier – LCPC – Dunod éditeur.
- Reguig Hadj larroussi. 2007. Contribution l'étude de la relation sol-végétation dans la région sud de la zone humide de chott et Hodna.méme.ding.en biologie Msila.
- Richards L. A., 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Agricultural Handbook 60, Washington, USA, p. 160
- Rhoades. J.D., 1997. Sustainability of irrigation: an over view of salinity problems and control strategies, Riverside, CA, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS.

- Rhoades J.D., Chanduvi F. & Lesch S.M., 1999. Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements.' FAO Ed. (FAO) 150 p
- Saidi D, Le bissonnais Y, Duval O, Daoud Y, Halitim A, 2004. Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Cheliff (Algérie). *Etude ET Gestion des Sols*, Vol. 11, pp 81-92.
- Servant, J. (1975). Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphe. Exemple des sols salés du Sud et sud-ouest de la France. Montpellier: These de doctorate d'état
- Hans. (2003). Dryland salinity: A key environmental issue in southern Australia. *Plant and soils*, 257, 5-7.
- Szabolcs, I. (1989). Salt-affected Soils. Florida, USA: CRC Press. Szabolcs, I. (1989). Salt-affected soils. Florida: CRS pressinc.
- Schneider S., 2010. Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols à partir d'une modalisation inverse de Données d'infiltration et de résistivité électrique. Thèse de doc. Université Paris-Sud 11, Paris, 146 p.
- Source (U.S.D.A), 1996, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique-Arbaoui Abdellah, Mémoire de Master en Hydraulique, Etude de l'impact de la qualité des eaux d'irrigation sur la fertilité du sol, la plante et le rendement des systèmes d'irrigation, Année 2014, Melle Terchi Sara, p18.
- SCHLOSSER F., 1989 - Eléments de mécanique des sols - Pressent de l'ENPC, 280 p.
- SOUTY N. 1987. Aspect mécanique de la croissance des racines, mesure de la force de pénétration, *agronomie* 7 (8) Montfavet, pp623-630.
- YOUNG I.M., BLANCHART E., CHENU C., DANGERFIELD M., FRAGOSO C., GRIMALDI M., INGRAM J. ET MONROZIER L.J. 1998. The interaction of soil biota and soil structure under global change. *Global Change Biology*, 4, 703-712.
- Zahow. M.F., Amrhein C., 1992. Reclamation of a saline sodic soil using synthetic polymers and gypsum. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, pp. 1257-1260.

4. Annexes

Annexe01 (01) document d'cour salinisation alcalinisation et dégradation du sol du Dr Laiche aouidan.

Résumé

L'application de méthodes statistiques pour caractériser l'effet de la salinité sur les propriétés mécaniques du sol permet de réaliser des conclusions rapides et d'en faire un bilan de l'extension de la salinité dans l'espace.

L'expérimentation est réalisée sur une aire importante de la limite d'Es Sebikha caractérisée par un climat semi-aride. Les prélèvements des échantillons (5 échantillons) ont été effectués sur un seul niveau de profondeur (15 cm) répartis sur les limites de la sabkha Nord et Sud-Est, Ouest et la zone d'entrée des eaux usées.

Les résultats obtenus indiquent une forte variabilité spatiale de la conductivité électrique 3030 et 6930 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Une corrélation très hautement significative entre la porosité, perméabilité et la salinité a été révélée.

Mots clés : Sebikha, Salinité, Mécanique, Perméabilité, Porosité, Conductivité électrique
Summary

The application of statistical methods to characterize the effect of salinity on the mechanical properties of the soil makes it possible to draw rapid conclusions and to make an assessment of the extension of salinity in space.

The experiment is carried out on a large area of the limit of Es Sebikha characterized by a semi-arid climate. The samples were taken (5 samples) on a single level of depth (15 cm) distributed over the limits of the North and South-East and West sabkha and the sewage inlet zone.

The results obtained indicate a strong spatial variability of the electrical conductivity 3030 and 6930 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A very highly significant correlation between porosity, permeability and salinity was revealed.

Keywords: Sebikha, Salinity, Mechanics, Permeability, Porosity, Electrical conductivity

ملخص

إن تطبيق الأساليب الإحصائية لوصف تأثير الملوحة على الخواص الميكانيكية للتربة يجعل من الممكن استخلاص استنتاجات سريعة وإجراء تقييم لتمدد الملوحة في الفضاء.

أجريت التجربة على مساحة كبيرة من حدود السبخة تتميز بمناخ شبه جاف. وأخذت العينات (5 عينات) على مستوى واحد بعمق (15 سم) موزعة على حدود السبخة الشمالية والجنوبية الشرقية والغربية ومنطقة مدخل الصرف الصحي.

النتائج التي تم الحصول عليها تشير إلى تباين مكاني قوي في الموصلية الكهربائية 3030 و 6930 ميكروثنائية / سم. تم الكشف عن علاقة ارتباط معنوية عالية بين المسامية والنفاذية والملوحة.

الكلمات المفتاحية: السبخة ، الملوحة ، الميكانيك ، النفاذية ، المسامية الناقلية الكهربائية