

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

N°



FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : GEOTECHNIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention  
du diplôme de Master Académique**

Par :

**BENAMARA Nacereddine      MAZARI Abdessalam**

**Intitulé**

***Caractérisation du sol de Chabba El Hamra  
(wilaya de M'sila) Traité au ciment Matine  
et fortement compacté***

Soutenu le 24/06/2023 devant le jury composé de :

<b>Dr KHEMISSA Mohamed</b>	<b>Prof., Université de M'SILA</b>	<b>Président</b>
<b>Dr MEKKI Lakhdar</b>	<b>MCB, Université de M'SILA</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Dr SEDDIKI Ahmed</b>	<b>MCA, Université de M'SILA</b>	<b>Examineur</b>

**Année universitaire : 2022 /2023**

## *Remerciements*

Il est admirable de remercier Dieu pour le courage, la patience, la volonté et la force accordés pour surmonter les difficultés et les obstacles tout au long des années d'études.

Il est également important de témoigner une vive gratitude à Dr MEKKI Lakhdar pour sa précieuse assistance. Les remerciements s'adressent également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils accordent en évaluant ce travail.

Nous tenons à remercier Said Zerig, le propriétaire du laboratoire des travaux publics et de la construction, Sidi Aissa, ainsi que tout le personnel pour leur aide à mon égard, à certaines étapes de cette étude.

Nous tenons également à remercier chaleureusement le directeur du Laboratoire Centrale des Travaux Publics (LCTP, Antenne de M'sila), ainsi que l'ensemble du personnel pour leur aide à certaines étapes de cette étude.

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail à mes chers parents pour le soutien et les encouragements qu'ils m'ont apportés tout au long de ma vie. Ils étaient toujours avec moi, me conseillant et me guidant, me donnant force et confiance en moi. Je leur dois tout ce que je suis aujourd'hui.*

*Je dédie également ce travail à mes frères et sœurs qui ont été pour moi de proches compagnons et amis. Ils ont partagé de beaux moments et des défis avec moi, et ont été un soutien solide dans mon cheminement académique et personnel.*

*Je tiens également à remercier du fond du cœur tous les autres membres de ma famille qui ont contribué à mon succès. Grâce à leur soutien et à leurs encouragements constants, j'ai trouvé la force d'avancer et d'atteindre mes objectifs.*

*Et je ne peux pas oublier mes amis qui ont été un pilier solide dans ma vie. Grâce à eux, j'ai pu trouver un équilibre entre travailler dur et m'amuser. Je les remercie pour leur confiance et leur camaraderie.*

*Enfin, je tiens à remercier mes camarades de classe qui ont partagé leurs connaissances et leurs expériences avec moi au cours de ce parcours académique. Vous avez été un soutien et une inspiration importants pour moi, et je vous en suis très reconnaissant.*

*Je dédie ce travail avec gratitude et amour à toute ma famille et mes amis qui ont été une véritable inspiration et un soutien dans ma vie. Vous avez été ma force et ma motivation, et je n'oublierai jamais la gentillesse et la contribution que vous m'avez apportées.*

***Nacereddine Benamara***

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail avec fierté et gratitude à mes parents, qui ont été le principal soutien de ma réussite. Grâce à leur amour indéfectible, leurs encouragements et leur soutien, j'ai pu arriver là où je suis aujourd'hui. Je les remercie du fond du cœur pour tout ce qu'ils m'ont apporté.*

*Je dédie également ce travail à tous les membres de ma famille, y compris mes frères et sœurs, qui m'ont soutenu et soutenu à chaque étape de ma vie. Ils ont été un soutien et une inspiration solides pour moi, et ils ont mes remerciements et ma gratitude les plus profonds.*

*Je voudrais également dédier ce travail à tous mes proches et amis qui ont été un soutien et une inspiration constants tout au long de mon parcours. Ils m'ont apporté soutien, encouragement et confiance, et je leur en suis reconnaissant.*

*Merci à tous ceux qui ont contribué à mon succès et m'ont soutenu dans ce travail. Je ne peux pas exprimer à quel point je suis reconnaissant et reconnaissant envers tous ceux qui ont été à mes côtés tout au long de ce voyage.*

***Mazari Abdessalam***

## ملخص

تعرض هذه الدراسة نتائج دراسة أجريت على تربة طينية تم جلبها من موقع الشعبة الحمراء في بلدية المسيلة. الهدف من هذه الدراسة هو تحديد العوامل الفيزيائية والميكانيكية لهذه التربة المعالجة بالإسمنت المتين (صنف 42.5)، وتحليل تأثير المعالجة على خواصها الميكانيكية. بالإضافة إلى اختبارات تحديد التربة، تضمن البرنامج التجريبي اختبارات الرص نوع بروكتور المعدل والضغط البسيط واختبارات CBR

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها انخفاضاً كبيراً في اللدونة ، كما أنها تُظهر تحسناً كبيراً في معاملات CBR ومقاومتها للضغط البسيط لطين الطمي المعاد تكوينه عن طريق الرص في ظل الظروف المثلى لاختبار بروكتور المعدل.

