

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Mohamed Boudiaf - M'sila**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Civil**



## **MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de :**

**MASTER**

**Filière : GENIE CIVIL**

**Option : Géotechnique**

## **THEME**

**Caractérisation et traitement à la chaux  
des sols du Chott El Hodna  
(wilaya de M'sila)**

**Proposé et dirigé par :**

**Dr : KHEMISSA Mohamed, Professeur, Encadreur**

**Dr : MAHAMEDI Abdelkrim, M.C.A, Co-Encadreur**

**Présenté par :**

**MAHAMEDI Abdelhalim**

**MAKRI Abdelkadir**

**Promotion : 2020**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université Mohamed Boudiaf - M'sila**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Civil**



**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de :**

**MASTER**

**Filière : GENIE CIVIL**

**Option : Géotechnique**

**THEME**

**Caractérisation et traitement à la chaux  
des sols du Chott El Hodna  
(wilaya de M'sila)**

**Promotion : 2020**

## **Remerciements**

Toute notre gratitude et remerciements vont au bon Dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour effectuer ce travail.

Il ne nous aurait été possible, à nous seul, d'achever le présent travail sans l'assistance, l'appui et le suivi minutieux de nos enseignants et encadreurs, Docteur KHEMISSA Mohamed Professeur et Docteur MAHAMEDI Abdelkrim Maître de conférences "A", à tous les deux on exprime notre profond respect.

Nos sincères remerciements vont au président et aux membres du jury de soutenance qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail.

On tient également à remercier Monsieur SALAMANI Ibrahim, responsable des moyens généraux de la faculté de technologie, pour sa disponibilité dès le début de nos essais, ainsi que l'ensemble du personnel du département de génie civil de l'université Mohamed Boudiaf de M'sila.

On ne saurait oublier d'exprimer nos remerciements à tous les enseignants du département de Génie Civil qui ont contribué à notre formation, ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont permis, de près ou de loin, de mener à bien ce travail, trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

A. MAHAMEDI

A. MAKRI

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma très chère mère*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurais point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

*A mon très cher père*

*Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.*

*Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

*A mes très chères sœurs : Soundous, Imane et Yamna.*

*Puisse Dieu vous donner santé, bonheur, courage et surtout réussite.*

*A la mémoire de ma grande mère.*

*A mes très chers grands parents.*

*A mon enseignant et encadreur le Professeur KHEMISSE Mohamed.*

*A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin.*

*A tous mes amis et surtout mes camarades de la promotion 2020.*

*A tous ceux qui me sont très chers.*

*A. MAHAMED*

# Dédicaces

Je dédie ce travail :

- ✓ A la mémoire de mon père. Que Dieu ait son âme.

Tu resteras toujours dans mon cœur.

- ✓ A ma chère famille.
- ✓ A mes enseignants et encadreurs Messieurs KHEMISSA Mohamed et MAHAMEDI Abdelkrim.
- ✓ A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin.
- ✓ A tous mes amis et à ceux que j'aime.

A. MAKRI

# Sommaire

**Résumé**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale** ..... 1

## *Première partie*

### **Synthèse bibliographique**

**Chapitre1. Caractérisation des sols salés** ..... 4

1.1 Généralités sur les sols salés ..... 4

1.2 Les sols salés en Algérie et dans le monde ..... 5

1.3 Caractéristiques des sols salés ..... 7

1.3.1 Caractéristiques chimiques ..... 8

1.3.2 Caractéristiques physiques ..... 9

1.4 Classification des sols salés ..... 9

1.5 Effet de la salinité et la sodicité sur le sol ..... 11

1.5.1 Effet sur les propriétés physiques du sol ..... 12

1.5.2 Effet sur les propriétés chimiques ..... 12

1.6 Méthodes expérimentales d'identification et de caractérisation des sols salés ..... 12

1.6.1 Analyse granulométrique ..... 13

1.6.2 Teneur en eau ..... 14

1.6.3 Limites d'Atterberg ..... 16

1.6.4 Compactage ..... 17

1.6.5 Compressibilité ..... 18

1.7 Conclusion ..... 20

**Chapitre2. Traitement des sols** ..... 22

2.1 Objectifs du traitement ..... 22

2.2 Techniques de traitement possibles ..... 23

2.3 Traitement chimique ..... 23

2.4 Traitement chimique par ajout de chaux ..... 26

2.5 Techniques et réalisation des travaux de traitement ..... 26

2.6 La chaux .....	28
2.6.1 Définition .....	28
2.6.2 Historique .....	28
2.6.3 La fabrication des chaux naturelles .....	28
2.6.4 Différents types de chaux .....	29
2.6.4.1 Chaux vive .....	30
2.6.4.2 Chaux éteinte .....	30
2.6.5 Caractéristiques chimiques et physiques .....	30
2.6.5.1 Caractéristiques chimiques .....	30
2.6.5.2 Caractéristiques physiques .....	31

## Deuxième partie

### **Etude expérimentale**

<b>Chapitre 3. Description de site étudié .....</b>	<b>32</b>
3.1 Contexte l'étude .....	32
3.2 Présentation du Chott d'El Hodna .....	34
3.2.1 Topographie .....	36
3.2.2 Prélèvement d'échantillons .....	36
<b>Chapitre 4. Programme expérimental et procédures d'essais .....</b>	<b>37</b>
4.1 Protocole expérimental .....	37
4.2 Propriétés du liant hydraulique utilisé .....	37
4.3 Liste des essais .....	38
4.3.1 Sol non traité .....	39
4.3.1.1 Essais d'identification .....	39
4.3.1.2 Essais de caractérisation .....	39
4.3.2 Sol traité .....	39
4.3.2.1 Essais d'identification .....	39
4.3.2.2 Essais de caractérisation .....	39
4.4 Description des essais .....	40
4.4.1 Essais d'identification .....	40
4.4.2 Essais de caractérisation .....	44
<b>Chapitre 5. Présentation et analyse des résultats d'essais .....</b>	<b>47</b>
5.1 Essais d'identification .....	47

5.1.1 Paramètre d'états .....	47
5.1.2 Analyse granulométrique par tamisage .....	48
5.1.3 Limites d'Atterberg .....	50
5.1.4 Essai au bleu de méthylène .....	53
5.2 Interprétation des résultats des essais d'identification .....	55
5.3 Essai mécanique .....	56
5.3.1 Essais Proctor normal .....	56
5.4 Interprétation des résultats de compactage .....	58
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>59</b>

**Références bibliographiques.**

**Annexe.**

## ملخص

تقدم و تحلل هذه المذكرة نتائج دراسة تجريبية أنجزت على غضار طبيع ي تم جلبه من موقع شط الحضنة (السبخة) بالقرب من بلدية عين الخضراء بولاية المسيلة، بهدف استعماله في إنجاز الطرقات. تم إجراء تجميع بيليوغرافي من مراجع وطنية عديدة (عن تربة جزائرية مالحة) و الدولية (عن التربة المالحة القادمة من مناطق جغرافية مختلفة حول العالم) مما سمح ببعض التأكيدات القاطعة فيما يتعلق باستخدامها. تهدف الدراسة التي أجريت إلى إيجاد الخصائص الفيزيو-كيميائية والميكانيكية لتمييز سلوك هذا الغضار الطبيعي. أتاحت النتائج التي تم الحصول عليها التعرف على التربة المختبرة كغضار غير بلاستيكي و متنسق للغاية. أتاحت لنا تجربة الرص بروكتور العادي تحديد محتوى الماء الأمثل الذي قيمته 15.53% و و الكثافة الجافة بقيمة 1.67.

**كلمات مفاتيح:** تربة مالحة، تجارب التشخيص، الرص.

## Résumé

Ce mémoire présente et analyse les résultats d'une étude expérimentale effectuée sur une argile naturelle prélevée sur le site de Chott El Hodna (Sebkha) près de la commune de Ain Khadra (wilaya de M'sila) en vue de son utilisation en construction routière. Une synthèse bibliographique a été effectuée à partir de nombreuses références nationales (sur des sols salés algériens) et internationales (sur des sols salés provenant de diverses zones géographiques à travers le monde) a permis de souligner quelques affirmations concluantes quant à leur utilisation. L'étude expérimentale effectuée avait pour finalité de vérifier les aspects physico-chimiques et mécaniques et de caractériser le comportement de cette argile naturelle. Les résultats obtenus ont permis d'identifier le sol testé comme une argile peu plastique, très consistante. L'essai de compactage Proctor normal nous a permis de déterminer la teneur en eau optimale qui est de 15,53% et la densité maximale qui est de 1,67.

**Mots-clés :** sol salé, essais d'identification, compactage.

## Abstract

This study presents and analyzes the results of an experimental study carried out on a natural clay taken from the site of Chott El Hodna (Sebkha) near the town of Ain Khadra (wilaya of M'sila) to use it in road construction. A bibliographic synthesis was carried out from many national references (on Algerian salty soils) and international (on salty soils from various geographical areas around the world) allowed to underline some conclusive statements as to their use. The purpose of the experimental study was to verify the physico-chemical and mechanical aspects and to characterize the behavior of this natural clay. The obtained results allowed to identify the tested soil as clay with low plasticity, very consistent. The normal Proctor compaction test allowed us to determine the optimum water content which is 15.53% and the maximum density which is 1.67.

**Keywords:** salty soil, identification tests, compaction.

## Liste des figures

- Figure 1.1 :** Distribution des sols salés en Afrique (Madanni, 2008).
- Figure 1.2 :** Situation géographique des Chotts et Sebkhas en Algérie (Demnati, 2013).
- Figure 1.3 :** Analyse granulométrique du sol de Sebkha (Al-Amoudi et al., 1992).
- Figure 1.4 :** Analyse granulométrique (Mansour et al., 2008).
- Figure 1.5 :** Limite de liquidité (Mansour et al., 2008).
- Figure 1.6 :** Courbes de compactage (Mansour et al., 2008).
- Figure 1.7 :** Courbes de compressibilité (Al-Amoudi et al., 1992).
- Figure 1.8 :** Courbes de compressibilité des échantillons naturel et lavé (Kim et al., 2008).
- Figure 2.1 :** Critères d'utilisation du traitement chimique (Dept. Of the Army, 1983).
- Figure 2.2 :** Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol de classe A<sub>2</sub> traité à 2% de chaux vive (LCPC-SETRA, 2000).
- Figure 2.3 :** Schéma du principe de la fabrication de la chaux.
- Figure 3.1 :** Relevé mensuel de température dans la wilaya de M'sila pour la période (1980 – 2016).
- Figure 3.2 :** Relevé pluviométrique mensuel dans la wilaya de M'sila pour la période (1980 – 2016).
- Figure 3.3 :** Situation géographique du Chott d'El Hodna.
- Figure 3.4 :** Chott El Hodna en période hivernale.
- Figure 3.5 :** Chott El Hodna en période estivale.
- Figure 3.6 :** Localisation du site de prélèvement (Chott El Hodna).
- Figure 5.1 :** Fuseau granulométrique de l'argile du Chott El Hodna.
- Figure 5.2 :** Classification de l'argile de Chott El Hodna.
- Figure 5.3 :** Courbe moyenne de compactage des trois essais de Proctor normal.

## Liste des tableaux

- Tableau 1.1** : Distribution des sols salés dans le monde (Szabolcs, 1989).
- Tableau 1.2** : Risques d'alcalisation du milieu d'après le paramètre SAR.
- Tableau 1.3** : Classes des sols affectés par les sels (USSL, 1954).
- Tableau 1.4** : Les références des sols salés (AFES, 2008).
- Tableau 2.1** : Synthèse sur les dosages en stabilisants pratiqués pour le traitement des sols selon les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004).
- Tableau 4.1** : Propriétés physico-chimiques de la chaux éteinte de Saïda.
- Tableau 5.1** : Détermination de la teneur en eau et les masses volumiques humide et sèche.
- Tableau 5.2** : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai n° 01.
- Tableau 5.3** : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai n° 02.
- Tableau 5.4** : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai n° 03.
- Tableau 5.5** : Analyse granulométrique par tamisage des trois essais.
- Tableau 5.6** : Détermination de la limite de l'essai n° 01.
- Tableau 5.7** : Détermination de la limite de l'essai n° 02.
- Tableau 5.8** : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n° 03.
- Tableau 5.9** : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n° 01.
- Tableau 5.10** : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n° 01.
- Tableau 5.11** : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n° 01.
- Tableau 5.12** : Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg
- Tableau 5.13** : Résultats des essais au bleu de méthylène.
- Tableau 5.14** : Paramètres d'identification du sol de Chott El Hodna (wilaya de M'sila).
- Tableau 5.15** : Résultats de l'essai Proctor normal n° 01.
- Tableau 5.16** : Résultats de l'essai Proctor normal n° 02.
- Tableau 5.17** : Résultats de l'essai Proctor normal n° 03.
- Tableau 5.18** : Résumé des résultats des essais Proctor normal.

---

# **INTRODUCTION**

---

## **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. A l'état sec, les sols salés sont très difficiles à compacter puisque leur consistance varie de dure à très à dure. A l'état humide, ils deviennent très collants, donc non compactables. Cependant, leur emploi peut être décidé sur la base d'un traitement spécifique à la chaux et/ou aux liants hydrauliques qui leur confèrera des propriétés nouvelles répondant aux qualités requises. Le traitement à la chaux aérienne principalement calcique (chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux) est l'une des technique de traitement les plus ancienne et les plus utilisés en construction routière. Ce procédé est principalement utilisé pour rendre compactable les sols mous en réduisant leur plasticité et, par conséquent, en améliorer la portance.

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 Sebkhass en sont un exemple. Ces derniers sont connues comme des sols salés vu leur teneur 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.

Le monde en général et l'Algérie en particulier sont très animés par la construction de grands projets, qui en partie sont implantés sur des sols de faibles qualités notamment les sols des Sebkhass. Les sols des Sebkhass sont des sédiments salins récents, largement distribués dans les régions continentales d'Asie, d'Amérique du Sud, d'Australie, aux Etats-Unis et en Afrique du Nord. L'Algérie regroupe un nombre important de Sebkhass qui s'étalent du sud tunisien jusqu'au mont de l'Atlas au nord algérien.

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.

Le tissu urbain de la wilaya de M'sila connaît de nos jours un essor économique et social considérable qui se traduit par une extension sans cesse croissante de son réseau routier parallèlement au développement de son tissu urbain, d'où son extension vers des terrains vierges souvent moins favorables que ceux déjà urbanisés. Cette wilaya est située dans une zone classée comme semi-aride, caractérisée par de faibles précipitations et des écarts de température importants entre l'hiver et l'été. La wilaya de M'sila abrite une superficie importante de sols salins, celle-ci est considérée comme la capitale du Chott El Hodna (Sabkha).

L'objectif de la présente étude consiste, d'une part, de caractériser les propriétés de résistance d'un sol prélevé sur un site rural du Chott El Hodna situé près de la commune de Ain Khadra dans la wilaya de M'sila, d'autre part, de déterminer les paramètres physiques et mécaniques de ce sol compacté aux conditions de l'optimum Proctor avant et après son traitement à la chaux.

Ce mémoire se compose de cinq chapitres répartis en deux parties :

- La première partie présente une synthèse bibliographique qui traite les sols salés ainsi que le traitement de ces sols. Elle se compose de deux chapitres :
  - Le premier chapitre présente un aperçu sur les sols salés dans le monde et particulièrement en Algérie et définit ensuite la structure des sols salés suivi d'une description des phénomènes de salinisation. Il se termine ensuite par l'énumération des méthodes expérimentales d'identification et de caractérisation des sols salés.

- Le deuxième chapitre traite l'essentiel du traitement des sols (techniques de traitement possible, techniques de réalisation des travaux de traitement, traitement chimique notamment à la chaux).
- La deuxième partie présente l'étude expérimentale effectuée, elle est composée de trois chapitres :
  - Le troisième chapitre présente le contexte de l'étude avec la description du site de prélèvement : site de Chott El Hodna près de la commune de Ain Khadra wilaya de M'sila.
  - Le quatrième chapitre regroupe l'ensemble des essais expérimentaux ainsi que les procédures suivis.
  - Le cinquième chapitre présente et analyse les résultats des essais effectués sur le sol avant traitement à la chaux à différentes teneurs.
  - Le mémoire se termine par une conclusion générale et une liste de références bibliographiques.

---

**Première partie**  
**SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

---

## Chapitre 1

### Caractérisation des sols salés

*Les sols salés sont parmi les sols problématiques qui provoquent des désordres importants dans les infrastructures routières et dans d'autres constructions civiles et industrielles de faible hauteur. L'identification et la caractérisation de ce type de sols est plus que souhaitable afin de préserver le bâti existant ou à projeter de tout sinistre réel ou supposé permettant de ce fait d'éviter des pertes matérielles, donc financières et éventuellement humaines. Avant définition de la structure des sols salés et description des phénomènes de salinisation, ce chapitre présente un aperçu sur les sols salés dans le monde et particulièrement en Algérie. Il se termine ensuite par l'énumération des méthodes expérimentales d'identification et de caractérisation des sols salés.*

#### 1.1 Généralités sur les sols salés

On parle en général de sol salé lorsque la concentration en sels des solutions dépasse 0.5 g/l. Les sols sodiques aussi appelés sols salés ou sols halomorphes sont caractérisés par leur teneur élevée en sels solubles - plus solubles que le gypse - dans l'ensemble ou dans une partie du profil ou par la dégradation de la structure de l'un de leurs horizons - ou de tout leur ensemble - sous l'influence de l'un des ions provenant de ces sels, en particulier du sodium.

La présence de ces sels dans la solution du sol et l'apparition d'une structure dégradée, diffuse, et d'une compacité excessive, le plus souvent même à l'état sec, mais au moins à l'état humide, ont une influence sur la végétation, qui généralement se spécialise et dont la croissance diminue, irrégulièrement, dans le temps et dans l'espace; elle peut même disparaître, laissant place à un sol nu ou parfois recouvert d'un simple voile organique. Ce sol nu présente souvent en saison sèche en surface des lamelles peu épaisses, plus ou moins durcies, recouvrant un horizon poudreux de pseudo-sable, toujours mêlé de cristaux de sels, ou ce pseudo-sable lui-même. Ailleurs il peut être recouvert d'efflorescences cristallines

blanches ou grises ou d'une croûte saline, ou de produits noirs, humiques mêlés de cristaux de carbonate de soude. Ailleurs encore il peut rester toujours humide, même en saison sèche, par suite de sa richesse en sels hygroscopiques.

Ces sols ont une grande extension dans les trois pays du Maghreb. Elle est due aux conditions arides ou semi-arides d'une grande partie de cette région où les possibilités d'évaporation sont considérables et les précipitations pluviales limitées; à la présence fréquente de dépôts géologiques salifères et de nappes phréatiques ou artésiennes salées ; à la succession des évènements, variations climatiques et phénomènes de sédimentation, au cours des Temps quaternaires. Les sols sodiques ne sont pas toujours utilisables; ils ne peuvent l'être que moyennant diverses précautions.

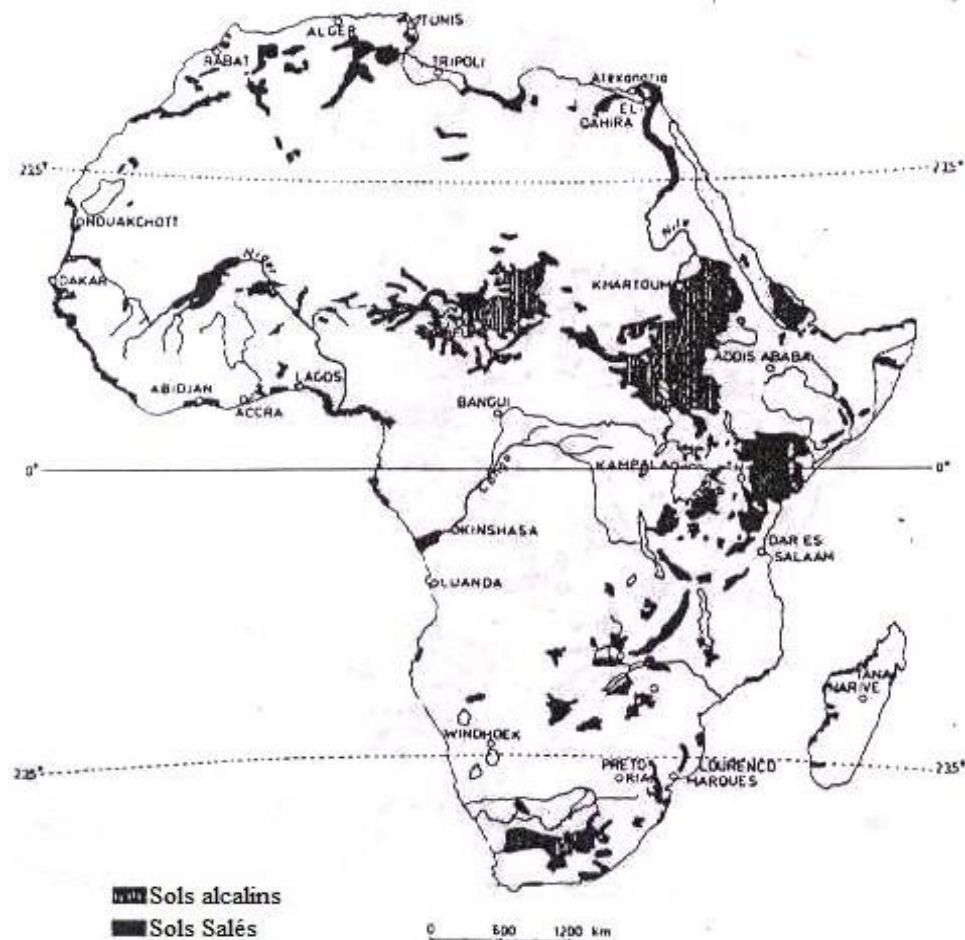
## 1.2 Les sols salés en Algérie et dans le monde

La salinisation des sols est considérée comme étant un problème majeur à l'échelle du globe. La surface des sols salés dans le monde est estimée à 932.2 million d'hectares environ et se répartie comme suit (Szabolcs, 1989) (tableau 1.1) :

**Tableau 1.1** : Distribution des sols salés dans le monde (Szabolcs, 1989).

<b>Sols des différents continents affectés par les sels (million d'hectares)</b>	
Amérique du Nord	15.80
Mexique et Amérique centrale	02,00
Amérique du sud	129,00
Afrique	80,50
Asie du sud	85,10
Asie du Nord et du centre	211,70
Asie du Sud Est	20,00
Australie	357,40
Europe	30,70
Total	932.20

L'Afrique présente de vaste surface de sols salés (figure 1.1).

