

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 au ciment
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 :

OKREFI Aymen

SEGHIRI Nouredine

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 au ciment
des sols du Chott El Hodna
(wilaya de M'sila)**

Promotion : 2020

Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant qui nous a donné la santé, la patience, la puissance et la volonté pour réaliser ce mémoire.

*Nous remercions chaleureusement nos promoteurs **Mr KHEMISSA Mohamed** et **Mr MAHAMEDI Abdelkrim** pour leur aide et leur encadrement, leurs encouragements et leurs orientations continu lors de l'élaboration de ce travail.*

Nous tenons également à remercier profondément nos professeurs, qui nous ont enrichis de connaissances ainsi que l'ensemble du personnel du département de génie civil.

Enfin, Nous tenons à remercier toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Merci

Dédicaces

Je dédie ce projet de fin d'étude en premier lieu à mes parents qui m'ont aidé et soutenu durant toutes ces longues années d'étude. A mes frères et ma sœur et tous mes amis et à tous ceux que j'ai connus au cours de mon cursus universitaire.

SEGHIRI Nouredine

Je dédie ce travail à mes chers parents, mes chères sœurs, mes oncles et tantes, mon cher frère Zemouli Mohamed, mon ami Seghiri Nouredine, à toute ma famille sans exception, à mes enseignants et encadreurs Messieurs KHEMISSA Mohamed et MAHAMEDI Abdelkrim, à tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin, à tout mes amis et surtout mes camarades de la promotion 2020, à tous ceux que j'aime.

OKREFI Aymen

SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des principales notations utilisées	
Introduction générale.....	1

Première partie

Synthèse Bibliographique

Chapitre 1. 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
1.4. Classification des sols salés	9
1.5. Effet de la salinité et la sodicité sur le sol	11
1.6. Méthodes expérimentales d'identification et de caractérisation des sols salés	12
1.7. Conclusion	20
Chapitre 2. Traitement des sols	
2.1. Objectifs du traitement	22
2.2 Techniques de traitement	23
2.3. Traitement chimique	23
2.4 Traitement chimique par ajout de ciment	26
2.5 Techniques de réalisation des travaux de traitement	27
2.6 Les ciments	27

Deuxième Partie
Etude Expérimentale

Chapitre 3. Description du site étudié

3.1 Contexte de l'étude	31
3.2 Description de la région d'étude	33
3.3 Aspect géographique et administratif	34
3.4 Prélèvement d'échantillons	35

Chapitre 4. Programme expérimental et procédures d'essais

Introduction	36
4.1 Liste des essais	36
4.2 Les essais d'identifications	37
4.3 Essai mécanique	41

Chapitre 5. Présentation et analyse des résultats d'essais

Introduction	43
5.1 Rappel	43
5.2 Les procédures utilisées pour le séchage du sol	43
5.3 Les essais d'identifications	44
5.4 Interprétation des résultats des essais d'identification	55
5.5 Essai mécanique	56

Conclusion générale	61
----------------------------------	-----------

Remarque

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.

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 (Madani, 2008).
- Figure 1.2 :** Situation géographique des Chotts et Sebkhass en Algérie (Demnati, 2013).
- Figure 1.3 :** Analyse granulométrique du sol de Sebkhass (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 :** schéma récapitulatif des quatre méthodes de fabrication du ciment.
- Figure 3.1 :** Régime mensuel de précipitations à la station de M'sila au cours de la période (1980 – 2016).
- Figure 3.2 :** Régime mensuel de température à la station de M'sila au cours de la période (1980 – 2016).
- Figure 3.3 :** Chott El-Hodna en période d'hivernale.
- Figure 3.4 :** Chott El-Hodna en période d'été.
- Figure 3.5 :** Localisation de Chott El-Hodna par rapport aux communes de M'sila.
- Figure 3.6 :** Site de prélèvement des échantillons d'essai.
- Figure 4.1 :** Détermination du poids volumique humide.
- Figure 4.2 :** Appareillage d'analyse granulométrique (tamisage).
- Figure 4.3 :** Représentation des limites d'Atterberg.
- Figure 4.4 :** Appareillage de limites d'Atterberg.
- Figure 4.5 :** appareillage de l'essai au bleu de méthylène.
- Figure 4.6 :** Les étapes de l'essai au bleu de méthylène.
- Figure 4.7 :** Valeurs de bleu de quelques sols.
- Figure 4.8 :** Appareil essai Proctor (compacteur automatique).
- Figure 5.1 :** courbe d'analyse granulométrie par tamisage de l'essai 01.
- Figure 5.2 :** courbe d'analyse granulométrie par tamisage de l'essai 02
- Figure 5.3 :** courbe d'analyse granulométrie par tamisage de l'essai 03
- Figure 5.4 :** Courbe de l'analyse granulométrique par tamisage.

Figure 5.5 : Courbe de limite de liquidité WL en fonction de nombre de coups essai 01.

Figure 5.6 : Courbe de limite de liquidité WL en fonction de nombre de coups essai 02.

Figure 5.7 : Courbe de limite de liquidité WL en fonction de nombre de coups essai 03.

Figure 5.8 : Essai Proctor normal (essai 01).

Figure 5.9 : Essai Proctor normal (essai 02).

Figure 5.10 : Essai 03 Proctor normal (essai 03).

Figure 5.11 : Résultats des essais 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 (USSSL, 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** : Les domaines de plasticité.
- Tableau 4.2** : Les domaines de consistance.
- Tableau 5.1** : Détermination de la teneur en eau et de la masse volumique sèche et humide.
- Tableau 5.2** : Granulométrie par tamisage de l'essai n°1
- Tableau 5.3** : Granulométrie par tamisage de l'essai n°2
- Tableau 5.4** : Granulométrie par tamisage de l'essai n°3
- Tableau 5.5**: Récapitulatif des résultats des essais de l'analyse granulométrique.
- Tableau 5.6** : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n°1.
- Tableau 5.7** : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n°1
- Tableau 5.8** : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n°2
- Tableau 5.9** : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n°2.
- Tableau 5.10** : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n°3.
- Tableau 5.11** : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n°3.
- Tableau 5.12** : Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg.
- Tableau 5.13** : Valeurs au bleu de méthylène par l'essai à la tâche.
- Tableau 5.14** : des informations sur l'eau distillée utilisée
- Tableau 5.15** : Caractéristiques d'identification du sol témoin étudié.
- Tableau 5.16** : Masses volumiques sèches et teneurs en eau du sol témoin de l'essai 01
- Tableau 5.17** : Masses volumiques sèches et teneurs en eau du sol témoin essai 02.
- Tableau 5.18** : Masses volumiques sèches et teneurs en eau du sol témoin essai 03
- Tableau 5.19** : Masses volumiques sèches et teneurs en eau moyennes du sol témoin
- Tableau 5.20**: Résumé des résultats des essais Proctor normal.

LISTE DES NOTATIONS

CE : La conductivité électrique

PH : Le potentiel hydrogène

ESP : Le taux de sodium échangeable

SAR : Sodium Absorption Ration

M_w : La masse de l'eau

M_d : La masse des grains solides

W_L : La limite de liquidité

W_P : La limite de plasticité

I_p : Indice de plasticité.

I_c : Indice de consistance

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

V_{cc} : volume de la solution utilisée

VBS : Valeur du bleu

S.S.T : Surface spécifique totale.

ρ_h : La masse volumique humide

ρ_d : La masse volumique sèche

$\rho_{d\ opt}$: La masse volumique sèche optimum

W : Teneur en eau

W_0 : Teneur en eau initiale

W_{NAT} : Teneur en eau naturelle

$W_{opt\ n}$: La teneur en eau à l'optimum Proctor normal

$\rho_{d\ opt\ n}$: La masse volumique sèche à l'optimum 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 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. Les chaux aériennes principalement calciques (chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux), les ciments et les liants spéciaux routiers font partie des produits de traitement les plus utilisés. 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 connus 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 surcroît, les sols salés abritent d'autres 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 Sebkhas. Les sols des Sebkha 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 Sebkhas 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 considéré 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 au ciment.

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 des 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 mixte à la chaux et au ciment).
- 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 au ciment 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 événements, 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).

Sols des différents continents affectés par les sels (million d'hectares)	
Amérique du Nord	15.8
Mexique et Amérique centrale	2
Amérique du sud	129
Afrique	80.5
Asie du sud	85.1
Asie du Nord et du centre	211.7
Asie du Sud Est	20
Australie	357.4
Europe	30.7
Total	932.2

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

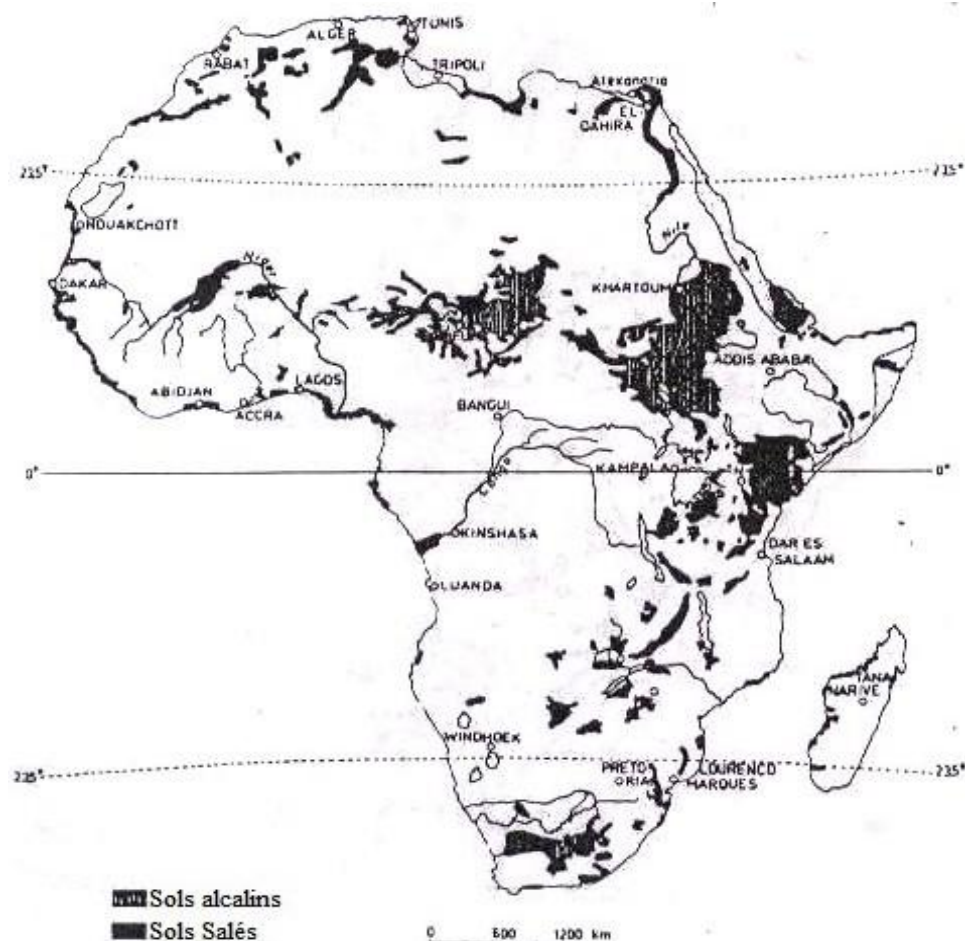


Figure 1.1 : Distribution des sols salés en Afrique (Madanni, 2008).

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). Leurs répartitions 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.

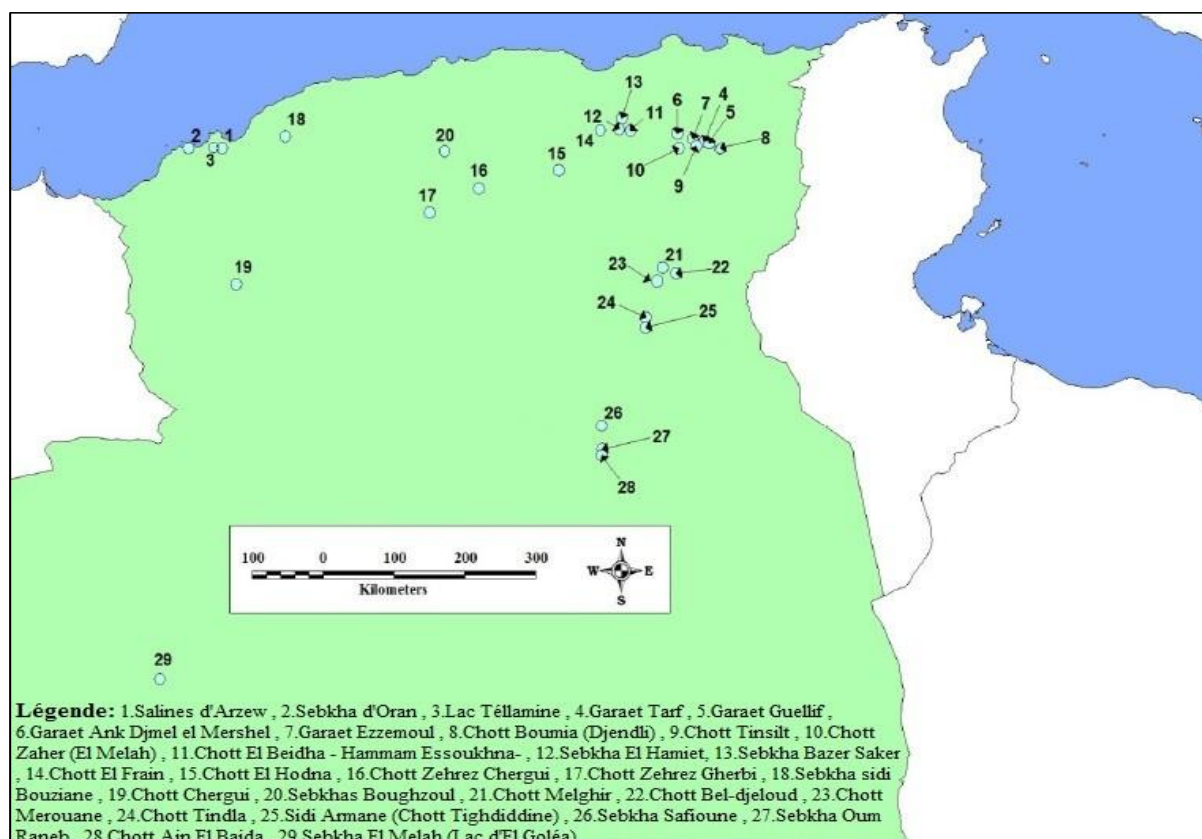


Figure 1.2 : Situation géographique des Chotts et Sebkhahs en Algérie (Demnati, 2013).

