

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 mixte (chaux/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 :

BENSILETTE Imane

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 mixte (chaux/ciment)
des sols du Chott-El-Hodna
(wilaya de M'sila)**

Promotion : 2020

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mes enseignants et encadreurs, Messieurs KHEMISSA Mohamed et MAHAMEDI Abdelkrim qui m'ont accordé leur confiance, aide et soutien dans l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements à tous mes professeurs, aux doctorants, techniciens de laboratoires, camarades de classe et personnels du département de génie civil pour leurs contributions à ma réussite.

Je remercie particulièrement mon mari Hamza qui m'a beaucoup aidée tout au long de mon travail.

A ma famille, et en particulier à ma mère et mon père, leur intelligence, leur confiance, leur tendresse, leur amour me portent et me guident tous les jours.

Merci pour avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Je remercie également toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de ce mémoire.

Enfin, Je remercie mes amies et camarades de promotion pour les bons moments qu'on a passé ensemble durant notre formation.

Imane

Dédicaces

Avec les sentiments de la plus profonde humilité je dédie ce modeste travail :

A mon cher père Ahmed qui m'a toujours soutenu, qui a sacrifié sa vie pour notre bien, qui s'est privé de tout pour répondre à nos besoins. Aucun mot ne saurait exprimer tout mon amour, ma gratitude et ma profonde reconnaissance.

A ma chère mère Djemaa celle qui m'a donné la vie, à la lumière de mon âme, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, merci pour votre présence dans les moments qui m'étaient les plus difficiles.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur mon mari Hamza.

A mes chers frères Rachid, Youcef, Khalil, Saad, Bouzid et Akrame, je vous souhaite tout le bonheur et la réussite du monde.

A mes chères sœurs Ahlam, Zineb, Nacira Halom et Souhila, que dieu vous procure santé et bonheur durant toute votre vie.

A mon camarade Abdelhalim Mahamedi, pour l'aide qu'il m'a prodigué à l'élaboration de ce mémoire.

A ma deuxième famille : Baba Omar, Mama Djamila, je vous souhaite une vie pleine de bonheur.

A mon encadreur, Dr Mahamedi Abdelkrim les mots ne suffisent guère pour exprimer mes remerciements pour votre patience, vos conseils précieux et critiques constructives, je vous souhaite une vie pleine de bonheur.

A toutes mes amies et à tous ceux qui m'ont aidé à mettre au point ce travail.

Iman

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des tableaux

Liste des figures

Résumé

Abstract

ملخص

Introduction générale 1

1ère 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 22

2.1 Objectifs du traitement 22

2.2 Techniques de traitement 23

2.3 Traitement chimique 23

2.4 Traitement mixte à la chaux et au ciment 26

2.5 Techniques de réalisation des travaux de traitement 26

2.6 La chaux 28

2.7 Les ciments 32

2ème partie

Etude expérimentale

Chapitre 3: Description du site étudié 36

Introduction 36

| | |
|---|-----------|
| 3.1 Contexte de l'étude | 36 |
| 3.2 Description de la région d'étude | 38 |
| 3.3 Aspect géographique et administratif | 39 |
| 3.4 Prélèvement d'échantillons | 40 |
| Chapitre 4: Programme expérimental et procédures d'essais | 41 |
| Introduction | 41 |
| 4.1 Programme expérimental | 41 |
| 4.2 Propriétés des liants hydrauliques utilisés | 41 |
| 4.3 Liste des essais | 43 |
| 4.4 Description des essais | 44 |
| Chapitre 5: Présentation et analyse des résultats d'essais | 50 |
| Introduction | 50 |
| 5.1 Les essais d'identification | 50 |
| 5.2 Interprétation | 61 |
| 5.3 Essai mécanique | 61 |
| Conclusion générale | 66 |
| Références bibliographiques | 68 |

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 (Madanni, 2008)..... | 6 |
| Figure 1.2 : Situation géographique des Chotts et Sebkhass en Algérie (Demnati, 2013)..... | 7 |
| Figure 1.3 : Analyse granulométrique du sol de Sebkhass (Al-Amoudi et al., 1992)..... | 13 |
| Figure 1.4 : Analyse granulométrique (Mansour et al., 2008)..... | 14 |
| Figure 1.5 : Limite de liquidité (Mansour et al., 2008)..... | 17 |
| Figure 1.6 : Courbes de compactage (Mansour et al., 2008)..... | 18 |
| Figure 1.7 : Courbes de compressibilité (Al-Amoudi et al., 1992)..... | 19 |
| Figure 1.8 : Courbes de compressibilité des échantillons naturel et lavé (Kim et al., 2008)... | 20 |
| Figure 2.1 : Critères d'utilisation du traitement chimique (Dept. Of the Army,1983)..... | 25 |
| Figure 2.2 : Représentation des actions de la chaux sur les caractéristiques de compactage et de résistance au poinçonnement dans le cas d'un sol de classe A ₂ traité à 2% de chaux vive (LCPC-SETRA, 2000)..... | 27 |
| Figure 2.3 : Schéma du principe de la fabrication de la chaux..... | 29 |
| Figure 2.4 : schéma récapitulatif des quatre méthodes de fabrication du ciment..... | 33 |
| Figure 3.1 : Régime mensuel de précipitations à la station de M'sila au cours de la période (1980 – 2016)..... | 36 |
| Figure 3.2 : Régime mensuel de température à la station de M'sila au cours de la période (1980 – 2016)..... | 37 |
| Figure 3.3 : Chott el Hodna en période d'hiver..... | 38 |
| Figure 3.4 : Chott el Hodna en période d'été..... | 39 |
| Figure 3.5 : Localisation de Chott El-Hodna par rapport aux communes de M'sila..... | 40 |
| Figure 3.6 : Site de prélèvement des échantillons d'essai..... | 40 |
| Figure 5.1 : Courbe d'analyse granulométrique essai N°01..... | 52 |
| Figure 5.2 : Courbe d'analyse granulométrique essai N°02..... | 53 |
| Figure 5.3 : Courbe d'analyse granulométrique essai N °03..... | 53 |
| Figure 5.4 : Représentation des trois essais d'analyse granulométrique par tamisage..... | 54 |

| | |
|--|----|
| Figure 5.5 : Résultats des limites d'Atterberg de l'essai n° 01 | 58 |
| Figure 5.6 : Résultats des limites d'Atterberg de l'essai n° 02 | 58 |
| Figure 5.7 : Résultats des limites d'Atterberg de l'essai n° 03 | 58 |
| Figure 5.8 : Abaque de Casagrande relatif au trois essais..... | 59 |
| Figure 5.9 : Résultats de l'essai Proctor normal n°01 | 63 |
| Figure 5.10 : Résultats de l'essai Proctor normal n°02..... | 63 |
| Figure 5.11 : Résultats de l'essai Proctor normal n° 03..... | 64 |
| Figure 5.12 : Courbe moyenne de Proctor normal..... | 65 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1.1 : Distribution des sols salés dans le monde (Szabolcs, 1989)..... | 5 |
| Tableau 1.2 : Risques d'alcalisation du milieu d'après le paramètre SAR..... | 9 |
| Tableau 1.3 : Classes des sols affectés par les sels (USSL, 1954)..... | 10 |
| Tableau 1.4 : Les références des sols salés (AFES, 2008)..... | 11 |
| 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)..... | 25 |
| Tableau 4.1 : Propriétés physico-chimiques de la chaux éteinte de Saïda..... | 42 |
| Tableau 4.2 : Propriétés physico-chimiques du ciment utilisé..... | 42 |
| Tableau 4.3 : Dosage en chaux et ciment considérés pour le traitement..... | 43 |
| Tableau 5.1 : Détermination de la teneur en eau et la masse volumique humide et sèche... | 50 |
| Tableau 5.2 : Granulométrie par tamisage de l'essai n°01..... | 51 |
| Tableau 5.3 : Granulométrie par tamisage de l'essai n°02..... | 51 |
| Tableau 5.4 : Granulométrie par tamisage de l'essai n°03..... | 52 |
| Tableau 5.5 : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n° 01..... | 55 |
| Tableau 5.6 : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n° 01..... | 55 |
| Tableau 5.7 : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n° 02..... | 56 |
| Tableau 5.8 : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n° 02..... | 56 |
| Tableau 5.9 : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n° 03..... | 57 |
| Tableau 5.10 : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n° 03..... | 57 |
| Tableau 5.11 : Récapitulatif des résultats des essais de limites d'Atterberg..... | 59 |
| Tableau 5.12 : Valeur de bleu de méthylène par l'essai à la tâche..... | 60 |
| Tableau 5.13 : Caractéristiques d'identification du sol étudié..... | 60 |
| Tableau 5.14 : Résultats de l'essai Proctor normal n° 01..... | 61 |
| Tableau 5.15 : Résultats de l'essai Proctor normal n° 02..... | 62 |
| Tableau 5.16 : Résultats de l'essai Proctor normal n° 03..... | 62 |
| Tableau 5.17 : Résumé des résultats des essais Proctor normal..... | 64 |

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 à la chaux et au ciment (traitement mixte).

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

- La première partie présente une synthèse bibliographique qui traite les sols salés ainsi que le traitement de ces sols. Elle se compose de deux chapitres :
 - Le premier chapitre présente un aperçu sur les sols salés dans le monde et particulièrement en Algérie et définit ensuite la structure des sols salés suivi d'une

description des phénomènes de salinisation. Il se termine ensuite par l'énumération des méthodes expérimentales d'identification et de caractérisation des sols salés.

- Le deuxième chapitre traite l'essentiel du traitement des sols (techniques de traitement possible, techniques de réalisation des travaux de traitement, traitement chimique notamment 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 mixte à la chaux et 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 évènements, variations climatiques et phénomènes de sédimentation, au cours des Temps quaternaires. Les sols sodiques ne sont pas toujours utilisables; ils ne peuvent l'être que moyennant diverses précautions.

1.2 Les sols salés en Algérie et dans le monde

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

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

| 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).

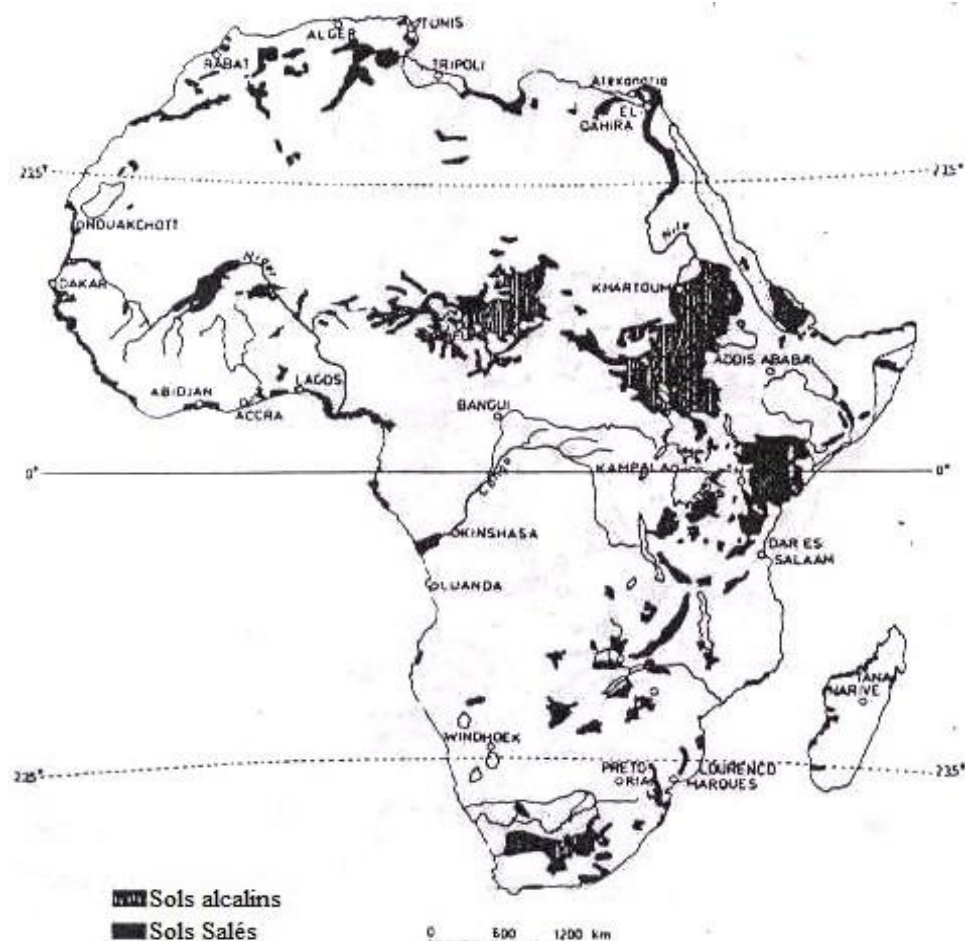


Figure 1.1 : Distribution des sols salés en Afrique (Madanni, 2008).

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). Leur répartition géographique est très étendue (Figure 1.2). Mis à part le chott du Hodna on peut citer les Chotts qui constituent le complexe de Oum El Bouaghi dans l'est des hauts plateaux, le Zahres Chergui et Gherbi au centre et chott Chergui, sebkha de Naâma à l'ouest, la sebkha d'Oran et les salines d'Arzew dans les plaines littorales. Au Sahara septentrional, on compte également un nombre important de Chotts, incluant le Grand

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

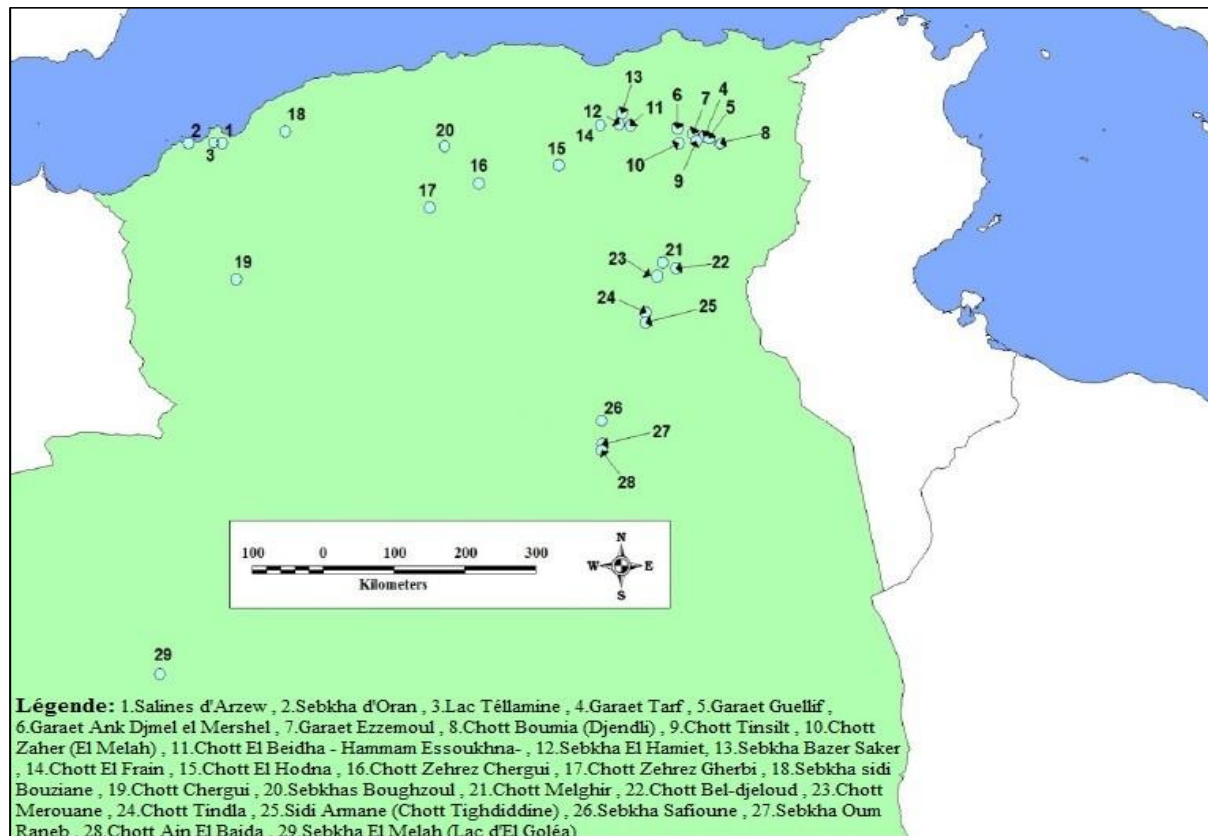


Figure 1.2 : Situation géographique des Chotts et Sebkhahs en Algérie (Demnati, 2013).