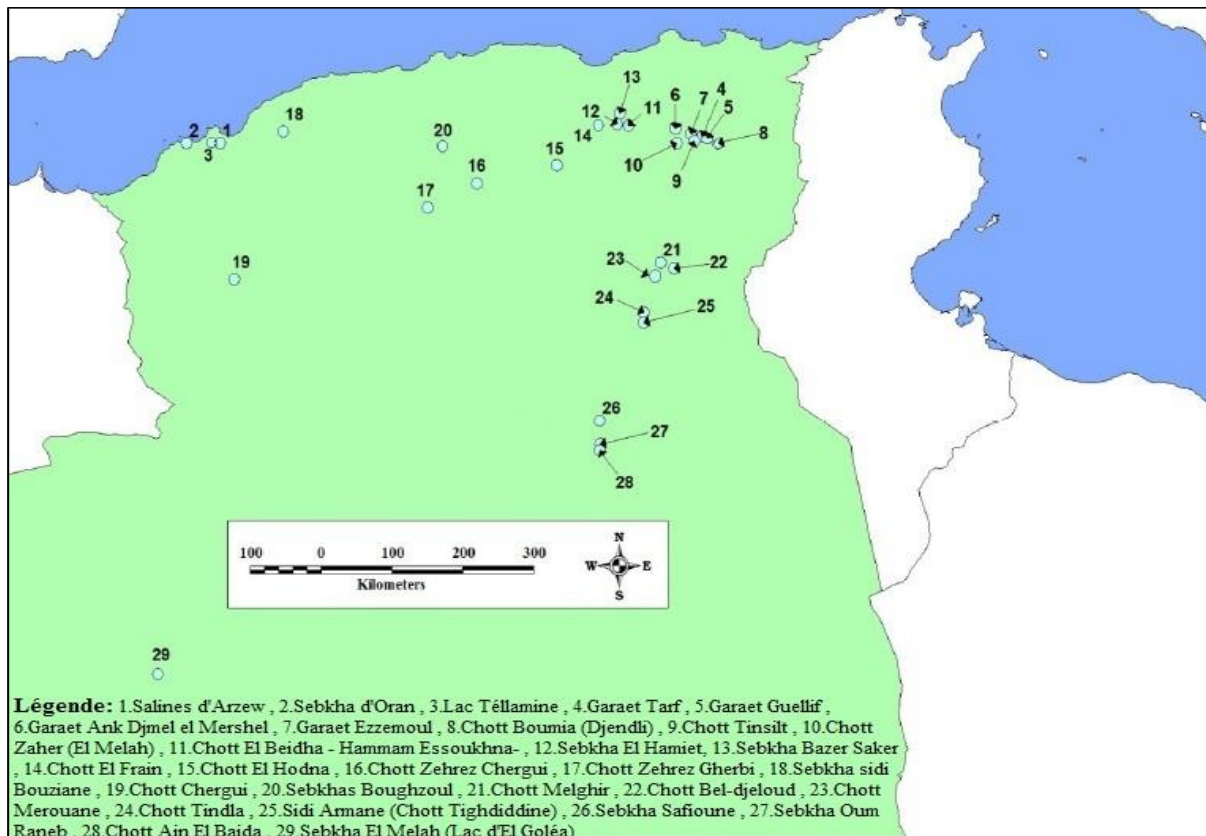


**Figure 1.1 :** Distribution des sols salés en Afrique (Madanni, 2008).

D'après Szabolcs (1989), 3,2 millions d'hectares de la surface globale de l'Algérie subissent à des degrés de sévérité variable le phénomène de salinisation dont une bonne partie se trouve localisée dans les régions steppiques où le processus de salinisation est plus marqué du fait des températures élevées durant presque toute l'année, du manque d'exutoire et de l'absence de drainage efficient.

L'Algérie regroupe un nombre important de Chotts qui s'étalent du sud tunisien jusqu'au mont de l'Atlas au nord algérien situées dans la zone du Grand Erg Occidental (Demnati, 2013). Leur répartition géographique est très étendue (Figure 1.2). Mis à part le chott du Hodna on peut citer les Chotts qui constituent le complexe de Oum El Bouaghi dans l'est des hauts plateaux, le Zahres Chergui et Gherbi au centre et chott Chergui, sebkha de Naâma à l'ouest, la sebkha d'Oran et les salines d'Arzew dans les plaines littorales. Au Sahara septentrional, on compte également un nombre important de Chotts, incluant le Grand

Erg Oriental, au nord-est du Sahara le chott Melghir et le chott Merouane. Vers le sud, dans la région d'Ouargla, sont les chotts d'Ain Beida, Oum Raneb, Sidi Amrane et Safioune. D'autres sont situées dans la zone du Grand Erg Occidental, comme la sebkha El Melah dans la région de Ghardaïa.



**Figure 1.2 :** Situation géographique des Chotts et Sebkhahs en Algérie (Demnati, 2013).

La taille et la profondeur des Chotts algériens sont très variables. Leurs superficies peuvent atteindre plusieurs milliers d'hectare. Ils ont une profondeur d'eau variable, la plus petite est d'environ 20 cm comme la plus grande peut dépasser 4 m (Demnati, 2013).

### 1.3 Caractéristiques des sols salés :

Tout sol qui renferme des sels solubles en quantités anormalement élevée est qualifié de salé. La mesure effectuée est celle de la salinité, ainsi que tout sol qui renferme du sodium échangeable en quantité anormalement élevée est qualifié de sodique. La mesure effectuée est celle de la sodicité. Ces déterminations font appel à des méthodes spécifiques (Servant M, 1975).

### 1.3.1 Caractéristiques chimiques

#### a) La conductivité électrique CE

La conductivité électrique d'une solution est la conductance de cette solution mesurée entre des électrodes de 1 cm<sup>2</sup> de surface. Elle permet de déterminer la salinité globale de l'extrait de la pâte saturée. (BAISE D., 1988).

De plus la connaissance de la conductivité est nécessaire pour l'étude de complexe absorbant des sols salés (AUBERT, 1960).

#### b) La réaction du sol, pH

Le pH se mesure sur une suspension de terre fine (AUBERT, 1960). Le pH des sols salés dont la salinité est du type neutre c'est-à-dire quand elle est due a des sels de bases et d'acides forts (sulfates, chlorures, de calcium, de sodium, de magnésium), reste inférieur a 8,5 et le sol est basique. Si la salinité est en revanche due a des sels de bases fortes et d'acides faibles, le pH est au-dessus de 8,5 et peut atteindre 10, et le sol est alcalin. Le pH peut dépasser 10 après une précipitation du carbonate de calcium, les ségrégations salines sont fortement sodique et renferment des sol alcalins (SERVANT, 1975).

Un pH compris entre 8 et 9 est retenu, généralement, comme limite de dégradation de la structure (AUBERT, 1983).

#### c) La composition ionique de la solution du sol

Afin de connaître la concentration en anions solubles (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et en cations solubles (Na<sup>+</sup>, CA<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>), une analyse chimique est effectuée sur un extrait de pâte saturée ou un extrait aqueux dilué. Elle sert a définir le type de salinisation. Elle sert aussi à calculer le SAR (Sodium Absorption Ration) qui définit la sodisation de la solution du sol.

#### d) Le taux de sodium échangeable (ESP)

Il exprime le taux de saturation complexe absorbant en sodium échangeable par rapport a tous autres cations échangeable.

#### e) Le SAR « Sodium Absorption Ration »

L'utilisation du paramètre SAR (Sodium Absorption Ration) est faite dans le cadre de l'étude de mécanisme de sodisation, ce dernier permet de définir la composition des solutions du sol ou de nappes salées (Mathieu, Pieltain, & F, 2003). Le SAR est calculé selon l'expression suivante :

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

Le SAR fournit des indications sur le risque d'alcalisation du milieu. Les risques sont récapitulés dans le tableau ci-dessous (tableau 1.2) :

**Tableau 1.2 :** Risques d'alcalisation du milieu d'après le paramètre SAR

Valeur du SAR	Risque d'alcalisation du milieu
SAR < 10	Faible
10 ≤ SAR ≤ 18	Moyen
SAR > 18	Élevé
SAR > 26	Très élevé

### 1.3.2 Caractéristiques physiques

#### a) Capacité de rétention en eau

Les sols salés peuvent rester humides même en saison sèche grâce à leur richesse en éléments minéraux hygroscopique cette richesse hydrique n'est pas toujours disponible à cause des dépressions osmotiques élevés de la solution du sol, la capacité de rétention en eau diminue en fonction de la nature de cation dans l'ordre suivant :  $Na^+ > Mg^{++} > Ca^{++} > K^+$  (Halitim, 1973)

#### b) Structure et perméabilité

La stabilité structurale d'un sol diminue dès que le taux de sodium échangeable atteint 12 à 15% (Duthil, 1973).

Le gonflement et la dispersion dépendent tous deux de la minéralogie des argiles et des unités totales de  $Na^+$  absorbée sur les sites d'échange (Aldermoch, 1976).

Les sols qui ont un taux élevé de sodium échangeable ont une structure dense, compacte et sont difficiles à manier quand ils sont secs, et ont une faible perméabilité pour l'eau quand ils sont mouillés (Boulane J, Hydro, 1971).

### 1.4 Classification des sols salés

La salinité du sol est décrite et caractérisée en termes de concentration et de type de sels solubles. Elle est reliée à la conductivité électrique du sol mesurée en déci siemens par mètre (dS.m-1). Selon USSL (1954), les sols affectés par les sels sont classés en fonction de la

conductivité électrique de leur extrait de pâte saturée (CE dS.m-1), du pourcentage de sodium échangeable (ESP en %) et de leur pH (tableau 1.3).

**Tableau 1.3** : Classes des sols affectés par les sels (USSS, 1954).

Classe	Conductivité électrique (dS.m <sup>-1</sup> )	ESP (%)	pH
Non salin	< 4	< 15	< 8,5
Salin	> 4	< 15	< 8,5
Sodique	< 4	> 15	> 8,5
Salin-sodique	> 4	> 15	> 8,5

La classification française paraît la plus appropriée dans les zones arides et en particulier pour les sols salés, puisque selon Halitim (1988), les sols salés sont disposés dans la classe des sols salsodiques, elle-même subdivisée en deux sous classes :

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

**1. Sols salins à complexe calcique (solontchaks)** : très fréquents en Algérie (FAO, 2005), caractérisés par un ESP <15% et un profil peu différencié (Servant, 1975 ; Duchauffour, 1977). Ils se rencontrent dans les zones steppiques ou désertiques dans lesquelles des nappes salées contiennent à l'instar des sels solubles, une quantité importante de calcium qui alimente le profil (Halitim, 1973).

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

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

1. **Sols alcalins non lessives (solontchaks solonetz) :** leur profil est de type A, C ou A, B, C. Ils sont fréquents en Algérie (Durand, 1983).
2. **Sols alcalins lessives :** L'horizon de surface A, pauvre en argile (migration par l'effet de lessivage) (Duchauffour, 1983). Ces sols existent en Algérie, mais sont très localisés dans les zones humides (Durand, 1983).
3. **Sols alcalins dégradés (Solonetz) :** ils présentent une structure complètement dégradée en surface avec un pH de 4 à 5 et en profondeur un pH élevé de 9 à 10.

Selon Loyer (1995), on distingue selon le référentiel pédologique Français (Baize et Girard, 1995), sept références : sodisalisols (1 référence), salisodisols (1 référence), Salisols (2 références), sodisols (3 références) (tableau 1.4).

**Tableau 1.4 :** Les références des sols salés (AFES, 2008).

Type de sol	Nombre de références	Observations
Sodisalisols	1	- Sodisalisols
Salisodisols	1	- Salisodisols
Salisols	2	- Salisols chloruro-sulfatés - Salisols carbonatés
Sodisols	3	- Sodisols indifférenciés - Sodisols solonetziques - Sodisols solodisés

### 1.5 Effet de la salinité et la sodicité sur le sol

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

L'excès de sel dans un sol modifie les paramètres physiques et chimiques de ce dernier :

### 1.5.1 Effet sur les propriétés physiques du sol

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

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

### 1.5.2 Effet sur les propriétés chimiques du sol

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

- **Le pH** : La réaction du sol est influencée par la nature des sels. Alors que certains sels sont acidifiants ( $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{MgSO}_4$ ), d'autres sont alcalinisant ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{NaCO}_3$ ).
- **Le ESP** : Le taux de sodium échangeable a une grande importance dans les sols alcalins, vu que ces derniers retiennent de faible concentration en sels solubles et la grande quantité de sodium se trouve sous forme échangeable. Tandis que dans le cas des sols salés, la grande partie du sodium se trouve dans la solution du sol.

## 1.6 Méthodes expérimentales d'identification et de caractérisation des sols salés

Durant les dernières décennies, plusieurs pays à travers le monde ont connus des progrès urbains et industriels considérables en réalisant de grands projets d'infrastructures. Ces projets sont en partie implantés sur des sols de Sebkhass.

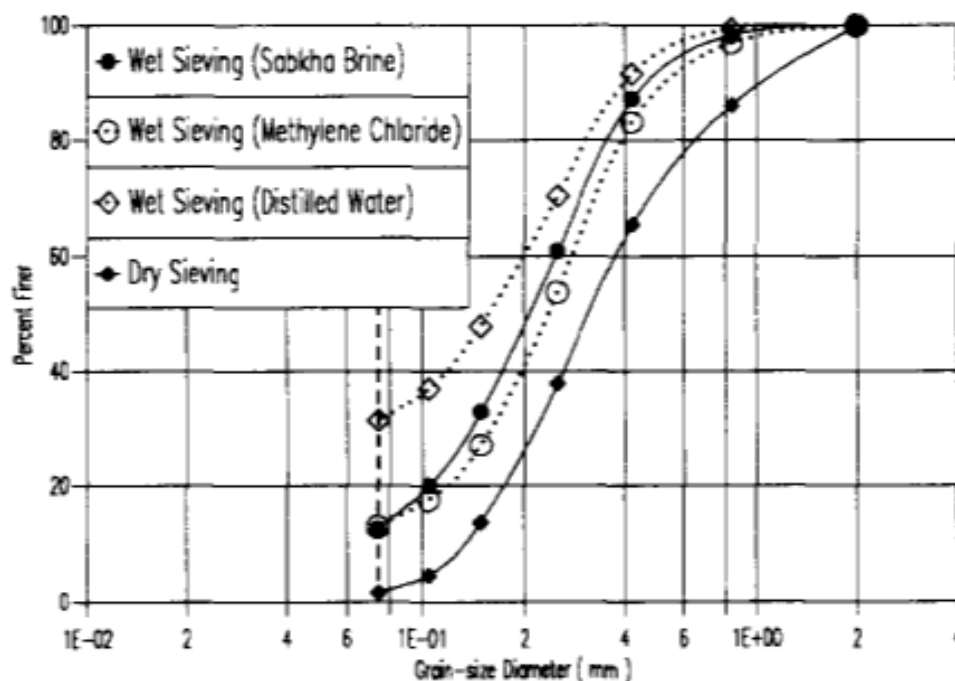
Les sols des Sebkhass sont considérés comme des sols difficiles qui posent des problèmes particuliers pendant la conception et la réalisation des ouvrages. Les principaux problèmes potentiels liés aux ces sols peuvent être résumés dans ce qui suit (Amin, 2004) :

- Diminution rapide de la portance du sol après inondations.
- Hétérogénéité du sol de Sebkhass qui peut conduire à des tassements différentiels.
- Les eaux souterraines riches en sels migrent vers la surface par remontée capillaire.
- Les concentrations élevées de sulfate ( $\text{SO}_4$ ) et de chlorure ( $\text{Cl}$ ) ont un effet corrosif à la fois sur le béton et sur l'acier.
- Sous des conditions chaudes et humides, le gypse ( $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) subit une hydratation pour former l'anhydrite ( $\text{Ca SO}_4$ ) et une déshydratation pour former à nouveau le gypse. C'est un processus chimique qui implique des changements de volume très importants.

Malgré que plusieurs chercheurs se soient intéressés à la caractérisation des sols salés, il demeure qu'il reste toujours des zones d'ombre non illustrés. Pour la majorité des études, on remarque une concentration sur la méthodologie de détermination des caractéristiques physiques et mécaniques de ces sols riches en sels. Parmi les études réalisées, nous présenterons ci-dessous uniquement ceux qui ont une relation avec notre étude.

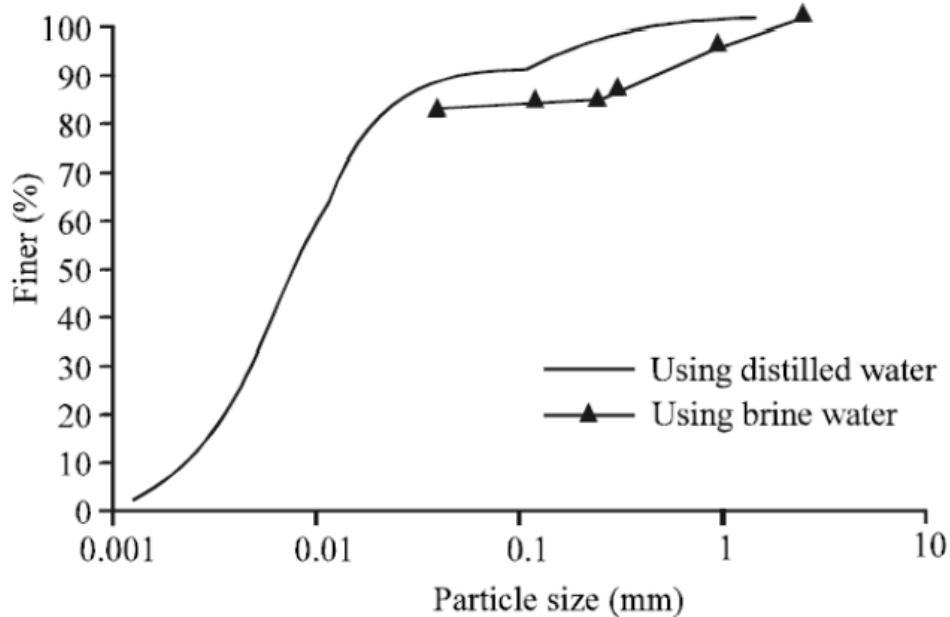
### 1.6.1 Analyse granulométrique

Al-Amoudi et al. 1992, en étudiant les caractéristiques géotechniques d'un sol sableux de Sebkhass en Arabie Saoudite, ont suggérés l'utilisation de la saumure naturelle et le chlorure de méthylène pour la détermination de la granulométrie de ce type de sols. Leurs résultats d'analyses granulométriques sont présentés sur la figure 1.3.



**Figure 1.3 :** Analyse granulométrique du sol de Sebkhass (Al-Amoudi et al., 1992).

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



**Figure 1.4 :** Analyse granulométrique (Mansour et al., 2008).

### 1.6.2 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 peser à nouveau. La teneur en eau est donc le rapport entre la différence entre les deux poids (humide et sec) et du poids sec.

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

Où :

W : Poids du sol humide.

W<sub>d</sub> : Poids du sol après étuvage à 105°C ± 5°C.

La norme française recommande de chauffer les sols sensibles à la chaleur 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:

$$w_f = \frac{W_b}{W_s} = \frac{W - W_d}{W_d - rW} = \frac{W_c}{1 - r - rW_c} \quad (2)$$

$$\text{Avec : } r = \frac{W_{sa}}{W_b} = \textit{salinité}$$

$W_{sa}$  : le poids du 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 intact (pour pouvoir mesurer le poids volumique total).

$$w_f = \frac{W_{sw}}{W_s} = \frac{G_{sw}}{G_s} = \frac{(G_s \cdot \gamma_w - \gamma_t)}{(\gamma_t - G_{sw} \cdot \gamma_w)} \quad (3)$$

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

### 1.6.3 Limites d'Atterberg

D'après Terzaghi (1943), La consistance d'un sol peut être définie comme un état de fermeté et est liée aux forces de cohésion entre les particules et ne concerne donc que les sols cohérents (Benabdallah, 2010). En mécanique des sols, on distingue quatre états de consistance soit l'état solide, l'état semi-solide, l'état plastique et l'état liquide. Les teneurs en eau qui délimitent ces quatre états de consistance sont appelés limites de consistance ou limites d'Atterberg.

- *Limite de plasticité*  $w_P$  : Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre l'état plastique et solide.
- *Limite de liquidité*  $w_L$  : Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre l'état plastique et liquide.
- *Indice de plasticité*  $I_p$  : C'est la différence entre les limites de liquidité et de plasticité.

Mansour et al. (2008) ont étudiés l'effet de l'utilisation de la saumure naturelle de la mer morte sur les limites d'Atterberg sur des échantillons de sol naturel. Les résultats trouvés ont montrés que les limites d'Atterberg diminuent en fonction de la salinité (figure 1.5).

Les mêmes résultats ont été trouvés par Yukselen-Aksoy et al. (2008), Shariatmadari et al. (2011), Ajalloeian et al. (2013) sachant que le calcul des teneurs en eau pour déterminer les limites de consistances est basé sur la méthode classique. Tous ces chercheurs ont liés cette diminution aux réactions chimiques entre le sol et les sels solubles.

Frydman et al. (2008) ont étudié l'effet de l'utilisation de la saumure naturelle sur les limites d'Atterberg de la région de la mère morte. Leurs résultats montrent que la réalisation des essais par l'utilisation de la saumure naturelle conduit à des valeurs des limites d'Atterberg inférieures en comparaison avec les essais réalisés sur des échantillons de sol lavé par l'utilisation de l'eau distillée en attribuant cette différence à la difficulté de séchage des échantillons salés qui durait plus de 8 jours sans avoir atteint un poids sec constant.

La détermination des limites d'Atterberg par l'équation (3) a conduit à une augmentation des valeurs des limites de liquidité et de plasticité en utilisant de la saumure naturelle en comparaison avec les résultats obtenus en utilisant de l'eau distillée.

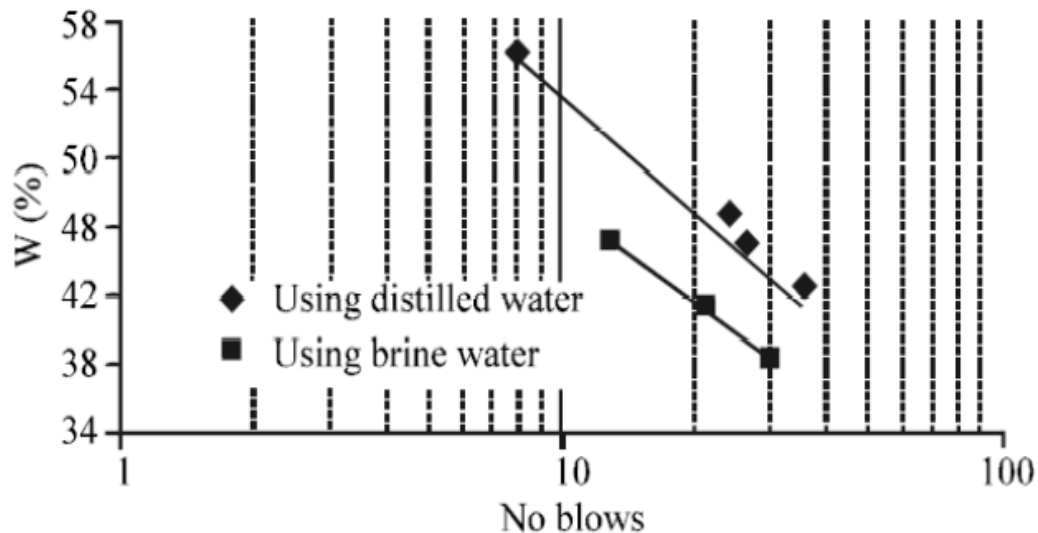


Figure 1.5 : Limite de liquidité (Mansour et al., 2008).

#### 1.6.4 Compactage

Le compactage est la densification des sols par application d'énergie mécanique. Il vise à améliorer les propriétés géotechniques des sols. Il peut en outre (Holtz et Kovacs, 1981):

- Réduire ou éliminer le risque de tassement.
- Augmenter la résistance des sols et la stabilité des talus.
- Améliorer la capacité portante des infrastructures routières.
- Limiter les variations de volume indésirables.

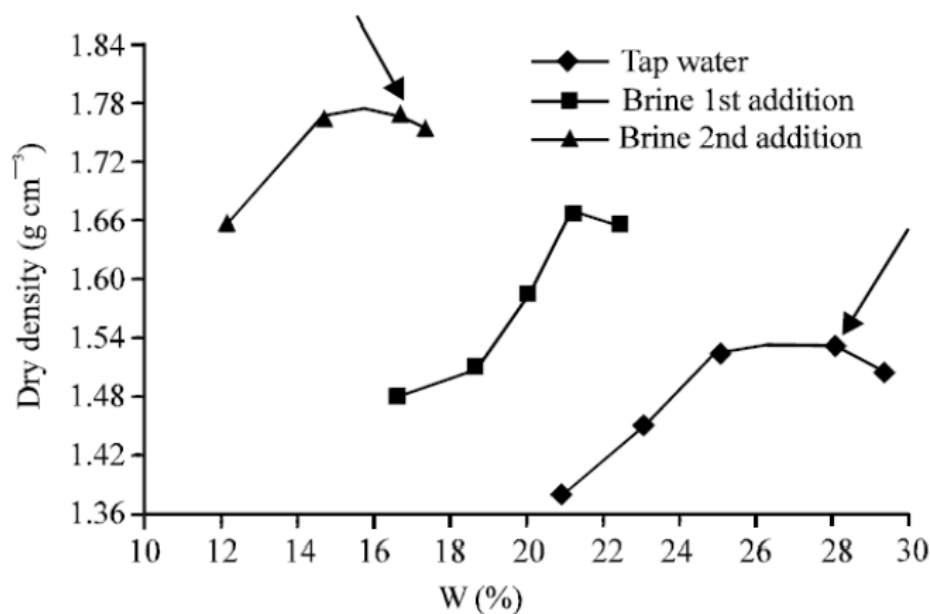
Les essais de compactage effectués en laboratoire permettent de déterminer le poids volumique sec maximal pour une énergie de compactage donnée.