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 et qualifié de salé. La mesure effectuée est celle de la salinité. Ainsi que tout sol 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 cm² 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⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻) et en cations solubles (Na⁺, CA⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺), 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, Pielain, & 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 (USSL, 1954).

Classe	Conductivité électrique (dS.m ⁻¹)	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 paramètres 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 (CaSO_4 , KCl , MgSO_4), d'autres sont alcalinisant (NaHCO_3 , CaCO_3 , 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 (SO_4) et de chlorure (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 (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.

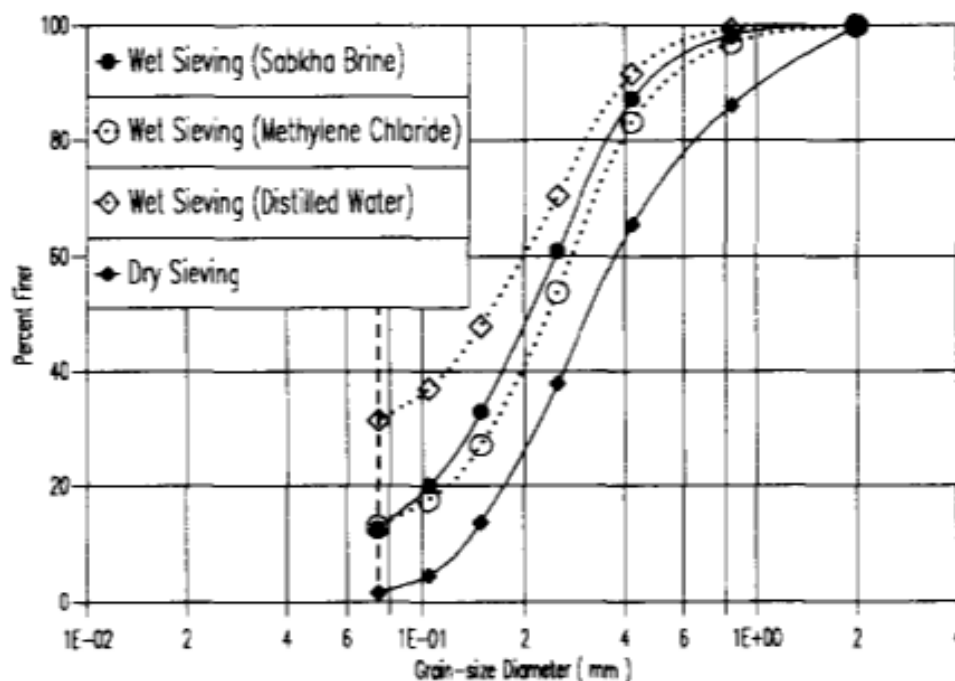


Figure 1.3 : Analyse granulométrique du sol de Sebkhass (Al-Amoudi et al., 1992).

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.

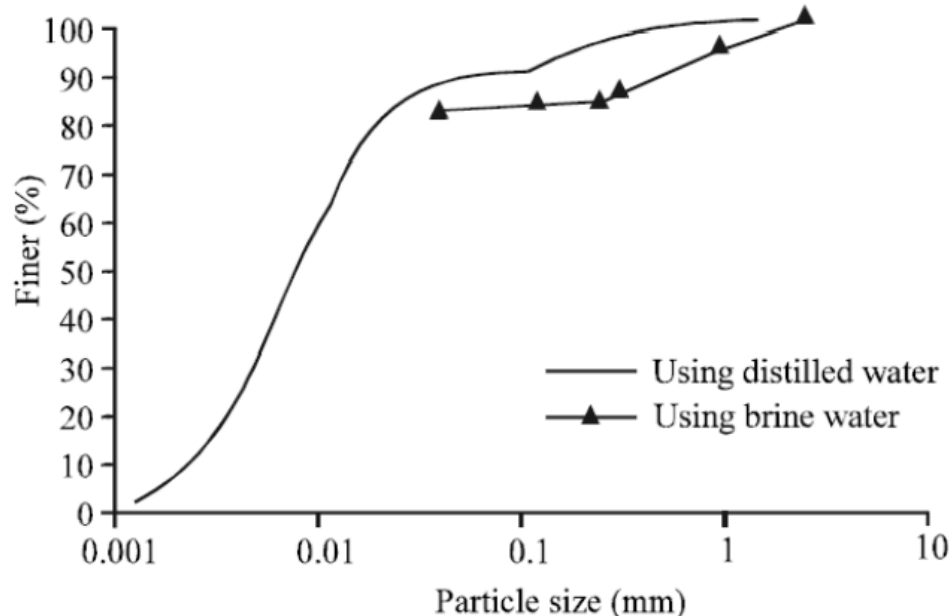


Figure 1.4 : Analyse granulométrique (Mansour et al., 2008).

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_d : 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, γ_w : Poids volumique de l'eau fraîche et γ_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) à 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.

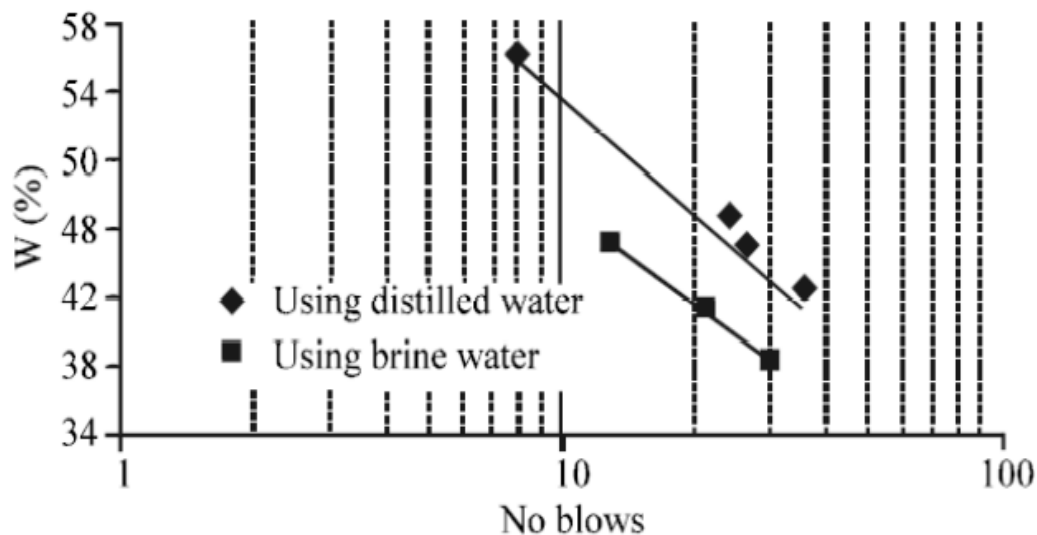


Figure 1.5 : Limite de liquidité (Mansour et al., 2008).

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 Sebkha 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

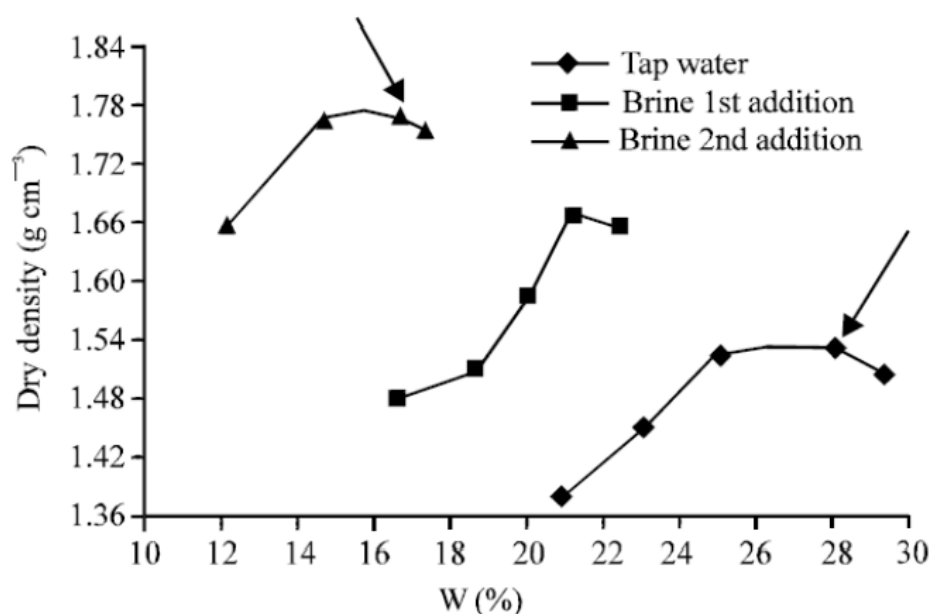


Figure 1.6 : Courbes de compactage (Mansour et al., 2008).

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).

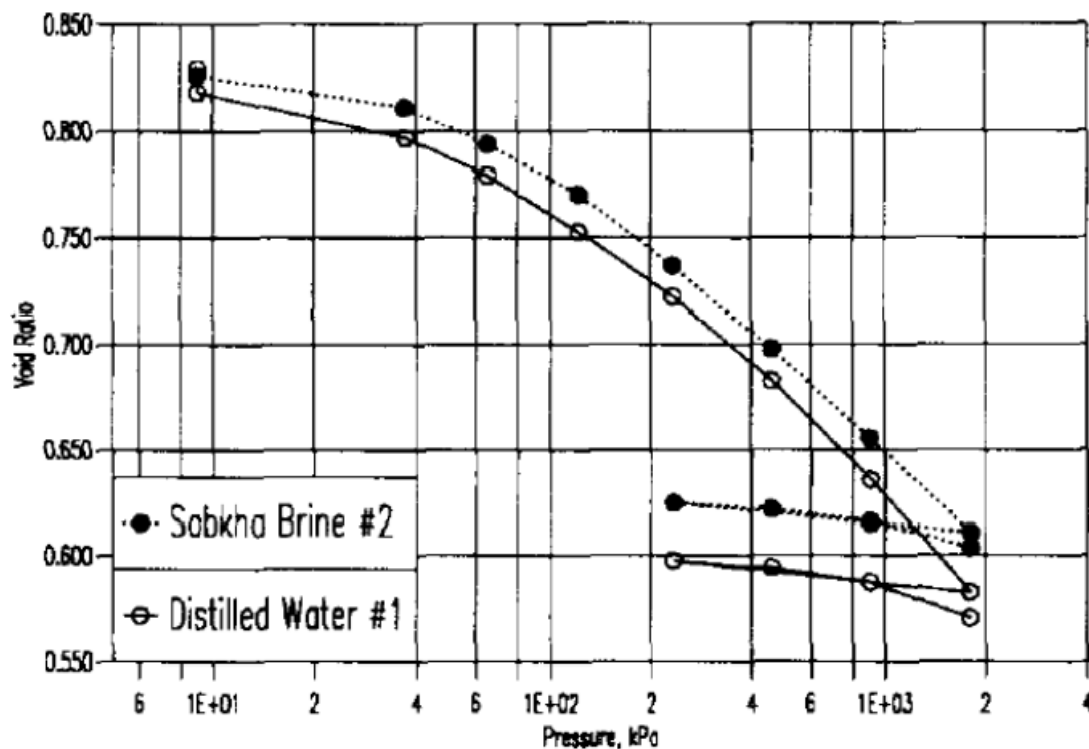


Figure 1.7 : Courbes de compressibilité (Al-Amoudi et al., 1992).

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).

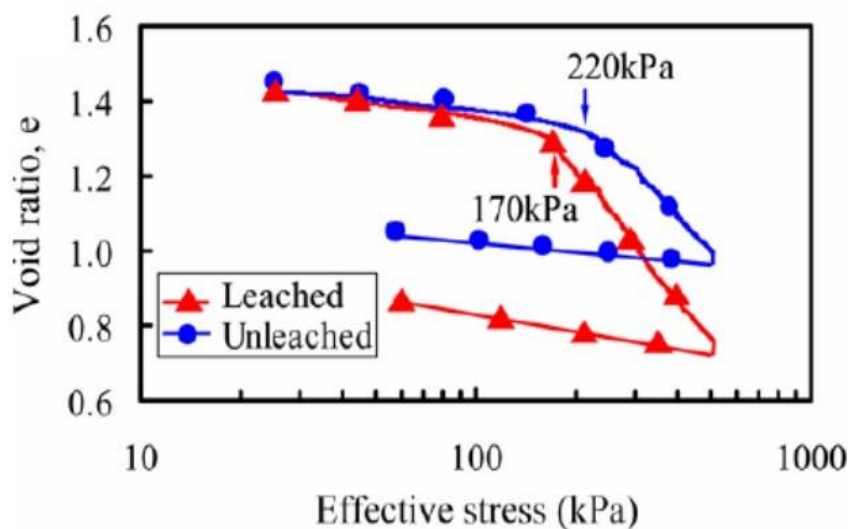


Figure 1.8 : Courbes de compressibilité des échantillons naturel et lavé (Kim et al., 2008).

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 au ciment.

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 (NaCl , KCl , 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 ; Tonoze et al., 2004, 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 (ciment) 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 au ciment. 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).

