

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierat
Département : Génie Civil
Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Civil
Spécialité : Constructions Métalliques et Mixtes

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**AMELIORATION DES CARACTERISATION DES SOLS
ARGILE LIMONEUX PAR LA CHAUX**

Présenté par : **HADEF MANEL**

Encadrant : **OTMANI NADIA M.C.A. Université Badji Mokhtar - ANNABA**

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Président
A.HACEN CHAOUCH	Pr	Badji Mokhtar Annaba	Président
OTMANI NADIA	M.C.A	Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
G.BOUKHATEM	M.C.A	Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENTS

Le grand remerciement revient à dieu qui nous a donné la force et le courage de pouvoir terminer ce modeste travail.

En guise de reconnaissance, je veux remercier toutes les personnes qui, par leur conseil, leur collaboration ou leur soutien moral et leur amitié, ont contribué à la réalisation et à l'achèvement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Mme OTMANI NADIA, qui m'a donné la chance de travailler sous sa direction, je la remercie aussi pour les encouragements et les conseils qui m'ont permis de réaliser ce travail.

Je tiens à remercier les membres du jury :

Dr G. BOUKHATEM et Monsieur Pr. A. HACEN CHAOUCH qui nous a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de soutenance.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chers à mon cœur, à ceux qui m'ont guidé pour faire mes premiers pas et m'ont appris mon premier mot, à ceux qui ont toujours été à mes côtés, qui ont illuminé mes nuits sombres et ont ensoleillé mes jours avec leurs inépuisable affection, à mes parents, que dieu leur accorde une longue vie.

C'est avec respect et gratitude que je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et ma sympathie à :

- Mon père et ma mère.
- Mon mari MOHCENE
- Mes frères RAMZI, ROCHDI
- Mes sœurs ISMAHANE, HODA, WAHIDA
- Ma belle-sœur HORIYA
- Mes nièces SALSABIL, ZAYNEB, ISRA, ILIN
- Mes neveux YAHIA, CHIHAB ELDIN, ZAKARIYA
- A toute ma famille.
- Mes amis les plus proches RAHMA, WARDA, AWATEF, CHAHRA, CHADYA.

HADEF MANEL.

RESUME

Aujourd'hui les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du Génie Civil à l'échelle mondiale. Les ajouts des produits chimiques les plus utilisés sont le ciment, la chaux, les cendres volantes. L'objectif principal du malaxage des ajouts de produits chimiques avec le sol est l'amélioration de ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité.

Dans ce travail, nous réalisons une étude expérimentale sur le traitement à la chaux du sol limoneux argileux extrait à partir d'un projet de station de relevage à 100 logements se trouvant dans la ville d'Eltarf. Dans un premier temps ;on détermine l'état du sol considéré à l'aide des essais d'identification au laboratoire, tels que la granulométrie, les limites d'Atterberg, ainsi que les caractéristiques mécaniques du sol à l'état naturel, par la méthode de compressibilité par palier à l'odomètre et l'essai de cisaillement. Le sol considéré (argile limoneuse) est caractérisé par une forte teneur en eau, lui donnant une certaine friabilité, ce qui a été observé lors des essais au laboratoire. Pour l'amélioration des caractéristiques de ce sol, nous employons l'ajout de la chaux avec les pourcentages suivants : 2 %, 4 % et 6 %. Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 6.50 à 7.00m. Après l'extraction, il a été placé dans des caisses qui contiennent plusieurs carottiers (moules sous forme de carottes) ensuite transporté au laboratoire « Laboratoire national de l'habitat et de la construction * LNHC* EL-Tarf » pour préparation et exécution, des essais géotechniques d'identification et de caractérisation.

On peut conclure que l'ajout de ce produit chimique améliore l'état du sol considéré car après le traitement, il se trouve dans la zone des limons peu plastique.

الملخص

تعد المنتجات والتقنيات المختلفة اليوم جزءًا من ممارسة شائعة لأعمال الهندسة المدنية الكبيرة في جميع أنحاء العالم. الإضافات الكيميائية الأكثر استخدامًا هي الأسمت والجير والرماد المتطاير. الهدف الرئيسي من خلط إضافات المواد الكيميائية مع التربة هو تحسين خواصها الفيزيائية - الميكانيكية بالإضافة إلى متانتها.

في هذا العمل نقوم بإجراء دراسة تجريبية على معالجة الجير للتربة الطينية المستخرجة من مشروع محطة رفع 100 مسكن يقع في مدينة الطارف. أولاً، يتم تحديد حالة التربة المعتبرة باستخدام اختبارات تحديد المختبر، مثل حجم الحبوب، وحدود أتيربيرج، وكذلك الخصائص الميكانيكية للتربة في حالتها الطبيعية، من خلال طريقة ضغط خطوة عداد المسافات واختبار القص. تمتاز التربة المعتبرة (الطين الطيني) بارتفاع نسبة الماء، مما يعطيها قابلية تفتيت معينة، والتي لوحظت خلال الاختبارات المعملية. لتحسين خصائص هذه التربة نستخدم إضافة الجير بالنسب التالية: 2%، 4% و 6%. تم تعدين التربة لعمق حوالي 6.50 إلى 7.00 م. بعد الاستخراج، تم وضعها في صناديق تحتوي على عدة نوى (قوالب على شكل جزر) ثم نقلها إلى المختبر الوطني "المعمل الوطني للإسكان والبناء * LNHC * الطارف" للتحضير والتنفيذ وتحدي الجيو تقنية واختبارات التوصيف.

يمكن الاستنتاج أن إضافة هذه المادة الكيميائية يحسن حالة التربة المدروسة لأنها بعد المعالجة تكون في منطقة الطمي البلاستيكية المنخفضة.

Abstract

Today the various products and techniques are part of a common practice of large civil engineering works worldwide. The most used chemical additions are cement, lime, fly ash. The main objective of mixing the additions of chemicals with the soil is to improve its physic-mechanical properties as well as its durability.

In this work, we are carrying out an experimental study on the lime treatment of silty clay soil extracted from a 100-dwelling lifting station project located in the town of Eltarf. First, the state of the soil considered is determined using laboratory identification tests, such as grain size, Atterberg limits, as well as the mechanical characteristics of the soil in its natural state, by the odometer step compressibility method and the shear test. The soil considered (silty clay) is characterized by high water content, giving it a certain friability, which was observed during laboratory tests. To improve the characteristics of this soil, we use the addition of lime with the following percentages: 2%, 4% and 6%. The soil was mined to a depth of approximately 6.50 to 7.00m. After the extraction, it was placed in boxes which contain several cores (molds in the form of carrots) then transported to the laboratory "National Laboratory of Housing and Construction * LNHC * EL-Tarf" for preparation and execution, geotechnical identification and characterization tests.

It can be concluded that the addition of this chemical improves the condition of the soil considered because after treatment it is in the low plastic silt zone.

Sommaire

INTRODUCTION Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1

1 Introduction	3
2 Définition d'un sol	3
3 Éléments constitutifs D'un sol	3
4 Grains	4
5 Pores	4
6 Identification et classification des sols instables	5
6.1 Caractérisation des sols instables	5
6.2 Les Argiles	6
6.3 Principales familles des minéraux argileux	6
6.3.1 Structure élémentaire des minéraux argileux	6
6.3.2 Les différents types d'argiles	8
6.3.2.1 Famille de la kaolinite	8
6.3.2.2 Famille de la montmorillonite	8
6.3.2.3 Famille de l'illite	9
6.4 Les Limons	10
6.5 Les Marnes	10
7 Principaux problèmes des sols instables	11
7.1 Phénomène de Gonflement	11
7.2 Tassements	11
7.3 Glissements	12
8 Quelques cas pathologiques	12
8.1 Cas des bâtiments	12
8.2 Cas des chaussées	13
9 Technique d'amélioration des sols	13
9.1 Méthodes mécaniques	13
9.1.1 Compactage dynamique	13
9.1.2 Vibro_compactage	14
9.2 Méthodes hydromécaniques	15
9.2.1 Pré chargement ou Pré compression	15
9.2.2 Accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux	15

Sommaire

9.3 Méthodes Thermiques	16
9.3.1 Déshydratation	16
9.3.2 Congélation	16
9.4 Méthodes chimiques	17
9.4.1 Utilisation de la chaux	17
9.4.2 Utilisation du ciment	18
10 Conclusion	19

Chapitre 2

Introduction	20
1 Recherches concernant la stabilisation des sols	23
2 Notions de bade sur la chaux	23
2.1 Fabrication	24
2.2 Les différents types de chaux aériennes	24
2.3 Différence entre la chaux aérienne et la chaux ayant des propriétés hydrauliques	26
2.4 Domaines d'application de la chaux	27
2.5 Effet de la chaux sur les sols	27
2.6 Actions des liants (la chaux)	28
2.6.1 Actions immédiates	28
2.6.2 Actions à long terme	29
3 Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage	29
4 Avantages de la technique	30
4.1 Avantages Techniques	30
4.2 Avantages Economiques	30
4.3 Avantages Ecologiques et Environnementaux	31
5 Méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol	
5.1 Malaxage sur place :	31
5.1.1 Préparation du sol à traiter	31
5.1.2 Epannage	31
5.1.3 Malaxage	32
5.1.4 Réglage	32

Sommaire

5.1.5 Compactage	33
5.1.6 Protection de surface	33
6 Conclusion	34

Chapitre 3

1 Introduction	35
2 Prélèvement des échantillons	35
3 Etude de sol	35
4 Essais d'identification du sol	35
4.1 La Teneur En Eau Selon La Norme (NF P 94 050)	37
4.2 Granulométrie	38
4.3 Limite d'Atterberg selon la norme NF p 94-051	40
4.4 Compactage	45
4.5 Essai de compressibilité par paliers à l'odomètre	48
4.6 Essai de cisaillement rectiligne	51
4.6.1 La cohésion	53
4.6.2 L'angle de frottement	54
5 Conclusion	54

Chapitre 4

1 Introduction	55
2 Identification et classification du matériau considéré et du matériau de traitement	55
2.1 Matériau utilisé pour le traitement (chaux)	56
2.2 Préparation du mélange	57
3 Essai mécanique au laboratoire	58
3.1 Essai Proctor normal	58
3.1.1 Influence du taux de la teneur en eau sur la densité sèche	59
3.1.2 Influence du pourcentage de la chaux sur la teneur en eau et la densité sèche	61
3.2 Essai de cisaillement	62

Sommaire

3.2.1 Résistance au cisaillement en fonction du taux de chaux	63
3.2.2 Influence du pourcentage de la chaux sur la cohésion et l'angle de frottement	65
4 Essai physique au laboratoire	71
4.1 Limites d'Atterrer	71
5 Conclusion	79
Conclusion Générale.....	80

Listes des figures

CHAPITRE 1

Figure 1.1	La Texture du Sol.	5
Figure 1.2	Structure Elémentaire Tétraédrique (Morel R. 1996).	7
Figure 1.3	Structure Elémentaire Octaédrique (Morel R. 1996).	7
Figure 1.4	Schéma de structure tétraédrique et octaédrique.	7
Figure 1.5	Structure de la kaolinite [Lambe, 1953].	8
Figure 1.6	Structure de la montmorillonite [Lambe, 1953].	9
Figure 1.7	Structure d'illite [Lambe, 1953].	9
Figure 1.8	fissures au niveau d'une structure de génie civil.	13
Figure 1.9	Déformation d'une chaussée de sol instable.	13
Figure 1.10	Chantier d'un compactage dynamique profond.	14
Figure 1.11	Vibrocompactage.	14
Figure 1.12	Principe du pré chargement pour le contrôle des tassements [Bell, 1993].	15
Figure 1.13	Installation des drains.	16
Figure 1.14	Chantier utilisant la congélation du sol.	17
Figure 1.15	Chantier de traitement du sol à la chaux.	18
Figure 1.16	Chantier de traitement du sol au ciment	19

CHAPITRE 2

Figure 2.1	Courbe de compactage selon % ciment (Albusoda B. et al., 2012)	21
Figure 2.2	Variation des caractéristiques de compactage des mélanges sol-chaux [Eren and Filiz 2009].	22
Figure 2.3	Variation des paramètres de cisaillement des sols traités à la chaux [Osula 1991].	23
Figure 2.4	Cycle de fabrication de la chaux	25
Figure 2.5	Diminution de la teneur en eau	28
Figure 2.6	Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage	30
Figure 2.7	Epannage de la chaux	32
Figure 2.8	Malaxage de la chaux sur chantier.	32
Figure 2.9	Compactage	33
Figure 2.10	Protection de surface.	33

Listes des figures

CHAPITRE 3

Figure 3.1	Sols argileux.	36
Figure 3.2	Détermination la Teneur en Eau.	37
Figure 3.3	Ensemble des tamis.	39
Figure 3.4	Analyse granulométrique.	40
Figure 3.5	Définition des Limites d'Atterberg.	41
Figure 3.6	Boîte de Casa grande et la plaque de verre.	42
Figure 3.7	Détermination la Limite de Liquidité.	43
Figure 3.8	Détermination la Limite de Plasticité	44
Figure 3.9	Graphiques regroupant les résultats des limites d'Atterberg.	45
Figure 3.10	Proctor Normale.	47
Figure 3.11	La Forme de Compactage.	48
Figure 3.12	Coupe schématisé de la cellule oedométrique (Arabet, 2010).	48
Figure 3.13	Comparateur de mesure(LNHC).	49
Figure 3.14	Appareillage de l'essai de compressibilité par palier l'œdomètre.	49
Figure 3.15	Courbe de compressibilité oedométrique.	50
Figure 3.16	Grappe regroupant les courbes de compressibilité (l'œdomètre).	51
Figure 3.17	Machine de cisaillement.	52
Figure 3.18	Droite Coulomb de l'essai de cisaillement rectiligne	53
Figure 3.19	Graphique de l'essai de cisaillement.	54

CHAPITRE 4

Figure 4.1	Sol argile.	56
Figure 4.2	Chaux vive de Saida.	57
Figure 4.3	Méthode de mélange.	58
Figure 4.4	L'essai Proctor.	59
Figure 4.5	La courbe de compactage (Argile).	60
Figure 4.6	La courbe de compactage du mélange (Argile+2%chaux).	60
Figure 4.7	La courbe de compactage du mélange (Argile+4%chaux).	60
Figure 4.8	La courbe de compactage du mélange (Argile+6%chaux).	61
Figure 4.9	Influence du pourcentage de la chaux sur la teneur en eau optimale.	61
Figure 4.10	Influence du pourcentage de la chaux sur la densité sèche.	62
Figure 4.11	Essai de cisaillement	62
Figure 4.12	Graphique de l'essai de cisaillement.	63
Figure 4.13	Graphique de l'essai de cisaillement (argile +2%chaux).	64
Figure 4.14	Graphique de l'essai de cisaillement (argile +4%chaux).	64
Figure 4.15	Graphique de l'essai de cisaillement (argile +4%chaux).	65
Figure 4.16	Variation de la cohésion en fonction du % de la chaux.	66
Figure 4.17	Variation d'angle de frottement en fonction du % de la chaux.	66

Listes des figures

Figure 4.18	La courbe de cisaillement du mélange (Argile+0% de chaux).	67
Figure 4.19	La courbe de cisaillement du mélange (Argile+2% de chaux).	68
Figure 4.20	La courbe de cisaillement du mélange (Argile+4% de chaux).	69
Figure 4.21	La courbe de cisaillement du mélange (Argile+6% de chaux).	70
Figure 4.22	L'essai de limite d'Atterberg.	71
Figure 4.23	Diagramme de Casa grande.	72
Figure 4.24	La courbe de limite d'Atterberg (Argile+2% chaux).	72
Figure 4.25	La courbe de limite d'Atterberg (Argile+4% chaux).	72
Figure 4.26	La courbe de limite d'Atterberg (Argile+6% chaux).	73
Figure 4.27	L'effet de l'ajout de chaux sur la limite de liquidité.	73
Figure 4.28	L'effet de l'ajout de chaux sur la limite de plasticité.	74
Figure 4.29	L'effet de l'ajout de la chaux sur les indices de plasticité.	74
Figure 4.30	La courbe de limite d'Atterberg du mélange (Argile+% chaux).	75
Figure 4.31	La courbe de limite d'Atterberg du mélange (Argile+2% chaux).	76
Figure 4.32	La courbe de limite d'Atterberg du mélange (Argile+4% chaux).	77
Figure 4.33	La courbe de limite d'Atterberg du mélange (Argile+6% chaux).	78

LISTE DES TABLEAUX**Chapitre 1**

Tableau 1.1	Caractéristiques physico-chimiques des minéraux argileux courants.	10
--------------------	--	----

Chapitre 2

Tableau 2.1	Les différentes caractéristiques de la chaux.	26
--------------------	---	----

Chapitre 3

Tableau 3.1	Caractéristiques géotechniques du sol.	37
Tableau 3.2	Classification des sols en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité.	44
Tableau 3.3	Résultat de limite Atterberg.	44
Tableau 3.4	Les différents Types du Moule Proctor.	45
Tableau 3.5	Résultats de l'essai Proctor.	48
Tableau 3.6	Résultats des essais de compressibilité (l'œdomètre).	51
Tableau 3.7	Résultats de l'essai de cisaillement rectiligne.	53
Tableau 3.8	Résultats de l'essai de cisaillement.	53

Chapitre 4

Tableau 4.1	Caractéristiques géotechniques.	55
Tableau 4.2	Les propriétés physiques et chimiques.	56
Tableau 4.3	Influence du pourcentage de la chaux, essai Proctor.	59
Tableau 4.4	Influence du pourcentage de la chaux sur le cisaillement.	63
Tableau 4.5	Cohésion et angle de frottement en fonction du pourcentage de chaux.	65
Tableau 4.6	Résultats de limite d'Atterberg de sol argileux + la chaux.	71

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Aujourd'hui les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du Génie Civil à l'échelle mondiale. Le recours à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts est due principalement aux facteurs suivants, tels que la raréfaction des gisements naturels de matériaux nobles, le souci écologique croissant imposant de préserver les ressources naturelles existantes. Les ajouts des produits chimiques les plus utilisés sont le ciment, la chaux, les cendres volantes. L'objectif principal du malaxage des ajouts de produits chimiques avec le sol est l'amélioration de ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité.

Les différentes propriétés qui peuvent être améliorées sont la résistance, la plasticité, la compressibilité, la perméabilité, le potentiel de gonflement et le potentiel d'effondrement. L'amélioration de ces propriétés s'effectue soit par l'augmentation de certaines d'entre elles telle que la résistance, soit par la réduction d'autres telles que la plasticité, la perméabilité et l'érosion. Un bon malaxage des ajouts des produits chimiques avec le sol à traiter est un facteur important affectant d'une façon significative la qualité des résultats.

Le traitement à la chaux est une technique bien connue pour améliorer les propriétés mécaniques des sols argileux dans le génie civil (construction de routes, construction ferroviaire et aéroport) en ajoutant une petite quantité de chaux dans le sol. De nombreuses études montrent que le traitement à la chaux peut modifier les propriétés physiques et hydromécaniques des sols compactés comme la réduction du potentiel du gonflement, l'augmentation de la résistance au cisaillement, l'augmentation du module d'élasticité et la modification des propriétés de compactage. Dans ce travail, nous réalisons une étude expérimentale sur le traitement à la chaux du sol limoneux argileux extrait à partir d'un projet de station de relevage à 100 logements se trouvant dans la ville d'Eltarf. Dans un premier temps ;on détermine l'état du sol considéré à l'aide des essais d'identification au laboratoire, tels que la granulométrie, les limites d'Atterberg, ainsi que les caractéristiques mécaniques du sol à l'état naturel, par la méthode de compressibilité par palier à l'odomètre et l'essai de cisaillement. Le sol considéré (argile limoneux) est caractérisé par une forte teneur en eau, lui donnant une certaine friabilité, ce qui a été observé lors des essais au laboratoire. Pour l'amélioration des caractéristiques de ce sol, nous employons l'ajout de la chaux avec les pourcentages suivants : 2 %, 4 % et 6 %. Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 6.50

Introduction générale

à 7.00m. Après l'extraction, il a été placé dans des caisses qui contiennent plusieurs carottiers (moules sous forme de carottes) ensuite transporté au laboratoire « Laboratoire national de l'habitat et de la construction * LNHC* EL-Tarf » pour préparation et exécution, des essais géotechniques d'identification et de caractérisation.

Le mémoire est structuré en 4 chapitres :

- Après une introduction générale exposant la problématique et définissant les objectifs et le plan de travail, le premier chapitre présente dans une première partie un aperçu sur la caractérisation des sols fins
- Le deuxième chapitre présente un panorama sur les différentes techniques d'amélioration des sols instables, puis une définition sur les matériaux de traitement et leurs influences sur la portance.
- Le troisième chapitre contient un programme expérimental présentant l'ensemble des essais réalisés au laboratoire pour la caractérisation du sol étudié.
- Le quatrième chapitre, consiste à la présentation des résultats du traitement par les ajouts de la chaux sur les caractéristiques de la portance du sol étudié. Enfin, en dernier lieu sont exposées les principales conclusions.

CHAPITRE 1 : Méthodes d'amélioration des sols instables

1 Introduction

Les matériaux à la surface de l'écorce terrestre sont constitués de sols ou de roches. Le sol est un matériau hétérogène et anisotrope comportant un mélange d'éléments solides, d'eau et de gaz.

La fluctuation de ces deux derniers éléments dans les vides font de ce matériau triphasique un sujet variable dans le temps.

Un sol est défini par la géotechnique comme «un agrégat naturel de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère». Ce matériau discontinu est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches.

L'altération physique comprend l'érosion, le gel et dégel, la variation de température, et l'anthropisation, etc. L'altération chimique comprend l'hydratation, l'oxydoréduction et la carbonatation.

Certains sols, qu'on dit organiques, contiennent des débris végétaux ou d'animaux. Le caractère meuble ne suffit pas pour définir un sol naturel car certains matériaux fabriqués artificiellement à partir de sol soude roches présentent aussi ce caractère.

2 Définition d'un sol

Dans les études géotechniques les matériaux existant à la surface de l'écorce terrestre sont classés en deux grandes catégories :

-les roches : agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes, même après immersion prolongée dans l'eau + Mécanique des roches.

-les sols: agrégats de grains minéraux pouvant être séparés sous l'effet d'actions mécaniques relativement faibles + Mécanique des sols. Les matériaux de transition entre sols et roches sont nommés SIRT (sols indurés et roches tendres). On notera que le géologue appelle sols tous les matériaux se trouvant à la surface de l'écorce terrestre. Les sols sont des matériaux meubles, poreux, hétérogènes et souvent anisotropes. Les matériaux, minéraux ou organiques, sont généralement à l'état de grains ou de particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variable. [1]

3 Éléments constitutifs D'un sol

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide, d'eau pouvant circuler ou non entre les particules et d'air ou de gaz. L'est donc, en général, constitué de trois phases :

Sol = phase solide + phase liquide + phase gazeuse.

Entre les grains du squelette, les vides peuvent être remplis par de l'eau, par un gaz ou les deux à la fois. Le gaz contenu dans les vides entre les particules est généralement de l'air lorsque le sol est sec ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide (cas le plus fréquent). L'eau peut remplir plus ou moins tous les vides entre les grains et être mobile (écoulement plus ou moins rapide). Lorsque l'eau remplit tous les vides, le sol est dit saturé. Dans les régions tempérées, la plupart des sols en place, à quelques mètres de profondeur sont saturés. Lorsqu'il n'y a pas d'eau, le sol est dit sec. L'étude complète des sols non saturés, qui constituent un milieu à trois phases, est très complexe. [2]

4 Grains

Les grains dérivent de rochers massifs et forment le squelette du sol. Ils sont caractérisés par :

- **Leur taille** : c'est pour estimer la quantité des grains d'une taille définie que l'on détermine la granulométrie.
- **Leur forme** : la forme des grains (cubique, sphérique, plaquettes, etc.) et leur état de surface (rugueux, poli, etc.) ont une influence directe sur le comportement du sol. D'une manière générale, l'irrégularité des grains augmente la stabilité.
- **La nature des minéraux qui les composent** : la nature des particules d'un sol a une influence sur certains paramètres du sol (perméabilité, compressibilité, résistance, transmission des forces), spécialement dans les sols fins. Certains minéraux peuvent conférer des propriétés.

5 Pores

Entre les différentes particules de sols se trouvent ce que l'on appelle communément des «vides».

Ce terme est pourtant mal choisi puisque ces «vides» ne sont en fait pas vides mais contiennent de l'air et/ou de l'eau. C'est la raison pour laquelle le terme «pores» est mieux adapté dans ce cas-ci.

La teneur en pores peut être plus ou moins importante selon la granulométrie, la forme et la distribution des grains, et la compacité du sol.

Leur présence est facile à visualiser dans les sables et graviers mais elle l'est moins dans les argiles ou limons où les pores sont beaucoup plus petits. Lorsque le sol est sec, les pores sont remplis d'air. Lorsque, à l'opposé, les pores sont complètement remplis d'eau, on dit que le sol est saturé. [3]

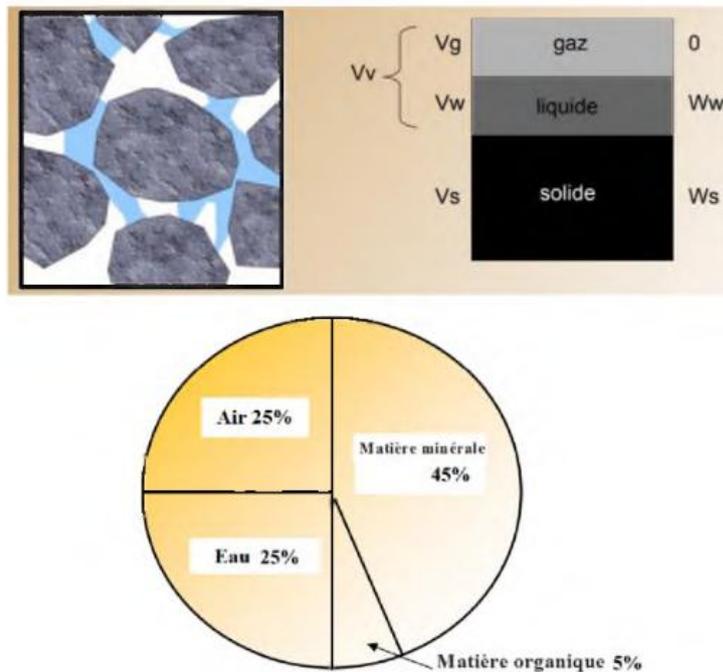


Figure 1.1. La Texture du Sol.

6 Identification et classification des sols instables

6.1. Caractérisation des sols instables :

Les sols fins mous et compressibles sont fréquemment rencontrés.

Les problèmes relatifs à ce type de sol est qu'ils subissent des déformations importantes sous les charges qui leur sont appliquées. Leur capacité portante est souvent trop faible pour supporter les charges prévues. Toutes ces caractéristiques nous amène aux problèmes rencontrés dans la pratique à savoir des tassements excessifs et l'instabilité de l'ouvrage.

Les sols fins en général et l'argile en particulier sont constitués d'un ensemble de particules minérales ayant une taille inférieure à 2 μm . Ce matériau a fait l'objet de nombreux travaux sur sa nature minéralogique. Au niveau minéralogique, les argiles sont des silicates simples ou complexes d'aluminium, de magnésium et de fer. La plupart des minéraux argileux se

présentent sous la forme de feuillets, d'où leur nom de phyllithes ou phyllo-silicates. Chaque particule est constituée d'un empilement de quelques dizaines ou centaines de feuillets.

La constitution chimique, l'épaisseur et l'écartement des feuillets définissent la minéralogie de l'argile et ses propriétés.

En général, trois grands types argiles sont identifiés : la kaolinite, la smaltite et l'illite. Dans les sols, ces types d'argiles peuvent être mélangés. La proportion de chacune de ces argiles varie suivant les sols. [4]

6.2 Les Argiles :

Qu'est-ce qu'une argile? On pourra trouver dans les dictionnaires la définition suivante: « roche sédimentaire terreuse, imperméable, grasse au toucher, qui happe à la langue, formée surtout de silicates d'aluminium et qui, imbibée d'eau, devient malléable». Dans la pratique, ce terme est utilisé pour désigner un ensemble d'espèces minérales, une famille de roches, une catégorie de sols ou encore une classe granulométrique. Sous le vocable «argile» se cache donc une grande diversité de matériaux avec des compositions chimiques et minéralogiques, des textures et des propriétés variées. Les minéraux argileux proviennent de l'altération et de la dégradation des roches: altération physique sous l'effet des variations de température, et surtout altération chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules de moins de 2 μm et entre 2 à 5 μm . Les conditions dans lesquelles cette dégradation a lieu (température, PH de l'eau, etc.) sont responsables de la diversité des argiles .[5]

6.3 Principales familles des minéraux argileux:

Les trois familles de minéraux argileux les plus connues sont celles de: la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

6.3.1 Structure élémentaire des minéraux argileux :

Tous les minéraux argileux sont composés par l'assemblage, d'eau (H_2O), de silice, sous forme de silicates (SiO_3) et d'aluminium, Sous forme d'alumine (Al_2O_3).