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

1.3 Caractéristiques des sols salés :

Tout sol qui renferme des sels solubles en quantités anormalement élevée 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 cm^2 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^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) 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, Pieltain, & F, 2003). Le SAR est calculé selon l'expression suivante :

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

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

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

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

1.3.2 Caractéristiques physiques

a) Capacité de rétention en eau

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

b) Structure et perméabilité

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

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

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

1.4 Classification des sols salés

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

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

Tableau 1.3 : Classes des sols affectés par les sels (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.

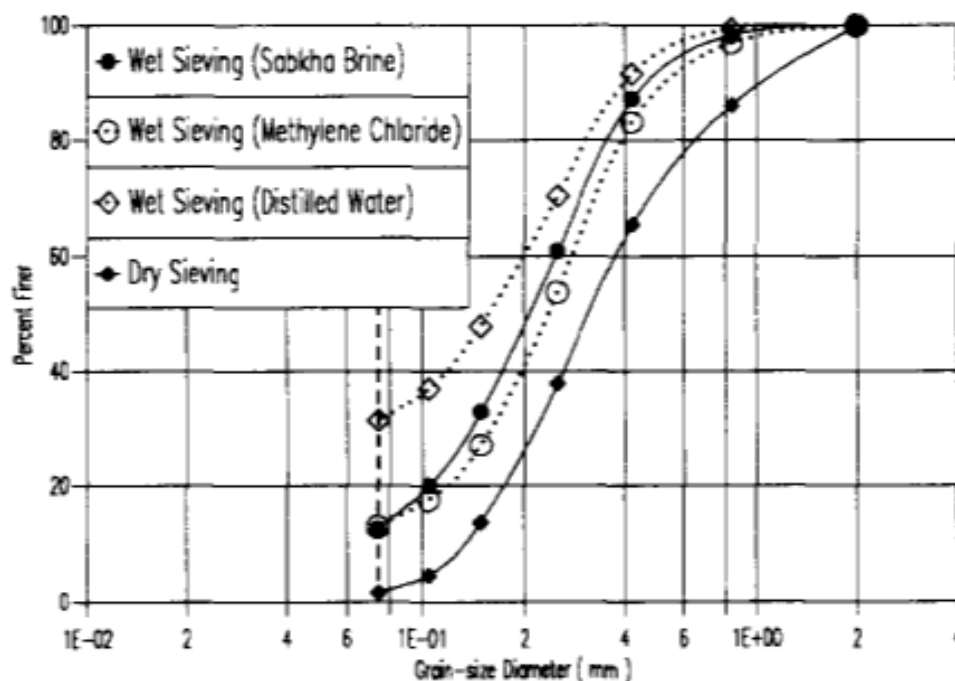


Figure 1.3 : Analyse granulométrique du sol de Sebkhass (Al-Amoudi et al., 1992).

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.

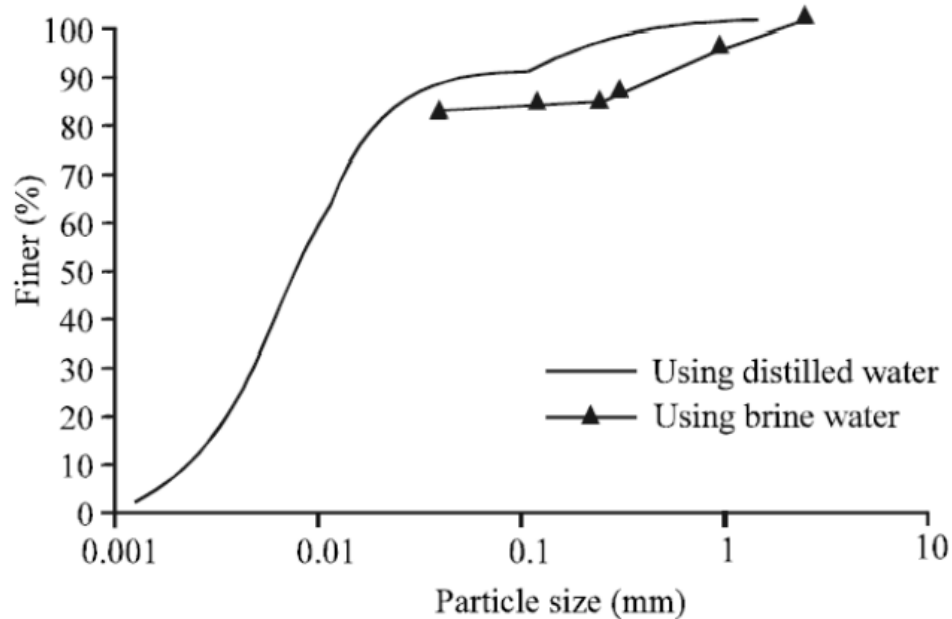


Figure 1.4 : Analyse granulométrique (Mansour et al., 2008).

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) a conduit à une augmentation des valeurs des limites de liquidité et de plasticité en utilisant de la saumure naturelle en comparaison avec les résultats obtenus en utilisant de l'eau distillée.

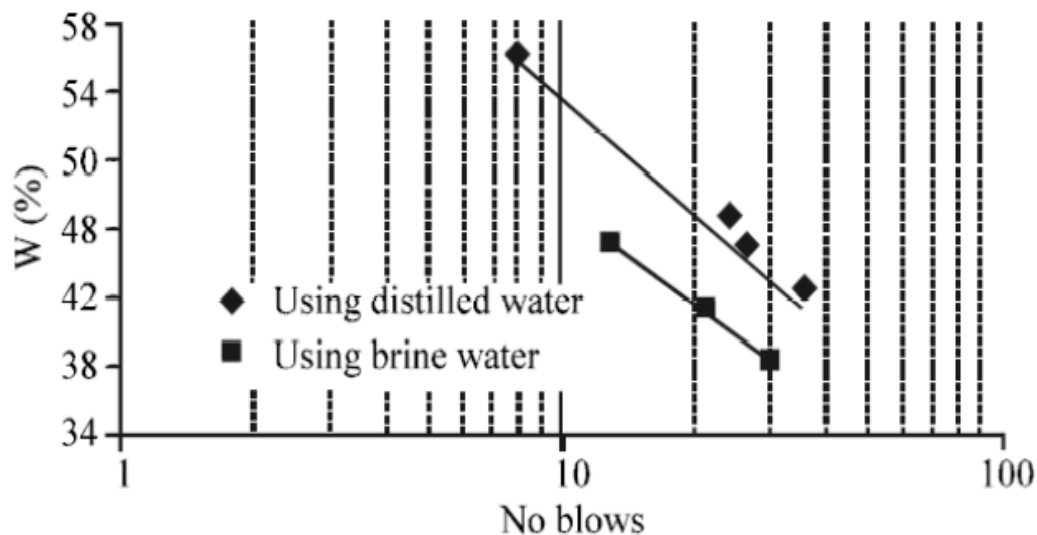


Figure 1.5 : Limite de liquidité (Mansour et al., 2008).

1.6.4 Compactage

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

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

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

Al-Amoudi et al. (1992), ont réalisé des essais Proctor sur des échantillons d'un sol sableux de la 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

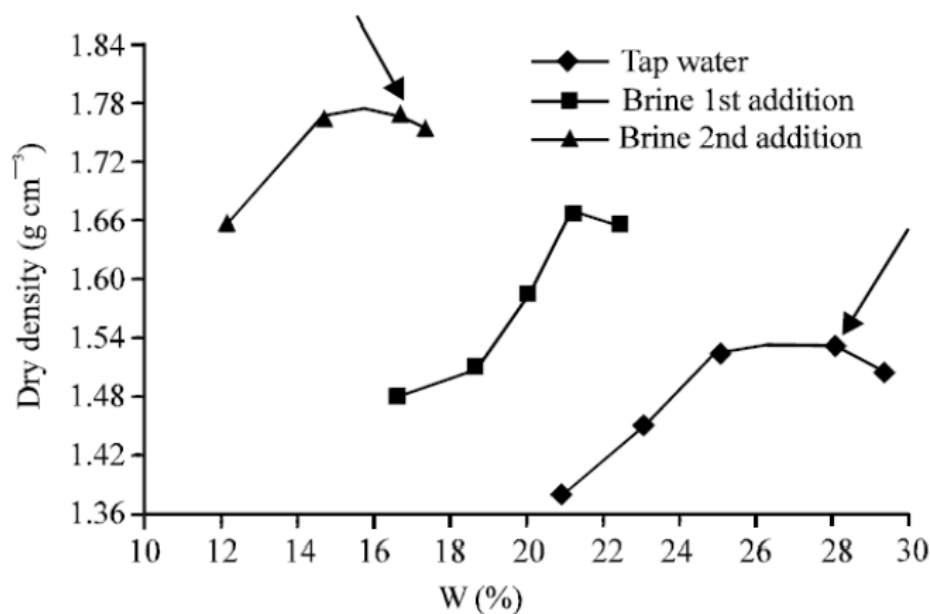


Figure 1.6 : Courbes de compactage (Mansour et al., 2008).

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).

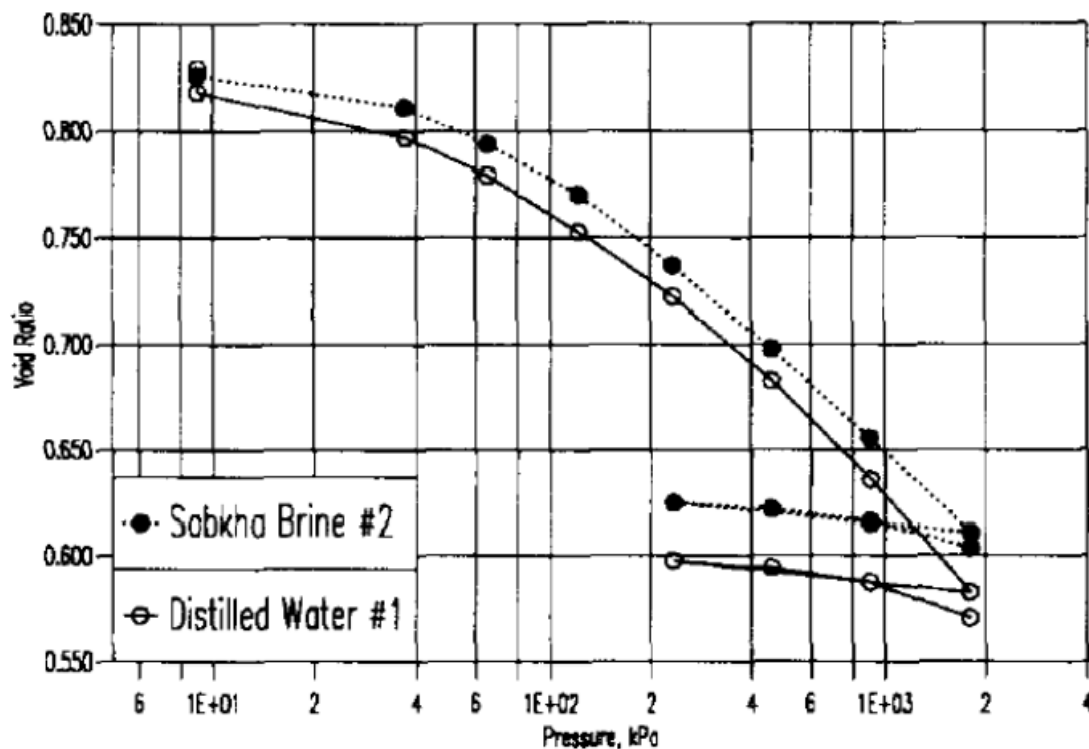


Figure 1.7 : Courbes de compressibilité (Al-Amoudi et al., 1992).

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).

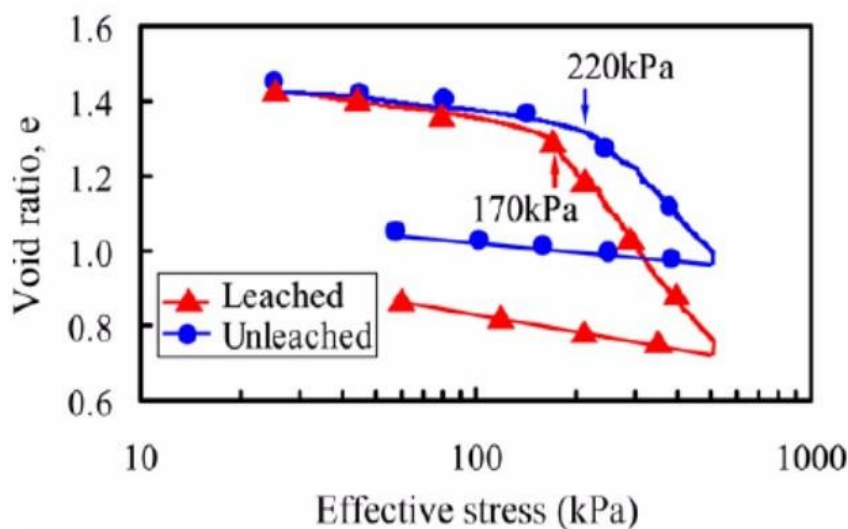


Figure 1.8 : Courbes de compressibilité des échantillons naturel et lavé (Kim et al., 2008).

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 mixte (chaux/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 ; Tonoz et al., 2004, 2006 ; etc.). Les études de traitement effectuées sur des sols gonflants confirment l'action de la chaux sur leurs caractéristiques de plasticité et de gonflement (Al-Mukhtar et al., 2010 ; Al-Rawas et al., 2005 ; Bell, 1996 ; Nalbantoglu, 2006 ; Stavridakis, 2006 ; Tonoz et al., 2006 ; etc.). D'autres produits de traitement (sable de dunes, solutions salines, bitume, poussière de pierres, etc.) ont été testés pour stabiliser les sols gonflants et autres sols problématiques (Brooke, 2009 ; Harichane et al., 2011 ; Khabbaz et Fatahi, 2011 ; Louafi et Bahar, 2012 ; Mohammedzein et Al-Rawas, 2011 ; Ramadas et al., 2011 ; Sharma et al., 2012 ; etc.). Les résultats obtenus montrent une amélioration des propriétés géotechniques des sols étudiés, mais l'efficacité de ces produits n'est pas encore clairement établie en pratique. Parmi les produits de traitement qui viennent d'être cités, seuls donc les liants hydrauliques (chaux et ciment) présentent un intérêt particulier dans la suite de cette étude. Les conditions de leur 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 de la combinaison de la chaux et du ciment (traitement mixte) . 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).

