REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**



**F**aculté de **T**echnologie

# Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie civil
Spécialité : Géotechnique

---

# Thème :
# L'effet de la salinité de l'eau sur les caractéristiques géotechniques des argiles gonflantes (la bentonite de Maghnia)

---

Présenté par :

**Boutaib Fella.**

**Larbi zoulikha Fahima.**

Proposé et Dirigé par :

**Dr. Messad Ali.**

**Promotion Juin 2021**

# *Remerciements*

*Tout d'abord, nous remercions Allah, le tout puissant de nous avoir donné la force, le courage et la volonté de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous tenons d'abord à remercier vivement le Docteur MESSAD Ali pour avoir accepté de diriger notre projet de fin d'études. Grâce à sa grande disponibilité, ses précieux conseils, ses idées et ses nombreux amendements que ce travail a aboutis à sa fin.*

*Nous remercions aussi tout le personnel du laboratoire de travaux publics et de construction de MEZAAD ROAD qui nous ont aidés pour la mise en œuvre des essais.*

*Nous remercions nos familles qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles.*

*Nos sincères gratitudes vont vers tous ce qui ils ont participé de près ou de loin à ce travail.*

***Merci***

# *Dédicace*

*Je dédie se modeste travail aux être qui sont les plus chères dans ma vie :*

*À mon très cher père m'énormément aide dans ma vie avec ses conseils et sont sagesse, qui est la source de ma réussite.*

*A ma mère cette fontaine d'amour et de tendresse, pour ces conseils et soutien indéfectible.*

*A mes frères Samir et Mahdjoub.*

*A mes sœurs Hanan et Siham.*

***Fella Boutaib***

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à : À mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance.*

*À mon superviseur Dr Messad Ali.*

*À mon chère frère Yacine et à mes chères sœurs Maroua, Sanaa et ma petite Fella pour leurs encouragements. À tous les membres de ma famille.*

*À mes chères amies Fatima, Sara, Fella,Malek et à tous mes amis que je n'ai pas cités et à tous ceux qui me connaissent.*

***Larbi Zoulikha Fahima***

# ملخص

تعتبر التربة المالحة من أكثر أنواع التربة إشكالا المتواجدة في مناطق مختلفة من العالم، خاصة في المناطق القاحلة وشبه القاحلة. تغطي المناطق القاحلة وشبه القاحلة جزءا كبيرًا من الجزائر.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحديد تأثير ملوحة الماء على الخصائص الكيميائية والفيزيائية لبنتونيت مغنية بما في ذلك انحراف الأشعة السينية (XRD) والمسح المجهري الإلكتروني (SEM) وحدود اتربيرج.

تتكون دراستنا من خلط المحاليل ملحية بنسب مختلفة (0 ، 5 ، 10 ، 15 ، 20،25٪) على التوالي مع البنتونيت.

تشير النتائج التي تم الحصول عليها إلى أن حدود اتربيرج تنخفض مع الملوحة عند تحديدها على أساس محتوى الماء التقليدي وتنخفض مع الملوحة عند تحديدها بناءً على محتوى السائل(مع الأخذ بعين الاعتبار الملح الذائب).

الكلمات المفتاحية: تربة السبخة ، تربة مالحة ، بنتونيت ، حدود أتربيرج.

# RESUME

Les sols salés font partie des sols problématiques les plus rencontrés dans diverses régions du monde, notamment dans les zones arides et semi-arides. Les zones arides et semi-arides couvrent une bonne partie de l'Algérie.

L'objectif principal de ce projet consiste à déterminer l'effet de la salinité de l'eau sur les caractéristiques physiques de la bentonite de Meghnia notamment la diffraction aux rayons X(DRX), Microscopie électronique à balayage (MEB) et les limites d'Atterberg.

Notre étude consiste à mélanger des solutions salines avec des différents pourcentages (0, 5, 10, 15, 20,25%) respectivement avec la Bentonite.

Les résultats obtenus indiquent que les limites d'Atterberg diminuent avec la salinité lorsqu'elles sont déterminées sur la base de la teneur en eau conventionnelle et diminuent avec la salinité lorsqu'elles sont déterminées sur la base de la teneur en fluide.

**Mots clés :** sols de sebkhas, sols salés, la bentonite, limites d'Atterberg.

# ABSTRACT

Sabkha soils are recent saline sediments widely distributed in Algeria and other countries. As they are characterised by low strength and high compressibility, they are considered to be difficult soils that pose special problems for design and construction engineering.

In this study, the effect of salts on the determination of the water content and Atterberg limits of sabkha soils has been studied. The tests were performed using distilled water, natural bentonite and saline solutions with different salt concentrations (0, 5, 10, 15, 20,25%). The results indicate that the liquid and plastic limits decrease with pore fluid salinity when the conventional water content procedure is used, and decrease also when the fluid content method is used.

Keywords: sebkhas soils, saline soils, bentonite, Atterberg limits.

# Table des matières

Introduction générale .....1

CHAPITRE I : SOLS SALÉS ET ENVIRONNEMENTS ARIDES

I.1. Les sols salés .....3

I.1.1. Définition des sols salés .....3

I.1.2. Les sols salés en Algérie et dans le monde .....3

I.1.2.1. Les sols salés dans le monde .....3

I.1.2.2. Les sols salés en Algérie .....4

I.1.3. Causes et origines de la salinisation des sols .....5

I .1.4. Salinité .....6

I.1.5. Conductivité électrique .....6

I.1.6. Effet des sels sur le sol .....7

I.1.7. Les sels solubles .....7

I.2. Les environnements arides .....8

I.2.1. Causes de l'aridité .....9

I.2.2. Classification des zones arides .....9

I.2.3. Répartition géographique des zones arides dans le monde .....11

I.2.4. Climat des zones arides .....11

I.2.5. Salinisation des sols et des eaux en régions arides .....11

I.2.7. Répartition des Sebkhas dans le monde .....13

Conclusion .....14

CHAPITRE II : PROPRIETES GEOTECHNIQUES DES SOLS SALÉS

Introduction .....15

II.1. Analyse granulométrique .....15

II.2. Teneur en eau .....16

II.3. Limites d'Atterberg .....18

Conclusion .....20

CHAPITRE III : LES BENTONITE

Introduction.....21
III.1.Définitions des argiles.....21
III .2.Classification des argiles.....22
III .3.Bentonite.....23
III.4.Origine de la bentonite.....23
III.5.Structure et composition de la bentonite.....24
III.6.Microstructure de la montmorillonite.....25
III.6.1.Le feuillet.....25
III.6.2.La particule primaire.....25
III.6.3.L'agrégat.....26
III.7.Capacité de gonflement.....26
III.8.Les différents types de bentonite.....27
III.8.1.Bentonites naturelles.....27
III.8.2.Bentonite active.....27
III.9.Bentonite de Maghnia.....28
III.10.Action de l'eau sur la bentonite.....30
III.10.1. Le gonflement.....30
III.10.2.Le retrait.....31
III.10.3.La Perméabilité des sols.....31
Conclusion.....31

CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

Introduction.....32
IV.1. Matériaux utilises.....32
IV.1.1. Eau salée.....32
IV.1.2. Analyse chimique.....32
IV.1.3. Préparation des échantillons de sel.....33

IV.2. Caractérisation de la bentonite.....34
IV.2.1. Diffraction aux rayons X (DRX).....34
IV.2.2. Microscopie électronique à balayage (MEB).....37
IV.2.3. Analyse granulométrique :.....39
IV.2.4. La masse volumique des grains solides ρs.....40
IV.3. Étude de l'effet du sel sur les limites d'Atterberg de la bentonite.....41
Conclusion.....46
Conclusion générale.....47

# Liste des figures

Figure I.1.Carte mondiale de salinisation ..... 4

Figure I.2. Répartition des sols salins du nord de l'Algérie ..... 5

Figure I.3.Carte des zones arides dans le monde ..... 10

Figure I.4. Modèle d'une Sebkha côtière ..... 12

Figure I.5.Carte mondiale des emplacements des sebkha ..... 13

---

Figure II.1.Analyse granulométrique du sol de Sebkha. ..... 15

Figure II.2.Analyse granulométrique ..... 16

Figure II.3.Limite de liquidité. ..... 19

Figure II.4.Effet de la salinité du fluide interstitiel sur les limites plastique ..... 19

---

Figure III.1.La structure d'une montmorillonite. ..... 24

Figure III.2.Structure multi-échelle de la montmorillonite. ..... 25

Figure III.3.Modes d'associations supposés des feuillets de montmorillonite en suspension selon la théorie de Van Olphen ..... 26

Figure III.4. Argile gonflante ..... 27

Figure III.5. Carte de répartition des gisements de bentonites de Hammam Boughrara. ..... 28

Figure III.6.Situation de l'unité BENAL par rapport aux gisements. ..... 29

Figure III.7.Processus de production de la bentonite de Maghnia... ..... 30

---

Figure IV.1.Les sels cristallines ..... 33

Figure IV.2. Préparation des liquides salins. ....34

Figure IV.3. Diffractomètre PANalytical : Empyrean....35

Figure IV.4. DRX d'un Echantillon bentonite de Maghnia. ....36

Figure IV.5. Microscope électronique à balayage JEOL JSM-6340F ....37

Figure IV.6. Illustration de la bentonite... ....38

Figure IV.7 Montmorillonite. ....38

Figure IV.8. Analyse granulométrique du Bentonite de Maghnia ....39

Figure IV.9. La masse volumique des grains solides $\rho_s(méthode\ de\ pecnometre)$... ....40

Figure IV.10. L'effet de la salinité sur la limite de liquidité (méthode conventionnelle) ....41

Figure IV.11. L'effet de la salinité sur la limite de plasticité (méthode conventionnelle) ....42

Figure IV.12. L'effet de la salinité sur la limite de liquidité (teneur en fluide) ....43

Figure IV.13. L'effet de la salinité sur la limite de plasticité (teneur en fluide) ....44

Figure IV.14. Erreur associée à l'utilisation de la teneur en eau conventionnelle... ....44

Figure IV.15. L'effet de la salinité sur l'indice de plasticité... ....45

# Liste des tableaux

Tableau I.1.Superficie affectée par la salinité dans le monde (FAO, 2008).....3

Tableau IV.1.Les résultats d'analyse chimique.....32

# *Introduction générale*

# Introduction générale

Les sols salés font partie des sols problématiques les plus rencontrés dans diverses régions du monde, notamment dans les zones arides et semi-arides. Les zones arides et semi-arides couvrent, entre autres, une bonne partie de l'Algérie. Ces zones, délimitées par l'Atlas tellien au Nord et l'Atlas saharien au Sud, s'étendent d'Est en Ouest jusqu'aux pays limitrophes du Maghreb. Leur météorologie est caractérisée par de faibles précipitations et des écarts de température importants entre l'hiver et l'été (des hivers froids et humides et des étés chauds et secs). Les désordres qui apparaissent régulièrement dans ces zones affectant les infrastructures routières, les voiries et réseaux divers et les constructions civiles et industrielles de faible hauteur compromettent l'utilisation des sols salés dans leur état naturel comme matériaux de remblais ou de couches de forme ou comme support de fondations des ouvrages géotechniques.

La salinité est la présence des sels solubles dans les eaux ou dans les sols. Selon la richesse en sels et la composition ionique de la solution, plusieurs conséquences plus ou moins néfastes sur la caractérisation géotechniques. En Algérie, on évalue aujourd'hui à 1,5 million d'hectares la superficie des sols salés dont 49 milles se situent dans le sud du pays.

Auparavant, quand un sol n'était pas adéquat pour la construction d'un ouvrage il était possible d'en choisir un autre qui présente des caractéristiques géotechniques meilleures car les besoins de la société n'étant pas importants. Avec l'accroissement de la population et le développement des activités, la mise à disposition des sols adéquats qui présentent de bonnes caractéristiques géotechniques est parfois impossible. Par conséquent, il est souvent obligatoire d'adapter un ouvrage au type de sol sur lequel il sera construit même si ses caractéristiques géotechniques sont de qualités médiocres, les sols des Sebkhas en sont un exemple. Ces derniers sont connues comme des sols salés vu leur contenance excessive en sel. L'effet de la salinité affecte l'état hydrique du sol en diminuant sa teneur en eau, ce dernier redeviendra rugueux et sec. De surcroit, les sols salés abritent d'autre problèmes physiques, tels qu'une faible capacité portante et une compressibilité élevée.

Certains sols, en raison de leurs propriétés géotechniques intrinsèques et/ou de leur teneur en eau sont considérés comme mauvais ou médiocres et ne présentent pas par conséquent les performances nécessaires pour supporter le trafic de chantier, la chaussée et le trafic futur ou même pour être utilisés en remblai, les sols salés sont un exemple.

L'objectif de la présente étude consiste à déterminer l'effet de la salinité de l'eau sur les caractéristiques géotechniques des argiles gonflantes (bentonite) dans le but d'aboutir à une méthodologie de caractérisation permettant de prendre en compte la présence des sels.

Ce travail est composé de trois chapitres :

- ✓ Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur les sols salés, la salinisation des sols et aux environnements arides.
- ✓ Le deuxième chapitre nous allons présenter les essentielles études réalisées qui concernent la géotechnique des sols salés.
- ✓ Le troisième chapitre présente les principaux termes des bentonites.
- ✓ Le quatrième chapitre présente les modes opératoires, les résultats des essais avec l'interprétation des résultats.
- ✓ A la fin une conclusion générale est présentée.

# *Chapitre I :*

# *Sols salés et environnements arides*

# I.1. Les sols salés

## I.1.1. Définition des sols salés

Les sols salés ou sols halomorphes appelés actuellement sols salsodiques représentent un pourcentage important de la surface totale des sols dans le monde (Cherbuy, 1991).

Les sols salins sont naturellement présents sous tous les climats et sur tous les continents. Ils sont là où l'évaporation excède les précipitations de façon permanente ou temporaire. Ils sont étroitement liés à une source de salinité d'ordre géologique (évaporites), hydrogéologique (eaux souterraines), hydrologique (eaux marines) ou anthropique (gestion hydro-agricole) (Girard et al, 2005).

## I.1.2. Les sols salés en Algérie et dans le monde

### I.1.2.1. Les sols salés dans le monde

A l'échelle mondiale, les sols salés occupent des surfaces étendues et constituent une grande ampleur pour l'agriculture. Leurs distributions géographiques se superposent presque entièrement à celle des zones arides et semi arides et des zones côtières (Durand, 1983). La surface affectée par la salinité dans le monde est évaluée à 954,8 millions d'hectares (Tableau 1), soit 23 % des terres cultivées (FAO, 2008).

**Tableau I.1 - Superficie affectée par la salinité dans le monde (FAO, 2008)**

| **Région** | **Superficie** |
|---|---|
| Afrique | 80,5 |
| Europe | 50,8 |
| Amérique du Nord | 15,7 |
| Amérique du Sud | 129,2 |
| Australie | 357, 3 |
| Mexique et Amérique centre | 2 |
| Asie du Sud Est | 20 |
| Asie du centre et du Nord | 211,7 |
| Asie du sud | 87,6 |
| Total | 954,8 |

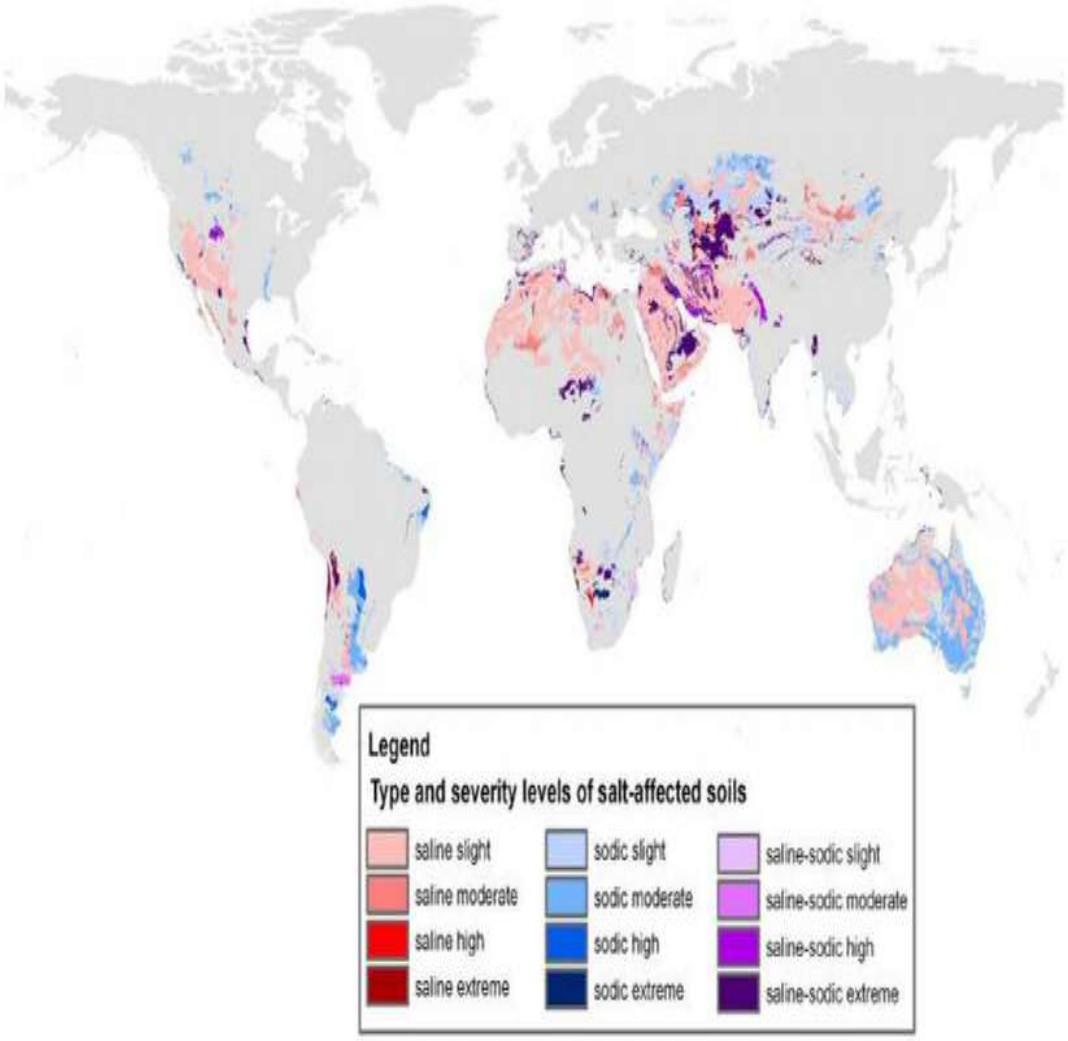



**Figure I.1**-Carte mondiale de salinisation.

### I.1.2.2. Les sols salés en Algérie

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

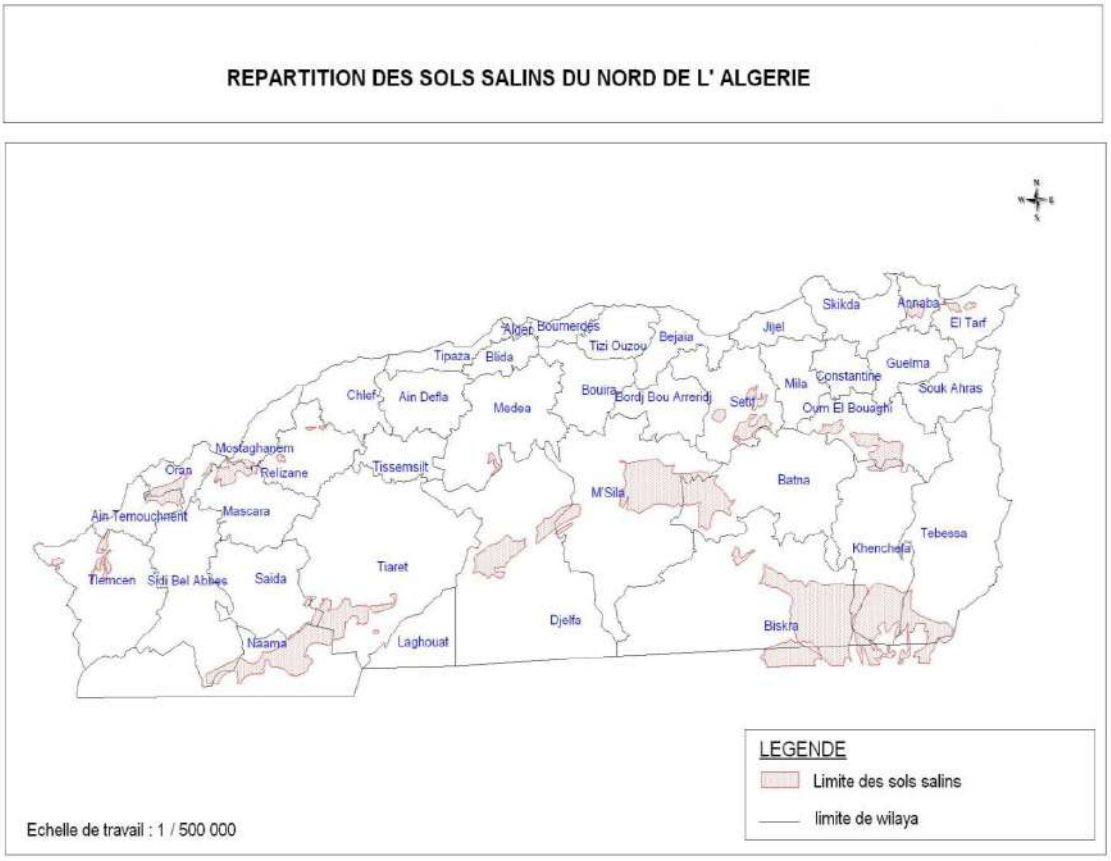



**Figure I.2**- Répartition des sols salins du nord de l'Algérie (INSID, 2008).

### I.1.3. Causes et origines de la salinisation des sols

La salinité des sols a des sources très variées. Elle résulte de l'altération des roches mères contenant des minéraux nécessaires à la formation des sels solubles (minéraux sodiques, potassiques, magnésiens, de produits de l'hydrothermalisme riches en soufre et en chlore), ou de la dissolution des évaporites (IRD, 2008). L'océan peut être une source principale de la salinité, notamment dans les zones côtières où le matériau de base est constitué de dépôts marins anciens. Les eaux salées des nappes phréatiques ou artésiennes peuvent aboutir à la salinité par une remontée de la nappe.