Leur structure élémentaire, appelée feuillet, est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicates et alumines. Chaque minéral argileux est composé d'un empilement de feuillets. Ce dernier a un nombre variable de couches pouvant être regroupées en deux types :

Le Tétraèdre de silice SiO₄ :

4 atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enserrant un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques (Freeah 2006) (Figure.1.2).

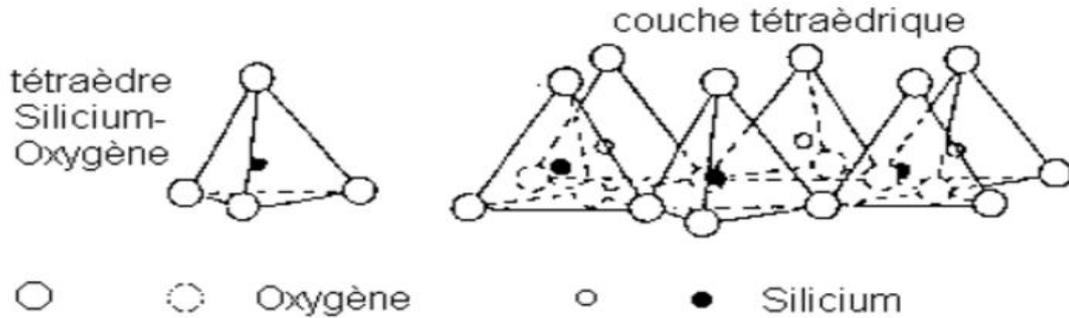


Figure 1.2. Structure Élémentaire Tétraédrique (Morel R. 1996).

L'octaèdre d'alumine Al₂(OH)₆ et éventuellement de magnésium Mg₃(OH)₆ :

6 ions hydroxydes enserrant un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques. [6]

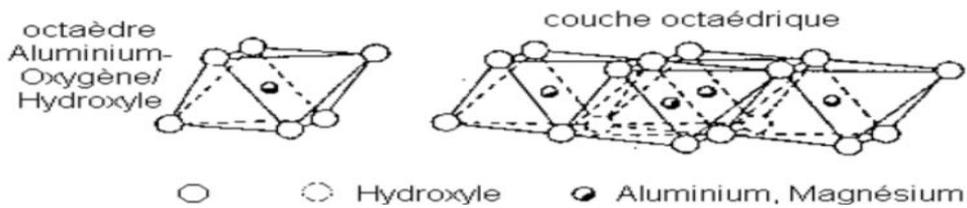


Figure 1.3. Structure Élémentaire Octaédrique (Morel R. 1996).

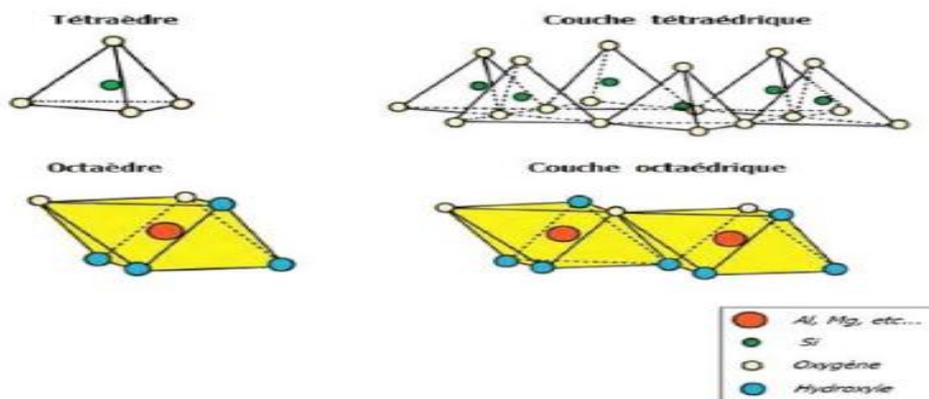


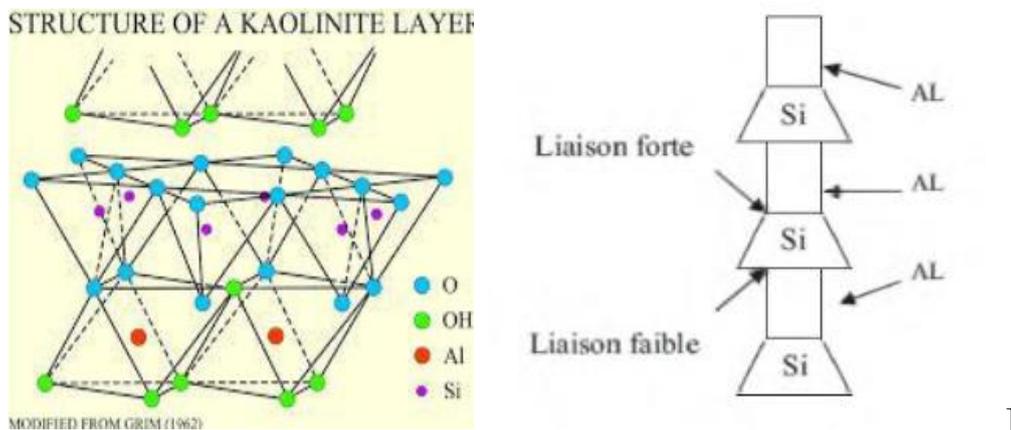
Figure 1.4. Schéma de structure tétraédrique et octaédrique.

6.3.2 Les différents types d'argiles :

Les types d'argiles les plus fréquents sont :

6.3.2.1 Famille de la kaolinite:

Le feuillet élémentaire de cette famille résulte de l'assemblage d'un feuillet tétraédrique SiO_4 avec un feuillet octaédrique $\text{AlO}_2(\text{OH})_4$. Les couches de base successives sont maintenues ensemble par les liens d'hydrogène entre les hydroxyles du feuillet en octaèdre et les atomes d'oxygène du feuillet en tétraèdre. Ces liaisons empêchent l'hydratation entre les feuillets élémentaires permettant un empilement relativement important de couches et la formation d'un cristal d'assez grande dimension. L'espace inter-foliaire de cette famille est de 7.2 Å. La kaolinite est une argile stable, non-gonflante et sa structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau et ne peut être détruite que par chauffage à 450 °C. Les particules de kaolinite ont une forme plate hexagonale d'épaisseur de l'ordre de 0.1 µm et de diamètre moyen entre 0.3 µm et 4 µm.



6.3.2.2 Famille de la montmorillonite:

Le feuillet de cette famille est constitué par l'association de deux couches tétraédriques SiO_4 , disposées de façon à laisser entre elles une couche octaédrique de type $\text{TO}_4(\text{OH})_2$. T pouvant être Al^{3+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , K^+ , ... Les couches de cette famille peuvent adsorber de l'eau dans des proportions considérables en donnant lieu à des gonflements caractéristiques, car les liaisons d'un feuillet à l'autre sont faibles et l'eau pénètre facilement entre les feuillets. Ainsi, les sols dont la teneur en montmorillonite est élevée sont susceptibles de gonflement et de retrait important en fonction de la variation de leur teneur en eau. Les plaquettes de la montmorillonite ont une forme quelconque avec des tailles très petites, un diamètre moyen entre 0.1 µm et 1 µm et une épaisseur moyenne entre 0.01 µm et 0.1 µm. La montmorillonite

est l'une des argiles les plus connues de la famille des smectites définies comme «les argiles gonflantes».

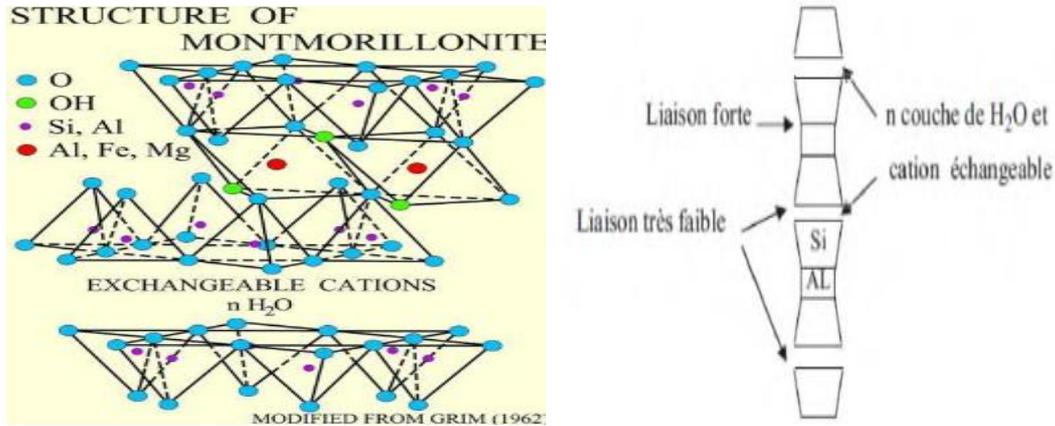


Figure 1.6. Structure de la montmorillonite [Lambe, 1953].

6.3.2.3 Famille de l'illite:

Les argiles de la famille de l'illite sont parmi les minéraux les plus répandus à la surface de la terre. La structure de l'illite est analogue à celle de la montmorillonite, mais la présence d'ions potassium K^+ dans la structure rééquilibre et renforce la liaison entre feuillets, rendant ainsi l'argile moins sensible aux phénomènes de retrait-gonflement. Les particules d'illites sont plates, de forme moins régulière que celle des particules de kaolinites; elles ont un diamètre moyen variant entre 0.1 μm et 3 μm avec une épaisseur de l'ordre de 0.01 μm . [7]

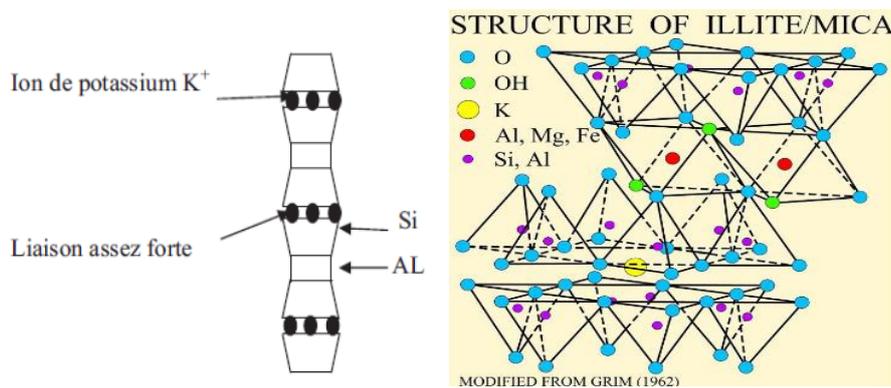


Figure 1.7. Structure d'illite [Lambe, 1953].

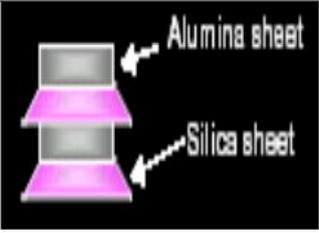
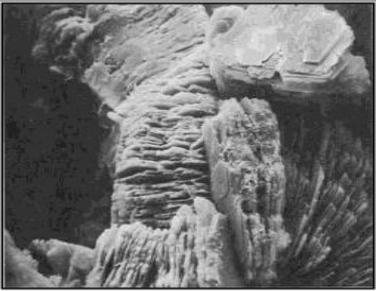
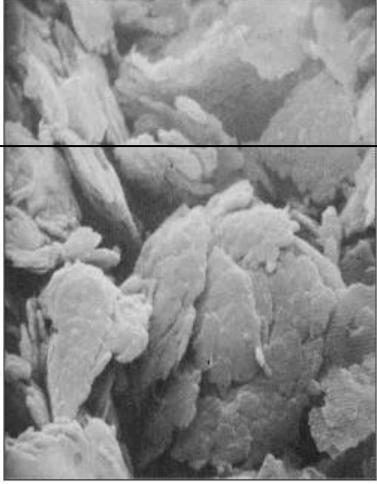
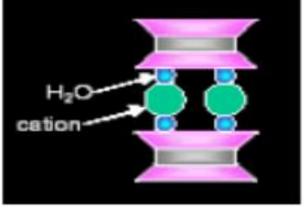
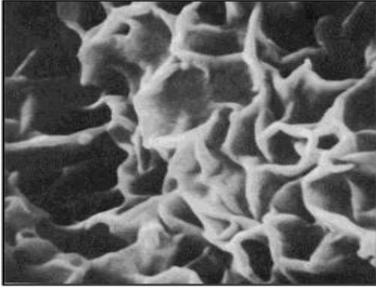
Minéraux Argileux	Type de minéral	Structure du minéral	Taille de la particule	: Photographie au microscope à balayage électronique [4]
Kaolinite	1 : 1	 <p>Alumina sheet Silica sheet</p> $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Grande ($> 1\mu\text{m}$)	
Illite	2 : 1	 <p>potassium</p> $(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4$ $\text{O}_{10}[(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}]$	Moyenne ($< 1\mu\text{m}$)	
Montmorillonite	2 : 1	 <p>H_2O cation</p> $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Petite ($< 1\mu\text{m}$)	

Tableau. 1.1. Caractéristiques physico-chimiques des minéraux argileux courants.

6.4 Les Limons :

C'est un matériau de grosseur entre les sables et les argiles. Contenant une teneur en calcaire suffisante, ces sols deviennent fertiles. Ils seront dits limons organiques s'ils contiennent des matières organiques. Ces sols sont difficilement compactables et ont de faibles portances, D entre 2 à 20 μm . [8]

6.5 Les Marnes :

Roche tendre composée en proportions variables d'argile et de calcaire mêlés à du sable, qui a la propriété de se déliter et qui est utilisée selon sa composition pour l'amendement des terres, la fabrication de ciments, de tuiles, de céramiques. On considère, selon leur composition, trois

grandes catégories : Les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium. Les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95%. Comme pour les argiles, les marnes argileuses présentent notamment l'inconvénient de craqueler sur une certaine profondeur en cas de sécheresse. D'une façon générale, les marnes sont une assise de fondations bonne à moyenne en l'absence de gypse. En revanche, elles sont médiocres, voire dangereuses, lorsqu'elles sont très argileuses en affleurement ou lorsqu'elles se situent au-dessus d'une masse de gypse, avec risque de formation de fontis. On peut conclure que l'évolution des sols fins est due à la présence des minéraux argileux dans les sols tels que : les marnes, les argiles....etc. qui manifestent une grande sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couches de sol) et une forte affinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification: gonflement, déconsolidation, perte des caractéristiques mécaniques). [9]

7 Principaux problèmes des sols instables

Dans de nombreux pays du monde, le gonflement est à l'origine de fréquents désordres des ouvrages légers.

Aux Etats-Unis d'Amérique les dommages provoqués par le gonflement des sols présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles.

En Algérie l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que posent les phénomènes de gonflement, tassement, et de glissement.

7.1 Phénomène de Gonflement :

le gonflement de sol est un terme utilisé pour dire que le volume du sol augmente, lié aux changements d'humidité des sols très argileux, qui sont capables de fixer l'eau disponible, mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse (phénomène de retrait). Le phénomène de retrait et de gonflement des sols argileux occasionne des dégâts considérables aux bâtiments. Il est à l'origine de tassements différentiels des terrains d'assise des constructions qui provoquent des désordres parfois très importants. [9]

7.2 Tassements :

Le tassement c'est une diminution de volume de certains sols (vases, tourbes, argiles...etc.), sous l'effet des charges appliquées et de l'assèchement. Ce phénomène peut être de grande extension et affecte des agglomérations entières (Mexico, construite sur des alluvions, s'est tassée de sept mètres depuis le début du siècle par exploitation excessive de la nappe). [10]

7.3 Glissements :

Il s'agit du déplacement lent d'une masse de terrain cohérente le long d'une surface de rupture. Cette surface a une profondeur qui varie de l'ordre du mètre à quelques dizaines de mètres dans des cas exceptionnels. Les volumes de terrain mis en jeu sont considérable, les vitesses d'avancement du terrain peuvent varier jusqu'à atteindre quelques décimètres par an. Se produisent généralement en situation de forte saturation des sols en eau.

En se basant sur la surface de rupture, Robitaille et Tremblay (1997) distinguent trois principaux types de glissements :

- Les glissements plans
- Les glissements circulaires ou rotationnels
- Le glissement quelconque (aléatoire) [11]

8 Quelques cas pathologiques

Les désordres provoqués par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support.

La pathologie dépend du type d'ouvrage. Les phénomènes de retrait et de gonflement de certains sols argileux ont été observés depuis longtemps dans les pays à climat aride et semi-aride où ils sont à l'origine de nombreux dégâts causés tant aux bâtiments qu'aux réseaux et voiries.

8.1 Cas des bâtiments :

Pour les structures de génie civil on peut observer les désordres suivants :

- Fissuration des structures.
- Distorsion des ouvertures.
- Rupture des canalisations.
- Décollement des bâtiments.

(La figure.1.8) représente des fissures au niveau d'une structure légère de génie civil due au gonflement du sol de fondation. Les bâtiments, et particulièrement les maisons individuelles construits sans précautions sur sols gonflants, présentent souvent des figures de dégradation telles que fissures des murs porteurs, voire des murs de remplissage, bombement de l'éventuel radié qui conduisent parfois à l'instabilité générale du bâtiment par rupture ou déboisement de ses éléments porteurs.



Figure 1.8. fissures au niveau d'une structure de génie civil.

8.2 Cas des chaussées :

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de la teneur en eau du sous-sol.

Il peut être attribué au climat et à la surcharge. Le désordre subis par la chaussée se résume généralement à des fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur ses accotements.

En saison de pluie ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords. Ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche (Figure. 1.9).[9]



Figure 1.9. Déformation d'une chaussée de sol instable.

9 Technique d'amélioration des sols

9.1 Méthodes mécaniques :

Nous citerons deux méthodes de stabilisation mécanique :

9.1.1 Compactage dynamique :

Le compactage de surface peut être utilisé pour une profondeur maximale de 3m. Au-delà de cette profondeur autre type de compactage existe connu sous le nom de compactage

dynamique profond. C'est un procédé qui consiste à pilonner le sol en surface avec une dame en chute libre d'une hauteur de 10 à 30 mètres, une masse pesant de 10 à 35 tonnes. L'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration. Au bout de quelques jours ou semaines, une restructuration s'opère qui aboutit à des caractéristiques de portance améliorées. [12]



Figure 1.10 .Chantier d'un compactage dynamique profond.

9.1.2 Vibrocompactage :

La technique du vibrocompactage (ou compactage par résonance vibratoire) consiste en la vibration de profilés spécialement développés à l'aide de vibreurs verticaux fortement puissants à fréquence variable, installés et adéquatement fixés à la tête du profilé ,l'énergie vibratoire est transmise sur toute la longueur du profilé et provoquant le compactage du sol en place, sans qu'un matériau de remplacement soit nécessaire. Ce type de compactage fonctionne de façon optimale dans des sols sableux saturés, les vibrations font développer alors des pressions interstitielles. La mobilité des particules de sable augmente et elles se réorganisent donc plus facilement.



Figure 1.11. Vibrocompactage.

Ce procédé de Vibrocompactage est appelé aussi la vibroflotation. Cette méthode trouve son application dans les sols granulaires particulièrement les sables propres et les sables silt eux avec une teneur en fines inférieure à 20%. Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense. [13]

9.2 Méthodes hydromécaniques

9.2.1 Pré chargement ou Pré compression :

La pré-compression nécessite la compression du sol sous une pression appliquée avant l'application des charges.

Cette méthode est utilisée sur des terrains dont le tassement va se prolonger durant plusieurs années. On applique généralement ces méthodes sur des mauvais terrains de composition principalement argileuse. Le principe consiste à surcharger le terrain afin qu'il se tasse naturellement. Le pré chargement des sols s'opère selon les mêmes principes dans le cas des sols fins ou grenus. Le mode de réalisation est le même, mais la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir l'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs que les sols fins et surtout argileux. (Figure 1.12).

Cette technique consiste à placer sur le terrain une charge égale à la charge définitive p_f augmentée éventuellement d'une surcharge p_s qui assure tout ou partie des effets suivants :

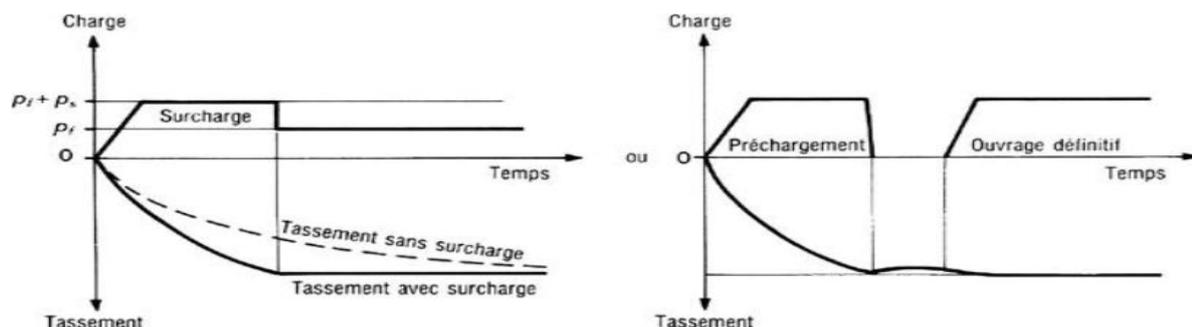


Figure 1.12. Principe du pré chargement pour le contrôle des tassements

[Bell, 1993].

Les effets bénéfiques de ce procédé incluent une augmentation considérable de la capacité de portance par la réduction des pressions interstitielles excessives et de plus la réduction de la compressibilité des sols mous par l'accélération de la consolidation.

9.2.2 Accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux :

Les drains verticaux peuvent donc être utilisés dans beaucoup de cas pour accélérer le taux du tassement de la consolidation primaire à l'intérieur de la zone pré chargée avec ou sans la surcharge ajoutée. Ce procédé est inefficace dans les sols tels que les argiles très organiques et

les tourbes où leur comportement de tassement est beaucoup plus dominé par la compression secondaire. Les drains verticaux permettent donc au drainage de s'effectuer horizontalement et verticalement (Figure 1.13).



Figure 1.13. Installation des drains.

Durant les années 1980, les drains verticaux sont constitués généralement de sable réalisés par différents procédés tels que le battage et le vibrofonçage.

A partir des années 1980, une nouvelle génération de drains qui sont les drains préfabriqués en forme de bande a fait son apparition. La part de ces drains a augmenté de façon très rapide.

[3]

9.3 Méthodes Thermiques

9.3.1 Déshydratation

La déshydratation par la chaleur est très rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple. En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage.

9.3.2 Congélation

La congélation des terrains instables est un procédé ancien à caractère provisoire, employé pour le creusement des fouilles de puits ou de galeries. Cette technique rend le sol étanche et résistant provisoirement. Ce procédé est généralement développé pour les sols grenus mais il peut être appliqué aux argiles molles et aux limons. La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé (Figure 1.14).



Figure 1.14. Chantier utilisant la congélation du sol.

Les techniques de congélation utilisées sont basées sur la circulation d'un fluide froid dans des tubes enfoncés dans le massif de sol. Une saturation complète du sol est souhaitée. La congélation du sol s'effectue d'habitude en deux étapes à savoir les étapes active et passive de congélation. L'étape active est la plus importante et l'appareillage de réfrigération marche avec sa grande capacité que durant l'étape passive nécessaire pour maintenir l'épaisseur du front de gel contre le dégel.

9.4 Méthodes chimiques

La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Aujourd'hui les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du Génie Civil à l'échelle mondiale. Le recours massif à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts est due principalement aux facteurs suivants tels que la raréfaction des gisements naturels de matériaux nobles, le souci écologique croissant imposant de préserver d'une part les ressources naturelles existantes et de limiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme. Les ajouts cimentaires et les produits chimiques les plus utilisés sont le ciment, la chaux, les cendres volantes, L'objectif principal du malaxage des ajouts cimentaires avec le sol est l'amélioration de ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité.

Les différentes propriétés qui peuvent être améliorées sont la résistance, la plasticité, la compressibilité, la perméabilité, le potentiel de gonflement et le potentiel d'effondrement. L'amélioration de ces propriétés s'effectue soit par l'augmentation de certaines d'entre elles telle que la résistance, soit par la réduction d'autres telles que la plasticité, la perméabilité et l'érosion. Un bon malaxage des ajouts cimentaires avec le sol à traiter est un facteur important affectant d'une façon significative la qualité des résultats. [7]

9.4.1 Utilisation de la chaux

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques.

D'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente. Dans certains cas par exemple, un sol stabilisé à la chaux fournit une performance structurelle équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou en concassé (Bell, 1978). L'utilisation de la chaux se fait par l'addition des produits calcaires calcinés de monoxyde de calcium (chaux vive, CaO) ou d'hydroxyde de calcium (chaux hydratée, Ca(OH)).

Généralement, la chaux vive est plus efficace que la chaux hydratée pour l'amélioration des sols. La chaux est plus efficace aux sols argileux que les sols granulaires. Par conséquent, les sols présentant des indices de plasticité au-delà de 10 sont les plus ciblés par ce procédé (Figure. 1.15). De plus, la réussite de stabilisation à la chaux d'un sol nécessite d'une part une source de silice et/ou d'alumine et d'autre part des particules de petites dimensions susceptibles à l'échange cationique ainsi que la durée de cure.



(a) Epandage

(b) Malaxage

Figure. 1.15. Chantier de traitement du sol à la chaux.

9.4.2 Utilisation du ciment

Le ciment Portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes et les revêtements de pistes d'aéroports. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment Portland comme stabilisants, le ciment Portland fournit en plus la chaux et la source de silice. Lorsque le ciment Portland est mélangé à l'eau, l'initiation de l'hydratation occasionne une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol. A mesure que les ions de calcium sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile (Figure 1.16). [3]



Figure 1.16. Chantier de traitement du sol au ciment.

Comme indiqué ci-dessus, le processus de stabilisation initié par l'ajout du ciment Portland à l'argile engendre quatre étapes distinctes à savoir l'échange cationique, la floculation et l'agglomération de l'argile, l'hydratation par cimentation et les réactions pouzzolaniques. Le ciment Portland possède donc des propriétés lui permettant d'initier une étape de plus que la chaux soit celle de l'hydratation par cimentation. Les sols possédant un faible pourcentage d'argile, donc moins de silice et d'alumine ont besoin d'un apport de ciment si les réactions pouzzolaniques sont désirées. Par conséquent, le ciment Portland peut généralement être utilisé dans les mêmes types de sols que la chaux. [9]

10 Conclusion

Les facteurs qui interviennent dans le choix entre les différentes techniques d'amélioration sont assez divers tels que les considérations économiques, les méthodes d'amélioration mécaniques et hydromécaniques des sols sont coûteuses et demandent un savoir-faire élevé ce qui n'est toujours permis dans les pays en voie de développement comme l'Algérie. De plus, les méthodes d'amélioration thermiques des sols restent elles aussi efficaces mais dont l'emploi reste limité en raison de leurs coûts très élevés. Par ailleurs, la méthode d'amélioration chimique des sols par addition de la chaux, du ciment ou d'autres ajouts cimentaires reste la plus utilisée et la moins onéreuse. Cette technique s'est développée très rapidement à travers le monde et qui est encore menée à connaître une importante croissance. Aisée à mettre en œuvre, économique et efficace, elle permet surtout d'éviter de lourds travaux de terrassement destinés à rejeter les sols inadéquats et à faire appel à des matériaux d'emprunt de bonne qualité. Les ajouts cimentaires sont produits en Algérie.

Chapitre 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Les caractéristiques médiocres d'un sol ont un impact majeur sur les ouvrages de génie civil et leurs duré de vie. Ces sols peuvent être améliorés avec des additives chimiques.

On peut ajouter ces additifs aux divers types de sols pour améliorer les caractéristiques géotechniques.

L'efficacité de ces additifs dépend de la nature du sol traité et la quantité d'additif ajoutée Dans ce chapitre on présente une étude bibliographique sur la stabilisation des sols par les additifs. On présente également des notions sur la chaux car elle employée dans l'étude expérimentale.

1 Recherches concernant la stabilisation des sols

Les sols cimentés peuvent être trouvés naturellement, ou induits artificiellement dans le but d'améliorer la capacité de support des sols faibles. Cimentation joue un rôle important dans le comportement d'ingénierie des sols et a fait l'objet d'une enquête approfondie dans le monde entier. Les effets bénéfiques du traitement du ciment sur la performance d'un large éventail de sols ont été largement documentés.