Al-Amoudi et al. (1992), ont réalisé des essais Proctor sur des échantillons d'un sol sableux de la Sebka de Ras Al-Ghar en Arabie Saoudite en utilisant l'eau distillée et la saumure naturelle, dans le but de déterminer l'effet de la salinité sur les caractéristiques de compactage. Les résultats obtenus ont indiqués qu'il n'y a pas de différence nette entre les résultats lors de l'utilisation de l'eau distillée ou de la saumure naturelle.

Des résultats similaires ont été trouvés par Ajalloeian et Mansouri (2013) en utilisant trois types de liquides notamment l'eau distillée, eau naturelle demi-salée et de l'eau naturelle salée.

Mansour et al. (2008), ont réalisés des essais Proctor sur des échantillons de sol de la mer morte en utilisant l'eau distillée et la saumure naturelle de la mer morte (figure 1.6). L'échantillon du sol traité par saumure naturelle est séché à l'air libre puis testé à nouveau par la saumure dans le but d'augmenter la concentration en sel. Les résultats obtenus ont indiqués que la teneur en eau optimale diminue et le poids volumique sec maximal augmente en fonction de la salinité.

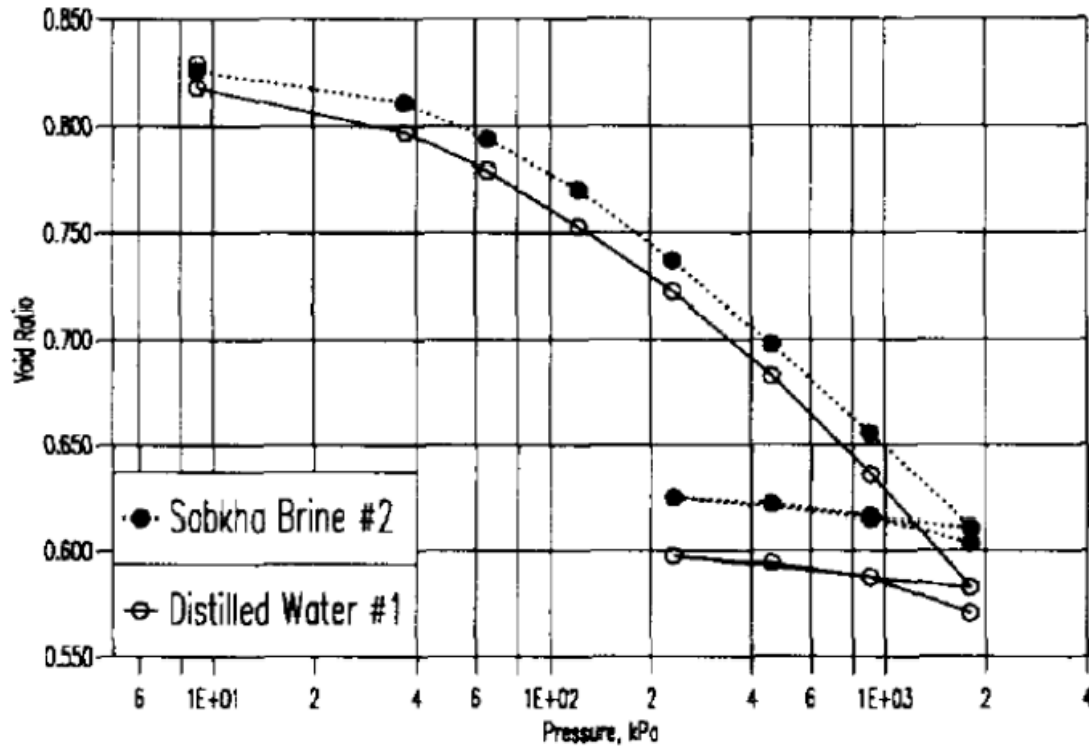
Alainachi et Al Obaidy en 2010, ont trouvés des résultats similaires à ceux de Mansour et al. (2008), en réalisant des essais Proctor sur des échantillons de sol du golfe du Basra par l'utilisation de l'eau distillée et de la saumure naturelle



**Figure 1.6 :** Courbes de compactage (Mansour et al., 2008).

### 1.6.5 Compressibilité

A1-Amoudi et al. (1992) ont réalisés des essais de consolidation sur quatre échantillons intacts de sol de Sabkha. Deux échantillons ont été inondés avec de l'eau distillée et les deux autres avec de la saumure naturelle. Les résultats obtenus indiquaient que les pressions de préconsolidation, les indices de compression et de gonflement semblaient être insensibles au type de fluide utilisé (figure 1.7).

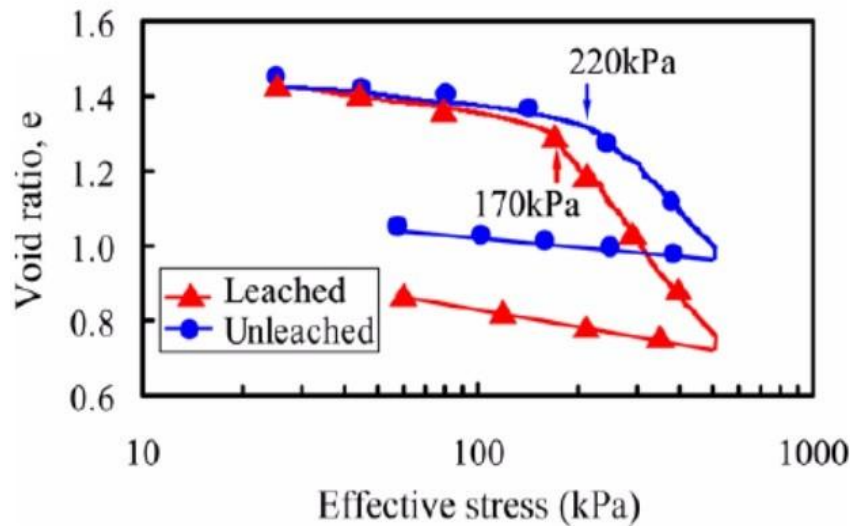


**Figure 1.7 :** Courbes de compressibilité (Al-Amoudi et al., 1992).

En 1994, Al-Amoudi et al., ont modifié l'œdomètre de telle façon qu'il permet la percolation de l'eau à travers l'échantillon sans l'application d'une pression externe. Les indices de compression et de gonflement ne sont pas affectés par l'inondation ou par la percolation de l'eau distillée à travers les échantillons de sebkha. Ceci est attribué à la nature du sol de Sebkha qui possède une faible compressibilité.

Kim et al. (2008) ont étudié l'effet de lessivage d'une argile marine sur les caractéristiques de compressibilité. Le lessivage des échantillons a été effectué en utilisant de l'eau distillée et a nécessité environ 25 jours pour réduire la salinité du sol de 17.96 et 16.26 g/l à environ 3g/l.

Les essais de compressibilité ont été effectués sur des échantillons de sol naturels et lessivés. Les résultats obtenus ont montrés que la contrainte de préconsolidation diminue et les indices de compression et de gonflement augmentent lorsque la salinité diminue (figure 1.8).



**Figure 1.8 :** Courbes de compressibilité des échantillons naturel et lavé (Kim et al., 2008).

Ajalloeian et al. (2013), ont réalisé des essais de compressibilité à l'œdomètre conventionnel sur des échantillons de sol reconstitués avec trois types de solutions différentes notamment l'eau distillée, eau demi salée et eau salée. Les résultats obtenus montrent que les indices de compression et de gonflement diminuent lorsque la salinité augmente.

Frydman et al. (2008), ont tracés deux courbes de consolidation pour le même essai en calculant les indices des vides à partir des teneurs en eau déterminées par la méthode conventionnelle et celles des teneurs en fluide déterminées par l'équation (3). Leurs résultats indiquaient que l'utilisation des valeurs des teneurs en fluide pour calculer les indices des vides donne des valeurs d'indices de compression plus élevés en comparaison avec les valeurs obtenus par la méthode conventionnelle.

## 1.7 Conclusion

A travers ce chapitre nous avons présenté une étude bibliographique sur les sols salés où l'on a montré que la salinisation des sols est considérée comme étant un problème majeur à l'échelle du globe. On a donné ensuite un aperçu sur les sols salés dans le monde et particulièrement en Algérie tout en précisant leurs caractéristiques physiques et chimiques ainsi que l'effet de la salinité et la sodicité sur le sol.

Nous avons présenté ensuite les études qui traitent l'effet des sels sur certaines caractéristiques géotechniques des sols salés notamment la teneur en eau, les limites d'Atterberg, les caractéristiques de compactage, les paramètres de compressibilité. Leurs multitudes et leurs complexités démontrent les difficultés liées à la détermination des

caractéristiques géotechniques de ces sols.

Ces études montrent que les limites d'Atterberg diminuent en fonction de l'augmentation de la salinité (Mansour et al., 2008, Shariatmadari et al., 2011 et Ajalloeian et al., 2013 ).

Pour le compactage certaines études montrent que la teneur en eau optimale diminue et le poids volumique sec maximal augmente en fonction de l'augmentation de la salinité (Mansour et al., 2008 et Alainachi et Al Obaidy, 2010), d'autres montrent qu'il n'y a pas de différence nette entre les caractéristiques de compactage lors de l'utilisation de l'eau distillée ou de l'eau salée (Al- Amoudi et al., 1992 et Ajalloeian et Mansouri, 2013).

La contrainte de préconsolidation diminue et les coefficients de compression et de gonflement augmentent lorsque la salinité diminue (Kim et al., 2008).

Il est à noter que ces études ne prennent pas en considération l'effet des sels sur la détermination de la teneur en eau des sols salés.

## Chapitre 2

### Traitement des sols

*Le traitement des sols est une technique éprouvée et peut être considérée comme classique en construction routière. Ce procédé a pour objet de rendre compactables les sols mous par réduction de leur plasticité et, par conséquent, en améliorer la résistance. Son application au cas des sols problématiques, notamment les sols salés, s'avère une solution techniquement et économiquement fort intéressante. Outre les avantages classiques répertoriés, dans le cas des sols mous et autres sols médiocres, cette solution offre la possibilité de réduire les potentiels de salinisation des sols argileux et d'améliorer leurs performances, leur procurant, de ce fait, stabilité, durabilité et meilleure résistance. Après énumération des objectifs du traitement des sols médiocres et problématiques, ce chapitre présente les techniques de traitement disponibles, notamment le cas du traitement chimique aux liants hydrauliques et particulièrement le traitement à la chaux.*

#### 2.1. Objectifs du traitement

Le traitement des sols médiocres (sols mous, limons, marnes, tourbes, etc.) ainsi que les sols à problèmes (sols liquéfiables, sols expansifs, sols effondrables) vise à satisfaire les points énumérés ci-après :

- ✓ Rendre utilisable un sol qui ne présente initialement pas les caractéristiques requises à son utilisation.
- ✓ Optimiser les opérations de réalisation par assèchement des sols qui deviennent praticables aux engins de chantiers.
- ✓ Possibilité d'éviter le décapage des sols existants et leur substitution par des sols d'apport.
- ✓ L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable.
- ✓ Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre les particules.
- ✓ Possibilités de préserver l'écosystème et de ne plus avoir besoin de parcourir de nouveaux gisements naturels.
- ✓ Limiter la sensibilité des sols aux variations hygrométrique saisonnières.

La réalisation de ces objectifs est incontestablement dépendante de la technique de traitement adoptée et des procédures de sa mise en œuvre pour atteindre le niveau de performance recherché.

## 2.2 Techniques de traitement

Le Traitement des sols consiste à modifier leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques, il existe de nos jours trois techniques de traitement ou de stabilisation des sols en géotechnique routière :

- Le traitement mécanique (drainage, substitution, compactage dynamique, etc.) ;
- Le traitement thermique (augmentation de la température du sol traité) ;
- Le traitement chimique (par additif).

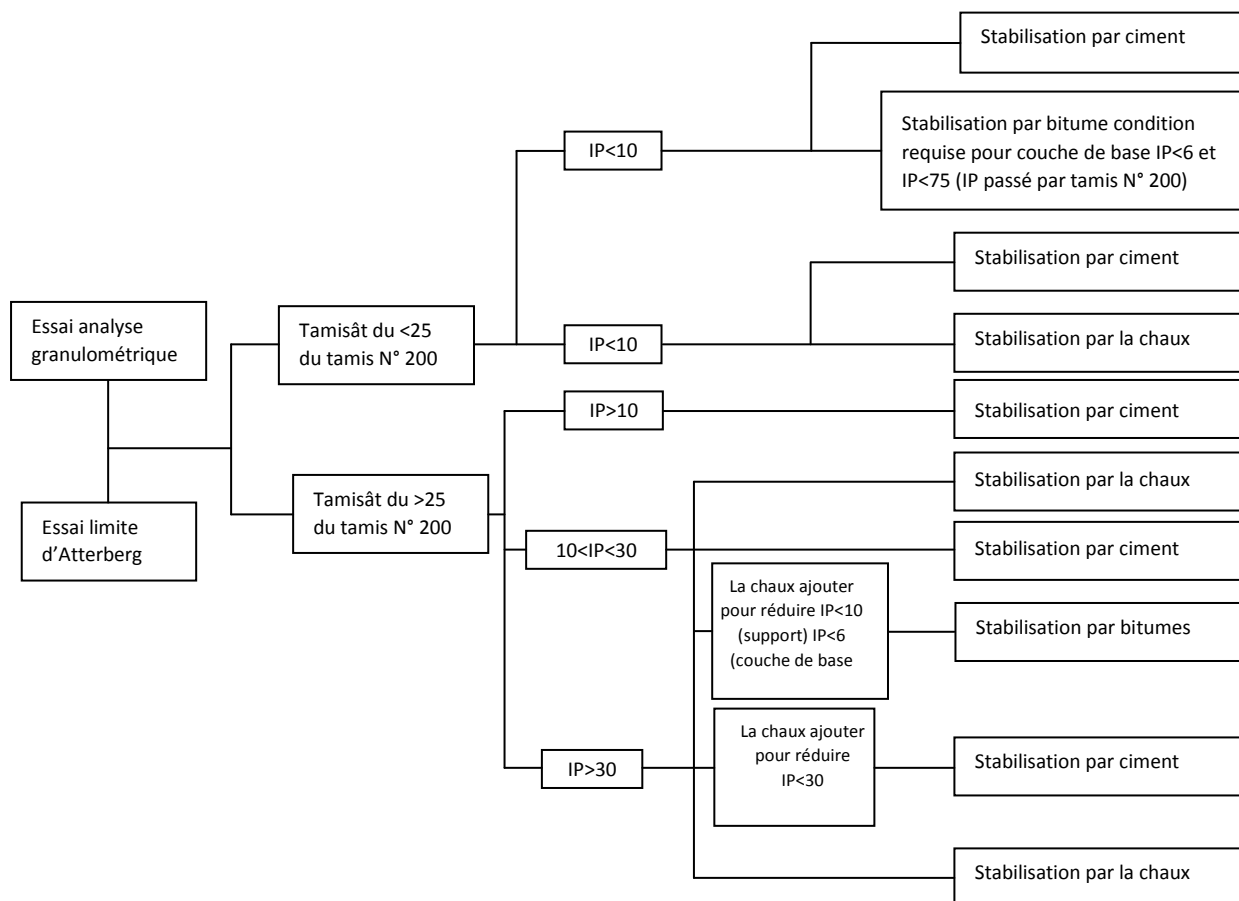
Les deux premières techniques peuvent être considérées comme coûteuses ; la dernière technique étant donc la mieux privilégiée en raison des avantages techniques, économiques, écologiques et environnementaux qu'elle procure. Par ailleurs, seule cette dernière technique en relation avec le thème proposé dans cette étude est décrite sommairement ci-après. On peut simplement noter que le choix de l'une de ces techniques dépend de plusieurs paramètres liés aux considérations économiques, à la nature du sol à traiter, à la durée de l'opération de traitement (donc du chantier), à la disponibilité des produits de traitement à utiliser et/ou des moyens disponibles pour leur mise en œuvre et aux conditions environnementales plus ou moins favorables.

## 2.3. Traitement chimique

Le traitement chimique des sols est réalisé à l'aide d'additifs, on en distingue trois types :

- **Traitement par ajout de matériaux inertes** : Le traitement par ajout de matériaux inertes comme les sables et les graviers utilisés en mélange avec le sol réduisent le pourcentage global d'éléments actifs (inférieurs à 2 microns), donc l'activité des fines argileuses. L'efficacité de ce mode de traitement sera fonction du pourcentage d'éléments inertes, de leur granulométrie et du mode de mise en place du mélange.
- **Traitement par addition de solutions salines** : Son efficacité serait très influencée par la nature du fluide hydratant ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ) et de sa concentration.
- **Traitement chimique par additifs** : Elle est employée surtout pour les sols contenant une certaine quantité d'argile. Ils ont pour effet de réagir avec la fraction argileuse et de modifier leur environnement chimique et sa structure minéralogique.

- Cette technique a fait l'objet de nombreuses recherches à travers le monde. Les chaux aériennes principalement calciques (chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux) et les liants spéciaux routiers sont les produits de traitement les plus utilisés. L'action de ces produits de traitement sur l'état hydrique des sols fins et sur leur fraction argileuse est mise en évidence en pratique (Morel, 1984 ; Bell, 1989, 1996 ; Derriche et Lazzali, 1997 ; Mellas et al., 2004 ; Tonož et al., 2004, 2006 ; etc.). Les études de traitement effectuées sur des sols gonflants confirment l'action de la chaux sur leurs caractéristiques de plasticité et de gonflement (Al-Mukhtar et al., 2010 ; Al-Rawas et al., 2005 ; Bell, 1996 ; Nalbantoglu, 2006 ; Stavridakis, 2006 ; Tonož et al., 2006 ; etc.). D'autres produits de traitement (sable de dunes, solutions salines, bitume, poussière de pierres, etc.) ont été testés pour stabiliser les sols gonflants et autres sols problématiques (Brooke, 2009 ; Harichane et al., 2011 ; Khabbaz et Fatahi, 2011 ; Louafi et Bahar, 2012 ; Mohammedzein et Al-Rawas, 2011 ; Ramadas et al., 2011 ; Sharma et al., 2012 ; etc.). Les résultats obtenus montrent une amélioration des propriétés géotechniques des sols étudiés, mais l'efficacité de ces produits n'est pas encore clairement établie en pratique. Parmi les produits de traitement qui viennent d'être cités, seuls donc le liant hydraulique (chaux) présente un intérêt particulier dans la suite de cette étude. Les conditions de son utilisation sont schématisées dans la figure 2.1.
- On notera simplement que le guide technique en vigueur en France pour le traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques (LCPC-SETRA, 2000a) décrit de manière suffisante les produits de traitement en question, l'action de ces produits sur les sols traités et les caractéristiques requises à leur utilisation ; ces dernières étant fixées dans les normes françaises (NF P 15-301) pour les ciments et (NF P 98-101) pour la chaux. Il en va de même pour les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004) qui fixent un code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou au ciment, ainsi que pour les règles du Département des armées de l'US Air Force. Aussi, n'exposera-t-on ci-après que les propriétés significatives que procurent le traitement à la chaux. Le tableau 2.1 recommande le choix du liant (chaux, ciment ou leur combinaison) et le dosage convenable en fonction des caractéristiques de plasticité du sol à traiter selon les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004).



**Figure 2.1 :** Critères d'utilisation du traitement chimique (Dept. Of the Army,1983).

**Tableau 2.1 :** Synthèse sur les dosages en stabilisants pratiqués pour le traitement des sols selon les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004).

Stabilisation	Indice de plasticité							Dosage
	0	5	10	15	20	25	30 et +	
	Valeur de bleu du sol (g de bleu/kg de matériau)							
	0	10	15	22	30	40	60 et +	
Chaux								4 à 8%
Ciment								4 à 8%
Mixte (chaux puis ciment)								1 à 2% chaux 4 à 6% ciment
Composé (chaux-ciment)								5 à 8%

## 2.4 Traitement chimique par ajout de chaux :

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour traiter les sols surtout les sols contenant les particules fines argileuses a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente (Biczysko, 1996 ; Greaves, 1996 ; Kelly, 1988 ; Little 1995), rapporte qu'en général, un sol traité à la chaux fournit une performance structurale équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou en concassé.

Plusieurs réactions sont initiées lors de l'ajout de la chaux à un sol à granulométrie fine : l'échange cationique et la floculation modifient presque instantanément la plasticité, la maniabilité, la résistance et les propriétés de déformation sous charge d'un sol (Moore, 1987). La figure 2.2 représente les actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement (LCPC-SETRA, 2000).

L'action de la chaux sur un sol fin s'exprime par :

- Diminution au niveau de la teneur en eau du mélange sol-chaux de l'ordre de 1 à 2% pour 1% de chaux.
- Modifications immédiates des propriétés géotechniques du sol traité qui se manifestent par une diminution de l'indice de plasticité, augmentation de l'indice portant immédiat et l'indice CBR immédiat, ainsi que l'aplatissement de la courbe Proctor avec la diminution de la densité sèche maximale et l'augmentation de la teneur en eau optimale.
- Des modifications à long terme qui se traduisent par la formation d'aluminates et de silicates de calcium hydratés par réaction pouzzolanique.

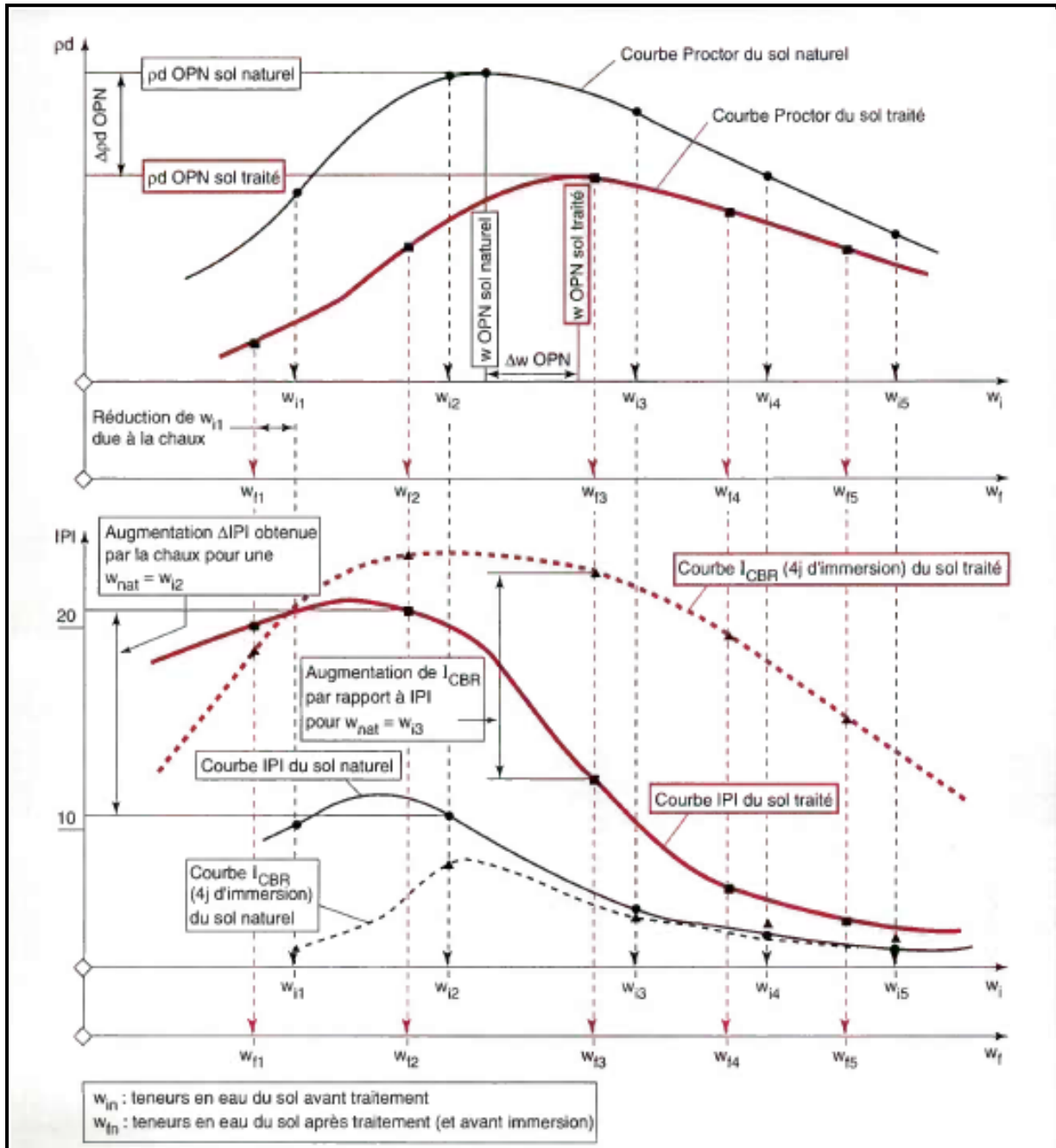
## 2.5 Techniques de réalisation des travaux de traitement

La réalisation des travaux de traitement des sols fait appel suivant les cas de chantier à un certain nombre d'opérations élémentaires exigeant un ordonnancement précis, un savoir-faire et des matériels spécifiques.