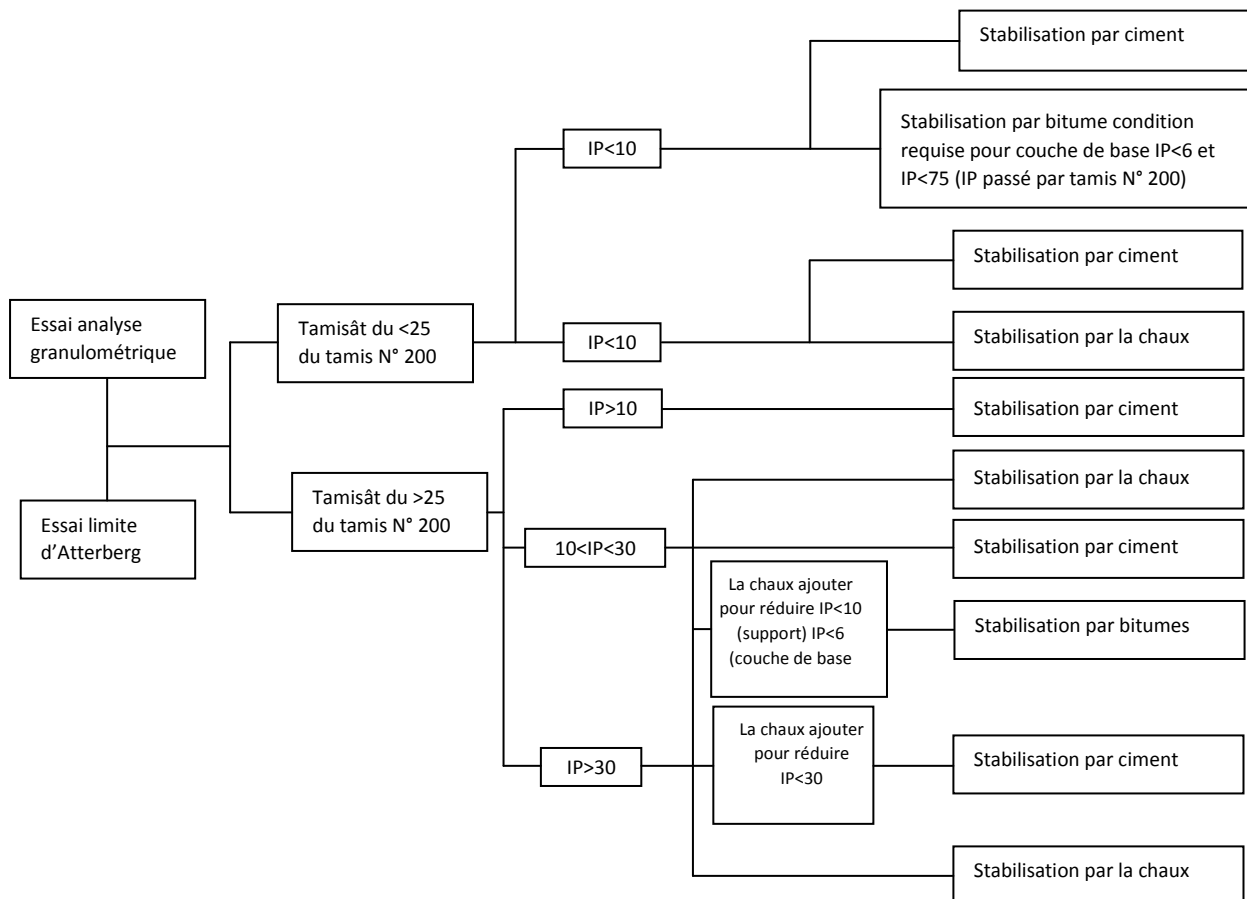


Figure 2.1 : Critères d'utilisation du traitement chimique (Dept. Of the Army,1983).

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 mixte à la chaux et au ciment :

Ce mode de traitement constitue un compromis entre les traitements simples à la chaux et au ciment préconisés pour les sols trop humides et peu argileux respectivement destinés à une utilisation en couches de forme routières.

L'action de ces deux liants est complémentaire (le traitement à la chaux assèche les matériaux humides et le traitement au ciment apporte au mélange une rigidification rapide). Toutefois, un traitement préalable à la chaux à faible dose (0,5 à 2%) par son action immédiate amène le sol à son état optimal pour le traitement au ciment. La figure 2.2 montre l'effet du traitement mixte à la chaux (1% de CaO) et au ciment (4% de CPJ-CEM II/A 32,5) sur les courbes Proctor et CBR destinés à déterminer les caractéristiques de mise en œuvre des sols traités pour couches de forme. On notera en particulier :

- sur la courbe de compactage, une diminution de la densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale se traduisant par un décalage de la courbe de compactage vers la ligne de saturation ;
- sur la courbe de portance, une augmentation de l'indice portant immédiat correspondant à une teneur en eau de mise en œuvre égale à 90% de la teneur en eau optimale.

2.5 Techniques de réalisation des travaux de traitement

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

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

- La préparation du sol à traiter (élimination des éléments blocaille, homogénéisation, humidification éventuelle).
- L'épandage du liant de traitement.
- Le malaxage du liant avec le sol.
- L'ajustement de l'état hydrique (soit humidifier le sol par arrosage, soit l'assécher par aération).
- Le réglage du mélange.
- Le compactage.
- L'application de la protection superficielle du sol traité (cas d'une couche de forme).

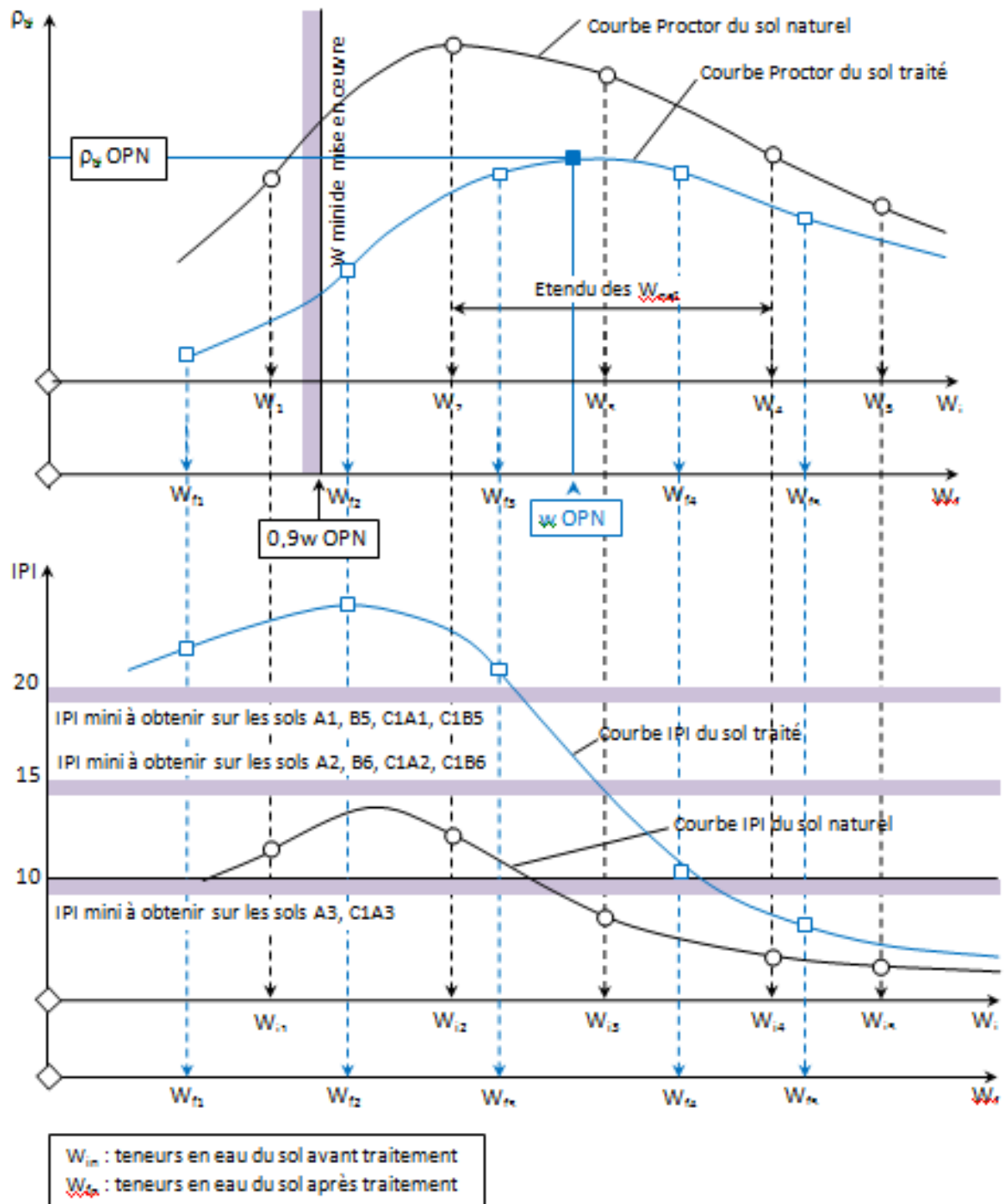


Figure 2.2 Exemple de représentation d’une étude Proctor Normal-IPI à réaliser pour la détermination des caractéristiques de mise en œuvre des sols traités pour couches de forme (cas d’un sol A₂ traité à 1% de CaO + 4% de CPJ-CEM II/A 32,5 (LCPC-SETRA, 2000a).

2.6 La chaux

2.6.1 Définition

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

2.6.2 Historique

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

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

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

2.6.3 La fabrication des chaux hydrauliques naturelles

a) La matière première

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

b) La cuisson

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

c) L'extinction

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

d) Le broyage

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

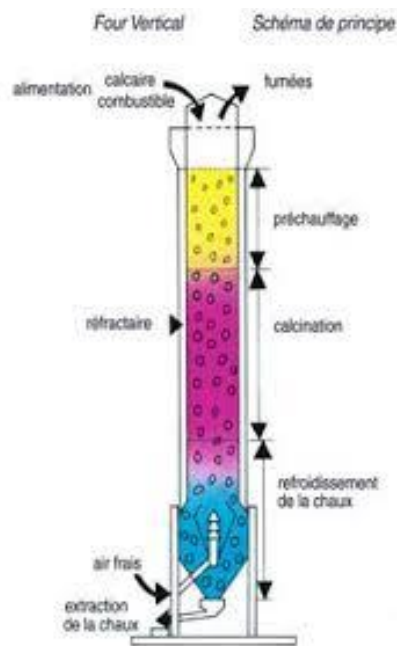


Figure 2.3 : Schéma du principe de la fabrication de la chaux.

2.6.4 Différent types de chaux

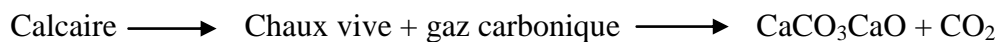
La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux :

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

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

2.6.4.1 Chaux vive

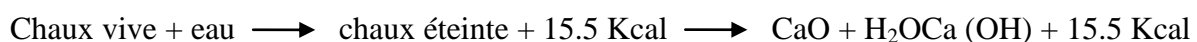
Constituée principalement d'oxyde de calcium CaO, généralement à plus de 90%. La calcination du calcaire (carbonate de calcium) entraîne la formation de chaux vive (oxyde de calcium) et de gaz carbonique (dioxyde carbonique).



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

2.6.4.2 Chaux éteinte

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



2.6.5 Caractéristiques chimique et physiques

2.6.5.1 Caractéristiques chimiques

a) **Teneur en CaO** : La teneur en CaO est évidemment la principale caractéristique d'une chaux mais ce CaO peut être libre, c'est-à-dire sous forme d'oxyde CaO ou d'hydroxyde Ca(OH)₂, ou combiné sous forme :

- De carbonate, soit parce que le calcaire d'origine n'a pas été complètement dissocié et qu'il reste des incuits, soit parce qu'il y a eu ré-carbonations de la chaux au contact de l'air. Le CaO ainsi combiné peut être considéré comme inerte pour la plupart des emplois routiers, on apprécie son importance grâce à la teneur en CO₂ de la chaux.
- De silicates et d'aluminates.
- Eventuellement, mais plus rarement, d'autres sels (sulfates, phosphates, par exemple).

b) **Teneur en MgO** : La teneur en MgO est également importante à connaître puisque la Magnésie a en général une action analogue à la chaux. Le MgO, comme le CaO, peut être libre ou combiné, les principales indications données par l'analyse chimique d'une chaux seront donc les teneurs en : CaO total et CaO libre, MgO, CO₂, SiO₂, AL₂O₃ et FeO₃. Il n'est pas nécessaire de connaître toutes ces valeurs, les teneurs en CaO et MgO sont souvent suffisantes.

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

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

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

2.6.5.2 Caractéristiques physiques

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

2.7 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

2.7.1 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).
- e) Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).
- f) 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 (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃), et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). 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 Fe₂O₃, l'oxyde ferrique.
- g) 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 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

- h) 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 °C, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique (CO₂) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO₃).
- i) Le mélange est porté à 1450-1550 °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 Al₂O₃ et Fe₂O₃ en formant une masse liquide. SiO₂ 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

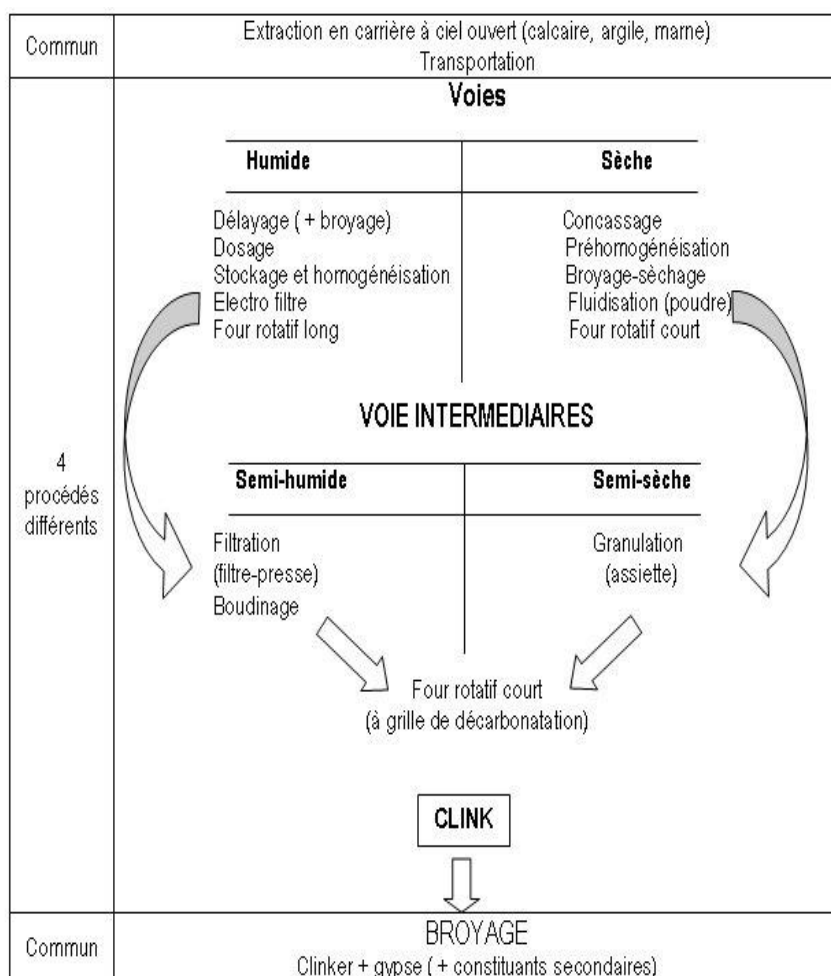


Figure 2.4 : schéma récapitulatif des quatre méthodes de fabrication du ciment

2.7.2 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).