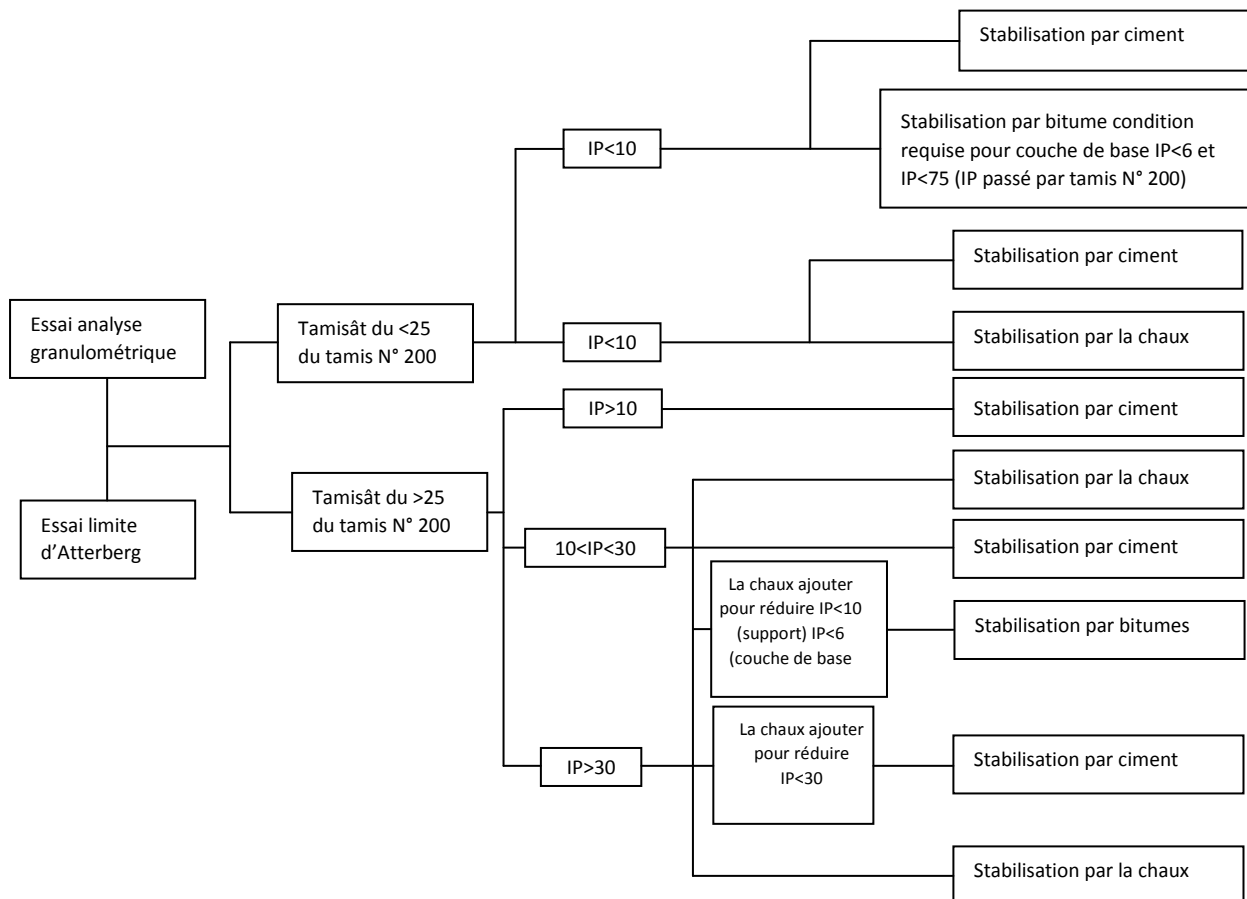


Figure 2.1 : Critères d'utilisation du traitement chimique (Dept. Of the Army, 1983).

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 ciment :

On distingue cinq types de ciment (CEM I : ciment Portland, CEM II : ciment Portland composé, CEM III : ciment de haut fourneau, CEM IV : ciment pouzzolanique et CEM V : ciment composé), dont le choix pour le traitement des sols se fera sur différents critères (CRR, 2004) :

- temps de prise assez long pour la mise en œuvre,
- bonne résistance à moyen et long terme,
- compatibilité avec le sol à traiter,
- bon rapport qualité/prix.

Parmi les ciments cités ci-dessus, le ciment Portland composé est de loin le plus utilisé en Algérie sous forme de cinq classes distinctes : CHAMIL (CEM II/B 32,5 R NA 442), MOHTARIF (CEM II/B 32,5R NA 442), MALAKI (CEM II/A-L 52,5NNA 442), MATINE (CEM II/B 42,5 RNA 442) et MOKAOUEM (CEM III/B 42,5 – ES NA 442) de fabrication locale dans les cimenteries Lafarge Algérie. Les fiches techniques de ces cinq classes de ciment sont à chercher sur le site (<http://lafarge-dz.com/ciment.html>).

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques à priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argile. L'action du ciment sur les sols traités se manifeste par (Routes 89, 2004) :

- l'amélioration des caractéristiques initiales des sols, notamment des sols fins prétraités à la chaux ou des sols peu ou pas plastiques dont les teneurs en eau ne permettent pas de réaliser des remblais ou des couches de forme dans de bonnes conditions et avec des garanties suffisantes de qualité ;
- l'obtention d'un développement rapide et durable des résistances mécaniques et des stabilités à l'eau et au gel ;
- des modifications immédiates et à long terme des propriétés géotechniques et mécaniques du sol traité (hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres avec passage par la phase soluté suivie de la cristallisation des produits hydratés : prise hydraulique).
- une diminution de la teneur en eau du mélange sol-ciment.

Ce mode convient au traitement des sols destinés à une utilisation en remblais ou en couches de forme routières. On notera simplement que les modalités de traitement des sols au ciment sont régies par les normes européenne (EN 197-1) et française (NF P 15 -108) en vigueur.

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).

2.6 Les ciments

Le terme « ciment » est issu du latin coementum qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens étymologique a donc été à peu près conservé ; « Portland » nom donné par le détenteur du brevet d'invention du ciment Joseph Aspdin en 1824. Parmi tous les liants minéraux, le ciment portland est le liant qui occupe la première place par sa production et son utilisation.

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau et parce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce

durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium

2.6.1 Principe de fabrication du ciment portland

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes :

- Préparation du cru
- Caisson
- Broyage et conditionnement

Il existe quatre méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau:

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3), et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe_2O_3 , l'oxyde ferrique.

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant : calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température ($1450\text{ }^\circ\text{C}$) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au delà de $100\text{ }^\circ\text{C}$, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de $400\text{ }^\circ\text{C}$ commence la composition en gaz carbonique (CO_2) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO_3).

Le mélange est porté à $1450\text{-}1550\text{ }^\circ\text{C}$, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante : une partie de CaO est retenue par Al_2O_3 et Fe_2O_3 en formant une masse liquide. SiO_2 et CaO restant réagissent pour donner le silicate bicalcique dont une

partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du CaO non combiné. La figure 2.4 montre les étapes de fabrication du ciment

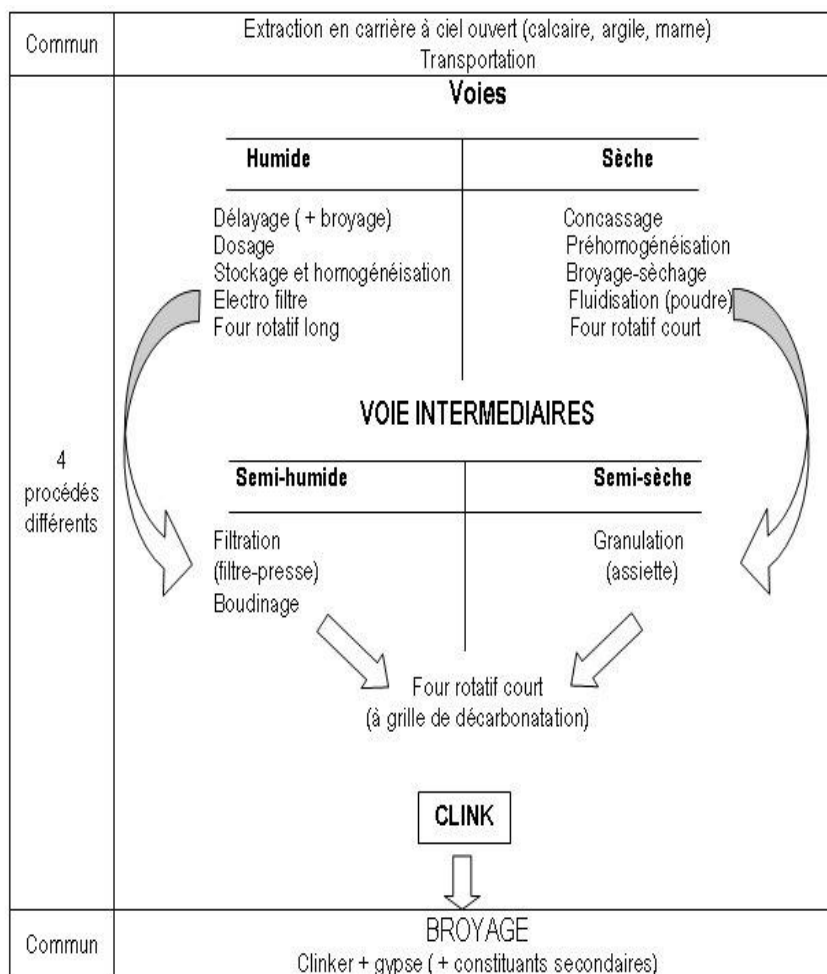


Figure 2.4 : schéma récapitulatif des quatre méthodes de fabrication du ciment

2.6.2 Les constituants des ciments

Le ciment est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques.

Les constituants les plus utilisés sont:

- **Calcaires** : Les calcaires sont considérés comme un des constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75% en masse.
- **Laitier granulé de haut fourneau** : Le laitier est un sous-produit de l'industrie

métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau.

- **Cendres volantes (V ou W) :** Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gazs de combustion des centrales thermiques. Les cendres volantes siliceuses (V) ont des propriétés pouzzolaniques; Les cendres volantes calciques (W) ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques.
- **Schistes calcinés :** Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques.
- **Fumée de silice :** Les fumées de silices sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1 µm). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentes pour au moins 85 % (en masse). Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques.
- **Fillers :** Ce sont des « constituants secondaires » des ciments, dont ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

2.6.2 Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et de constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

- ✓ CEM I : Ciment portland (CPA - dans la notation française),
- ✓ CEM II: Ciment portland composé (CPJ),
- ✓ CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF),
- ✓ CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ),
- ✓ CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

Deuxième partie
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Chapitre 3**Description du site étudié**

Dans les dernières années nous avons connus une dilatation et une animation des habitants dans la région d'El-Hodna, cette animation est accompagné de grands projets d'infrastructure dans cette région (constructions, routes, voies ferrées, etc.). Plusieurs zones dans cette région présentes des sols de faible qualité qui peuvent induire des difficultés lors de la réalisation des projets. Nous avons choisi le sol de la région du chott El-Hodna en vu de sa complexité et l'importance des enjeux qu'il induit.

3.1 Contexte de l'étude

La wilaya de M'sila connaît de nos jours une urbanisation croissante dictée par une démographie galopante, Cette wilaya se situe dans une zone classée comme semi-aride, caractérisée par une faible précipitation et des écarts de température importants entre l'hiver et l'été. Les figures 3.1 et 3.2 présentent les régimes mensuels des précipitations et de température relative enregistrés à la station de M'sila au cours de la période (1980 – 2016).

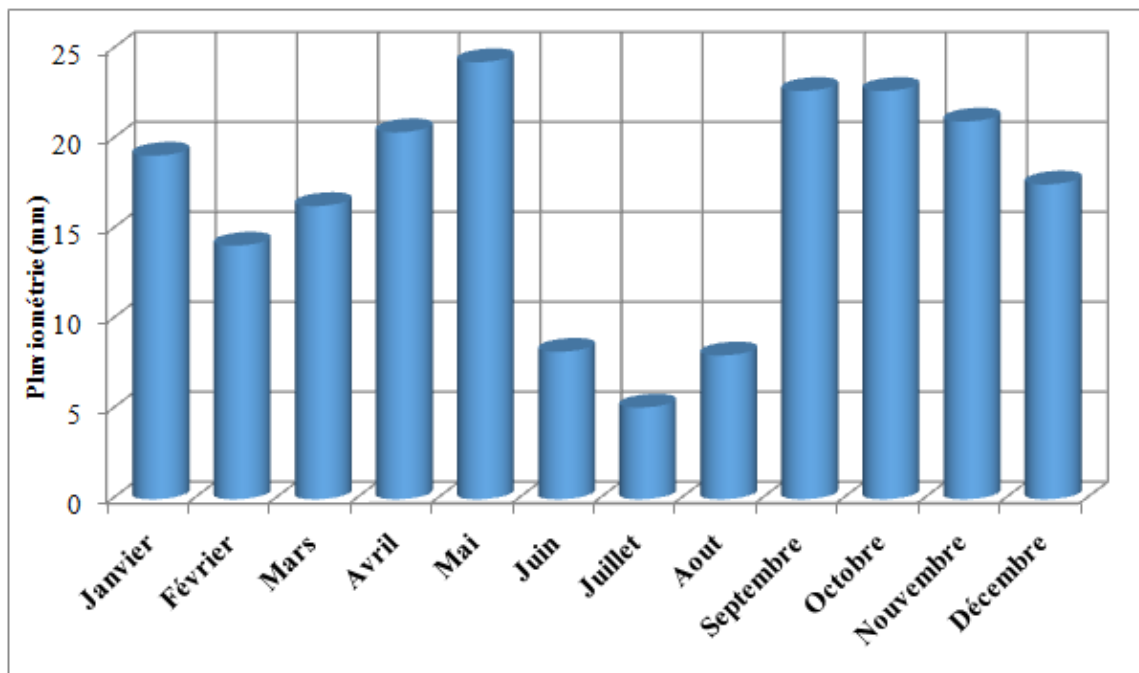


Figure 3.1 : Régime mensuel de précipitations à la station de M'sila au cours de la période (1980 – 2016).