Les travaux de traitement des sols se caractérisent par la nécessité de mettre en œuvre une grande variété de matériels et de techniques d'exécution :

- La préparation du sol à traiter (élimination des éléments blocaille, homogénéisation, humidification éventuelle).
- L'épandage du liant de traitement.
- Le malaxage du liant avec le sol.

- L'ajustement de l'état hydrique (soit humidifier le sol par arrosage, soit l'assécher par aération).
- Le réglage du mélange.
- Le compactage.
- L'application de la protection superficielle du sol traité (cas d'une couche de forme).



**Figure 2.2 :** Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol de classe A<sub>2</sub> traité à 2% de chaux vive (LCPC-SETRA, 2000).

## **2.6 La chaux**

### **2.6.1 Définition**

La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Elle est utilisée depuis des siècles. Il existe plusieurs types de chaux utilisées dans des différents domaines notamment dans le traitement des sols.

### **2.6.2 Historique**

La chaux existe depuis plusieurs milliers d'années. Nos ancêtres s'en servaient pour bâtir et monter des murs, enduire et peindre.

Des Égyptiens la mirent en œuvre, alliée ou non au plâtre, pour monter les pyramides. Les civilisations mésopotamiennes, phéniciennes, les Incas ou les Mayas eurent également recours à la chaux pour bâtir. Dès les premiers siècles, la chaux fit l'objet de toutes les études et connue son heure de gloire dans le bâtiment.

Avec la découverte du ciment dans la 2<sup>ème</sup> moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle et sa production industrielle en début du XX<sup>ème</sup> siècle, la chaux perdit de sa prédominance dans le bâtiment. Les fours à chaux très abondants s'éteignirent les uns après les autres. Heureusement, cette disparition ne fut pas complète, et on redécouvre aujourd'hui les vertus incomparables de ce produit.

### **2.6.3 La fabrication des chaux hydrauliques naturelles**

#### **a) La matière première**

La roche calcaire est extraite de carrières à ciel ouvert ou souterraines. Après abattage, elle est concassée et criblée.

#### **b) La cuisson**

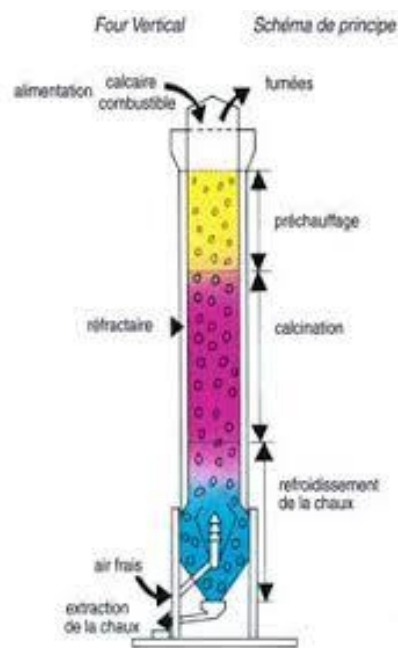
La cuisson s'effectue en général dans des fours verticaux à marche continue, dans lesquels sont introduits dans la partie supérieure, par couches successives, la pierre calcaire et le combustible. La matière descend lentement, en traversant d'abord une zone de préchauffage, provoquant l'évaporation de l'eau libre et la déshydratation (vers 200 °C). Elle traverse ensuite une zone de calcination où elle est décarbonatée (à partir de 900 °C). La zone de cuisson proprement dite, où se forment les silicates et aluminates de calcium, se situe à une température variant entre 1 000 °C et 1 200 °C selon la qualité de chaux recherchée.

### c) L'extinction

La chaux recueillie à la sortie du four passe alors par une extinction contrôlée où, sous l'action de l'eau, la pierre se pulvérise et la chaux vive est éteinte complètement, tout en respectant les silicates et aluminates qui lui donnent naturellement son caractère hydraulique.

### d) Le broyage

Le matériau obtenu est généralement broyé, avec ou sans addition d'autres constituants.



**Figure 2.3** : Schéma du principe de la fabrication de la chaux.

### 2.6.4 Différent types de chaux

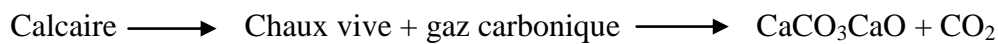
La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux :

- Chaux aérienne provenant d'un calcaire pur.
- Chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium.
- Chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux.

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes. Elles se présentent sous deux formes :

### 2.6.4.1 Chaux vive

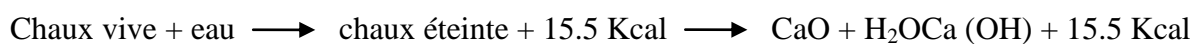
Constituée principalement d'oxyde de calcium CaO, généralement à plus de 90%. La calcination du calcaire (carbonate de calcium) entraîne la formation de chaux vive (oxyde de calcium) et de gaz carbonique (dioxyde carbonique).



Réaction endothermique nécessitant 425 kilocalories par kilogramme de calcaire. Cette réaction s'effectue à une température voisine de 900 °C et s'accompagne d'une perte de poids d'environ 45% correspondant à la perte en gaz carbonique.

### 2.6.4.2 Chaux éteinte

Contient essentiellement de l'hydroxyde de calcium Ca (OH)<sub>2</sub>. Elle est obtenue par extinction de la chaux vive selon la réaction d'hydratation suivante :



## 2.6.5 Caractéristiques chimique et physiques

### 2.6.5.1 Caractéristiques chimiques

- a) **Teneur en CaO** : La teneur en CaO est évidemment la principale caractéristique d'une chaux mais ce CaO peut être libre, c'est-à-dire sous forme d'oxyde CaO ou d'hydroxyde Ca(OH)<sub>2</sub>, ou combiné sous forme :
- De carbonate, soit parce que le calcaire d'origine n'a pas été complètement dissocié et qu'il reste des incuits, soit parce qu'il y a eu ré-carbonations de la chaux au contact de l'air. Le CaO ainsi combiné peut être considéré comme inerte pour la plupart des emplois routiers, on apprécie son importance grâce à la teneur en CO<sub>2</sub> de la chaux.
  - De silicates et d'aluminates.
  - Eventuellement, mais plus rarement, d'autres sels (sulfates, phosphates, par exemple).
- b) **Teneur en MgO** : La teneur en MgO est également importante à connaître puisque la Magnésie a en général une action analogue à la chaux. Le MgO, comme le CaO, peut être libre ou combiné, les principales indications données par l'analyse chimique d'une chaux seront donc les teneurs en : CaO total et CaO libre, MgO, CO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et FeO<sub>3</sub>. Il n'est pas nécessaire de connaître toutes ces valeurs, les teneurs en CaO et MgO sont souvent suffisantes.

c) **Réactivité** : Cette propriété est essentiellement prise en compte dans les applications où la chaux est utilisée pour flocculer les argiles ou coaguler les impuretés (phénomène de floculation). La réactivité définit la rapidité d'action d'une chaux, dans une réaction donnée, elle dépend essentiellement de :

- La porosité de la chaux (qui diminue lorsque la température de cuisson augmente).
- La finesse et le mode de cuisson.

Dans le cas de la chaux vive, la réactivité dépend de la température de calcination et de la composition du calcaire en cause. Pour la chaux éteinte, la réactivité est liée aux conditions d'extinction. Elle peut se déterminer directement en mesurant dans des conditions bien définies la vitesse de réaction d'un échantillon en présence d'eau (hydratation) ou d'un acide (neutralisation). La surface spécifique, et même la finesse de mouture, peuvent dans certains cas en donner une idée.

#### 2.6.5.2 Caractéristiques physiques

- a) **Finesse** : C'est une caractéristique importante dans la mesure où elle intervient sur les conditions de transport, de stockage ou de mélange. Elle peut également intervenir sur la vitesse de réaction de la chaux, mais il faut se rappeler, dans le cas de la chaux vive, que la présence d'eau peut modifier profondément la finesse initiale puisque l'extinction entraîne une pulvérisation très fine (à l'inverse du ciment qui se prend en grumeaux et perd de son efficacité s'il est humidifié prématurément).
- b) **Surface spécifique** : La surface spécifique donne une indication sur l'importance des surfaces de contact entre la chaux et le produit avec lequel elle est mise en réaction par conséquent sur la vitesse avec laquelle elle agira. La connaissance de la finesse ou surface spécifique est un élément fondamental pour maîtriser la réactivité de la chaux, plus les grains sont fins, plus la surface de contact est étendue et plus les réactions de floculation sont rapides.
- c) **Masse volumique et densité** : Ces deux notions aident à déterminer la masse de liant contenue dans un volume donné. La masse volumique varie beaucoup suivant la nature de la chaux, sa granulométrie et son degré de saturation.
- d) **Solubilité** : La solubilité de la chaux est très faible et diminue lorsque la température augmente.

---

**Deuxième partie**  
**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE**

---

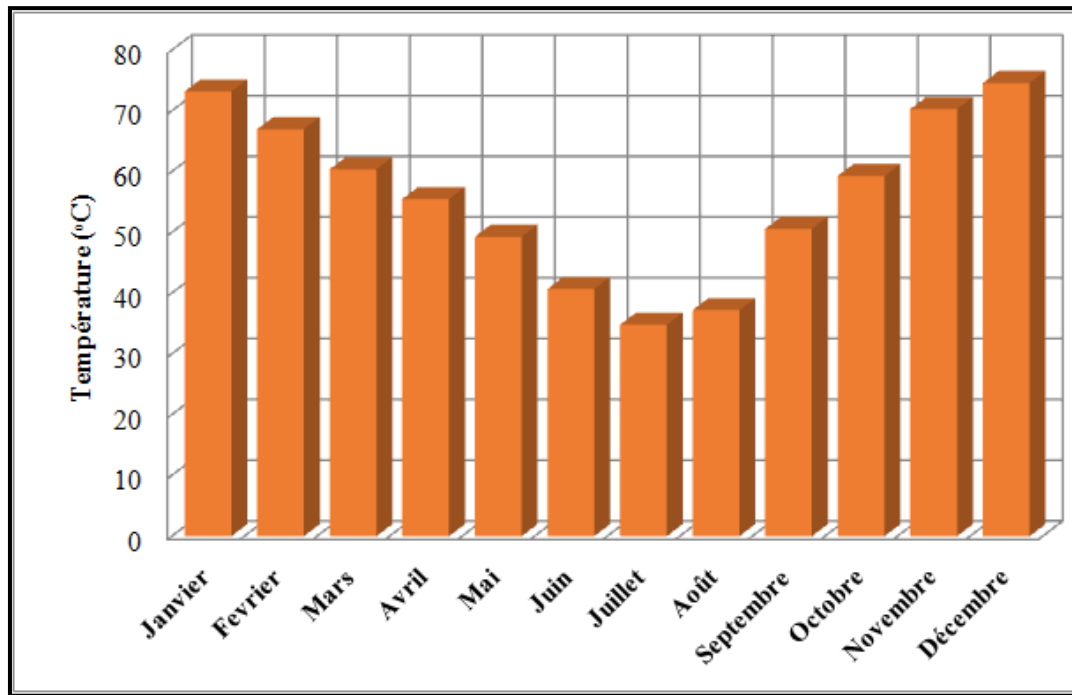
## **Chapitre 3**

### **Description du site étudié**

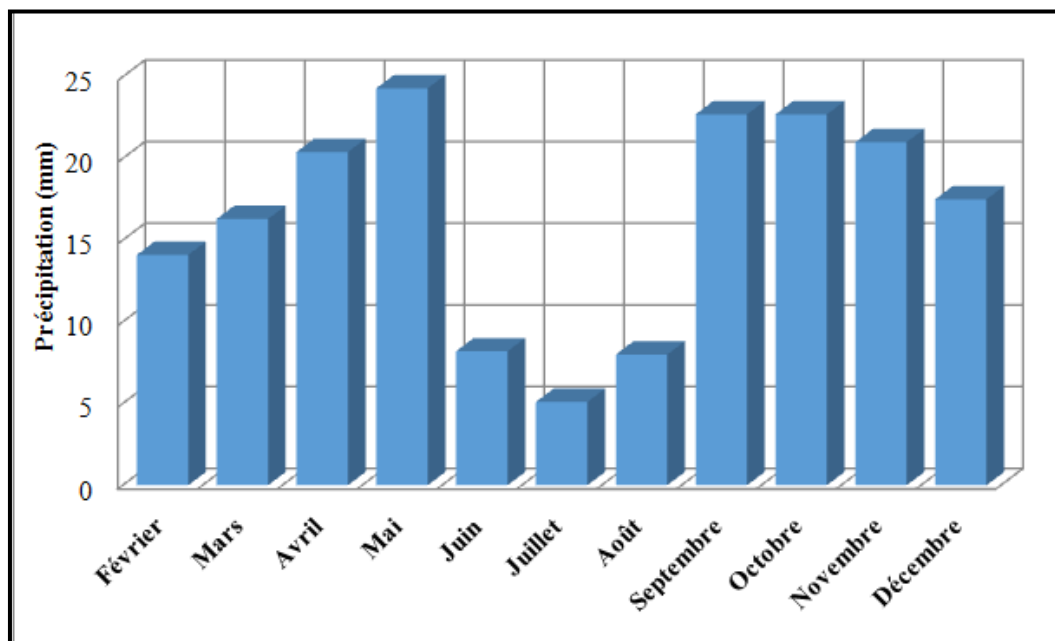
*Pour vérifier l'applicabilité des concepts évoqués dans la synthèse bibliographique permettant de valoriser les sols naturellement salés par un traitement à la chaux, en vue de leur utilisation en construction routière, le site de Chott el Hodna situé près de la commune de Ain Khadra wilaya de M'sila a été choisi. Le choix de ce site a été motivé en raison de son extension vers des terrains moins favorables que ceux déjà urbanisés. Outre le contexte général de l'étude justifiant ce choix (géologie et climatologie de la zone d'étude, pathologie des ouvrages existants), ce chapitre donne une description sommaire du Chott El Hodna et du site en relation avec le lieu et le niveau de prélèvement des échantillons d'essais et de la coupe géotechnique des terrains correspondante.*

#### **3.1 Contexte de l'étude**

Le tissu urbain de la wilaya de M'sila connaît de nos jours un développement considérable en raison d'une démographie sans cesse croissante, d'où son extension vers des terrains vierges souvent moins favorables que ceux déjà urbanisés. Cette wilaya est située dans une zone classée comme semi-aride, 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 figures 3.1 et 3.2 présentent les relevés mensuels de température et des précipitations effectués dans cette wilaya au cours de la période (1980 – 2016). La wilaya de M'sila abrite une très grande partie de Chott El Hodna qui est très animée ces dernières années par de grands projets d'infrastructure (Autoroute, voies ferrés, routes,...). Plusieurs zones dans cette région présentent des sols de faibles qualités qui peuvent induire des difficultés lors de la réalisation des projets. Des désordres importants y apparaissent fréquemment dans les constructions civiles et industrielles de faible hauteur (pavillons, bâtiments légers, routes), édifiées notamment aux alentours du Chott El Hodna.



**Figure 3.1** : Relevé mensuel de température dans la wilaya de M'sila pour la période (1980 – 2016).



**Figure 3.2** : Relevé pluviométrique mensuel dans la wilaya de M'sila pour la période (1980 – 2016).



La région du Chott est immergée pendant la période hivernale par des eaux salées (Figure 3.4). En période estivale ces eaux s'évaporent et une croûte de sel de 4 à 5 cm d'épaisseur se forme sur la surface de la sebkha (Figure 3.5).



**Figure 3.4 :** Chott El Hodna en période hivernale



**Figure 3.5 :** Chott El Hodna en période estivale

### 3.2.1 Topographie

Le Chott occupe la partie basse du centre du bassin du Hodna, situé à l'extrême Est des hauts plateaux, ce bassin s'étend sur 220 Km de long et 90 Km de large au maximum, piégé entre les formations suivantes :

- Au Nord par la chaîne du Bibans et les monts du Hodna d'altitude comprise entre 1400 m et 1800 m.
- Au Sud par l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien (prolongement des monts du Ouled Naïls d'altitude comprise entre 1470 m et 1675 m et les Monts du Zab : 980 m.
- A l'Est par le Djebel Metlili à 1495 m.
- Au Sud-Est la ville de Barika et le Djebel Tsenia..
- Au Sud-Ouest par les monts de Boussaâda terminaison des monts des Ouled Naïl.
- A l'Ouest par les hautes plaines steppiques Algéro-oranaises où l'altitude moyenne est comprise entre 900 m et 1200 m.

La zone centrale, représentée par la Sabkha, ou zone d'eau libre salée, plate et nue est caractérisée par une absence totale de végétation.

### 3.2.2 Prélèvement d'échantillons

Le site a reçu un projet de liaison routière entre le village de Ain el Khadra et M'cif. La route traverse le Chott d'El Hodna sur un linéaire de 11 km (figure 3.6).

La coupe géotechnique du massif révèle l'existence de deux couches de sol successives : des dépôts de vase et des traces de terre végétale d'épaisseur 0,2 à 0,4 m, suivie d'une grande couche d'argile de couleur brune à brunâtre. Le prélèvement des échantillons d'essais a été effectué à l'aide d'une pelle mécanique entre 1,30 et 1,70 m de profondeur.



**Figure 3.6 :** Localisation du site de prélèvement (Chott El Hodna)

**Chapitre 4****Programme expérimental  
et procédures d'essais**

*Après présentation du protocole expérimental suivi et définition des propriétés physico-chimiques du stabilisant utilisé, ce chapitre donne la liste des essais d'identification et de caractérisation qui devaient être réalisés avec une description succincte des procédures expérimentales correspondantes en vigueur en Algérie et les paramètres d'interprétation des propriétés physico-chimiques et mécaniques des sols testés.*

**4.1 Protocole expérimental**

Le protocole expérimental qui devrait être exécuté comporte des essais d'identification réalisés sur sol non traité (sol témoin) et sur sol traité à la chaux. Une description de ce liant et des essais est donnée ci-après.

Les échantillons soumis aux essais seront confectionnés à partir du mélange de la quantité de sol finement broyé après étuvage à 105 °C à la teneur en stabilisant désirée. L'ensemble sera ensuite malaxé vigoureusement à sec, puis humidifié à la teneur en eau optimale  $W_{opt}$  (i.e. densité sèche maximale  $\gamma_{d-max}$  correspondant à l'optimum Proctor) ; les caractéristiques de compactage étant préalablement déterminées sur le sol non traité. Tous les essais ont été conduits à la température ambiante.

Les procédures expérimentales suivies dans chaque type d'essai ont été conformes aux normes algériennes en vigueur, lesquelles sont compatibles aux normes françaises (i.e. normes européennes) en vigueur. Les méthodes d'interprétation des résultats d'essais s'inspirent beaucoup des connaissances acquises à travers le monde sur ce type de sol.

**4.2 Propriétés du liant hydraulique utilisé**

Le traitement sera effectué en mélangeant le sol au stabilisant (la chaux dans notre cas) dans les proportions données ci-après. La chaux utilisée est de type chaux éteinte provenant des usines ERCO de Hassasna (wilaya de Saïda). Le tableau 4.1 donne les caractéristiques physiques et chimiques de ce stabilisant.

Les teneurs pondérales en chaux considérés pour le traitement sont 0 % pour l'échantillon témoin, 2 %, 4 %, 6 %, 8 %, 10 % et 12 % pour les échantillons traités.

**Tableau 4.1 :** Propriétés physico-chimiques de la chaux éteinte de Saïda.

Description	NHL	
	<b>Propriétés physiques</b>	Densité
Coefficient d'absorption		< 5
Sensibilité au gel		< 30
Volume d'extinction		2,73 cm <sup>3</sup>
Refus 630 µm		0 %
Refus 90 µm		< 10 %
<b>Propriétés chimiques</b>	Humidité	> 5
	CaO	> 83,3 %
	MgO	< 0,5 %
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 2 %
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 1,5 %
	SiO <sub>2</sub>	< 2,5 %
	SO <sub>3</sub>	< 2,5
	Na <sub>2</sub> O	< 4,7 –0,5
	CO <sub>2</sub>	< 5
	CaCO <sub>3</sub>	< 10
Insolubles dans HCL	< 1	

### 4.3 Liste des essais

La liste des essais d'identification et de caractérisation et les normes en vigueur correspondantes sont données ci-après.

Le programme expérimental a été réalisé au sein du Laboratoire de Développement des Géomatériaux de l'Université Mohamed Boudiaf de M'sila. Ce programme est réparti en deux parties :

### **4.3.1 Sol non traité**

#### **4.3.1.1 Essais d'identification**

- Analyse minéralogique : DRX, MEB.
- Analyse chimique : EDX.
- Analyse microstructurale : MIP.
- La teneur en eau.
- Le poids volumique sec est humide.
- La granulométrie (par tamisage et par sédimentométrie).
- Les limites d'Atterberg.
- L'essai bleu de méthylène.

#### **4.3.1.2 Essais de caractérisation**

- Proctor normal
- Essai C.B.R immédiat et après imbibition.
- Essai a la boite de cisaillement.
- Essai de compression simple.
- Mesures aux ultrasons.

### **4.3.2 Sol traité :**

#### **4.3.2.1 Essais d'identification**

- Limites d'Atterberg.
- Essai de bleu de méthylène.
- Analyse minéralogique : DRX, MEB.
- Analyse chimique : EDX.
- Analyse microstructurale : MIP.

#### **4.3.2.2 Essais de caractérisation**

- Proctor normal.
- Essai C.B.R immédiat et après imbibition.
- Essai a la boite de cisaillement.
- Essai de compression simple.
- Mesures aux ultrasons.

## **4.4 Description des essais**

Les procédures suivies dans chaque type d'essai sont décrites en détail dans la norme spécifique. Aussi, se limitera-t-on à n'en rappeler ci-après que le principe et les paramètres caractéristiques intéressant l'objet de cette étude.

### **4.4.1 Essais d'identification**

#### **a/ Analyse minéralogique**

La diffraction des rayons X (DRX) est une méthode d'analyse physico-chimique. Celle-ci consiste à émettre des rayons X sur la matière cristalline, les rayons X provoquent un déplacement du nuage électronique dans le noyau des atomes. Ces oscillations induites provoquent une réémission d'ondes électromagnétique de même fréquences. La longueur d'onde des rayons X étant de l'ordre de grandeur des distances interatomiques (quelques angströms), le but est de déterminer la proportion des différents minéraux présents dans une matrice d'argile.

La Microscopie Electronique à Balayage (MEB) fournit des informations sous forme d'images utilisées pour visualiser la morphologie, la topographie ainsi que les contrastes chimiques des objets étudiés. En mode électrons rétrodiffusés, il est possible d'établir une image des numéros atomiques moyens, véritable cartographie des minéraux. Couplé à un système d'analyse par spectrométrie X à dispersion d'énergie, elle permet de réaliser des analyses chimiques multi-élémentaires quantitatives (MEB JEOL-JSM 5600 LV).

#### **b/ Analyse chimique**

Le but de cet essai est de déterminer la nature chimique des échantillons choisis. Cette étape étant importante dans l'identification des matériaux locaux utilisés en construction surtout routière.

#### **c/ Analyse microstructurale**

L'analyse microstructurale à l'aide de porosimétrie par intrusion de mercure (MIP) est une technique destructrice et non portable, cette dernière est utilisée pour analyser la porosité totale connectée, le volume des pores, la distribution de la taille des pores et la surface.