2.7.3 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

Pour apurer l'applicabilité des concepts évoqués dans la synthèse bibliographique permettant d'exhausser les sols salés par un traitement chimique, notamment le traitement chimique mixte chaux/ciment et de leur utilisation en construction routière, un site situé à la wilaya de M'sila a été choisi. Le choix de ce site a été pris en raison de son extension vers des terrains moins favorable. Outre le contexte général de l'étude légitimant ce choix (géologie et climatologie de la zone). Ce chapitre donne une description du site en relation avec la zone d'étude et le niveau de prélèvement des échantillons d'essais.

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).

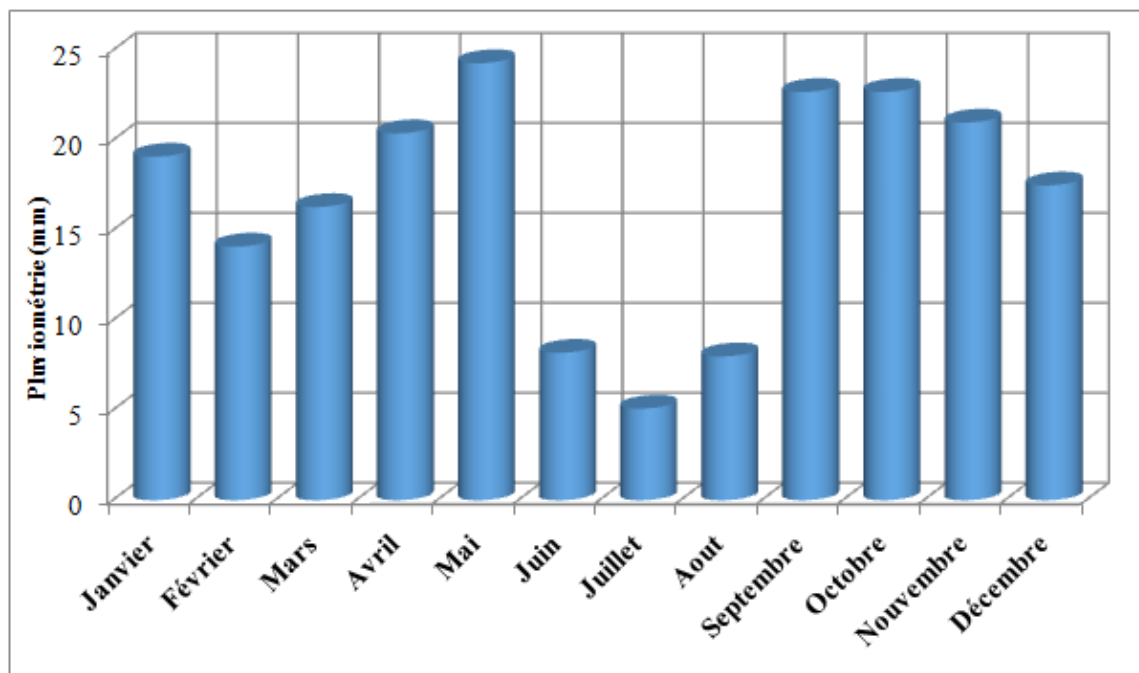


Figure 3.1 : Régime mensuel de précipitations à la station de M'sila au cours de la période (1980 – 2016).

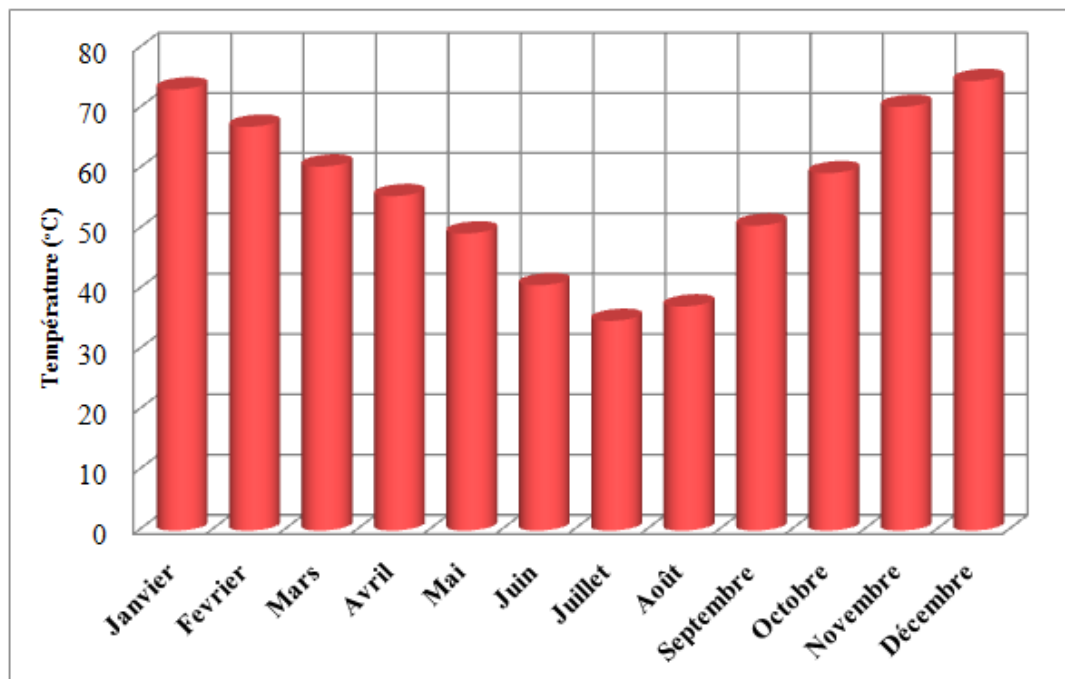


Figure 3.2 : Régime mensuel de température à la station de M'sila au cours de la période (1980 – 2016).

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.

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).

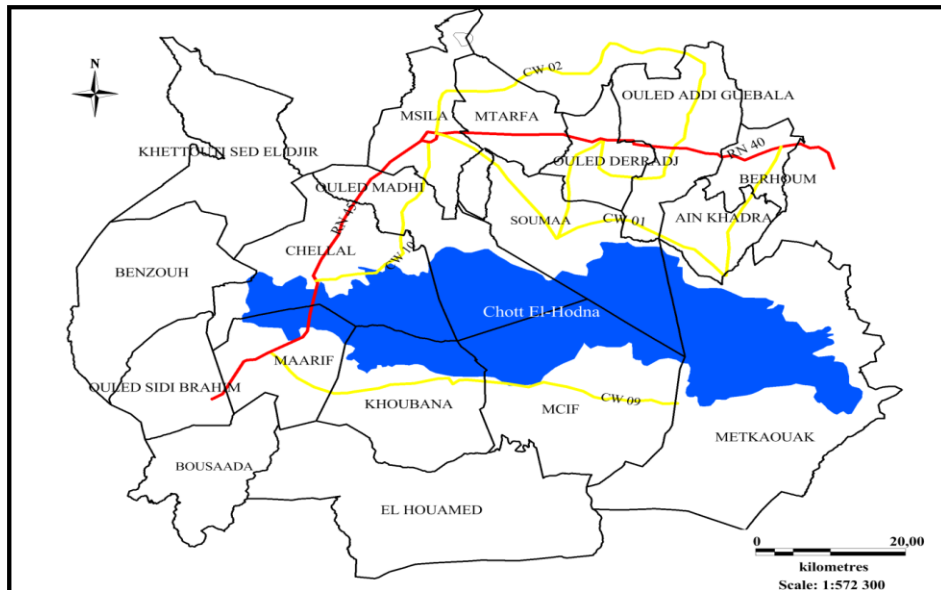


Figure 3.5 : Localisation de Chott El-Hodna par rapport aux communes de M'sila.

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 nous allons citer le programme expérimental qui devrait être suivi pour l'identification ainsi que pour la caractérisation du sol étudié de Chott El Hodna. Pour cela nous allons décrire les essais programmés pour cette étude ainsi que leur procédure d'exécution.

4.1 Programme expérimental

Le programme expérimental a été totalement réalisé au sein du laboratoire de recherche de Géomatériaux de la faculté de Technologie de l'université de M'sila. Ce programme est réparti en deux parties :

La première partie concerne les essais d'identification effectués sur le sol témoin (non traité).

La deuxième partie concerne le seul essai de caractérisation qui concerne le compactage du sol non traité.

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

4.2 Propriétés des liants hydrauliques utilisés

Le traitement est effectué en mélangeant le sol aux liants hydrauliques (dans notre cas le traitement mixte chaux /ciment) dans les proportions données ci-après. La chaux utilisée est de type chaux éteinte provenant des usines ERCO de Hassasna (wilaya de Saïda) et le ciment utilisé est de type Portland composé fabriqué localement dans la cimenterie Lafarge de Hammam-Dalaâ (wilaya de M'sila). Le tableau 4.1 présente les caractéristiques physiques et chimiques de la chaux et le tableau 4.2 présente les caractéristiques physiques et chimiques du ciment.

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

| Description | NHL | |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------|
| Propriétés physiques | Densité | 600-900 g/l |
| | Coefficient d'absorption | < 5 |
| | Sensibilité au gel | < 30 |
| | Volume d'extinction | 2,73 cm ³ |
| | Refus 630 µm | 0 % |
| | Refus 90 µm | < 10 % |
| Propriétés chimiques | Humidité | > 5 |
| | CaO | > 83,3 % |
| | MgO | < 0,5 % |
| | Fe ₂ O ₃ | < 2 % |
| | Al ₂ O ₃ | < 1,5 % |
| | SiO ₂ | < 2,5 % |
| | SO ₃ | < 2,5 |
| | Na ₂ O | < 4,7 – 0,5 |
| | CO ₂ | < 5 |
| | CaCO ₃ | < 10 |
| | Insolubles dans HCL | < 1 |

Tableau 4.2 : Propriétés physico-chimiques du ciment utilisé.

| Désignation | Commerciale | MATINE |
|-----------------------------|--|--------------------------|
| | Codifiée (norme) | CEM II/B 42,5 R (NA 442) |
| Propriétés physiques | Consistance normale de la pâte de ciment (%) | 25 – 28,5 |
| | Finesse Blaine (µm/m) | 4150 – 5250 |
| | Début de prise | 140 – 195 min |
| | Fin de prise | 195 – 290 min |
| | Retrait à 28 jours d'âge (µm/m) | < 1000 |
| | Expansion (mm) | 0,3 – 2,5 |
| | Résistance à la compression à 28 jours (MPa) | ≥ 42,5 |
| Propriétés chimiques | Pertes au feu (%) | 7,5 – 12 |
| | Résidus solubles (%) | 0,7 – 2 |
| | Teneur en sulfates SO ₃ (%) | 2 – 2,7 |
| | Teneur en Oxyde de Magnésium MgO (%) | 1 – 2,2 |
| | Teneur en Chlorures (%) | 0,01 – 0,05 |
| | Teneur en Silicates tricalciques C3S (%) | 55 – 62 |
| | Teneur en alcalis (%) | 0,5 – 0,75 |

Les teneurs pondérales en ciment et en chaux considérés pour le traitement mixte sont données dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Dosage en chaux et ciment considérés pour le traitement

| Désignation | C0L0 | C0L12 | C2L10 | C4L8 | C6L6 | C8L4 | C10L2 | C12L0 |
|----------------------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| Dosage en ciment (%) | 0 | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| Dosage en chaux (%) | 0 | 12 | 10 | 8 | 6 | 4 | 2 | 0 |

4.3 Liste des essais

La liste des essais d'identification et de caractérisation qui devrait être suivie est la suivante :

4.3.1 Sol non traité

Essais d'identification

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

Essais mécaniques

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

4.3.2 Sol traité :

Essais d'identification

- Les limites d'Atterberg.

- L'essai de bleu de méthylène.
- Analyse chimique : EDX.
- Analyse microstructurale : MIP.
- Analyse minéralogique : DRX, MEB.

Essais mécaniques

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

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

4.4 Description des essais

4.4.1 Analyse minéralogique

La diffraction des rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique. Elle ne s'applique que sur la matière cristalline, mais pas sur la matière amorphe.

La technique consiste à émettre des rayons X sur la matière cristalline, les rayons X provoquent un déplacement du nuage électronique dans le noyau des atomes. Ces oscillations induites provoquent une réémission d'ondes électromagnétique de même fréquences. La longueur d'onde des rayons X étant de l'ordre de grandeur des distances interatomiques (quelques angströms), les interférences des rayons diffusés vont être alternativement constructive ou destructives.

4.4.2 Analyse chimique

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

4.4.3 Teneur en eau (NF P 94-050)

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

$$W = \frac{m_s}{m_d}$$

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

4.4.4 Poids volumique sec et humide (NF P 94-053)

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

La masse volumique d'un sol (ρ_d) est le quotient de la masse des grains solides (m_s) du sol par le volume (V) qu'il occupe. La masse volumique sèche peut être obtenue comme le rapport du poids volumique humide par l'unité plus la teneur en eau ($\gamma_d = \gamma_h / (1 + \omega)$).

4.4.5 Analyse granulométrique

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

A. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056)

C'est l'ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur 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 de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

B. Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P 94-057)

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

d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données.

4.4.6 Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Quelque soit la nature de l'argile, celle-ci malaxée avec des quantités d'eau de plus en plus importantes finit par se transformer en boue « l'argile a un comportement liquide ».

Au contraire, si l'argile est suffisamment desséchée, les grains sont très resserrés et les liaisons deviennent intenses « l'argile a un comportement solide ».

Entre ces deux états, l'argile est malléable « elle a un comportement plastique ».

Ces trois états de consistance sont des paramètres géotechniques destinés à identifier les sols, caractériser leur consistance et permettre de ce fait de les classer :

- ✓ Limite de liquidité W_L .
- ✓ Limite de plasticité W_P .
- ✓ Indice de plasticité $I_P = W_L - W_P$
- ✓ Indice de consistance $I_C = \frac{(W_L - W_{nat})}{I_P}$

On peut tirer aussi l'activité d'une argile « A_c » qui se définit comme suit :

$$A_c = \frac{\text{Indice de plasticité}}{C_2 = (\% \text{ éléments } < 2\mu\text{m})}$$

4.4.7 Essai au bleu de méthylène (NF P 98-068)

Le principe de l'essai consiste à maintenir en permanence sous agitation un mélange [échantillon tamisé à $80\mu\text{m}$ + eau], puis à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène par doses successives, jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées, il apparaît alors un excès qui marque la fin de l'essai et qui est détecté par le test de la tache. Ce dernier consiste à former avec une goutte de la suspension sur du papier filtre normalisé, une tache qui est un dépôt de sol coloré en bleu, entouré d'une zone humide incolore. L'excès de bleu se traduit par l'apparition dans cette zone d'une auréole d'un bleu clair. Le test est alors positif.

De cet essai, on peut tirer les paramètres suivant :

- ✓ La valeur du bleu : $VBS = \frac{\text{Volume en cm}^3 \text{ de solution}}{\text{Poids sec de la prise}}$

$$\checkmark \text{ La surface spécifique totale : } SST = 20,93 \times V_{cc} \times \frac{1}{P_s}$$

Avec :

- SST : Surface spécifique totale (m²/g).
- V_{cc} : Volume de la solution utilisée (cm³).
- P_s : Poids du matériau sec (g).
- 20,93 : surface correspondant à 1 cm³ de bleu de méthylène.