La stabilisation du ciment est un processus rapide et peut être utilisé pour la stabilisation D'une large gamme de sols. L'addition de ciment a montré une amélioration significative de la maniabilité, de la résistance à la compression et de la résistance au cisaillement des sols (Sariosseiri et Muhunthan, 2009). Abdulla et Kiouisis (1997) ont rapporté que l'augmentation de la teneur en ciment entraîne un matériau plus fort, plus rigide et entraîne généralement une réponse plus ductile. L'augmentation des pressions de confinement entraîne une déformation du cisaillement plus ductile, avec une compression volumétrique initiale plus grande et une vitesse de dilatation maximale Réduite. Abdulla et Kiouisis, (1997) ont conclu que la plupart des rapports expérimentaux estiment qu'une augmentation de la teneur en ciment entraîne une augmentation de la cohésion. Cependant, il n'y a pas d'accord général sur les effets de la teneur en ciment sur l'angle de frottement maximal. Saxena et Lastrico, (1978) ont suggéré que, à des contraintes axiales faibles (<1%), la cohésion causée par le collage de ciment entre les particules est la principale composante de la résistance. La résistance à la friction devient dominante. Pour le sable cimenté, des contraintes plus importantes sont nécessaires pour produire les liaisons cimentaires entre les particules (dos Santos et al., 2010a). Lee et al., (2010) ont signalé un rendement distinctif pour le sable cimenté en raison de l'endommagement de la cimentation, alors que seule une augmentation monotone de la

déformation sans céder pour le sable non cimenté. Pour le sable cimenté, le rendement est abordé lorsque la liaison créée par le cimentant se rompt progressivement, après quoi les contraintes seront portées par la nouvelle matrice (non cimentée) des grains hôtes et du ciment cassé (Coop and Atkinson, 1993, Hamidi et Haeri , 2008). Sariosseiri et Muhunthan (2009) ont signalé que l'ajout de ciment améliore la résistance au cisaillement, mais le type d'erreur varie considérablement. Les sols traités au ciment non cimentés, à 5% et à 10%, présentent un défaut de type ductile, planaire et fractionnement, respectivement. Le contenu en ciment, la pression de confinement, la densité initiale, la teneur en humidité, etc. sont les paramètres clés qui dictent la résistance du sable cimenté. Albusoda B. et al., 2012 ont réalisé des essais de compactage et des essais de cisaillement direct sur sable de dune stabilisé par différents pourcentage de ciment (4%, 8% et 12%). La densité sèche augmente avec l'augmentation du % de ciment par contre la teneur en eau diminue avec l'augmentation de ciment.

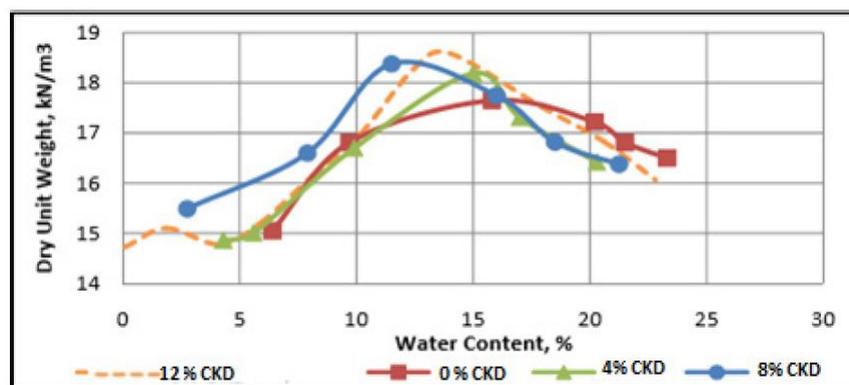


Figure 2.1 : Courbe de compactage selon % ciment (Albusoda B. et al., 2012).

L'angle du frottement est presque constant avec l'augmentation du ciment, par contre une augmentation très importante est observée à la cohésion pour chaque ajout de ciment jusqu'à 8% d'ajout de ciment.[14]

Les travaux effectués par George et al. (1992) ont permis d'observer que lorsqu'un sol est traité avec la chaux il y a une diminution notable de l'indice de plasticité. De plus, la limite de liquidité présente une augmentation peu marquée que celle de la limite de plasticité.

Plusieurs études ont été conduites par différents chercheurs [Ola 1977, George et al. 1992, Eren and Filiz 2009, Bozbey and Garaisayev 2010] pour étudier l'effet de l'addition de la chaux au sol à traiter sur les caractéristiques de compactage à savoir la teneur en eau optimale

et la densité sèche maximale. Ajouter de la chaux au mauvais sol provoque une réduction de la densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale (Figure II.16)

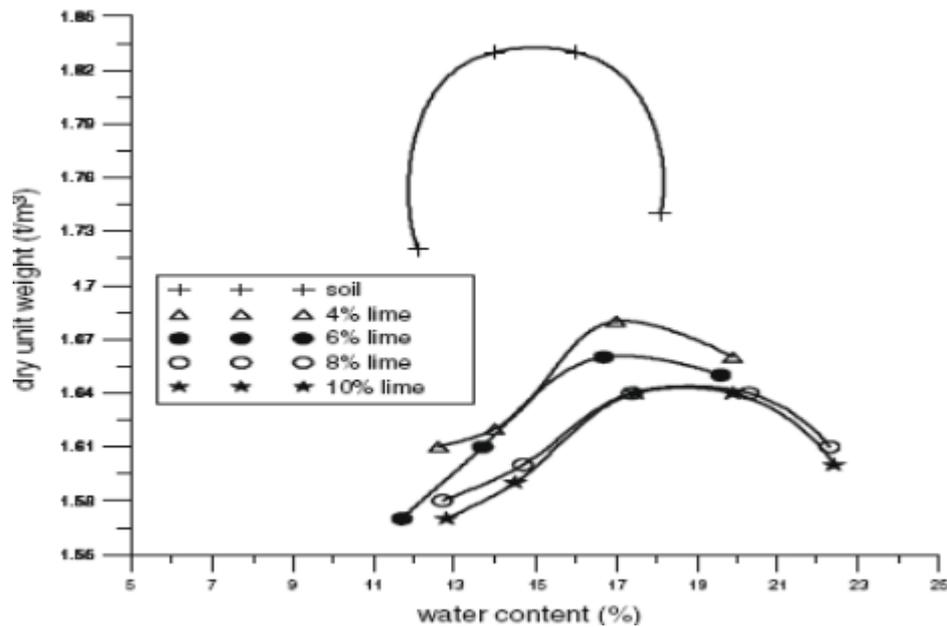


Figure 2.2. Variation des caractéristiques de compactage des mélanges sol-chaux [Eren and Filiz 2009].

De nombreuses études ont été effectuées dans le but de voir l'effet de l'addition de la chaux sur la résistance au cisaillement des sols instables à traiter. Plusieurs chercheurs [Osula 1991, Gay and Schad 2000, Muntohar and Hantoro 2000, Bagherpour and Choobbasti 2003, Lin et al. 2007] ont montré que la stabilisation des sols instables à l'aide de la chaux provoque une augmentation de la résistance au cisaillement de ces sols traités par rapport aux sols naturels. La période de cure est un facteur important dans l'évolution de la résistance au cisaillement des échantillons traités. L'augmentation de la cohésion est attribuée à la cimentation des particules tandis que celle de l'angle de frottement est due à la floculation des mêmes particules (Figure 2.3). [15]

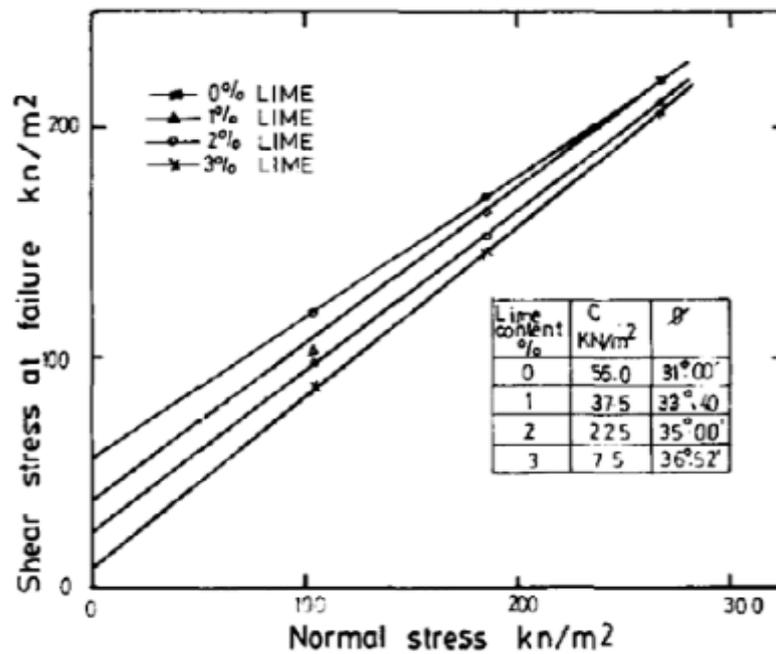


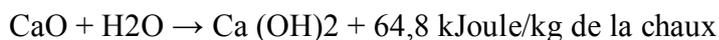
Figure 2.3. Variation des paramètres de cisaillement des sols traités à la chaux [Osula 1991].

2 Notions de base sur la chaux

La chaux est un produit naturel et biologique, qui respecte l'environnement. La chaux est une matière, généralement, poudreuse et de couleur blanche, obtenue par thermolyse du calcaire. Elle est utilisée depuis l'antiquité, notamment dans la construction. Elle trouve une place privilégiée dans le secteur du bâtiment et dans les matériaux de construction. La chaux intervient à différents stades du traitement des sols, et sa qualité a une influence directe sur l'efficacité du traitement des sols. Certaines propriétés de la chaux présentent des avantages particuliers pour les traitements de sols :

- ✓ **Basicité:**
- ✓ La chaux est fortement basique ; les solutions présentent un PH supérieur à 12 (réduire le degré d'acidité du sol).
- ✓ **Hydratation :**

La chaux vive est très avide d'eau. En s'hydratant, elle s'éteint avec un fort dégagement de chaleur selon la réaction chimique suivante :



Cette propriété est utilisée pour assécher des sols très imprégnés d'eau.

✓ Flocculation :

Le phénomène de flocculation s'explique par la formation de ponts $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CaOH^+ entre les feuillets d'argile, ce qui modifie la consistance du milieu et le fait de passer d'un état plastique à une structure grumeleuse stable ce qui permet un bon compactage (ou une bonne consolidation).

2.1 Fabrication

La fabrication de la chaux consiste à cuire des carbonates de calcium et/ou de magnésium pour libérer le dioxyde de carbone et obtenir l'oxyde dérivé



L'oxyde de calcium produit par le four est habituellement concassé, broyé et/ou tamisé avant d'être transporté vers le stockage en silo. Du silo, la chaux cuite est soit livrée au client final pour utilisation sous forme de chaux vive, soit transférée dans une installation d'hydratation où elle est mise à réagir avec de l'eau pour produire la chaux éteinte.



La chaux aérienne peut durcir lentement (recarbonatation) sous l'action du

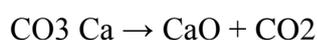
CO_2 atmosphérique (cette qualité de prise à l'air est à la base de la qualification de chaux aérienne).[3]

2.2 Les différents types de chaux aériennes

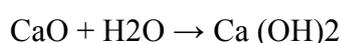
La chaux aérienne peut exister sous les trois formes suivantes:

✓ La chaux vive :

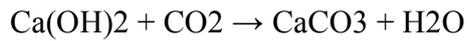
Est obtenue par décarbonatation du calcaire (CO_3Ca) à une température d'environ 900°C .



La chaux vive réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur et se transforme en chaux éteinte.



La réaction est réversible car l'hydratation par l'humidité ambiante et le CO_2 de l'atmosphère vont permettre à la chaux une prise à l'air, d'où le terme de chaux aérienne.



➤ **La chaux aérienne :**

Peut exister sous trois formes : chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux. Les caractéristiques des chaux aériennes prises en compte sont : la forme (vive, éteinte ou lait), la teneur en chaux libre, la granularité (tamisât 2 mm, 0,2 mm et 0,08 mm), la réactivité (essai de réactivité à l'eau, la vitesse d'hydratation de la chaux, le test global de qualité de la chaux). La chaux est couramment symbolisée par sa formule chimique : CaO.

Il existe divers matériaux appelés chaux qui se différencient entre eux par leur teneur en impuretés. (Normes NF P 153310 et NF P 153312). Les chaux sont codifiées ainsi :

-chaux aérienne calcique vive: CL3Q

-chaux aérienne calcique éteinte: CL3S

-chaux hydraulique naturelle: NHL [16]

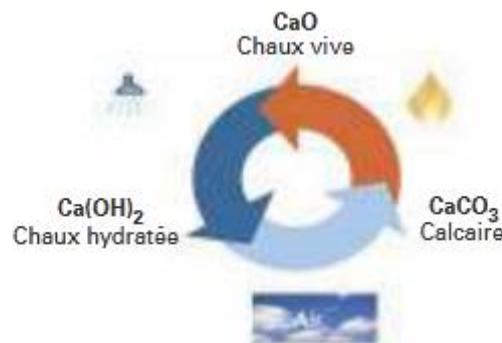


Figure 2.4. Cycle de fabrication de la chaux.

➤ **Lait de chaux**

C'est la chaux en forme plus concentrée et plus liquide et sa prise est très lente, elle est obtenue par mise en suspension de chaux éteinte dans de l'eau comme elle peut être préparée à partir de la chaux vive, Elle est utilisée pour les traitements de matériaux secs. Son emploi a l'avantage de supprimer la poussière et d'humidifier les sols.

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes.

Elles se présentent sous deux formes : **Chaux vive** et **Chaux éteinte**. [17]

Tableau 2.1. Les différentes caractéristiques de la chaux.

	Chaux vive	Chaux éteinte
Teneur en chaux libre	>80%	>50%
Finesse (passant à 0.08mm)	>50%	>90%
réactivité	T >60° en 50°	/

2.3 Différence entre la chaux aérienne et la chaux ayant des propriétés hydrauliques

La partie 1 de la norme fait la distinction entre les deux familles de chaux : les chaux aériennes (NF EN 459-1, cf.) et les chaux ayant des propriétés hydrauliques (NF EN 459-1, cf.).

Ces deux familles sont précédées de définitions dont les principales sont rappelées ci-après:

•**Chaux:** oxyde et/ou hydroxyde de calcium et oxyde et/ou hydroxyde de calcium et de magnésium produits par la décomposition thermique (calcination) de carbonate de calcium d'origine naturelle (par exemple: calcaire, craie, coquilles) ou de carbonate de calcium et de magnésium d'origine naturelle (par exemple : calcaire dolomitique, dolomie).

•**Chaux aérienne:** chaux qui se combine et durcit avec le dioxyde de carbone présent dans l'air. Les chaux aériennes n'ont pas de propriété hydraulique. Elles sont divisées en deux sous-familles, la chaux calcique (CL) et la chaux dolomitique (DL). La chaux aérienne peut se trouver sous deux états :

-Soit de la chaux vive CaO , désignée par Q

-Soit de la chaux hydratée -aussi appelée chaux éteinte $-\text{Ca}(\text{OH})_2$, désignée par S, S PL ou S ML

•**Chaux ayant des propriétés hydrauliques:**

Chaux de construction constituées principalement d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), mais aussi de silicates de calcium et d'aluminates de calcium. Ces chaux ont la propriété de faire prise et de durcir lorsqu'elles sont mélangées à l'eau et/ou sous l'eau. La réaction avec le dioxyde de carbone présent dans l'air contribue au durcissement. Les chaux ayant des

propriétés hydrauliques sont divisées en trois sous-familles, la chaux hydraulique naturelle (NHL), la chaux formulée (FL) et la chaux hydraulique (HL). [18]

2.4 Domaines d'application de la chaux

Domaines d'application Les chaux aériennes et les chaux ayant des propriétés hydrauliques sont destinées au domaine de la construction en général (bâtiment et génie civil). Cependant, leurs caractéristiques, leurs propriétés, et donc leur domaine d'application, diffèrent d'une famille à l'autre.

➤ **Dans le domaine du bâtiment:**

Les chaux aériennes, sous forme hydratée, et les chaux ayant des propriétés hydrauliques sont principalement utilisées dans la confection de mortiers, enduits et badigeons ainsi que dans la fabrication du béton de chanvre. Les chaux aériennes calciques sous forme vive entrent dans la composition du béton cellulaire et des briques silico-calcaires. •

➤ **Dans le domaine du génie civil :**

Les chaux aériennes, principalement calciques à l'état vive, sont utilisées pour le traitement des sols et des matériaux (recyclage, valorisation, réemploi). La chaux aérienne calcique, sous forme vive ou hydratée, est utilisée comme composant, et éventuellement activateur, dans des liants à base de ciments, laitiers, cendres volantes, etc. La chaux aérienne calcique sous forme hydratée entre dans la composition des mortiers techniques (mortiers d'injection, mortiers de bourrage de tunnels, etc.).

➤ **Dans le domaine des enrobés bitumineux:**

La chaux aérienne calcique, sous forme hydratée peut être utilisée comme additif multifonctionnel dans les enrobés bitumineux. • Les laits de chaux calciques, trouvent une application en protection des couches d'accrochages. Ces dernières, répandues avant la pose de l'enrobé bitumineux, restent fragiles vis-à-vis de la circulation des engins de chantier. Les laits de chaux les protègent contre l'arrachement des roues et des chenilles d'engins. [19]

2.5 Effet de la chaux sur les sols

Les sols fins, c'est-à-dire les sols qui contiennent des proportions notables d'argiles et de limons, ont des propriétés routières déplorables. Ils gonflent et deviennent plastiques en présence d'eau, se rétractent avec la sécheresse, foisonnent sous l'effet du gel. Ils n'ont donc aucune stabilité face aux variations climatiques. Ils peuvent ainsi se trouver, soit dès

l'extraction, soit à la suite d'intempéries, à un degré de consistance élevé que la circulation des engins devienne difficile, voire impossible, ce qui par voie de conséquence rend leur utilisation délicate. Compte tenu de ses propriétés, la chaux modifie de façon sensible le comportement des sols fins argileux ou limoneux, grâce à trois actions distinctes :

Actions immédiates → Diminution de la teneur en eau naturelle

Lors du mélange chaux-matériau, trois phénomènes interviennent:

-l'hydratation de la chaux vive, qui se traduit par la réaction: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + 64,8 \text{ KJ}$

-la chaleur dégagée par cette réaction (64,8 kJ/mole) provoque la vaporisation d'une certaine quantité d'eau ;

-la production de chaux éteinte augmente la masse de solide du mélange.

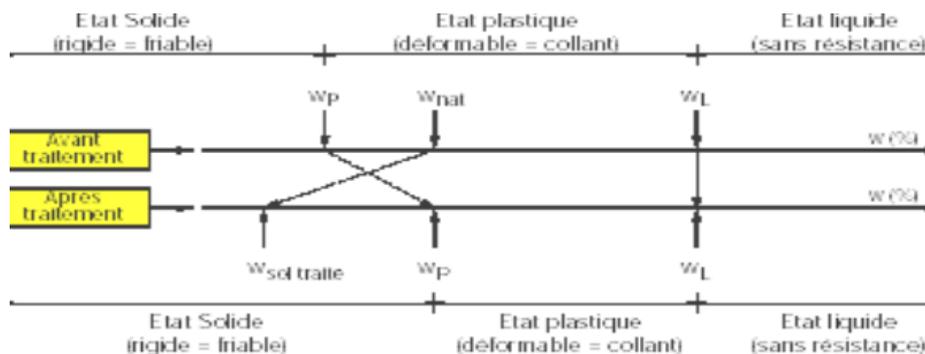


Figure 2.5. Diminution de la teneur en eau.

Modification de la fraction argileuse du matériau : La chaux vive agit sur les charges électriques des particules fines et produit leur floculation. Cette action modifie certaines caractéristiques géotechniques du matériau, en premier lieu elle provoque la réduction de l'indice de plasticité (I_p). Dans le même temps, elle augmente la résistance au cisaillement et modifie les caractéristiques de compactage du matériau. [20]

2.6 Actions des liants (la chaux)

2.6.1 Actions immédiates

○ Modification de l'état hydrique : la chaux vive et la chaux éteinte abaissent la teneur en eau alors que le lait de chaux permet une élévation de la teneur en eau. Il faut noter que

l'abaissement de la teneur en eau peut être supérieur à celui provoqué par la chaux à cause de conditions atmosphériques évaporantes. L'assèchement qui se produit lors du malaxage peut être préjudiciable pour le traitement de la CDF, mais il peut être compensé par un arrosage complémentaire.

○ Modification de la fraction argileuse Réduction de l'argilosité par flocculation : actions sur les charges électriques des particules fines. Le phénomène se traduit par une réduction de l'indice de plasticité (sol rigide, frottant), une augmentation de la résistance au cisaillement du sol (élévation de l'IPI → rigidité), et une modification des caractéristiques de compactage. L'énergie de compactage nécessaire est réduite avec la réduction de p_d . Un matériau moins dense est plus facile à compacter qu'un matériau qui a une densité plus importante et donc qui va offrir une plus grande résistance au coup asséné par le compacteur.

La figure 2.6 représente l'influence du traitement à la chaux sur les caractéristiques de compactage et exprime bien cette relation entre les paramètres de densité, de teneur en eau et le compactage, car on peut y visualiser le déplacement du point de l'optimum ; optimum signifiant la condition idéale pour un compactage optimal.

2.6.2 Actions à long terme

-Action pouzzolanique : phénomène de cimentation (cristallisation de la fraction argileuse)

-Action de syntaxie (pralinage des grains) : augmentation de la résistance des grains par obturation des pores.[21]

3 Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage

Afès et Didier (1999), Bulletin CRR, Cité par AZZOUZ (2006), ont montré que le traitement à la chaux réduit la valeur maximale de la masse volumique sèche et augmente la valeur de la teneur en eau optimale et implique un aplatissement des courbes Proctor du sol. La Fig.2. 6 représente l'argile traitée à 1, 2, 3 % de chaux et compactée à l'énergie Proctor normal. La courbe Proctor obtenue s'aplatit au fur et mesure que le pourcentage de chaux augmente. Ils ont vérifié que le traitement à la chaux conduit à une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale. [22]

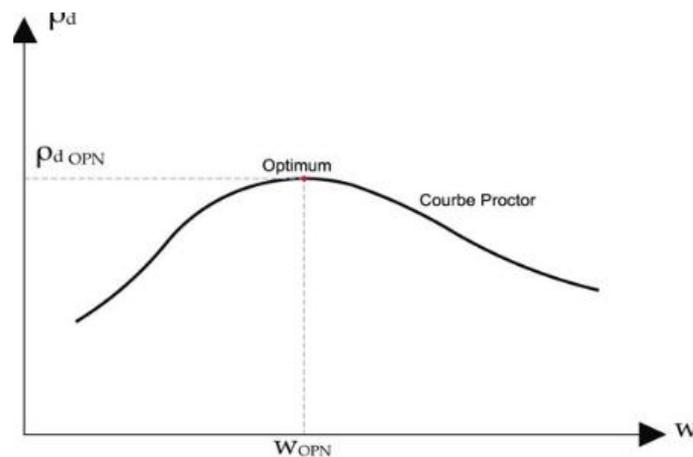


Figure 2.6. Influence de la chaux sur les caractéristiques de compactage.

4 Avantages de la technique

Le traitement des sols en place à la chaux est une technique qui offre trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux.

4.1 Avantages Techniques :

Le traitement des sols en place à la chaux permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, durable et stable, présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. En outre, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure. Cette technique assure un bon comportement par temps chaud sans déformation, ni orniérage et un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à la rigidité du matériau et à l'effet de dalle induit.

Enfin, le traitement des sols en place est une technique possédant une facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation.

4.2 Avantages Economiques :

Le traitement des sols en place à la chaux est une technique de traitement à froid, donc utilisant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport. L'absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier. Enfin, le traitement des sols en place est une technique très économique, notamment du fait de la durée plus courte des travaux par rapport à une solution avec décaissement.

4.3 Avantages Ecologiques et Environnementaux :

Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'utilisateur et aux riverains et une réduction de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier. La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue à préserver l'environnement. [23]

5 Méthode d'utilisation de la chaux dans le traitement du sol

5.1 Malaxage sur place :

Les étapes de traitement peuvent se présenter dans un ordre différent suivant qu'il s'agit de traiter le sol en place, ou que l'on prévoit des mouvements de terre avant ou après le traitement. On distingue les étapes principales suivantes :

5.1.1 Préparation du sol à traiter :

Cette opération, visant à faciliter le malaxage ultérieur, consiste : soit d'éliminer de gros éléments susceptibles d'entraver le malaxage, soit de permettre la modification de l'état hydrique du sol par aération ou humidification.

L'exécution de cette opération, qui n'est pas toujours nécessaire, s'effectue à l'aide d'un ripper, d'une herse ou d'une charrue.

5.1.2 Epannage :

La technique de l'épannage "au sac" sur des plateformes préalablement quadrillées peut être envisagée pour des chantiers de surface très limitée (< 250 m²) ou de géométrie complexe. Dans les autres cas, la répartition de la chaux est réalisée à l'aide d'un épandeur à dosage pondéral, équipé en général d'un dispositif asservi à la vitesse du véhicule. L'épannage de chaux doit être réalisé avec un maximum de précision et de régularité. La chaux est chargée pneumatiquement dans l'épandeur, soit directement à partir de la citerne de transport, soit via des silos-tampons installés sur chantier.



Figure 2.7. Epannage du la chaux.

5.1.3 Malaxage :

Cette opération a pour but de faire foisonner le sol, et d'y incorporer la chaux de façon homogène. En fonction de la nature du sol, de la taille et du type de chantier, il est exécuté à l'aide de pulvimixers, de roto bêches, de charrues à disques ou à socs. Pour les chantiers de faible importance, du matériel de type agricole peut être utilisé. Sur sites sensibles au niveau des poussières, il est recommandé d'utiliser des malaxeurs.



Figure 2.8. Malaxage de la chaux sur chantier.

5.1.4 Réglage :

Le réglage définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écêtage des bosses. Il se fait le plus souvent à la niveleuse. Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués.

L'épaisseur à raboter doit être prise en compte au stade du traitement, en prévoyant une surépaisseur suffisante du matériau traité (environ 3 cm).

5.1.5 Compactage :

Il doit être réalisé immédiatement après le réglage final et, dans tous les cas, avant expiration du "délai de maniabilité" du mélange sol chaux, pour apporter le complément de l'énergie exigée pour obtenir la qualité de compactage recherchée suivant la couche considérée.



Figure 2.9. Compactage.

5.1.6 Protection de surface:

Cette protection superficielle (en général, un enduit gravillonné à l'émulsion de bitume) est destinée à imperméabiliser et à protéger la couche traitée des intempéries, de l'évaporation de l'eau et du trafic. Elle doit être réalisée dans les plus brefs délais après la fin du compactage final. [24].



Figure 2.10. Protection de surface.

6. Conclusion

Les travaux de construction des remblais et des couches de formes représentent une part importante du coût global de réalisation des projets routiers. Cette importance justifie une recherche d'optimisation globale, visant à minimiser les coûts. On a donc intérêt à privilégier les performances des remblais et de la couche de forme des structures routières, en sol argileux ou limoneux, par la technique de traitement des sols en rajoutant différents matériaux.

Les caractéristiques médiocres d'un sol ont un impact majeur sur les ouvrages de génie civil et leurs duré de vie. Ces sols peuvent être améliorés avec des additives chimiques.

On peut ajouter ces additifs aux divers types de sols pour améliorer les caractéristiques géotechniques.

L'efficacité de ces additifs dépend de la nature du sol traité et la quantité d'additif ajoutée.

Ce chapitre de l'étude bibliographique présente l'état d'avancement de la recherche

Dans le domaine de la stabilisation des sols. L'utilisation du ciment dans la stabilisation de la terre en général est un domaine assez connu grâce aux importants travaux de laboratoire et réalisations sur le terrain.

Ces travaux ont permis de connaître les mécanismes de réactions entre la terre et ces liants, leurs effets sur les propriétés de la terre. D'après ces études, il a été défini que la chaux convient plus à une terre avec un taux d'argile non négligeable et le ciment est plutôt meilleur avec une terre sableuse.

CHAPITRE 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

Chapitre 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

1 Introduction

Quelque soient les objectifs recherchés dans une étude géotechnique, il est de règle d'effectuer initialement l'identification de sols concernés.

Cette procédure permet d'orienter les analyses géotechniques ultérieures et surtout d'effectuer une classification des matériaux rencontrés. Les paramètres nécessaires pour cette classification sont aussi bien de natures physico-chimiques et mécaniques.

Ce chapitre est un ensemble des essais géotechniques au laboratoire pour l'identification de sol étudié.

2 Prélèvement des échantillons

Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 6.50 à 7.00m les prélèvements d'échantillons effectués par le sondage. Après l'extraction, le sol a été placé dans des caisses contenant des carottiers de sondage et transporté au laboratoire pour préparation et exécution des essais géotechniques d'identification et de caractérisation. Sa classification a été déterminée suivant les normes.