La salinité peut être provoquée en conditions anthropiques par l'irrigation par des eaux salées. Ce type de salinité du sol est la conséquence de la mauvaise combinaison d'un forte évaporation et d'un apport inadapté d'eau d'irrigation chargée en sels dissous (Boualla et al., 2012).

Parmi les principaux facteurs qui contribuent à la salinité croissante, on peut citer les rares précipitations, l'évaporation élevée, l'irrigation avec l'eau saline et l'intervention de l'homme dans les pratiques cultivables dans les zones proches côtières, arides et semi-arides.

**I .1.4. Salinité**

La salinité est la présence d'une quantité de sels solubles comme le sodium, le magnésium, le calcium, le chlorure, le sulfate et le nitrate, qui se trouvent dans le sol (Tabet, 1999).

Les sols solubles engendrent une gamme variée d'anions et de cations présents dans le sol, sous forme cristallisée, dissoute dans la solution du sol ou adsorbée sur la surface des colloïdes (Douaik, 2005).

La salinité de l'eau et des sols peut provenir de sources variées. Elle provient naturellement de l'altération des roches mères contenant des minéraux nécessaires à la formation des solubles (IRD, 2008).

La définition historique de la salinité était basée sur la concentration en chlorure (qui pouvait être déterminée par titrage). Ce calcul utilisait l'équation suivante (kemker, 2014):

$$\text{Salinité} = 1.80655 * (\text{dosage en chlorure})\ (\text{PPT ou } g/Kg)$$

Bien que l'échelle de salinité pratique soit acceptable dans la plupart des situations, une nouvelle méthode de mesure de la salinité a été adoptée en 2010. Cette méthode, appelée TEOS-10, détermine la salinité absolue par opposition à la salinité pratique dérivée de la conductivité. La salinité absolue fournit une représentation précise et cohérente de l'état thermodynamique du système. La salinité absolue est à la fois plus exacte et plus précise que la salinité pratique et peut être utilisée pour estimer la salinité non seulement à travers l'océan, mais aussi à de plus grandes profondeurs et dans de plus grandes plages de température. Le TEOS-10 est dérivé d'une fonction de Gibbs, qui nécessite des calculs plus complexes, mais offre des informations plus utiles (kemker, 2014).

**I.1.5. Conductivité électrique**

La conductivité est une mesure de la capacité de l'eau à laisser passer un flux électrique. Cette capacité est directement liée à la concentration d'ions dans l'eau. Ces ions conducteurs proviennent de sels dissous et de matériaux inorganiques tels que les alcalis, les chlorures, les sulfures et les composés carbonatés. Les composés qui se dissolvent en ions sont également appelés électrolytes 40. Plus il y a d'ions, plus la conductivité de l'eau est élevée. De même, moins il y a d'ions dans l'eau, moins elle est conductrice. L'eau distillée ou dés ionisée peut agir comme un isolant en raison de sa valeur de conductivité très faible (voire négligeable). L'eau de mer, en revanche, a une conductivité très élevée.

La conductance spécifique est une mesure de la conductivité effectuée à 25° C ou corrigée à cette température. Il s'agit de la méthode standardisée de mesure de la conductivité. Comme la température de l'eau affecte la lecture de la conductivité, le fait de rapporter la conductivité à 25°C permet de comparer facilement les données. La conductivité spécifique est généralement rapportée en uS/cm à 25°C (kemker, 2014).

Si une mesure de conductivité est effectuée à 25° C, elle peut être simplement indiquée comme étant la conductance spécifique. Si une mesure est effectuée à une température différente et corrigée à 25° C, le coefficient de température doit être pris en compte. Le coefficient de température de la conductance spécifique peut varier en fonction de la température mesurée et de la composition ionique de l'eau. Un coefficient de 0,0191-0,02 est couramment utilisé sur la base des normes KCl. Les solutions à base de NaCl doivent avoir un coefficient de température de 0,02-0,0214(kemker, 2014).

### I.1.6. Effet des sels sur le sol

Les sols salée sont caractérisés généralement par des propriétés physiques, chimiques et biologiques défavorables à la croissance des végétaux en raison de la présence de sels solubles et ou de sodium échangeable en quantité élevée.

Les sols salins peuvent provenir des sols normaux par suite d'une accumulation de sels provenant de l'eau d'irrigation ou par le mouvement montant de l'eau souterraine ou par une combinaison des deux processus. Les sels accumulés dans le sol provoquent l'augmentation de la pression osmotique de la solution du sol et peuvent conduiront à la stérilisation du sol. D'autre part les sols riches en sodium échangeable peuvent avoir une structure dégradée suite à la dispersion des argiles. La séparation des particules du sol conduit à un est ructuredense compacte et le sol devient perméable, asphyxiant et difficile à labourer. Il est à noter que la présence de sels en excès et l'absence de quantité appréciable de sodium échangeable peuvent donner dans certains sols salins une structure favorable et une bonne perméabilité suite à la floculation des colloïdes (Rouahna, 2007).

### I.1.7. Les sels solubles

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).

Les principaux sels solubles sont :

- Les Chlorures : Le chlorure est un sel principal responsable de la formation des sols salés. Il a une solubilité très élevée.

Parmi ces sels on trouve :

- Chlorure de sodium (Na Cl) : C'est le sel le plus répandu, très soluble.
- Chlorure de potassium (K Cl) : C'est un sel voisin du Na Cl mais peu répandu dans la nature.
- Chlorures de calcium (Ca Cl2) : C'est un sel relativement rare dans les sols, car il réagit avec NaSO4 ou Na2CO3 pour former du CaSO4 ou CaCO3 (sels peu solubles).
- Chlorures de magnésium (Mg Cl2) : C'est un sel relativement rare, sauf dans les cas de forte salinité, sa solubilité est de l'ordre de 350g/l.

- Les Sulfates : Les sels sulfatés se trouvent en quantités variables dans les sols.

Parmi ces sels on trouve :

- Les sulfates de calcium (Ca SO4) : le gypse (Ca SO4 2H2O) est la forme la plus répondue.
- Les sulfates de magnésium (Mg SO4) : C'est un composant typique des sols salés, on le trouve souvent dans les eaux souterraines, sa solubilité est très élevée.
- Les sulfates de sodium (Na2 SO4) : Composant typique des sols salés, sa solubilité de l'ordre de 300g/l.
- Les sulfates de potassium (K2 SO4) : Il se trouve en très faibles quantités.

- Les carbonates : Les sels carbonatés sont très répondus dans les sols.

Parmi ces sels :

- Les carbonates de magnésium (Mg CO3) sa solubilité est plus élevée. Il donne du Mg (HCO3) en présence de H2 CO3.
- Les carbonates de sodium : (Na CO3) : Il à un pouvoir alcalinisant.
- Les carbonates de potassium (K2 CO3) : Il est extrêmement rare de le trouver en grandes quantités, car il est fixé par les argiles (messad, 2015).

## I.2. Les environnements arides

On peut définir l'environnement aride comme un environnement où la quantité de précipitation qu'une zone donnée reçoit, divisée par la quantité perdue par évapotranspiration, donne une fraction inférieure à 0,50. L'environnement aride peut être subdivisé en trois zones: hyper-aride, aride et semi-aride. Ces zones se caractérisent par leur faible précipitation annuelle (de 0 à 800 millimètres), qui se produit de façon rare et irrégulière et une végétation résistant à la sécheresse. Près d'un tiers de la superficie totale des terres mondiales est aride (dresch, 1982).

### I.2.1. Causes de l'aridité

L'aridité est due à la présence d'un air sec descendant. Aussi la trouve-t-on surtout dans des lieux où les conditions anticycloniques sont persistantes, comme c'est le cas dans les régions situées sous les anticyclones des zones sub-tropicales.

L'influence des anticyclones sub-tropicaux sur les précipitations s'accroît avec la présence de surfaces fraîches. Les conditions arides se rencontrent également du côté sous le vent des grandes chaînes de montagne qui déstructurent les cyclones lorsqu'ils passent par-dessus elles, créant des effets "d'ombre" où la pluie ne tombe pas. D'autre part, la présence de surfaces de terres fortement chauffées empêche également les précipitations; aussi existe-t-il loin de la mer de vastes étendues de climat sec.

### I.2.2. Classification des zones arides

L'aridité est exprimée par le rapport P/ETP.

P : les précipitations, ETP : les évapotranspirations.

Sur cette base le PNUE en 1997 a définit les catégories suivantes :

- Régions sub-humides sèches P/ETP 0.65-0.50

  Ce sont des régions à régime pluviométrique saisonnier où l'agriculture pluviale est possible et fortement répandue, ce sont des régions exposées à une aridification progressive sous l'effet d'actions anthropiques.

- Régions semi arides P/ETP 0.50-0.20

  Les précipitations annuelles sont de 500 mm, C'est le domaine des steppes buissonnantes avec plus ou moins une grande fréquence de graminées pérennes. Régions propices à l'élevage et à l'agriculture sédentaires.

- Régions arides P/ETP 0.05-0.20

  Régions où les précipitations annuelles ne dépassent pas 200 mm, la végétation naturelle est clairsemée, dominée par des espèces épineuses ou succulentes.

  L'élevage sédentaire est encore possible mais pas d'agriculture sans irrigation.

- Régions hyper arides P/ETP <0.05

  C'est le désert vrai et les périodes de sécheresse peuvent dépasser 12 mois, la productivité biologique y est très faible et la seule activité viable demeure le pastoralisme nomade. La végétation naturelle se réfugie surtout dans les cours d'eau.

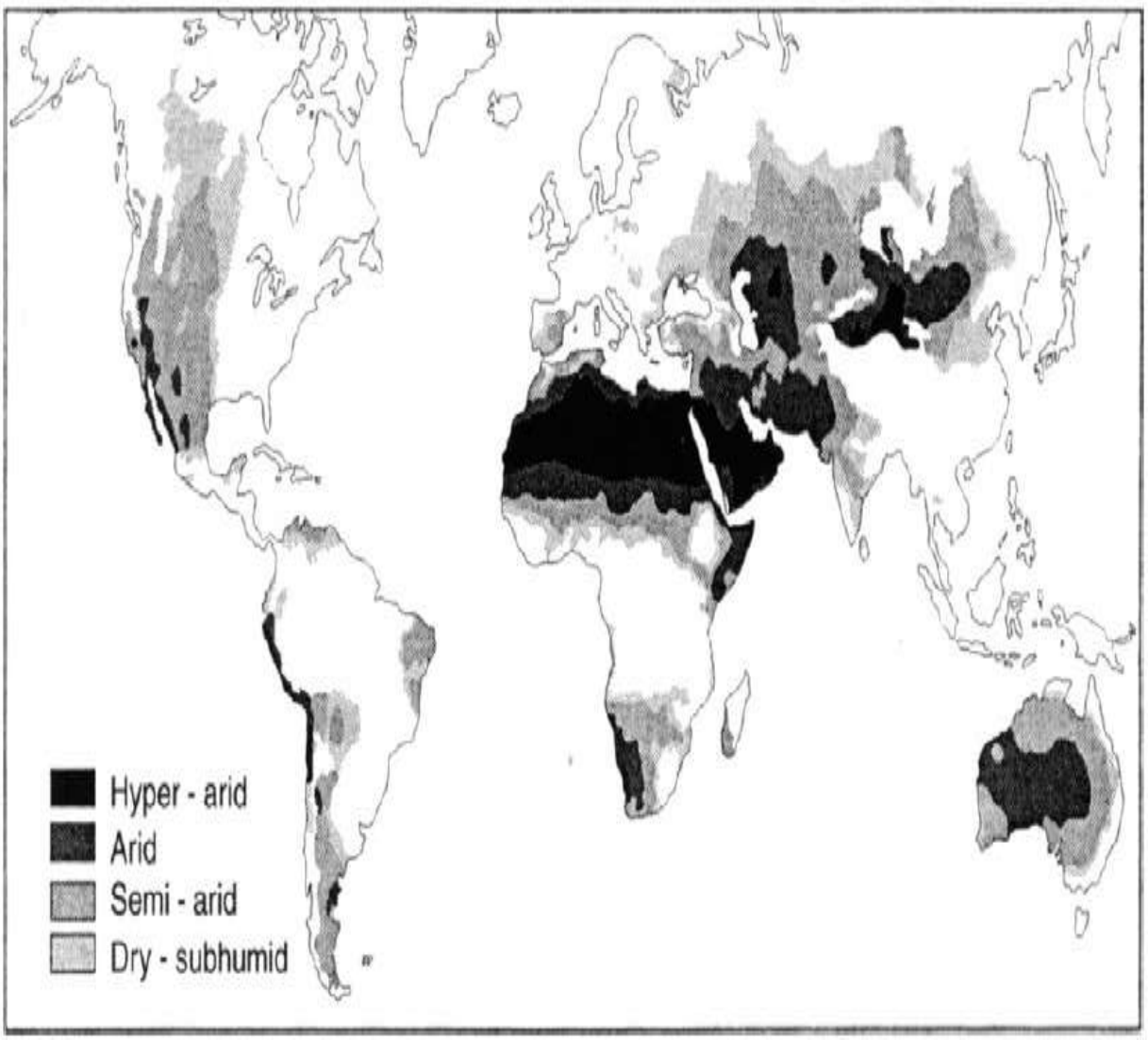



**Figure I.3**-Carte des zones arides dans le monde (wri, 2002).

### I.2.3. Répartition géographique des zones arides dans le monde

Les zones arides occupent environ 43 % de la surface terrestre, soit près de 6,45 milliards d'hectares, réparties dans 100 pays et touchant une population estimée à 900 millions de personnes soit, 20 % de la population mondiale.

Un milliard d'hectares est hyper-aride : ce sont les vrais déserts comme le sahara. Les régions arides, semi-arides et subhumides sèches occupent 5.45 milliards d'hectares, ce sont des régions sèches qui se caractérisent par : Des précipitations rares et faibles et des sols pauvres en matière organique.

### I.2.4. Climat des zones arides

La zone aride se caractérise par une chaleur excessive et une précipitation insuffisante et variable; on y trouve cependant des contrastes climatiques. Ceux-ci résultent en général des différences de température, de saison des pluies et de degré d'aridité. Lorsqu'on décrit la zone aride, on distingue trois grands types de climats: le climat méditerranéen, le climat tropical et le climat continental.

- Le climat méditerranéen : la saison des pluies se situe en automne et en hiver. Les étés sont chauds et secs; les températures hivernales sont douces.
- Le climat tropical : les précipitations se produisent en été. Plus on est loin de l'équateur, plus la saison des pluies est courte.
- Le climat continental : les précipitations sont régulièrement réparties sur toute l'année, bien qu'il y ait une tendance à plus de pluie en été.

### I.2.5. Salinisation des sols et des eaux en régions arides

En régions arides les précipitations faibles et occasionnelles induisent un drainage climatique nettement déficitaire pendant la plus grande partie de l'année. Les écoulements superficiels ou hypodermiques sont le plus souvent temporaires (Bouteyre et al. 1992). Ils atteignent des zones de concentration qui sont les lieux privilégiés de manifestations salines dans les eaux et dans les sols. L'importance de ces phénomènes de salinité dépend des apports hydriques et du potentiel d'évaporation. Les eaux souterraines, naturelles ou engendrées par des infiltrations des eaux salées, se concentrent en sels sous l'effet d'une dynamique essentiellement ascendante par capillarité. Elles salinisent les sols à leur contact (messad, 2015).

### I.2.6. Les Sebkhas

Sebkha, en arabe, mot qui désigne les plaines salines soumises à des inondations périodiques. Dans les milieux désertiques, les dépressions ne sont occupées que temporairement par de

l'eau. Une forte évaporation conduit à la formation caractéristique d'une croûte d'évaporites qui tapissent le fond de ces dépressions.

Une sebkha désigne un bassin occupant le fond d'une dépression à forte salinité plus ou moins séparé d'un milieu marin, dans des régions arides (milieu supratidal). Néanmoins, il peut être toujours en contact par un très faible filet d'eau (bassin d'eau profond), ou au contraire par des infiltrations (bassin d'eau peu profond) dans ce cas il peut se produire des débordements périodiques d'eau vers le bassin. Dans les deux cas il va y avoir une augmentation de la salinité, une évaporation importante, l'apparition d'une saumure et la précipitation d'évaporites au fond du bassin si la profondeur est faible, ou à une extrémité si la profondeur est importante. Ils se sont surtout situés au Nord de l'Afrique et dans le Moyen Orient

Il y a essentiellement deux types de sebkhas, côtière et continentale, associés à des conditions de formation spécifiques :

- **Sebkha côtière**

Ces sols de sebkha sont le résultat de dépôt des sédiments marins, au moins dans leurs parties vers la mer. La plupart de sols de sebkha côtiers sont des surfaces supratidale, qui ont été développées à la suite d'un ordre de sédimentation qui semble avoir commencé il y a des milliers d'années par l'eau de mer transgressant au-dessus des dunes de sable (figureI.4).

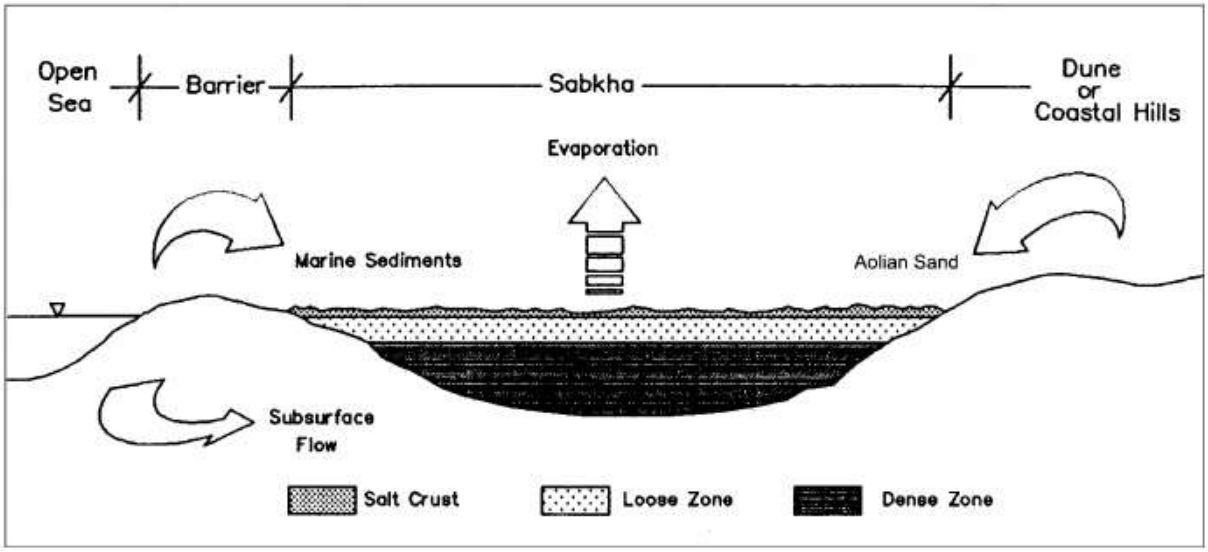



**Figure I.4**-Modèle d'une Sebkha côtière.

- **Sebkha continentale ou intérieure**

Ils se développent habituellement comme des surfaces, dont le vent a enlevé les particules sèches de sédiment, parallèles à la nappe phréatique, aux niveaux qui sont contrôlés par l'humidité des sédiments (Johnson et al, 1978).