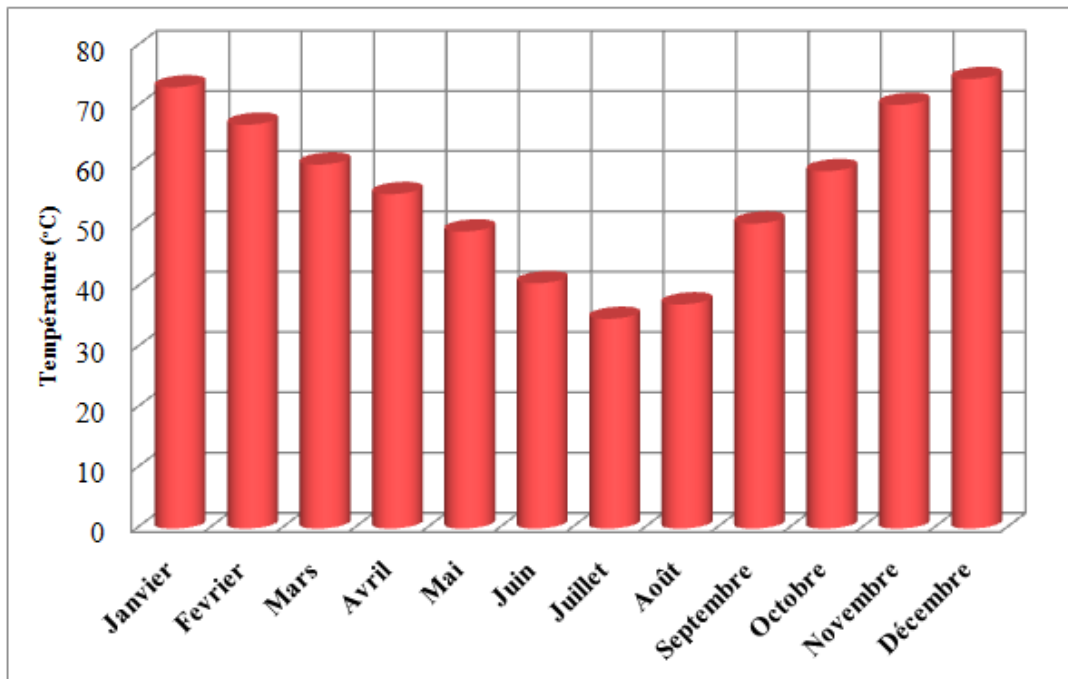


Figure 3.2 : Régime mensuel de température à la station de M'sila au cours de la période (1980 – 2016).

La wilaya de M'sila abrite une très grande partie du Chott El Hodna qui est très animée par de grands projets. Les sols de Chott el Hodna sont connus comme des sols salés vu leur teneur excessive en sel. Le phénomène de la salinisation affecte l'état hydrique du sol en diminuant sa teneur en eau, ce dernier redeviendra rugueux et sec. De surcroît, les sols salés abritent d'autres problèmes physiques, tels qu'une faible capacité portante et une compressibilité élevée. Les sols de Chott El Hodna sont pris comme des sols de faibles qualités qui peuvent induire à des difficultés lors de la réalisation des projets.

L'emploi en remblai ou en couches de forme routières à l'état naturel de ces sols n'est normalement pas envisagé. Ce dernier peut être éventuellement décidé sur la base d'un traitement aux liants hydrauliques, précisément le traitement chimique mixte chaux/ciment. Dans la suite de ce mémoire on s'intéressera à caractériser des échantillons de sol salé prélevés sur un site situé dans cette wilaya près de la commune de Ain el Khadra.

3.2. Description de la région d'étude

Le Chott d'El Hodna fait partie d'une série de chotts qui se sont développés là où convergent les eaux provenant de l'Atlas saharien au sud et l'Atlas tellien au Nord. Paysage végétal des hautes plaines steppiques, il fait partie du point de vue phytogéographique du domaine Maghrébin steppique. Son bassin situé à l'extrême est des hauts plateaux, orienté Ouest-Nord, Ouest- Est, Sud- Est, qui s'étend sur 220 Km le long et 90 Km de large, est coincé entre deux formations montagneuses atteignant 1800 à 1900 m d'altitude au Nord et 600 à 900 m au Sud, c'est hydrologiquement un bassin fermé de 26000 km².

La cuvette du Hodna, d'une superficie de 8 500 km², qui sert de niveau de base aux oueds du bassin, occupe en son milieu de bas fond-plat une superficie de 1 100 km², c'est cela que l'on appelle «Chott El Hodna».

La surface d'épandage des crues, le Chott a une forme elliptique, une eau salée et s'étend 77 Km de long et 19 km de large. Sa surface inondée, quoique variable, ne dépasse jamais 80.000 ha. Son alimentation est assurée par au moins 22 cours d'eau principaux auxquels il faut ajouter des sources d'eau douce. Il se met en eau uniquement en hiver, sec et salé en été, des croûtes de sel couvrent toute son étendue (BOUMEZBEUR, 2002).

La région de Chott el Hodna est immergée pendant la période d'hiver par des eaux salées (figure 3.3). En période d'été ses eaux s'évaporent et une croûte de sel se forme sur la surface de la sebkha (figure 3.4).



Figure 3.3 : Chott el Hodna en période d'hiver.



Figure 3.4 : Chott el Hodna en période d'été.

3.3 Aspect géographique et administratif

Chott El-Hodna avec sa superficie importante 362.000 hectares (MESSAD et MOUSSAI, 2015) chevauche deux wilaya, M'sila (1000Km²) et Batna (100Km²) au Sud-Est d'Alger, il est isolé de la mer Méditerranée par 150 km² de chaînes de montagnes. Il occupe le centre la cuvette du Hodna, il se situe à 40 Km au Nord-Est de la ville de Boussaâda et à 80 km au Nord-Ouest de la ville de Biskra.

Il est situé entre les lignes latitudinales (35°18' et 35°32') et longitudinales (4°15' et 5°06'), à une altitude moyenne de 392 m (MESSAD et MOUSSAI, 2015) et fait partie de dix communes de la wilaya de M'Sila et deux de la wilaya de Batna (figure3.5).

Le Chott El-Hodna est limitée :

- Au Nord par la chaîne du Bibans et les monts du Hodna (1400-1800 m).
- Au Sud par l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien (prolongement des monts d'Ouled Naïl (1470 - 1675 m) et les Monts du Zab (980 m).
- A l'Est par le Djebel Metlili (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 (900 - 1200 m) (JEAN et FRANCO, 1995) (figure3.5).

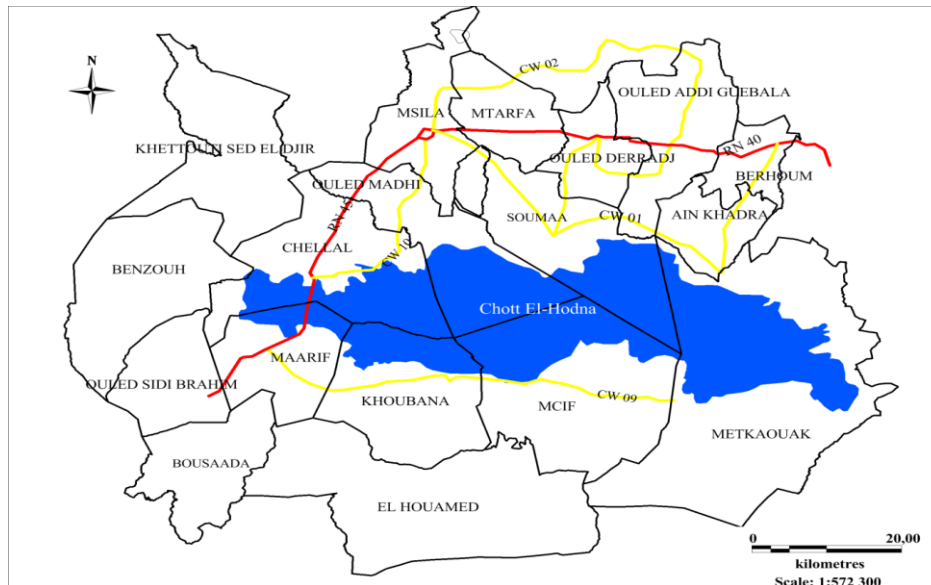


Figure 3.5 : Localisation de Chott El-Hodna par rapport aux communes de M'sila.

3.4 Prélèvement d'échantillons

Le site est situé dans la région des hauts plateaux à l'est d'Algérie dans la wilaya de M'sila et a reçu un projet de liaison routière entre le village de Ain el Khadra et M'cif. La route projetée traverse le Chott d'el Hodna sur un linéaire de 11 km.

La coupe géotechnique du massif a révéla la présence de deux couches de sol consécutives : 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 : Site de prélèvement des échantillons d'essai.

Chapitre 4 :
Programme expérimental
et procédures d'essais

Dans ce chapitre son exposé les méthodes et les techniques expérimentales utilisées sur un échantillon témoin (non traité). La réalisation du programme : réalisé dans deux laboratoires différents et qui sont : le laboratoire de pédagogique du département de génie civil de la faculté de technologie et le laboratoire de recherche de GEO-MATERIAUX de l'université de M'sila. Une grande quantité de sol du prélevé sur un site rural du Chott El-Hodna situé près de la commune de Ain Khadra dans la wilaya de M'sila et transportés au laboratoire pour analyse.

4.1. Liste des essais :

1- Les essais d'identifications :

- › Paramètres d'état :
 - › La teneur en eau (NF P 94-050).
 - › Le poids volumique sec et humide (NF P 94-053).

- › Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056).
- › Limites de consistance (NF P 94-051).
- › Essai au bleu de méthylène (NF P 94-068).

2- L'essai de caractérisation (mécanique) :

- › Proctor normal (ω_{opt} ; γ_{dmax}) (NF P 94-093).

N.B : Les procédures expérimentales suivies dans chaque type d'essai ont été conformes au tant que possible aux méthodes d'essais en vigueur.

4.2. Essais d'identifications :

Ils comportent les essais d'identification physique permettant de déterminer les paramètres décrits ci-après, avec entre parenthèses la norme française correspondante.

a- Paramètres d'état:

Ils comportent :

♦ La teneur en eau (NA 5209, NF P 94-050) :

C'est le rapport de la masse de l'eau contenue dans le sol après l'évaporation lors de l'étuvage (m_w) sur la masse des grains solides (m_d), exprimé en pourcentage :

$$W(\%) = \frac{M_w}{M_d} \times 100$$

L'essai est effectué sur échantillon intact ramené directement du site.

♦ Les poids volumiques humide et sèche (NA5210, NF P 94-053) :

La poids volumique humide (γ_d) : c'est le quotient (rapport) de la masse humide (m_h) 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 les étapes de la norme.

La poids volumique sèche d'un sol (γ_d) : c'est le quotient (rapport) de la masse des grains solides (m_s) du sol par le volume (v) qu'il occupe.

La poids volumique sèche peut être obtenue comme le rapport du poids volumique humide par l'unité plus la teneur en eau ($\gamma_d = \gamma_h/1 + w$).



Figure 4.1 : Détermination du poids volumique humide.

b- Analyse granulométrique :

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

♦ **Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056) :**

Le tamisage sous l'eau (par voie humide) pour les particules de dimensions $\geq 80\mu\text{m}$ (0.08mm).

C'est l'ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant un échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série des tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse (figure 4.2).



Figure 4.2 : Appareillage d'analyse granulométrique (tamisage).

c - Limites de consistance (NF P 94-051).

L'essai s'effectue en deux phases :

- recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés ;
- recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure.

Les 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 : limite de liquidité (W_L),
- › Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité (W_P).

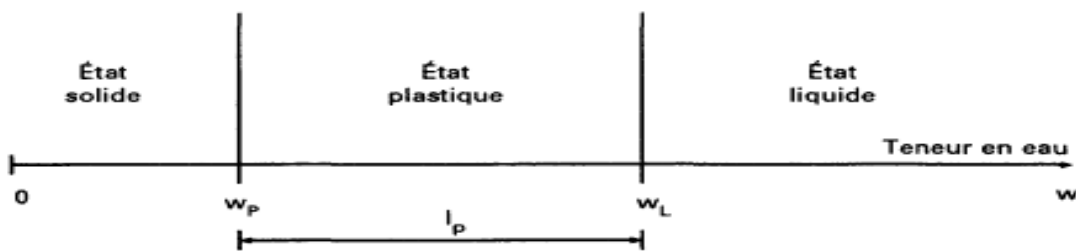


Figure 4.3 : Représentation des limites d'Atterberg

La détermination des limites de liquidité (W_L) et de plasticité (W_P) permet de déduire les paramètres suivants :

- ♦ L'indice de plasticité mesurant l'étendue du domaine plastique :

$$I_P = W_L - W_P$$

I_P	< 5	5 - 15	15 - 40	> 40
Etat	Non plastique	Peu plastique	plastique	Très plastique

Tableau 4.1 : Les domaines de plasticité.

- ♦ L'indice de consistance :

$$I_C = (W_L - W_{NAT}) / I_P$$

I_C	< 0	0 - 0,25	0,25 - 0,50	0,50 - 0,75	0,75 - 1,0	> 1
Etat	liquide	Très mou	mou	ferme	Très ferme	dur

Tableau 4.2 : Les domaines de consistance.



Figure 4.4 : Appareillage de limites d'Atterberg.

f - L'essai au bleu de méthylène (NA1948 , NF P 94-068) :

L'essai est réalisé sur la fraction 0/0.08 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 permanence agitation

La valeur au bleu de méthylène constitue un paramètre d'identification permettant de mesurer la surface spécifique des particules solides contenues dans les sols fins et de déterminer l'activité de leur fraction argileuse.



Figure 4.5 : appareillage de l'essai au bleu de méthylène.

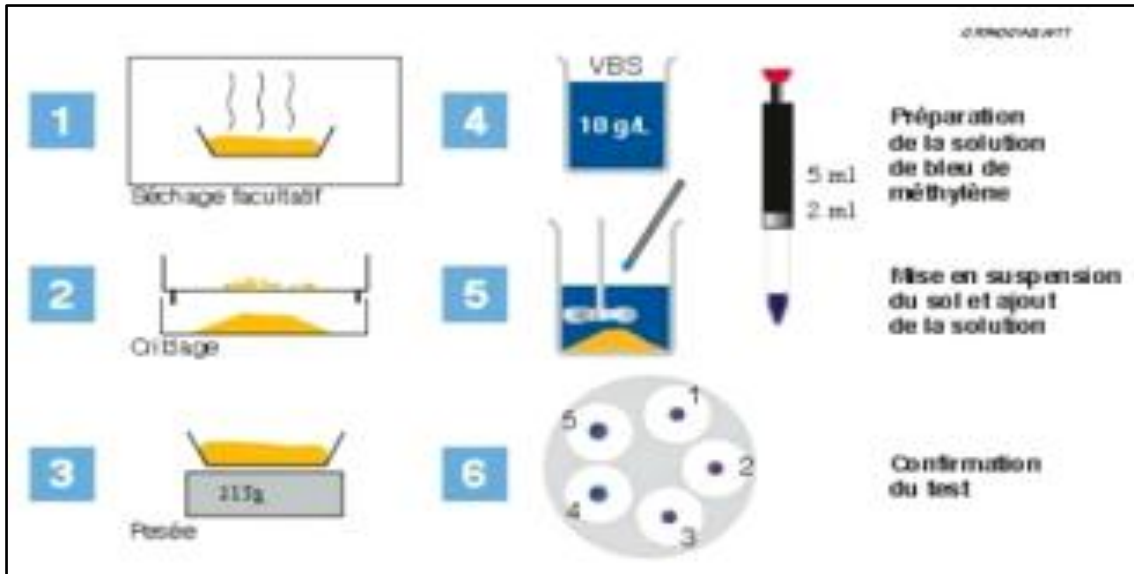


Figure 4.6 : Les étapes de l'essai au bleu de méthylène.