3 Etude de sol

Il est indispensable avant tout démarrage de travaux d'avoir une idée des caractéristiques du sol pour collecter les informations nécessaires qui va aider l'ingénieur géotechnicien dans :

- Sélectionne le type de sol (argile, limons, sable...).
- Détermination des problèmes possible (tassement, gonflement...) et établir des solutions.

L'étude géotechnique des sols basés sur deux types d'essais :

- Essais in situ.
- Essais au laboratoire.

Dans cette étude les essais réalisés au laboratoire est :

4 Essais d'identification du sol

Permet de classer le sol et de calculer le divers paramètre donc il faut le reconnaître en prélevant des échantillons représentatifs.

Chapitre 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

L'étude préalable de ces échantillons en laboratoire portera sur l'état et les caractéristiques des sols :

- Teneur en eau naturelle.
- Granulométrie.
- Indice de plasticité (limites d'Atterberg).
- Compactage (Proctor normal).
- Compressibilité par paliers à l'œdomètre.
- Cisaillement rectiligne

➤ Sols

Le sol utilisé dans cette étude a été obtenu à partir d'un site (projet de station de relevage des eaux usées) situé au gisement du terrain EL TARF. (Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 6.50 à 7.00m. Après l'extraction, le sol a été placé dans des caisses contenant des carottiers de sondage et transporté au laboratoire « Laboratoire national de l'habitat et de la construction * LNHC* » pour préparation et exécution, des essais géotechniques d'identification et de caractérisation. Au laboratoire, nous avons procédé au séchage, concassage et broyage des échantillons des sols prélevés.



Figure3.1. Sols argileux.

Chapitre 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

Tableau3.1. Caractéristiques géotechniques du sol.

Caractéristiques de base	
Couleur	Gris
Profondeur	6.50-7.00m
Teneur en eau naturelle (%)	25.41%
Teneur en eau saturation W_s %	28.99%
Elément passant au tamis 80 μ m (%)	97%
Limite de liquidité (%)	66.37%
Limite de plasticité (%)	34.10%
Indice de plasticité (%)	32.27%
Teneur en eau optimal (%)	15.77%
Densité sèche maximale (t/m ³)	1.52 t/m ³
Densité humide (t/m ³)	1.87t/m ³
Degré de saturation S_r (%)	80.76%

4.1 La Teneur En Eau Selon La Norme (NF P 94 050) :

Détermination la teneur en eau pondérale des matériaux – méthode par étuvage.

Objectif :

Consiste à calculer le rapport du poids d'eau que le sol contient au poids de ses éléments secs, après dessiccation à l'étuve à 105° C (50°C dans le cas des sols contenant des éléments organique).

Appareillage :

- Une tare.
- Etuve (50° C, 105°C).
- Balance.



Figure3.2. Détermination la Teneur en Eau.

Mode Opérateur :

L'échantillon de matériau humide est pesé puis placé dans l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (correspondant alors à la masse du matériau sec).

Chapitre 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

Les formules pour la teneur en eau La teneur en eau pondérale par la formule :

$$W(\%) = \frac{\text{poids de l'eau}}{\text{poids du sol sec}} * 100 = \frac{p_{H+tare} - p_{S+tare}}{p_{S+tare} - p_{tare}} * 100$$

$$\text{Poids de l'eau} = p_{H+tare} - p_{S+tare}$$

$$\text{Poids du sol sec} = p_{S+tare} - p_{tare}$$

$$P_{\text{paraffine}} = p_{\text{humide+paraffine}} - p_{\text{humide}}$$

$$\text{Volume brut} = p_{\text{humide+paraffine}} - p_{\text{matériau dans l'eau}}$$

$$\text{Volume de la paraffine} = \frac{p_{\text{paraffine}}}{\text{densité de la paraffine}} = \frac{p_{\text{paraffine}}}{0.88}$$

$$\text{Volume net} = (\text{volume brut}) - (\text{volume paraffine})$$

$$\text{Densité humide } \gamma_h = \frac{\text{poids humide}}{\text{volume net}} \text{ (t/m}^3\text{)}$$

$$\text{Densité sèche} : \frac{\gamma_h}{w+100} * 100 \text{ (t/m}^3\text{)}$$

$$\text{Teneur en eau de saturation} : W_s = \left(\frac{1}{\gamma_{d \text{ moyen}}} - \frac{1}{\gamma_s} \right) * 100 \text{ avec } \gamma_s \approx 2.7 \text{ t/m}^3$$

$$d'où W_s = \left(\frac{1}{\gamma_{d \text{ moyen}}} - 0.37 \right) * 100. [25]$$

Sols :

Le sol utilisé dans cette étude a été obtenu à partir d'un site (projet de Station relevage des eaux usées) situé au gisement du terrien ELTARF (Figure 2.2). Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 6.50 à 7.00m. Après l'extraction, le sol a été placé dans boîtes comme carottiers par la sonde et transporté au laboratoire « Laboratoire national de l'habitat et de la construction * LNHC* » pour préparation et exécution, des essais géotechniques d'identification et de caractérisation. Au laboratoire, nous avons procédé au séchage, concassage et broyage des échantillons des sols prélevés.

4.2 Granulométrie :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution relative des diamètres des grains dans un sol. **L'analyse granulométrique des échantillons testés selon la norme NF P 94-057/1992.**

Objet de l'essai :

Etablir la répartition pondérale des éléments granulaire d'un matériau.

Domaine d'application :

Fraction d'un matériau comprise entre 80 µm et

Chapitre 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

50mm Pour les éléments inférieure 80 μ m on se reportera à la norme **NF P94-**

057 (méthode par sédimentation) éléments supérieur à 50mm le GTR préconise une estimation visuelle.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à séparer par brassage sous l'eau, les grains agglomérés puis une fois séchée, à classer au moyen d'une série de tamis et à peser le refus cumulé sur chaque tamis, la masse cumulé.

Appareillage spécial pour l'analyse granulométrique :

- balance.
- tamis.
- vibreux de tamis.

Préparation du sol :

- placé l'échantillon dans l'étuve à 105°C jusqu'à W=0.
- pesée la quantité de sol nécessaire pour l'essai ($G=3D_{max}$).
- Imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant au moins **24H**, une masse de matériau.

Mode opératoire :

- Tamiser par voie humide au tamis de 80 μ m.
- Laisser reposer le mélange passant à 80 μ m jusqu'à obtenir l'eau claire.
- Eliminer l'eau par siphonage et placer à l'étuve pour l'essai de sédimentométrie.
- Finalement placé l'échantillon dans l'étuve à 105°C jusqu'à W=0.
- Pour le refus à 80 μ m.

On sort le matériau que l'on verse sur les tamis disposés comme dans l'appareillage et on secoue à la main ou au vibreur de tamis, il y aura un passage selon le diamètre des tamis. On enlève chaque tamis et on pèse le refus, au fur et à mesure en faisant un cumul sur le tamis suivant :



Figure 3.3. Ensemble des tamis.

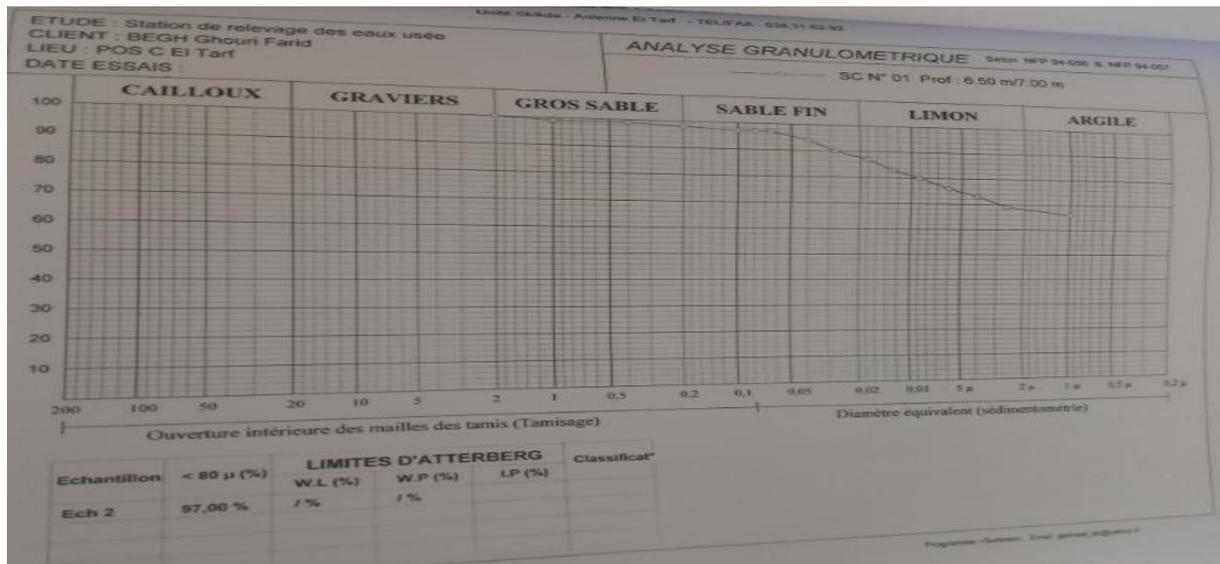


Figure 3.4 .Analyse granulométrique.

D'après la granulométrie, les éléments à 80 μm dès ce mémoire pour voir leurs influences sur les sols argileux.[3]

4.3 Limite d'Atterberg selon la norme NF p 94-051 :

Objectif :

Identifie et caractérise l'argile site du sol.

Domaine d'application :

Cet essai s'applique généralement sur les sols composant un pourcentage des fines (80 μm) supérieur à 35%.

Basé sur la détermination des deux limites d'Atterberg (**Limite de Liquidité à la coupelle** et **Limite de Plasticité au rouleau**) s'applique aux sols dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille

400μm.

Définition : Pour les besoins du présent essai, les définitions suivantes s'appliquent :

Limite d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) :

Teneur en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol.

Limite de liquidité WL :

Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.

Limite de plasticité WP :

Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.

Indice de plasticité IP :

Chapitre 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

Différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

$$IP = Wl - Wp$$

L'indice de consistance :

$Ic = (wl - wnat) / (wl - wp)$. Il permet de caractériser la consistance d'un sol :

- **Ic** inférieur à une valeur de l'ordre de 0,7 : sols peu consistants avec lesquels on risque d'avoir des problèmes de traficabilité.
- **Ic** supérieur à une valeur de l'ordre de 1,3 : sols de consistance élevée avec lesquels on risque d'être confronté à des problèmes d'extraction.

Les teneurs en eau étant exprimées en pourcentage, l'indice de plasticité est un nombre sans dimension.

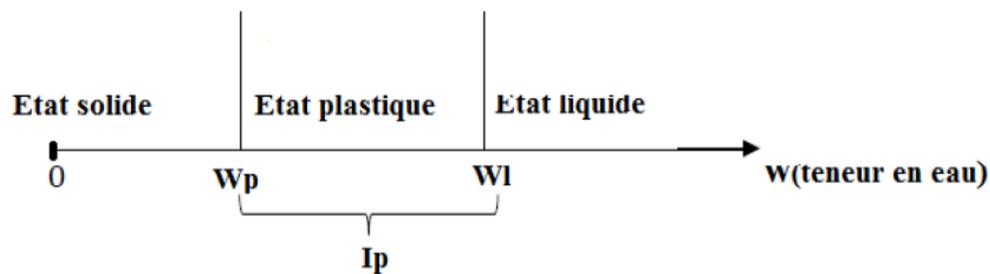


Figure 3.5. Définition des Limites d'Atterberg.

Principe de détermination des limites d'Atterberg :

L'essai s'effectue en deux phases :

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

Appareillage :

Le matériel nécessaire à préparation du sol est distingué du matériel utilisé pour la détermination des limites.

Matériel pour la préparation du sol :

Un récipient d'eau moins 2L, un bac et un tamis à la maille carrée de **400µm** d'ouverture.

Matériel pour la détermination la limite de liquidité :

Chapitre 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

Un appareil de Casa grande, une étuve de dessiccation à température réglable à **50° C**, une balance et des capsules ou boîtes de pétri, spatule, truelles.

Matériel pour la détermination la limite de plasticité :

- Une plaque lisse en marbre pour le malaxage et la confection des rouleaux de sol,
- spatules une balance,
- une étuve et une plaque de verre de **5 cm** de largeur et de **10.5 cm** de longueur portant une graduation tous les **1 cm** et une cale de **0.5 cm** ou tout autre dispositif permettant d'apprécier le diamètre des rouleaux de sol de **3 mm ± 0.5 mm**.



Figure 3.6. Boîte de Casa grande et la plaque de verre.

Préparation du sol :

- Imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant au moins **24H**, une masse de matériau.
- Tamiser par voie humide au tamis de **400 µm**.
- Recueillir l'eau de lavage et le tamisât dans un bac.
- Siphonner le mélange sol-eau après une décantation au moins **12 Heures**.
- Evaporer l'eau excédentaire à une température ne dépassant pas **50°C**.
- Homogénéiser par malaxage à la truelle du mortier.

Mode Opérateur

Détermination de la Limite de Liquidité à la coupelle :

- Contrôler si le fonctionnement de l'appareil est bien.
- Malaxer la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.
- Mettre dans une coupelle propre et sèche, une masse du sol malaxé avec l'eau.
- Partager la pâte en deux au moyen de l'outil à rainurer.
- Fixer délicatement sur le support métallique de l'appareil de **CASAGRANDE**.
- Actionner la came de façon à soumettre la coupelle à une série de choc à la cadence de **2 coups/s**.

Chapitre 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

- Noter le nombre **N** des chocs nécessaires pour que les lèvres des rainures rejoignent sur une longueur d'environ **1cm**.
- Prélever environ de 5g de pate de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermée afin d'en déterminer la teneur en eau. On note poids total humide.
- Placer le prélèvement dans une capsule de masse connue et pesé immédiatement avant d'être introduit dans l'étuve pour dessiccations. On note poids total sec.
- Effectuer au moins 4 fois la même opération complète sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente à chaque fois. On note teneur en eau.



Figure3.7. Détermination la Limite de Liquidité.

Détermination de la Limite de Plasticité au rouleau :

- Former une boulette à partir de la pâte préparée.
- Rouler la boulette sur une plaque lisse à la main ou éventuellement à l'aide d'une plaquette, de façon à obtenir un rouleau qui aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne un diamètre de **3 mm** et une longueur d'environ **10 cm** et ne doit être creux.
- La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint **3 mm ± 0.5 mm**.
- Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau réintégré à la boulette et reformer à nouveau.
- Prélever, une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau, et placer la dans une capsule de masse connue, la peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau.
- Effectuer un deuxième essai sur une nouvelle boulette.[1]



Figure 3.8. Détermination la Limite de Plasticité.

Tableau 3.2. Classification des sols en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité.

Limite de liquidité Wl(%)	Classification
0-20	Non gonflons
20-35	Gonflement faible
35-50	Gonflement moyen
50-70	Gonflement élevé
70-90	Gonflement très élevé
>90	Gonflement critique

Ip(%)	Classification
0-5	Non plastique (ferme)
5-15	Peu plastique
15-40	Plastique
IP>40	très plastique

Les mesures des limites d'Atterberg conduisent aux valeurs portées sur
Le tableau 3.3 récapitulatif :

Tableau 3.3. Résultat de limite Atterberg (profondeur 6.50-7.00m).

	Essai 01	Essai 02	Essai 03	WL (%)	IP %
Nombre de coups	17	25	33	66.37	32.27
Teneur en eau %	67.37	66.27	65.45		

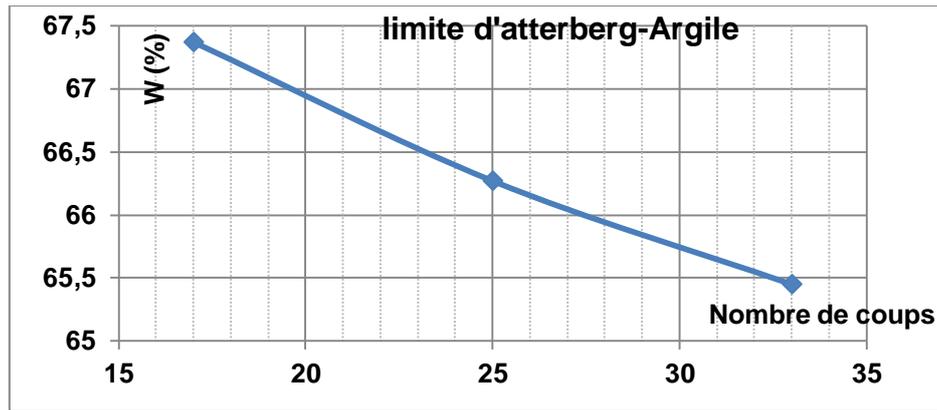


Figure 3.9. Graphiques regroupant les résultats des limites d'Atterberg.

4.4 Compactage :

Proctor normal-Proctor modifié

(NF94-093) :

Objectif de l'essai :

Le compactage de sol vise à améliorer les propriétés géotechniques des sols. Il est fonction de quatre principales variables :

- La masse volumique de sol sec.
- La teneur en eau.
- L'énergie de compactage.
- Le type de sol (étalement granulométrique, présence de minéraux argileux).

Le choix de l'intensité de compactage est fait en fonction de la surcharge que va subir l'ouvrage au cours de sa durée de vie :

Essai Proctor normal : Résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ou peu chargé.

Essai Proctor modifié : Forte résistance souhaitée, du type chaussée autoroutière

Tableau 3.4. Les différents types du moule Proctor.

type	Nb totale de coups	Hauteur de chute (cm)	Masse de la dame (kg)	Diamètre du module (cm)	Hauteur de module (cm)	Energie KN.m/m ³
normal	75	30.5	2.490	10.15	11.65	593
modifié	280	45.7	4.535	15.20	11.60	2700

Chapitre 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

Le principe de ces essais :

Consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneur en eau et à le compacter pour chacune teneur en eau. Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir d'essais dit essais Proctor normal ou Proctor modifié. Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée.

Matériel Nécessaire :

- Moule Proctor normal, Dame Proctor normal,
- Règle à araser,
- Disque d'espacement,
- Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau,
- Tamis 5 mm,
- Truelle,
- spatule,
- pinceau,
- Burette à huile,
- Eprouvette graduée 150 ml environ,
- Petits récipients (mesures des teneurs en eau),
- Balance portée 20 kg et Etuve 105°C.

Préparer le mélange du sol : Le matériau doit être mis dans l'étuve jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai. Une certaine quantité d'eau est malaxé avec le matériau ; on mélange doucement avec une pelle, après le mélange, le matériau est conservé dans une boîte ou un sac hermétique au moins de 24 heures pour être homogénéifié, le mélange du matériau constitue la phase la plus délicate de cet essai. **Solidariser le moule,**

l'embase et la rehausse :

Cette étape est principalement pour protéger qu'il n'y a pas de décalage entre le corps, l'embase et la rehausse du moule pendant le compactage.

Mode Opérateur :

Lubrifier la paroi du moule :

La paroi du moule doit être lubrifiée à huile, la pour que l'on puisse retirer l'échantillon compacté plus facilement.

Compactage :

Introduire alors la quantité de matériau pour que la première couche après compactage soit légèrement plus haute que le tiers de la hauteur du moule, compacter cette couche avec la dame Proctor normal en appliquant respectivement 25 coups par couche comme la fige (2.7). Répéter l'opération autant de fois pour la deuxième et la troisième couche.

Araser et retirer l'échantillon :

Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur de 1 ou 2 centimètres en pratique, cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant radicalement du centre vers la périphérie du moule, ensuite, on retire l'échantillon.

Peser :

On pèse immédiatement la masse de l'échantillon compacté, et on prend une quantité de l'échantillon qui a été arasée (au milieu) pour déterminer la teneur en eau de l'échantillon.[3]

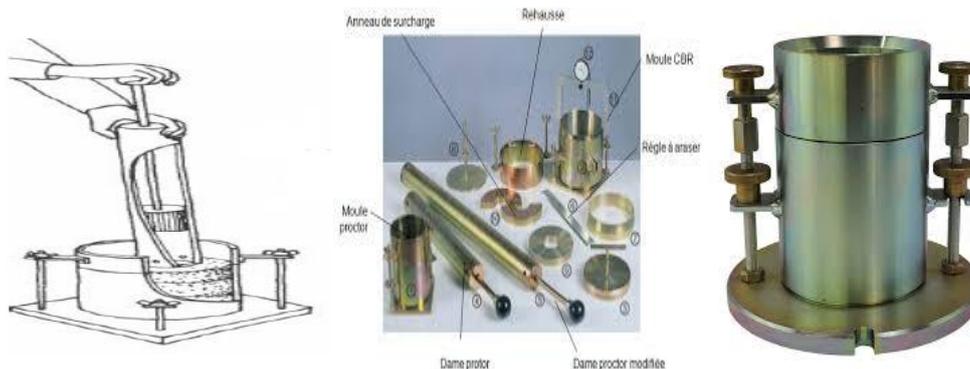


Figure 3.10. Proctor Normale.

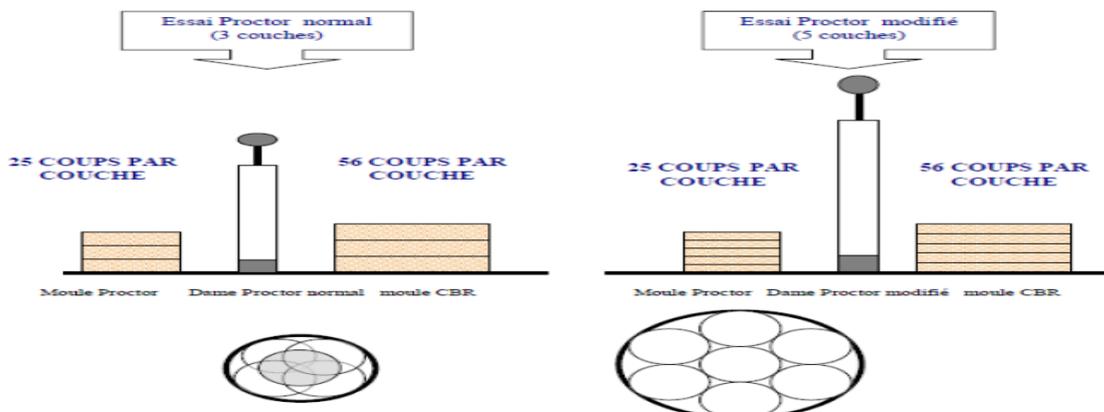


Figure 3.11. La Forme de Compactage.

Chapitre 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

Le résultat de l'essai Proctor sont reportés sur le tableau 2.5 suivant :

Tableau3.5. Résultats de l'essai Proctor.

Désignation des échantillons	Caractéristique de compactage	
	Teneur en eau optimale $\omega_{opt}(\%)$	Densité sèche maximal $\gamma_{dmax}(T/m^3)$
Etat naturelle (sol argileux)	15.77	1.69

4.5 Essai de compressibilité par paliers à l'œdomètre :

L'essai oedométrique, introduit au début du vingtième siècle dans la pratique de la mécanique des sols, est de loin l'essai le plus utilisé dans les études géotechniques de sols, vulnérables à une telle déformation, sous l'effet de plusieurs sollicitations ; c'est ainsi que cet essai permet de simuler le comportement mécanique d'un sol soumis à une augmentation de contraintes.

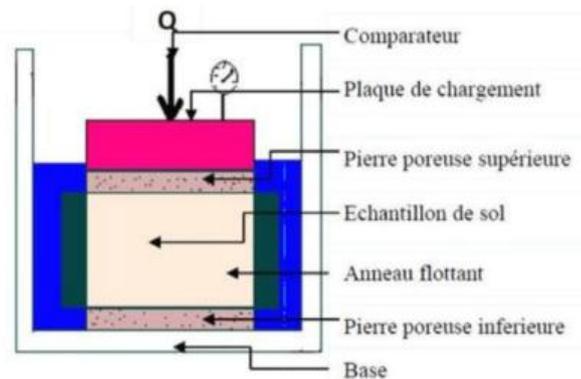


Figure3.12. Coupe schématisé de la cellule œdométrique (Arabet, 2010).

En laboratoire, l'essai œdométrique traduit les conditions de déformation des sols, on appliquant des charges sur un échantillon, à sa teneur en eau naturelle, découpé et introduit dans l'anneau de l'œdomètre. Les pressions de ces charges sont transmises par l'intermédiaire d'un piston, lié directement à l'échantillon. Les charges appliquées sont verticales (les déformations latérales étant empêchées), la cellule œdométrique, étant drainée du haut en bas et maintenue saturée pendant l'essai. Les charges sont effectués d'une manière progressive : on applique une charge, on mesure la déformation jusqu'à ce qu'elle se stabilise, puis on applique une charge plus forte et l'on recommence les observations, etc.



Figure 3.13. Comparateur de mesure(LNHC).

- a) Indique le nombre de tours effectués par l'aiguille, chaque tour d'aiguille exprime 1mm.
- b) Lecture de graduation 0.01mm : Coupe schématisé de la cellule oedométrique (Arabet, 2010). 32 L'œdomètre usage repose sur le mode de chargement par poids, cependant les autres systèmes de la mise en charges (pneumatiques et hydrauliques) ne sont pas réalisés dans ce mémoire.



Figure 3.14. Appareillage de l'essai de compressibilité par palier l'œdomètre.

Expression des résultats La courbe de compressibilité oedométrique est la courbe continue qui relie les points expérimentaux d'une mesure réalisée conventionnellement, représentés dans le diagramme $(e, \log \sigma)$ en échelle semi-logarithmique, e étant l'indice des vides de l'éprouvette à la fin du palier de chargement sous σ .

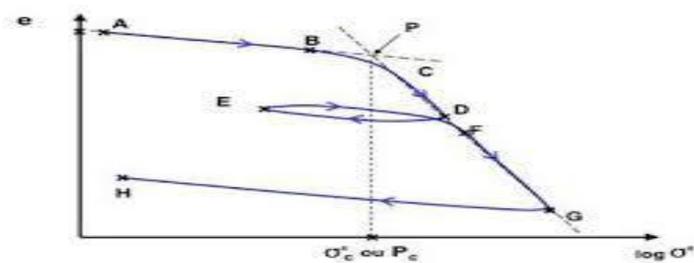


Figure 3.15. Courbe de compressibilité oedométrique.

Chapitre 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

Calcule d'indice de vide :

$$e = \frac{H - Sp - hp}{hp}$$

Avec :

- H : hauteur initial de l'échantillon pris conventionnellement égale à 2 cm ;
- Sp : Valeur de tassement, exprimé en (cm) ;
- Hp : Hauteur des pleins, exprimés en (cm).

$$h_p = \frac{M_s}{\rho_s \cdot S}$$

Avec :

- Ms : masse du sol sec, obtenu par étuvage en de l'éprouvette en fin de l'essai ;
- ρ_s : masse volumique des grains solides, prise conventionnellement égale à 2,7 g/cm³ ;
- S : section de l'éprouvette.

La courbe de compressibilité oedométrique, permet de déterminer quelques paramètres mécaniques du sol liés à la compressibilité ; indice de compression Cc et indice de gonflement Cg. Ces paramètres sont déterminés graphiquement sur la courbe de compressibilité.