### I.2.7. Répartition des Sebkhas dans le monde

Les Sebkhas sont des zones géographiquement très répondues qui se trouvent dans toutes les régions continentales d'Asie, d'Amériques du Sud, d'Australie, aux Etats-Unis et en Afrique du nord. Ces milieux se limitent généralement dans les zones arides à semi-arides (Demnati, 2013).

Al-Amoudi (1994) a établi une carte de distribution des Sebkhas dans le monde (Figure I.5).

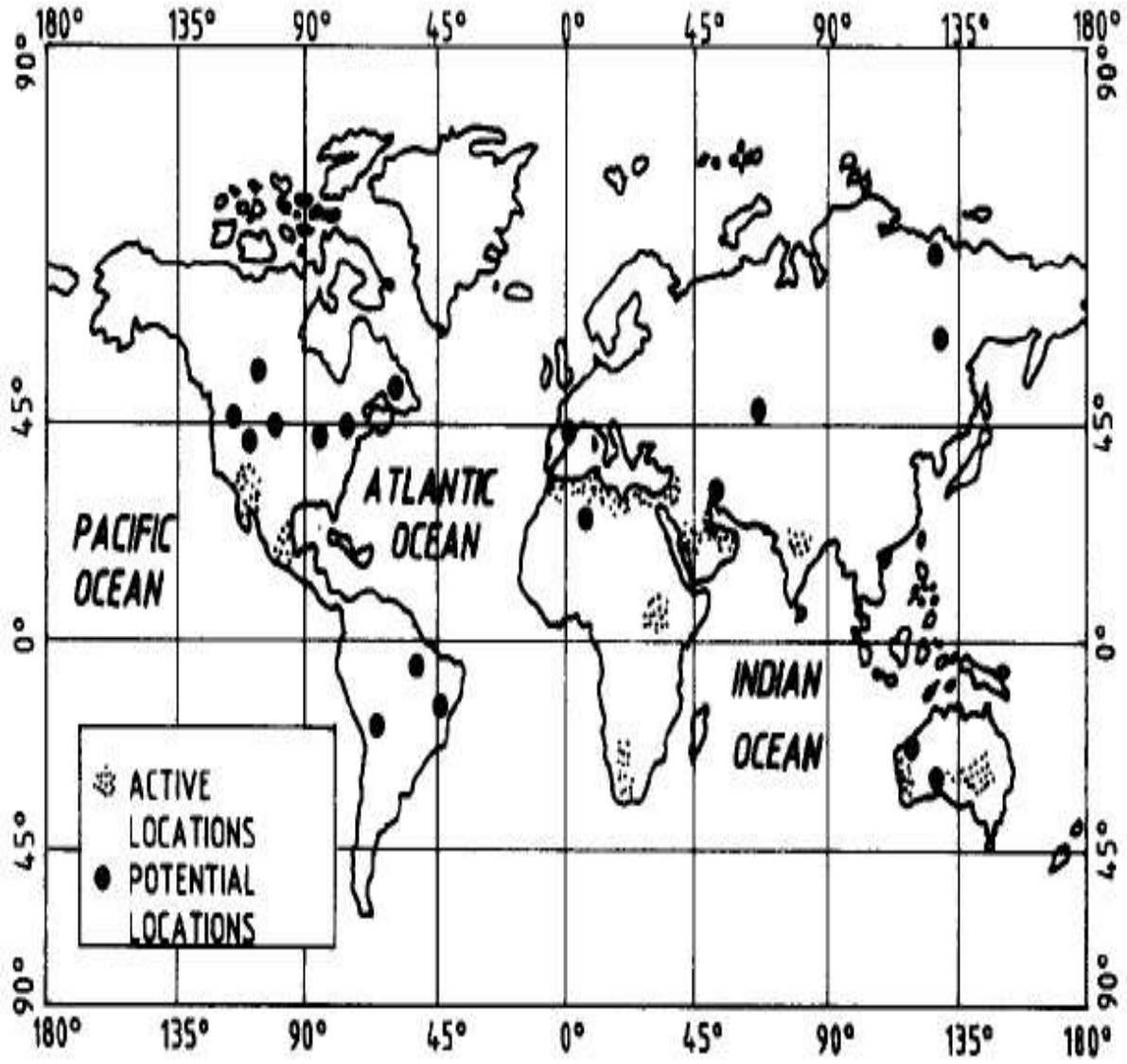



**Figure I.5**-Carte mondiale des emplacements des sebkhas (Al-Amoudi, 1994).

## Conclusion

Dans ce chapitre nous présentons l'essentiel d'informations relatives aux sols salés, à la salinisation des sols et aux environnements arides. Et cela dans le but de comprendre les phénomènes liés à la formation et à l'évolution des Sebkhas.

# *Chapitre II :*

# *Propriétés géotechniques des sols salés*

## Introduction

D'une façon générale, les sols salés sont caractérisés par la présence de sels en excès dans leur profil, ces sels peuvent leur donner certaines propriétés géotechniques, qui se manifestent dans le cas des sols évolués par des caractéristiques morphologiques et des structures particulières. D'après la classification française (Aubert, 1960), les sols salés sont divisés en deux sous classes suivant que leur structure est dégradée ou non par l'action du sodium, la première comporte les sols à alcalis (sols à alcalis non lessivés, solonetz, solod), et la deuxième les sols salins proprement dit· Pour mettre en évidence l'action des sels solubles sur les caractères géotechniques du sol, il parait utile de rappeler rapidement les définitions essentielles des sols salés.

## II.1. Analyse granulométrique

Al-Amoudi et al. 1992, ont proposés l'utilisation de la saumure naturelle et le chlorure de méthylène pour la détermination de la granulométrie d'un sol sableux de Sebkha en Arabie Saoudite. Leurs résultats d'analyses granulométriques obtenus ont indiqués que l'utilisation de la saumure le chlorure de méthylène à aucun effet sur le pourcentage des fines (figure II.1).

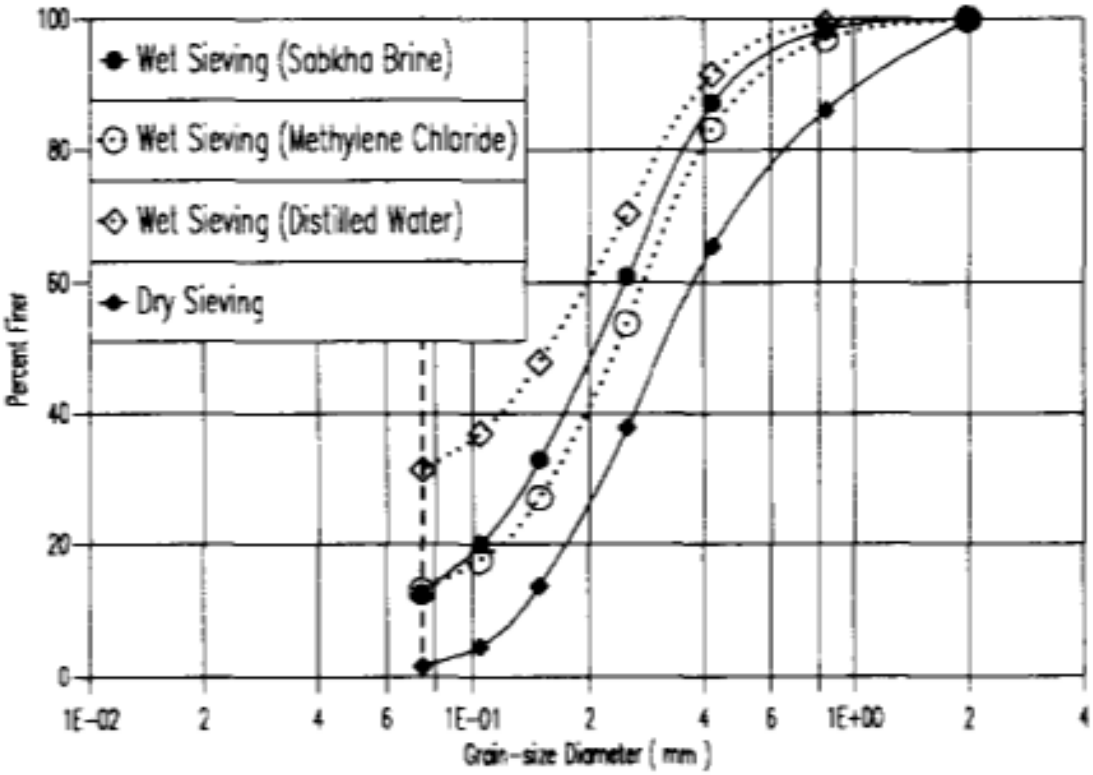



**Figure II.1**- Analyse granulométrique du sol de Sebkha (Al-Amoudi et al, 1994).

Mansour et al. (2008) ont réalisés des essais d'analyse granulométrique sur des échantillons de sol de la mer morte par l'utilisation de l'eau distillée et de la saumure naturelle. Les résultats obtenus ont indiqués que l'utilisation de la saumure naturelle de la mer morte diminue le pourcentage des fines en comparaison avec les essais réalisés par de l'eau distillée (figure II.2).

Cette différence est attribuée à la dissolution des sels et la séparation des matériaux cimentés Provoquées par l'utilisation de l'eau distillée.

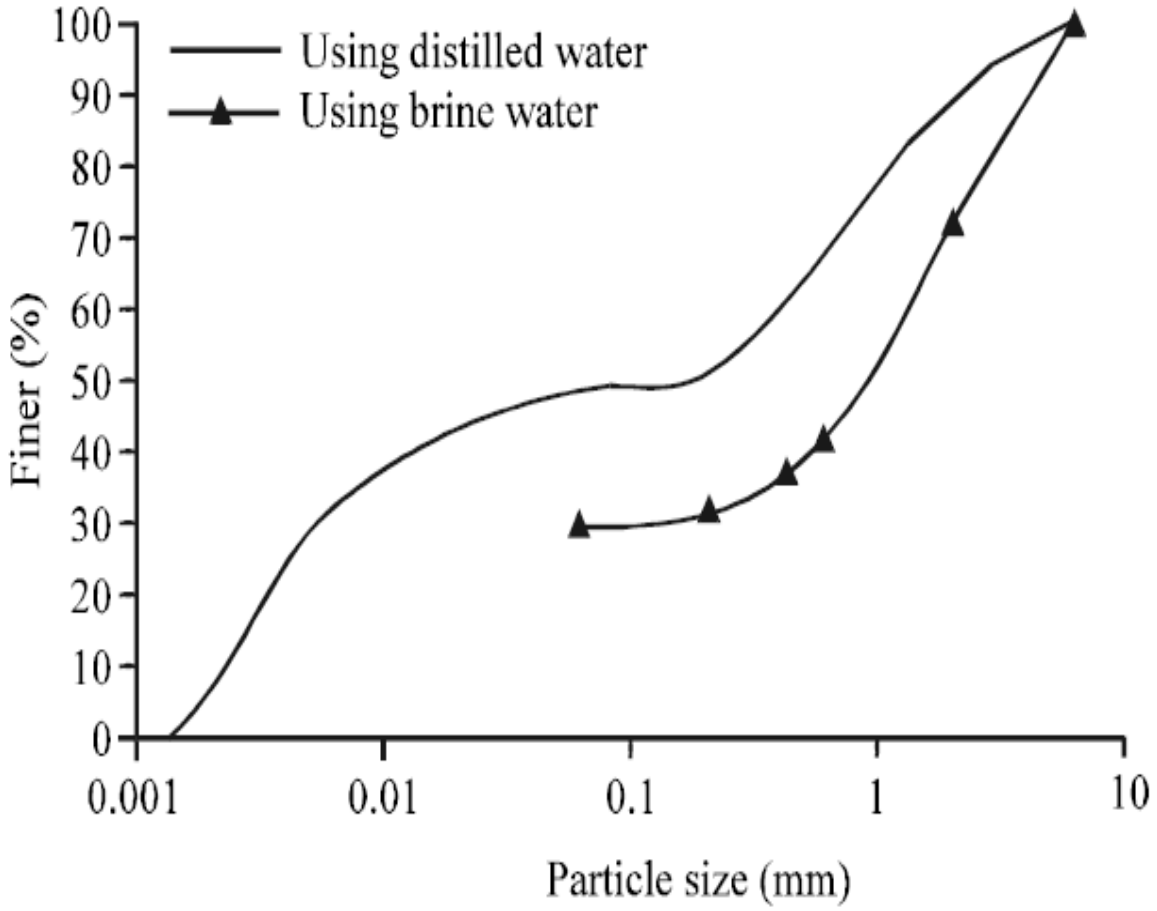



**Figure II.2**-Analyse granulométrique (Mansour et al., 2008).

## II.2. Teneur en eau

L'évaluation de toutes les propriétés, physiques et mécaniques, dépend de la mesure de la teneur en eau notamment les limites d'Atterberg, l'indice des vides, la masse volumique sèche, la compressibilité, etc.

Le processus normalisé de la détermination de la teneur en eau consiste à peser une quantité de sol, intact, remanié ou reconstitué, à son état humide, puis le sécher à environ 105°C et le pesé à nouveau. La teneur en eau est donc le rapport entre la différence entre les deux poids

(humide et sec) et du poids sec.

Les teneurs en eau et en fluide peuvent être définies comme suivent :

Teneur en eau conventionnelle :

$$W_c(\%) = \frac{W - W_d}{W_d} = \frac{\text{poids de l'eau}}{\text{poids du sol sec}}$$

Où :

W: Poids de sol humide.

$W_d$: Poids du sol après étuvage à 105°C ± 5°C.

La norme française recommande que les sols sensibles à la chaleur doivent être chauffés à 50 °C. La norme américaine se réfère également à des matériaux contenant du gypse et des sols contenant des quantités substantielles de sel et recommande qu'ils doivent être séchés à une température de 60 °C.

Quand un échantillon de sol salé est séché dans une étuve son eau interstitielle s'évapore mais le sel reste avec les particules solides ce qui influe sur la valeur de la teneur en eau.

Pour cette raison, toutes les propriétés physiques des sols salés tels que l'indice des vides, le degré de saturation, etc., ainsi que les relations de phase entre les différents paramètres du sol, sont donc influencés.

Noorany (1984), en étudiant les sols marins, a suggéré d'utiliser la teneur en fluide pour les sols salés au lieu de la teneur en eau. La teneur en fluide est donnée par la relation suivante :

Teneur en fluide (Noorany, 1984)

$$W_f = \frac{W_b}{W_s} = \frac{W - W_d}{W_d - rW} = \frac{W_C}{1 - r - rW_C}$$

Avec : $r = \frac{W_{sa}}{W_b}$=Salinité

$W_{sa}$:le poids de sel.

$W_b$:le poids de la saumure.

Par la suite, Frydman et al. (2008) en étudiant les propriétés géotechniques du sol de la mer morte, ont considérés la formule proposée par Noorany comme étant une formule non convenable à cause des difficultés trouvées liées à la mesure de la teneur en eau notamment le problème de séchage de l'échantillon de sol, qui durait plus de 8 jours sans avoir atteint un poids sec constant. Ils ont proposés une nouvelle formule pour le calcul de la teneur en fluide des sols salés à condition que l'échantillon soit saturé et intacts (pour pouvoir mesurer le poids volumique total).

$$W_f = \frac{W_{sw}}{W_s} = \frac{G_{sw}}{G_s} \frac{(G_s\gamma_w - \gamma_t)}{\gamma_t - G_{sw}\gamma_w}$$

Où :

$W_f$: Teneur en fluide.

$G_{sw}$ : Densité de la saumure.

$G_s$: Densité spécifique des grains solides.

$\gamma_w$ : Poids volumique de l'eau fraiche.

$\gamma_t$ : Poids volumique total mesuré sur des échantillons de sol intacts.

## II.3. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont les principaux constituants des propriétés géotechniques. Ces limites liquides et plastiques sont déterminées en effectuant respectivement l'appareil de Casagrande et le palming. La faible influence de la salinité sur la limite de plasticité peut résulter d'une faible humidité du sol, ce qui entraîne une diminution de l'interaction entre le sol et le soluté dans l'eau. Mais dans la limite liquide, dans lequel l'humidité du sol est plus élevée, l'effet de la salinité sera plus.

Mansour et al, 2008 ont indiqué que la présence de cations échangeables de haute valence dans la saumure de la Mer Morte diminue la distance entre les particules en diminuant les forces répulsives dans la microstructure du sol.

La limite plastique est observée dans le sens où, lorsque le sol trempé est testé pour la limite plastique, la plasticité diminue progressivement avec l'augmentation des concentrations de sel.

La plasticité diminue en raison de l'augmentation de la teneur en sel. La plasticité est diminuée à cause de l'effet de la solution saline sur la force d'adhésion des particules. Les particules d'argile se floculent, transforme les particules d'argile naturelles en forme de plaques en structures métallines imbriquées en forme d'aiguilles, ce qui rend les sols argileux.

Les flocs se comportent comme des particules de limon qui sont les moins plastiques. C'est pourquoi une réduction est observée dans la limite plastique.

Messad et al en 2015 des essais de limite d'Atterberg ont été appliqués à l'argile de Kaolinite (argile non gonflante), et les résultats des limites d'Atterberg des échantillons de kaolinite augmentent en fonction de la salinité des liquides quand les limites de liquidité et de plasticités sont basées sur la teneur en fluide.