4.4.8 Analyse microstructurale

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

4.4.9 Essai Proctor (NF P 94-093)

L'essai Proctor mesure les variations de la compacité d'un sol, en fonction de la teneur en eau à laquelle il est préparé et ce en fonction de l'énergie de compactage. L'essai est standardisé, ainsi et en fonction de l'énergie de compactage, on différencie « Proctor normal » du « Proctor modifié ».

En pratique, on prépare 5 échantillons de sol à des teneurs en eau différentes et on les compacte par un certain nombre de coup de dame (25 coups pour le Proctor normal) puis on mesure la masse volumique sèche et la teneur en eau des éprouvettes.

4.4.10 Essai CBR immédiat et après imbibition (NF P 94-078)

L'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante (1.27 mm/min) dans une éprouvette de matériau. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels (2.5 et 5 mm) sont respectivement rapportés aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements. L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés.

a. CBR immédiat

De cet essai nous pouvons tirer l'indice CBR immédiat.

$$= \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm}}{13.35} \times 100$$

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

L'indice recherché est la plus grande valeur.

b. CBR après imbibition

De cet essai on peut tirer deux paramètres :

1. L'indice CBR après imbibition

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm}}{13.35} \times 100$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5.0 mm}}{19.93} \times 100$$

L'indice recherché est la plus grande valeur.

2. Le gonflement linéaire

Après quatre (4) jours d'immersion ($\pm 2h$) on mesure la hauteur ou l'amplitude du gonflement Δh indiquée par le comparateur : $G\% = \frac{\Delta h}{h} \times 100$

4.4.11 Essai de cisaillement direct (NF P 94-071-1)

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes, dans notre cas le but est de déterminer l'effort de cisaillement. L'échantillon de sol est préparé selon les caractéristiques optimums et sous l'énergie de Proctor normal, l'essai adopté pour le cisaillement est non consolidé non drainé (UU) avec une vitesse de 1 mm/min et une course de 6 mm de déplacement horizontal.

En utilisant la boîte de cisaillement carrée (36 cm²), on divise le contenu du moule Proctor normal en trois parties représentatives des trois couches du moule (la couche 1 représente la couche supérieure, la couche 2 représente la couche intermédiaire et enfin la couche 3 représente la couche inférieure).

4.4.12 Essai de compression simple (NF P 18-406)

L'essai permet de mesurer la résistance à la rupture en compression simple R_c du sol. L'éprouvette généralement cylindrique de dimension normalisée de 10.2 cm de diamètre et 11cm de hauteur est placée entre les deux plateaux d'une presse et soumise à des charges croissantes jusqu'à rupture.

La vitesse d'écrasement doit être suffisamment rapide (1.5 à 2 mm/min) pour qu'aucun drainage ne puisse se produire pendant l'essai.

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

L'essai se fait sur une éprouvette cylindrique de dimensions normalisées de 10.2 cm de diamètre et 11 cm de hauteur.

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

La résistance à la compression simple sera :

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

- F : force au moment de la rupture.
- S : section de l'éprouvette.

4.4.13 Mesures aux ultrasons

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

Chapitre 5

Présentation et analyse des résultats d'essais

Ce chapitre représente l'ensemble des résultats des essais réalisés sur l'échantillon de sol prélevé sur le site de Chott el Hodna dans la wilaya de M'sila, ainsi que l'interprétation de ces résultats. Le chapitre est organisé sous forme de deux parties, la première résume les essais d'identification effectués sur le sol étudié (paramètres d'état, granularité, limites d'Atterberg) et leur interprétation et la seconde partie résume l'essai de caractérisation Proctor normal, effectué sur le sol étudié.

5.1 Les essais d'identification

Les tableaux 5.1 à 5.11 présentent les résultats des essais d'identification (paramètres d'état, granulométrie, limites d'Atterberg) obtenus à partir d'un prélèvement effectué à une profondeur comprise entre 1.30 à 1.70 mètres. Le tableau 5.12 présente les valeurs de bleu de méthylène déterminées à partir de six essais et enfin le tableau 5.13 présente un résumé des caractéristiques d'identification des essais effectués sur le sol étudié.

5.1.1 Paramètres d'états :

Le sol étudié est prélevé à une profondeur entre 1,3 à 1,70 mètres.

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

| | Moule 1 | Moule 2 |
|--|--------------|---------|
| Masse du moule (g) : m_1 | 721.25 | 710.38 |
| Masse humide totale (g) : m_2 | 913.68 | 905.78 |
| Masse sèche totale (g) : m_3 | 890.45 | 884.15 |
| Volume du moule (cm^3) : V | 100.00 | 100.00 |
| Masse de l'eau (g) : $m_w = m_2 - m_3$ | 23.23 | 21.64 |
| Masse du sol humide (g) : $m_h = m_2 - m_1$ | 192.43 | 195.41 |
| Masse du sol sec (g) : $m_d = m_3 - m_1$ | 169.20 | 173.77 |
| Teneur en eau (%) : $W_n = (m_w/m_d) \times 100$ | 13.73 | 12.45 |
| La moyenne (%) : W_n | 13.09 | |
| Masse volumique humide (g/cm^3) : $\rho_h = m_h/V$ | 1.897 | 1.926 |
| La moyenne : ρ_h (g/cm^3) | 1.92 | |
| Masse volumique sèche (g/cm^3) : $\rho_d = m_d/V$ | 1.668 | 1.713 |
| La moyenne : ρ_d (g/cm^3) | 1.72 | |

5.1.2 Analyse granulométrique par tamisage

Les tableaux 5.2 à 5.4 sont résultants de trois essais d'analyse granulométrique par tamisage. Les figures 5.1, 5.2 et 5.3 présentent les courbes granulométriques de chaque essai.

Tableau 5.2 : Granulométrie par tamisage de l'essai n°01

| Tamis (mm) | Poids refus partiel (g) | Refus cumulés (g) | Refus cumulés (%) | Tamisât en (%) |
|------------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| 3.15 | 01.37 | 01,37 | 00,46 | 99,54 |
| 2.5 | 01.48 | 02,85 | 00,95 | 99,05 |
| 2 | 01.65 | 04,50 | 01,50 | 98,50 |
| 1.6 | 01.04 | 05,54 | 01,85 | 98,15 |
| 1.25 | 02.09 | 07,63 | 02,54 | 97,46 |
| 1 | 00.89 | 08,52 | 02,84 | 97,16 |
| 0.8 | 01.73 | 10,25 | 03,42 | 96,58 |
| 0.5 | 03.18 | 13,43 | 04,48 | 95,52 |
| 0.315 | 08.58 | 22,01 | 07,34 | 92,66 |
| 0.125 | 36.72 | 58,73 | 19,58 | 80,42 |
| 0.08 | 25.42 | 84,15 | 28,05 | 71,95 |

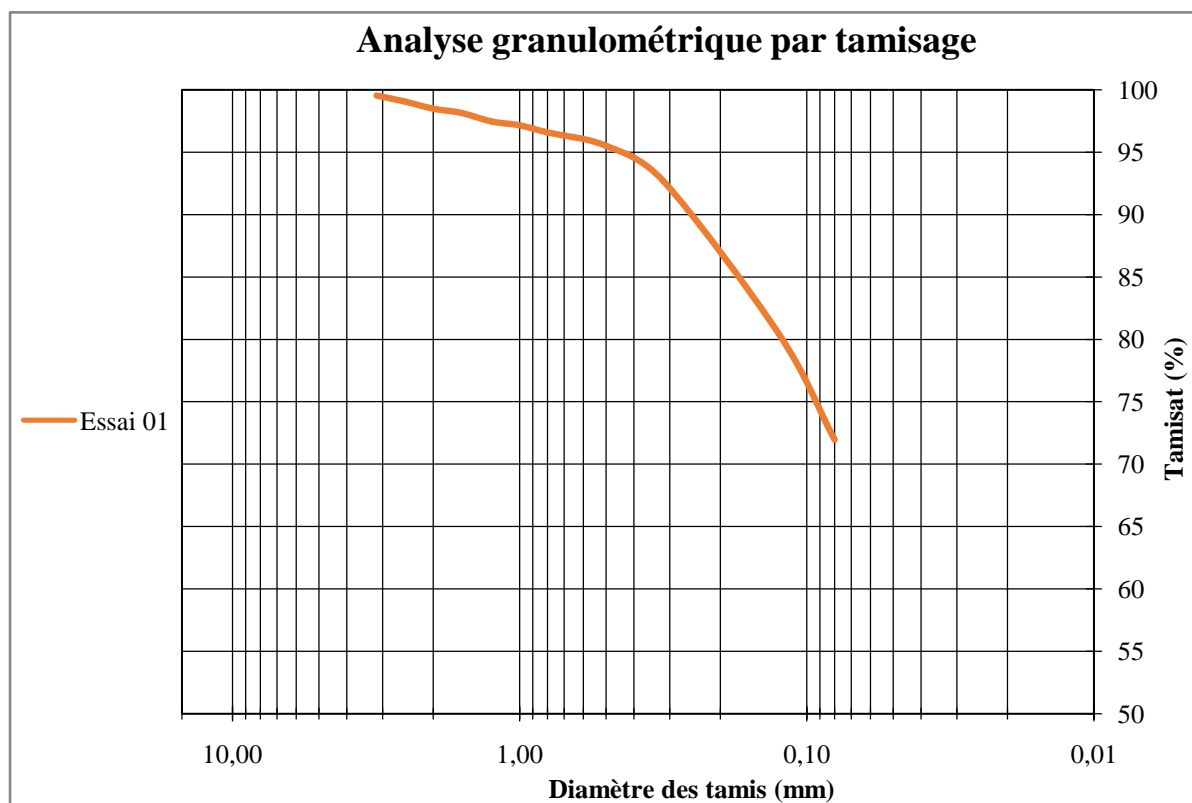
Tableau 5.3 : Granulométrie par tamisage de l'essai n°02

| Tamis (mm) | Poids refus partiel (g) | Refus cumulés (g) | Refus cumulés (%) | Tamisât en (%) |
|------------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| 3.15 | 00,78 | 00,78 | 00,26 | 99,74 |
| 2.5 | 00,90 | 01,68 | 00,56 | 99,44 |
| 2 | 01,13 | 02,81 | 00,94 | 99,06 |
| 1.6 | 00,89 | 03,70 | 01,23 | 98,77 |
| 1.25 | 01,59 | 05,29 | 01,76 | 98,24 |
| 1 | 00,93 | 06,22 | 02,07 | 97,93 |
| 0.8 | 01,52 | 07,74 | 02,58 | 97,42 |
| 0.5 | 02,95 | 10,69 | 03,56 | 96,44 |
| 0.315 | 09,60 | 20,29 | 06,76 | 93,24 |
| 0.125 | 37,12 | 57,41 | 19,14 | 80,86 |
| 0.08 | 43,28 | 100,69 | 33,56 | 66,44 |

Tableau 5.4 : Granulométrie par tamisage de l'essai n°03

| Tamis (mm) | Poids refus partiel (g) | Refus cumulés (g) | Refus cumulés (%) | Tamisât en (%) |
|------------|-------------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| 3.15 | 02,94 | 02,94 | 0,98 | 99,02 |
| 2.5 | 02,48 | 05,42 | 01,81 | 98,19 |
| 2 | 04,14 | 09,56 | 03,19 | 96,81 |
| 1.6 | 02,81 | 12,37 | 04,12 | 95,88 |
| 1.25 | 04,36 | 16,73 | 05,58 | 94,42 |
| 1 | 02,1 | 18,83 | 06,28 | 93,72 |
| 0.8 | 03,58 | 22,41 | 07,47 | 92,53 |
| 0.5 | 05,43 | 27,84 | 09,28 | 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 |

Les figures 5.1, 5.2 et 5.3 représentent les courbes granulométriques pour chaque essai d'analyse granulométrique par tamisage.

**Figure 5.1 :** Courbe d'analyse granulométrique essai N°01.

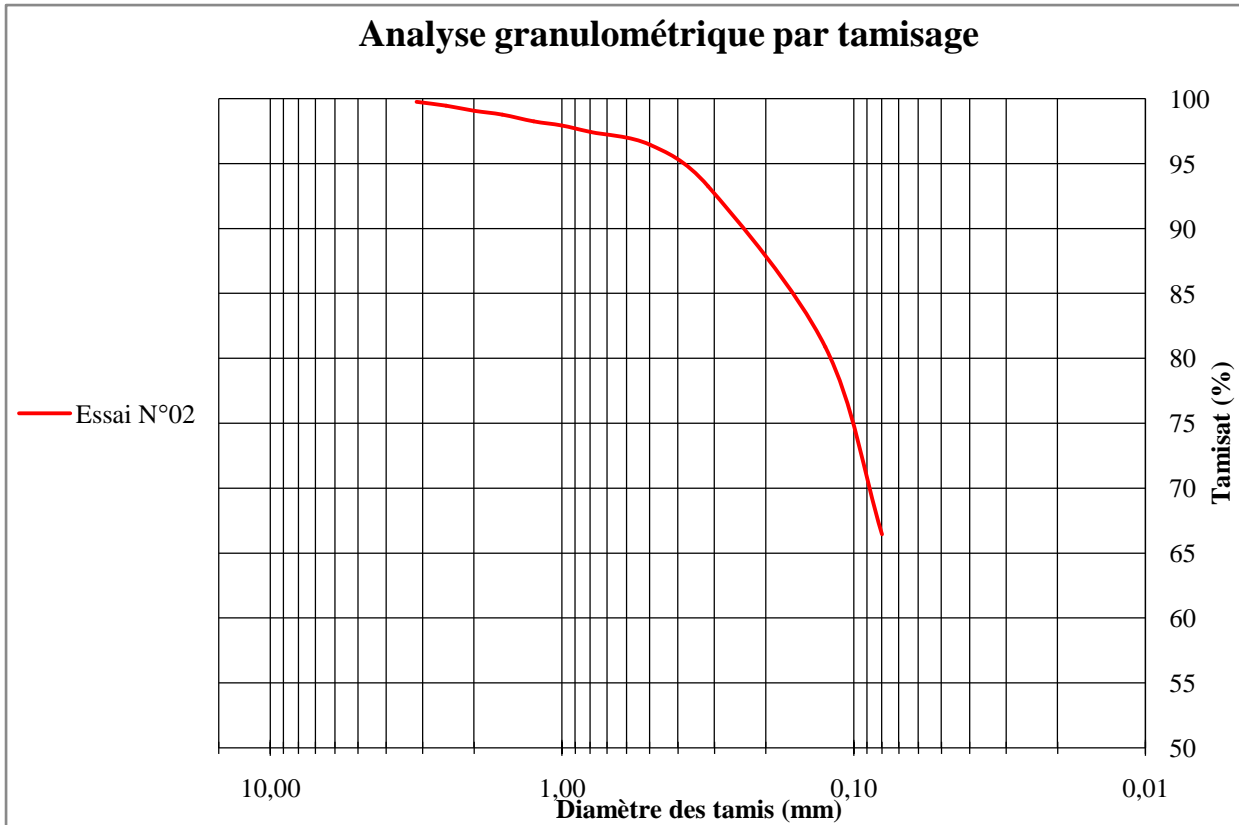


Figure 5.2 : Courbe d'analyse granulométrique essai N°02.