Indice de compression Cc ; on appelle indice de compressibilité Cc la pente de partie CD de la courbe de compressibilité oedométrique, Il est sans dimension, soit :

$$Cc = \frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma')} \quad \Leftrightarrow \quad Cc = \frac{\Delta e}{\log \frac{\sigma'_f}{\sigma'_{ci}}}$$

Avec :

Δe : La variation de l'indice de vide

$\Delta(\log \sigma')$: La variation de la contrainte

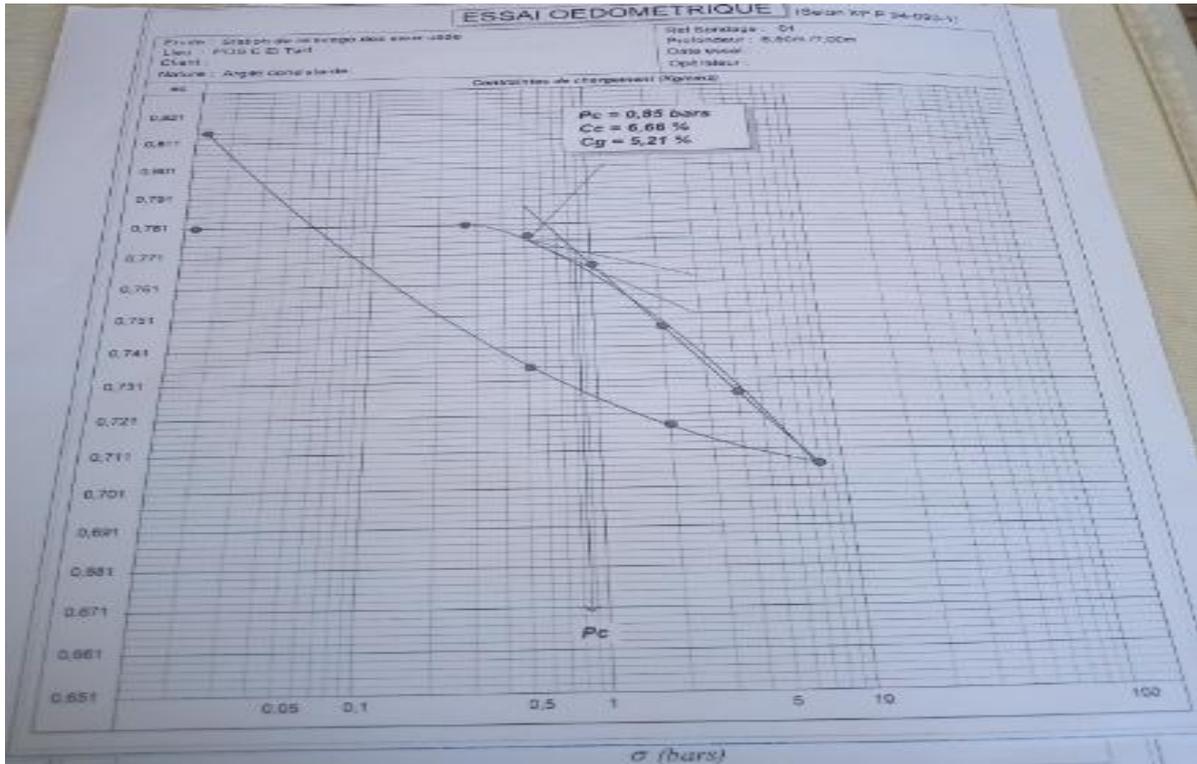


Figure 3.16. Graphe regroupant les courbes de compressibilité (l'œdomètre).

Tableau 3.6. Résultats des essais de compressibilité (l'œdomètre).

Paramètres oedométrique	valeurs
Pression de consolidation P_c	0.85 bars
Coefficient de compressibilité C_c	6.66%
Coefficient de gonflement C_g	5.21%

4.6 Essai de cisaillement rectiligne :

L'essai a pour objectif de mesurer au laboratoire des caractéristiques de rupture d'un échantillon de sol placé dans la boîte de cisaillement constituée de deux demi boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. L'essai consiste à :

- Consolider l'éprouvette de section (s) dans une première phase en appliquant sur la face supérieure un effort vertical constant maintenu pendant tout l'essai. La phase de consolidation permet de calculer la vitesse à laquelle doit être cisailé l'échantillon, celle-ci est achevée lorsque les lectures sur le comparateur exprimé en (mm) se stabilisent.
- Produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N) un cisaillement dans celle-ci selon le plan

Chapitre 3 : Caractérisation et classification du sol considéré

horizontal de glissement des deux demi-boîtes, l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif à vitesse constante.

-Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant. En fait, l'essai s'effectue sur trois éprouvettes contenant le même échantillon, préparées dans les mêmes conditions, cisillées ultérieurement à la même vitesse, mais soumises à des efforts verticaux différents depuis la phase de consolidation jusqu'à la fin de cisaillement.



Figure 3.17. Machine de cisaillement.

- Lecture de déplacement verticale.
- Lecture de la force cisailant.
- Expression des résultats.

La détermination des paramètres mécaniques des sols s'obtient en traçant les droites dite de Coulomb (courbes intrinsèques) dans un repère orthonormé qui présente, en abscisses les contraintes verticales (σ_i) et en ordonnées les contraintes de cisaillements maximales (τ_{\max}), sachant que : $\sigma = N/A$ et $\tau = T/A$

Avec : N : effort de compression normale (vertical)

T : effort horizontal de cisaillement

A : surface de l'échantillon

Les pentes de ces droites représentent les tangentes des angles de frottement internes ϕ d'une part, d'autre part, les cohésions C s'obtiennent par l'intersection de ces droites avec l'axe des ordonnées (**Figure. 3.19**). La courbe de résistance au cisaillement est ainsi décrite par deux paramètres ; l'angle de frottement ϕ et la cohésion C.

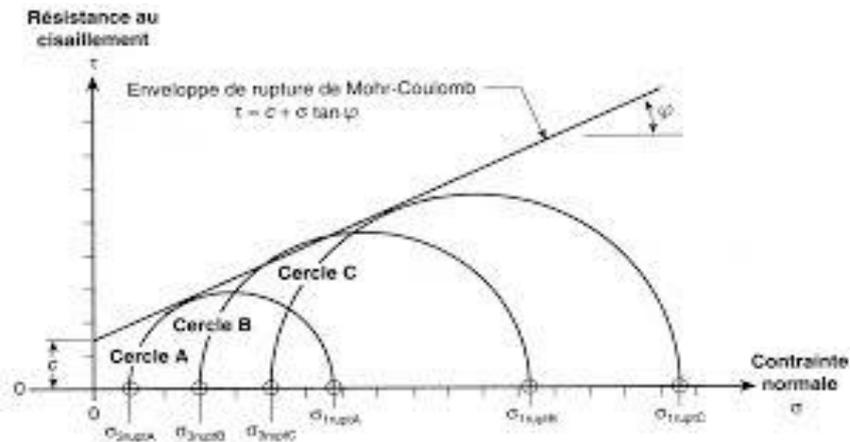


Figure 3.18. Droite Coulomb de l'essai de cisaillement rectiligne.

La figure 3.18 montre les résultats obtenus aux différents essais de cisaillement réalisés par l'auteur(...)[]. Ces résultats sont représentés sous forme de droites intrinsèques, à partir desquelles on détermine les propriétés de résistance au cisaillement (angle de frottement et la cohésion). Les résultats obtenus à partir de l'essai que nous avons réalisé à l'état naturel sont ainsi récapitulés dans le tableau (3.8).[7]

Tableau 3.7. Résultats de l'essai de cisaillement rectiligne.

Les échantillons		Contrainte normale σ (bars)	Contrainte de cisaillement τ (bars)
Échantillon naturelle (6.50-7.00m)	Éprouvette 1	0,5	0,56
	Éprouvette 2	1,0	0,73
	Éprouvette 3	1,5	0,80

Tableau 3.8. Résultats de l'essai de cisaillement.

Cohésion C (bars)	Angle de frottement ϕ (degrés)
0.45	13.52

4.6.1 La cohésion :

Elle exprime la résistance au cisaillement du sol sous contrainte normale indépendamment de la contrainte normale. Elle constitue la résistance propre de la structure due essentiellement à la liaison de type physico-chimique pouvant exister entre les grains et créées par la cimentation. La cohésion est nulle dans les sables étant donné qu'ils ne possèdent pas de telles liaisons. En revanche, cette dernière apparaît dans les sables humides ou légèrement cimentés en raison des

ménisques d'eau existant aux points de contact entre les grains créant ainsi une certaine adhérence entre ces derniers et qui disparaît dès que la teneur en eau du sable augmente [MAGNAN 1991]. La cohésion est relativement élevée pour les sols cohérents, surtout dans les sols fortement sur consolidés. Mais celle-ci disparaît dès que les liaisons sont cassées par le cisaillement, ce qui correspond approximativement au maximum de la courbe de rupture [LERAU, 2005]. [26]

4.6.2 L'angle de frottement :

L'angle de frottement représente la capacité de résistance au cisaillement d'un sol sous un effort normal. Il peut être en général mesuré sur des échantillons en laboratoire par des essais tels que l'essai de la boîte de casa grande (essai de cisaillement rectiligne) ou à l'appareil triaxial (essai de compression sur éprouvette cylindrique soumise à une pression de confinement donnée). Il est généralement défini par la lettre grec ϕ il est préférable d'utiliser, pour les calculs l'angle de frottement drainé qui est obtenu soit à partir des essais avec des vitesses de cisaillement lentes permettant ainsi la dissipation des pressions interstitielles au sein des échantillons. [27]

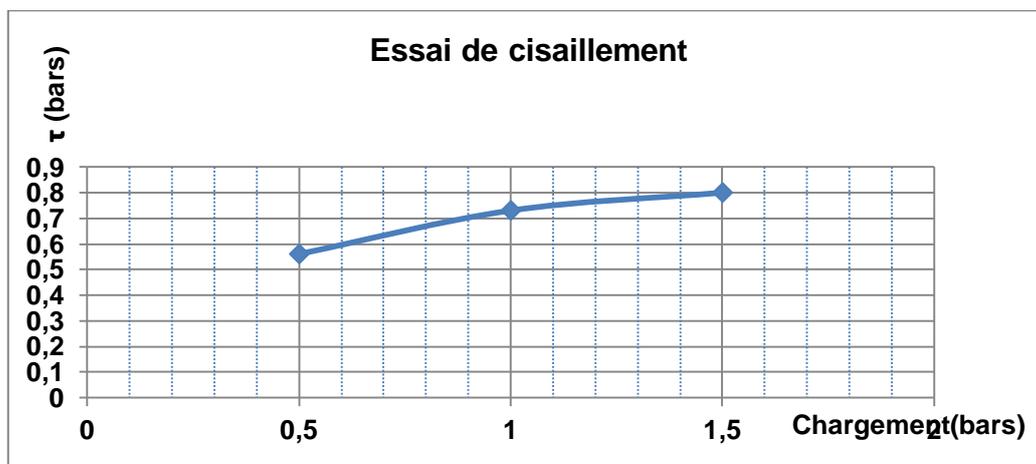


Figure 3.19. Graphique de l'essai de cisaillement.

5 Conclusion

Dans ce chapitre nous présentons les essais avec leurs objectifs ainsi que les conditions d'utilisation. La présentation de chaque essai, avec la norme régissant ce dernier se trouve également dans ce chapitre. Les résultats obtenus seront présentés d'une manière claire sous forme de courbes avec interprétation dans le prochain chapitre (chapitre 4).

CHAPITRE 4 :Présentation et interprétation des résultats

1 Introduction

Ce chapitre consiste à faire une étude expérimentale ; dans un premier temps on détermine l'état du sol considéré à l'aide des essais d'identification au laboratoire, tels que la granulométrie, les limites d'Atterberg, ainsi que les caractéristiques mécaniques du sol à l'état naturel par la méthode de compressibilité par palier à l'odomètre et l'essai de cisaillement rectiligne. Dans notre travail, on s'intéresse au sol du type argile limoneuse, qui est caractérisé par une forte teneur en eau, lui donnant une certaine friabilité, ce qui a été observé lors des essais au laboratoire. Pour l'amélioration des caractéristiques de ce sol, nous employons l'ajout de la chaux avec les pourcentages suivants : 2 %, 4 % et 6 %. Les essais réalisés dans ce travail sont : L'essai au cisaillement rectiligne à la boîte (CASAGRANDE), l'essai Proctor (compactage) et l'essai des limites d'Atterberg, ces essais seront présentés d'une manière détaillée dans ce qui suit.

2 Identification et classification du matériau considéré et du matériau de traitement

L'échantillon prélevé est un matériau argileux limoneux qui provient d'un site d'EL TARG. Ce matériau est une argile limoneuse peu sableuse, noirâtre, avec la présence d'eau.

Le sol utilisé dans cette étude a été obtenu à partir d'un site (projet de Station relevage des eaux usées) situé dans la ville d'ELTARG.

Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 6.50 à 7.00m. Après l'extraction, il a été placé dans des caisses (Figure 4.1) qui contiennent plusieurs carottiers (moules se forme de carottes) et transporté au laboratoire « Laboratoire national de l'habitat et de la construction * LNHC* » pour préparation et exécution, des essais géotechniques d'identification et de caractérisation. Au laboratoire, nous avons procédé au séchage, concassage et broyage des échantillons des sols prélevés. Les caractéristiques géotechniques obtenues sont présentées dans le tableau 4.1.



Figure 4.1. Sol argile.

Tableau 4.1. Caractéristiques géotechniques.

Caractéristiques de base	
Couleur	Gris
Profondeur	6.50-7.00m
Teneur en eau naturelle (%)	25.41%
Teneur en eau saturation $W_s\%$	28.99%
Élément passant au tamis 80 μ m (%)	97%
Limite de liquidité (%)	66.37%
Limite de plasticité (%)	34.10%
Indice de plasticité (%)	32.27%
Teneur en eau optimal (%)	15.77%
Densité sèche maximale (t/m ³)	1.52 t/m ³
Degré de saturation S_r (%)	80.76%
Teneur en eau optimale ω_{opt} (%)	15.77%
Cohésion C	0.48
Angle de frottement ϕ	12.89

2.1 Matériau utilisé pour le traitement (chaux)

Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire dans des fours droits ou rotatifs à une température variable de 900 à 1250°C. On distingue plusieurs natures de chaux, selon la composition chimique de la roche d'origine. Notamment la chaux vive et la chaux éteinte. Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. On extrait le calcaire dans des carrières et des mines à travers le

monde. Dans notre cas on utilise une chaux vive fabriquée par une société locale « BMSD-SARL » située dans la ville de Saïda (Sud-ouest du territoire national) (Figure 4.2). Les propriétés physiques et chimiques de cette chaux sont présentées dans le (tableau 4.2).

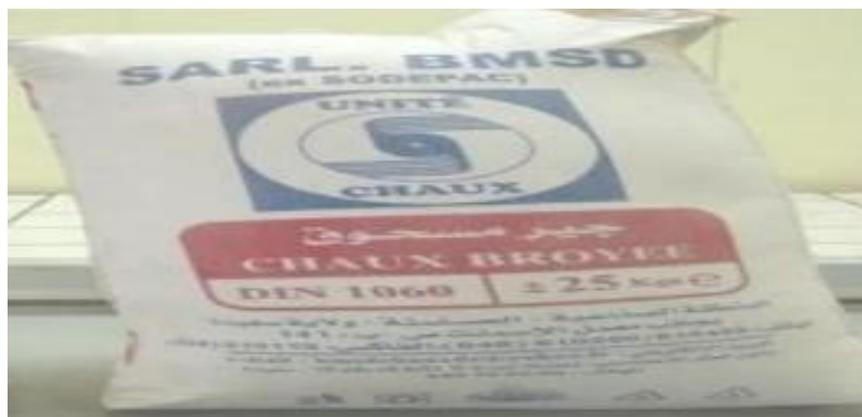


Figure 4.2. Chaux vive de Saïda.

Tableau 4.2. Les propriétés physiques et chimiques.

Nom chimique	Chaux (%)
Apparence physique	Poudre blanche sèche
CaO	> 83.3
MgO	< 0.5
Fe ₂ O ₃	< 2
Al ₂ O ₃	< 1.5
SiO ₂	< 2.5
SO ₃	< 0.5
Na ₂ O	0.4 - 0.5
CO ₂	< 5
CaCO ₃	< 10
Densité spécifique	2
Plus de 90 µm (%)	< 10
Plus de 630 µm (%)	0
Matériau insoluble (%)	< 1
Densité apparente (g/l)	600-900

2.2 Préparation du mélange

La méthode utilisée pour la préparation des mélanges (sol + chaux) nécessite un matériel de laboratoire approprié (Bacs, petites pelles, étuve, balance électrique, tamis...).

On prend à chaque fois une quantité de sol tamisé à différentes granulométries selon la spécificité de chaque essai puis on rajoute des quantités de la chaux, croissantes avec les pourcentages désignés (2%,4% et 6%).



Figure4.3. Méthode de mélange. (a) Sol étuvé et concassé, (b) Pesage de la quantité de chaux, (c) Versement de la chaux sur le sol, (d) Mixage du sol avec la chaux.

3. Essai mécanique au laboratoire

3.1 Essai Proctor normal

Afin de voir l'influence des différents pourcentages d'ajout sur les paramètres de compactage de l'argile traitée avec de la chaux, une série de 4 essais au compactage Proctor Normal a été effectuée au niveau du laboratoire national de l'habitat et de la construction *LNHC* wilaya d'El Tarf.



Figure 4.4. L'essai Proctor.

Les résultats de l'essai Proctor sont représentés dans le **tableau 4.3** (Influence du pourcentage de la chaux sur Proctor)

Les valeurs de la densité sèche en fonction de la teneur en eau sont représentées dans les figures suivantes :

Tableau 4.3. Influence du pourcentage de la chaux, essai Proctor.

Désignation des échantillons	Caractéristiques de compactage	
	Teneur en eau optimal $\omega_{opt}(\%)$	Poids volumique sec maximal $\gamma_{dmax}(T/m^3)$
Etat naturelle	15.77	1.69
Sol+2%chaux	16.03	1.61
Sol+4%chaux	16.54	1.60
Sol+6%chaux	16.55	1.56

Les valeurs de la densité sèche en fonction de la teneur en eau, ont été calculées en fonction de la densité humide et de la teneur en eau par la formule:

Les teneurs en eau optimales ainsi que les poids volumiques humides sont déterminés lors de l'étude expérimentale et calculés à l'aide des formules se trouvant dans le chapitre 3(section 4.1). Les courbes de l'essai Proctor (γ_{dmax} en fonction ω_{opt}) sont représentées dans les figures suivantes :

3.1.1 Influence du taux de la teneur en eau sur la densité sèche

Au laboratoire on cherche à trouver la teneur en eau optimale, cette teneur correspond à la densité sèche maximale, pour notre cas 3 pourcentages d'eau sont employés (14%, 16% et 18%) pour chaque échantillon, lors de l'essai Proctor. On constate que pour les 4 essais réalisés (0% chaux, 2%chaux, 4%chaux et 6%chaux), la valeur optimale de la teneur en eau est de 16% (Figure 4.5-4.8), cette correspond au poids de l'eau ajouté au mélange qui est de 320g.

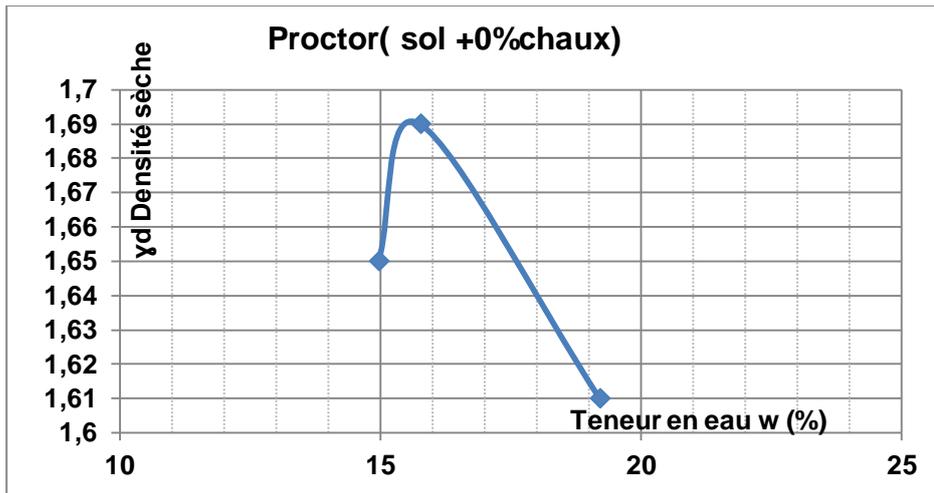


Figure 4.5. La courbe de compactage (Argile).

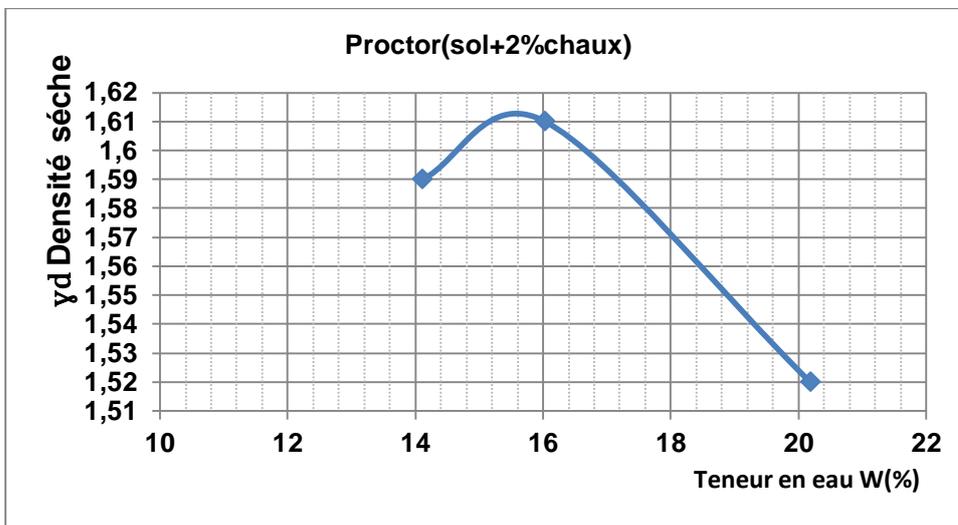


Figure 4.6. La courbe de compactage du mélange (Argile+2%chaux).

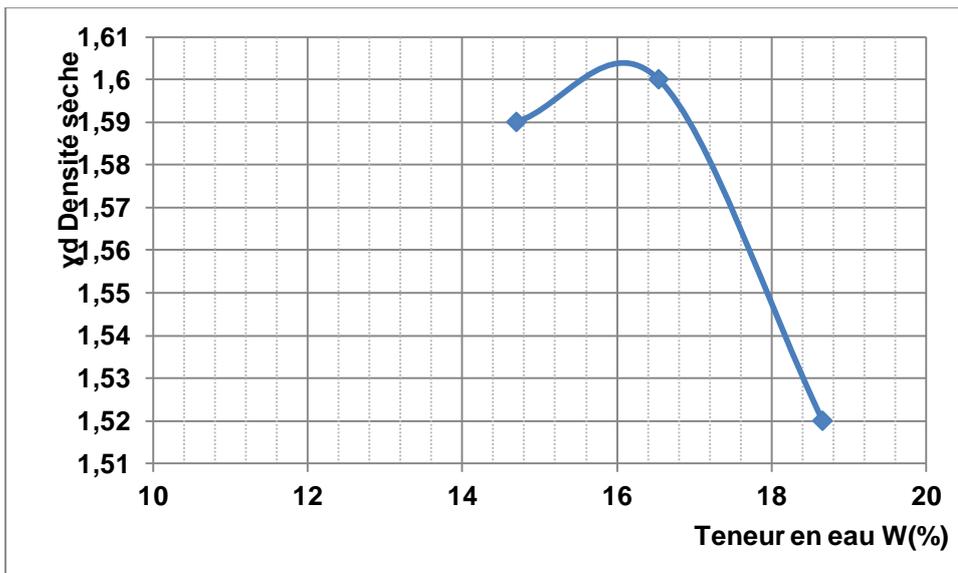


Figure 4.7. La courbe de compactage du mélange (Argile+4%chaux).

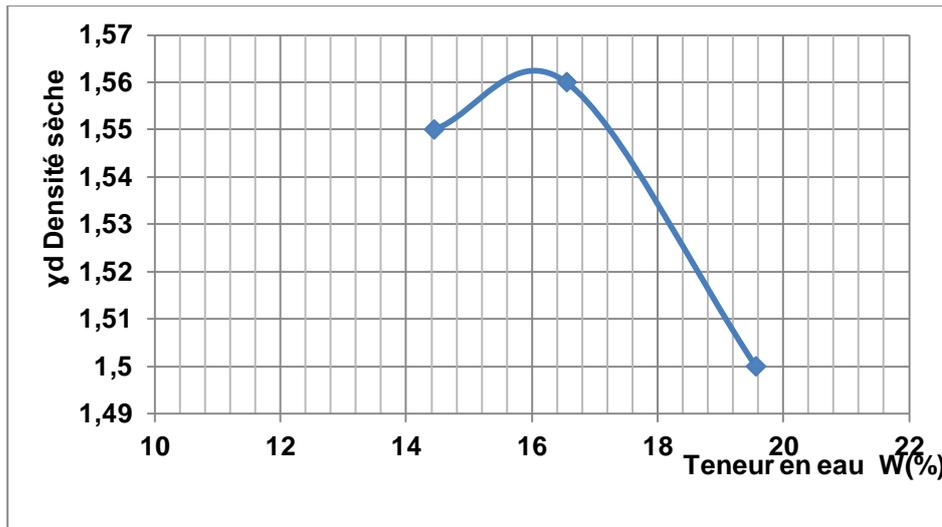


Figure 4.8. La courbe de compactage du mélange (Argile+6%chaux).

3.1.2 Influence du pourcentage de la chaux sur la teneur en eau et la densité sèche

Les graphes (Fig. 4.9 et Fig4.10) montrent l'évolution de la teneur en eau et de la densité sèche en fonction du pourcentage de chaux rajouté. A travers ces figures, nous constatons que les valeurs des teneurs en eau optimales augmentent et les densités sèches maximales diminuent avec l'augmentation du pourcentage de la chaux.

On remarque que la densité sèche optimale diminue et la teneur en eau optimale augmente graduellement en fonction de l'augmentation de la teneur en chaux. On peut dire que cette teneur en eau favorise la naissance de la porosité dans le sol, ce qui permet à la chaux de pénétrer dans l'argile en petites quantités améliorant ainsi, les caractéristiques du sol.

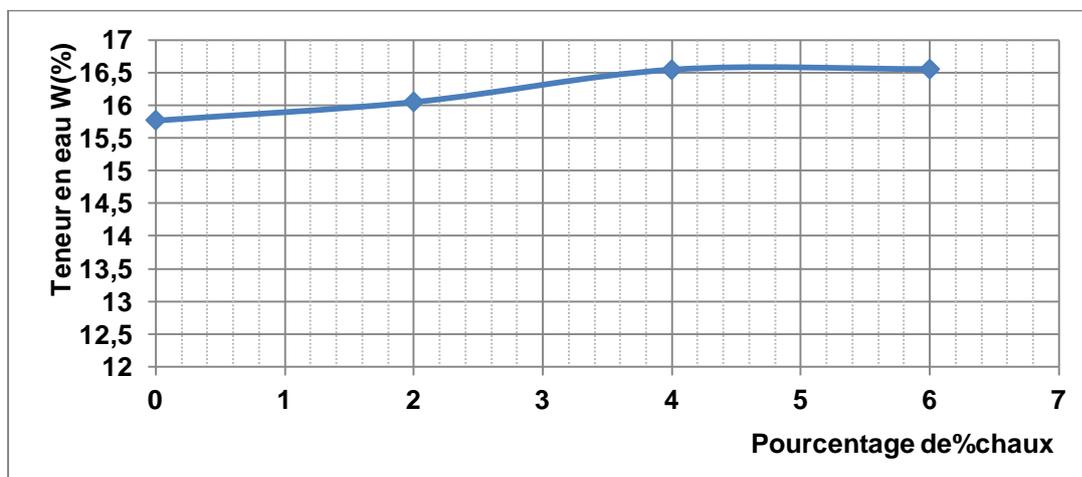


Figure 4.9. Influence du pourcentage de la chaux sur la teneur en eau optimale.

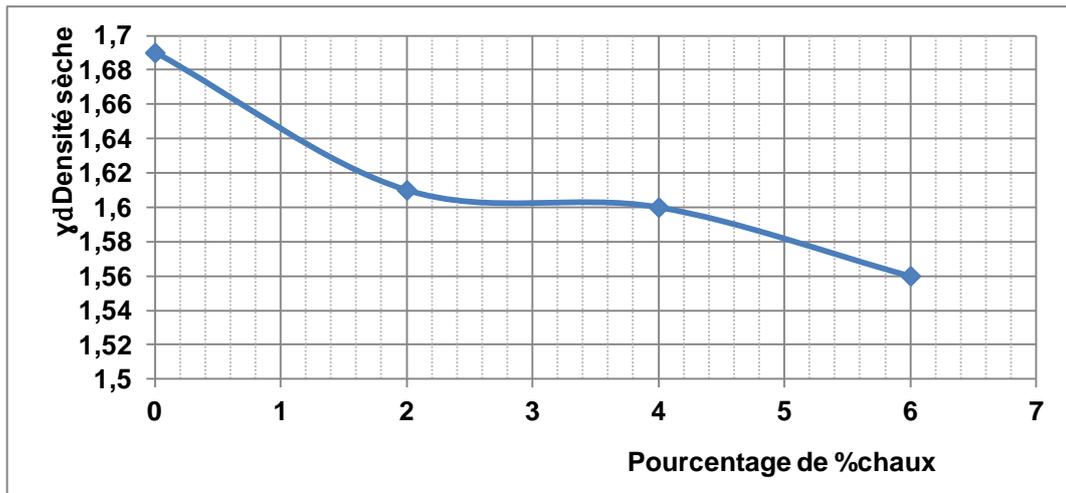


Figure 4.10. Influence du pourcentage de la chaux sur la densité sèche.