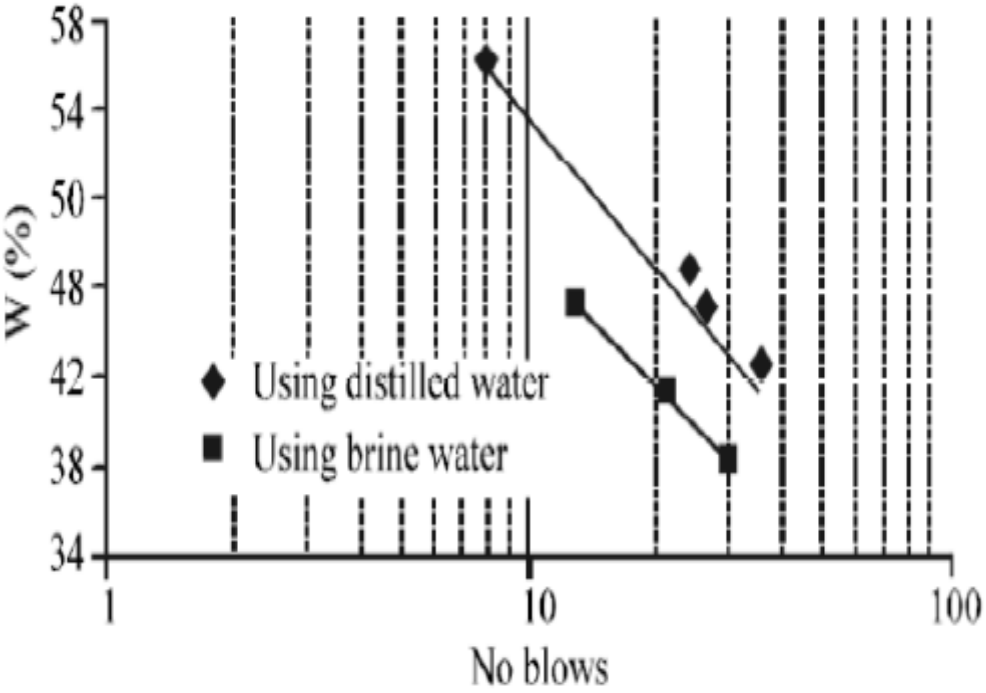



**Figure II.3-** Limite de liquidité

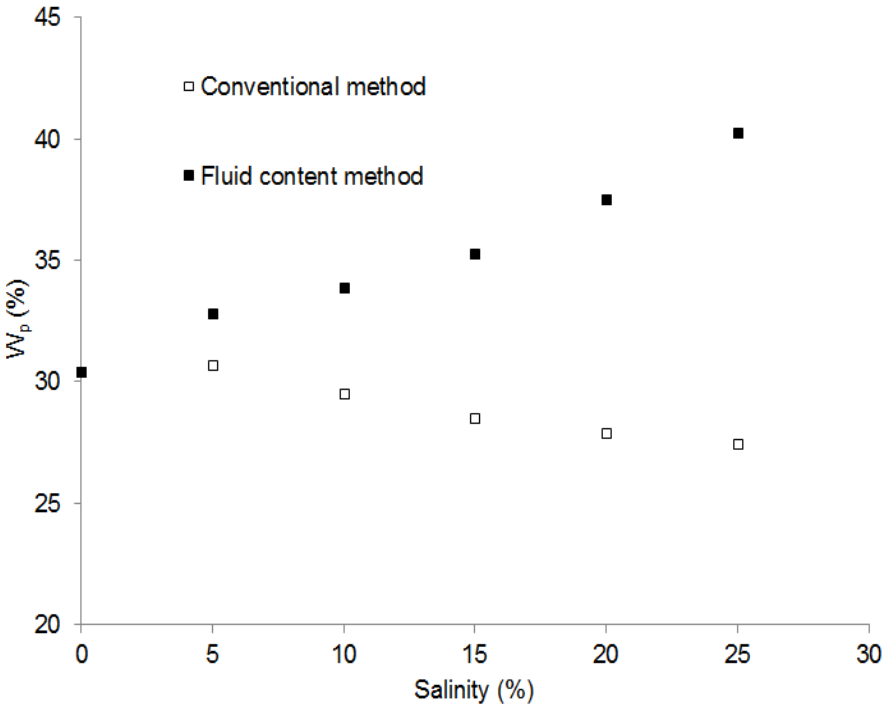



**Figure II.4**-Effet de la salinité du fluide interstitiel sur les limites plastiques (Messad et al ., 2015).

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelque des études réalisées qui concernent la géotechnique des sols salés notamment l'analyse granulométrique, la teneur en eau et les limites d'Atterberg, leurs complexités démontrent les difficultés liées à la détermination des caractéristiques géotechniques de ces sols.

# *Chapitre III :*

# *Les bentonites*

## Introduction

Les minéraux argileux sont des silicates en feuillets (d'aluminium plus ou moins hydratés sous la forme de particules fines de l'ordre de micromètre (µm).

Dans le milieu naturel, ils sont par exemple, des constituants majeurs des sols qui se forment à partir de l'altération physico-chimique d'une roche, le type d'argile produit dépond directement de la nature de la roche, du climat et de la topographie du milieu. Le processus de formation des minéraux argileux conditionne alors la morphologie et la taille des particules ainsi que leur structure et leur composition chimique. Selon Chauvel et Monnier (1953) cette structure en feuillet et la composition chimique confèrent à ces types de matériaux des propriétés physico- chimiques d'intérêt commercial {surface spécifique, capacité d'échange cationique (CEC) capacité de sorption, potentiel de gonflement, plasticité, ect.}(Abdellaoui, 2007).

## III.1.Définitions des argiles

En génie civil, la première définition des argiles est **granulométrique**: les argiles correspondent à la fraction inférieure à 2 µm d'un sol ou d'une formation géologique. **Minéralogiquement**, les argiles correspondent à des minéraux alumino-silicatés, le plus souvent de la famille des phyllo silicates, qui sont formés de particules dont les unités de bases sont des feuillets de très faible épaisseur (7, 10 ou 14 Å). Les deux définitions (granulométrique et minéralogique) se recoupent mais ne sont pas équivalentes. En effet, si les minéraux argileux sont le plus souvent constitués de particules inférieures à 2 µm, la fraction granulométrique inférieure à 2 µm d'un sol ou d'une formation géologique comprend très souvent d'autres minéraux que les seuls minéraux argileux (quartz, silice colloïdale, carbonates, etc.)(Koffi, 2006).

Compte tenu de la granulométrie des particules et de leur structure (association de feuillets de très faible épaisseur), les matériaux argileux développent des surfaces spécifiques très élevées, comprises entre5et 800$m^2$/g,ce qui leur confère des propriétés d'adsorption trèsimportantes.

Le terme roche argileuse désigne des roches sédimentaires (ou détritiques) à grain très fin contenant au moins 50 % de minéraux argileux auxquels peuvent s'ajouter d'autres minéraux très divers, détritiques ou non (quartz, minéraux carbonatés, si1ice colloïdale, etc.). Les roches argileuses se présentent macroscopiquement comme des roches tendres (rayables à l'ongle), fragiles à l'état sec et qui se brisent avec une cassure conchoïdale. Elles sont douées

alors d'un grand pouvoir absorbant, gonflent à l'eau et deviennent plastiques avant de perdre leur cohésion. Elles se dispersent alors dans l'eau et forment une solution colloïdale dont la stabilité dépend à la fois de la nature de l'argile et des caractéristiques physico-chimiques du liquide.

## III .2.Classification des argiles

Parmi l'ensemble des minéraux cités nous évoquerons plus particulièrement trois familles importantes, les ***kaolinites***, les ***illites*** et les ***smectites*** (Koffi, 2006).

### III .2.1.Kaolinite

La kaolinite est un phyllosilicate constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. La faible capacitée d'échange des kaolinites est due à des sites de surface amphotères. Morphologiquement la kaolinite se présente sous forme de particules hexagonales constituées par des empilements de feuillets fortement associés les uns aux autres. Compte tenu de leurs faibles propriétés d'hydratation, les kaolinites sont dites argiles non gonflantes.

### III .2.2.Illite

Les illites sont composées de feuillets possédant une charge globale négative, plus élevée que celle des smectites, qui est compensée par des ions potassium. La différence fondamentale avec les smectites réside dans le fait que les ions compensateurs (potassium) ne sont que très faiblement échangeables : l'illite a une capacité d'échange cationique très faible. Il n'y a pas d'hydratation des espaces interfoliaires. Comme la kaolinite, l'illite est qualifiée ***« argile non gonflante »***. Bien que l'illite ait une structure voisine de celle des smectites, ses propriétés d'échange, d'hydratation et de gonflement sont proches de celles de la kaolinite. Les particules sont également des entités rigides constituées par des feuillets fortement associés les uns aux autres.

### III .2.1. Smectites (bentonites)

Les smectites sont des phyllosilicates constitués des deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique. Minéralogiquement, cette famille est constituée de plusieurs espèces telles que la montmorillonite, la beidellite, l'hectorite et la saponite. La charge élevée de ces argiles est due pour l'essentiel à des substitutions isomorphiques. Cette charge est donc permanente, négative et peudépendante du pH. Elle est compensée par des cations ($Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $Na^{+}$ et $K^{+}$ le plussouvent) échangeables, placés entre les feuillets. Ces argiles possèdent donc une capacitéd'échange cationique élevée. Des molécules d'eau sont susceptibles de s'intercaler dansles espaces interfoliaires et le degré

d'hydratation dépend de la nature du cation et del'humidité relative. Cette possibilité de gonflement des espaces interfoliaires conduit àdésigner ces argiles par le terme **« argiles gonflantes ».** Cette famille de minérauxargileux possède donc des propriétés remarquables d'hydratation et de gonflement. Elles sont très peu perméables.

D'un point de vue textural, les smectites sont constituées de feuillets de grande extension latérale, associés les uns aux autres en nombre très variable (de 1 à plusieurs centaines) selon l'humidité et la nature du cation échangeable. Lorsque les particules sont constituées d'un faible nombre de feuillets (cas des smectites sodiques aux fortes teneurs en eau), les particules sont à la fois très souples et anisotropes et forment des réseaux très « lâches » susceptibles de retenir de grandes quantités d'eau.

## III .3.Bentonite

Le terme bentonite désigne les matériaux argileux à usage industriel, essentiellement composés de smectites et plus particulièrement de montmorillonite. Les propriétés de gonflement et de perméabilité des bentonites dépendent étroitement de la nature du cation compensateur.

Il existe une certaine diversité parmi les matériaux commercialisés sous le terme de bentonite, dont les performances, vis à vis de la fonction d'étanchéifiassions dépendent de (Luckham et Rossi, 1999)

- La teneur en montmorillonite présente dans le produit ;
- La concentration relative de la bentonite en sodium et en calcium ;
- La finesse de mouture qui a une conséquence indirecte sur l'activité de la bentonite : à poids égal, une bentonite fortement broyée a une surface d'exposition supérieure et s'hydrate plus rapidement que la bentonite plus grossière ;
- Des additifs chimiques éventuellement introduits lors de la fabrication du matériau commercialisé.

## III.4.Origine de la bentonite

L'altération et la transformation hydrothermale de cendres des tufs volcaniques riches en verre entraînent la néoformation des minéraux argileux, qui font partie principalement du groupe des smectite. Les roches argileuses ainsi formées portent le nom de bentonite, d'après le gisement situé près de Fort Benton (Wyoming, Etats-Unis). Elle contient plus de 75 % de montmorillonite ; cette dernière fut découverte pour la première fois en 1847 près de montmorillon, dans le département de Vienne (France) (Airodi et Critter ,1997). En Algérie,

les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'oranie (ouest algérien).

On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) dont les réserves sont estimées à un million de tonnes et de celle de Mostaganem (M'zila) avec des réserves de deux millions de tonnes (Weber et Morris ,1963).

## III.5.Structure et composition de la bentonite

La bentonite est une roche argileuse, friable, tendre et onctueuse au toucher, sa teinte dépend des composés minéraux et impuretés (matière organique et oxydes des métaux) qui lui sont étroitement associés. Elle est blanche, grise ou légèrement jaune. Elle se caractérise par une capacité élevée d'adsorption, d'échange ionique et de gonflement (Weber et Morris ,1963).Elle est constituée, principalement, par un minéral argileux appelé montmorillonite dont la structure est schématisé par la figure III.1.

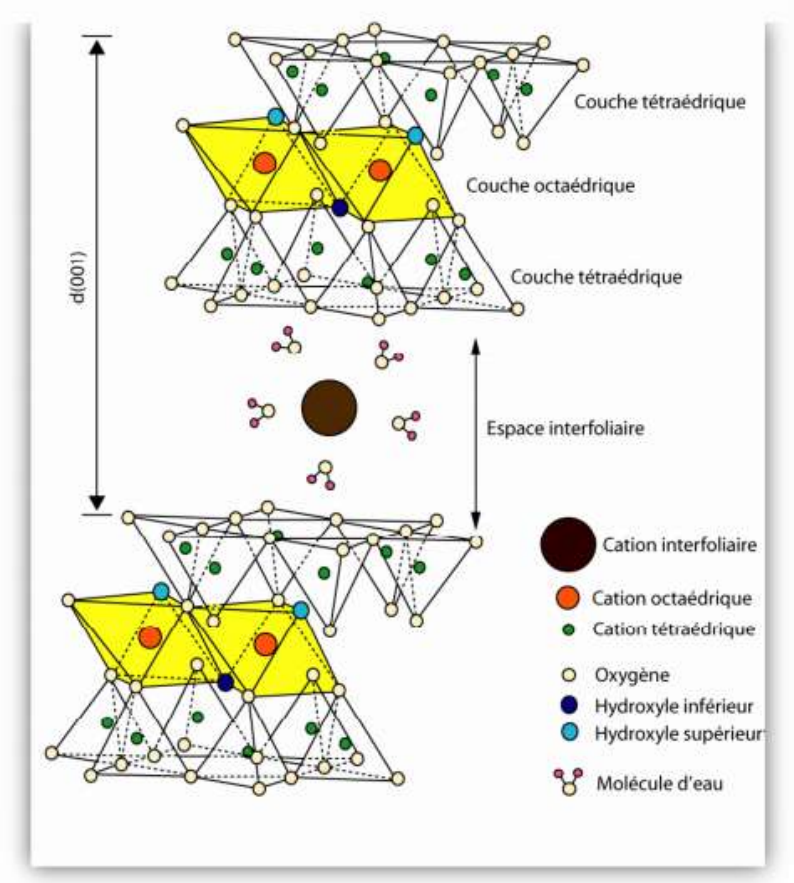



**Figure III.1**- La structure d'une montmorillonite.

## III.6.Microstructure de la montmorillonite

Les montmorillonites ont la particularité de présenter différents niveaux d'organisation selon l'échelle d'observation (Joubert et al, 2006). Nous présentons dans cette partie les différents "objets" caractéristiques de cette structure multi-échelle (figure III.2).

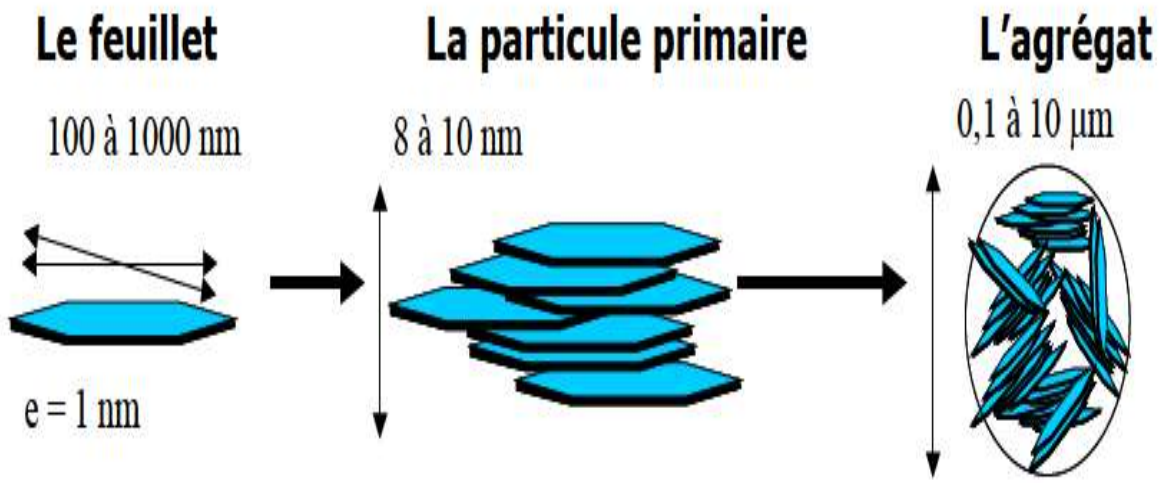



**Figure III.2-** Structure multi-échelle de la montmorillonite.

### III.6.1.Le feuillet

C'est la répétition horizontale de la demi-maille dans les directions x et y. Il est assimilable à un disque ou à une plaquette, possédant des dimensions latérales de l'ordre du micron, et faisant à peu prés un nanomètre d'épaisseur. Ces plaquettes sont souples et relativement déformables. L'anisotropie des feuillets est très importante. Dans la famille des smectites, la charge d'un feuillet varie de 0,2 à 0,6 électron par maille, selon la localisation des substitutions, et le taux d'occupation des couches octaédriques. La montmorillonite possède environ 0,3 à 0,4 électron par maile. Les cations compensateurs à la surface des feuillets de montmorillonite sont généralement des ions calcium ou sodium. On emploie généralement les termes de montmorillonite "calcique" et de montmorillonite "sodique" pour faire référence à la nature de ces cations (Cousin, 1980).

### III.6.2.La particule primaire

Particule formée d'un empilement de feuillets identiques parallèle à son plan de base.

L'empilement peut être ordonné, semi-ordonnée ou désordonné. Son épaisseur est varie de 8 à 10 nm. Dans le cas de la montmorillonite l'empilement est désordonné (Saygideger, 2005).

### III.6.3.L'agrégat

C'est un ensemble de particules primaires orientées dans toutes les directions .Les agrégats ont une taille qui varie de 0,1 à 10 microns. Cette structure multi-échelle développe différents niveaux de porosité, qui expliquent l'aptitude de la montmorillonite au gonflement.

L'adsorption d'eau se fait à plusieurs niveaux : par l'hydratation des cations compensateurs mais aussi par capillarité au sein des galeries et des porosités interparticulaires et inter agrégats (Joubert et al, 2006). Il existe plusieurs modes d'associations (Van Olphen, 1964) : bord à bord et face à face (figure III.3).

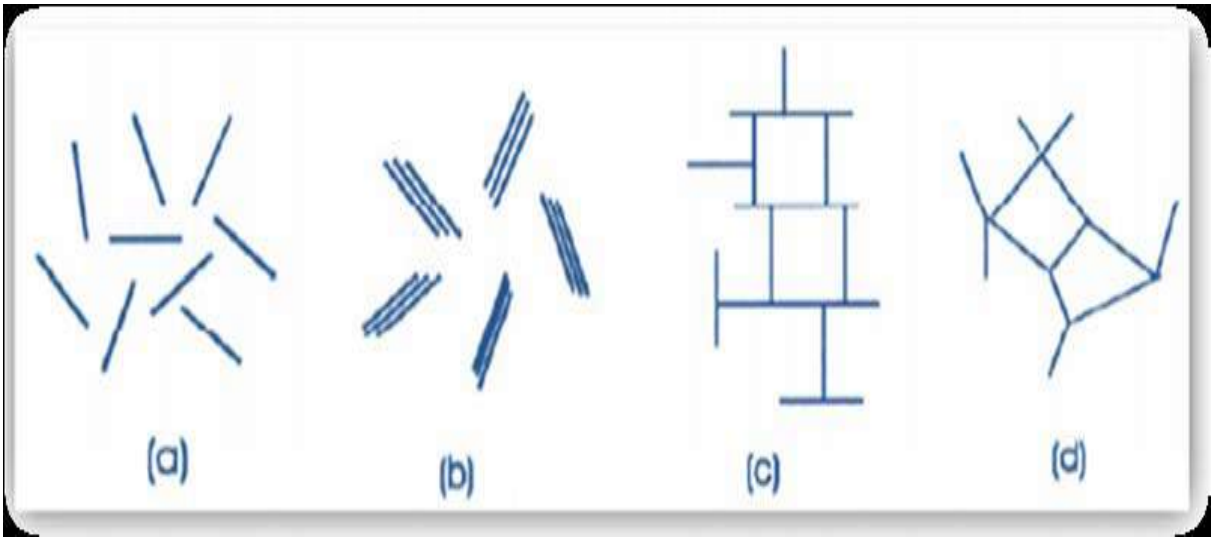



**Figure III.3**- Modes d'associations supposés des feuillets de montmorillonite en suspension selon la théorie de Van Olphen (1964): **(a)** dispersion, **(b)** agrégation face-face, **(c)** association bord-face, **(d)** association bord-bord.

## III.7.Capacité de gonflement

L'une des propriétés la plus remarquable de la bentonite est sa faculté de se gonfler considérablement dans l'eau pour former des masses visqueuses et gélatineuses. Pour qu'une argile soit vraiment une bentonite au sens commercial du terme, elle doit gonfler au moins cinq fois l'équivalent de son volume au contact de l'eau. Il est admis que le gonflement des montmorillonites est principalement dû au fait que l'absorption de l'eau par la structure de la molécule s'effectue entre les feuillets qui s'écartent les uns des autres. L'adsorption de l'eau est une réaction exothermique qui implique la formation de liaisons d'hydrogène entre les molécules d'eau et les groupements hydroxyles de la montmorillonite et l'hydratation des cations échangeables (Saualha, 2005). Le gonflement de la montmorillonite est un processus réversible.

Autrement dit, la montmorillonite peut être séchée et gonflée à nouveau autant de fois que l'on voudra sans que ses propriétés soient modifiées, pourvu que l'eau utilisée soit pure et que le séchage n'ait pas été fait à une température élevée (Romero- Gonza'lez, 2006).