Cette technique implique l'intrusion d'un liquide non mouillant (souvent du mercure) à haute pression dans un matériau grâce à l'utilisation d'un porosimètre. La taille des pores peut

être déterminée sur la base de la pression externe nécessaire pour forcer le liquide dans un pore contre la force opposée de la tension superficielle du liquide.

#### **d/ Teneur en eau (NF P 94-050 ; NA 5209)**

C'est le rapport de la masse de l'eau contenue dans le sol ( $m_w$ ) sur la masse des grains solides ( $m_d$ ) qui le constituent exprimé en pourcentage :

$$w = m_w / m_d$$

L'échantillon de sol est pesé, puis placé dans une étuve. Une fois la dessiccation obtenue, l'échantillon est pesé à nouveau. Les deux pesées donnent par différence la masse de l'eau contenue dans le sol ( $m_w$ ).

#### **e/ Poids volumique humide et sec (NF P 94-053 ; NA 5210)**

La masse volumique d'un sol ( $\rho$ ) est le quotient de la masse ( $m$ ) du sol par le volume ( $V$ ) qu'il occupe (y compris les fluides interstitiels : air + eau). Dans ce cas, l'utilisation d'un carottier a été préconisée, qui consistait au respect des étapes de la norme.

La masse volumique d'un sol ( $\rho_d$ ) est le quotient de la masse des grains solides ( $m_s$ ) du sol par le volume ( $V$ ) qu'il occupe. La masse volumique sèche peut être obtenue comme le rapport du poids volumique humide par l'unité plus la teneur en eau :

$$(\gamma_d = \gamma_h / 1 + \omega).$$

#### **f/ Analyse granulométrique (NF P94-056 ; NA 5232) et (NF P94-57 ; NA 5251)**

Elle a pour but de déterminer la répartition en poids des grains du sol (norme NF P 94-056 ; NA 5232) pour l'analyse granulométrique par tamisage et la norme (NF P 94-057 ; NA 5251), pour l'analyse granulométrique par sédimentométrie).

##### **f.1/ Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056 ; NA 5232)**

Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification.

L'essai consiste à séparer par lavage les grains agglomérés d'une masse connue de matériau, puis à les fractionner, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement après séchage le refus cumulé sur chaque tamis.

### f.2/ Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P 94-057 ; NA 5251)

Les particules inférieures à 80 µm séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans l'eau additionnée d'une défloculation. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densitomètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et de la profondeur d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données.

### g/ Essai de limites de consistance (NF P 94-051 ; NA 16213)

Les limites de consistance, appelées limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limites de liquidité ( $W_L$ ).
- Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limites de plasticité ( $W_p$ ).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de matière première brute.

$$\text{La différence : } I_p = W_L - W_p$$

défini l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon, il définit donc l'argilosité de l'échantillon.

L'encadré ci-après donne les intervalles de variations de l'indice de plasticité ( $I_p$ ) pour chaque état de plasticité du sol.

<b><math>I_p</math></b>	< 5	5 - 15	15 - 40	> 40
<b>Etat</b>	non plastique	peu plastique	plastique	très plastique

Par ailleurs, l'abaque de Casagrande permet de classer le sol conformément à la norme de classification des sols fins et des sols organiques en vigueur (normes françaises : NF P 94-500 et XP P 94-011).

Les limites de consistances procurent aussi un indice appelé indice de consistance ( $I_c$ ), avec lequel on détermine l'état de consistance du sol. Cet dernier est défini comme suit :

$$I_c = (W_L - W_{nat}) / I_p$$

où  $W_{nat}$  désigne la teneur en eau naturelle du sol.

L'encadré ci-après donne les intervalles des variations de  $I_c$  pour chaque état de consistance du sol.

<b><math>I_c</math></b>	< 0	0 – 0,25	0,25 – 0,50	0,50 – 0,75	0,75 – 1,0	> 1
<b>Etat</b>	liquide	très mou	mou	ferme	très ferme	dur

On peut tirer aussi l'activité d'une argile ( $A_c$ ) qui se définit comme suit :

$$A_c = \frac{\text{Indice de plasticité}}{C2 = (\% \text{ éléments } < 2\mu\text{m})}$$

#### h/ Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068 ; NA 5288)

L'essai est réalisé sur la fraction 0/0.080 mm, il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire à la saturation des particules argileuses en suspension dans l'eau et en permanente agitation. La valeur de bleu VBS est la quantité de bleu de méthylène absorbé par 40 g de matériau.

Les paramètres qu'on peut tirer de l'essai du bleu au méthylène :

- La valeur du bleu :  $VBS = \frac{\text{Volume en cm}^3 \text{ de solution}}{\text{Poids sec de la prise}}$
- La surface spécifique totale :  $SST = 20.93 \times Vcc \times \frac{1}{Ps}$

Avec :

- SST : surface spécifique ( $\text{m}^2/\text{g}$ ).
- Vcc : volume de la solution utilisée ( $\text{cm}^3$ ).
- Ps : poids du matériau sec (g)
- 20.93 : surface correspondant à  $1 \text{ cm}^3$  de bleu de méthylène.

L'encadré ci-après donne les intervalles de variations du VBS pour chaque nature de sol.

<b>VBS</b>	< 0.2	0.2 – 2.5	2.5 - 6	6 - 8	> 8
<b>Sol</b>	sableux	limoneux	limono-argileux	argileux	très argileux

#### 4.4.2 Essais de caractérisation

##### a/ Essai Proctor normal (NF P 94-093 ; NA 5262)

L'essai Proctor est un essai de compactage exécuté en laboratoire qui a pour but de déterminer l'influence de la teneur en eau ( $W$  exprimée %) d'un matériau sur sa compactibilité (exprimée par la masse volumique sèche  $\rho_d$  en  $\text{g/cm}^3$  ou  $\text{kg/m}^3$ ).

Le matériau est porté à différentes teneurs en eau et chacun des mélanges est ensuite compacté par couche dans le moule cylindrique au moyen d'un marteau de dimension et de masse normalisées que l'on laisse tomber librement d'une hauteur normalisée. La masse volumique sèche de l'échantillon ainsi compactée est déterminé pour chaque teneur en eau. La courbe de compactage qui en résulte permet de déterminer la teneur en eau optimale  $W_{\text{opt}}$  et la densité sèche maximale  $\gamma_{d-\text{max}}$  correspondante. Ces deux paramètres traduisent l'état de compacité du sol en laboratoire et conditionne les modalités de compactage en place.

##### b/ Essai de portance C.B.R (NF P 94-078 ; NA 5252)

L'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportés aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements, l'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés.

##### b.1/ Essai C.B.R immédiat

On pose l'éprouvette sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et on procède au poinçonnement de la manière suivante :

- Approcher la face supérieure de l'éprouvette vers le piston, à l'aide des dispositifs prévus sur la presse jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériau.
- Régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur mesurant l'enfoncement du poinçon.
- Noter les efforts du poinçonnement correspondant aux enfoncements suivants : 1.25 ; 2 ; 2.5 ; 5 ; 7.5 et 10 mm.
- L'indice recherché et par conversion, la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$= \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (KN)}}{13.35} \times 100$$

$$= \frac{\text{Effort de pénétration à 5.0 mm d'enfoncement (KN)}}{19.93} \times 100$$

### **b.2/ Essai C.B.R après imbibition**

Après quatre (4) jours d'immersion ( $\pm 2h$ ) on mesure la hauteur de gonflement  $\Delta h$  indiquée par le comparateur, on extrait l'ensemble hors du bac d'immersion en observant un temps d'égouttage de 15 minutes puis on dépose le trépied, le comparateur, les surcharges et le disque de gonflement. La même procédure que la détermination de l'indice C.B.R immédiat.

### **c/ Essai de cisaillement direct (NF P 94-71-1 ; NA 16218)**

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes, dans notre cas le but est de déterminer l'effort de cisaillement. L'échantillon de sol est préparé selon les caractéristiques optimums et sous l'énergie de Proctor normal, l'essai adopté pour le cisaillement est non consolidé non drainé (CD) avec une vitesse de 1 mm/min et une course de 6 mm de déplacement horizontal en utilisant la boîte de cisaillement carrée (36 cm<sup>2</sup>), on a pu diviser le contenu du moule Proctor en trois parties représentatives des trois couches du moule (la première couche représente la couche de fond, la deuxième couche représente la couche intermédiaire et enfin la troisième couche représente la couche supérieure).

### **d/ Essai de compression simple (NF P 18-406 ; NA 427)**

L'essai permet de mesurer la résistance à la rupture en compression simple  $R_c$  du sol. L'éprouvette généralement cylindrique de dimension normalisée de 10,2 cm de diamètre et 11 cm de hauteur est placée entre les deux plateaux d'une presse et soumise à des charges croissantes jusqu'à rupture.

La vitesse d'écrasement doit être suffisamment rapide (1,5 à 2 mm/min) pour qu'aucun drainage ne puisse se produire pendant l'essai.

La relation ( $R_c = 4P / \pi D^2$ ) donne en fonction de la charge appliquée  $P$  à la rupture, la valeur de la résistance à la compression simple  $R_c$ .

Le but de l'essai est de déterminer la résistance à la compression simple du sol.

Après la confection de l'éprouvette, on retire le moule et on fait passer l'éprouvette à la presse qui permet la lecture de la force qui s'exerce sur les facettes latérales du cylindre de sol.

L'éprouvette sera placée entre les deux mâchoires de la machine et on lèvera une seule lecture. Celle de la force correspondante à la rupture de l'échantillon. Soit F cette force.

La résistance à la compression simple sera :

$$\delta = \frac{F}{S}$$

F : force au moment de la rupture.

S : section de l'éprouvette.

#### e/ Mesures aux ultrasons (NF P 18-418 ; NA 5027)

Le principe de cette méthode consiste à mesurer le temps mis par la propagation d'ondes longitudinales (de compression) à parcourir une distance donnée et par conséquent la vitesse correspondante de propagation de cette onde dans l'éprouvette.

La méthode ultrasonore utilisée est la méthode en transmission en conformité avec la norme (NFP 18-418 ou NA 5027). Les capteurs que sont l'émetteur et le récepteur de l'ultrason sont montés de part et d'autre des surfaces opposées de l'éprouvette selon l'axe longitudinal. Un léger film de gel induit les deux surfaces parallèles pour assurer un bon contact entre les transducteurs et l'éprouvette. L'appareil permet d'enregistrer le temps de transit de l'onde. La vitesse du son dans l'éprouvette est calculée par le rapport de la longueur de l'éprouvette convertie en mètres sur le temps converti en seconde indiqué par l'appareil ultrasonore.

**N.B.** : Il est à noter que tous les essais ont été réalisés en utilisant de l'eau distillée. L'encadré ci-après donne quelques informations sur cette eau.

Eau distillée	Potentiel Hydrogène (PH)	Turbidité Néphélogéométrique (ntμ)	Conductivité (μs/cm)
	06,91	00,90	08,01

**Chapitre 5****Présentation et analyse  
des résultats d'essais**

*Ce chapitre présente et analyse les résultats d'essais obtenus sur les échantillons de sol prélevés sur le site de Chott El Hodna dans la wilaya de M'sila, puis testés conformément au protocole expérimental décrit dans le chapitre précédent. Il vise principalement à résumer les essais d'identification et leur interprétation ainsi que l'essai de caractérisation Proctor normal.*

**5.1 Essais d'identification**

Les tableaux 5.1 à 5.11 présentent les résultats des essais d'identification (paramètres d'état, analyse granulométrique et limites d'Atterberg) obtenus à partir d'un prélèvement effectué à une profondeur comprise entre 1,30 à 1.70 mètres. Le tableau 5.12 présente les valeurs de bleu de méthylène déterminées à partir de six essais et enfin le tableau 5.13 présente un résumé des caractéristiques d'identification des essais effectués sur le sol étudié.

**5.1.1 Paramètres d'états :**

Le tableau 5.1 présente les résultats de la teneur en eau naturelle et les masses volumiques humide et sèche issus de deux prélèvements effectués sur le site de Chott El Hodna.

**Tableau 5.1 :** Détermination de la teneur en eau et les masses volumiques humide et sèche.

Désignation	Moule 1	Moule 2	Moyenne
Masse du moule (g) : $m_1$	721,25	710,38	715,82
Masse humide totale (g) : $m_2$	913,68	905,78	909,73
Masse sèche totale (g) : $m_3$	890,45	884,15	887,30
Volume du moule ( $\text{cm}^3$ ) : V	100,00	100,00	100,00
Masse de l'eau (g) : $m_w = m_2 - m_3$	23,23	21,64	22,44
Masse du sol humide (g) : $m_h = m_2 - m_1$	192,43	195,41	193,92
Masse du sol sec (g) : $m_d = m_3 - m_1$	169,2	173,77	171,49
Teneur en eau (%) : $W_h = (m_w/m_d) \cdot 100$	13,73	12,45	<b>13,09</b>
Masse volumique humide ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ): $\rho_h = m_h/V$	1,92	1,95	<b>1,94</b>
Masse volumique sèche ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) : $\rho_d = m_d/V$	1,69	1,73	<b>1,71</b>

### 5.1.2. Analyse granulométrique par tamisage

Par faute de temps et du fait de la pandémie du covid-19, nous n'avons pu terminer l'essai de l'analyse granulométrique, les tableaux 5.2 à 5.5 sont issus de trois essais de l'analyse granulométrique uniquement par tamisage, effectués sur les échantillons de sol prélevées de Chott El Hodna selon la norme (NF P 94-056 ; NA 5232), leurs courbes correspondantes sont présentées en annexe de A.1 à A.3.

**Tableau 5.2 :** Analyse granulométrique par tamisage de l'essai n° 01.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
3,15	01,37	01,37	00,46	99,54
2,50	01,48	02,85	00,95	99,05
2,00	01,65	04,50	01,50	98,50
1,60	01,04	05,54	01,85	98,15
1,25	02,09	07,63	02,54	97,46
1,00	00,89	08,52	02,84	97,16
0,80	01,73	10,25	03,42	96,58
0,50	03,18	13,43	04,48	95,52
0,315	08,58	22,01	07,34	92,66
0,125	36,72	58,73	19,58	80,42
0,08	25,42	84,15	28,05	71,95

**Tableau 5.3 :** Analyse granulométrique par tamisage de l'essai n° 02.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
3,15	00,78	00,78	00,26	99,74
2,5	00,90	01,68	00,56	99,44
2,00	01,13	02,81	00,94	99,06
1,60	00,89	03,70	01,23	98,77
1,25	01,59	05,29	01,76	98,24
1,00	00,93	06,22	02,07	97,93
0,80	01,52	07,74	02,58	97,42
0,50	02,95	10,69	03,56	96,44
0,315	09,60	20,29	06,76	93,24
0,125	37,12	57,41	19,14	80,86
0,08	43,28	100,69	33,56	66,44

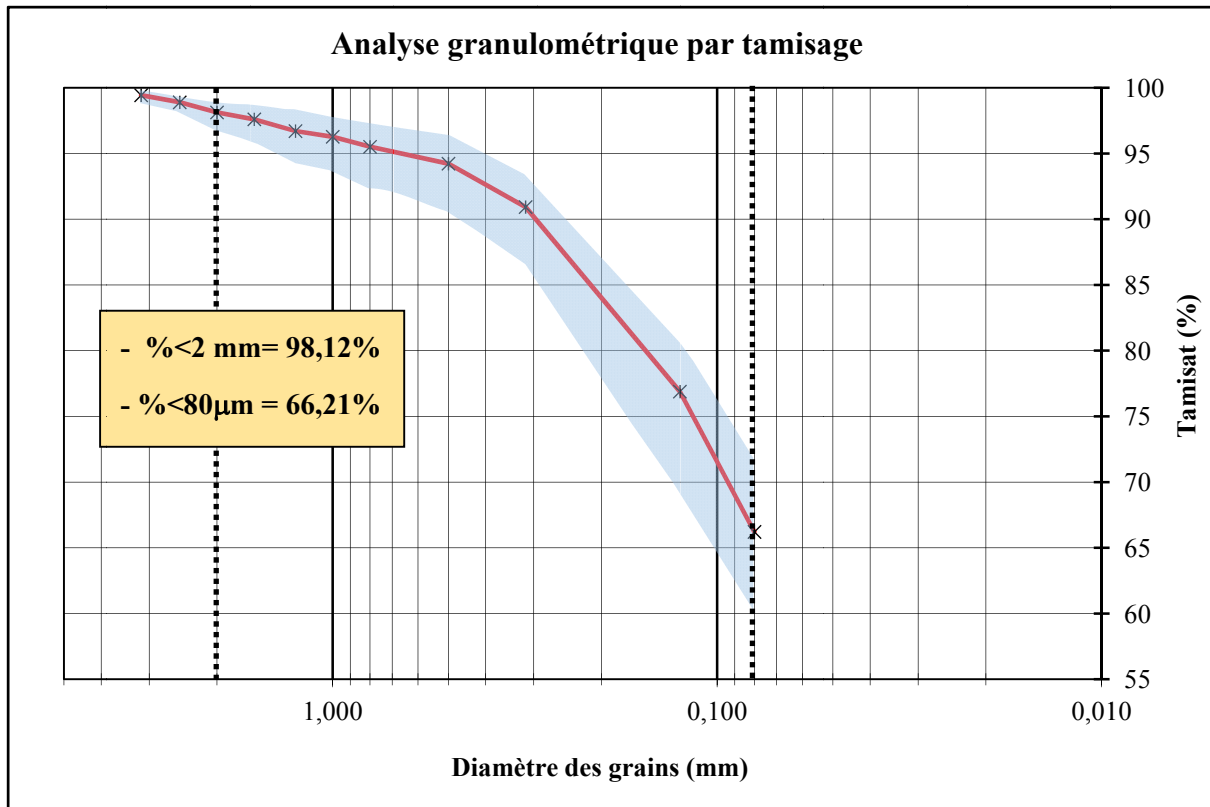
**Tableau 5.4 :** Analyse granulométrique par tamisage de l'essai n° 03.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
3,15	02,94	02,94	00,98	99,02
2,50	02,48	05,42	01,81	98,19
2,00	04,14	09,56	03,19	96,81
1,60	02,81	12,37	04,12	95,88
1,25	04,36	16,73	05,58	94,42
1,00	02,10	18,83	06,28	93,72
0,80	03,58	22,41	07,47	92,53
0,50	05,43	27,84	9,28	90,72
0,315	12,12	39,96	13,32	86,68
0,125	51,91	91,87	30,62	69,38
0,08	27,38	119,25	39,75	60,25

**Tableau 5.5 :** Analyse granulométrique par tamisage des trois essais.

	Essai n° 1	Essai n° 2	Essai n° 3	Moyenne
Tamis (mm)	Tamisât en (%)	Tamisât en (%)	Tamisât en (%)	Tamisât en (%)
3,15	99,54	99,74	99,02	99,43
2,50	99,05	99,44	98,19	98,89
2,00	98,50	99,06	96,81	98,12
1,60	98,15	98,77	95,88	97,60
1,25	97,46	98,24	94,42	96,71
1,00	97,16	97,93	93,72	96,27
0,80	96,58	97,42	92,53	95,51
0,50	95,52	96,44	90,72	94,23
0,315	92,66	93,24	86,68	90,86
0,125	80,42	80,86	69,38	76,89
0,08	71,95	66,44	60,25	66,21

La figure 5.1 présente un fuseau granulométrique par tamisage des échantillons de sol de Chott El Hodna correspondant à la moyenne des trois essais réalisés.



**Figure 5.1** : Fuseau granulométrique de l'argile du Chott El Hodna.

### 5.1.3. Limites d'Atterberg

Trois essais ont été réalisés pour la détermination des limites d'Atterberg, les tableaux 5.6 à 5.8 présentent les résultats de la limite de liquidité et ceux de 5.9 à 5.11 montrent les résultats de la limite de plasticité et le tableau 5.12 présente un récapitulatif des résultats de tous les essais. Les courbes correspondantes (A.4 à A.9) sont jointes en annexe.

**Tableau 5.6** : Détermination de la limite de l'essai n° 01.

Numéro de l'essai	1 <sup>er</sup> essai		2 <sup>ème</sup> essai		3 <sup>ème</sup> essai		4 <sup>ème</sup> essai	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de coups	17		23		29		32	
Numéro de la tare	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse de la tare $m_t$ (g)	10,33	10,32	10,42	10,37	10,36	10,40	10,29	10,36
Masse (sol humide + tare) $(m_h+m_t)$ (g)	22,68	24,76	26,38	25,44	24,36	23,61	24,19	23,42
Masse (sol sec + tare) $(m_d+m_t)$ (g)	18,78	20,26	21,39	20,70	19,97	19,47	19,90	19,38
Masse d'eau $m_w(g)=(m_h+m_t)-(m_d+m_t)$	3,90	4,50	4,99	4,74	4,40	4,14	4,29	4,04
Masse du sol sec $m_d$ (g) = $(m_d+m_t)-m_t$	8,46	9,94	10,97	10,33	9,61	9,07	9,61	9,02
Teneur en eau $w(\%) = m_w/m_d$	46,17	45,25	45,48	45,87	45,78	45,58	44,63	44,78
$W_{moy}(\%)$	45,71		45,68		45,68		44,71	
$W_L(\%) = -0.0512x + 46.736$	<b>45,46</b>							

**Tableau 5.7** : Détermination de la limite de l'essai n° 02.

Numéro de l'essai	1 <sup>er</sup> essai		2 <sup>ème</sup> essai		3 <sup>ème</sup> essai		4 <sup>ème</sup> essai	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de coups	16		23		29		33	
Numéro de la tare	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse de la tare $m_t$ (g)	10,20	10,10	10,10	10,10	10,10	10,10	10,20	10,10
Masse (g) (sol humide + tare) $= (m_h + m_t)$	25,40	26,40	25,00	23,70	25,3	27,6	22,50	20,20
Masse (g) (sol sec + tare) $= (m_d + m_t)$	20,40	21,00	20,00	19,30	20,50	21,90	18,70	17,00
Masse d'eau (g) $m_w = (m_h + m_t) - (m_d + m_t)$	05,00	5,40	05,00	04,40	04,80	5,70	3,80	3,20
Masse du sol sec (g) $m_d = (m_d + m_t) - m_t$	10,20	10,9	09,90	09,20	10,40	11,80	8,50	6,90
Teneur en eau $w(\%) = m_w / m_d$	49,02	49,54	50,51	47,83	46,15	48,31	44,71	46,38
$W_{moy}(\%)$	49,28		49,17		47,23		45,54	
$W_L(\%) = -0.221x + 53.385$	<b>47,86</b>							

**Tableau 5.8** : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n° 03.

Numéro de l'essai	1 <sup>er</sup> essai		2 <sup>ème</sup> essai		3 <sup>ème</sup> essai		4 <sup>ème</sup> essai	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de coups	16		22		29		32	
Numéro de la tare	1	2	3	4	5	6	7	8
Masse de la tare $m_t$ (g)	24,88	24,15	24,28	13,88	24,12	57,34	51,09	13,99
Masse (g) (sol humide + tare) $= (m_h + m_t)$	45,79	44,10	39,95	24,46	41,87	73,68	63,82	31,93
Masse (g) (sol sec + tare) $= (m_d + m_t)$	39,16	38,44	35,19	21,24	36,48	68,78	59,91	26,60
Masse d'eau (g) $m_w = (m_h + m_t) - (m_d + m_t)$	6,63	6,555	4,76	3,22	5,39	4,90	3,91	5,33
Masse du sol sec (g) $m_d = (m_d + m_t) - m_t$	14,28	14,29	10,91	7,35	12,36	11,44	8,83	12,62
Teneur en eau $w(\%) = m_w / m_d$	46,40	45,86	43,60	43,80	43,63	42,81	44,29	42,25
$W_{moy}(\%)$	46,13		43,70		43,22		43,27	
$W_L(\%) = -0.1708x + 48.307$	<b>44,04</b>							