3.2 Essai de cisaillement

Afin d'étudier l'influence du traitement à la chaux sur les paramètres de résistance des sols reconstitués une campagne d'essais de cisaillement directe à la boîte de casa-grande a été conduite. Les échantillons de sol reconstitué traité à différents pourcentage de la chaux sont compactés à une teneur en eau optimal et masse volumique sèche maximale.



Figure 4.11. Essai de cisaillement

Les résultats sont représentés pour les pourcentages de la chaux (2%, 4%, 6% d'ajouts).

3.2.1 Résistance au cisaillement en fonction du taux de chaux

Tableau 4.4. Influence du pourcentage de la chaux sur le cisaillement.

Les échantillons		Contrainte normale σ (Kipa)	Contrainte de cisaillement τ (Kipa)
Etat naturelle (0 % de la chaux)	Éprouvette 1	0,5	0.49
	Éprouvette 2	1,0	0.69
	Éprouvette 3	1,5	0.81
2% de la chaux	Éprouvette 1	0,5	0.47
	Éprouvette 2	1,0	0.75
	Éprouvette 3	1,5	0.82
4% de la chaux	Éprouvette 1	0,5	0.64
	Éprouvette 2	1,0	0.95
	Éprouvette 3	1,5	1.21
6% de la chaux	Éprouvette 1	0,5	0.50
	Éprouvette 2	1,0	1.31
	Éprouvette 3	1,5	1.36

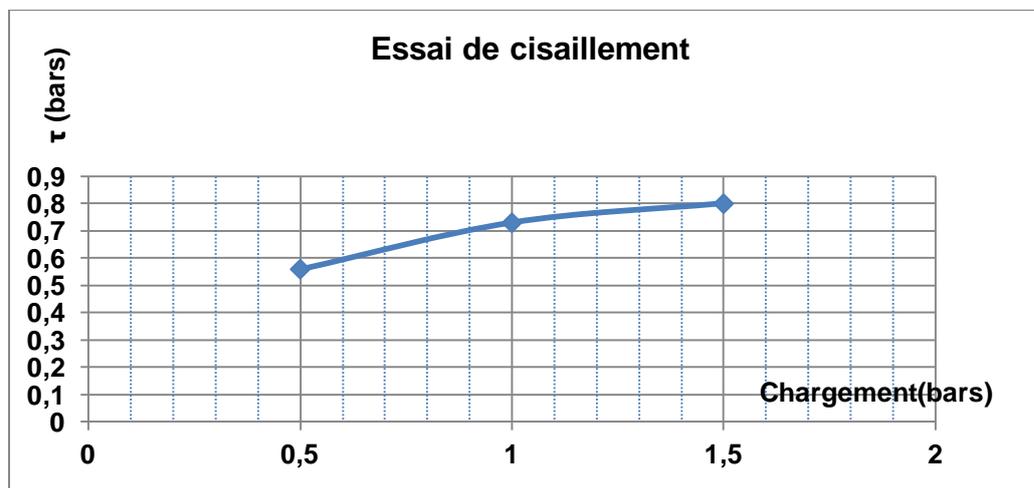


Figure 4.12. Graphique de l'essai de cisaillement.

La figure 4.12 montre que la courbe de cisaillement (0% de chaux) suit la loi de Coulomb défini dans le chapitre3. On note d'après cette courbe que l'augmentation du chargement entraine un accroissement de la contrainte de cisaillement.

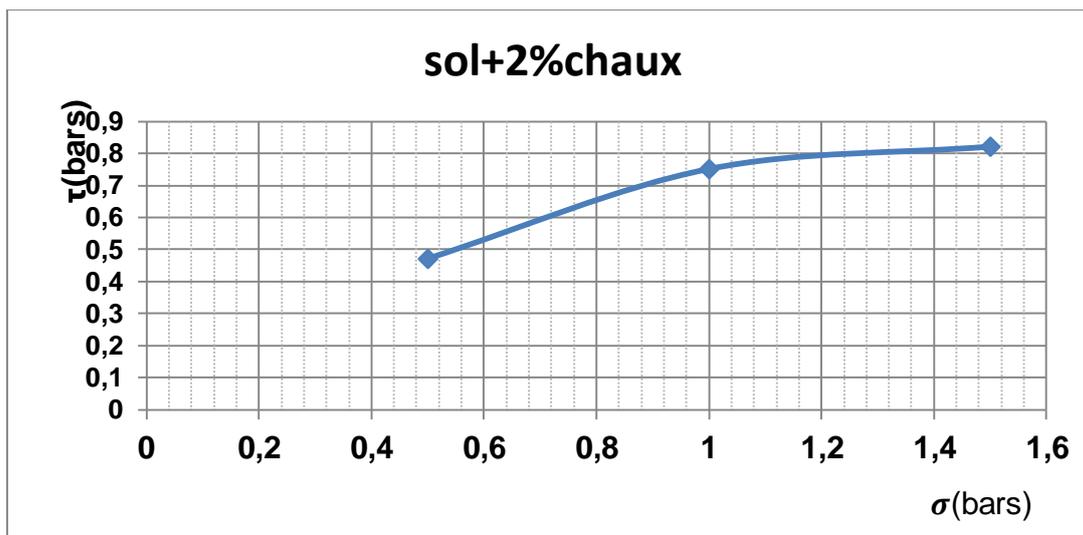


Figure 4.13. Graphique de l'essai de cisaillement (argile +2%chaux).

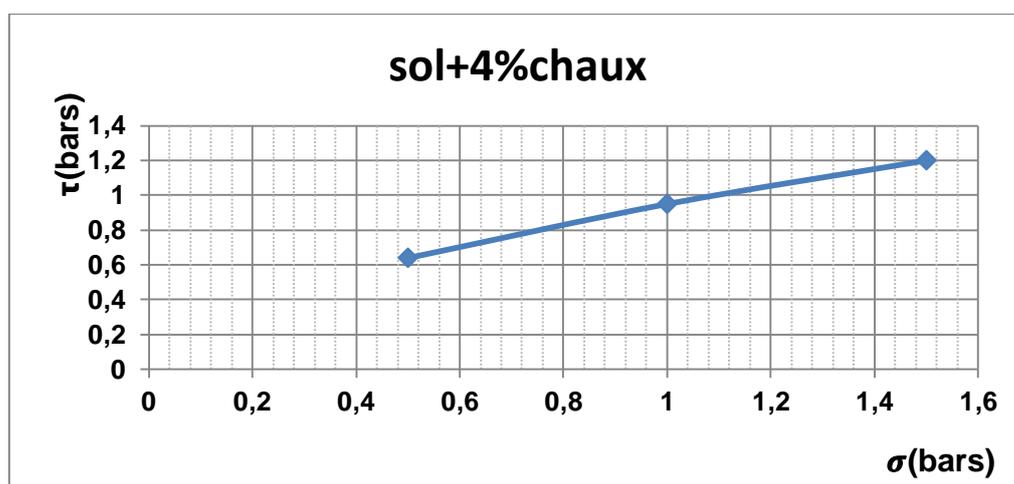


Figure 4.14. Graphique de l'essai de cisaillement (argile +4%chaux).

D'après les figures ci-dessus (fig. 4.13-fig4.15), on constate que l'addition de la chaux avec le sol en employant les taux 2%, 4%, provoque l'augmentation de la contrainte de cisaillement, on conclut donc qu'il y a amélioration de la résistance de cisaillement.

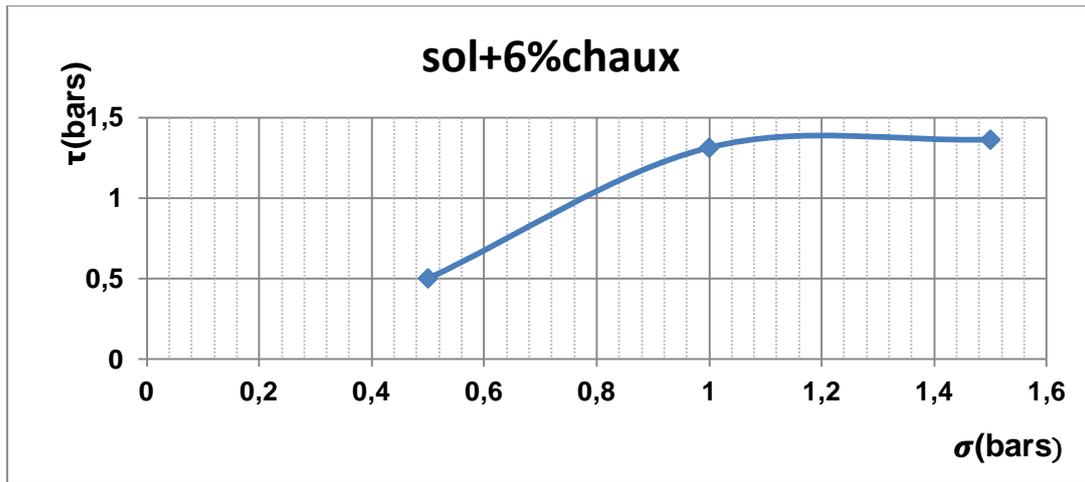


Figure 4.15. Graphique de l'essai de cisaillement (argile +4%chaux).

On remarque d'après la figure 4.15 que l'ajout de 6% de la chaux avec le sol n'a pas une grande influence sur la contrainte de cisaillement (courbe stationnaire pour l'ajout de 4 à 6%de chaux).

3.2.2 Influence du pourcentage de la chaux sur la cohésion et l'angle de frottement

Les résultats de l'essai de cisaillement montrent que la cohésion diminue et l'angle de frottement augmente au fur et à mesure de l'augmentation de l'ajout du matériau de traitement, ce qui permet le passage d'un état cohérent vers un état granulaire, et par la suite une augmentation de la résistance.

Tableau 4.5. Cohésion et angle de frottement en fonction du pourcentage de chaux.

Les échantillons	Cohésion C	Angle de frottement φ
Etat naturelle (6.50-7.00m)	0.45	13.52
2% de la chaux	0.39	24.93
4% de la chaux	0.35	30.19
6% de la chaux	0.14	38.94

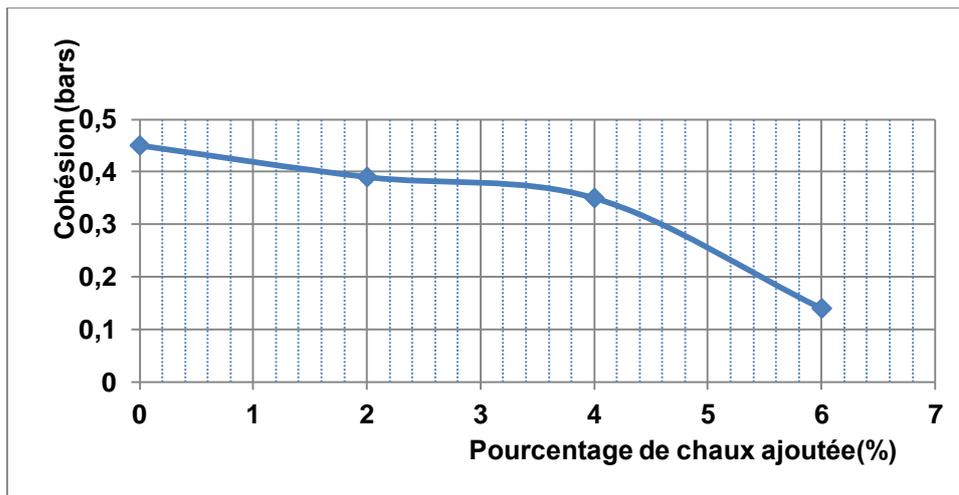


Figure 4.16. Variation de la cohésion en fonction du % de la chaux.

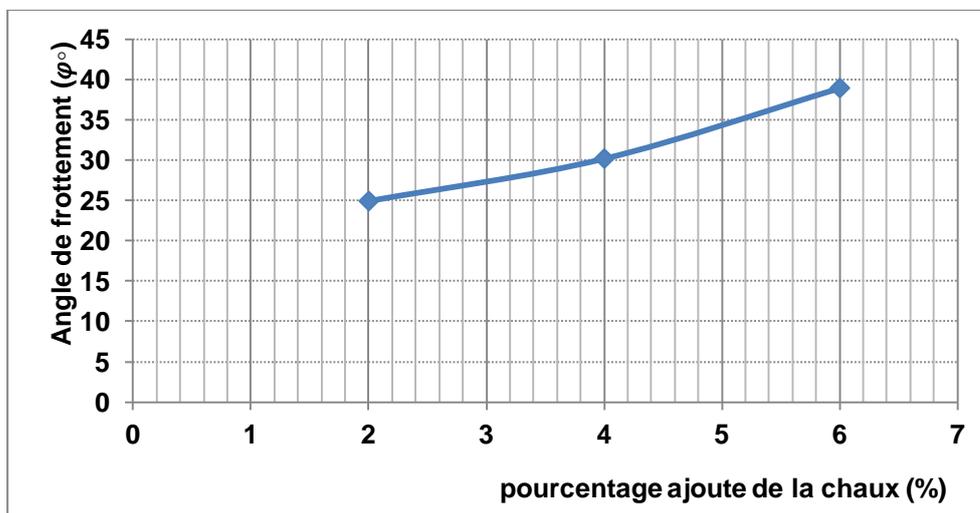


Figure 4.17. Variation d'angle de frottement en fonction du % de la chaux.

- Les courbes de cisaillement données par logiciel du laboratoire « LNHC » de Tarf :

• A l'état naturel (sol reconstitué)

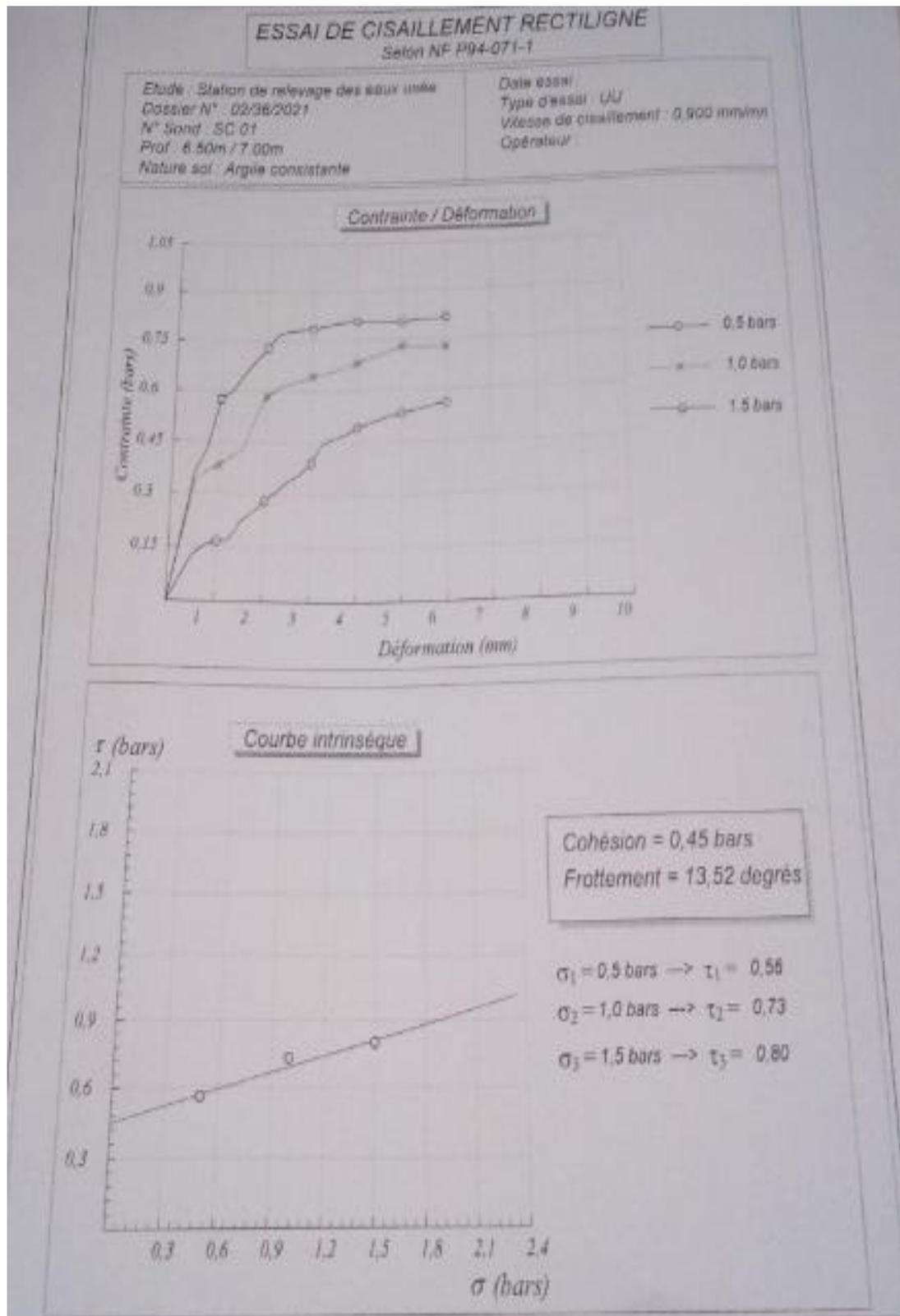


Figure 4.18. La courbe de cisaillement du mélange (Argile+0% de chaux).

- Sol argileux +2%chaux

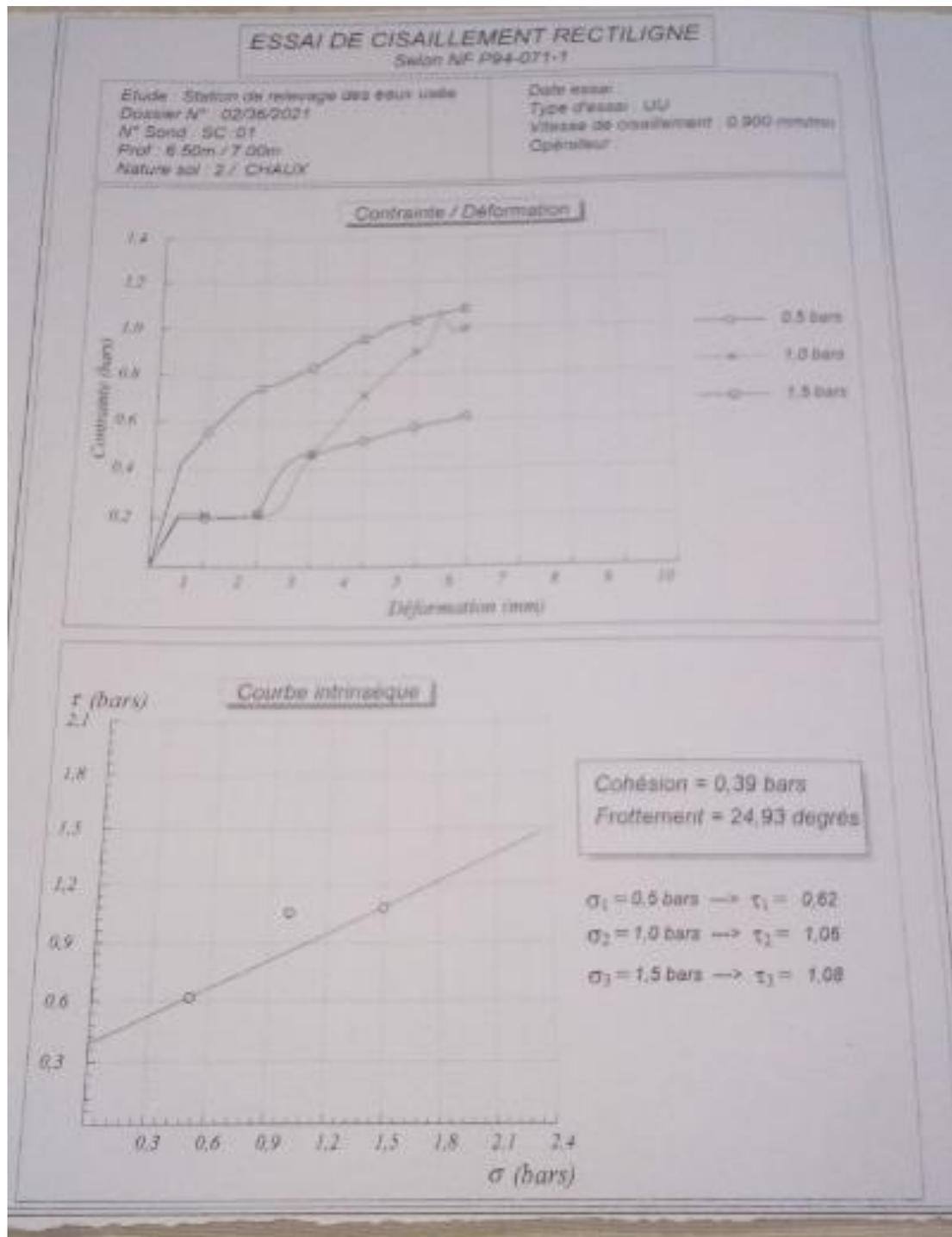


Figure 4.19. La courbe de cisaillement du mélange (Argile+2%de chaux).

- Sol argileux +4%chaux

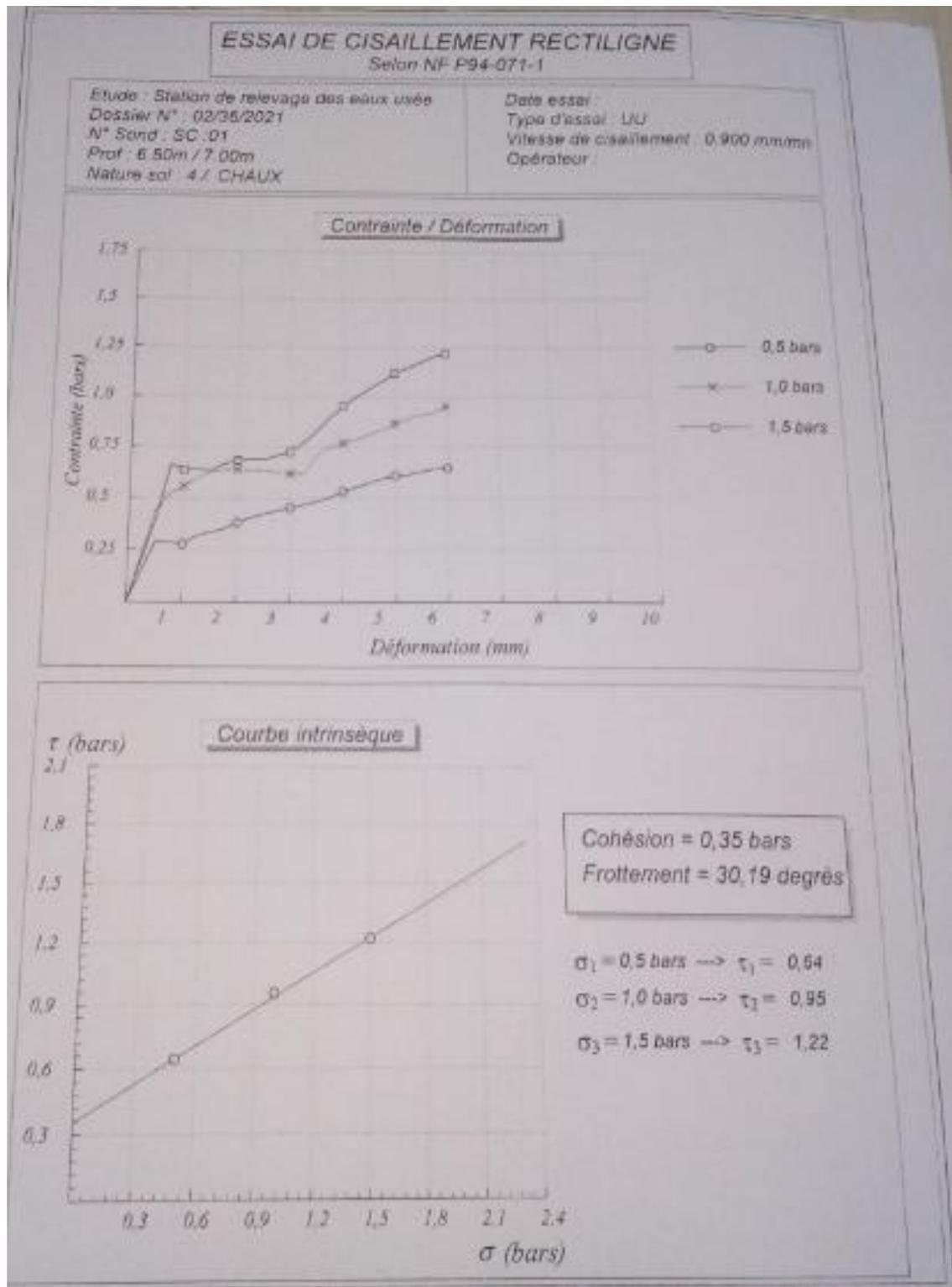


Figure 4.20. La courbe de cisaillement du mélange (Argile+4%de chaux).

- Sol argileux +6% chaux

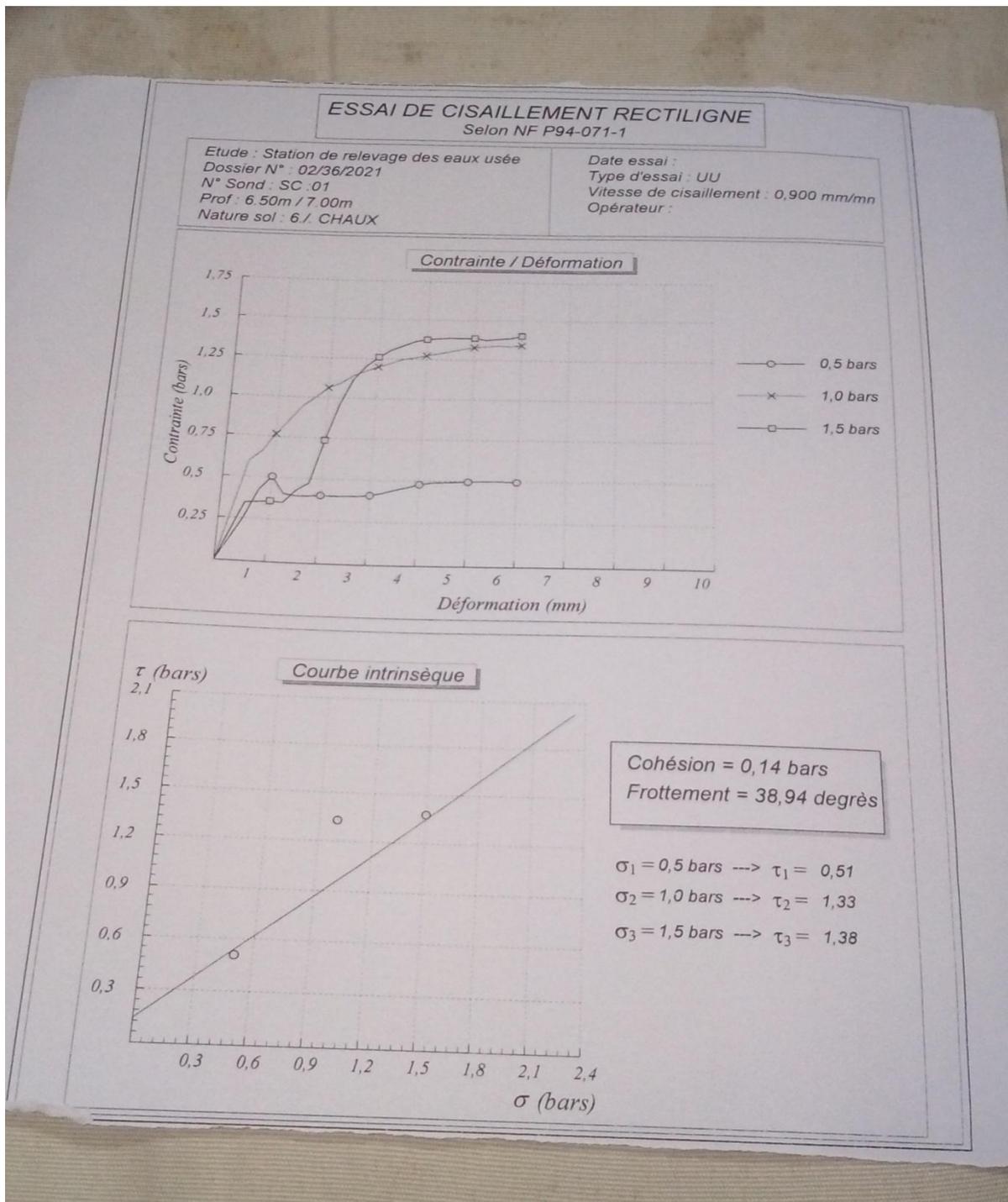


Figure 4.21. La courbe de cisaillement du mélange (Argile+6% de chaux).