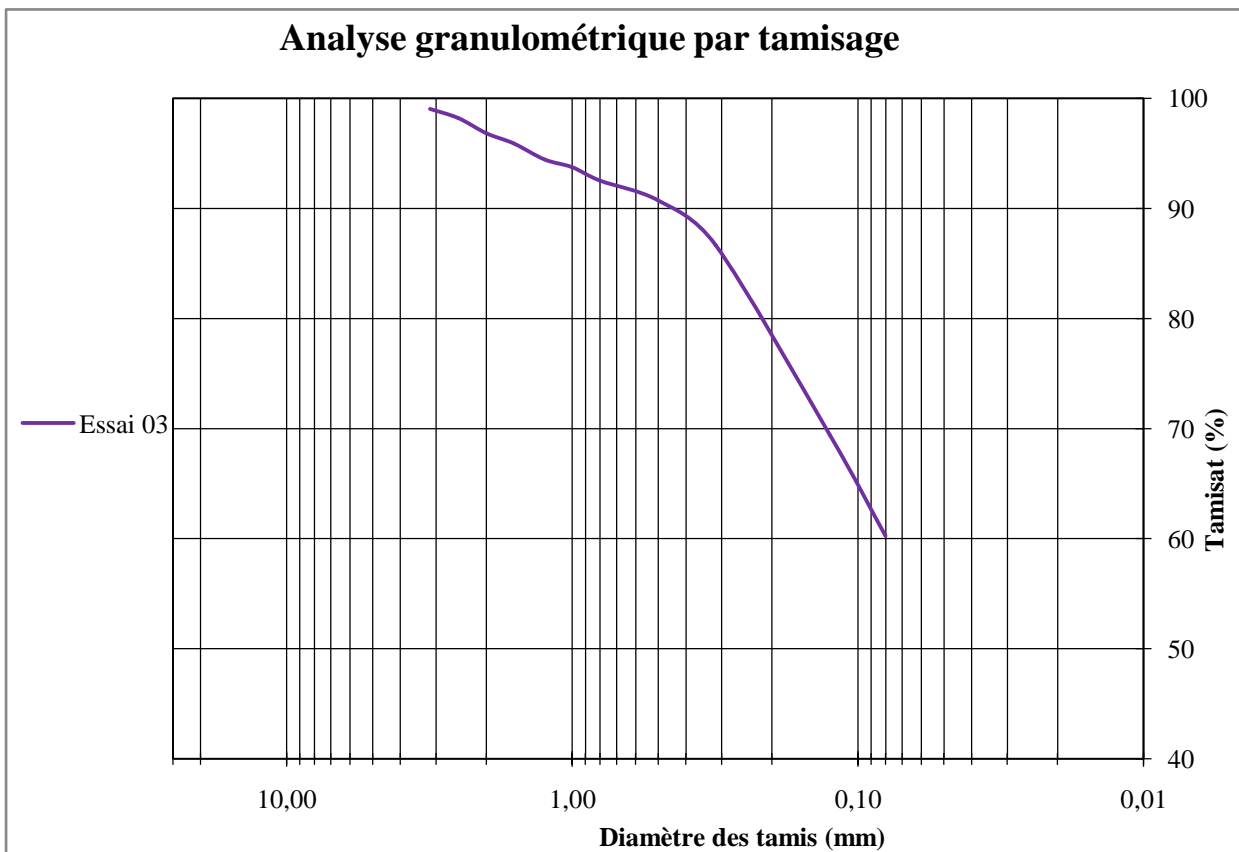


Figure 5.3 : Courbe d'analyse granulométrique essai N°03.

Le figure 5.4 ci-dessous et une représentation des trois courbes granulométriques dans le même diagramme.

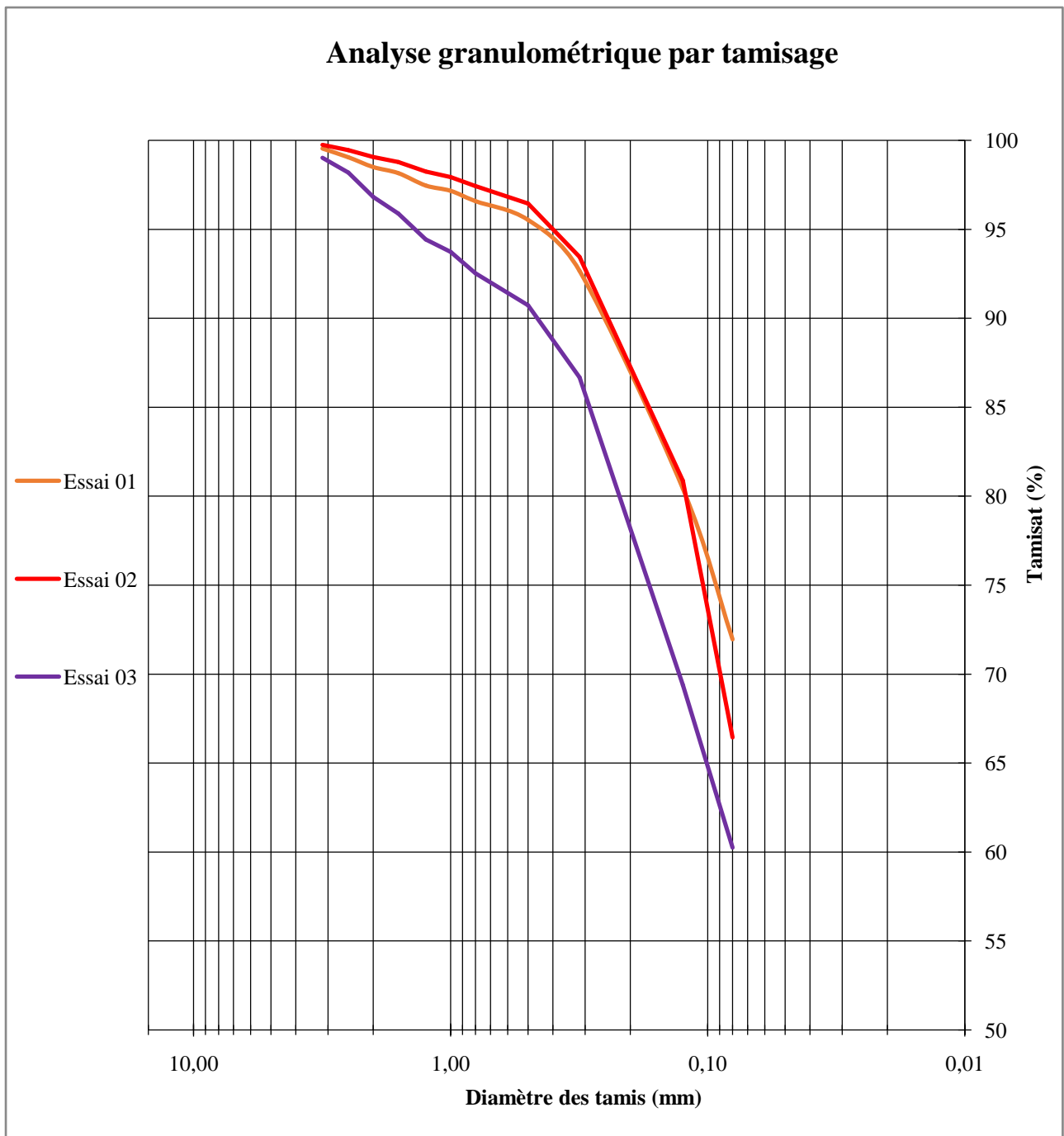


Figure 5.4 : Représentation des trois essais d'analyse granulométrique par tamisage.

5.1.3 Limites d'Atterberg

Nous avons réalisés trois essais pour déterminer les limites d'Atterberg, les tableaux 5.5 à 5.10 présentes les résultats obtenus. Les courbes des limites d'Atterberg et les abaques de Casagrande propre à chaque essai sont présentées sur les figures 5.5 à 5.10.

Tableau 5.5 : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n° 01.

| Nombre d'essais | 1 ^{er} essai | | 2 ^{ème} essai | | 3 ^{ème} essai | | 4 ^{ème} essai | |
|--|-----------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Nombre de coups | 17 | | 23 | | 29 | | 32 | |
| Numéro de la tare | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Masse de la tare m_t (g) | 10,33 | 10,32 | 10,42 | 10,37 | 10,36 | 10,40 | 10,29 | 10,36 |
| Masse (sol humide + tare) (m_h+m_t) (g) | 22,68 | 24,76 | 26,38 | 25,44 | 24,36 | 23,61 | 24,19 | 23,42 |
| Masse (sol sec + tare) (m_d+m_t) (g) | 18,78 | 20,26 | 21,39 | 20,70 | 19,97 | 19,47 | 19,90 | 19,38 |
| Masse d'eau $m_w(g)=(m_h+m_t)-(m_d+m_t)$ | 03,90 | 04,50 | 04,99 | 04,74 | 04,40 | 04,14 | 04,29 | 04,04 |
| Masse du sol sec m_d (g) = $(m_d+m_t)-m_t$ | 08,46 | 09,94 | 10,97 | 10,33 | 09,61 | 09,07 | 09,61 | 09,02 |
| Teneur en eau $w(\%) = m_w/m_d$ | 46,17 | 45,25 | 45,48 | 45,87 | 45,78 | 45,58 | 44,63 | 44,78 |
| W_{moy} (%) | 45,71 | | 45,68 | | 45,68 | | 44,71 | |
| $W_L(\%) = -0.0512x + 46.736$ | 45,46 | | | | | | | |

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

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

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

| Nombre d'essais | 1 ^{er} essai | | 2 ^{ème} essai | | 3 ^{ème} essai | | 4 ^{ème} essai | |
|---|-----------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Nombre de coups | 16 | | 23 | | 29 | | 33 | |
| Numéro de la tare | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Masse de la tare m_t (g) | 10,20 | 10,10 | 10,10 | 10,10 | 10,10 | 10,10 | 10,20 | 10,10 |
| Masse (sol humide + tare) (m_h+m_t) (g) | 25,40 | 26,40 | 25,00 | 23,70 | 25,30 | 27,60 | 22,50 | 20,20 |
| Masse (sol sec + tare) (m_d+m_t) (g) | 20,40 | 21,00 | 20,00 | 19,30 | 20,50 | 21,90 | 18,70 | 17,00 |
| Masse d'eau $m_w(g)=(m_h+m_t)-(m_d+m_t)$ | 05,00 | 05,40 | 05,00 | 04,40 | 04,80 | 05,70 | 03,80 | 03,20 |
| Masse du sol sec $m_d(g) = (m_d+m_t)-m_t$ | 10,20 | 10,90 | 09,90 | 9,20 | 10,40 | 11,80 | 08,50 | 06,90 |
| Teneur en eau $w(\%) = m_w/m_d$ | 49,02 | 49,54 | 50,51 | 47,83 | 46,15 | 48,31 | 44,71 | 46,38 |
| $W_{moy}(\%)$ | 49,28 | | 49,17 | | 47,23 | | 45,54 | |
| $W_L(\%) = -0.221x + 53.385$ | 47,86 | | | | | | | |

Tableau 5.8 : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n° 02.

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

Tableau 5.9 : Détermination de la limite de liquidité de l'essai n° 03.

| Nombre d'essais | 1 ^{er} essai | | 2 ^{ème} essai | | 3 ^{ème} essai | | 4 ^{ème} essai | |
|--|-----------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Nombre de coups | 16 | | 22 | | 29 | | 32 | |
| Numéro de la tare | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Masse de la tare m_t (g) | 24,88 | 24,15 | 24,28 | 13,88 | 24,12 | 57,34 | 51,09 | 13,99 |
| Masse (sol humide + tare) (m_h+m_t) (g) | 45,79 | 44,10 | 39,95 | 24,46 | 41,87 | 73,68 | 63,82 | 31,93 |
| Masse (sol sec + tare) (m_d+m_t) (g) | 39,16 | 38,44 | 35,19 | 21,24 | 36,48 | 68,78 | 59,91 | 26,60 |
| Masse d'eau $m_w(g)=(m_h+m_t)-(m_d+m_t)$ | 06,63 | 06,55 | 04,76 | 03,22 | 05,39 | 04,90 | 03,91 | 05,33 |
| Masse du sol sec m_d (g) = $(m_d+m_t)-m_t$ | 14,28 | 14,29 | 10,91 | 07,35 | 12,36 | 11,44 | 08,83 | 12,62 |
| Teneur en eau $w(\%) = m_w/m_d$ | 46,40 | 45,86 | 43,60 | 43,80 | 43,63 | 42,81 | 44,29 | 42,25 |
| W_{moy} (%) | 46,13 | | 43,70 | | 43,22 | | 43,27 | |
| W_L (%) = $-0.1708x + 48.307$ | 44,04 | | | | | | | |

Tableau 5.10 : Détermination de la limite de plasticité de l'essai n° 03.

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

Les figures 5.5 à 5.7 présentent les résultats des limites d'Atterberg pour chaque essai effectué sur le sol étudié.

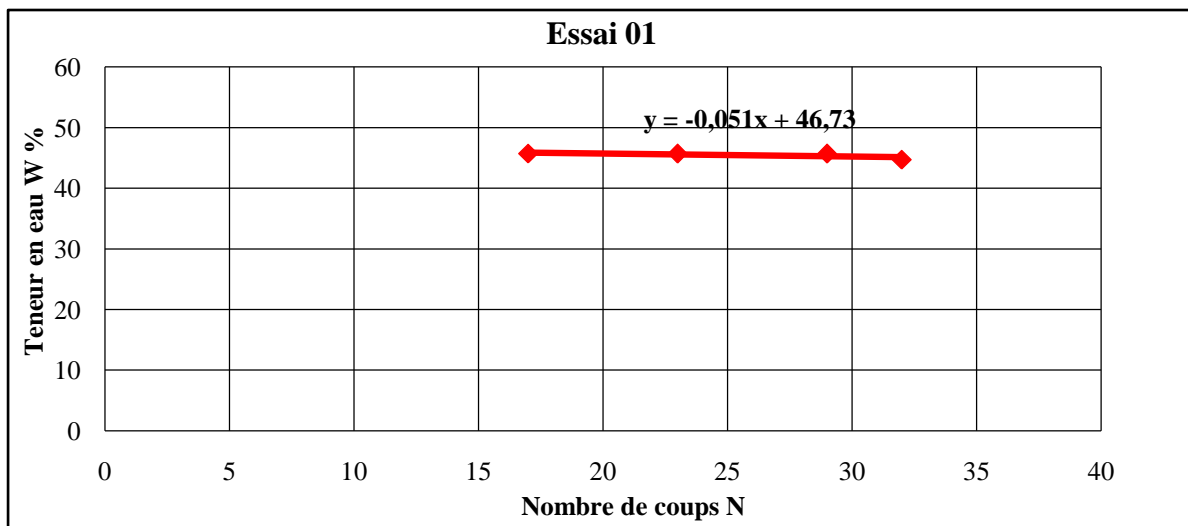


Figure 5.5 : Résultats des limites d'Atterberg de l'essai n° 01.

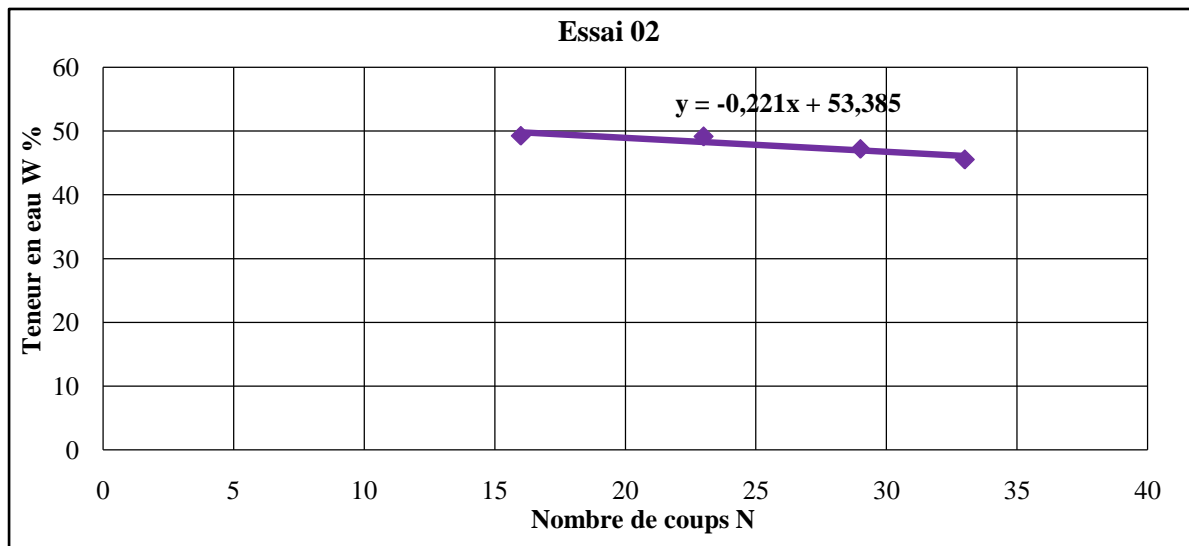


Figure 5.6 : Résultats des limites d'Atterberg de l'essai n° 02.