**Tableau 5.9** : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n° 01.

Numéro de l'essai	1 <sup>er</sup> essai		2 <sup>ème</sup> essai		3 <sup>ème</sup> essai		4 <sup>ème</sup> essai	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Numéro de la tare								
Masse de la tare $m_t$ (g)	08,70	08,40	19,60	08,50	13,90	14,00	13,70	11,10
Masse (sol humide + tare) $(m_h+m_t)$ (g)	10,60	10,50	22,10	10,40	16,10	16,00	16,00	13,20
Masse (sol sec + tare) $(m_d+m_t)$ (g)	10,20	10,10	21,80	10,00	15,80	15,60	15,40	12,70
Masse d'eau $m_w(g)=(m_h+m_t)-(m_d+m_t)$	0,40	00,40	00,30	00,40	00,30	00,40	00,60	00,50
Masse du sol sec $m_d$ (g) $= (m_d+m_t) - m_t$	01,50	01,70	02,20	01,50	01,90	01,60	01,70	01,60
Teneur en eau $w$ (%) $= m_w/m_d$	26,67	23,53	13,64	26,67	15,79	25,00	35,29	31,25
$W_{moy}$ (%)	25,10		20,15		20,39		33,27	
$W_p$ (%) $= ax+b$	<b>24,73</b>							

**Tableau 5.10** : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n° 01.

Nombre d'essais	1 <sup>er</sup> essai		2 <sup>ème</sup> essai		3 <sup>ème</sup> essai		4 <sup>ème</sup> essai	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Numéro de la tare								
Masse de la tare $m_t$ (g)	11,80	11,60	11,90	11,70	11,60	11,60	11,40	11,80
Masse (sol humide + tare) $(m_h+m_t)$ (g)	13,80	13,60	13,90	13,60	13,70	13,70	13,10	14,00
Masse (sol sec + tare) $(m_d+m_t)$ (g)	13,40	13,30	13,50	13,40	13,40	13,20	12,80	13,70
Masse d'eau $m_w(g)=(m_h+m_t)-(m_d+m_t)$	00,40	00,30	00,40	00,20	00,30	00,50	00,30	00,30
Masse du sol sec $m_d$ (g) $= (m_d+m_t) - m_t$	01,60	01,70	01,60	01,70	01,80	01,60	01,40	01,90
Teneur en eau $w$ (%) $= m_w/m_d$	25,00	17,65	25,00	11,76	16,67	31,25	21,43	15,79
$W_{moy}$ (%)	21,32		18,38		23,96		18,61	
$W_p$ (%)	<b>20,57</b>							

**Tableau 5.11** : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n° 01.

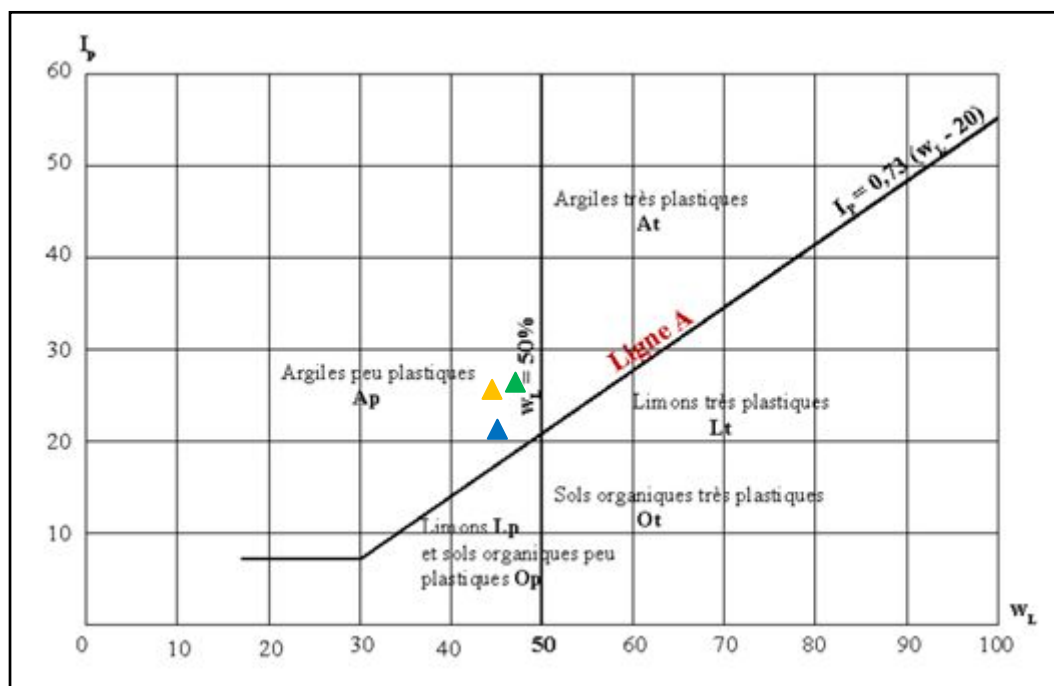
Nombre d'essais	1 <sup>er</sup> essai		2 <sup>ème</sup> essai		3 <sup>ème</sup> essai		4 <sup>ème</sup> essai	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Numéro de la tare								
Masse de la tare $m_t$ (g)	09,10	23,80	08,60	08,50	11,50	08,50	08,30	08,80
Masse (sol humide + tare) $(m_h+m_t)$ (g)	10,70	25,60	10,80	10,20	14,30	11,00	10,40	10,80
Masse (sol sec + tare) $(m_d+m_t)$ (g)	10,50	25,10	10,40	10,00	13,80	10,60	10,10	10,40
Masse d'eau $m_w(g)=(m_h+m_t)-(m_d+m_t)$	00,20	00,50	00,40	00,20	00,50	00,40	00,30	00,40
Masse du sol sec $m_d$ (g) $= (m_d+m_t) - m_t$	01,40	01,30	01,80	01,50	02,30	02,10	01,80	01,60
Teneur en eau $w$ (%) $= m_w/m_d$	12,50	27,78	18,18	11,76	17,86	16,00	14,29	20,00
$W_{moy}$ (%)	20,14		14,97		16,93		17,14	
$W_p$ (%)	<b>17,30</b>							

Le tableau 5.12 ci-dessous représente une récapitulation des résultats des essais des limites d'Atterberg.

**Tableau 5.12 :** Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg

N° essai	Couleur	$W_{nat}$	$W_L$ (%)	$W_P$ (%)	$I_P$ (%)	$I_C = (W_L - W_{nat})/I_P$
1	▲	13,09	45,46	24,73	20,73	1,56
2	▲	13,09	47,86	20,57	27,29	1,27
3	▲	13,09	44,04	17,30	26,74	1,16
Moyenne		<b>13,09</b>	<b>45,78</b>	<b>20,86</b>	<b>24,92</b>	<b>1,33</b>

La figure 5.2 présente l'abaque de Casagrande relatif aux trois essais réalisés.



**Figure 5.2 :** Classification de l'argile de Chott El Hodna.

#### 5.1.4. Essai au bleu de méthylène

Six essais au bleu de méthylène ont été réalisés, les résultats obtenus sont regroupés sur le tableau 5.13 ci-dessous.

**Tableau 5.13** : Résultats des essais au bleu de méthylène.

	Masse du sol (g)	Volume de la solution (cm <sup>3</sup> )	VBS (g/cm <sup>3</sup> )	SST (m <sup>2</sup> /g)
Essai 1	40	240	5,74	130,29
Essai 2	40	255	5,88	140,58
Essai 3	40	235	5,42	129,56
Essai 4	40	210	4,90	115,18
Essai 5	40	230	5,40	125,82
Essai 6	40	230	5,47	125,18
Moyenne	40	233,33	<b>5,47</b>	<b>127,77</b>

Les essais d'identification effectués sur les échantillons testés ont permis d'obtenir les plages de variation et les valeurs moyennes des paramètres géotechniques présentées dans le tableau 5.14.

**Tableau 5.14** : Paramètres d'identification du sol de Chott El Hodna (wilaya de M'sila).

Paramètres	Symboles	Plages de variation	Moyenne
Profondeur	m	1,30 – 1,70	1,50
Teneur en eau naturel	W <sub>nat</sub> (%)	12,45 - 13,73	13,09
Masse volumique humide	ρ <sub>h</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	01,92 – 1,95	01,94
Masse volumique sèche	ρ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	01,69 - 01,73	01,71
Limite de liquidité	W <sub>L</sub> (%)	44,08 - 47,86	45,78
Limite de plasticité	W <sub>P</sub> (%)	17,30 - 24,73	20,86
Indice de plasticité	I <sub>P</sub> (%)	20,73 - 27,29	24,92
Indice de consistance	I <sub>c</sub> (%)	01,21 - 01,63	01,33
Valeur de bleu du sol	VBS	04,90 - 05,88	05,47
Surface spécifique totale	SST (m <sup>2</sup> /g)	115,18 - 140,58	127,77
Passants à 2 mm	%<2 mm	96,81 – 99,06	98,12
Passants à 80 μm	%<0,08 mm	60,25 - 71,95	66,21
Teneur en eau optimale	W <sub>opt</sub> (%)	-	15,53
Classification LCPC		Ap	Argile peu plastique

## 5.2 Interprétation des résultats des essais d'identification

L'étude avait pour finalité de caractériser le comportement en laboratoire d'une argile naturelle traitée à la chaux en vue de son utilisation en construction routière. Le choix du site Chott El Hodna près de la commune de Ain Khadra (wilaya de M'sila) a été motivé en raison de son extension vers des zones à risque, où des désordres significatifs apparaissent fréquemment dans les infrastructures routières, voiries et réseaux divers et même dans les constructions civiles et industrielles de faible hauteur.

Les analyses granulométriques des échantillons de sol testés indiquent qu'ils se composent de 34% sable et de 66% de fines (limon + argile) et donnent aussi un pourcentage des passants à 2  $\mu\text{m}$  qui varie entre 96,81 % et 99,06 % avec une moyenne de 98,12 % et un pourcentage des passants à 80  $\mu\text{m}$  compris entre 60,25 % et 71,95 % avec une moyenne de 66,21 %. Ces valeurs indiquent que le sol présente une granulométrie fine.

La limite de liquidité varie entre 44,04 % et 47,86 % avec une moyenne de 45,78 % et l'indice de plasticité ( $I_p$ ) varie entre 20,73 % et 27,29 % avec une moyenne de 24,92 %, de même l'indice de consistance varie 01,16 et 01,56 avec une moyenne de 01,33.

On remarque que toutes les valeurs trouvées sont peu dispersées pour le prélèvement effectué et semblent indiquer que le massif est homogène en profondeur.

La valeur du bleu de méthylène (VBS) est comprise entre 4,90 et 5,88 avec une moyenne de 5,47. D'après la norme française NF P 11-300, il s'agit d'un sol fin argileux peu plastique et la valeur de la surface spécifique totale (SST) qui est comprise entre 115,18  $\text{m}^2/\text{g}$  et 140,58  $\text{m}^2/\text{g}$  avec une moyenne de 127,77  $\text{m}^2/\text{g}$ . Cette valeur dépasse légèrement 100  $\text{m}^2/\text{g}$ , ce qui implique que notre argile est constituée essentiellement de minéraux de type vermiculite.

Les sols testés ont été identifiés Selon la classification LPC des sols (Magnan, 1980) compatible au système unifié de classification des sols (USCS) comme une argile peu plastique ( $A_p$ ), très consistante ( $I_c > 1$ ).

L'emploi en remblai ou en couche de forme en l'état naturel de cette argile n'est normalement pas envisagé. A sec, elle est très difficile à compacter puisque sa consistance varie de dure à très dure et, humide, elle est très collante. Cependant, son emploi peut éventuellement être décidé sur la base d'un traitement spécifique aux liants hydrauliques notamment à la chaux.

## 5.3 Essai mécanique

### 5.3.1 Essais Proctor normal

Les tableaux 5.15, 5.16 et 5.17 présentent les résultats de trois essais de Proctor normal. Les courbes correspondantes (A.10 à A.12) sont jointes en annexe.

**Tableau 5.15** : Résultats de l'essai Proctor normal n° 01.

Paramètres	Symboles	Valeurs				
		10%	12%	14%	16%	18%
Teneur en eau approximative	%	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule	g	1712,10	1712,1	1712,1	1712,1	1712,10
Volume du moule	cm <sup>3</sup>	956,04	956,04	956,04	956,04	956,04
Masse du sol humide avec moule	g	3430,60	3536,40	3563,70	3539,90	3518,54
Masse du sol humide	g	1718,50	1824,30	1851,60	1827,80	1806,44
Masse volumique humide	g/cm <sup>3</sup>	01,80	01,91	01,94	01,91	01,89
Masse de la tare	g	11,60	11,60	11,70	11,50	11,60
Masse du sol humide + tare	g	32,70	38,00	30,40	42,30	41,80
Masse du sol sec + tare	g	30,36	34,45	27,74	37,33	36,80
Masse d'eau	g	02,34	03,55	02,66	04,97	05,00
Masse du sol sec	g	18,76	22,85	16,04	25,83	25,20
Teneur en eau W	%	<b>12,50</b>	<b>15,53</b>	<b>16,56</b>	<b>19,24</b>	<b>19,84</b>
Masse volumique sèche; $\rho_d$	g/cm <sup>3</sup>	<b>01,60</b>	<b>01,65</b>	<b>01,66</b>	<b>01,60</b>	<b>01,58</b>

**Tableau 5.16** : Résultats de l'essai Proctor normal n° 02.

Paramètres	Symboles	Valeurs				
		10%	12%	14%	16%	18%
Teneur en eau approximative	%	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule	g	1712,10	1712,10	1712,10	1712,10	1712,10
Volume du moule	cm <sup>3</sup>	956,04	956,04	956,04	956,04	956,04
Masse du sol humide avec moule	g	3430,10	3486,60	3585,30	3531,20	3506,90
Masse du sol humide	g	1718,00	1774,50	1873,20	1819,10	1794,80
Masse volumique humide	g/cm <sup>3</sup>	01,80	01,86	01,96	01,90	01,88
Masse de la tare	g	11,40	11,60	11,60	11,50	11,80
Masse du sol humide + tare	g	38,30	47,80	49,10	38,00	46,20
Masse du sol sec + tare	g	35,50	43,80	44,05	33,88	39,89
Masse d'eau	g	02,80	04,00	05,05	04,12	06,31
Masse du sol sec	g	24,10	32,20	32,45	22,38	28,09
Teneur en eau W	%	<b>11,62</b>	<b>12,42</b>	<b>15,56</b>	<b>18,43</b>	<b>22,45</b>
Masse volumique sèche; $\rho_d$	g/cm <sup>3</sup>	<b>01,61</b>	<b>01,65</b>	<b>01,70</b>	<b>01,61</b>	<b>01,53</b>

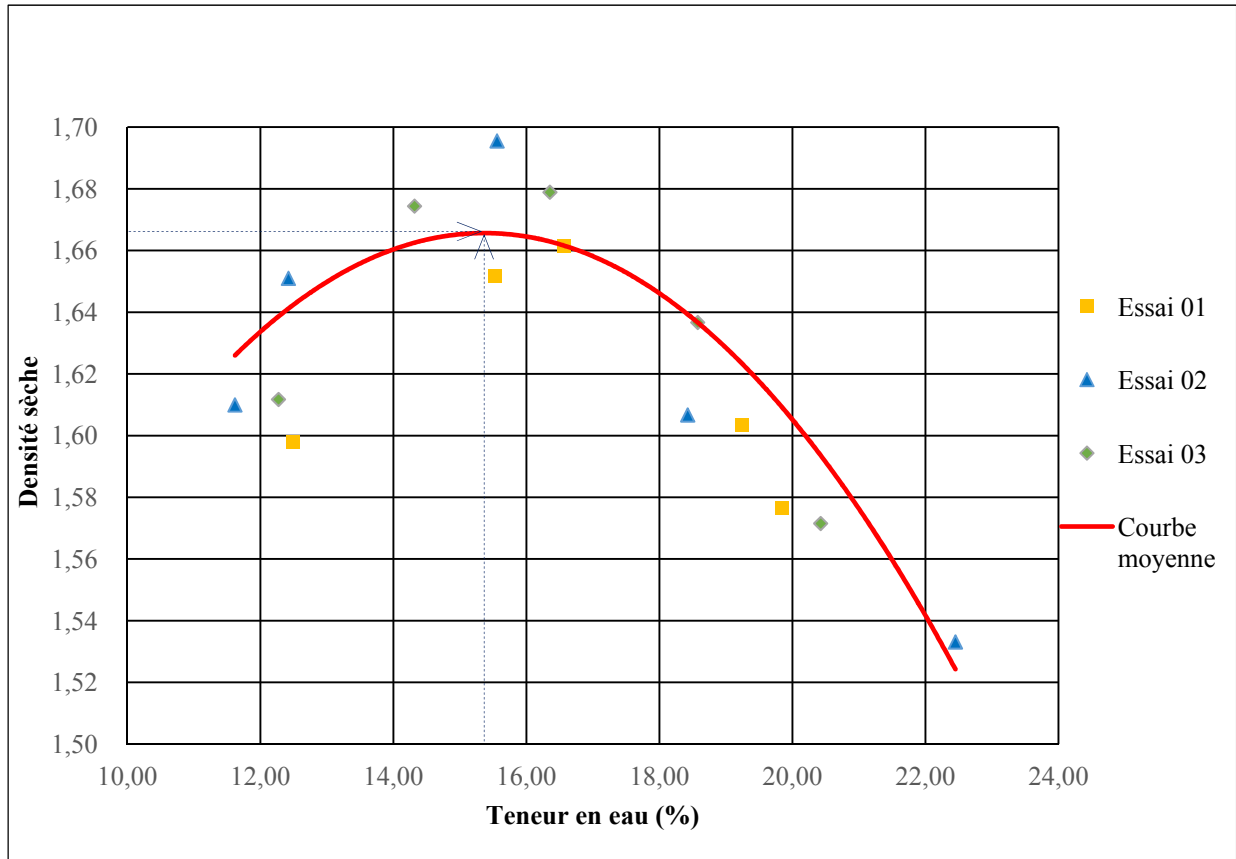
**Tableau 5.17** : Résultats de l'essai Proctor normal n° 03.

Paramètres	Symboles	Valeurs				
		10%	12%	14%	16%	18%
Teneur en eau approximative	%	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule	g	1712,10	1712,10	1712,10	1712,10	1712,10
Volume du moule	cm <sup>3</sup>	956,04	956,04	956,04	956,04	956,04
Masse du sol humide avec moule	g	3442,10	3542,10	3579,70	3567,50	3521,40
Masse du sol humide	g	1730,00	1830,00	1867,60	1855,40	1809,30
Masse volumique humide	g/cm <sup>3</sup>	01,81	01,91	01,95	01,94	01,89
Masse de la tare	g	11,70	11,70	11,60	11,80	11,50
Masse du sol humide + tare	g	49,70	51,70	58,70	54,60	41,70
Masse du sol sec + tare	g	45,55	46,69	52,08	47,90	36,58
Masse d'eau	g	4,154	5,010	6,620	6,705	5,122
Masse du sol sec	g	33,85	34,99	40,48	36,10	25,08
Teneur en eau W	%	<b>12,27</b>	<b>14,32</b>	<b>16,35</b>	<b>18,58</b>	<b>20,42</b>
Masse volumique sèche; $\rho_d$	g/cm <sup>3</sup>	<b>01,61</b>	<b>01,67</b>	<b>01,68</b>	<b>01,64</b>	<b>01,57</b>

Le tableau 5.18 résume les caractéristiques des essais de Proctor normal effectué sur le sol étudié. La figure 5.3 représente la courbe moyenne des trois essais.

**Tableau 5.18** : Résumé des résultats des essais Proctor normal.

Essai	Teneur en eau optimale $W_{opt}$ (%)	Densité sèche $\rho_d$
N° 1	15,70	1,66
N° 2	15,30	1,67
N° 3	15,60	1,68
Moyenne	<b>15,53</b>	<b>1,67</b>



**Figure 5.3 :** Courbe moyenne de compactage des trois essais de Proctor normal.

#### 5.4 Interprétation des résultats de compactage

Les essais de compactage Proctor normal effectués en laboratoire permettent de déterminer la densité sèche maximale correspondant à une teneur en eau optimale.

Il est à noter que tous les essais ont été réalisés en utilisant de l'eau distillée.

La valeur de la teneur en eau optimale comprise entre 15,30 % et 15,70 % a une valeur moyenne de 15,53% et la densité maximale varie entre 1,66 et 1,68 avec une valeur moyenne de 1,67.

#### **N. B. :**

Il est à signaler que lors de l'élaboration de notre travail expérimentale, nous avons rencontré des difficultés qui nous ont contraints à suspendre tous les essais, ce qui a influé directement sur l'avancement de notre travail, entre autre l'arrivée de la pandémie covid-19.

---

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

---

## **Conclusion générale**

Au terme de cette étude, il serait bien évidemment illusoire de prétendre avoir traité de manière exhaustive tous les aspects du comportement des sols salés. Toutefois, certains aspects physiques et mécaniques liés au phénomène de salinité ont pu être cernés sur la base d'une synthèse bibliographique faisant appel à des références signées et d'une étude expérimentale sur une argile naturelle prélevée sur le site de Chott El Hodna (Sebkha) près de la commune de Ain Khadra (wilaya de M'sila) classée comme une zone semi-aride et dont la géologie est caractérisée par des formations argileuses reconnues pour être considérés comme des sols difficiles qui posent des problèmes particuliers pendant la conception et la réalisation des ouvrages.

La synthèse bibliographique effectuée à partir de nombreuses références nationales (sur des sols salés algériens) et internationales (sur des sols salés provenant de diverses zones géographiques à travers le monde) a permis de souligner quelques affirmations concluantes dont les plus importantes sont les suivantes :

- La salinisation des sols affecte 3,2 million d'hectares de la surface globale de l'Algérie dont une bonne partie se trouve localisée dans les régions steppiques.
- Les études qui traitent l'effet des sels sur certaines caractéristiques géotechniques des sols salés notamment la teneur en eau, les limites d'Atterberg, les caractéristiques de compactage, les paramètres de compressibilité, leurs multitudes et leurs complexités démontrent les difficultés liées à la détermination des caractéristiques géotechniques de ces sols. Ces études ont montrées que les limites d'Atterberg diminuent en fonction de l'augmentation de la salinité (Mansour et al., 2008, Shariatmadari et al., 2011 et Ajalloeian et al., 2013). Pour le compactage certaines études montrent que la teneur en eau optimale diminue et le poids volumique sec optimal augmente en fonction de l'augmentation de la salinité (Mansour et al., 2008 et Alainachi et Al Obaidy, 2010), d'autres montrent qu'il n'y a pas de différence nette entre les caractéristiques de compactage lors de l'utilisation de l'eau distillée ou de l'eau salée (Al- Amoudi et al., 1992 et Ajalloeian et Mansouri, 2013).
- l'emploi des sols salés dans leur état naturel comme matériaux de remblais ou de couches de forme routières ou comme support de fondations des ouvrages géotechniques, est

normalement déconseillé. Il devient possible après traitement spécifique à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (ciments et liants spéciaux routiers : clinker Portland, cendres volantes, pouzzolanes naturelles, laitier granulé de hauts fourneaux, schistes calcinés, calcaire) à l'instar des sols médiocres et autres sols problématiques. Cependant, l'utilisation d'autres produits de traitement comme le sable (d'oued ou de dunes), les solutions salées, le bitume, la poussière de pierres, etc. n'a pas encore fait ses preuves à l'échelle de la pratique. Le choix du mode de traitement simple (à la chaux ou au ciment) ou mixte (à la chaux et au ciment) dépend d'un certain nombre de considérations techniques (sols trop humides ou trop secs, destinés à une utilisation en remblais ou en couches de forme routières), économiques, environnementales et écologiques. Mais, les modalités d'exécution du traitement des sols en place sont régies par les normes spécifiques en vigueur.