A titre d'identification le tableau représente les valeurs de bleu de quelques sols.

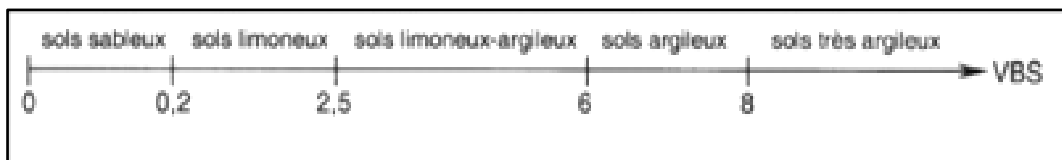


Figure 4.7 : Valeurs de bleu de quelques sols.

N.B: La valeur de bleu VBS est la quantité de bleu méthylène absorbé.

4.3. Essai mécanique :

Essai Proctor normal (NA 5262, NF P 94-093) :

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 en %) d'un matériau sur sa compactibilité (exprimée par la masse volumique sèche γ_d en g/cm^3 ou en kg/m^3).

› Conditions d'essai :

Le principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

› Résultats :

Les résultats sont traduits sous forme d'un graphique reprenant, en abscisse la teneur en eau au compactage et en ordonnée la masse volumique sèche .

- Énergie de compactage (Exprimée en kNm/m^3) =

$$\frac{\text{Hauteur de chute} \times \text{poids de la dame} \times \text{Nb de coups} \times \text{Nb de couches}}{\text{volume total du moule}}$$

volume total du moule



Figure 4.8 : Appareil essai Proctor (compacteur automatique).

Chapitre 5 :

Présentation et analyse des résultats d'essais

Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats des essais réalisés sur le sol étudié et leur interprétation, il est organisé sous forme une seule partie. Cette partie concernant le sol (témoin) non traité, qui comporte les essais d'identification (paramètres d'état, granularité, limites d'Atterberg, l'essai au bleu de méthylène), l'essai mécanique (Proctor normal). L'interprétation des résultats seront décrites à la fin de les essais d'identification, et l'essai mécanique (Proctor normal).

5.1 Rappel :

Ce travail porte sur l'étude de caractéristique d'un sol salé stabilisée à teneur en ciment. Pour des raisons pratiques dans le but d'avoir une plage de résultats plus représentative et plus significative dans l'ensemble des essais de traitement que nous aurions dû terminer, Mais nous n'avons pas pu terminé cet travail appliqué en raison de la situation sanitaire et délicate que traverse l'Algérie à cause de l'épidémie généralisée de "Covid-19", et aussi des mesures sanitaires prises par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique pour mieux gérer la situation actuelle ce qui nous a contraint à ne pas poursuivre les essais.

5.2 Les procédures utilisées pour le séchage du sol :

- Placer l'échantillon de sol humide dans un récipient ayant une grande surface et le sol déjà coupé en petits morceaux de dimensions inférieures à 20 mm.
- Mettre l'échantillon dans l'étuve à une température environ 55-60⁰C
- Lorsque l'échantillon atteint un état broyable, retirer le de l'étuve et broyer l'échantillon avec le broyeur en particules de diamètre inférieurs à 2 mm et après le broyage remettre le sol dans l'étuve.
- Après le séchage retirer l'échantillon et le laisser reposer.

5.3 Les essais d'identification :

Les tableaux 5.1 à 5.12 présentent les résultats des essais d'identification (paramètres d'état, granularité, limite d'Atterberg et le bleu de méthylène) obtenus à partir d'un prélèvement effectué à une profondeur comprise entre 1,3 à 1,7 mètres.

a) Paramètres d'état :

Dés échantillons de sol ont été placés dans des tares, pesées sur site et protégées à l'aide d'un papier de cellophane pour mesurer la teneur en eau naturelle du sol.

Le tableau 5.1 présente les résultats des essais obtenus à partir d'un prélèvement effectué à une profondeur comprise entre 1,30 à 1,70 m pour une moyenne de 1,50m.

Tableau 5.1: Détermination de la teneur en eau et de la masse volumique sèche et humide.

	Moule 1	Moule 2
Masse de moule (g)	721.25	710.38
Masse humide totale (g)	913.68	905.78
Masse sèche totale (g)	890.45	884.15
Volume du moule (cm ³)	100,00	100,00
Masse de l'eau (g)	23,23	21,64
Masse du sol humide (g)	192,43	195,41
Masse de sol sec (g)	169,2	173,77
Teneur en eau W_{net} (%)	13,73	12,45
Moyenne W_{nat} (%)	13,09	
Masse volumique humide ρ_h (g/cm ³)	1,92	1,95
Moyenne ρ_h (g/cm ³)	01,94	
Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)	1,69	1,73
La moyenne ρ_d (g/cm ³)	01,71	

d) Analyse granulométrique par tamisage:

Tableau 5.2 : Granulométrie par tamisage de l'essai n°1

Tamis (mm)	Poids refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
3.15	1.37	1,37	0,46	99,54
2.5	1.48	2,85	0,95	99,05
2	1.65	4,50	1,50	98,50
1.6	1.04	5,54	1,85	98,15
1.25	2.09	7,63	2,54	97,46
1	0.89	8,52	2,84	97,16
0.8	1.73	10,25	3,42	96,58
0.5	3.18	13,43	4,48	95,52
0.315	8.58	22,01	7,34	92,66
0.125	36.72	58,73	19,58	80,42
0.08	25.42	84,15	28,05	71,95

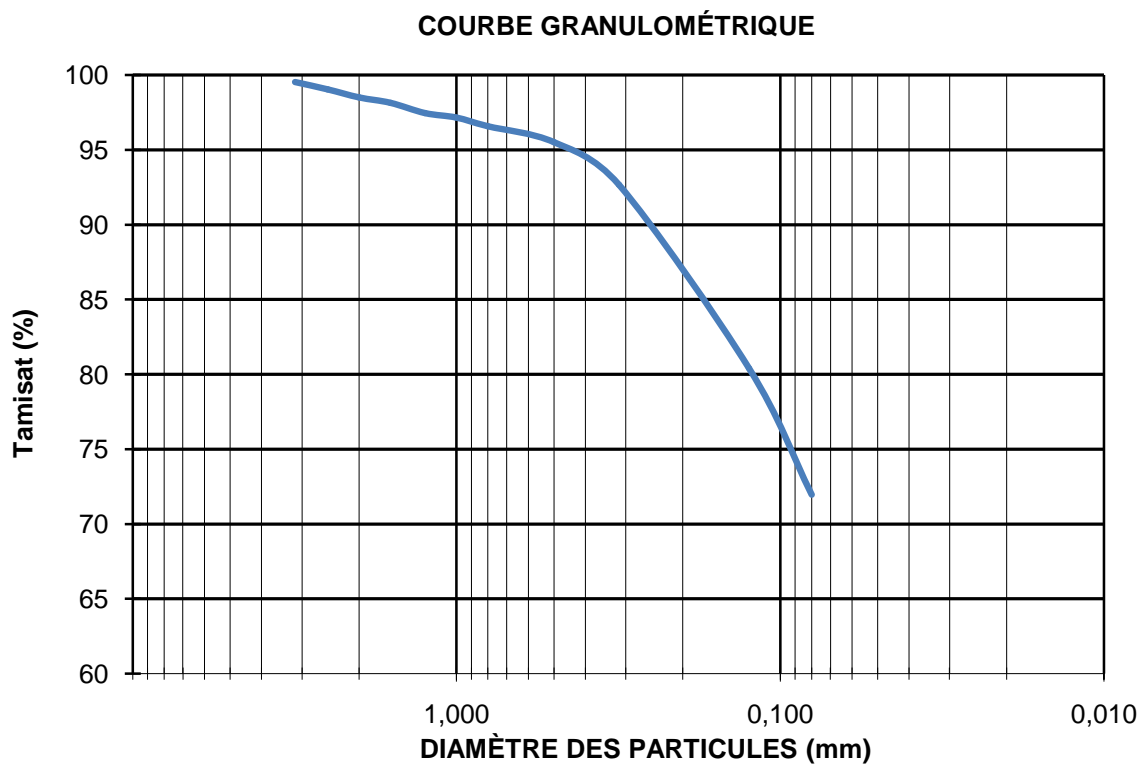


Figure 5.1 : courbe d'analyse granulométrique par tamisage de l'essai 01.

Tableau 5.3 : Granulométrie par tamisage de l'essai n°2

Tamis (mm)	Poids refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
3.15	0,78	0,78	0,26	99,74
2.5	0,9	1,68	0,56	99,44
2	1,13	2,81	0,94	99,06
1.6	0,89	3,7	1,23	98,77
1.25	1,59	5,29	1,76	98,24
1	0,93	6,22	2,07	97,93
0.8	1,52	7,74	2,58	97,42
0.5	2,95	10,69	3,56	96,44
0.315	9,6	20,29	6,76	93,24
0.125	37,12	57,41	19,14	80,86
0.08	43,28	100,69	33,56	66,44

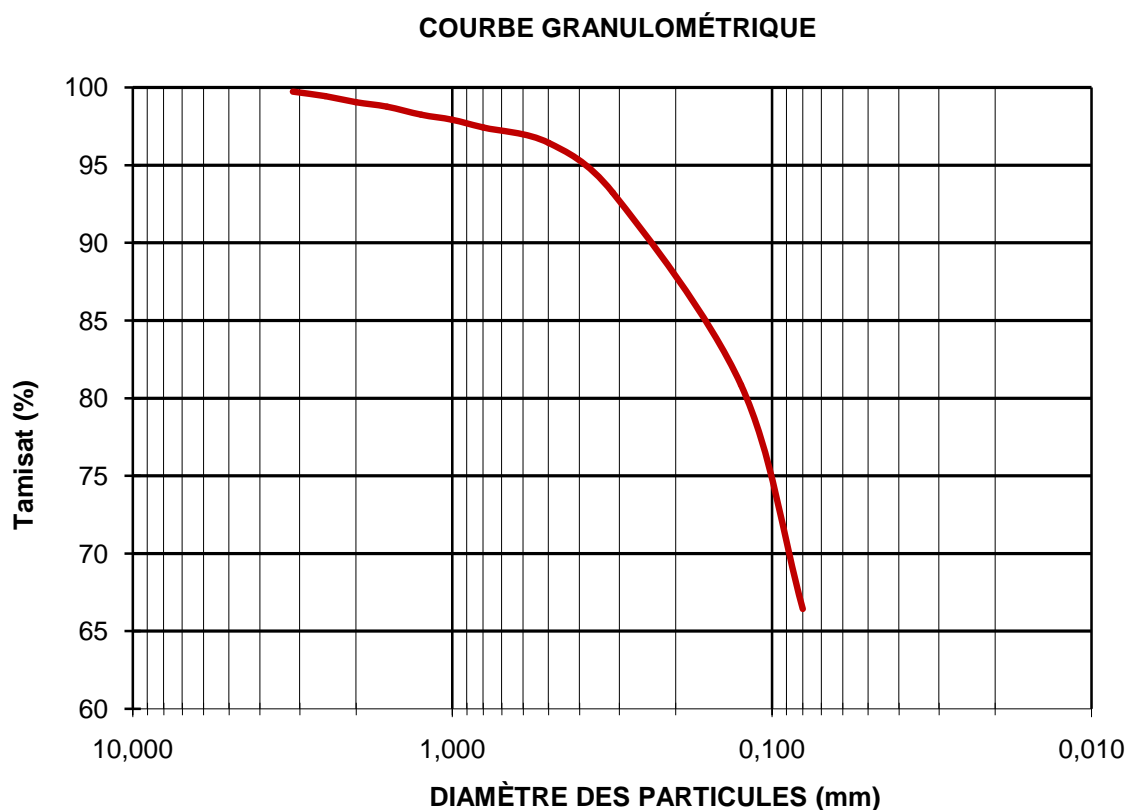
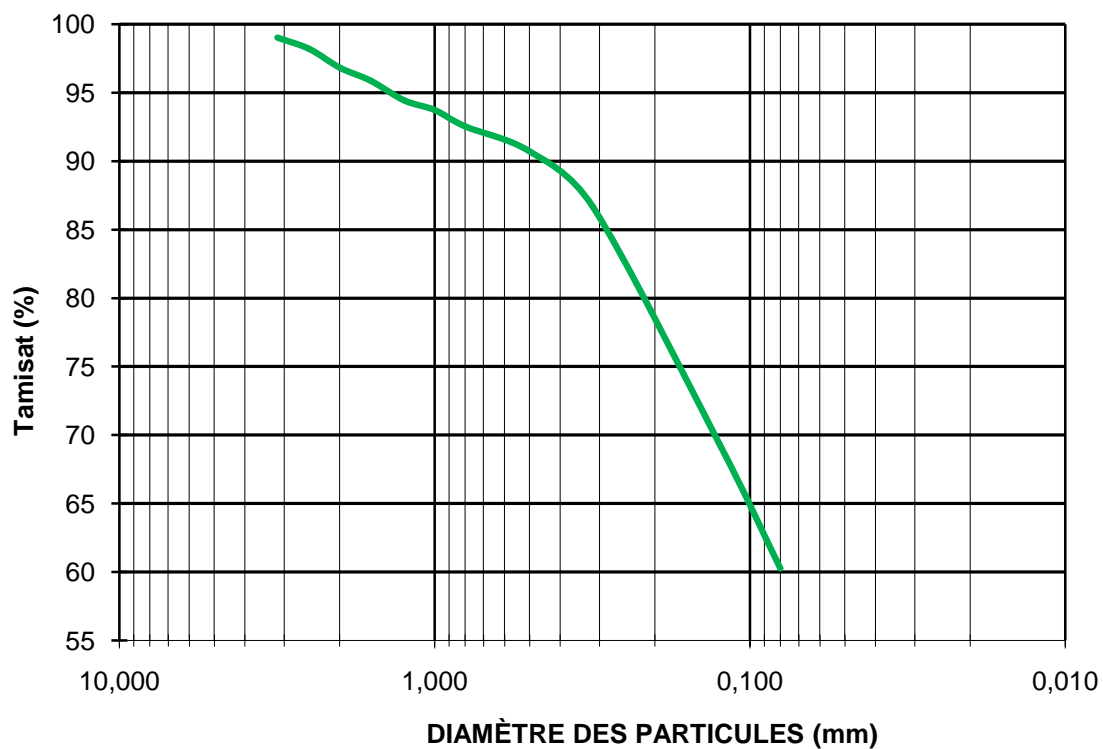
**Figure 5.2** : courbe d'analyse granulométrique par tamisage de l'essai 02

Tableau 5.4 : Granulométrie par tamisage de l'essai n°3

Tamis (mm)	Poids refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
3.15	2,94	2,94	0,98	99,02
2.5	2,48	5,42	1,81	98,19
2	4,14	9,56	3,19	96,81
1.6	2,81	12,37	4,12	95,88
1.25	4,36	16,73	5,58	94,42
1	2,1	18,83	6,28	93,72
0.8	3,58	22,41	7,47	92,53
0.5	5,43	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

COURBE GRANULOMÉTRIQUE**Figure 5.3 :** courbe d'analyse granulométrique par tamisage de l'essai 03

Le tableau 5.5 Résume une récapitulation des trois essais de l'analyse granulométrique par tamisage.