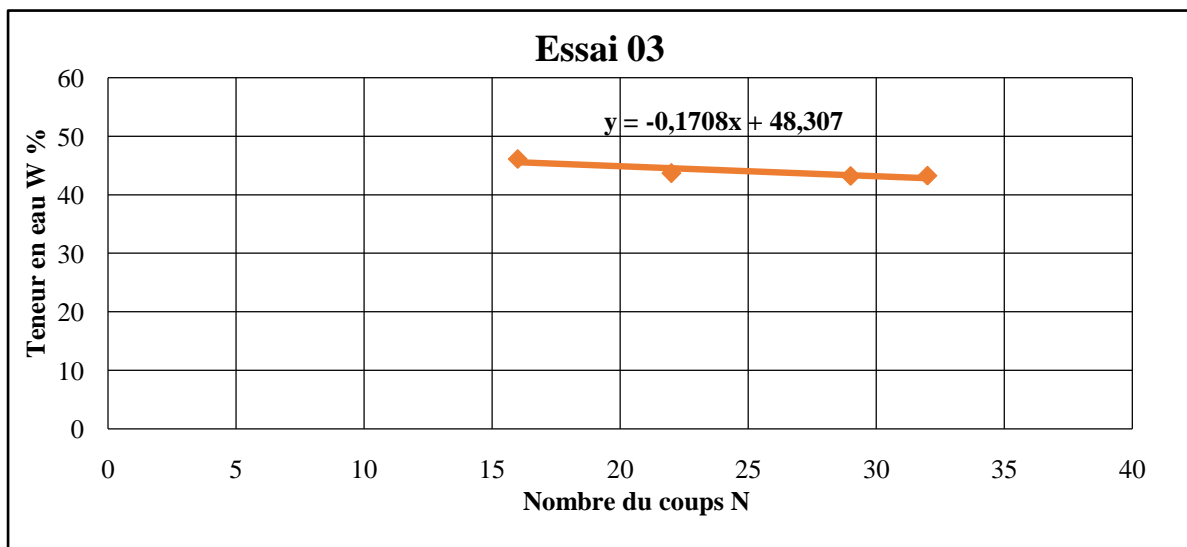


Figure 5.7 : Résultats des limites d'Atterberg de l'essai n° 03.

Le tableau ci-dessous représente une récapitulation des résultats des essais ainsi que la figure 5.8 qui représente l'abaque de Casagrande relatif aux trois essais effectués.

Tableau 5.11 : Récapitulatif des résultats des essais de limites d'Atterberg.

| Essai n° | Marqueur | W_L (%) | W_P (%) | I_P (%) | $I_C = (W_L - W_{nat}) / I_P$ |
|------------|----------|--------------|--------------|--------------|-------------------------------|
| 1 | ● | 45,46 | 24,73 | 20,73 | 1,629 |
| 2 | ● | 47,86 | 20,57 | 27,29 | 1,326 |
| 3 | ● | 44,04 | 17,30 | 26,74 | 1,209 |
| La moyenne | | 45,94 | 18,93 | 24,92 | 1,37 |

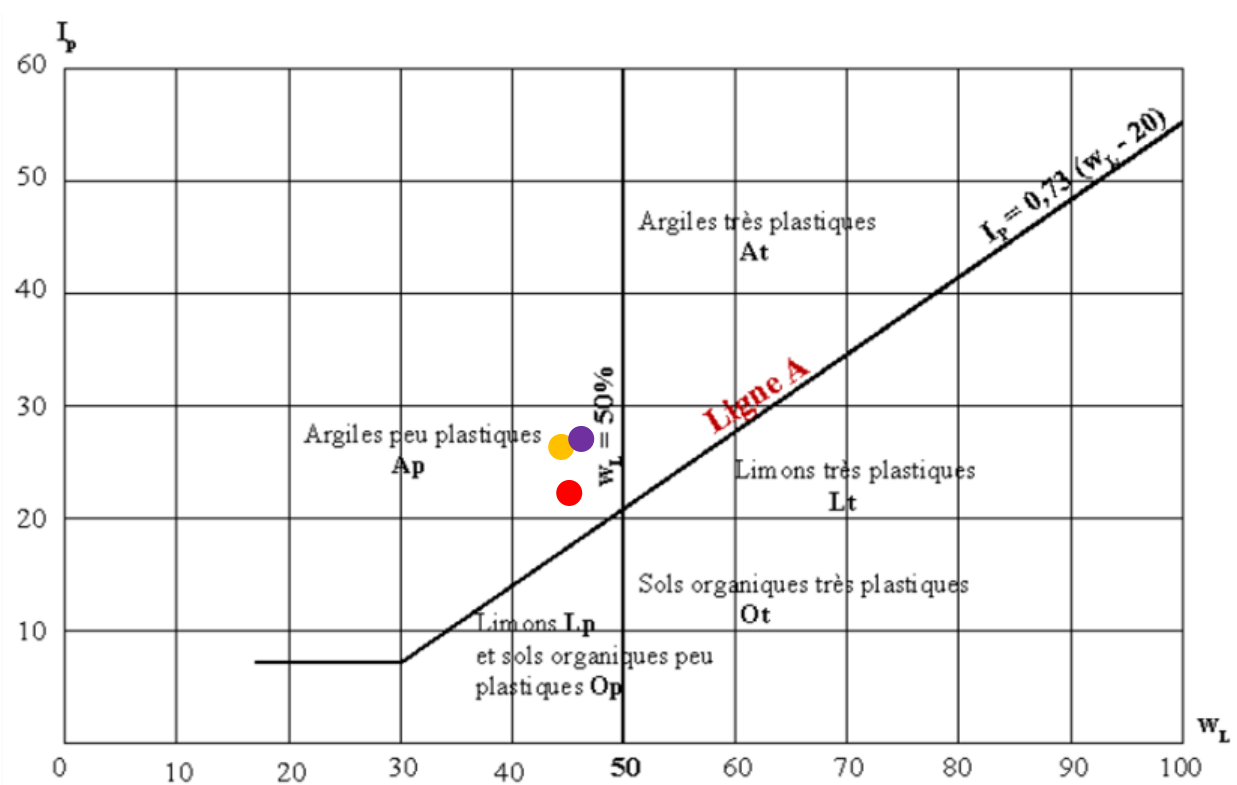


Figure 5.7 : Abaque de Casagrande relatif aux trois essais.

5.1.4 Essai au bleu de méthylène

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

Tableau 5.12 : Valeur de bleu de méthylène par l'essai à la tâche.

| | La masse du sol (g) | Volume de la solution (cm ³) | VBS (g/cm ³) | SST (m ² /g) |
|------------|------------------------|---|-----------------------------|----------------------------|
| Essai 1 | 40 | 240 | 5,74 | 130,29 |
| Essai 2 | 40 | 255 | 5,88 | 140,58 |
| Essai 3 | 40 | 235 | 5,42 | 129,56 |
| Essai 4 | 40 | 210 | 4,90 | 115,18 |
| Essai 5 | 40 | 230 | 5,40 | 125,82 |
| Essai 6 | 40 | 230 | 5,47 | 125,18 |
| La moyenne | 40 | 233.33 | 5,47 | 127,77 |

Le tableau 5.13 résume les caractéristiques d'identification des essais effectués sur le sol étudié.

Tableau 5.13 : Caractéristiques d'identification du sol étudié

| Profondeur (m) | 1.30 – 1.70 | 1.50 |
|--|---------------------|---------------|
| Paramètres | Plages de variation | Moyenne |
| Teneur en eau naturel W_{nat} (%) | 13,73 – 12,45 | 13,09 |
| Masse volumique humide ρ_h (g/cm ³) | 1,897 – 1,926 | 1,92 |
| Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³) | 1,668 - 1,713 | 1,72 |
| Limite de liquidité W_L | 44,08 - 47,80 | 45,94 |
| Limite de plasticité W_P | 17,30 - 24,73 | 18,93 |
| Indice de plasticité I_P | 20,73 - 27,29 | 24,92 |
| Valeur de bleu de méthylène VBS | 4,90 - 5,88 | 5,47 |
| Surface spécifique totale (m ² /g) | 115,18 - 140,58 | 127,77 |
| Passants à 2 mm (%) | 96.81 - 99.06 | 98,12 |
| Passants à 80 μ m (%) | 60,25 - 71,95 | 66,21 |
| Indice de consistance I_C | 1,21 - 1,63 | 1,37 |

5.2 Interprétation des résultats

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

La limite de liquidité varie entre 44,08% et 47,80% avec une moyenne 45,94% et l'indice de plasticité I_p varie entre 20,73% et 27,29% avec une moyenne de 24,92%.

La valeur de bleu VBS est égale à 5,47. D'après la norme française NF P 94-068, il s'agit d'un sol argileux.

5.3. Essai mécanique

5.3.1. Essais Proctor normal

Les tableaux 5.14, 5.15 et 5.16 sont le résultat de trois essais de Proctor normal.

Tableau 5.14 : Résultats de l'essai Proctor normal n° 01.

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

Tableau 5.15 : Résultats de l'essai Proctor normal n° 02.

| Teneur en eau approximative (%) | 10% | 12% | 14% | 16% | 18% |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Masse du moule (g) | 1712,10 | 1712,10 | 1712,10 | 1712,10 | 1712,10 |
| Volume du moule (cm ³) | 956,04 | 956,04 | 956,04 | 956,04 | 956,04 |
| Masse du sol humide avec moule (g) | 3430,10 | 3486,60 | 3585,30 | 3531,20 | 3506,90 |
| Masse du sol humide (g) | 1718,00 | 1774,50 | 1873,20 | 1819,10 | 1794,80 |
| Masse volumique humide (g/cm ³) | 01,80 | 01,86 | 01,96 | 01,90 | 01,88 |
| Masse de la tare (g) | 11,40 | 11,60 | 11,60 | 11,50 | 11,80 |
| Masse sol humide + tare (g) | 38,30 | 47,80 | 49,10 | 38,00 | 46,20 |
| Masse sol sec + tare (g) | 35,50 | 43,80 | 44,05 | 33,88 | 39,89 |
| Masse d'eau (g) | 02,80 | 04,00 | 05,05 | 04,12 | 06,31 |
| Masse du sol sec (g) | 24,10 | 32,20 | 32,45 | 22,38 | 28,09 |
| Teneur en eau W | 11,62 | 12,42 | 15,56 | 18,43 | 22,45 |
| Masse volumique sèche (g/cm ³) ; $\rho_d = \rho_h / (1+W)$ | 01,61 | 01,65 | 01,70 | 01,61 | 01,53 |

Tableau 5.16 : Résultats de l'essai Proctor normal n° 03.

| Teneur en eau approximative (%) | 10% | 12% | 14% | 16% | 18% |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Masse du moule (g) | 1712,10 | 1712,10 | 1712,10 | 1712,10 | 1712,10 |
| Volume du moule (cm ³) | 956,04 | 956,04 | 956,04 | 956,04 | 956,04 |
| Masse du sol humide avec moule (g) | 3442,10 | 3542,10 | 3579,70 | 3567,50 | 3521,40 |
| Masse du sol humide (g) | 1730,00 | 1830,00 | 1867,60 | 1855,40 | 1809,30 |
| Masse volumique humide (g/cm ³) | 01,81 | 01,91 | 01,95 | 01,94 | 01,89 |
| Masse de la tare (g) | 11,70 | 11,70 | 11,60 | 11,80 | 11,50 |
| Masse sol humide + tare (g) | 49,70 | 51,70 | 58,70 | 54,60 | 41,70 |
| Masse sol sec + tare (g) | 45,55 | 46,69 | 52,08 | 47,90 | 36,58 |
| Masse d'eau (g) | 04,154 | 05,01 | 06,62 | 06,705 | 05,122 |
| Masse du sol sec (g) | 33,85 | 34,99 | 40,48 | 36,10 | 25,08 |
| Teneur en eau W | 12,27 | 14,32 | 16,35 | 18,58 | 20,42 |
| Masse volumique sèche (g/cm ³) ; $\rho_d = \rho_h / (1+W)$ | 01,61 | 01,67 | 01,68 | 01,64 | 01,57 |

Les figures 5.8, 5.9 et 5.10 présentent les caractéristiques optimums de chacun des trois essais exécutés.

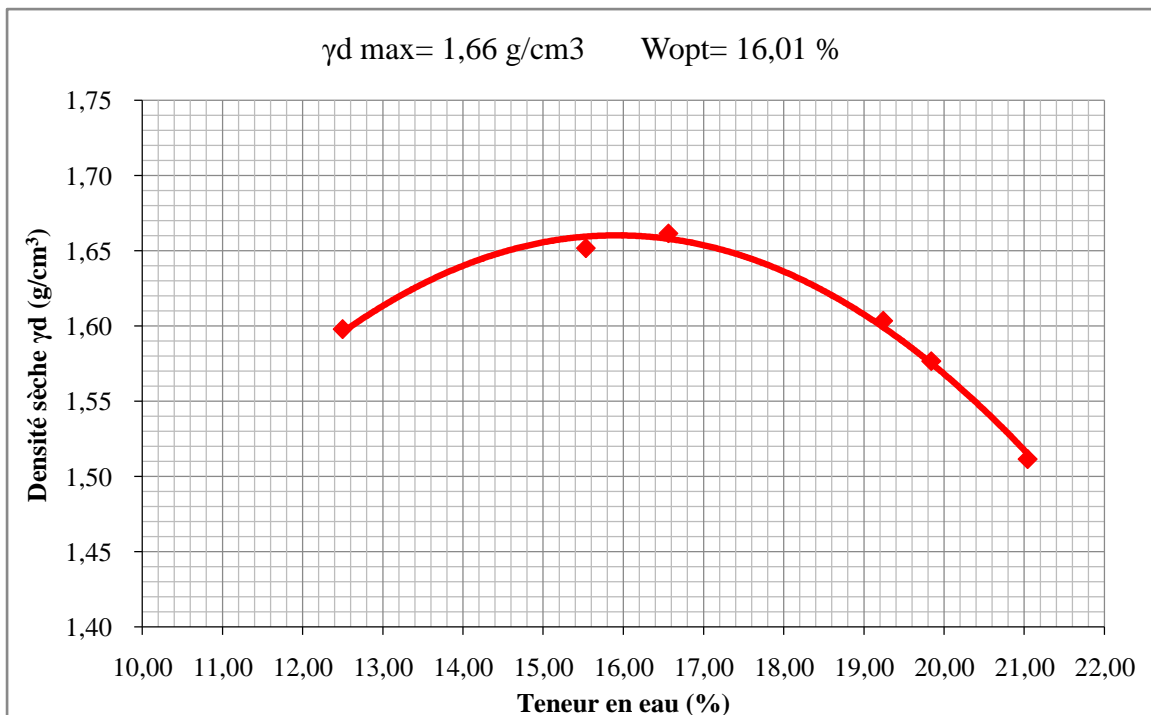


Figure 5.8 : Résultats de l'essai Proctor normal n°01.