4. Essai physique au laboratoire

4.1 Limites d'Atterberg :

Afin d'étudier l'influence de traitement de la chaux sur les limites d'Atterberg pour le sol étudié, des mesures des limites de liquidité et de plasticité ont été effectuées avec la chaux à différents dosages. De même principe que l'état naturel, Les limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) sont déterminées selon la norme (NF P 94-051). Après tamisage de sables quantités prédéterminées de la chaux vive est ajoutée, le malaxage du mélange se fait à sec jusqu'à l'homogénéisation puis une quantité d'eau est ajoutée au mélange jusqu'à obtention d'une pâte homogène.

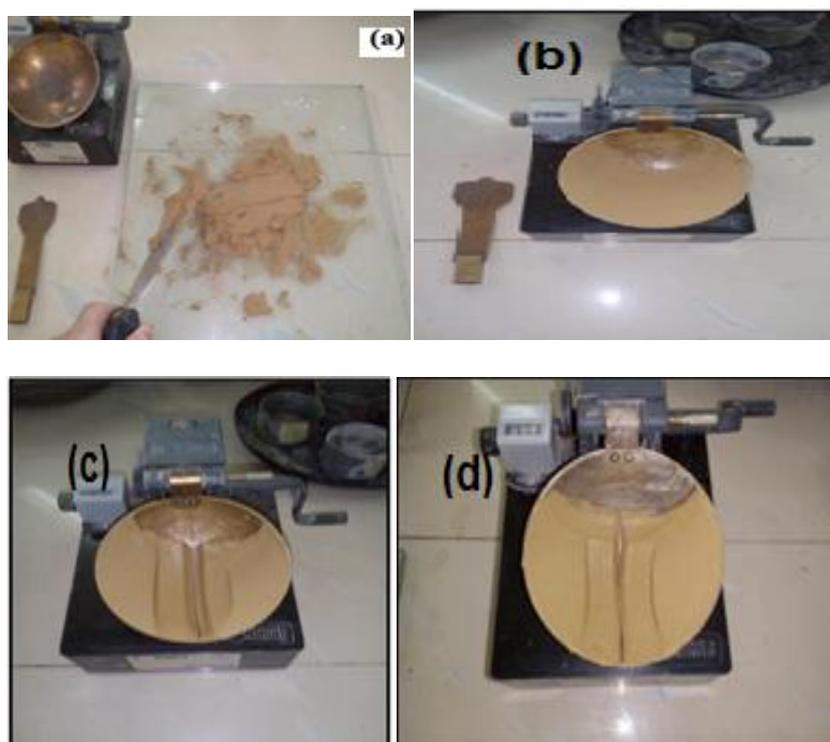


Figure 4.22. L'essai de limite d'Atterberg. (a)préparation de l'échantillon de sol, (b) remplissage de la coupelle, (c)réalisation de la rainure, (d) fermeture de la rainure.

Tableau4.6. Résultats de limite d'Atterberg de sol argileux + la chaux.

Pourcentage de la chaux (%)	Sol+0%chaux	Sol+2% chaux	Sol+4% chaux	Sol+6% chaux
W _L (%)	66.37	46.09	46.25	42.93
W _P (%)	34.10	27.76	32.27	30.43
I _P (%)	32.27	18.29	13.98	12.50

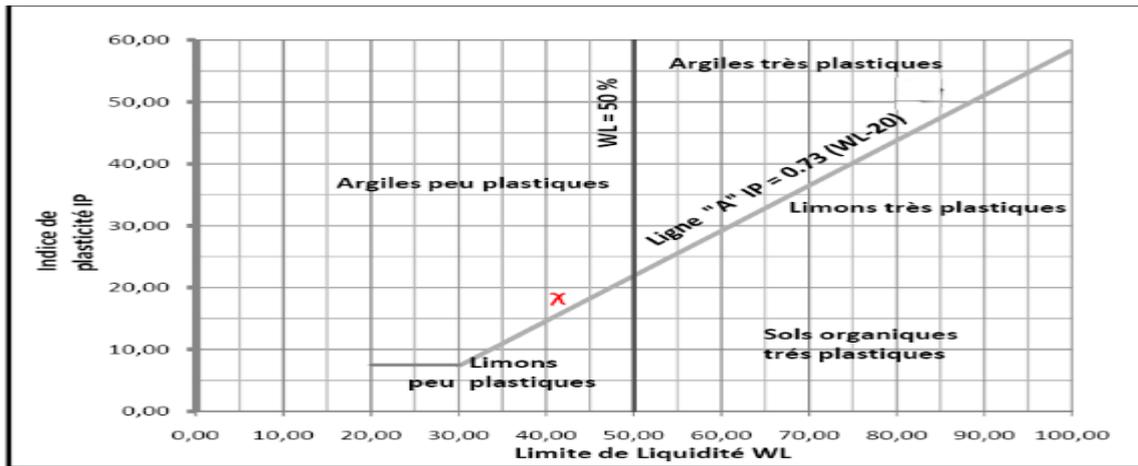


Figure 4.23. Diagramme de Casa grande.

D'après la classification des sols dans l'abaque de plasticité (Abaque de Casa grande), on peut conclure que l'ajout de la chaux sur le sol a changé la plasticité de l'argile très plastique à limons peu plastique (l'ajout de la chaux fait une rugosité sur l'argile).

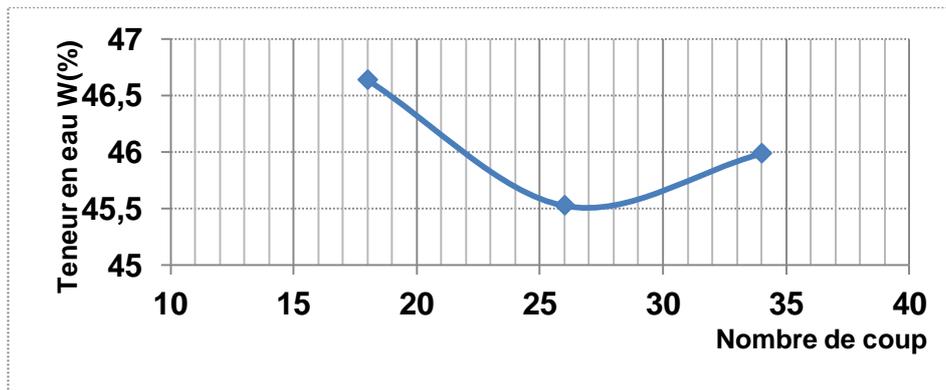


Figure 4.24. La courbe de limite d'Atterberg (Argile+2%chaux).

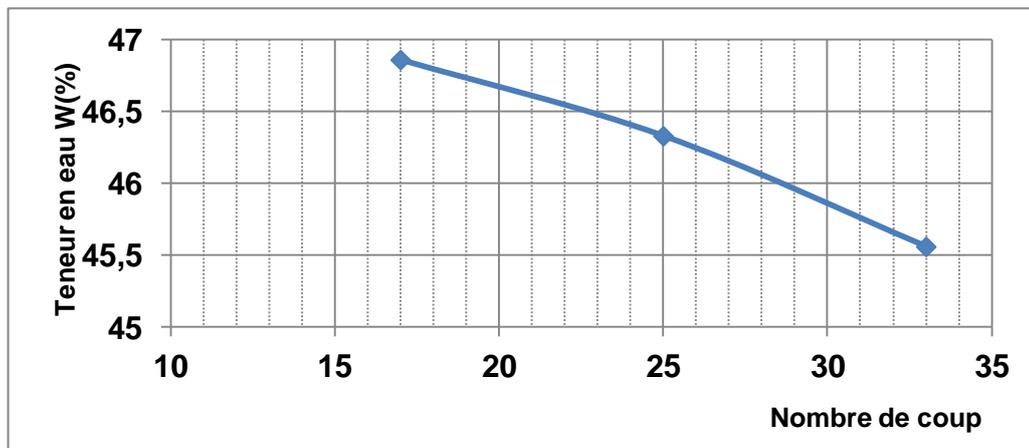


Figure 4.25. La courbe de limite d'Atterberg (Argile+4%chaux).

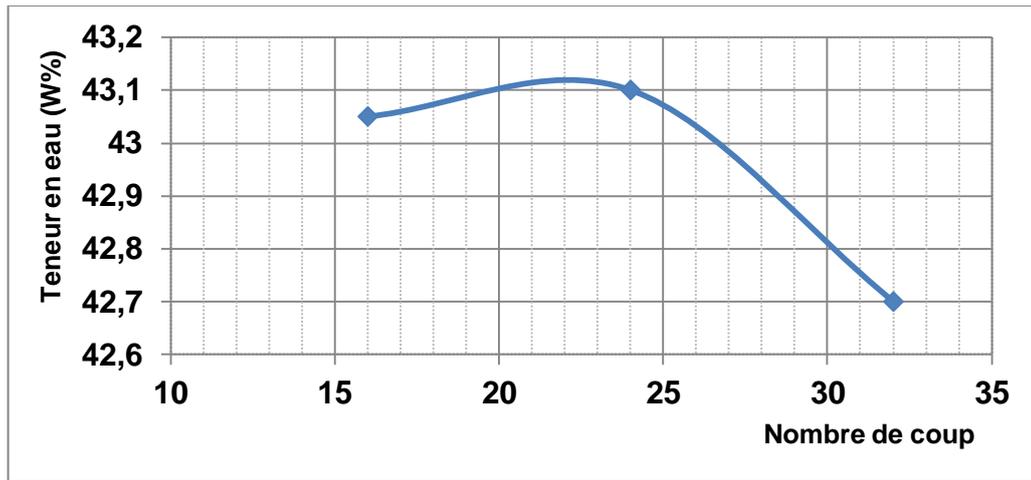


Figure 4.26. La courbe de limite d'Atterberg (Argile+6%chaux).

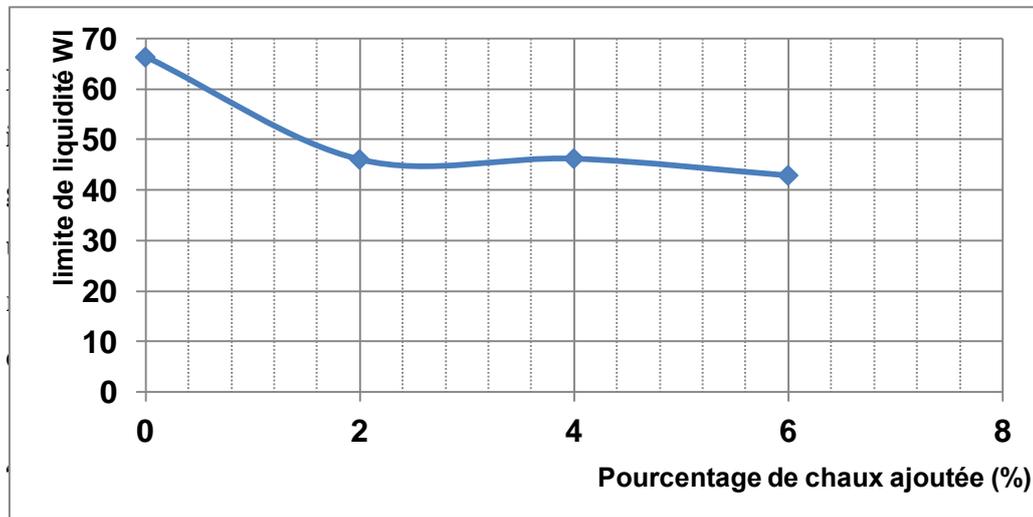


Figure 4.27. L'effet de l'ajout de chaux sur la limite de liquidité.

La figure 4.27 donne les valeurs de la limite de liquidité en fonction du pourcentage de chaux ajouté au sol considéré. D'après cette figure le sol à l'état naturel a une limite de liquidité 66.36 % ; ensuite en rajoutant de la chaux avec des taux de 2%, 4% et 6%, on remarque une diminution considérable de la limite de liquidité pour 2% de chaux elle devient égale à 46.09%, toutefois cette valeur augmente légèrement pour un ajout de 4%, puis lorsqu'on ajoute 6% de chaux la limite de liquidité se réduit et prend la valeur 42.93%.

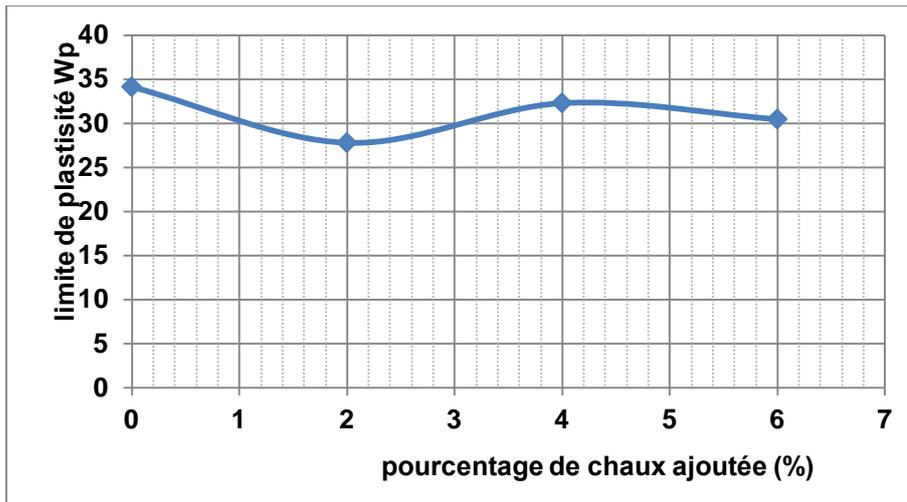


Figure 4.28. L'effet de l'ajout de chaux sur la limite de plasticité.

La figure 4.28 donne les valeurs de la limite de plasticité en fonction du pourcentage de chaux ajouté au sol considéré. D'après cette figure le sol à l'état naturel a une limite de plasticité de 34.1% ; ensuite en rajoutant de rajoutant de la chaux avec des taux de 2%, 4% et 6%, on observe une diminution de la limite de plasticité.

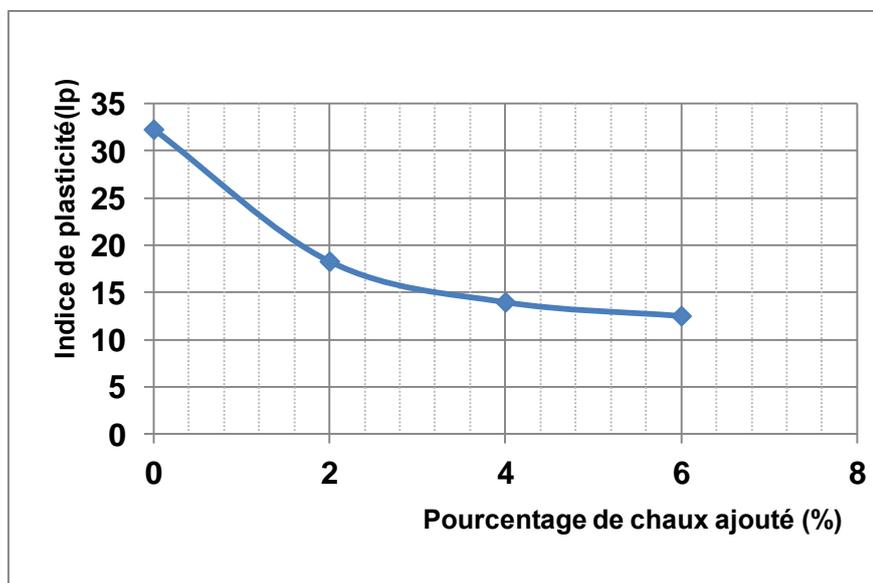


Figure 4.29. L'effet de l'ajout de la chaux sur les indices de plasticité.

On remarque d'après la figure 4.29 que le sol à l'état naturel (0% de chaux) a un indice de plasticité de 32.26 %. Après avoir ajouté 2% de chaux, on note que l'indice de plasticité a diminué jusqu'à une valeur de 18.33%. Ce dernier continu

à diminuer avec l'augmentation du pourcentage de chaux ; pour un ajout de 4%, il prend la valeur de 13.98% et finalement en ajoutant 6% de chaux au sol considéré on observe un indice de plasticité de 12.5%. On peut conclure que l'ajout de ce produit chimique améliore l'état du sol considéré car il se trouve dans la zone des limons peu plastique.

- Les courbes de Limites d'Atterberg données par logiciel de laboratoire « LNHC » de Tarf
 - A l'état naturel (sol reconstitué)

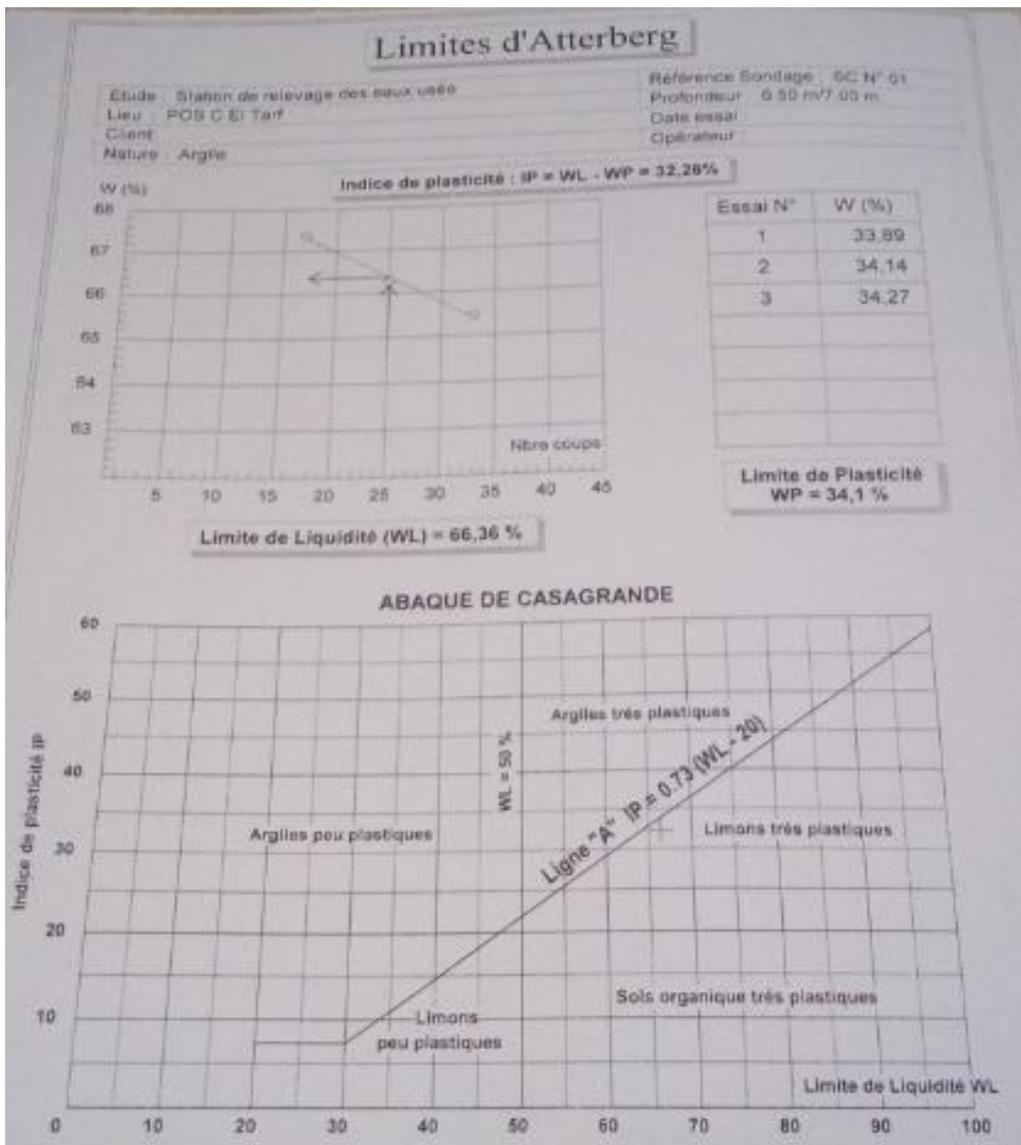


Figure 4.30. La courbe de limite d'Atterberg du mélange (Argile+%chaux).

Sol argileux +2%chaux

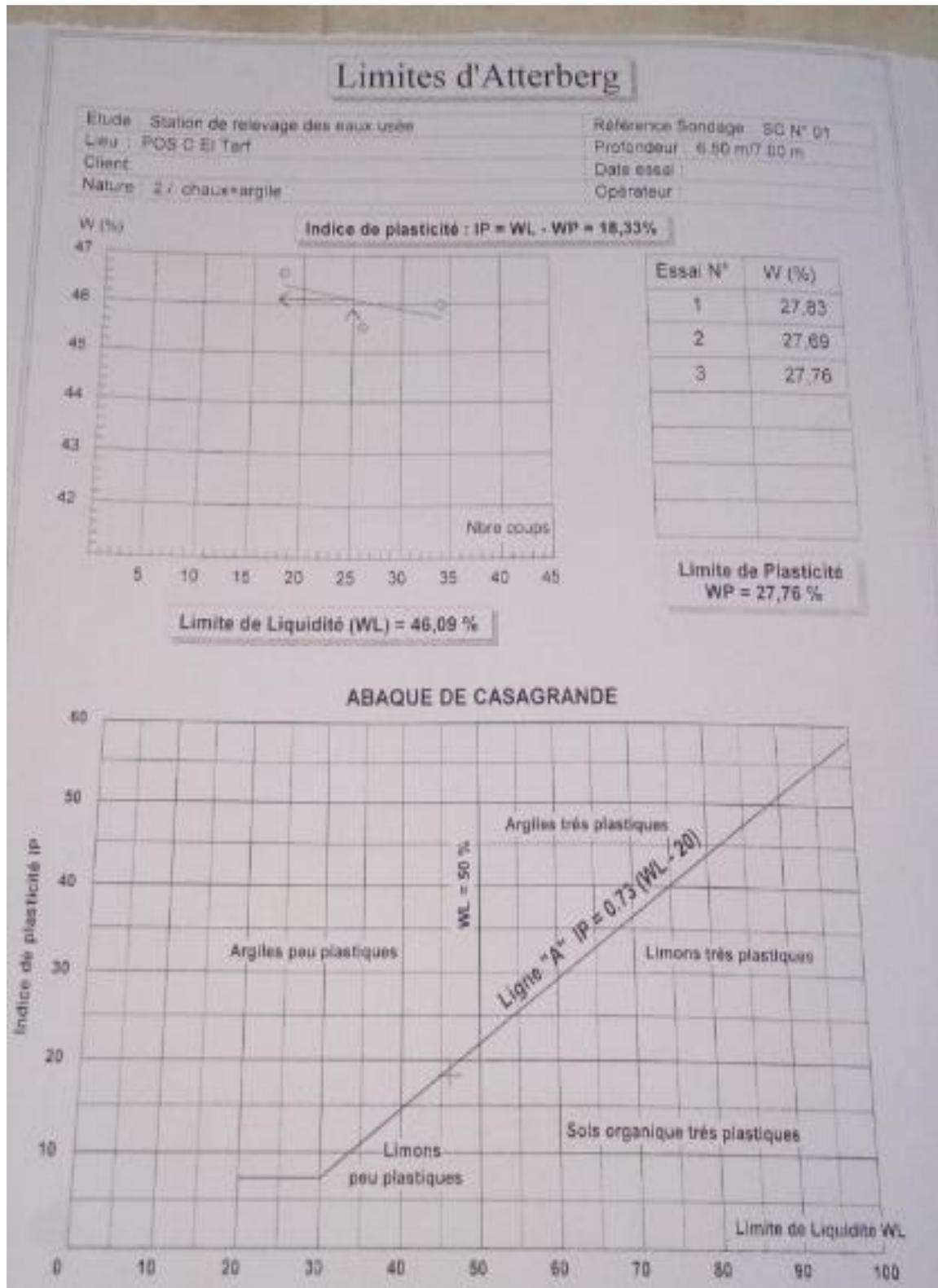


Figure 4.31. La courbe de limite d' Atterberg du mélange (Argile+2%chaux).

- Sol argileux +4%chaux

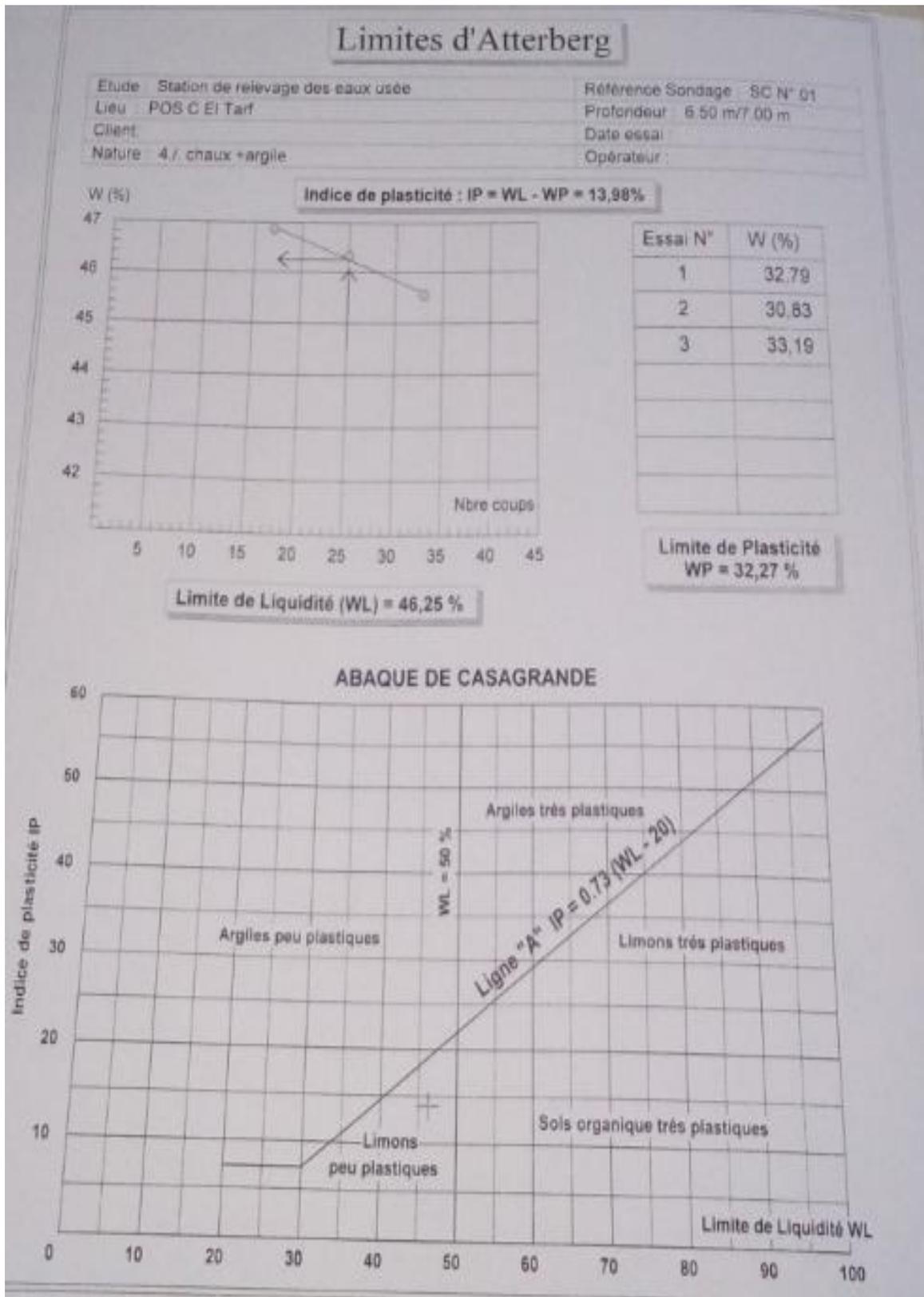


Figure 4.32. La courbe de limite d' Atterberg du mélange (Argile+4%chaux).