L'étude expérimentale effectuée avait pour finalité de vérifier les aspects physico-mécaniques évoqués ci-dessus et de caractériser le comportement d'une argile naturelle prélevée sur le site de Chott El Hodna de près de la commune de Ain Khadra dans la wilaya de M'sila en vue de son utilisation en construction routière. Le choix de ce site a été motivé en raison de son extension vers des zones à risque, où des désordres apparaissent fréquemment dans les infrastructures routières, voiries et réseaux divers et même dans les constructions civiles et industrielles de faible hauteur. Les résultats obtenus ont permis de dégager les conclusions suivantes :

- Les analyses granulométriques des échantillons de sol testés indiquent qu'ils se composent de 34% de sable et de 66% de fines (limon + argile) et donnent aussi un pourcentage des passants à 2 mm de 98,12 % et un pourcentage des passants à 80  $\mu\text{m}$  de 66,21 %. Ces valeurs indiquent que le sol présente une granulométrie fine.
- La limite de liquidité étant de 45,78 %, l'indice de plasticité ( $I_p$ ) vaut 24,92 % et l'indice de consistance est de 01,33. D'après l'abaque de plasticité de Casagrande c'est une argile peu plastique.
- La valeur du bleu de méthylène (VBS) est de 5,47. D'après la norme française NF P 11-300, il s'agit d'un sol fin argileux peu plastique et la valeur de la surface spécifique totale (SST) est de 127,77  $\text{m}^2/\text{g}$ . Cette valeur dépasse légèrement 100  $\text{m}^2/\text{g}$ , ce qui implique que notre argile est constituée essentiellement de minéraux de type vermiculite.
- On remarque que toutes les valeurs trouvées sont peu dispersées pour le prélèvement

effectué et semblent indiquer que le massif est homogène en profondeur.

- Les sols testés ont été identifiés selon la classification LPC des sols (Magnan, 1980) compatible au système unifié de classification des sols (USCS) comme une argile peu plastique (Ap), très consistante ( $I_c > 1$ ).
- L'essai de compactage Proctor normal a permis de déterminer la valeur moyenne de la teneur en eau optimale qui est de 15,53% et la densité maximale qui est de 1,67.

Il est à noter que la majorité des études ne prennent pas en considération l'effet des sels sur la détermination de la teneur en eau des sols salés car les sels précipités sont inclus dans la phase solide du sol et leur contribution à l'état fluide est ignorée.

Malgré que plusieurs chercheurs se soient intéressés à la caractérisation des sols salés, il demeure qu'il reste toujours des zones d'ombre non illustrés. Pour la majorité des études, on remarque une concentration sur la méthodologie de détermination des caractéristiques, physiques et mécaniques, de ces sols riches en sels.

---

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

## Références bibliographiques

- AFES (2008). Référentiel pédologique. Association Française pour l'Etude du Sol. Ed. Quæ.
- AFNOR (1991) Norme Française : **NF P 94-050** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des sols – Méthode par étuvage.
- AFNOR (1991) Norme Française : **NF P 94-053** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire – Méthode du moule.
- AFNOR (1992) Norme Française : **NF P 94-057** : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie
- AFNOR (1993) Norme Française : **NF P 94-051** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.
- AFNOR (1993) Norme Française : **NF P 94-068** Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche.
- AFNOR (1994) Norme Française : **NF P 94-071-1**Sols : Reconnaissance et Essais – Essai de cisaillement rectiligne à la boîte – partie 1 cisaillement direct.
- AFNOR (1996) Norme Française : **NF P 94-041** : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide
- AFNOR (1997) Norme Française : **NF P 94-078**Sols : Indice CBR immédiat— Indice CBR après immersion — Indice Portant Immédiat
- AFNOR (1999) Norme Française : **NF P 94-093** Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.
- Ajalloein R., Mansouri H., Sadeghpour A.H. (2013). Effect of saline water on getechnical 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 V 15, Bund. A.

- 
- Al-Amoudi O.S.B., Sahel N.A., Zaghloul R.N. et al (1992). Response of sabkha to laboratory tests : A case study. *Engineering Geology* 33: 11-125.
  - Aldermoch, M. (1976). *Influence des solutions salines sur les propriétés physiques et l'évolution des minéraux phylliteux des sols système*. Thèse doc.
  - Al-Mukhtar M., Lasledj A., Alcover J.F. Behavior and mineralogy changes in lime treated expansive soil at 20°C. *Applied Clay Science, Elsevier* 2010; 50(2):191-198.
  - Al-Rawas A.A., Goosen M.F.A., editors. *Expansive Soils: Recent advances in characterization and treatment*. Taylor & Francis Group; 2006, p. 317-339.
  - Al-Rawas A.A., Hugo A.W., Al-Sarmi H. Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. *Building and Environment, Elsevier* 2005; 40:267-281.
  - Amin A. (2004). Etude comparative des propriétés géotechniques des Sabkhas côtiers d'Arabie saoudite et de leurs effets dangereux. *Bulletin de géologie de l'ingénieur et de l'environnement* 63 (4) : 309-314.
  - Aubert G. (1983). *Observation sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou sal-sodiques*. Cashors Tom. Ser. Pd Vol. n°1
  - Baise D. (1988). Guide d'analyse courante en pédologie, choix, expression, interprétation, INRA. Paris.
  - Baize, D., & Girard, M. (1995). *Référentiel Pédologique*. INRA Editions.
  - Bell F.G. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng. Geol. Env., Springer* 1996; 42:223-237.
  - Bell F.G. Lime stabilization of clay soils. *Eng. Geol. Env., Springer* 1989;39(1):67-74.
  - Benabdallah E. (2010). Mouvement des eaux souterraines et des ions majeurs dans une argile Champlain depuis sa formation. Thèse de doctorat en génie minéral, Université de Montréal.
  - Boulaine, J. (1971). *hydropédologie, des écoles nationales de génie rurale, des eaux et des forêts*. Alger.
  - Brooks R.M. Soil stabilization with Fly Ash and Rice Husk Ash. *Int. J. of Research and Reviews in Applied Sciences* 2009;1(3):209-217.
  - CRR. *Recommandations du Centre de Recherches Routières*, Belgique, 2004.

- Derdour, H. (1981). *Contribution à l'étude de l'influence du taux de sodium échangeable sur le comportement des sols au compactage*. Algérie: thèse Magister, I.N.A.
- Derriche Z, Lazzali F. Analyse des mécanismes de stabilisation d'un sol gonflant par apport de chaux sous différentes formes. *Eng. Geol. Env., Springer* 1997;79-84.
- Douaoui A., Gascuel-Odoux C. et Walter C. (2004). *Infiltrabilité et érodibilité de sols salinés de la plaine du Bas Chéllif (Algérie)*. Etude et Gestion des Sols, Volume 11, 4, 2004, 379-392.
- Duchauffour P., 1983 : Pédogénèse et classification. 2<sup>ème</sup> édition. Masson. Paris, 466 p.
- Duchauffour P. (1977). *Pédologie. Pédogénèse et classification. Tome 1, Ed. Masson, Paris, 477p.*
- Duchauffour, P. (1988). *Abrégés de pédologie 2<sup>ème</sup> édition. Masson (Vol. 2)*. Paris. Milan. Barcelone .Mexico
- Durant J.H. (1983). Les sols irrigables. Agence de coopération culturelle et technique. Presse Universitaire de France. Paris.
- Duthil, J. (1973). *Elément d'écologie d'agronomie*. T3.Ed,J.B. Bailliere parie.
- FAO. (2005). *utilisation des engrais par culture en Algérie*.
- Feydman S., Charrah J., Goretsky L. (2008). Geotechnical properties of evaporate soils of the Dead Sea area. *Eng Geol* 101:236-244.
- Frydman S., Charrach J., Goretsky I. (2008). Geotechnical properties of evaporate soils of the Dead Sea area. *Eng Geol* 101:236-244.
- Halitim, A. (1973). *Etude expérimentation de l'amélioration des sols sodiques d'Algérie en vu de leur mise en culture* . Renne: thèse de 3eme cycle, Univ de Renne.
- Halitim, A. (1988). *Sols des régions arides d'Algérie*. Alger: Opu , Alger.
- Harichane K., Ghrici G., Kenai S., Grine K. Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils. *Geot. Geol. Eng., Springer* 2011;29:759-769.
- Holtz R. D., Kovacs W. D. (1981). An introduction to geotechnical engineering. Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs.
- INSID (2008) Sols salins en Algérie. Institut National des Sols, de l'Irrigation et du Drainage.

- Khabbaz H., Fatahi B. Chemical stabilization of closed land fill sites using chemical agents. In: Anagnostopoulos A et al, editors. *Proc. 15<sup>th</sup> Eur. Conf. Soil Mech. Geot. Eng.* IOS Press; 2011, p. 1777-1782.
- Khemissa M., Mahamedi A., Mekki L. Mécanique des sols problématiques (enjeu national pour un développement durable). Communication au colloque Algéro-Canadien sur l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, Université de Tlemcen, 24-26 février 2014.
- Khemissa M., Mekki L., Bakir N. Comportement oedométrique des argiles expansives de M'sila (Algérie). In: Magnan JP, Cojean R., Cui Y.J., editors. *SEC 2008: Symposium international sécheresse et constructions.* Presses du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées France; 2008, p. 229-234.
- Kidari H. (1991). Contribution à l'étude de l'influence de l'ESP sur le compactage. Thèse de Magister, INRAA. Alger
- Kim CK., Cho WB., Lee SL., Choi WJ. (2008). A study on the consolidation characteristic of cohesive soil by plastic index. *J. Korean Geotech. Society.*, 24(8): 99-109.
- LCPC-SETRA. *Guide des terrassements routiers : Réalisation des remblais et des couches de forme.* Guide technique France; 2000b.
- LCPC-SETRA. *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques: Application à la réalisation des remblais et des couches de forme.* Guide technique, France; 2000a.
- Louafi B., Bahar R. Sand: an additive for stabilization of swelling clay soils. *Int. J. Geosciences* 2012;3:719-725.
- Madani DJ. (2008) Relation entre le couvert végétal et les conditions édaphiques en zone à déficit hydrique. Mémoire de magister en sciences agronomiques. Université de El Hadj Lakhdar, Batna.
- Magnan J.P. Classification géotechnique des sols : A propos de la classification LPC. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées France* 1980;105:49-52.
- Mahamedi A. (2014) : Caractérisation et traitement des sols gonflants compactés en vue de leur utilisation en construction routière. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf – M'sila.
- 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.

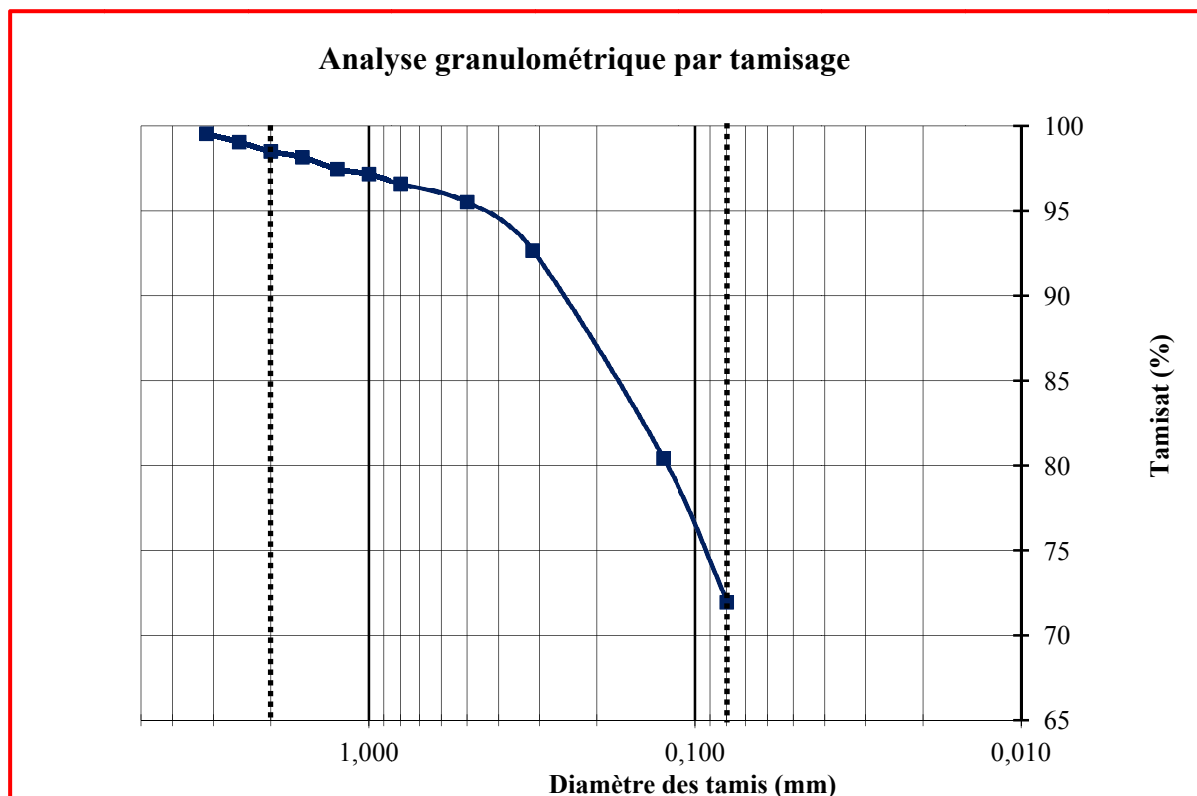
- 
- Mathieu, Pieltain, C., & F. (2003). *Analyse chimique des sols*. Paris: tec et doc, Lavoisier.
  - Mellas M., Hamdane A., Benmeddour D., Mabrouki A. Improvement of the expansive soils by the lime for their use in road works. In: *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Cong. Adv. Civ.* Middle East Technical University Ankara Turkey; 2012, p. 1-8.
  - Mohamedzein Y.E.A., Al-Rawas A.A. Cement-Stabilization of Sabkha soils from Al-Auzayba, Sultanate of Oman. *Geot. Geol. Eng., Springer* 2011; 29:999-1008.
  - Morel G. Etude en laboratoire du traitement à la chaux et au ciment des sols fins. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées France* 1984;133:63-70.
  - Nalbantoglu Z. Lime stabilization of expansive clay. In: Al-Rawas A.A., Goosen M.F.A., editors. *Expansive Soils: Recent advances in characterization and treatment*. Taylor & Francis Group; 2006, p. 341-348.
  - Noorany L. (1984). Phase relations in marine soils. *J. Geotech Eng ASCE* 110(4):539-543.
  - Oustani M., 2006. Contribution à l'étude de l'influence des amendements organiques sur les propriétés microbiologiques des sols sableux non salés et salés dans les régions Sahariennes (Cas de Ouargla) .Thèse Magister. Université Ouargla. 187p.
  - Ramadas T.L., Darga Kumar N., Yesuratnam G. Study of swelling and strength characteristics of expansive soil treated with stone dust and fly ash. In: Anagnostopoulos A. et al, editors. *Proc. 15<sup>th</sup> Eur. Conf. Soil Mech. Geot. Eng.* IOS Press; 2011, p. 659-664.
  - Robert, M. (1996). *Le sol interface dans l'environnement ressource pour le développement*. Paris: Masson.
  - Routes 89. Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme. *Documentation technique*, Routes n°89, 2004, p. 7-14.
  - Seed H.B., Woodward R.J., Lundgren R. Prediction of swelling potential for compacted clays. *J. Soil Mech. Found. Eng. Div. ASCE* 1962; 88(SM3):53-87.
  - Servant M. (1975). Etude pédologique des sols halomorphes. Montpellier : Thèse Doc. Univ. Montpellier.
  - Servant M., (1978). La salinité dans le sol et les eaux caractérisation et problèmes d'irrigation drainage. *Bull B.R G. M. sect. III. N°2* : 123-142.
  - Shariatmadari N., Salami M., Fard M. K. (2011). Effect of inorganic salt solutions on some geotechnical properties of soil-bentonite mixtures as barriers. *Int J. Civ Eng* 9:103-110.

- 
- Sharma N.K., Swain S.K., Sahoo U.C. Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation. *Geot. Geol. Eng., Springer* 2012; 30:1197–1205.
  - Stavridakis E.I. Stabilization of problematic soils using cement and lime. In: Al-Rawas A.A., Goosen M.F.A., editors. *Expansive Soils: Recent advances in characterization and treatment*. Taylor & Francis Group; 2006, p. 385-397.
  - Szabolcs I. (1989) Salt-affected Soils. CRC Press Inc., Florida, 274 p.
  - Terzaghi K., (1943). Theoretical soil mechanics. John Wiley and Sons, New York.
  - Tonož M.C., Gockceoglu C., Ulusay R. Stabilization of expansive Ankara Clay with lime. In:
    - Tonož M.C., Ulusay R., Gockceoglu C. Effects of lime stabilization on engineering properties of expansive Ankara Clay. *Eng. Geol. for Infrastructure Planning in Europe* 2004; 104:466-474.
  - USSL (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. United State Salinity Laboratory Staff, US Departement of Agriculture, Handbook n°60, U. S. Gov. Print. Office, Washington DC.
  - Yukselen-Aksoy Y., Kaya A., Oren A.H. (2008). Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays. *Eng Geol* 102:54-61.
  - Demnati F. (2013) Biodiversité et enjeux socio-économiques des lacs salés (Cotts et Sebkhass) d'Algérie : cas du Chohh Merouane et Melghir. Thèse de doctorat en sciences agronomiques. Université Mohamed Khider, Biskra.

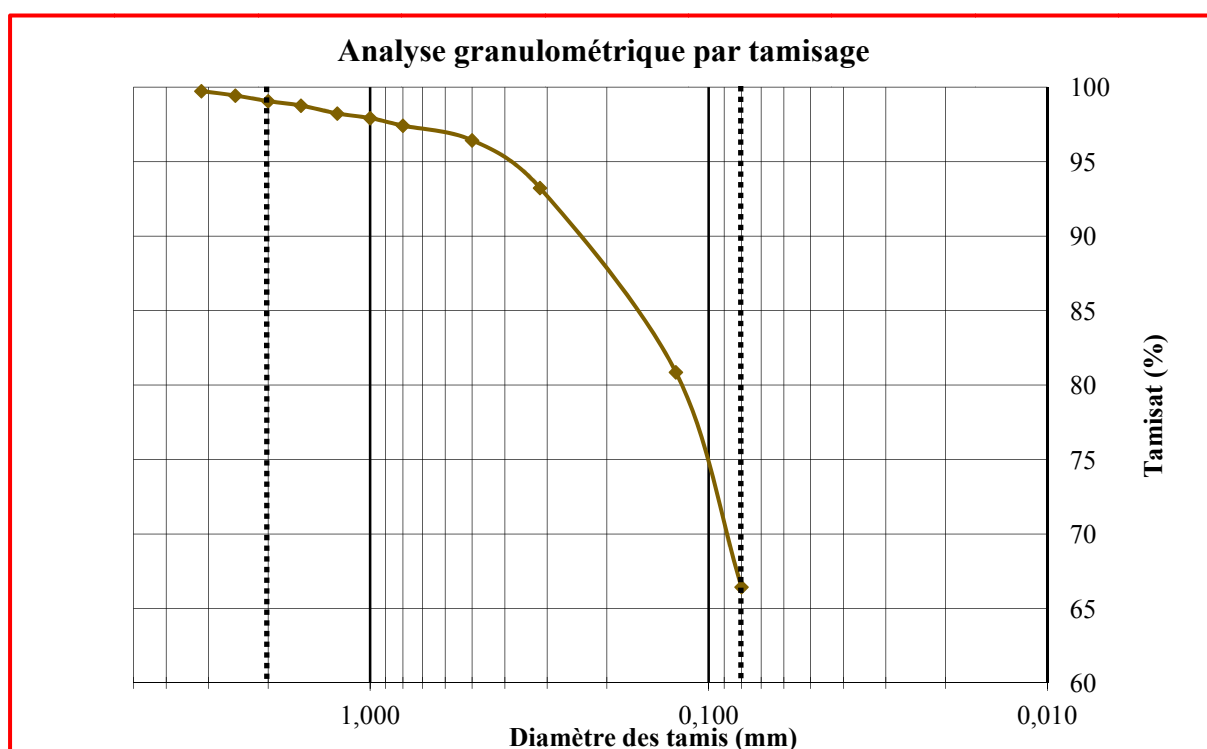
---

# **ANNEXE**

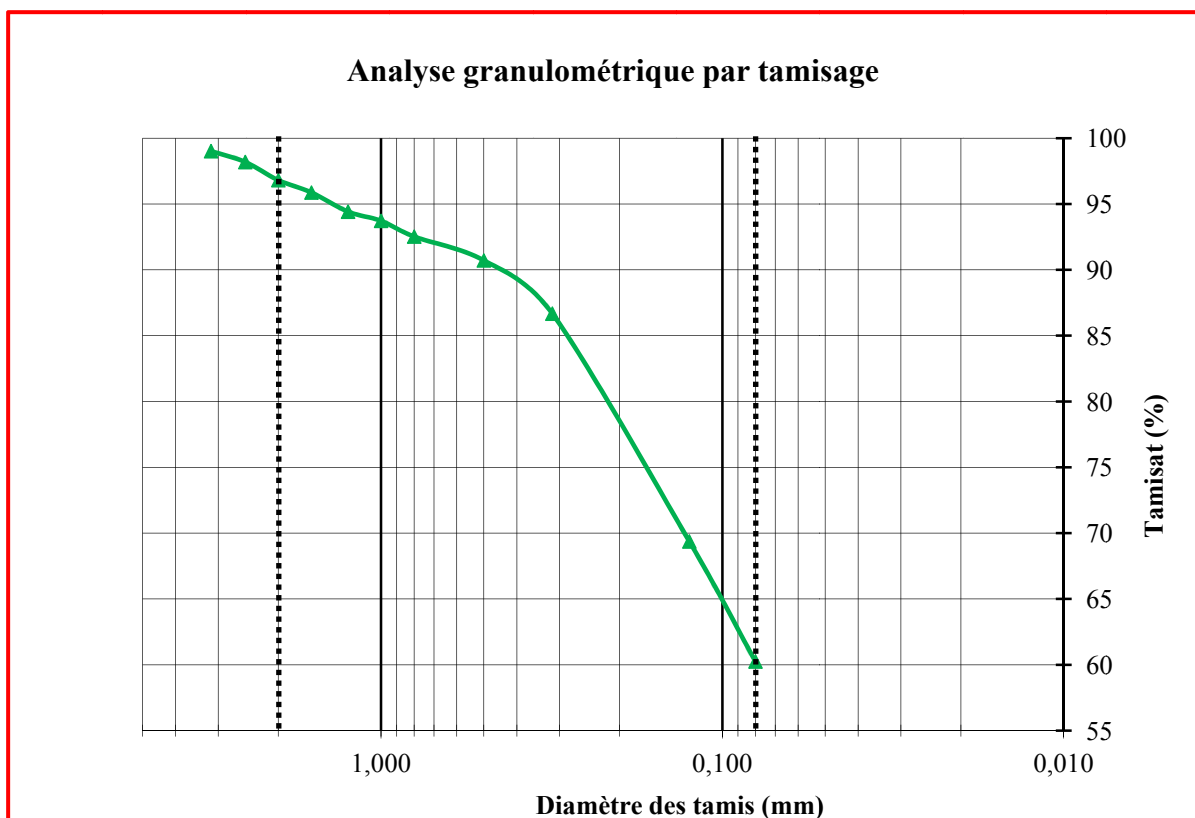
---

Annexe

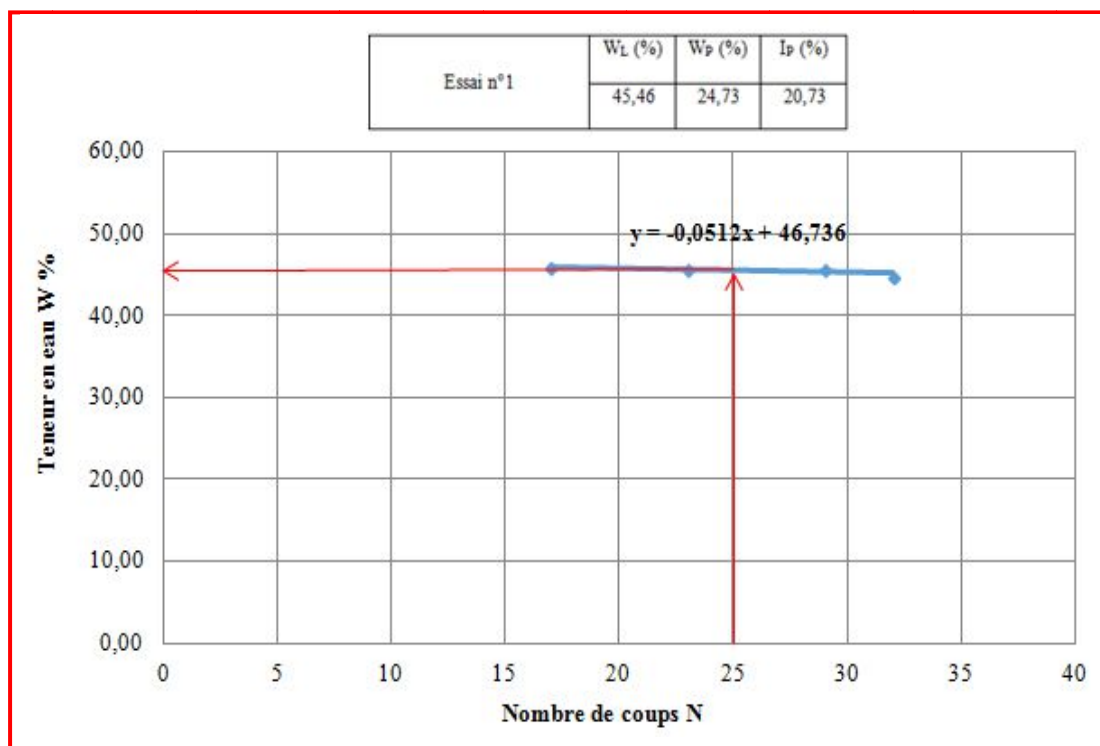
**Figure A.1 :** Courbe granulométrique de l'essai n° 01.