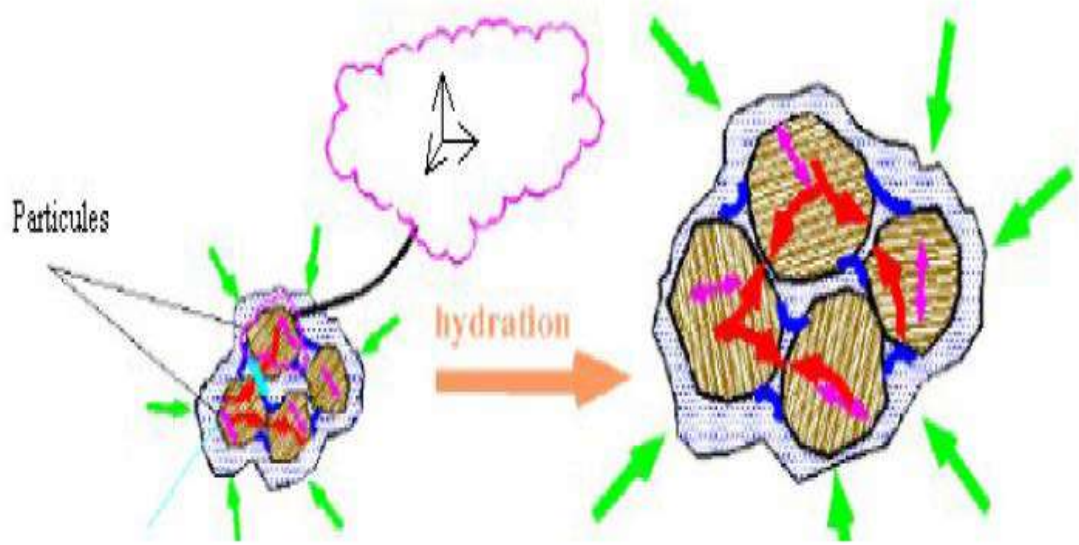



**Figure III.4**- Argile gonflante.

## III.8.Les différents types de bentonite

### III.8.1.Bentonites naturelles

En fonction de la nature de cation échangeable présent, il existe à l'état naturel deux types de bentonites:

- les bentonites sodiques, où le sodium est le cation échangeable majoritaire, elles ont un fort pouvoir de gonflement et d'absorption.
- les bentonites calciques, où le calcium est le cation échangeable majoritaire, elles ont un pouvoir de gonflement et d'absorption plus faible que les bentonites sodiques.

Ces deux types de bentonites, éventuellement après un séchage à 80-90°C, sont simplement broyés avant leur commercialisation (Moussaoui, 2012).

### III.8.2.Bentonite active

Afin d'améliorer les propriétés d'absorption des bentonites calciques, ces dernières sont le plus souvent activées par le carbonate de sodium puis séchées et broyées; on obtient ainsi des bentonites calciques activées dont les propriétés sont égales ou supérieures à celles des bentonites sodiques.

Les propriétés de ces bentonites ainsi activées ou permutées sont moins stables dans le temps (3 à 18 mois) et dépendent de l'activation et des taux de magnésium, calcium et sodium.

Ces différents types de bentonites se présentent sous forme de poudre ou de granulés Sphériques ou cylindriques. Elles ont des couleurs très variables allant du blanc pour les Produits les plus purs au gris, beige ou vert pour les autres (Moussaoui, 2012).

## III.9.Bentonite de Maghnia

EnAlgérie, les gisements de bentonite les plus importants économiquement se trouvent dans l'oranie (ouest algérien). On relève en particulier la carrière de Maghnia (Hammam Boughrara) et de celle de Mostaganem (M'zila).

Le gisement d'argiles bentonitiques de Hammam Boughrara est situé à 15 Km au Nord-Est de la ville de Maghnia, Wilaya de Tlemcen et à 05 Km du village Hammam-Boughrara. Le gisement qui s'étale sur une superficie de 175Ha est composé de cinq carrières (Roussel1, Roussel 2, DarM'Barek 1, Dar M'Barek2 et RM) avec un potentiel de réserve estimé à 11 millions de tonnes.

ENOF (**E**ntreprise **n**ationale des produits miniers n**o**n **f**erreux et substances utiles) exploite actuellement la carrière de Roussel 1.

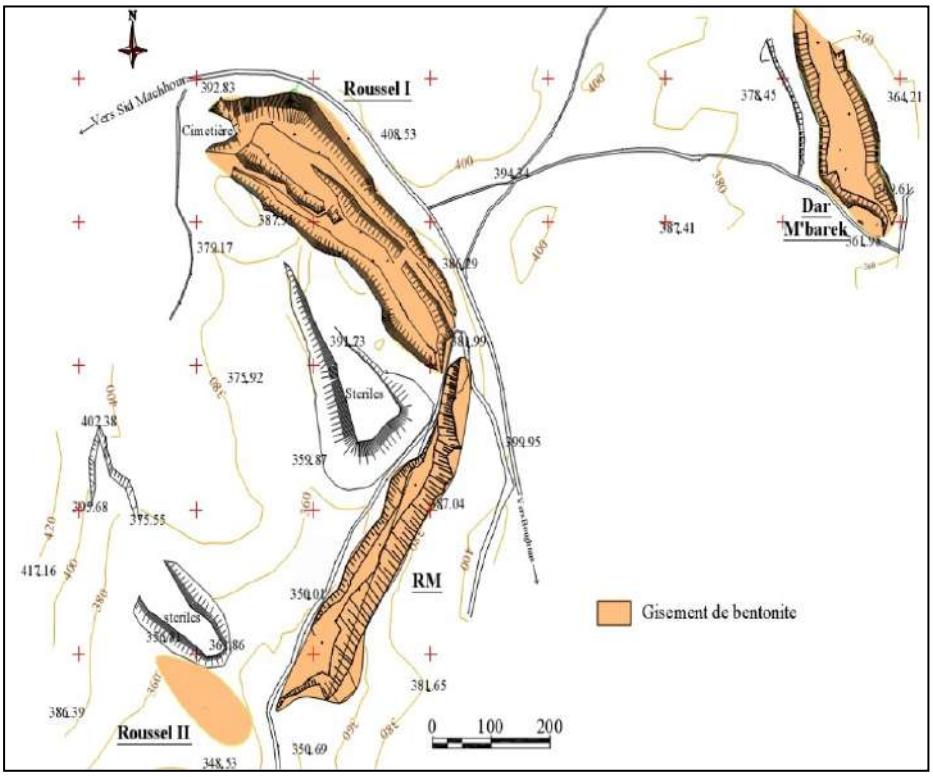



**Figure III.5**-Carte de répartition des gisements de bentonites de Hammam Boughrara.

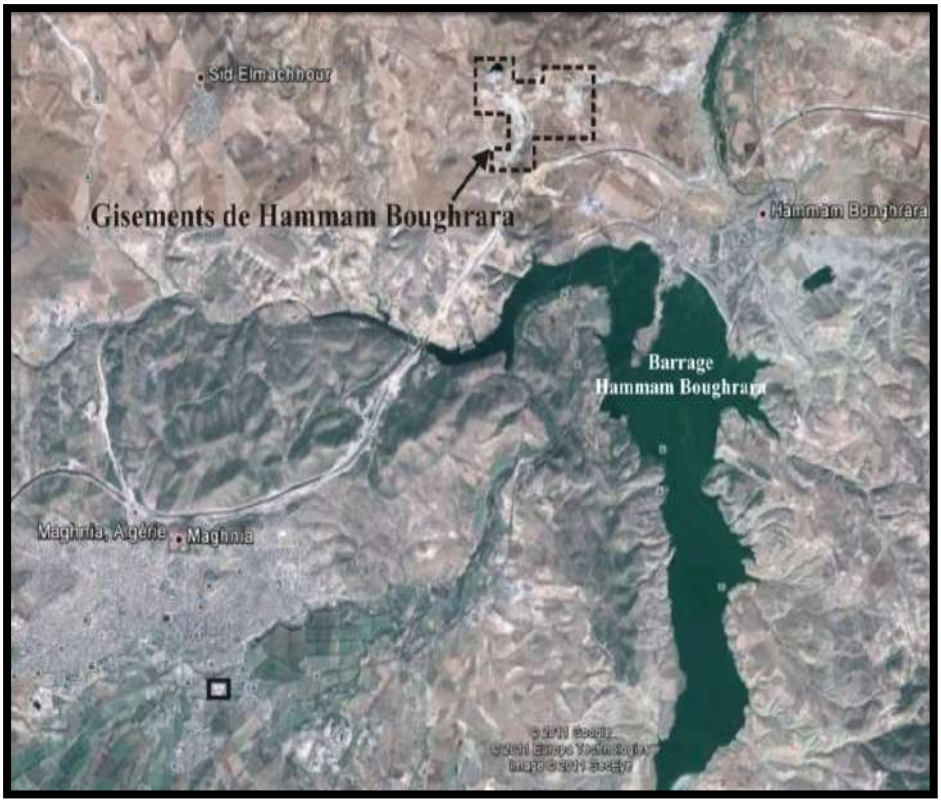



**Figure III.6** -Situation de l'unité BENTAL par rapport aux gisements.

L'unité de Maghnia se situe à l'intérieur de la zone urbaine. Elle est conçue en 1950.

ENOF Maghnia intervient sur quatre produits :

- **Bentonite de forage :** son domaine d'utilisation est : Viscosifiant de forage – (Forages pétrolier et hydraulique).
- **Bentonite de fonderie** : son domaine d'utilisation est : liant des sables de moulage.
- **Bentonite de Charge industrielle** : elle est utilisée comme additif dans les produits phytosanitaires (pesticides) et alimentation animale.

**La production globale de** la bentonite est en moyenne de 18000 tonnes/an répartie comme suit :

- Bentonite de forage : 16 000 T
- Bentonite de fonderie : 1 000 T
- Bentonite de charge industrielle : 1 000 T

Le traitement des bentonites se fait en 5 stades:

- Concassage
- Activation au carbonate de soude ($Na_2CO_3$).
- Séchage.
- Broyage et dopage au Magnésie
- Ensachage : 50 kg et big bags de 1.25 T (voir figure III.7).

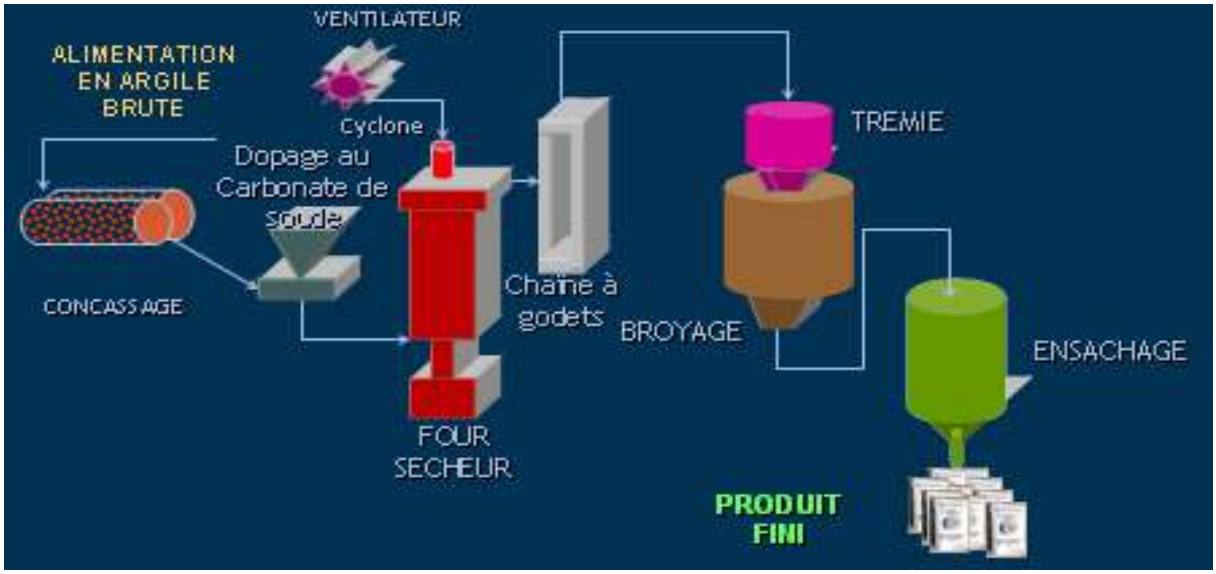



**Figure III.7**-Processus de production de la bentonite de Maghnia.

## III.10.Action de l'eau sur la bentonite

En présence d'eau, une bentonite peut former un solide hydraté suspension plus ou moins stable. Cela est possible grâce au caractère' argile.

### III.10.1. Le gonflement

La bentonite est caractérisé généralement par le gonflement en présence d'eau et il est définit par une augmentation du volume de sol.

Ce phénomène se passe durant la saison pluviale quand l'argile est complètement saturée en eau. En Pratique, le gonflement dépend de l'augmentation de la teneur en eau d'un sol et aussi de ça teneur en minéraux argileux actifs, ces minéraux aident l'eau à s'infiltrer plus facilement, ainsi que la composition chimique de l'eau qui peut favoriser ce phénomène (Melki ,2019).

### III.10.2.Le retrait

Le retrait survient lorsque la quantité d'eau dans le sol diminue, il agit contrairement au gonflement.

La cause de cette diminution peut être due généralement soit l'abaissement de la nappe phréatique ou bien par l'évaporation de l'eau souterraine en surface dans la saison de sécheresse, cette diminution s'accompagne d'une remonté capillaire (tension capillaire) se qui génère une augmentation de l'attraction entre les particules (Melki ,2019).

### III.10.3.La Perméabilité des sols

La perméabilité est la capacité d'un sol à se laisser traverser par l'eau à travers ses interstices, les vides plus petits signifient que l'eau s'écoule moins vîtes à travers le sol et l'argile est caractériser par un écoulement d'eau lent donc il est caractérisé par un sol peut-perméable donc il faut toujours faire attention à ce sujet surtout pour les essais au laboratoire qui sont fait en présence d'eau et de drainage ainsi que l'essai œnométrique.

La perméabilité est un critère important dans le choix des sols utilisés comme matériaux d'étanchéité et elle varie selon la granulométrie et la forme des grains et l'état de compactage du sol (Melki ,2019).

## Conclusion

L'argile est un matériau complexe de par sa composition chimique; il existe de nombreuses argiles parmi lesquelles on recense la famille des smectites on particulier les montmorillonites .Ces argiles sont très sensibles à la présence d'eau. Elles sont à l'origine de nombreux désordres dans les constructions géotechniques.

# *Chapitre IV :*

# *Étude expérimentale*

# Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter l'étude expérimentale réalisée sur la bentonite de Maghnia. Cette étude comporte des essais chimiques et physiques dans le but de déterminer l'effet de la salinité de l'eau sur certaines caractéristiques géotechniques.

L'étude expérimentale a été réalisée au niveau de laboratoire géotechnique ROAD.

## IV.1. Matériaux utilises

### IV.1.1. Eau salée

Une quantité de saumure naturelle d'environ 100 l et de  sel ont été prélevés et transportés au laboratoire pour analyse.

La localisation des points de prélèvement a été effectuée à l'aide d'un appareil GPS : 673883 **E**, 3917621 **N**, **Z**=387 m.

### IV.1.2. Analyse chimique

Une analyse chimique par photomètre de flamme est effectuée sur un échantillon de saumure naturelle

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1-Les résultats d'analyse chimique

| Paramètre | Unité | Résultats | Méthode |
|---|---|---|---|
| Potentiel Hydrogène | - | 7.22 | pH-mètre |
| Potassium (K+) | g/l | 19.05 | Photomètre |
| Calcium (Ca2+) | g/l | 25.92 | Photomètre |
| Magnésium(Mg2+) | g/l | 15.55 | Photomètre |
| Sodium (Na+) | g/l | 94.59 | Photomètre |
| Chlorures (Cl-) | g/l | 208.49 | Photomètre |
| Résidu Sec | g/l | 601 | Etuvage |

Les résultats de l'analyse chimique de la saumure naturelle indiquent que cette dernière est saturée en sel soluble.

### IV.1.3. Préparation des échantillons de sel

- Placer l'échantillon de l'eau salée dans un récipient.
- Mettre l'échantillon dans l'étuve à une température de 60°C.
- Après le séchage complet de l'échantillon(le sel se cristallise).
- Préparer des solutions salines avec des déférents pourcentages de salinités (0, 5, 10, 15et20 %)



**Figure IV.1**-Cristallisation des sels.



**Figure IV.2-**Préparation des saumures (5, 10, 15 et 20%).

## IV.2.Caractérisation de la bentonite

### IV.2.1. Diffraction aux rayons X (DRX)

Des essais de diffraction aux rayons X (DRX) ont été réalisés sur des échantillons de Bentonite pour identifier les différents minéraux constituants l'échantillon.

Les résultats obtenus montrent que la Bentonite de Maghnia est composée principalement de montmorillonite avec la présence de quartz, de calcite et des traces de zéolite, anorthite et muscovite (Figure IV-4).

Le minéral argileux prédominant étant la montmorillonite, l'échantillon considère est bien une bentonite.




**Figure IV.3-** Diffractomètre PANalytical : Empyrean.

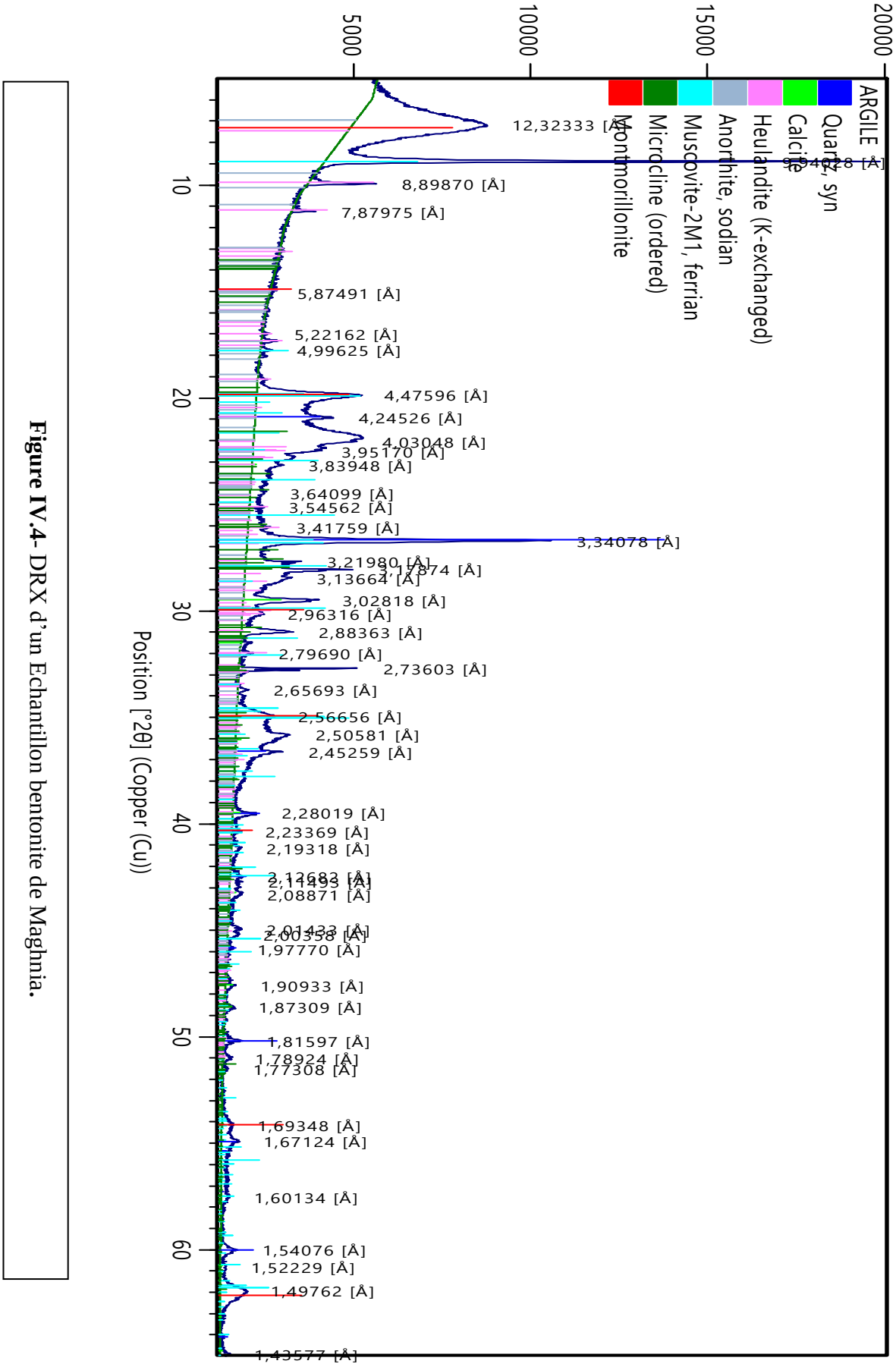



**Figure IV.4-** DRX d'un Echantillon bentonite de Maghnia.

### IV.2.2.Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB) ou Scanning Electron Microscopy (SEM) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière




**Figure IV.5-**Microscope électronique à balayage JEOL JSM-6340F.

Les résultats obtenus par MEB confirment les résultats déjà obtenus par DRX.