- Sol argileux +6%chaux

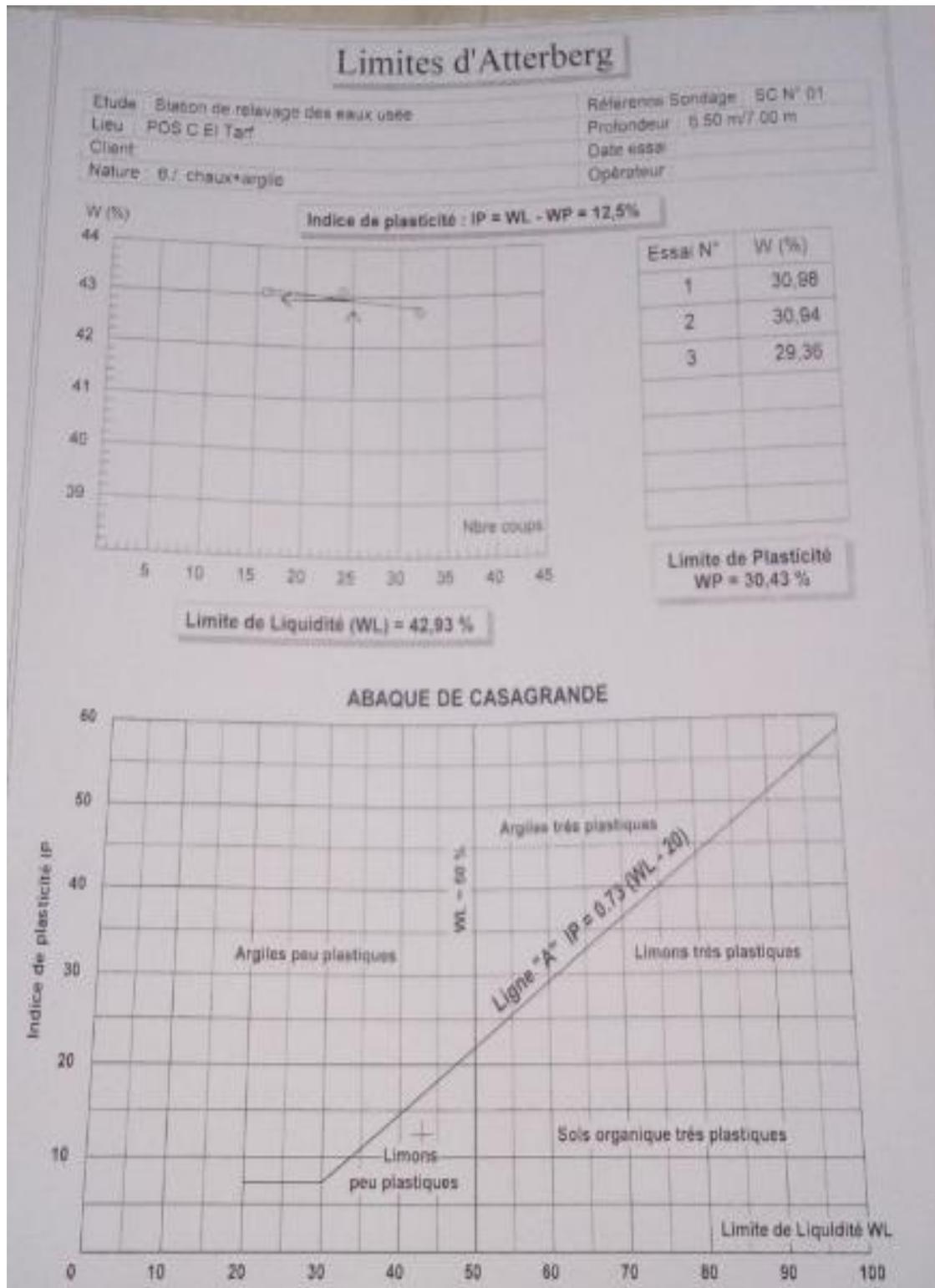


Figure 4.33. La courbe de limite d' Atterberg du mélange (Argile+6%chaux).

5 Conclusion

Les méthodes d'amélioration de l'argile avec des pourcentages de chaux 2, 4, et 6% ont donné de bons résultats sur la plasticité et le poids volumique sec optimal. Les résultats obtenus montrent qu'il y a une diminution de la plasticité et une diminution remarquable du poids volumique sec optimal. En fonction du pourcentage de chaux à ajouter. Pour le mélange à la chaux les résultats de l'optimum de Proctor ont donné des résultats qui sont en accord les études réalisées par d'autres chercheurs. [7]

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le travail réalisé nous a permis de tirer les conclusions citées ci-après :

- ✓ Nous constatons que les valeurs des teneurs en eau optimales augmentent et les densités sèches maximales diminuent avec l'augmentation du pourcentage de la chaux
- ✓ On remarque que la densité sèche optimale diminue et la teneur en eau optimale augmente graduellement en fonction de l'augmentation de la teneur en chaux. On peut dire que cette teneur en eau favorise la naissance de la porosité dans le sol, ce qui permet à la chaux de pénétrer dans l'argile en petites quantités améliorant ainsi, les caractéristiques du sol.
- ✓ Les résultats de l'essai de cisaillement montrent que la cohésion diminue et l'angle de frottement augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de l'ajout du matériau de traitement, ce qui permet le passage d'un état cohérent vers un état granulaire, et par la suite une augmentation de la résistance.
- ✓ D'après la classification des sols dans l'abaque de plasticité (Abaque de Casa grande), on peut conclure que l'ajout de la chaux sur le sol a changé la plasticité de l'argile très plastique à limons peu plastique (l'ajout de la chaux fait une rugosité sur l'argile).
- ✓ D'après les valeurs obtenues de la limite de liquidité en fonction du pourcentage de chaux ajouté (2%, 4% et 6%) au sol considéré ; on remarque une diminution considérable de la limite de liquidité pour 2% de chaux, toutefois cette valeur augmente légèrement pour un ajout de 4%, puis lorsqu'on ajoute 6% de chaux la limite de liquidité se réduit.
- ✓ Concernant la limite de plasticité, le sol à l'état naturel a une limite de plasticité de 34.1% ; ensuite en rajoutant de la chaux avec des taux de 2%, 4% et 6%, on observe une diminution de la limite de plasticité.
- ✓ Pour l'indice de plasticité, le sol avec (0% de chaux) a un indice de plasticité de 32.26 %. Après avoir ajouté 2% de chaux, on note que l'indice de plasticité a diminué. Ce dernier continue à diminuer avec l'augmentation du pourcentage de chaux (4%, et 6%) au sol considéré, à la fin, on observe un indice de plasticité égale à ?. On peut conclure que l'ajout de ce produit chimique améliore l'état du sol considéré car, il se trouve dans la zone des limons peu plastique.
- ✓ La chaux provoque une irrégularité des grains d'où une augmentation de la stabilité du sol.
- ✓ Donc finalement on peut juger que cette technique de mélange de l'argile avec la chaux qui est pratique et rentable, améliore la qualité du sol considéré et favorise la valorisation des matériaux locaux, et permet et une bonne gestion du chantier.

[1] **LAKHDARI KAHINA.** AMELIORATION DE LA RESISTANCE, MECANIQUE ET A L'ACTION DE L'EAU, D'UN SABLE PAR INCORPORATION DES STABILISANTS, Année 2016. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU.

[2] Introduction à la Mécanique des sols, licence Géologie Appliquée Spécialité Géotechnique 2019/2020, Université Ferhat Abbes. Setif1.

[3] **Oudni Selma.** EFFET DU TRAITEMENT DES SOLS LIMONEUX PAR LA CHAUX SUR ES *CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE*, 2017-2018. *UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI*

[4] Dr. AKACEM Mustapha. Mécanique des sols Cours et exercices, 2019/2020. Université Ahmed Draïa -Adrar

[5] **Mellouki Zohra Souddi Fatima.** Amélioration et stabilisation des propriétés physico-chimiques et mécaniques des argiles de la région d'Adrar dans des applications dans les centres de stockage des déchets (CSD), 2016-2017. Université Ahmed Draia Adrar.

[6] **BOUTOUCHE SILYOUNA.** STABILISATION D'UN SOL ARGILEUX PAR TRAITEMENT à la chaux et au ciment cas du site : Lotissement Mokadam, 2017/2018. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

[7] **Abidat Wafa.** EFFET DE TRAITEMENT DES SOLS ARGILEUX PAR LA CHAUX ET LE SABLE SUR LES PROPRIETES DEPORTANCE, 2019. Université Badji Mokhtar Annaba.

[8] **Bultel Frédéric.** PRISE EN COMPTE DE GONFLEMENT DES TERRAINS POUR LE DIMENSIONNEMENT DES Revêtements DES TUNNELS ,2001.Thèse DOCTORAT l'école nationale des ponts et chaussées.

[9] stabilisation des sols fins, université Abdou Belkr kaid –Tlemcen-

[10] Etude géotechnique d'un tronçon de la pénétrante autoroutière le port de Bejaia à l'Auto Route EST-OUEST au niveau d'Hanif, 2017. Université Bejaia.

[12] **BEKKOUCHE A., Aissa MAMOUNE S. M. et DJEDID A.,** (2002). "Techniques de stabilisation des sols expansifs", Journées d'Études sur les Sols Gonflants(JÉSG).

Université de Abdou Belkaid, Tlemcen.

[13] **GADOURI Hamid.** Influence de la présence des sulfates sur le traitement des sols argileux par des ajouts minéraux 2017, Université Yahia Farés –Médéa – 2017

[14] **BOURBIA Imane, BOUNAHAT Hassina.** Etude de stabilisation et renforcement des sols, 2017. UNIVERSITE de JIJEL.

[15] **Walid ZOUBIR.** Effet des résidus minéraux sur l'amélioration des sols fins argileux. Université Hassiba Ben Bouali de Chlef le 22/11/2012

[16] **Isis BRABET.** LE TRAITEMENT DES SOLS POUR LA COUCHE DE FORME, PLATEFORME DE CHAUSSEE, 2012. CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS PARIS.

[17] Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme.

[18] **NF EN 13043:2003** -Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodrômes et d'autres zones de circulation.

[19] **NF EN 459-1:2012** -Chaux de construction -Partie 1 : définitions, spécifications, et critères de conformité

[20] **Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.**

[21] **GTS :** Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques/ Application à la réalisation des remblais et des couches de forme.

[22] **Massinissa Koussaila SAADI.** *Stabilisation des sols gonflants avec la chaux. Cas de la région de Mila, 2017. Université larbi ben m'hidi Oum el Bouaghi*

[23] **AMOURA Fouad et MAAMERI Mohamed.** *Effet de la durée de cure sur la plasticité et sur les paramètres de cisaillement d'un sol fin argileux amélioré par la chaux, 2015. Université Hassiba Benbouali de Chlef.*

[24] **Mellal Fatima.** Etude du comportement physicochimique et mécanique d'un remblai routier marneux amélioré par la chaux éteinte Cas de l'autoroute Est-Ouest tronçon Oued Fodda /Khemis Miliana, 2009. Université Hassiba Ben-Bouali -Chlef-.

[25] Les formules pour la teneur en eau en « LNHC » de TARF.

[26] **BELMELLAT Hamida.** *ETUDE DES CORRELATIONS ENTRE LES PARAMETRES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES SOLS DE SITE DE TAMDA, 2018 /2019. Université Mouloud Mammeri de Tizi – Ouzou.*

[27] **KHETTAB Sihem** : "Etude des corrélations entre les caractéristiques Proctor et les caractéristiques mécaniques et physiques" 2015.

ANNEXE

ANNEXE A: TENEUR EN EAU

TENEUR EN Eau (Sol)

N° Echantillon	I	II	III
N°Tare	520	Q10	BH
P.H+Tare (g)	55.32	52.21	61.90
P.S+Tare (g)	48.25	45.84	53.90
P. Tare (g)	18.00	18.12	20.39
P. Eau (g)	7.07	6.37	8.00
P. Sol sec (g)	30.25	27.72	33.51
Teneur en eau (%)	23.37	22.97	23.87
PH+Paraffine (g)	324.09	388.68	397.97
Poids humide (g)	314.84	380.24	389.53
Pois paraffine (g)	9.25	8.44	8.44
P. Matériaux dans l'eau (g)	142.85	175.70	183.05
Volume brut (cm^3)	181.24	212.98	214.98
Volume paraffine (cm^3)	10.51	9.59	9.59
Volume net (cm^3)	170.73	203.39	205.33
Densité humide (γ_h) (t/m^3)	1.84	1.87	1.89
Densité sèche (γ_d) (t/m^3)	1.49	1.54	1.53

W(%)	(γ_h) (t/m^3)	(γ_d) (t/m^3)	W_s (%)	S_r (%)
23.41	1.87	1.52	28.99	80.76

ANEXXE B : ESSAIS PROCTOR

Essai Proctor (Sol +0% Chaux)
Moule : Proctor
Réf essai : NF P 94-093
Pois Moule : 5162g
Volume Moule : 942 cm ³
Cycle : 3 Couches (25 coups / couche)

Détermination de la masse volumique sèche

Eprouvette compactée No	1	2	3
Pourcentage d'eau ajoute %	14%	16%	18%
Poids d'eau ajoute (g)	280	320	360
Poids sol humide+moule(g)	6952	7008	6972
Pois du sol humide(g)	1790	1846	1810
Poids du sol sec (g)	1557	1595	1518
Densité sèche (Mg/m ³)	1.65	1.69	1.61

N°Tare	P04	307	K10	P08	200	305
Poids sol humide+ tare (g)	306	324	286	274	274	288
Poids du sol sec+ tare (g)	272	288	254	242	236	250
Poids Tare(g)	48	44	46	44	44	46
Poids Eau	34	36	32	32	38	38
Poids du sol sec (g)	224	244	208	198	192	204
Teneur en eau W(%)	15.18	14.75	15.38	16.16	19.79	18.62
Moyenne (%)	14.97		15.77		19.21	

ANNEXE

Essai Proctor (Sol +2% Chaux)

Moule : Proctor
 Réf essai : NF P 94-093
 Poids Moule : 5162g
 Volume Moule : 942 cm³
 Cycle : 3 Couches (25 coups / couche)

Détermination de la masse volumique sèche

Eprouvette compactée No	1	2	3
Pourcentage d'eau ajoutée %	14%	16%	18%
Poids d'eau ajoutée (g)	280	320	360
Poids sol humide+moule(g)	6870	6922	6894
Poids du sol humide(g)	1708	1760	1732
Poids du sol sec (g)	1497	1517	1447
Densité sèche (Mg/m ³)	1.59	1.61	1.52

N°Tare	304	300	12	207	P02	370
Poids sol humide+ tare (g)	320	322	318	315	310	318
Poids du sol sec+ tare (g)	286	288	282	276	272	266
Poids Tare(g)	46	46	46	44	48	44
Poids Eau	34	34	36	39	38	52
Poids du sol sec (g)	240	242	236	232	224	222
Teneur en eau W(%)	14.17	14.05	15.25	16.81	16.96	20.42
Moyenne (%)	14.11		16.03		18.69	

Essai Proctor (Sol +4% Chaux)

Moule : Proctor
 Réf essai : NF P 94-093
 Poids Moule : 5162g
 Volume Moule : 942 cm³
 Cycle : 3 Couches (25 coups / couche)

Détermination de la masse volumique sèche

Eprouvette compactée No	1	2	3
Pourcentage d'eau ajoutée %	14%	16%	18%
Poids d'eau ajoutée (g)	280	320	360

ANNEXE

Poids sol humide+moule(g)	7055	7088	7038
Pois du sol humide(g)	1720	1760	1700
Poids du sol sec (g)	1650	1648	1580
Densité sèche (Mg/m ³)	1.59	1.60	1.52

N°Tare	304	300	12	207	P02	370
Poids sol humide+ tare (g)	308	305	303	302	314	326
Poids du sol sec+ tare (g)	276	270	264	268	268	278
Poids Tare(g)	46	44	46	44	48	44
Poids Eau	32	35	39	34	37	48
Poids du sol sec (g)	230	226	218	224	220	234
Teneur en eau W(%)	13.91	15.49	17.89	15.18	16.81	20.51
Moyenne (%)	14.70		16.54		18.66	

Essai Proctor (Sol +6% Chaux)

Moule : Proctor
 Réf essai : NF P 94-093
Pois Moule : 5162g
Volume Moule : 942 cm³
 Cycle : 3 Couches (25 coups / couche)

Détermination de la masse volumique sèche

N°Tare	370	200	207	P02	P04	K10
Poids sol humide+ tare (g)	315	320	315	310	352	350
Poids du sol sec+ tare (g)	282	284	276	272	302	301
Poids Tare(g)	44	44	44	48	48	44
Poids Eau	33	36	39	38	50	49
Poids du sol sec (g)	238	240	237	234	254	252
Teneur en eau W(%)	13.86	15.00	16.46	16.24	19.68	19.44
Moyenne (%)	14.44		16.55		19.56	

CISAILLEMENT RECTILINGE A LA BOITE (Sol +0% Chaux)

Moule : Boite de cisaillement (Essai UU)
 Réf essai : NF P 94-071
Coefficient de machine : 0.1507
Pois Moule : 154.6g
Volume Moule : 72 cm³

ANNEXE

N° Echantillon	I	II	III
N° Des tares	05	180	71
Poids sol humide+ tare (g)	40.60	50.97	46.22
Poids du sol sec+ tare (g)	36.02	44.8	40.43
Poids Tare(g)	16.51	16.00	14.91
Poids Eau	4.58	6.17	5.79
Poids du sol sec (g)	19.51	28.80	25.52
Teneur en eau W (%)	23.48	21.42	22.69
Charge verticale (bars)	0.5	1.00	1.5
Poids sol humide+moule(g)	300	299	300
Pois du sol humide(g)	145.4	144.4	145
Densité humide (γ_h) (g/cm^3)	2.02	2.01	2.02
Densité sèche (γ_d) (g/cm^3)	1.64	1.65	1.65
Degré de saturation (Sr%)	97.23	91.00	95.52
Déformation (mm/mn)	5.00	5.50	4.75
Lecture à l'anneau	108	150	180
Section modifiée S_m (cm^2)	33.13	32.88	33.37
Force nette F_n (Kgf)	16.28	22.61	27.13
$\tau = \frac{F_n}{S_m}$ (bars)	0.56	0.73	0.80

CISAILLEMENT RECTILINGE A LA BOITE (Sol +2% Chaux)

Moule : Boite de cisaillement (Essai UU)

Réf essai : NF P 94-071

Coefficient de machine : 0.1507

Pois Moule : 154.6g

Volume Moule : 72 cm^3

N° Echantillon	I	II	III
N° Des tares	304	207	370
Poids sol humide+ tare (g)	320	315	310
Poids du sol sec+ tare (g)	280	276	272
Poids Tare(g)	46	44	44
Poids Eau	40	39	38
Poids du sol sec (g)	240	232	230
Teneur en eau W (%)	16.67	16.81	16.52
Charge verticale (bars)	0.5	1.00	1.5
Poids sol humide+moule(g)	288	292	295
Pois du sol humide(g)	133.4	137.4	140.4
Densité humide (γ_h) (g/cm^3)	1.85	1.91	1.95
Densité sèche (γ_d) (g/cm^3)	1.62	1.63	1.60
Degré de saturation (Sr%)	67.41	69.03	64.78
Déformation (mm/mn)	6.00	6.00	6.00
Lecture à l'anneau	101	163	177

ANNEXE

Section modifiée S_m (cm^2)	32.52	32.60	32.61
Force nette F_n (Kgf)	15.22	24.56	26.67
$\tau = \frac{F_n}{S_m}$ (bars)	0.62	1.06	1.08

CISAILLEMENT RECTILINGE A LA BOITE (Sol +4% Chaux)

Moule : Boite de cisaillement (Essai UU)

Réf essai : NF P 94-071

Coefficient de machine : 0.1507

Pois Moule : 154.6g

Volume Moule : 72 cm^3

N° Echantillon	I	II	III
N° Des tares	300	207	P02
Poids sol humide+ tare (g)	308	315	310
Poids du sol sec+ tare (g)	270	276	272
Poids Tare(g)	44	44	44
Poids Eau	35	39	38
Poids du sol sec (g)	232	237	234
Teneur en eau $W(\%)$	16.38	16.46	16.24
Charge verticale (bars)	0.5	1.00	1.5
Poids sol humide+moule(g)	288	290	289
Pois du sol humide(g)	133.4	135.4	134.4
Densité humide (γ_h) (g/cm^3)	1.85	1.88	1.86
Densité sèche (γ_d) (g/cm^3)	1.59	1.61	1.60
Degré de saturation ($S_r\%$)	63.27	65.55	63.94
Déformation (mm/mn)	6.00	6.00	6.00
Lecture à l'anneau	139	205	263
Section modifiée S_m (cm^2)	32.75	32.65	32.72
Force nette F_n (Kgf)	20.95	30.89	39.63
$\tau = \frac{F_n}{S_m}$ (bars)	0.64	0.95	1.22

CISAILLEMENT RECTILINGE A LA BOITE (Sol +6% Chaux)

Moule : Boite de cisaillement (Essai UU)

Réf essai : NF P 94-071

Coefficient de machine : 0.1507

Pois Moule : 154.6g

Volume Moule : 72 cm^3

ANNEXE

N° Echantillon	I	II	III
N° Des tares	P04	P08	207
Poids sol humide+ tare (g)	306	330	274
Poids du sol sec+ tare (g)	272	290	242
Poids Tare(g)	48	44	44
Poids Eau	34	40	32
Poids du sol sec (g)	224	246	195
Teneur en eau W (%)	15.18	16.26	16.41
Charge verticale (bars)	0.5	1.00	1.5
Poids sol humide+moule(g)	290	288	289
Pois du sol humide(g)	135.4	133.4	134.4
Densité humide (γ_h) (g/cm^3)	1.88	1.85	1.86
Densité sèche (γ_d) (g/cm^3)	1.63	1.59	1.59
Degré de saturation (Sr%)	62.37	62.80	63.38
Déformation (mm/mn)	1.00	5.00	4.00
Lecture à l'anneau	119	291	307
Section modifiée S_m (cm^2)	35.54	33.35	33.97
Force nette F_n (Kgf)	17.93	43.85	46.26
$\tau = \frac{F_n}{S_m}$ (bars)	0.51	1.33	1.38

DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG (Sol +0% Chaux)

Moule : Boite de cisaillement (Essai UU)

Réf essai : NF P 94-071

Coefficient de machine : 0.1507

Pois Moule : 154.6g

Volume Moule : 72 cm^3

$$W_L = 66.36$$

Résultats : $W_p = 34.10$

$$I_p = 32.27$$

1/ LIMITE DE PLASTICITE :

	1 ^{er} Essai	2 ^{ème} Essai	3 ^{ème} Essai
N° De tare	12	38	15
Pois total humide (g)	19.541	18.180	18.527
Pois total sec (g)	15.234	16.877	17.208
Poids de la tare (g)	14.377	13.060	13.359
Poids de l'eau	1.307	1.303	1.319
Poids du sol sec (g)	3.857	3.817	3.849
Teneur en eau (%)	33.89	34.14	34.27

ANNEXE

2/ LIMITE DE LIQUIDITE :

	1 ^{er} Essai		2eme Essai		3eme Essai	
Nombre de coups	17		25		33	
N° de la tare	39	34	26	07	14	05
Poids total humide (g)	24.073	23.719	24.405	21.475	26.184	23.486
Poids total sec (g)	19.619	19.669	20.064	17.761	21.250	19.755
Poids de la tare (g)	13.061	13.609	13.526	12.142	13.142	14.048
Poids de l'eau (g)	4.454	4.050	4.341	3.717	4.928	3.731
Poids du sol sec (g)	6.558	6.060	6.538	5.619	7.521	5.707
Teneur en eau (%)	67.92	66.83	66.40	66.15	65.52	65.38
Moyenne(%)	67.37		66.27		65.45	

DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG (Sol +0% Chaux)

Moule : Boite de cisaillement (Essai UU)

Réf essai : NF P 94-071

Coefficient de machine : 0.1507

Pois Moule : 154.6g

Volume Moule : 72 cm³

Résultats :	$W_L = 66.36\%$
	$W_P = 34.10\%$
	$I_P = 32.27\%$

1/ LIMITE DE PLASTICITE :

	1 ^{er} Essai	2éme Essai	3éme Essai
N° De tare	12	38	15
Pois total humide (g)	19.541	18.180	18.527
Poids total sec (g)	15.234	16.877	17.208
Poids de la tare (g)	14.377	13.060	13.359
Poids de l'eau	1.307	1.303	1.319
Poids du sol sec (g)	3.857	3.817	3.849
Teneur en eau (%)	33.89	34.14	34.27

ANNEXE

2/ LIMITE DE LIQUIDITE :

	1 ^{er} Essai		2eme Essai		3eme Essai	
Nombre de coups	17		25		33	
N° de la tare	39	34	26	07	14	05
Poids total humide (g)	24.073	23.719	24.405	21.475	26.184	23.486
Poids total sec (g)	19.619	19.669	20.064	17.761	21.250	19.755
Poids de la tare (g)	13.061	13.609	13.526	12.142	13.142	14.048
Poids de l'eau (g)	4.454	4.050	4.341	3.717	4.928	3.731
Poids du sol sec (g)	6.558	6.060	6.538	5.619	7.521	5.707
Teneur en eau (%)	67.92	66.83	66.40	66.15	65.52	65.38
Moyenne(%)	67.37		66.27		65.45	

DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG (Sol +2% Chaux)

Moule : Boite de cisaillement (Essai UU)

Réf essai : NF P 94-071

Coefficient de machine : 0.1507

Pois Moule : 154.6g

Volume Moule : 72 cm³

Résultats :

$W_L = 46.09\%$

$W_P = 27.76 \%$

$I_P = 18.29\%$

1/ LIMITE DE PLASTICITE :

	1 ^{er} Essai	2éme Essai	3éme Essai
N° De tare	07	38	015
Pois total humide (g)	17.272	17.920	18.348
Poids total sec (g)	16.160	16.876	17.276
Poids de la tare (g)	12.164	13.106	13.415
Poids de l'eau	1.112	1.044	1.072
Poids du sol sec (g)	3.996	3.770	3.861
Teneur en eau (%)	27.76	27.69	27.76

2/ LIMITE DE LIQUIDITE :

	1 ^{er} Essai		2eme Essai		3eme Essai	
Nombre de coups	18		26		34	
N° de la tare	40	18	21	24	22	12
Poids total humide (g)	28.797	28.061	26.174	24.744	25.268	23.917
Poids total sec (g)	23.742	24.246	22.449	21.376	21.739	20.961
Poids de la tare (g)	14.440	14.450	14.218	14.020	14.037	14.524
Poids de l'eau (g)	5.055	3.815	3.725	3.368	3.547	2.956
Poids du sol sec (g)	9.302	9.796	8.231	7.356	7.702	6.437
Teneur en eau (%)	54.34	38.94	45.26	45.79	46.05	45.92
Moyenne(%)	46.64		45.53		45.99	

ANNEXE

DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG (Sol +4% Chaux)

Moule : Boite de cisaillement (Essai UU)

Réf essai : NF P 94-071

Coefficient de machine : 0.1507

Pois Moule : 154.6g

Volume Moule : 72 cm³

Résultats :

$W_L = 46.25\%$

$W_P = 32.27\%$

$I_P = 13.98\%$

1/ LIMITE DE PLASTICITE :

	1 ^{er} Essai	2 ^{ème} Essai	3 ^{ème} Essai
N° De tare	05	31	14
Pois total humide (g)	18.534	18.393	17.979
Poids total sec (g)	17.437	17.191	16.961
Poids de la tare (g)	14.091	13.454	13.894
Poids de l'eau	1.097	1.152	1.018
Poids du sol sec (g)	3.346	3.737	3.067
Teneur en eau (%)	32.79	30.83	33.19

2/ LIMITE DE LIQUIDITE :

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
Nombre de coups	17		25		33	
N° de la tare	48	06	42	01	34	39
Poids total humide (g)	25.668	24.016	24.691	25.073	26.987	24.549
Poids total sec (g)	21.770	20.562	21.257	21.386	22.839	20.978
Poids de la tare (g)	13.430	13.208	13.845	13.426	13.715	13.157
Poids de l'eau (g)	3.898	3.454	3.434	3.687	4.148	3.571
Poids du sol sec (g)	8.340	7.354	7.412	7.960	9.124	7.821
Teneur en eau (%)	46.74	46.97	46.33	46.32	45.46	45.66
Moyenne(%)	46.86		46.33		45.56	

ANNEXE

DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG (Sol +6% Chaux)

Moule : Boite de cisaillement (Essai UU)

Réf essai : NF P 94-071

Coefficient de machine : 0.1507

Pois Moule : 154.6g

Volume Moule : 72 cm³

Résultats :

$W_L = 42.93\%$

$W_P = 30.43 \%$

$I_P = 12.52\%$

1/ LIMITE DE PLASTICITE :

	1 ^{er} Essai	2 ^{ème} Essai	3 ^{ème} Essai
N° De tare	40	18	24
Pois total humide (g)	17.850	17.659	17.319
Poids total sec (g)	17.068	16.931	16.570
Poids de la tare (g)	14.544	14.578	14.019
Poids de l'eau	0.782	0.728	0.749
Poids du sol sec (g)	2.542	2.353	2.551
Teneur en eau (%)	30.98	30.94	29.36

2/ LIMITE DE LIQUIDITE :

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
Nombre de coups	16		24		32	
N° de la tare	26	015	38	22	12	21
Poids total humide (g)	26.539	24.479	23.616	25.352	25.238	24.685
Poids total sec (g)	22.662	21.160	20.453	21.940	22.012	21.600
Poids de la tare (g)	13.690	13.419	13.096	14.042	14.551	14.282
Poids de l'eau (g)	3.877	3.319	3.163	3.412	3.226	3.085
Poids du sol sec (g)	8.972	7.741	7.357	7.898	7.461	7.318
Teneur en eau (%)	43.21	42.88	42.99	43.20	43.24	42.16
Moyenne(%)	43.05		46.33		45.56	