Tableau 5.5: Récapitulatif des résultats des essais de l'analyse granulométrique.

Tamis (mm)	Tamisât en (%)			Moyenne
	Essai 1	Essai 2	Essai 3	
3,15	99,54	99,74	99,02	99,43
2,5	99,05	99,44	98,19	98,89
2	98,50	99,06	96,81	98,12
1,6	98,15	98,77	95,88	97,60
1,25	97,46	98,24	94,42	96,70
1	97,16	97,93	93,72	96,27
0,8	96,58	97,42	92,53	95,51
0,5	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

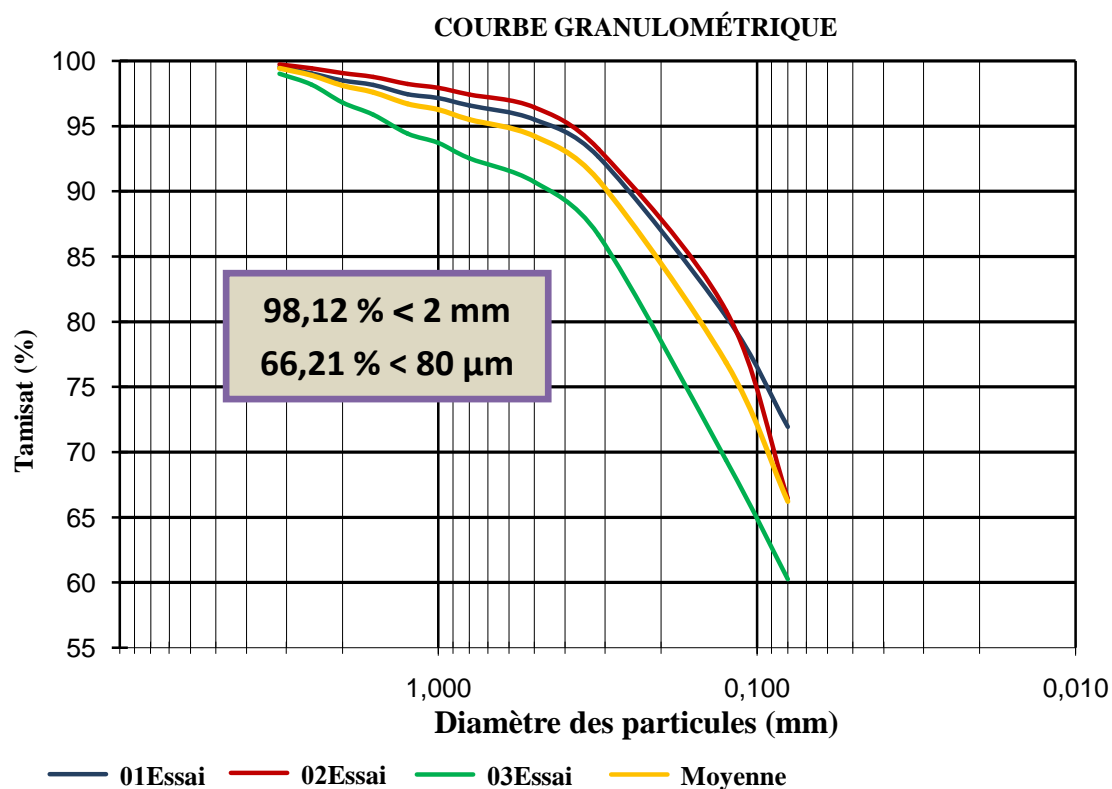


Figure 5.4 : Courbe de l'analyse granulométrique par tamisage.

e) Limites d'Atterberg :

Trois essais ont été réalisés pour la détermination des limites d'Atterberg.

Tableau 5.6 : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n°1.

Nombre d'essais	1		2		3		4	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Numéro de la tare								
Nombre de coups N	17		23		29		32	
Masse de la tare vide	10,33	10,32	10,42	10,37	10,36	10,4	10,29	10,36
Masse (tare +sol humide)	22,68	24,76	26,38	25,44	24,36	23,61	24,19	23,42
Masse (tare + sol sec)	18,78	20,26	21,39	20,70	19,97	19,47	19,90	19,38
Masse de sol humide	12,35	14,44	15,95	15,07	14,00	13,21	13,91	13,06
Masse de sol sec (g)	8,45	9,94	10,97	10,33	9,61	9,071	9,61	9,02
Masse d'eau (g)	3,9	4,49	4,99	4,74	4,39	4,14	4,29	4,04
Teneur en eau % (m_w/md)	46,17	45,25	45,48	45,87	45,78	45,59	44,6	44,81
La moyenne de teneur en eau %	45,71		45,68		45,69		44,74	
$W_L \% = 0,2371 \times 25 + 42,915$	45,46							

Tableau 5.7 : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n°1

Numéro d'essai	1		2		3		4	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Numéro de la tare								
Masse de la tare vide	8,7	8,4	19,6	8,5	13,9	14	13,7	11,1
Masse (tare +sol humide)	10,6	10,5	22,1	10,4	16,1	16	16	13,2
masse de sol humide	1,9	2,1	2,5	1,9	2,2	2	2,3	2,1
Masse (tare + sol sec)	10,2	10,1	21,8	10	15,8	15,6	15,4	12,7
masse de sol sec md (g)	1,5	1,7	2,2	1,5	1,9	1,6	1,7	1,6
mass d'eau (g)	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,6	0,5
teneur en eau %	26,67	23,53	13,64	26,67	15,79	25,00	35,29	31,25
moyenne de teneur en eau	25,10		20,15		20,39		33,27	
$W_P \%$	24,73							
$I_P (\%) = W_L - W_P$	20,73							

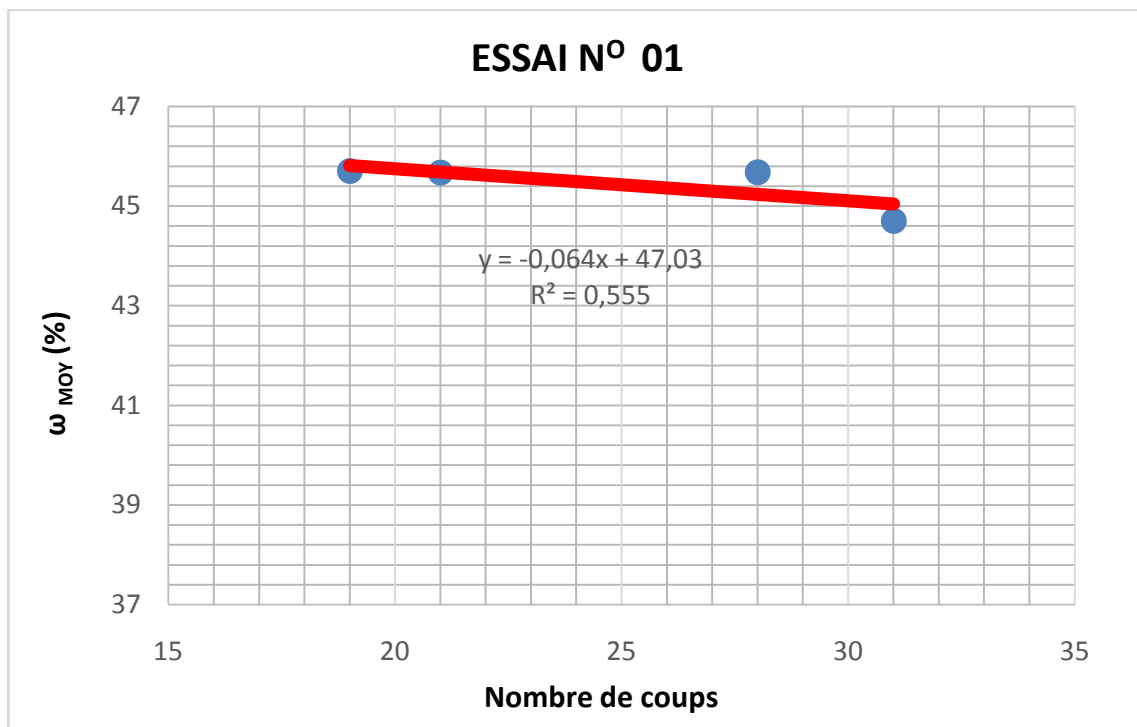


Figure 5.5 : Courbe de limite de liquidité WL en fonction de nombre de coups essai 01.

Tableau 5.8 : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n°2

Nombre d'essais	1		2		3		4	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Numéro de la tare	1	2	1	2	1	2	1	2
nombre de coups N	16		23		29		33	
Masse de la tare vide	10,2	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,2	10,1
Masse (tare+ sol humide)	25,4	26,4	25	23,7	25,3	27,6	22,5	20,2
Masse (tare + sol sec)	20,4	21	20	19,3	20,5	21,9	18,7	17
masse de sol humide	15,2	16,3	14,9	13,6	15,2	17,5	12,3	10,1
masse de sol sec md (g)	10,2	10,9	9,9	9,2	10,4	11,8	8,5	6,9
masse d'eau (g)	5	5,4	5	4,4	4,8	5,7	3,8	3,2
teneur en eau % (m_w/md)	49,02	49,54	50,51	47,83	46,15	48,31	45,17	46,38
moyenne de teneur en eau	49,28		49,17		47,23		45,77	
$W_L \% = 0,221x25+53,3855$	47,86							

Tableau 5.9 : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n°2.

Numéro d'essai	1		2		3		4	
Numéro de la tare	1	2	1	2	1	2	1	2
Masse de la tare vide	11,8	11,6	11,9	11,7	11,6	11,6	11,4	11,8
Masse (tare+sol humide)	13,8	13,6	13,9	13,6	13,7	13,7	13,1	14
masse de sol humide	2	2	2	1,9	2,1	2,1	1,7	2,2
Masse (tare + sol sec)	13,4	13,3	13,5	13,4	13,4	13,2	12,8	13,7
masse de sol sec md (g)	1,6	1,7	1,6	1,7	1,8	1,6	1,4	1,9
mass d'eau (g)	0,4	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5	0,3	0,3
teneur en eau %	25,00	17,65	25,00	11,76	16,67	31,25	21,43	15,79
moyenne de teneur en eau	21,32		18,38		23,96		18,61	
W_P %	20,57							
I_P (%)= W_L – W_P	27,29							

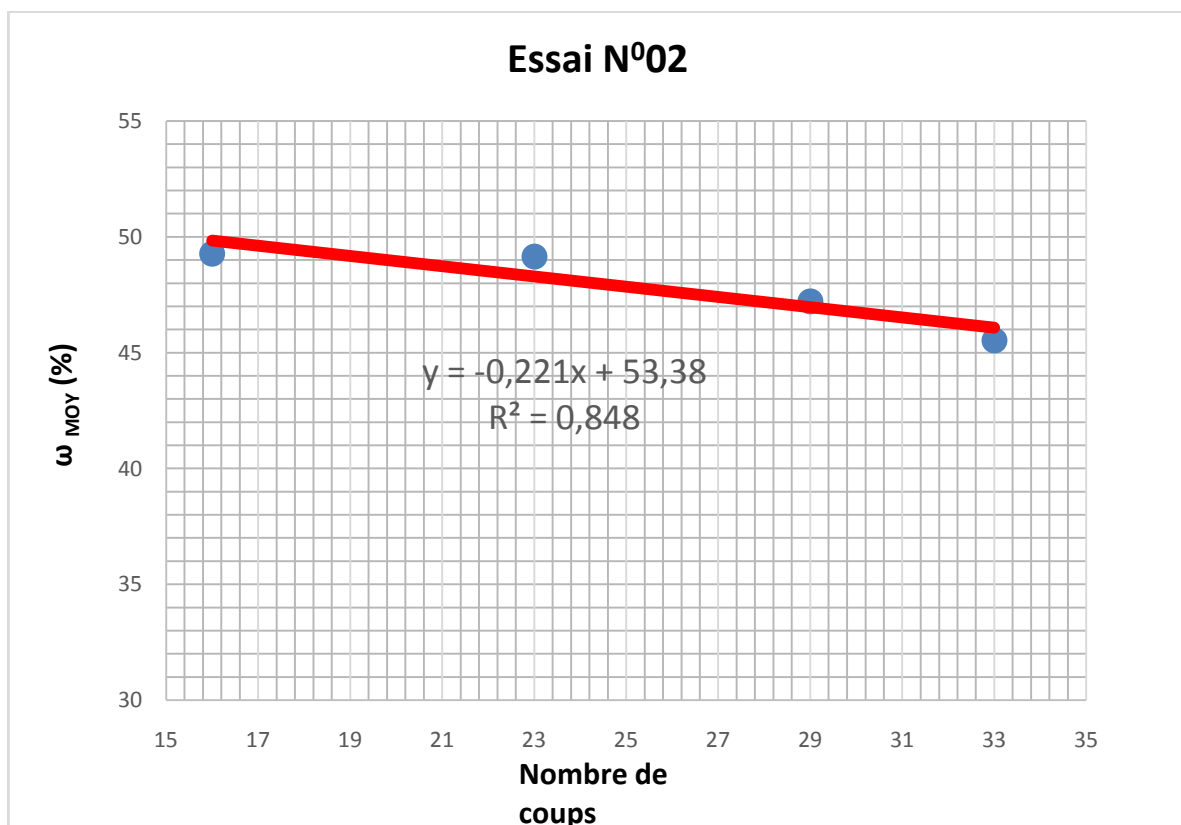
**Figure 5.6** : Courbe de limite de liquidité WL en fonction de nombre de coups essai 02.