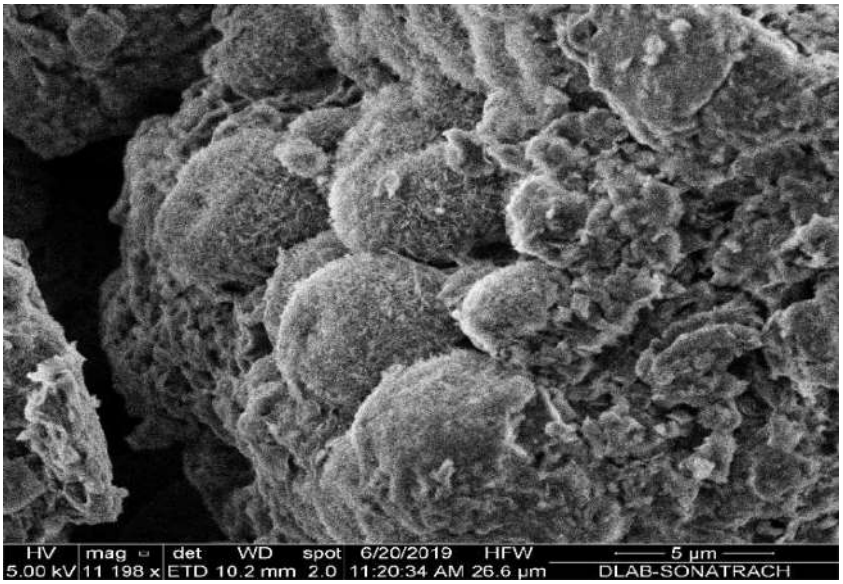



**Figure IV.6**-Illustration de la bentonite (DLAB-Sonatrach).

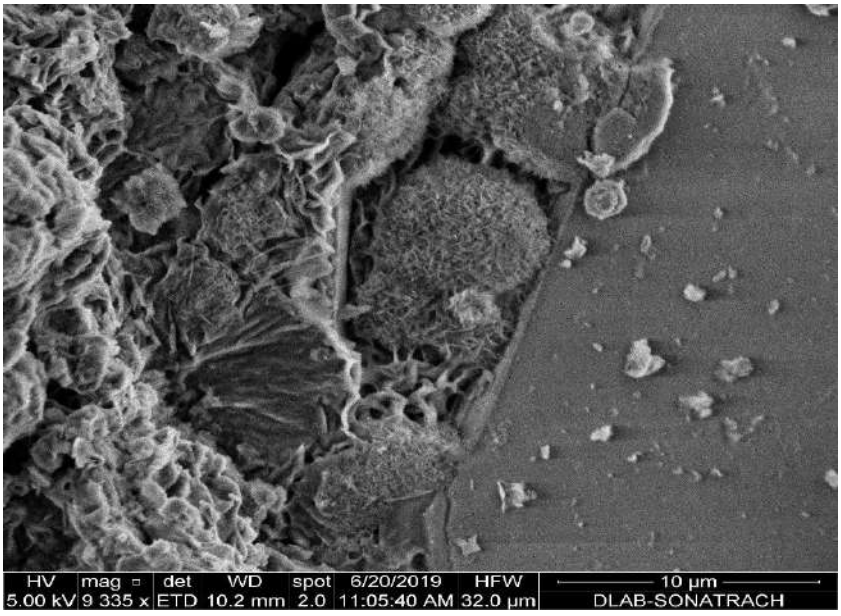



**Figure IV.7**-Montmorillonite (DLAB-Sonatrach).

### IV.2.3.Analyse granulométrique :

Selon les normes NF P94-056 et NF P94-057, des essais d'analyse granulométrique ont été réalisé sur des échantillons de Bentonite.

Chaque essai comporte deux phases :

- Analyse granulométrique par tamisage pour les particules de dimensions supérieur ou égal 80µm (0.08mm).
- Analyse granulométrique par sédimentation pour la partie fine dont le diamètre des particules est inférieur à 80µm ;

Les résultats obtenus sont présentés sur les figures IV.8.

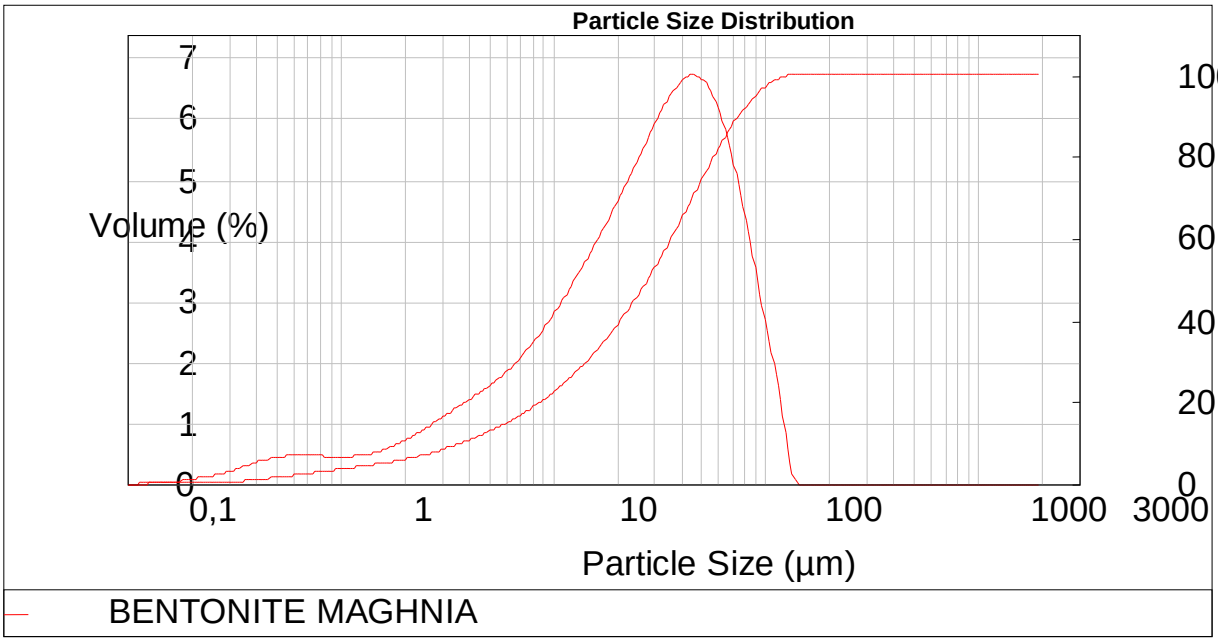



**Figure IV.8**-Analyse granulométrique du Bentonite de Maghnia.

A partir d'analyses granulométriques on peut classifier le matériau comme suit :

- Bentonite de Maghnia : Argile.

### IV.2.4. La masse volumique des grains solides $\rho_s$($méthode\ de\ pycnometre$)

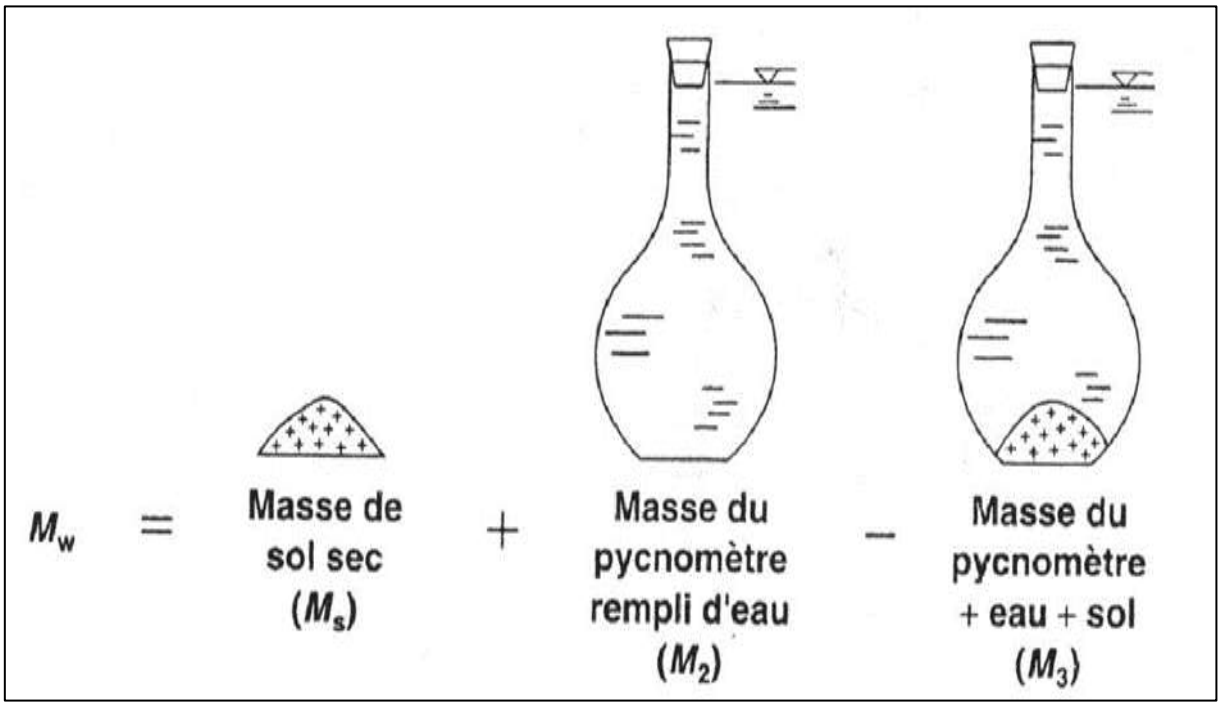



**Figure IV.9**-La masse volumique des grains solides$\rho_s$.

L'essai consiste à trouver la masse d'eau ($M_w$) déplacée par émersion dans un pycnomètre d'une masse connue de sol sec (Ms). Pour ce faire, on mesure la masse d'un pycnomètre rempli d'eau distillée et désaérée ($M_2$) et la masse du même pycnomètre dans lequel on a placé l'échantillon de sol et qu'on a rempli d'eau distillée et désaérée ($M_3$). Les mesures des masses $M_2$ et $M_3$ se font à une même température ($T_2$). La masse d'eau déplacée est alors égale à :

**$M_w = M_s + M_2 - M_3$**

$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$ **Avec :** Ms : la masse des grains solides

Vs : Volume des grains solides

Des essais de détermination de la masse volumique des grains solides ont été réalisés sur des échantillons de bentonite de Maghnia.

Les résultats obtenus indiquent que la masse volumique des grains solides est de 2.64 t/m3

## IV.3. Étude de l'effet du sel sur les limites d'Atterberg de la bentonite

Des essais de limites d'Atterberg ont été réalisés sur des échantillons de bentonite par l'utilisation de l'eau distillée, de la saumure naturelle et des liquides préparés à différentes salinités.

Lorsque la détermination des limites d'Atterberg des échantillons de bentonite est basée sur les teneurs en eau conventionnelles, les limites de liquidités et de plasticités diminuent en fonction de la salinité des liquides (figure IV.10, figure IV.11). Ces résultats concordent avec ceux trouvés par Messad et al. (2015).

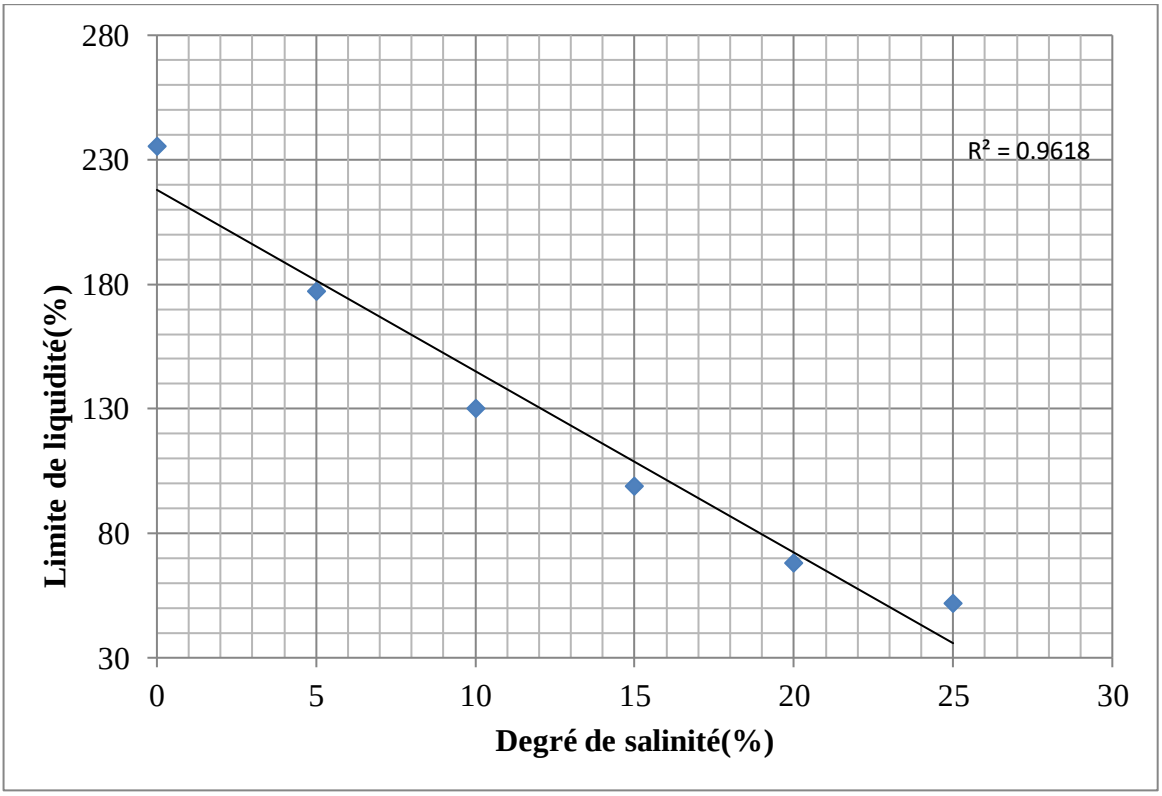



**Figure IV.10-** L'effet de la salinité sur la limite de liquidité (méthode conventionnelle).

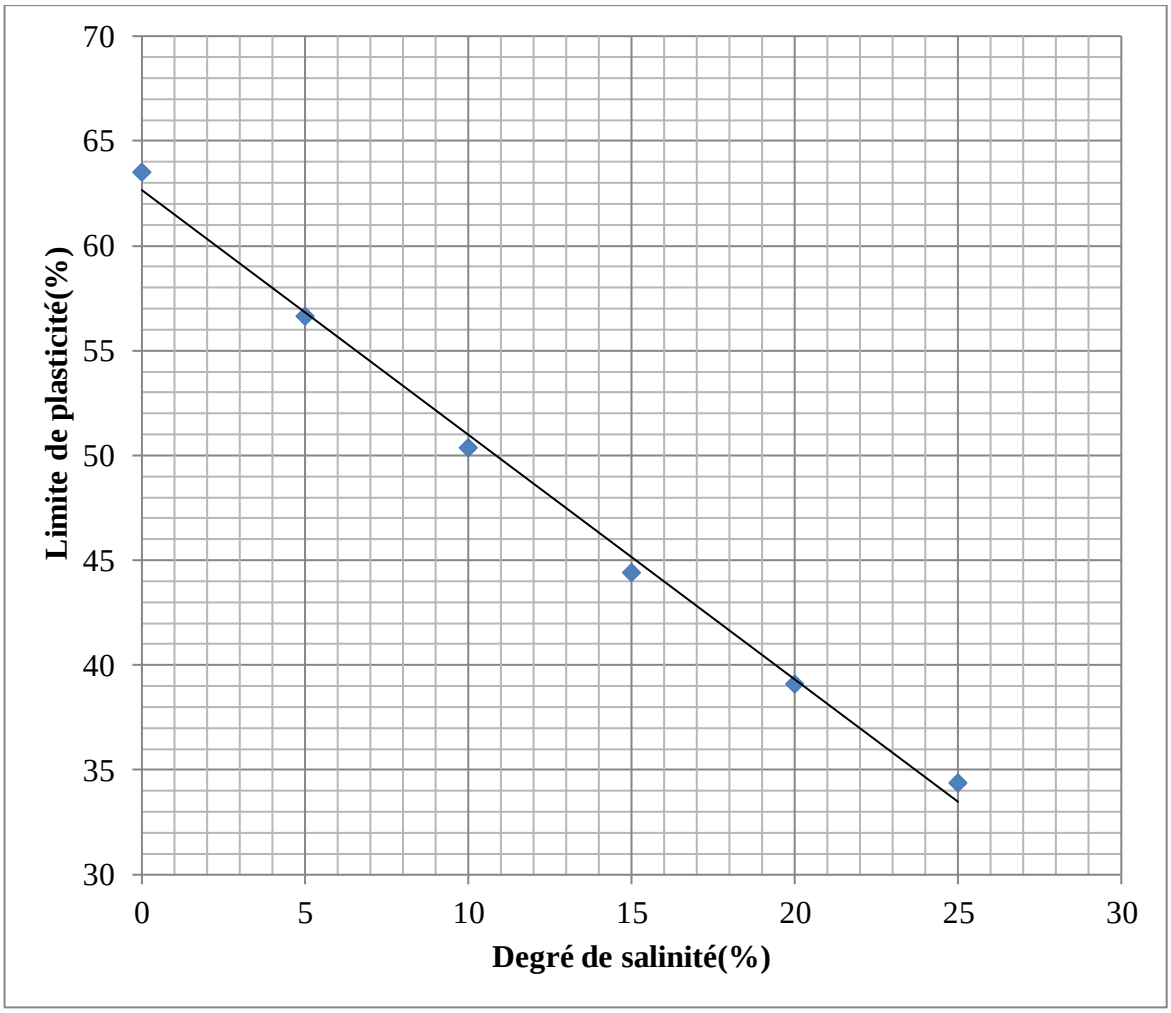



**Figure IV.11-** L'effet de la salinité sur la limite de plasticité (méthode conventionnelle).

Contrairement aux résultats trouvés par Messad et al. (2015) ; Lorsque la détermination des limites d'Atterberg des échantillons de bentonite est basée sur les teneurs en fluides, les limites de liquidités et de plasticités diminuent en fonction de la salinité des liquides (figure IV.12, figure IV.13).

Cette diminution et peut être due aux réactions chimiques entre la bentonite et le sel.