**Figure A.2 :** Courbe granulométrique de l'essai n° 02.



**Figure A.3** : Courbe granulométrique de l'essai n° 03.



**Figure A.4** : Limite de liquidité de l'essai n° 01.

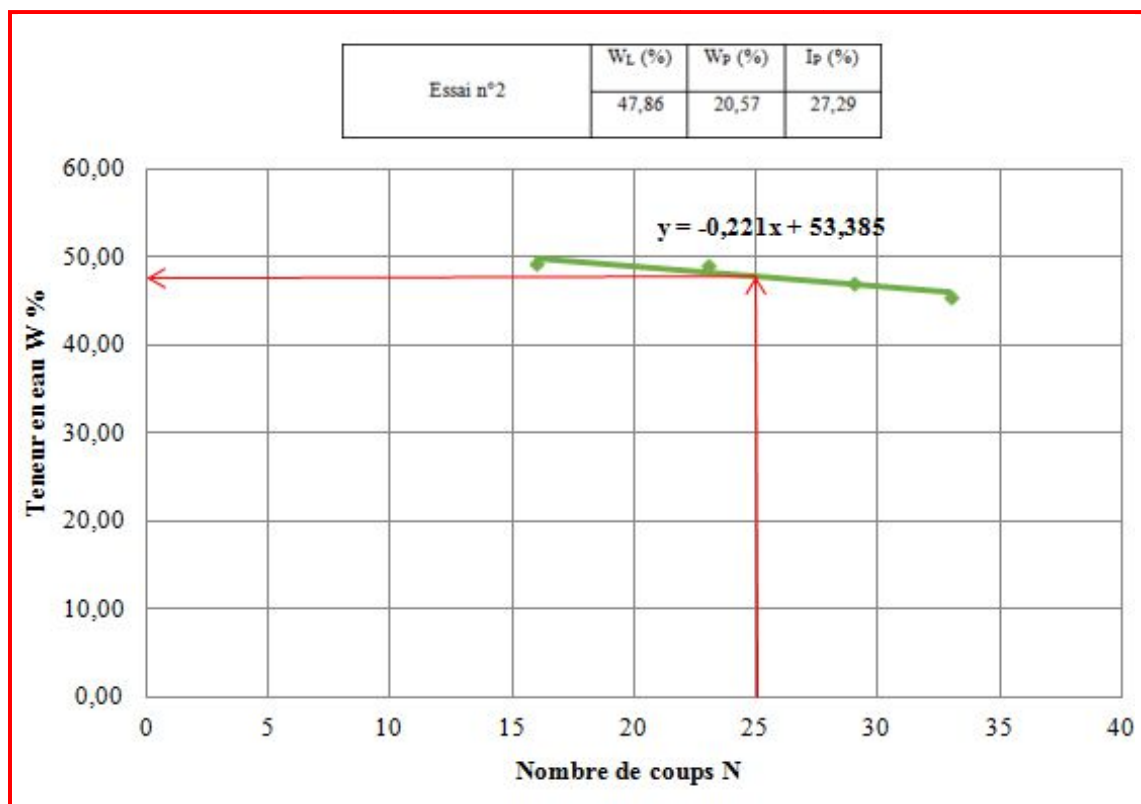


Figure A.5 : Limite de liquidité de l'essai n° 02.

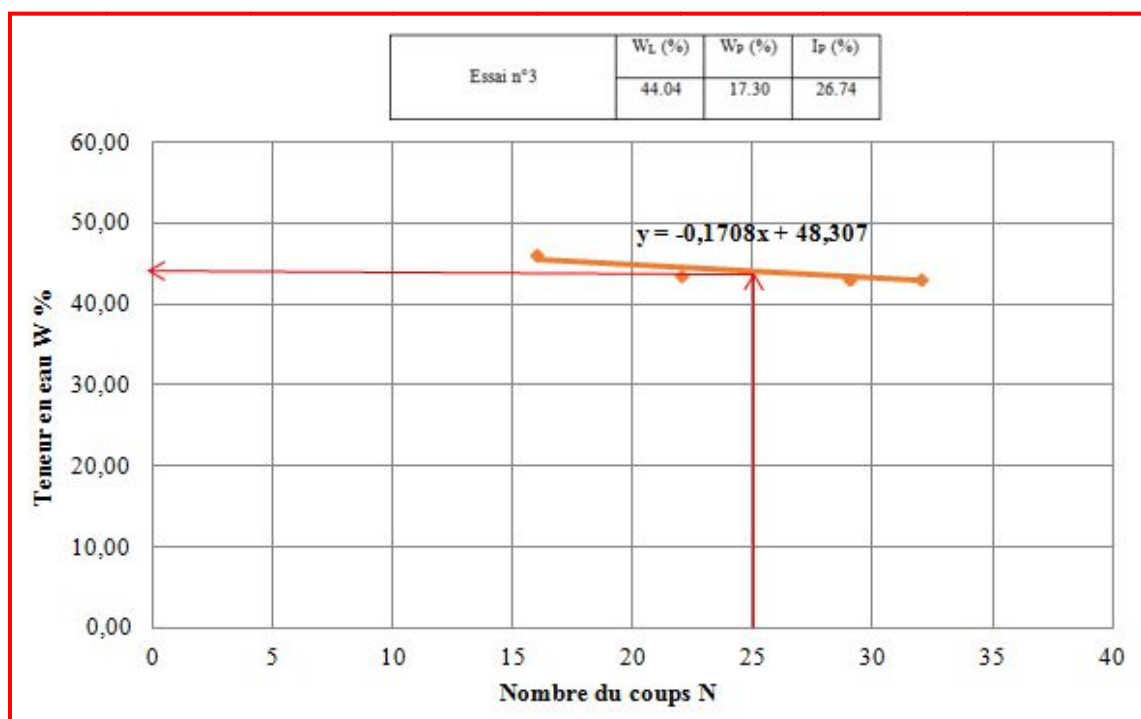


Figure A.6 : Limite de liquidité de l'essai n° 03.

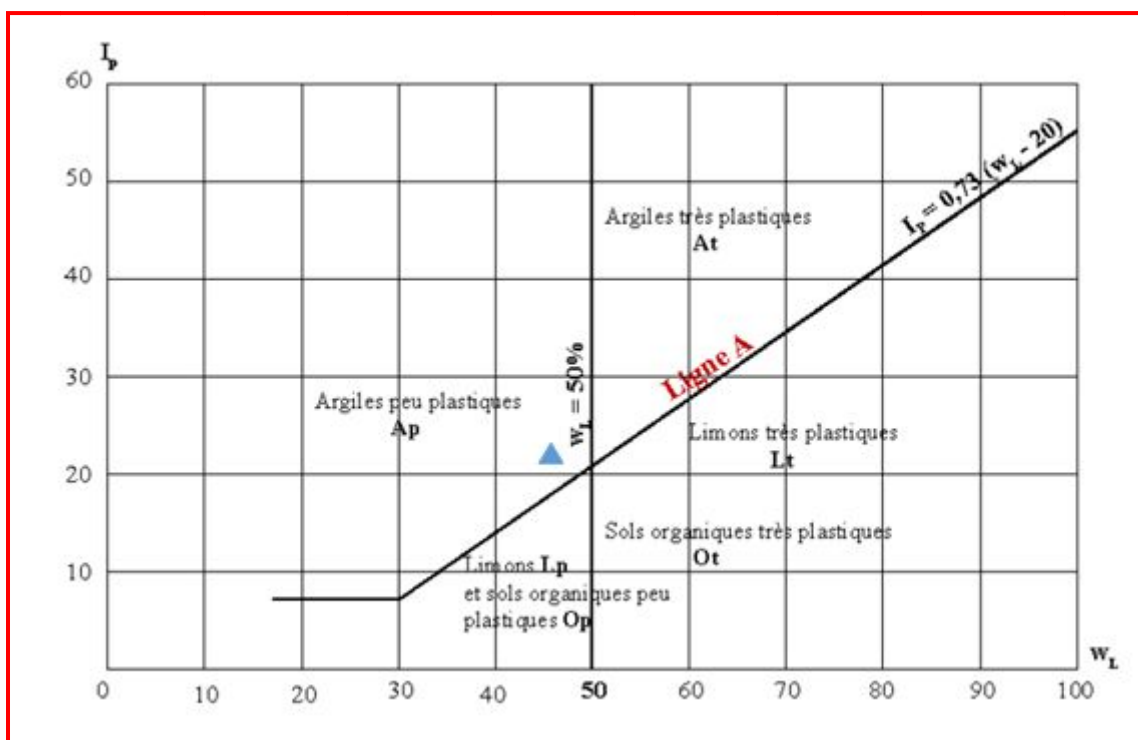


Figure A.7 : Abaque de Casagrande relatif à l'essai n°01.

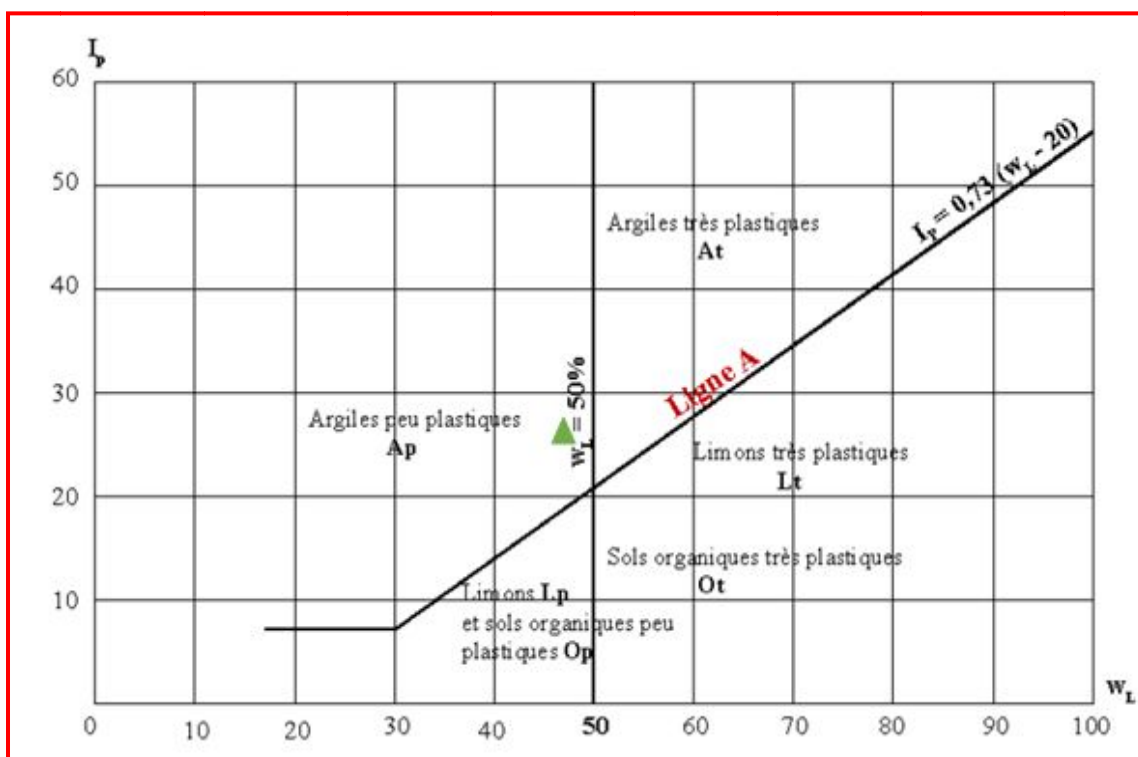


Figure A.8 : Abaque de Casagrande relatif à l'essai n°02.

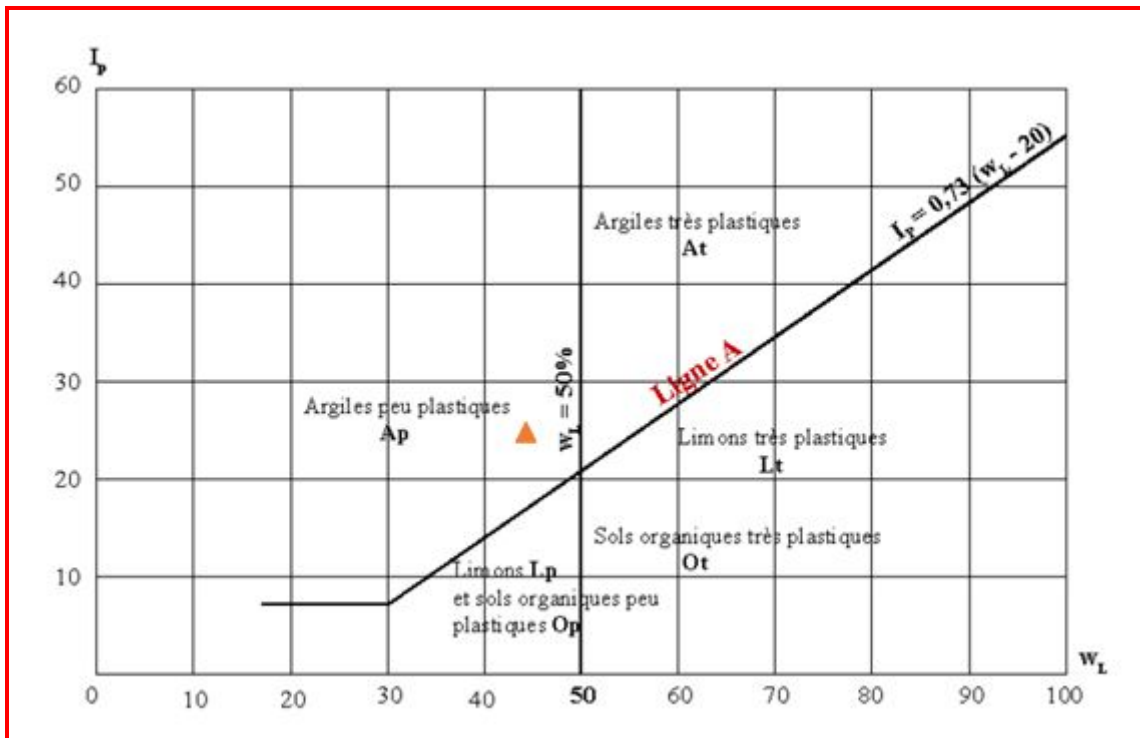


Figure A.9 : Abaque de Casagrande relatif à l'essai n°03.

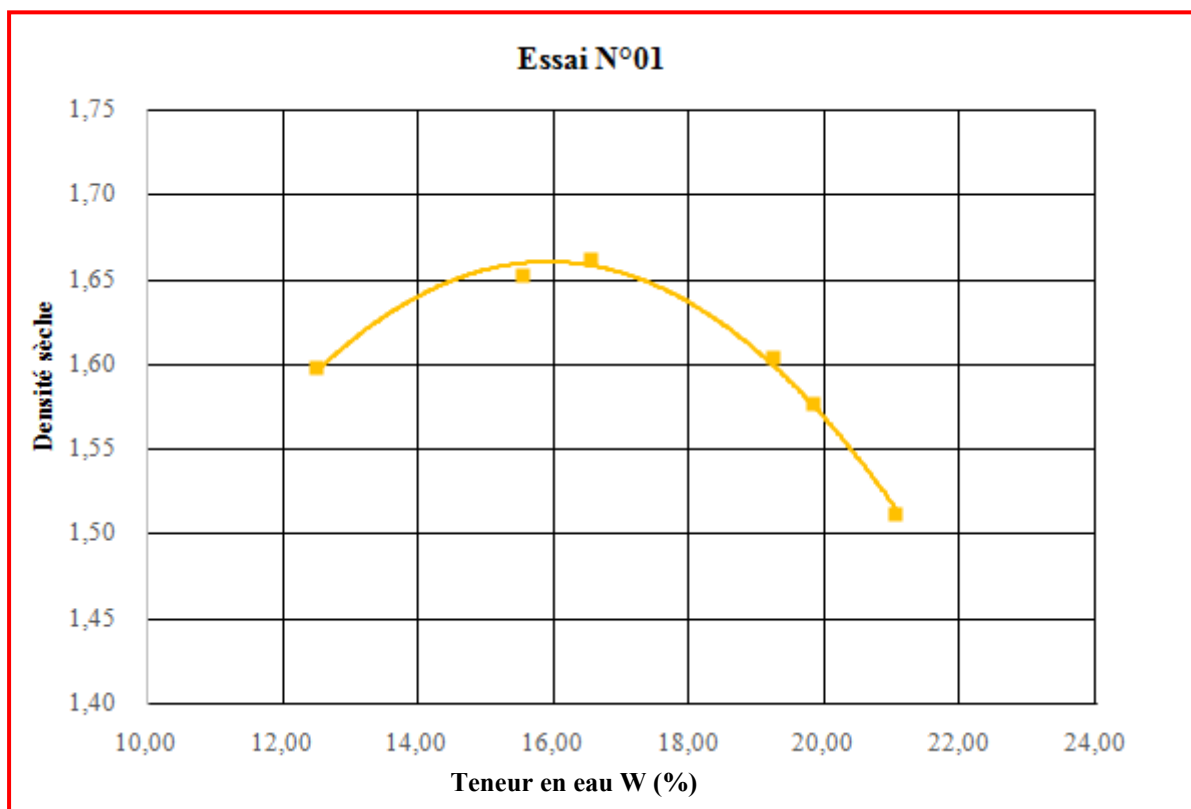
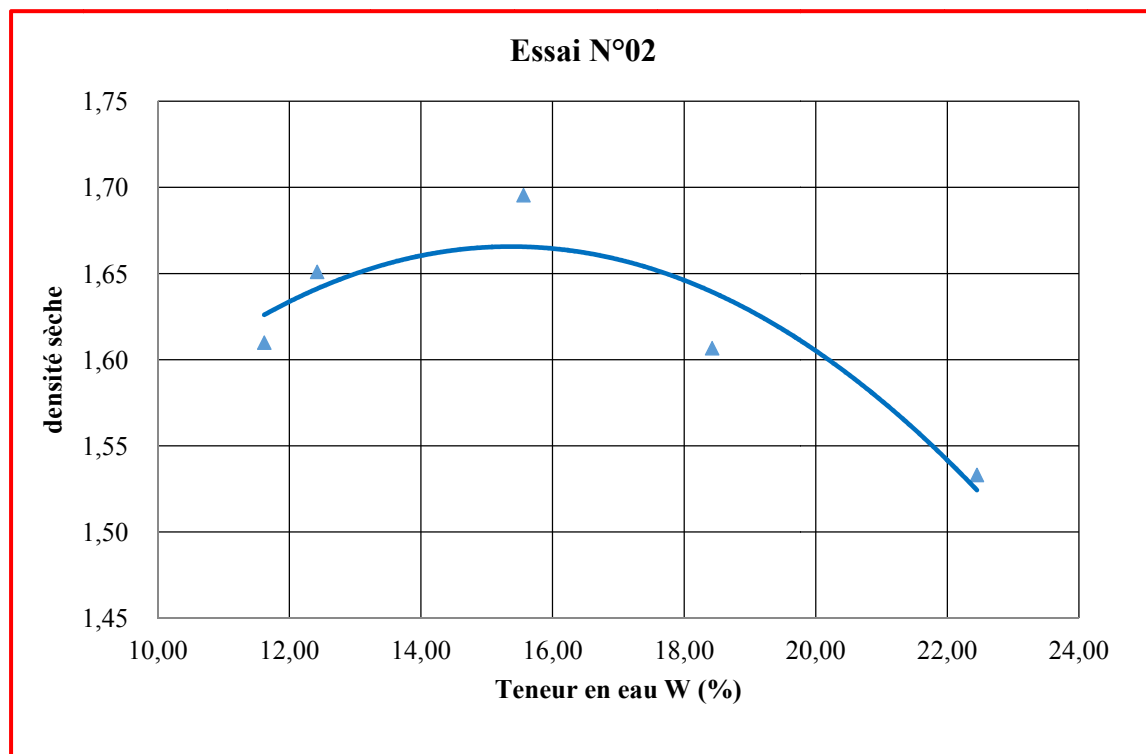
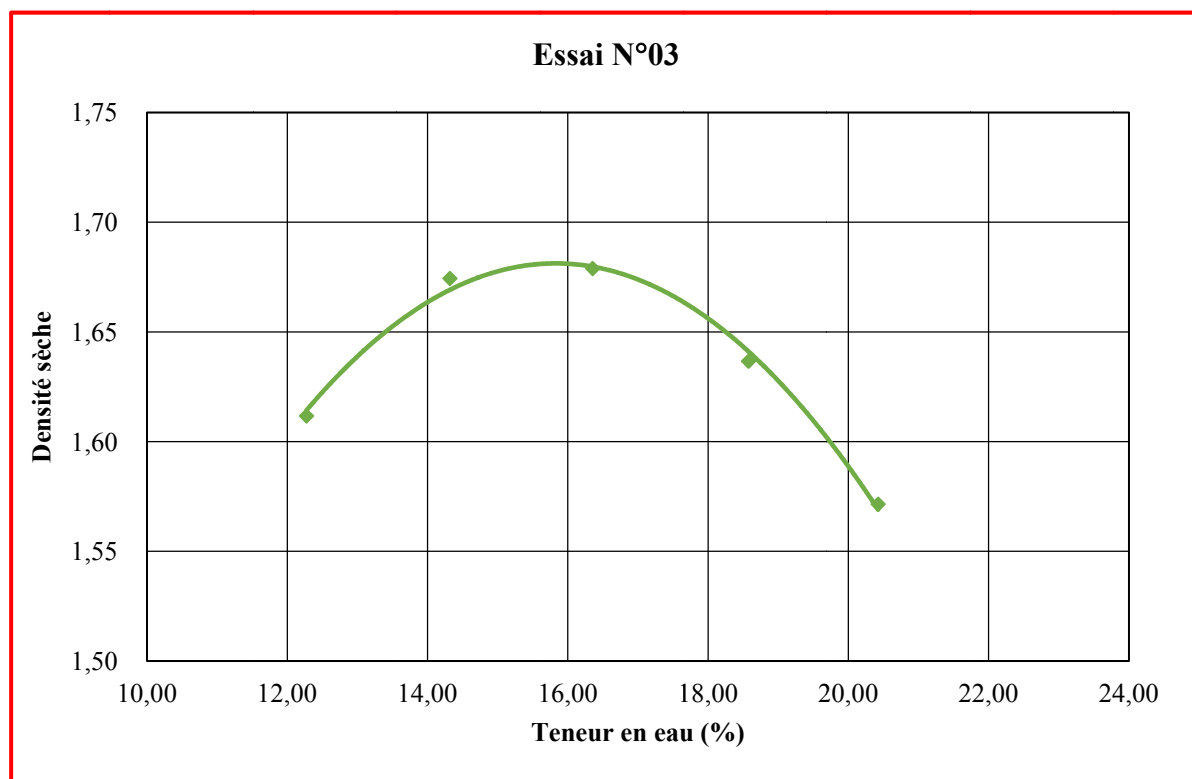


Figure A.10 : Courbe de l'essai Proctor normal n°01.



**Figure A.11** : Courbe de l'essai Proctor normal n°02.



**Figure A.12** : Courbe de l'essai Proctor normal n°03.