Tableau 5.10 : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n°3.

Nombre d'essais	1		2		3		4	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Numéro de la tare								
nombre de coups N	16		22		29		32	
Masse de la tare vide	24,88	24,15	24,28	13,88	24,12	57,33	51,08	13,98
Masse (tare +sol humide)	45,79	44,99	39,95	24,46	41,87	73,68	63,82	31,93
Masse (tare + sol sec)	39,16	38,44	35,19	21,23	36,48	68,77	59,91	26,59
masse de sol humide	20,91	20,84	15,67	10,57	17,75	16,34	12,73	17,95
masse de sol sec md (g)	14,28	14,29	10,92	7,365	12,36	11,44	8,82	12,62
masse d'eau (g)	6,62	6,55	4,76	3,22	5,39	4,89	3,91	5,33
teneur en eau % (mw/md)	46,40	45,86	43,48	43,60	43,63	42,81	44,29	42,25
moyenne de teneur en eau	46,13		43,54		43,22		43,27	
W_L % = -0,1708x+48,307	44,04							

Tableau 5.11 : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n°3.

Numéro d'essai	1		2		3		4	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Numéro de la tare								
Masse de la tare vide	9,1	23,8	8,6	8,5	11,5	8,5	8,3	8,8
Masse (tare +sol humide)	10,7	25,6	10,8	10,2	14,3	11	10,4	10,8
masse de sol humide	1,6	1,8	2,2	1,7	2,8	2,5	2,1	2
Masse (tare + sol sec)	10,5	25,1	10,4	10	13,8	10,6	10,1	10,4
masse de sol sec md (g)	1,4	1,3	1,8	1,5	2,3	2,1	1,8	1,6
mass d'eau (g)	0,2	0,5	0,4	0,2	0,5	0,4	0,3	0,4
teneur en eau %	12,5	27,78	18,18	11,76	17,86	16,00	14,29	20,00
moyenne de teneur en eau	20,14		14,97		16,93		17,14	
W_P %	17,30							
I_P(%)= W_L - W_P	26,74							

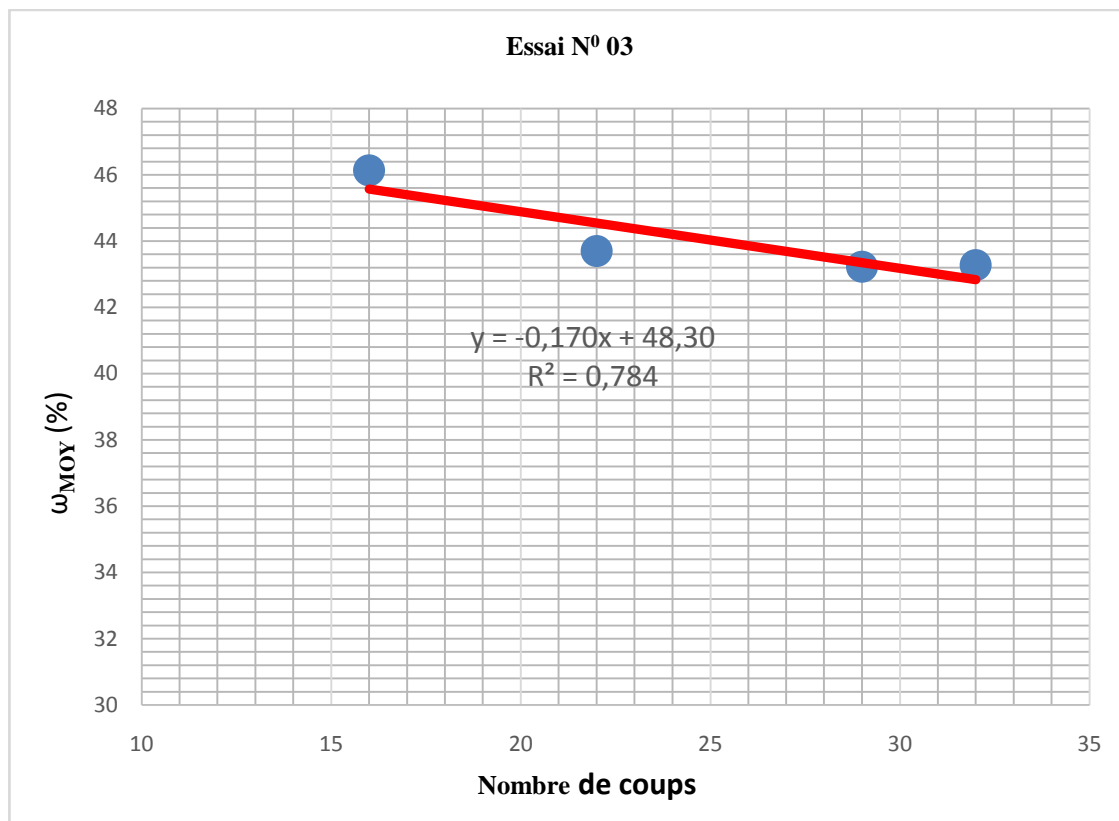


Figure 5.7 : Courbe de limite de liquidité WL en fonction de nombre de coups essai 03.

Le tableau ci-dessous représente la récapitulation des résultats de ces essais.

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

Essai n°	W_L %	W_P %	I_P % = $W_L - W_P$	$I_C = (W_L - W_{NAT})/I_P$
1	45,46	24,73	20,73	1,56
2	47,86	20,57	27,29	1,27
3	44,04	17,30	26,74	1,16
moyenne	45,78	20,86	24,92	1,33

f) Essai au bleu de méthylène

Six essais réalisés dont le résumé est indiqué au tableau ci-dessous.

Tableau 5.13 : Valeurs au bleu de méthylène par l'essai à la tâche.

	La masse du sol (g)	Volume de la solution (cm³)	VBS (g/cm³)	SST (m²/g)
Essai N°1	40	240	5,74	130,29
Essai N°2	40	255	5,88	140,58
Essai N°3	40	235	5,42	129,56
Essai N°4	40	210	4,90	115,18
Essai N°5	40	230	5,40	125,82
Essai N°6	40	230	5,47	125,18
La moyenne	40	233,33	5,47	127,77

Le tableau 5.14 présente des informations sur l'eau distillée dans l'ensemble des essais utilisés.

Tableau 5.14 : des informations sur l'eau distillée utilisée

L'eau distillée	PH	Turbidité Néphélométrique (ntμ)	Conductivité (μs/cm)
	6,91	0,9	8,01

Le tableau 5.15 résume les caractéristiques d'identification des essais effectués sur le sol témoin étudié.

Tableau 5.15 : Caractéristiques d'identification du sol témoin étudié

Paramètres	Symboles	Plages de variation	Moyenne
Profondeur	m	1,30 - 1,70	1,50
Teneur en eau naturel	W_{nat} (%)	12,45 - 13,73	13,09
Masse volumique humide	ρ_h (g/cm ³)	01,92 - 1,95	01,94
Masse volumique sèche	ρ_d (g/cm ³)	01,69 - 01,73	01,71
Limite de liquidité	W_L (%)	44,08 - 47,86	45,78
Limite de plasticité	W_P (%)	17,30 - 24,73	20,86
Indice de plasticité	I_P (%)	20,73 - 27,29	24,92
Indice de consistance	I_c (%)	01,21 - 01,63	01,33
Valeur de bleu du sol	VBS	04,90 - 05,88	05,47
Surface spécifique totale	SST (m ² /g)	115,18 - 140,58	127,77
Passants à 2 mm	%<2 mm	96,81 - 99,06	98,12
Passants à 80 μ m	%<0,08 mm	60,25 - 71,95	66,21
Teneur en eau optimale	W_{opt} (%)	15,30 - 16,70	15,53
Classification LCPC		Ap	Argile peu plastique

5.4 Interprétation des résultats des essais d'identification :

Les analyses granulométriques réalisées donnent un pourcentage des passants à 80 μ m compris entre 60,25 % et 71,95 % avec une moyenne de 66,21 %. Ces valeurs indiquent que le sol présente une granulométrie fine, le pourcentage de passants à 2 μ m varie entre 96,81 % et 99,06 % avec une moyenne de 98,12 %.

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%.

Selon la classification LCPC en vigueur (Magnan, 1980), il s'agit d'une argile peu plastique (AP) très consistante ($I_c = 1,33 > 1$) dur à très dur.

La raison principale de la faible teneur en eau de ce type de sol est la salinité élevée.

La valeur de bleu VBS est égale à 5,47. D'après la norme française NF P 11-300, il s'agit d'un sol limono-argileux. et la valeur de la surface spécifique totale (SST) correspondante est égale à 127,77 m²/g.

5.5 Essai mécanique :

Essai Proctor normal : Ont été réalisés trois essais de Proctor normal.

Tableau 5.16 : Masses volumiques sèches et teneurs en eau du sol témoin de l'essai 01

Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1712,1	1712,1	1712,1	1712,1	1712,1
Volume du moule (cm ³)	956,04	956,04	956,04	956,04	956,04
Masse du sol humide avec moule (g)	3430,6	3536,4	3563,7	3539,9	3518,54
Masse du sol humide (g)	1718,5	1824,3	1851,6	1827,8	1806,44
Masse volumique humide (g/cm ³)	1,8	1,91	1,94	1,91	1,89
Masse de la tare (g)	11,6	11,6	11,7	11,5	11,6
Masse sol humide + tare (g)	32,7	38	30,4	42,3	41,8
Masse sol sec + tare (g)	30,36	34,45	27,74	37,33	36,8
Masse d'eau (g)	2,34	3,55	2,66	4,97	5
Masse du sol sec (g)	18,76	22,85	16,04	25,83	25,2
Teneur en eau W (%)	12,5	15,53	16,56	19,24	19,84
Masse volumique sèche (g/cm³) ; $\rho_d = \rho_h / (1+W)$	1,6	1,65	1,66	1,6	1,58

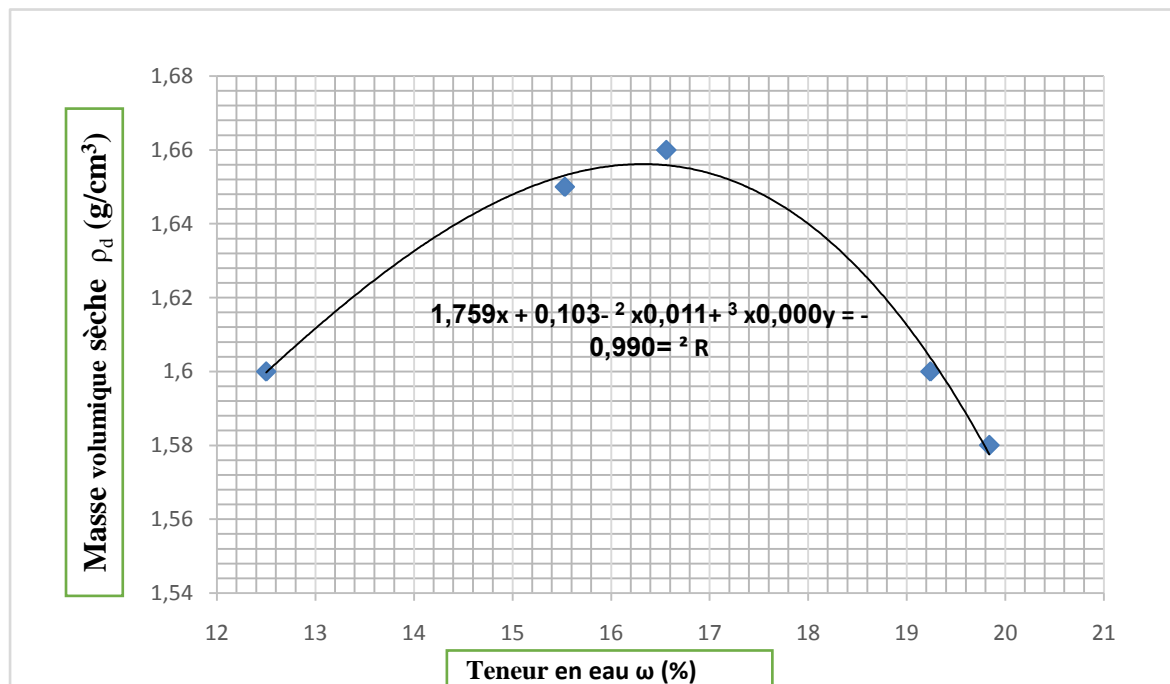


Figure 5.8 : Essai Proctor normal (essai 01).

Tableau 5.17 : Masses volumiques sèches et teneurs en eau du sol témoin essai 02.

Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1712,1	1712,1	1712,1	1712,1	1712,1
Volume du moule (cm ³)	956,04	956,04	956,04	956,04	956,04
Masse du sol humide avec moule (g)	3430,1	3486,6	3585,3	3531,2	3506,9
Masse du sol humide (g)	1718	1774,5	1873,2	1819,1	1794,8
Masse volumique humide (g/cm ³)	1,8	1,86	1,96	1,9	1,88
Masse de la tare (g)	11,4	11,6	11,6	11,5	11,8
Masse sol humide + tare (g)	38,3	47,8	49,1	38	46,2
Masse sol sec + tare (g)	35,5	43,8	44,05	33,88	39,89
Masse d'eau (g)	2,8	4	5,05	4,12	6,31
Masse du sol sec (g)	24,1	32,2	32,45	22,38	28,09
Teneur en eau W (%)	11,62	12,42	15,56	18,43	22,45
Masse volumique sèche (g/cm ³) ; $\rho_d = \rho_h / (1+W)$	1,61	1,65	1,7	1,61	1,53

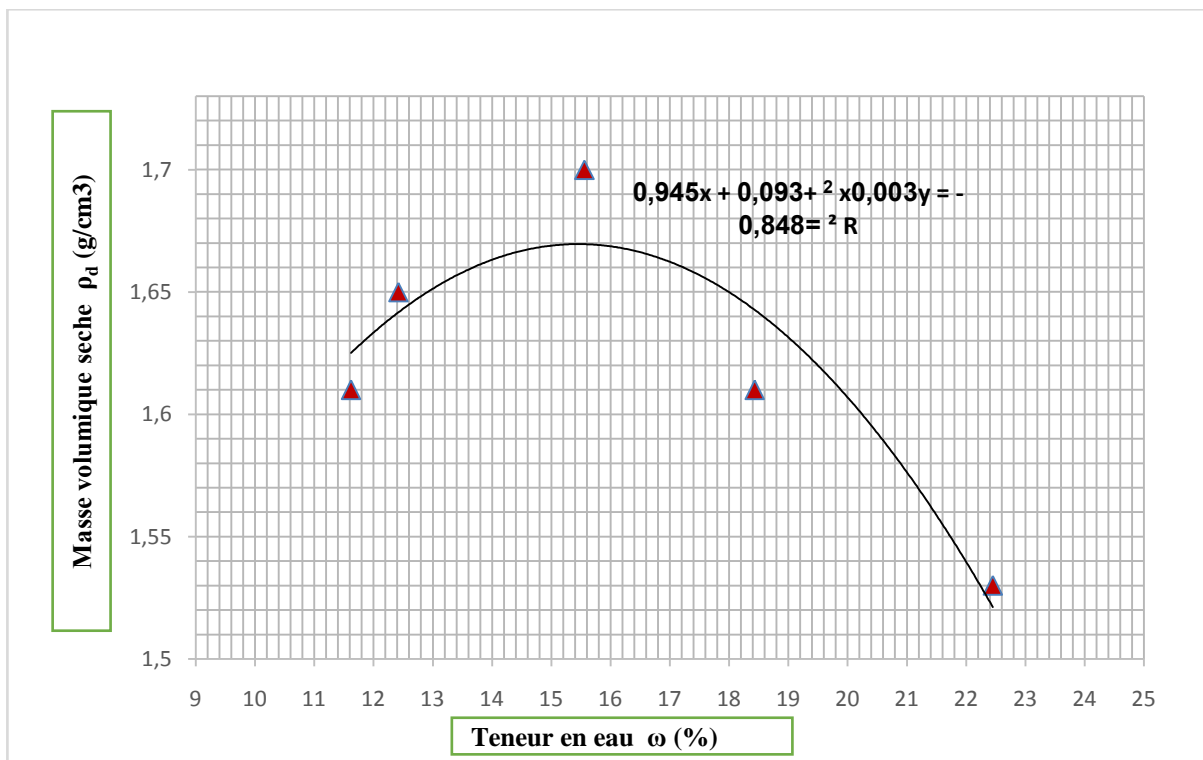
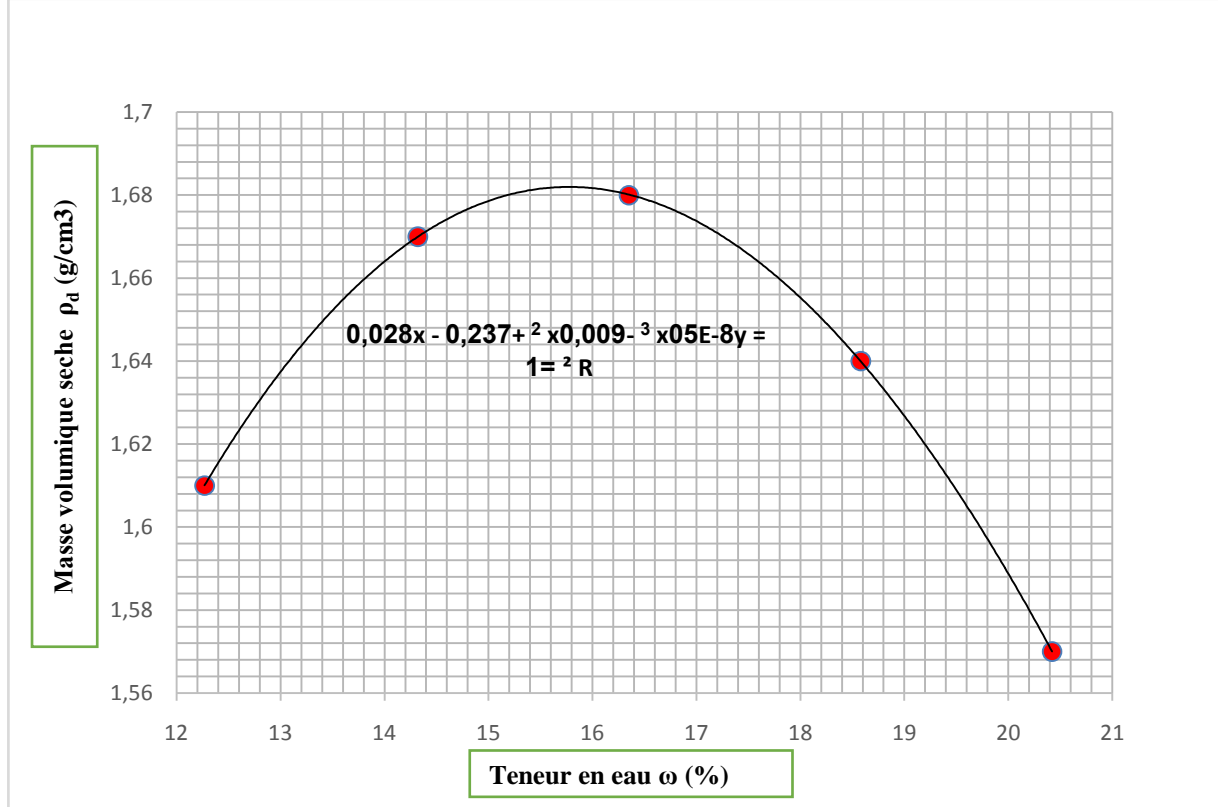
**Figure 5.9** : Essai Proctor normal (essai 02).

Tableau 5.18 : Masses volumiques sèches et teneurs en eau du sol témoin essai 03

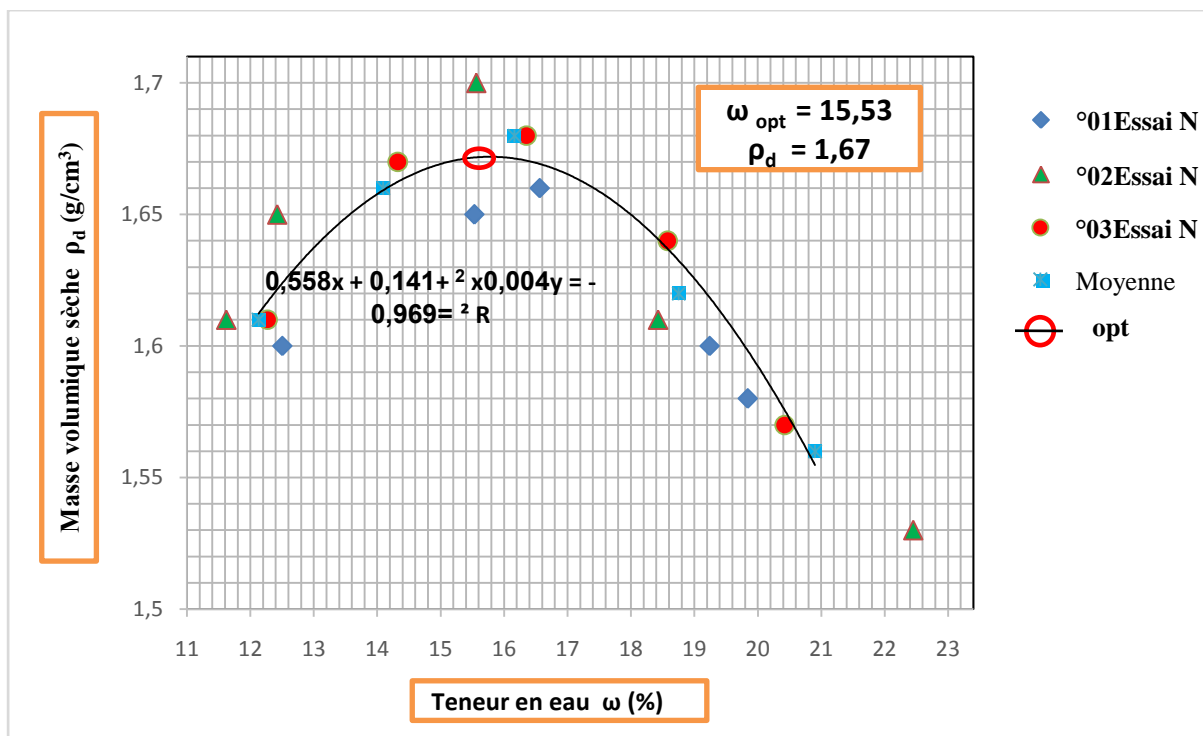
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1712,1	1712,1	1712,1	1712,1	1712,1
Volume du moule (cm ³)	956,04	956,04	956,04	956,04	956,04
Masse du sol humide + moule (g)	3442,1	3542,1	3579,7	3567,5	3521,4
Masse du sol humide (g)	1730	1830	1867,6	1855,4	1809,3
Masse volumique humide (g/cm ³)	1,81	1,91	1,95	1,94	1,89
Masse de la tare (g)	11,7	11,7	11,6	11,8	11,5
Masse sol humide + tare (g)	49,7	51,7	58,7	54,6	41,7
Masse sol sec + tare (g)	45,55	46,69	52,08	47,9	36,58
Masse d'eau (g)	4,154	5,01	6,62	6,705	5,122
Masse du sol sec (g)	33,85	34,99	40,48	36,1	25,08
Teneur en eau W (%)	12,27	14,32	16,35	18,58	20,42
Masse volumique sèche (g/cm ³) ; $\rho_d = \rho_h / (1+W)$	1,61	1,67	1,68	1,64	1,57

**Figure 5.10** : Essai 03 Proctor normal (essai 03).

Le Tableau 5.19 présente une récapitulation des trois essais de Proctor normal.

Tableau 5.19 : Masses volumiques sèches et teneurs en eau moyennes du sol témoin

Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Essai n°01					
Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)	1,60	1,65	1,66	1,60	1,58
Teneur en eau ω (%)	12,50	15,53	16,56	19,24	19,84
Essai n°02					
Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)	1,61	1,65	1,70	1,61	1,53
Teneur en eau ω (%)	11,62	12,42	15,56	18,43	22,45
Essai n°03					
Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)	1,61	1,67	1,68	1,64	1,57
Teneur en eau ω (%)	12,27	14,32	16,35	18,58	20,42

**Figure 5.11** : Résultats des essais Proctor normal.

Le tableau 5.20 résume les caractéristiques des essais de Proctor normal effectués sur le sol témoin étudié.

Tableau 5.20: Résumé des résultats des essais Proctor normal.

	ω_{opt} (%)	$\rho_d \text{ max}$ (g/cm ³)
Essai n° 01	16,70	1,66
Essai n° 02	15,30	1,67
Essai n° 03	15,60	1,68
Moyenne	15,53	1,67

La teneur en eau à l'optimum Proctor normal $W_{\text{opt}} = 15,53\%$ et la masse volumique sèche à l'optimum Proctor normal $\rho_{d \text{ opt}} = 1,67 \text{ g/cm}^3$.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale:

Ce sont les conséquences néfastes de la salinité du sol sur le bâti qui ont incité les chercheurs et les ingénieurs à penser à des remèdes et à des solutions aux causes des dégâts engendrés par ce phénomène, cette étude s'inscrit dans le cadre de la stabilisation des sols salés de la région du chott-El-Hodna (wilaya de M'sila). Il y a un manque des études qui traitent l'effet des sels sur les caractéristiques géotechniques des sols salés malgré que ce phénomène de salinité ait un impact négatif sur les projets d'infrastructures.

Le traitement des sols en place évite le transport et valorise les matériaux locaux. Il a pour objectif de réaliser des couches de fondation de meilleure qualité, dont les caractéristiques mécaniques seront considérablement rehaussées, ce qui donne une plus grande portance et une meilleure distribution des charges. Ces couches vont acquies une meilleure résistance à l'érosion en augmentant sensiblement leur durabilité.

Ce travail de recherche a été entrepris dans le but d'améliorer des caractéristiques géotechniques du sol de chott El-Hodna avec un traitement au ciment, mais nous n'avons pas pu atteindre notre objectif car 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.

L'étude bibliographique nous a permis d'identifier les sols salés et leurs caractéristiques physiques et mécaniques et la distribution des sebkhas dans le monde en général et l'Algérie en particulier.

L'étude expérimentale réalisée sur le sol de Chott El Hodna comporte des essais d'identifications tels que la teneur en eau, la masse volumique sèche et humide, l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, le VBS, et un essai de caractérisation limité sur le compactage Proctor normal.

Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes:

- Les échantillons prélevés sur le site de Chott El Hodna ont été identifiés comme une argile peu plastique très consistante.

La raison principale de la faible teneur en eau de ce type de sol est la salinité élevée.

- La diminution de la limite de liquidité est due à la diminution de la surface spécifique totale puisqu'il y a une relation inverse entre la teneur en eau et la salinité.
- La valeur de bleu VBS obtenue indique que le sol est limono-argileux et l'augmentation de la teneur en eau impact directement sur la diminution de la valeur au bleu méthylène.
- Les essais de compactage Proctor normal effectués en laboratoire ont permis de déterminer la densité sèche maximale correspondant à une teneur en eau optimale. 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 a une valeur moyenne de 1,67.

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

REFERENCES 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-Oudou 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.
- Duchaufour ph., 1983 : Pédogénèse et classification. 2^{ème} édition. Masson. Paris, 466 p.
- Duchaufour, P. (1977). *Pédologie. Pédogénèse et classification. Tome 1, Ed. Masson, Paris, 477p.*
- Duchaufour, P. (1988). *Abrégés de pédologie 2^{ème} 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. 15th 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. 10th 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. 15th 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.