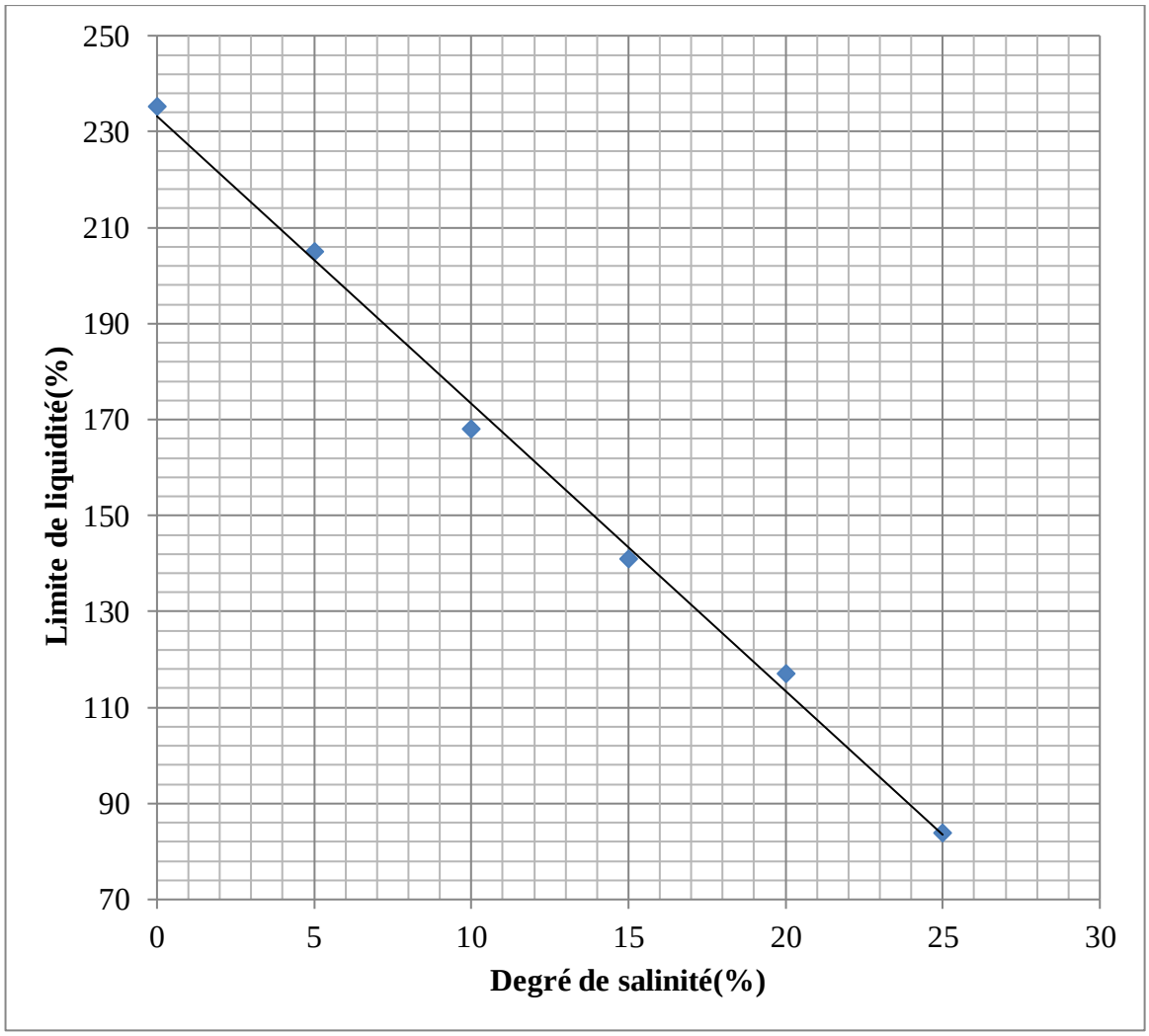



**Figure IV.12**-L'effet de la salinité sur la limite de liquidité (teneur en fluide).

La différence entre les limites d'Atterberg déterminées par la méthode conventionnelle et celle de teneur en fluide (ΔWL) pour le même essai augmente avec l'augmentation de la salinité (figure IV.14). Cela implique que l'erreur associée à l'utilisation de la méthode conventionnelle augmente en fonction de la salinité des liquides.

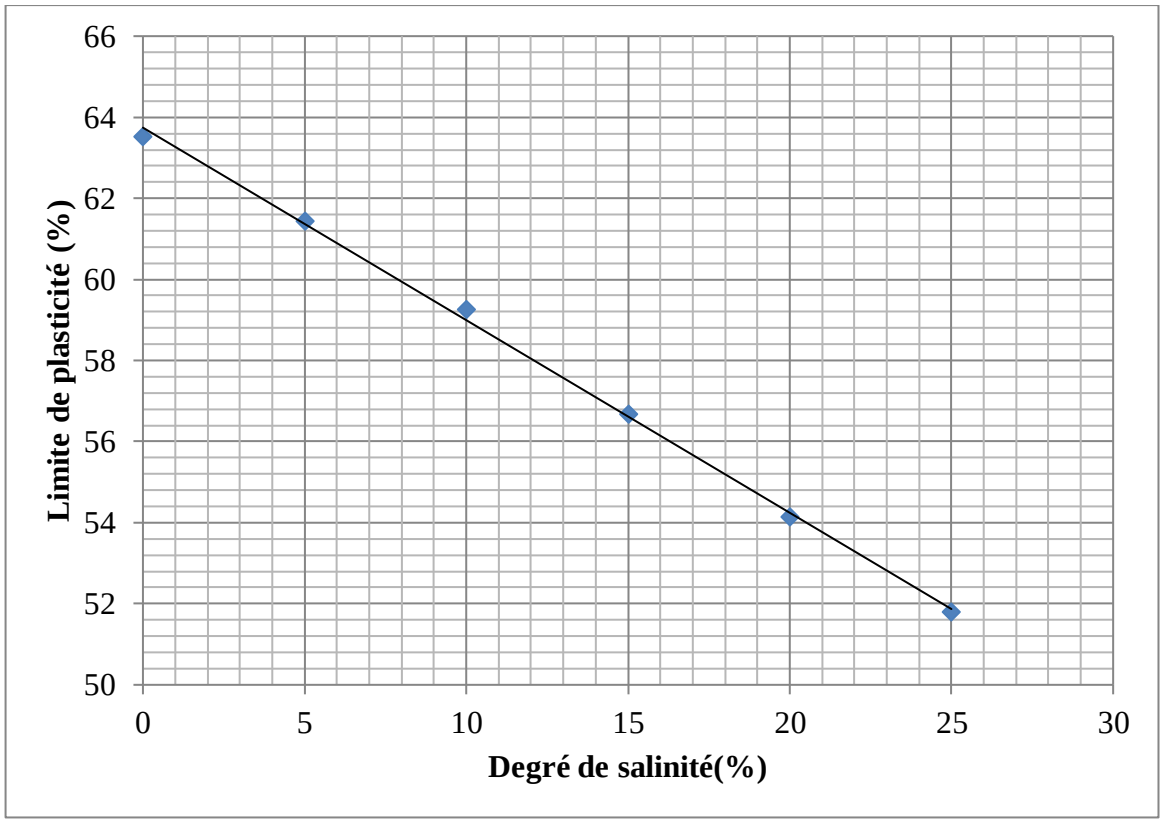



**Figure IV.13-** L'effet de la salinité sur la limite de plasticité (teneur en fluide).

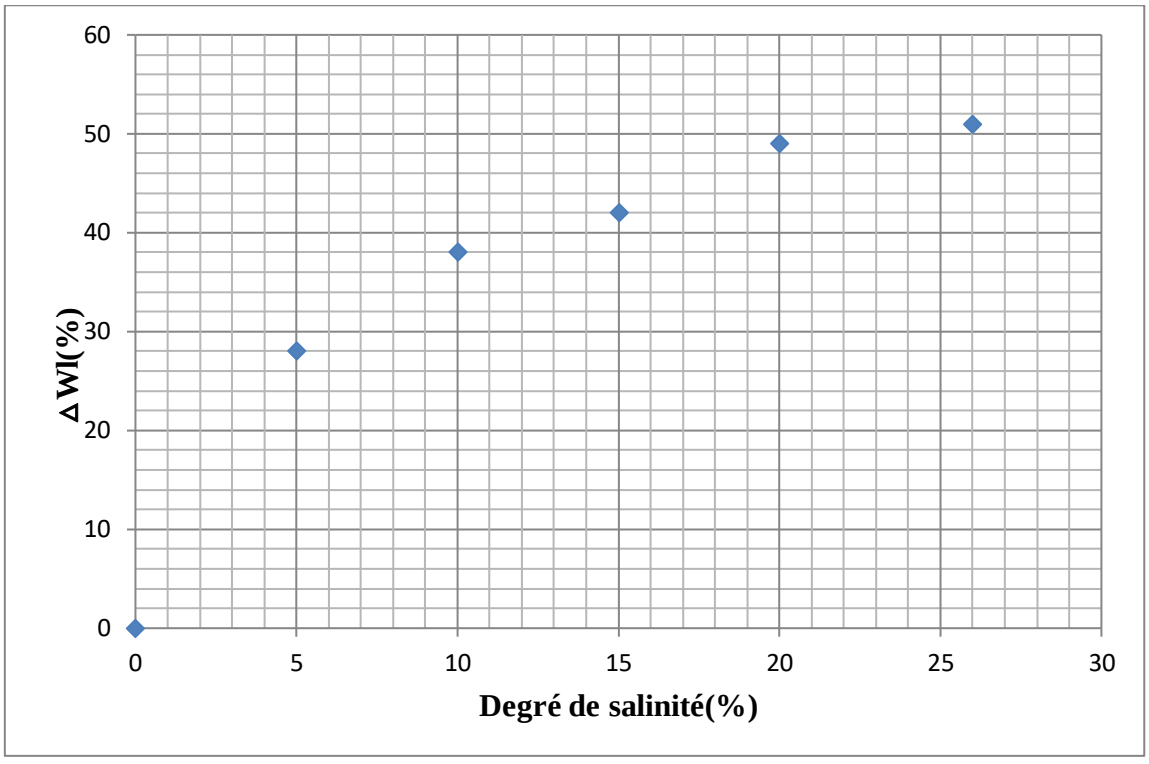



**Figure IV.14**-Erreur associée à l'utilisation de la teneur en eau conventionnelle.

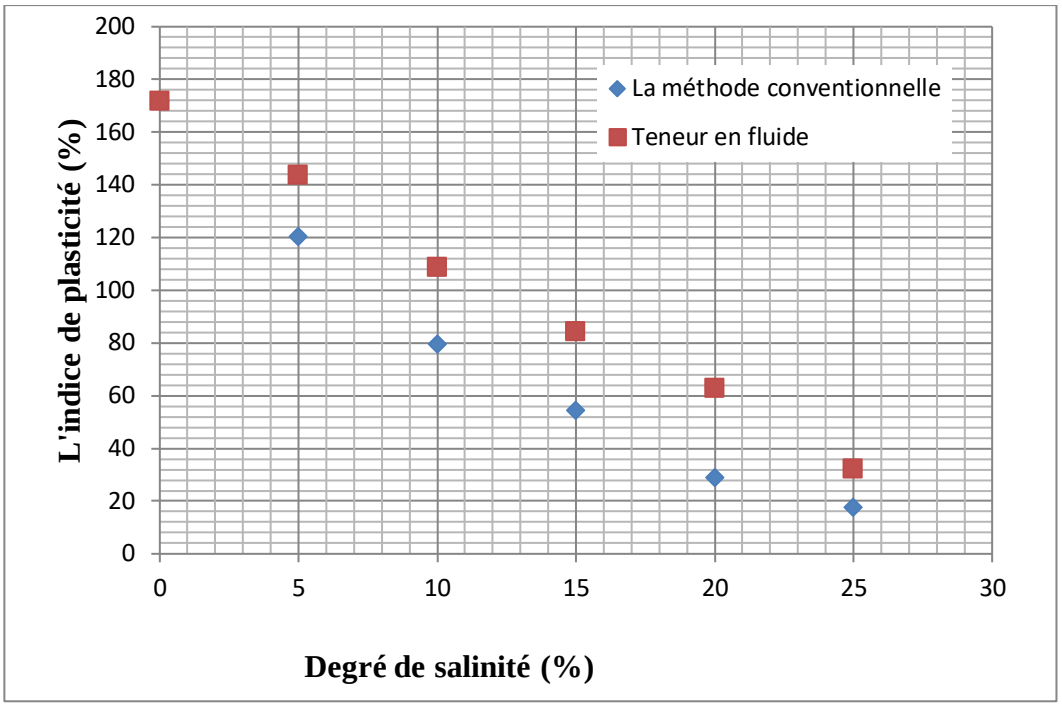



**Figure IV.15-** L'effet de la salinité sur l'indice de plasticité.

La classification des sols est très influencée par la méthode de détermination des limites d'Atterberg. Lorsque la détermination des limites d'Atterberg est basée sur la méthode conventionnelle, tous les échantillons sont classés comme une argile CH (Clay with high plasticity) et argile CV (Clay with very high plasticity) selon le système anglais de classification des sols (BS EN 2004). Alors qu'ils sont classés comme argile CV (Clay with very high plasticity) et argile CE (clay with extremely high plasticity) lorsque la détermination des limites d'Atterberg est basée sur la teneur en fluide (Figure IV.15). L'échantillon de bentonite testé par l'utilisation de l'eau distillée est classé comme une argile CE.

Après les essais que nous avons effectués entre le mélange de bentonite et les solutions salines, nous avons constaté que les résultats après avoir laissé le mélange reposer pendant 24 heures étaient mauvais. Après 48 heures, les résultats se sont améliorés, mais pas au degré requis.

Après 72 heures, les résultats étaient bons et les courbes comprenaient au moins 3 points, et à partir de là, nous concluons que l'interaction entre la bentonite et les solutions salines ne s'est terminée qu'après 72h.

Dans des expériences précédentes, les mêmes essais ont été appliqués à l'argile de Kaolinite (argile non gonflante), et les résultats des limites d'Atterberg des échantillons de kaolinite augmentent en fonction de la salinité des liquides quand les limites de liquidité et de

plasticités sont basées sur la teneur en fluide. Ces résultats sont opposés aux résultats de la bentonite (argile gonflante) donc on remarque que on doit le faire une caractérisation chimique pour avoir les réactions entre la bentonite et l'eau salée.

Les limites de liquidité sont très affectées par la salinité des liquides que celles de plasticité, ce qui indique que les sols avec une grande plasticité sont plus affectés par la salinité en comparaison avec ceux de faible plasticité.

## Conclusion

A travers ce chapitre nous avons présenté les différents résultats des essais minéralogiques et physiques réalisés sur la bentonite de Maghnia.

La bentonite de Maghnia est composée principalement de montmorillonite.

En effet, la détermination de la teneur en eau par la méthode conventionnelle n'est pas applicable dans le cas des sols salés car les sels précipités sont inclus dans la phase solide du sol et leur contribution à l'état fluide est ignorée. Par conséquent, il semble plus logique d'utiliser la teneur en fluide dans le cas des sols salés au lieu de la teneur en eau conventionnelle.

# *Conclusion générale*

# Conclusion générale

Ce travail est entrepris dans le but de déterminer l'effet de la salinité des eaux sur les caractéristiques géotechniques de la bentonite de Meghnia.

L'étude bibliographique nous a permis d'identifier les facteurs qui ont une influence sur la formation des Sebkhas notamment l'aridité et la salinisation des sols.

L'étude expérimentale réalisée sur la bentonite de Maghnia comporte des essais de caractérisation physique (détermination de la masse volumique des grains solides, l'analyse granulométrique et les limite d'Atterberg), analyse minéralogiques par diffraction des rayons X(DRX) et par la Microscopie électronique à balayage (MEB).

Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La bentonite de Maghnia est composée principalement de montmorillonite.
- la détermination de la teneur en eau par la méthode conventionnelle n'est pas applicable dans le cas des sols salés car les sels précipités sont inclus dans la phase solide du sol et leur contribution à l'état fluide est ignorée. Par conséquent, il semble plus logique d'utiliser la teneur en fluide dans le cas des sols salés au lieu de la teneur en eau conventionnelle.
- l'erreur associée à l'utilisation de la méthode conventionnelle pour la détermination des limites d'Atterberg augmente avec l'augmentation de la salinité des liquides.
- La classification des sols est très influencée par la méthode de détermination des limites d'Atterberg. Lorsque la détermination des limites d'Atterberg est basée sur la méthode conventionnelle, le sol est classés comme une argile CH (Clay with highplasticity) et argile CV (Clay with very high plasticity) selon le système anglais de classification des sols (BS EN 2004). Alors qu'ils sont classés comme argile CV (Clay with very high plasticity) et argile CE (clay with extremely high plasticity) lorsque la détermination des limites d'Atterberg est basée sur la teneur en fluide.
- Les limites de liquidité sont très affectées par la salinité des liquides que celles de plasticité, ce qui indique que les sols avec une grande plasticité sont plus affectés par la salinité en comparaison avec ceux de faible plasticité.

# *Références Bibliographiques*

# Références Bibliographiques

A. Joubert, M. Jauzein, L. Lucas, C. Joulian, F. Garrido., «Etude des processus biogéochimiques prépondérants responsables de la mobilité du Pb, Cd, Zn, As et Hg du sol vers l'hydrosphère», Rapport de fin de première année de thèse. BRGM/RP-54483-FR, 151 p, (2006).

A1-Amoudi O.S.B., Sahel N.A. (1994) Modified oedometer for arid saline soils. Journal of Geotechnical Engineering – ASCE 120: 1892-1897.

Abderrahim Melki., étude analytique des caractéres physico-chimiques et hydriques de deux types de bentonite. Mémoire de master Université Yahia Fares-Medea 2019.

Ajalloeian R., Mansouri H., Sadeghpour A.H. (2013) Effect of saline water on geotechnical properties of fine-grained soil. Electron J Geotech Eng 18:1419–1435.

Alainachi I.H., Alobaidy G.A. (2010) The Effects of Basra Gulf Salt Water on the Proctor compaction and CBR Test Results of Soil Samples at Baniyas City, Abu Dhabi, UAE. EJGE V15, Bund. A.

Aubert G., (1960) Les sols de la zone aride. UNESCO/NS/AZ/514 Colloque général sur les problèmes de la zone aride, communication n°5, Paris.

Boualla N., Benzeiane A., Derrich Z. (2012) Origine de la salinisation des sols de la plaine de M'leta, Oran Algérie. Journal of Applied Biosciences 53: 3787 – 3796.

Bouteyre G., Loyer J.Y. (1992) Sols salés, eaux saumâtres des régions arides tropicales et méditerranéennes : principaux faciès, conséquences pour l'agriculture. Paris : ORSTOM, p69 80.

C. Airoldi, S. A. M. Critter., «Thermodynamic study involving Cu, Zn, Cd, Hg, Pb, Ca and Na', Clays and clay Minerals» 45 (2), P125, (1997).

Ch. Abdellaoui., «Etudes des phénomènes d'adsorption et de diffusion des métaux lourds dans les sols argileux- application aux sites de charges», mémoire de magister en génie civil de l'université de Tlemcen-Algérie, (2007).

Chebuy B., (1991). Les sols salés et leur réhabilitation. p. 35.

Demnati F., Biodiversité et Enjeux Socio-économiques des lacs salés (Chotts et Sebkhas) d'Algérie : Cas du Chott Merouane et Melghir. Thèse de doctorat en sciences Agronomiques. Université MOHAMED KHIDER, BISKRA(2013).

Douaik A., 2005. Evaluation of the space-time variability of soil salinity: Bystatistical, geostatistical, and bayesian maximum entropy methods. Doctor (Ph.D.) thesis, Universiteit Gent, 211 p.

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

Durand., 1983. Les sols irrigables. Etude pédologique. Ed. AC.C.T., Presse universitaire. P322 et p339. France.

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

Frydman S., Charrach J., Goretsky I. (2008) Geotechnical properties of evaporite soils of the Dead Sea area. Eng Geol 101:236–244.

Girard M.C., Walter C., Remy J.C., Bertbel J et Morel J.L., 2005. Sols et environnements, cours, exercices et étude de cas. Edi : Dunod, Paris. 475p.

Gouga H., (2014). Biodiversité faunistique à Sebkhet Bazer (Sud de Sétif) : connaissance et conservation. Mémoire de magister en biologie. Université de Ferhat Abass – Sétif.

INSID (2008) Sols salins en Algérie. INSTITUT NATIONAL DES SOLS, DE L'IRRIGATION ET DU DRAINAGE.

IRD, 2008. Les dossiers thématiques de l'Institut de recherche pour le développement. Les sols sont fragiles.21p.

J. Romero-Gonza'lez, JR. Peralta-Videa, E. Rodr ´y´guez, M. Delgado, JL. GardeaTorresdey., «Potential of Agave lechuguilla biomass for Cr(III) removal from aqueous solutions: thermodynamic studies», Bioresour Technol, 97, 178–182, (2006).

Kemker Ch., (2014) Conductivity, Salinity and Total Dissolved Solids. Fundamentals of Environmental Measurements. Fondriest Environmental, Inc. 3 Mar 2014. Web. <http://www.fondriest.com/environmentalmeasurements/parameters/waterquality/conductivitysalinity-tds/ >.

Koffi L.K.., «Interactions entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium», Thèse de doctorat de l'université de Limoges, (2006).

Luckham, P.F. and S. Rossi (1999), Colloidal and rheological properties of bentonite suspensions Adv. Colloid Interface Sci. 82.

M.G. Saualha, J.L. Cardea-Torresdey, J.G. Parsons, G. Saupe, J.R. Peralta-Videa., «Determination of adsorption and speciation of chromium species by saltbush (Atriplex canescens) biomass using a combination of XAS and ICP-OES, Microchem», J. 81 122–132, (2005).

Mansour Z.M., Taha M.R., Chik Z. (2008) Fresh-brine water effect on the basic engineering properties of Lisan Marl-Dead Sea-Jordan. J Appl Sci 8:3603–3611.

Mansour Z.M., Taha M.R., Chik Z. (2008) Fresh-brine water effect on the basic engineering properties of Lisan Marl-Dead Sea-Jordan. J Appl Sci 8:3603–3611.