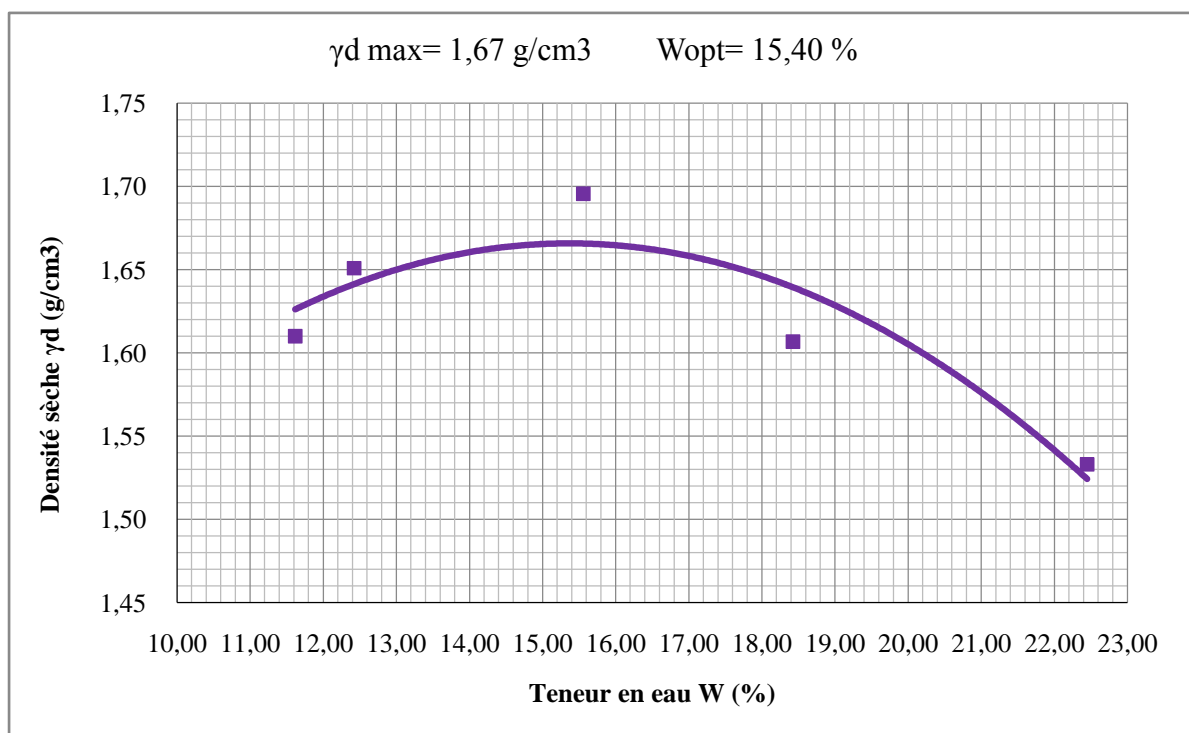


Figure 5.9 : Résultats de l'essai Proctor normal n°02.

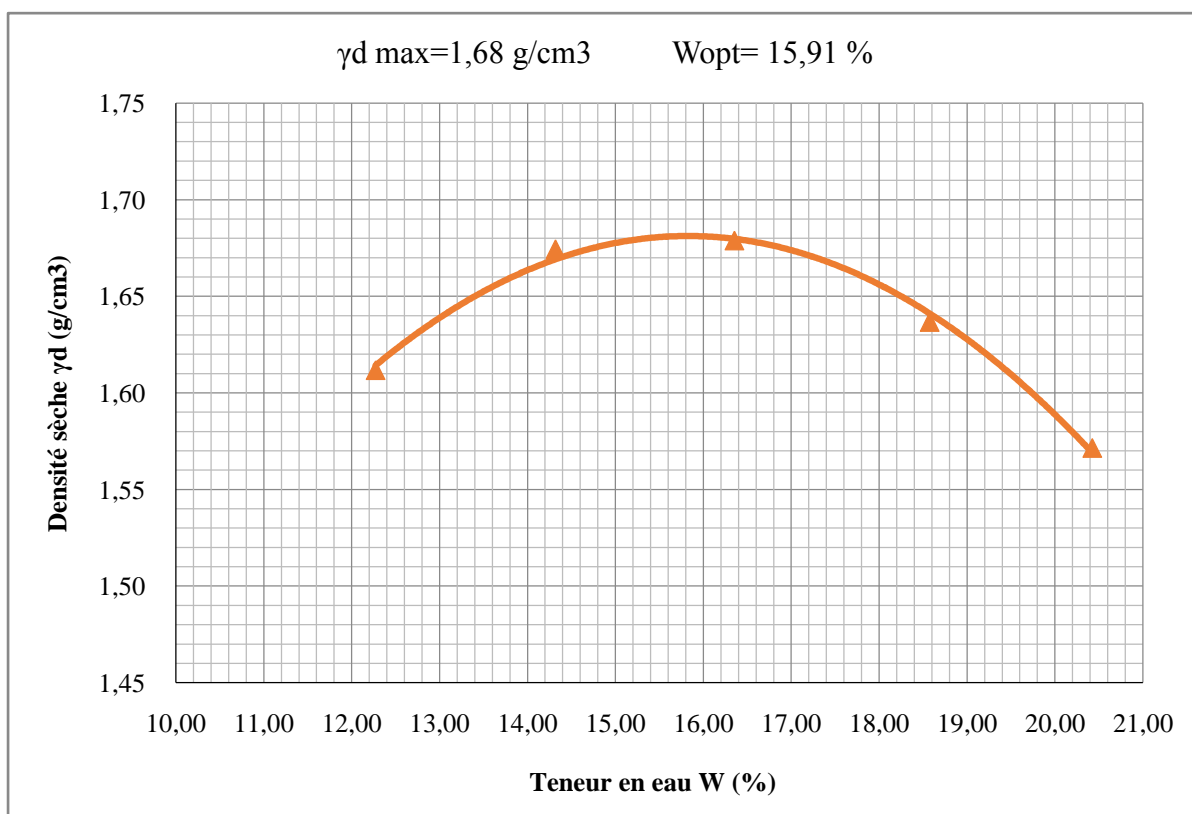


Figure 5.10 : Résultats de l'essai Proctor normal n° 03.

Le tableau 5.17 récapitule les caractéristiques des trois essais de Proctor normal effectués sur le sol étudié. La figure 5.15 représente la courbe moyenne des trois essais.

Tableau 5.17 : Résumé des résultats des essais Proctor normal.

| | W_{opt} (%) | ρ_d |
|------------|---------------|-------------|
| Essai n° 1 | 15,95 | 1,66 |
| Essai n° 2 | 15,35 | 1,67 |
| Essai n° 3 | 15,80 | 1,68 |
| Moyenne | 15,70 | 1,67 |

La figure 5.11 représenté ci-dessous présente la courbe moyenne des caractéristiques optimum des trois essais de Proctor normal.

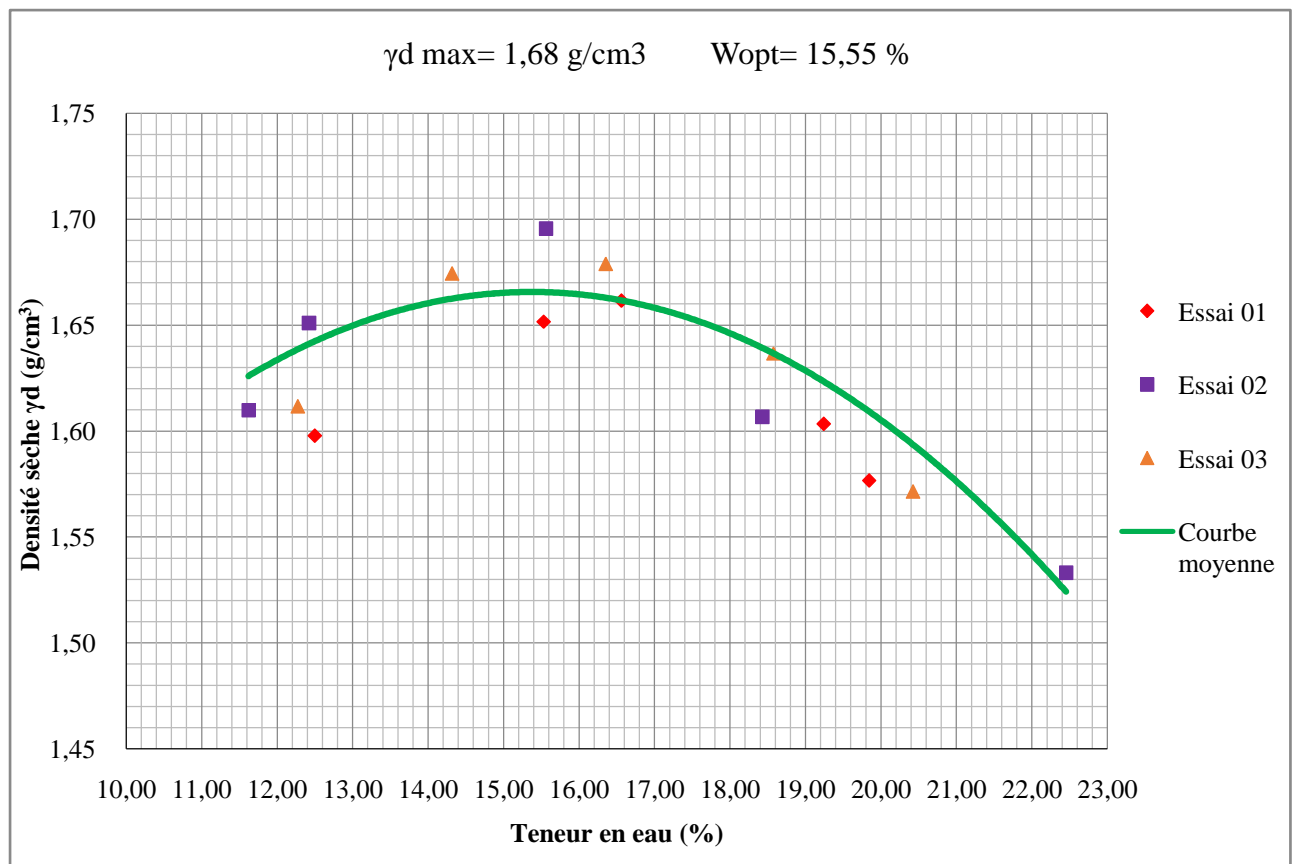


Figure 5.11 : Courbe moyenne de Proctor normal.

- ✓ La teneur en eau à l'optimum Proctor normal est $W_{opt} = 15,55 \%$.
- ✓ La masse volumique sec à l'optimum Proctor normal est $\rho_d = 1,68 \text{ g/cm}^3$.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Au terme de ce travail qui a consisté d'une part à rassembler quelques caractéristiques physiques et mécaniques ainsi que le comportement des sols salés d'après les différentes références bibliographiques nationales et internationales et d'autre part une étude expérimentale effectuée sur un sol prélevé du site de Chott El Hodna près du village de Ain Khadra dans la wilaya de M'sila, qui est considérée comme une zone semi aride, cette dernière est considérée comme la capitale du Chott El Hodna (Sabkha), nous a permis d'énoncer quelques points concernant les sols salés, ces derniers sont :

- ✓ La salinisation des sols affecte 3,2 million d'hectares de la surface globale de l'Algérie dont une bonne partie se trouve localisée dans les régions steppiques.
- ✓ l'emploi des sols salés dans leur état naturel comme matériaux de remblais ou de couches de forme routières, n'est pas envisagé. Ces derniers peuvent être rendu utilisable à leur état naturel par un traitement spécifique aux liants hydrauliques (la chaux, le ciment,...etc.) ou au liants spéciaux routiers.
- ✓ Les différentes études qui traitent l'effet des sels sur certaines caractéristiques géotechniques des sols salés comme la teneur en eau, les limites d'Atterberg, les caractéristiques de compactage, les paramètres de compressibilité, ces derniers démontrent les difficultés liées à la détermination des caractéristiques géotechniques des sols salés.

D'après l'étude expérimentale effectuée, qui a consisté à caractériser le comportement d'un sol naturel prélevé du site de Chott El Hodna près du village de Ain Khadra dans la wilaya de M'sila, qui a pour objet son utilisation en construction routière. Les résultats obtenus ont permis de déduire les conclusions suivantes :

- ✓ Les analyses granulométriques des échantillons de sol donnent un pourcentage des passants à 2mm de 98,12 % et un pourcentage des passants à 80 μm de 66,21 %. Ces valeurs indiquent que le sol présente une granulométrie fine.
- ✓ La limite de liquidité (W_L) vaut 45,78 %, la limite de plasticité (W_P) est de 20,86 %, l'indice de plasticité (I_P) vaut 24,92 %, l'indice de consistance (I_C) égale à 01,33,

d'après l'abaque de Casagrande c'est une argile peu plastique.

- ✓ La valeur du bleu de méthylène (VBS) étant de 5,47. D'après la norme NF P 11-300, il s'agit d'un sol fin argileux peu plastique. La valeur de la surface spécifique SST) est de 127,77 m²/g, celle-ci dépasse les 100 m²/g, ce qui fait que l'argile étudiée se compose essentiellement de vermiculite.
- ✓ D'après l'essai de compactage Proctor normal réalisé, la teneur en eau moyenne optimale vaut 15,57% et la densité sèche maximale est de 1,67.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- AFES (2008). Référentiel pédologique. Association Française pour l'Etude du Sol. Ed. Quæ.
- AFNOR (1991) Norme Française : **NF P 94-050** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des sols – Méthode par étuvage.
- AFNOR (1991) Norme Française : **NF P 94-053** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire – Méthode du moule.
- AFNOR (1992) Norme Française : **NF P 94-057** : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie
- AFNOR (1993) Norme Française : **NF P 94-051** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.
- AFNOR (1993) Norme Française : **NF P 94-068** Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche.
- AFNOR (1994) Norme Française : **NF P 94-071-1**Sols : Reconnaissance et Essais – Essai de cisaillement rectiligne à la boîte – partie 1 cisaillement direct.
- AFNOR (1996) Norme Française : **NF P 94-041** : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide
- AFNOR (1997) Norme Française : **NF P 94-078**Sols : Indice CBR immédiat— Indice CBR après immersion — Indice Portant Immédiat
- AFNOR (1999) Norme Française : **NF P 94-093** Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.
- Ajalloein R., Mansouri H., Sadeghpour A.H. (2013). Effect of saline water on getechnical properties of fine-grained soil. Electron J Geotech Eng 18:1419-1435.
- Alainachi I. H., Alobaidy G. A. (2010). The effects of Basra Gulf Salt Water on the Proctor Compaction and CBR Test Results of Soil Samples at Baniyas City, Abu Dhabi, UAE. EJGE V 15, Bund. A.

- Al-Amoudi O.S.B., Sahel N.A., Zaghoul 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-Oudoux C. et Walter C. (2004). *Infiltrabilité et érodibilité de sols salinés de la plaine du Bas Chéllif (Algérie)*. Etude et Gestion des Sols, Volume 11, 4, 2004, 379-392.
- Duchauffour ph., 1983 : Pédogénèse et classification. 2^{ème} édition. Masson. Paris, 466 p.
- Duchauffour, P. (1977). *Pédologie. Pédogenèse et classification. Tome 1, Ed. Masson, Paris, 477p.*
- Duchauffour, 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.