Marc L. (2001) Le contrôle de la salinité dans les rizières, Mémento Technique de Riziculture, p6-12.

Messad A., L'effet de la salinité de l'eau sur les caractéristiques géotechniques du sol de Chott El Hodna. Thèse doctorat en géotechnique Université Houari Boumediène (2015).

Noorany I. (1984) Phase relations in marine soils. J Geotech Eng ASCE 110(4):539–543.

Rouahna H. (2007) Relation entre les nappes et la salinité dans les sols gypseux de la région de AIN BEN NOUI, BISKRA. Mémoire de magister en pédologie. Université EL HADJ LAKHDAR, Batna.

S. Cousin., «Contribution à l'amélioration de la qualité des eaux destinées à l'alimentation humaine par utilisation d'argiles au cours des traitements de floculation – décantation», Thèse de Doctorat 3ème Cycle, Université Paris V, France, (1980).

S. Saygideger, O. Gulnaz, S. Istifli, N. Yucel., «Adsorption of Cd(II), Cu(II) and Ni(II) ions by Lemna minor L.: effect of physicochemical environment», J Hazard Mater 126: 96– 104, (2005).

Tabet D.H, 1999. Intérêt d'une approche spatiale par suivi de la salinité des sols dans les systèmes irrigués. Cas de la subdivision de Panjab (Pakistan). Thèse Doctorat ENGREF, Monpellier, 435p.

W.J. Weber, J.C. Morris., «Kinetics of Adsorption on carbon from solution. Journal of Sanitary Engineering», Division ASCE 89, 31, (1963).

WRI, 2002. Drylands, people, and ecosystem goods and services: a web-based geospatial analysis.

Z.Moussaoui., Intercalation de dendomètre sa travers la bentonite sodique. Mémoire de master univrsité abou bekr belkaid-Tlemcen 2012.

# *Annexes*

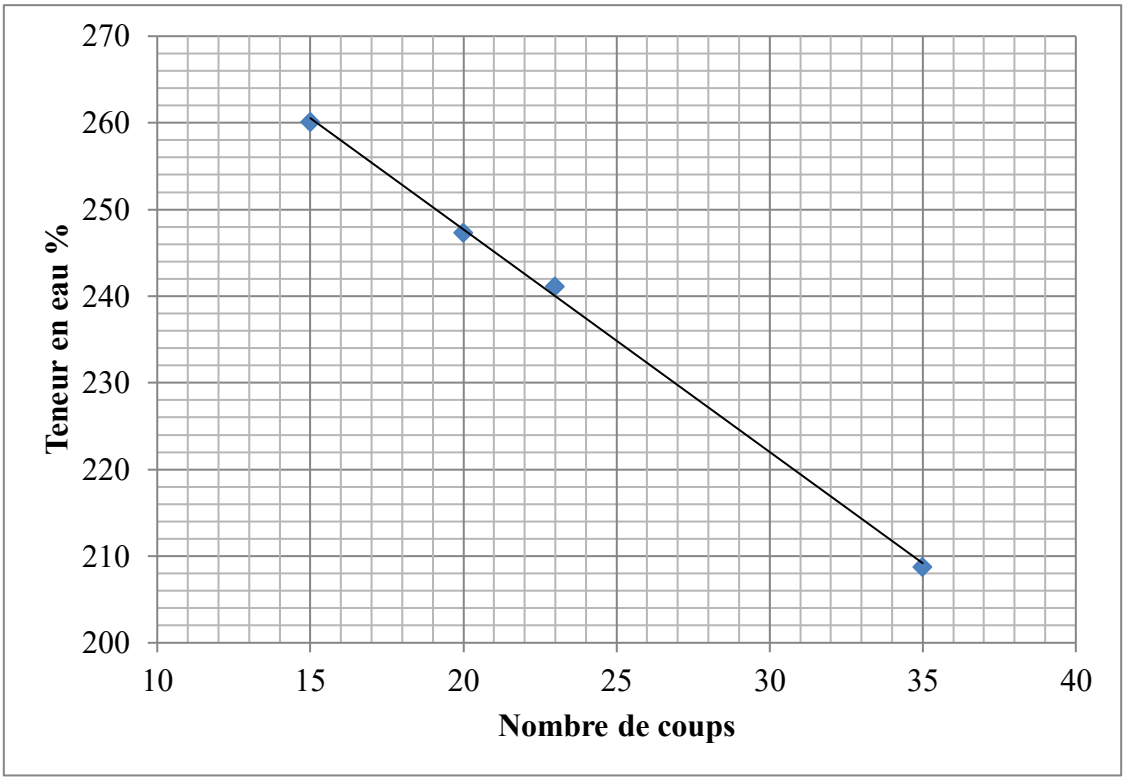



**Figure A.1**- L'effet de la salinité sur la limite de liquidité (l'eau distillé).

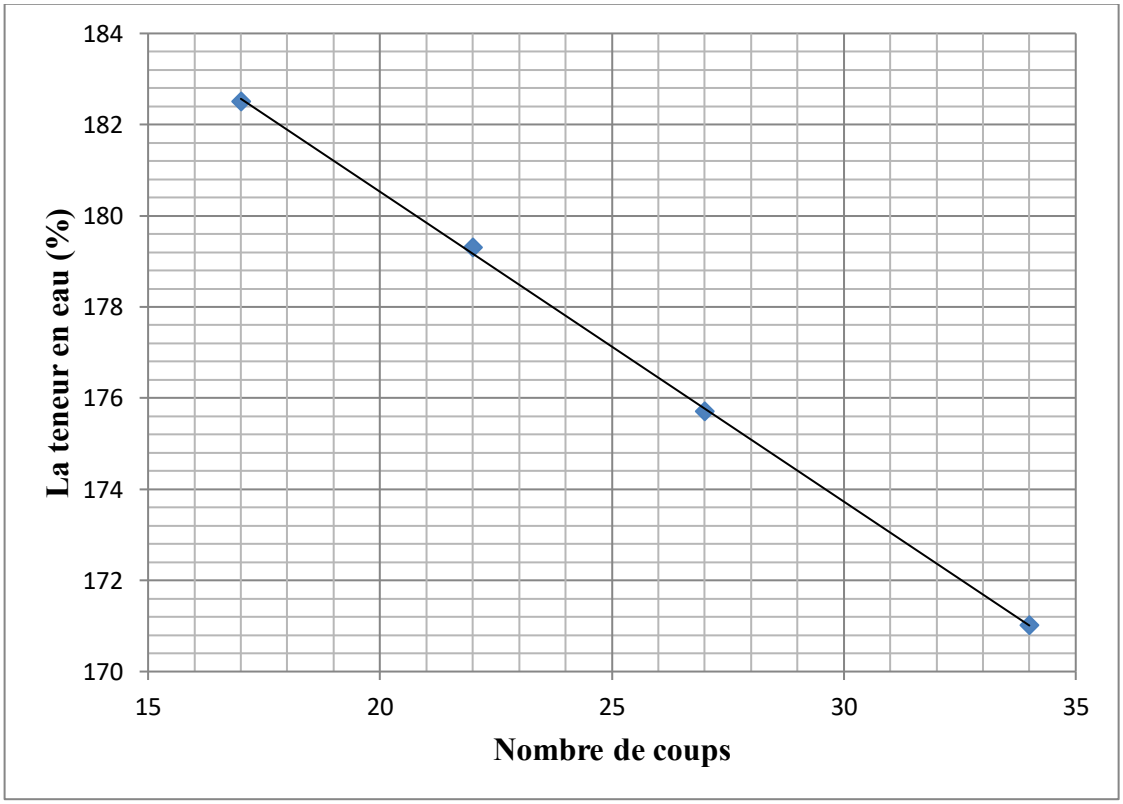



**Figure A.2**- L'effet de la salinité sur la limite de liquidité (5%).

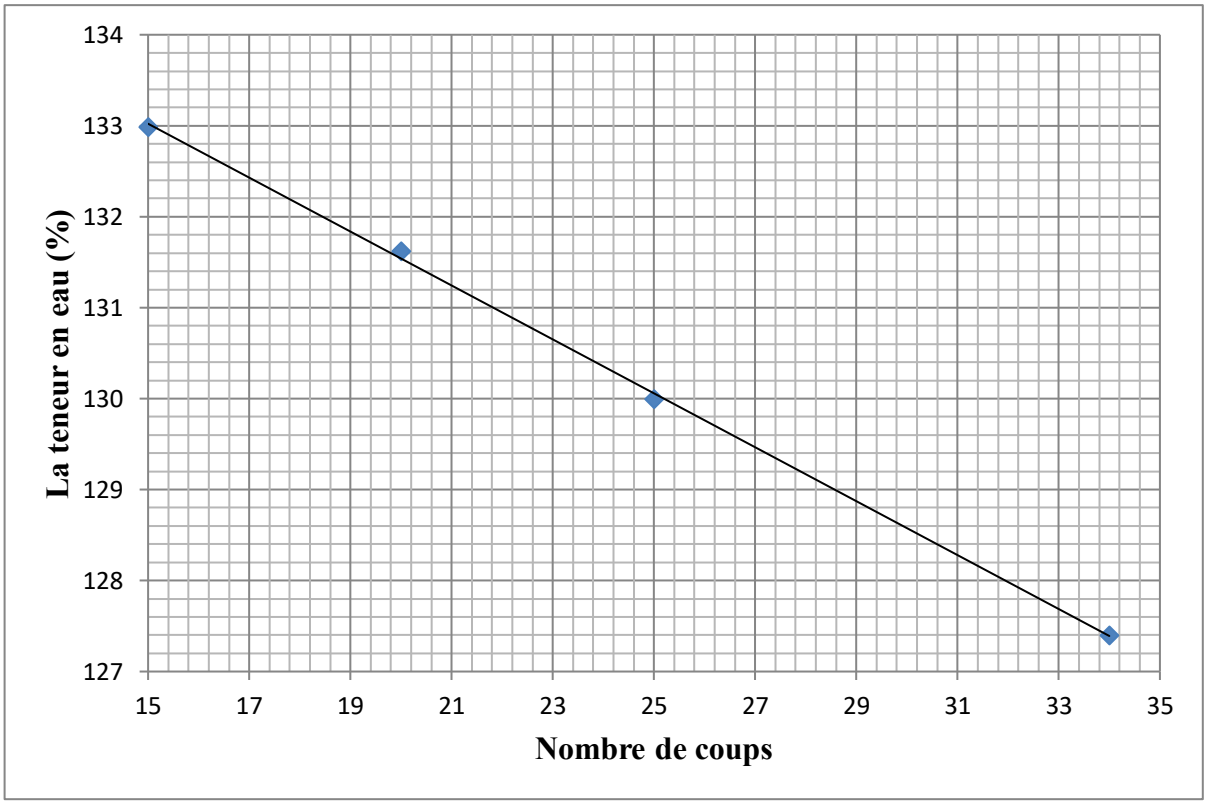



**Figure A.3**- L'effet de la salinité sur la limite de liquidité (10%).

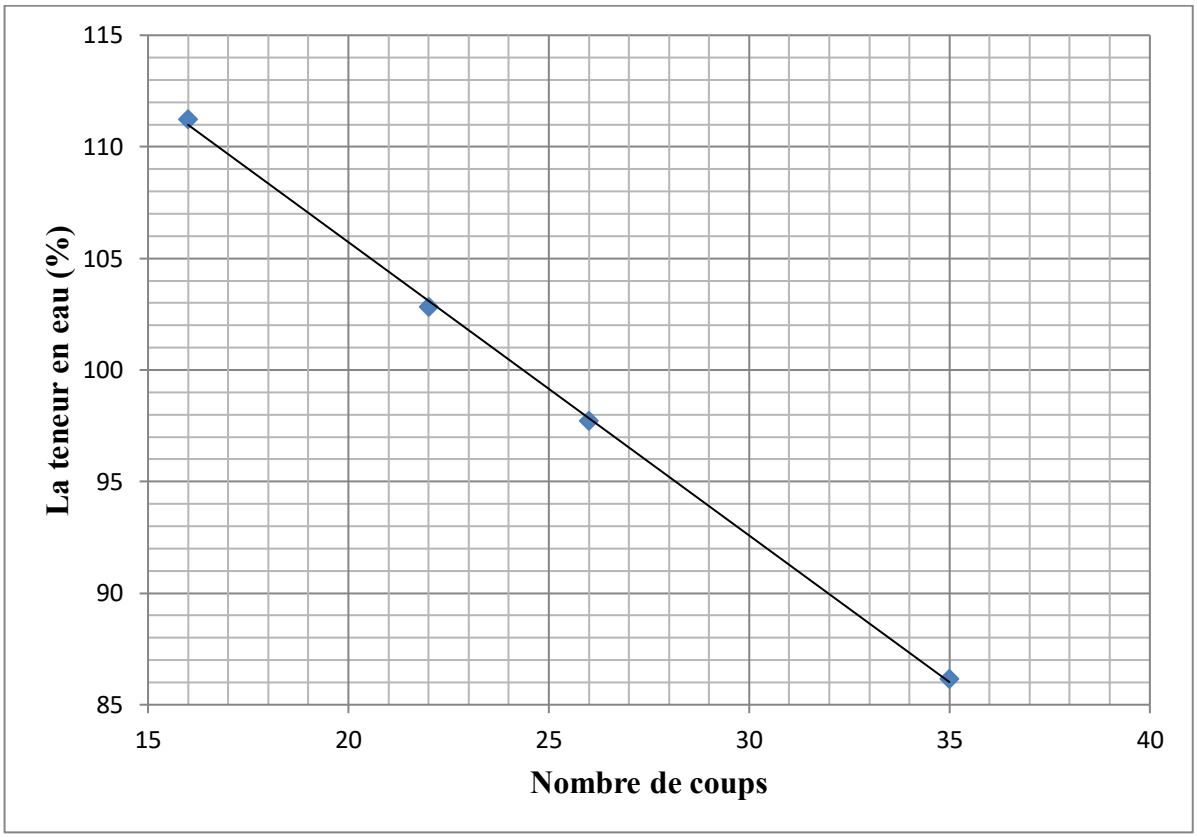



**Figure A.4**- L'effet de la salinité sur la limite de liquidité (15%).

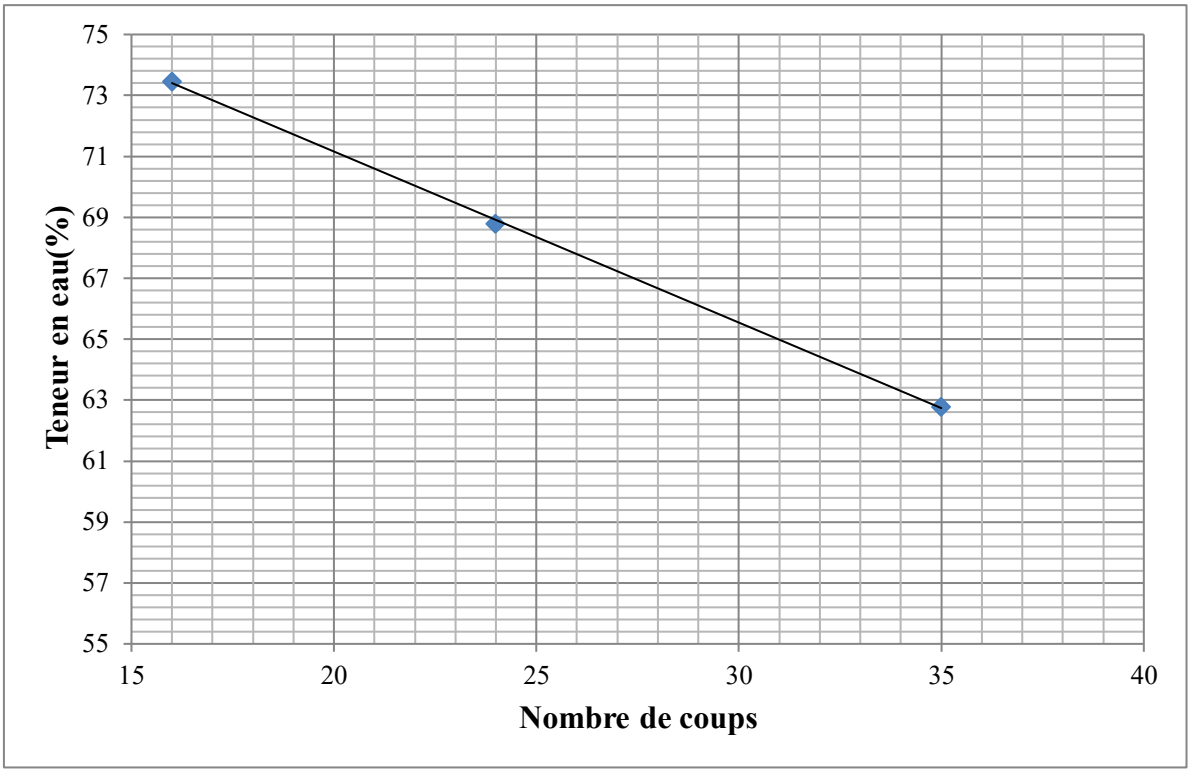



**Figure A.5**- L'effet de la salinité sur la limite de liquidité (20%).

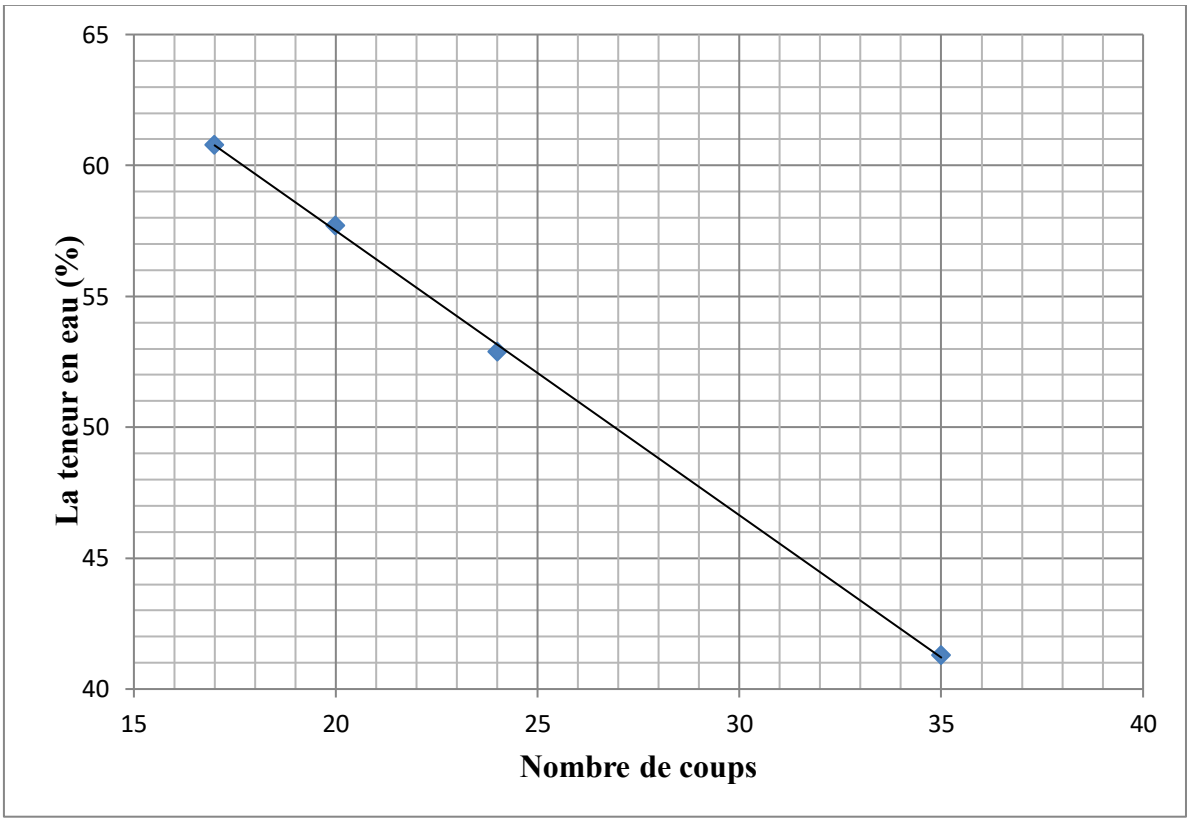



**Figure A.6**- L'effet de la salinité sur la limite de liquidité (25%).