**الكلمات المفتاحية:** الطين الطمي ، الرص بروكتور المعدل ، المعالجة، CBR ، الضغط البسيط،

## *Résumé*

Cette étude présente les résultats d'une étude menée sur un sol limono-argileux prélevé sur le site de Chaaba El Hamra, commune de M'sila. L'objectif de cette étude était de déterminer les paramètres physiques et mécaniques du sol traité avec du ciment Matine (classe 42.5), et d'analyser l'effet du traitement sur ses propriétés mécaniques. En plus des essais d'identification, le programme expérimental comprenait des essais de compactage type Proctor modifié, des essais de compression simple et des essais CBR.

Les résultats obtenus montrent une réduction importante de sa plasticité, elles montrent également une amélioration significative de ces indices CBR et sa résistance à la compression simple de ce limon-argileux reconstitué par compactage aux conditions optimales de Proctor modifié.

**Mots-clés:** limon-argileux, compactage, Proctor modifié, traitement, CBR, compression simple

# Abstract

This study presents the results of a study carried out on a silty-clayey soil sampled from the site of Chaaba El Hamra, of M'sila region. The objective of this study was to determine the physical and mechanical parameters of the soil treated with Matine cement (class 42.5), and to analyze the effect of the treatment on its mechanical properties. In addition to the identification tests, the experimental program included modified Proctor type compaction tests, simple compression tests and CBR tests.

The results obtained show a significant reduction in its plasticity, they also show a significant improvement in these CBR indices and its resistance to simple compression of this silt-clayey reconstituted by compacting under the optimal conditions of modified Proctor.

**Keywords:** silt-clay, compaction, modified Proctor, treatment, CBR, simple compression

# SOMMAIRE

## **CHAPITRE I: ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE TRAITEMENT DES SOLS**

I.1	Introduction: .....	1
I.2	Les argiles: .....	1
I.2.1	Definition: .....	1
I.2.2	Les différents types d'argiles : .....	2
I.2.3	Texture des argiles : .....	4
I.3	Les Limons : .....	5
I.3.1	Definition: .....	5
I.3.2	Particularisation spécifique des limons : .....	5
I.4	Objectifs du traitement: .....	6
I.5	Techniques de traitement possibles : .....	7
I.5.1	Le traitement mécanique : .....	10
I.5.2	Traitement thermique : .....	13
I.5.3	Traitement chimique: .....	13
I.6	Traitement des sols par le ciment : .....	20
I.6.1	Les ciments : .....	20
I.6.2	Types de ciment : .....	21
I.6.3	Réactions physico-chimiques du ciment : .....	22
I.6.4	Réactions physiques: .....	24
I.6.5	choix du type ciment utilisé pour le traitement : .....	24
I.6.6	Domaine D'utilisation : .....	25

## **CHAPITRE II: PROGRAMME EXPERIMENTAL ET PROCEDURES D'ESSAIS\**

II.1	Description du site: .....	27
II.2	Programme expérimental.....	28
II.2.1	Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-057) : .....	28
II.2.2	Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P94-057): .....	29
II.2.3	Les limites d'Atterberg (NF P 94-051) : .....	30
II.2.4	L'essai au bleu de méthylène (NF P 94-068) : .....	31
II.2.5	Essai Proctor modifié (NF P 94-093): .....	32
II.2.6	Essai CBR (NF P 94-078): .....	33
II.2.7	Essais de compression simple (NF P 94-077) : .....	34

### CHAPITRE III: PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS

III.1	Introduction :	36
III.2	Les essais d'identification :	36
III.2.1	Analyse granulométrique:	36
III.2.2	Les limites d'Atterberg :	38
III.2.3	L'essai au Bleu de Méthylène (VBS):	39
III.3	Interprétation des résultats :	40
III.4	Essai mécanique :	42
III.4.1	Essai Proctor modifié:	42
III.4.2	Essai de CBR:	44
III.4.3	Interprétation des résultats :	46
III.4.4	Essai de compression simple :	46
III.4.5	Interprétation des résultats :	47
IV	CONCLUSION GENERALE	47
V	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54
VI	ANNEXES	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>

# ***LISTE DES FIGURES***

## ***CHAPITRE I: ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE TRAITEMENT DES SOLS***

Figure I- 1: Présentation d'un octaèdre et d'une couche octaédrique.....	1
Figure I- 2:Présentation d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique.....	2
Figure I- 3:Structure de la montmorillonite [Lambe, 1953]. ....	2
Figure I- 4:Structure de la montmorillonite [Lambe, 1953]. ....	3
Figure I- 5:Structure d'illite [Lambe, 1953]. ....	3
Figure I- 6:Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell,1986). ....	3
Figure I- 7:Classification des sols [LCPC-SETRA 1992]. ....	6
Figure I- 8:Amélioration par drainage. ....	10
Figure I- 9:Substitution méthode simple (enlèvement et remplacement) des travaux de terrassement routière. ....	10
Figure I- 10:Compactage de Sol par Rouleau de Route .....	11
Figure I- 11:traitement des sols par injection .....	11
Figure I- 12:Colonne ballastée pour amélioration des sols.....	13
Figure I- 13:stabiliser des sols avec de la chaux ou du ciment.....	16
Figure I- 14:Traitement des sols à la chaux .....	18
Figure I- 15:Traitement a la chaux ou Ciment.....	19
Figure I- 16:Procédé classique d'épandage du ciment. ....	26

## ***CHAPITRE II: PROGRAMME EXPERIMENTAL ET PROCEDURES D'ESSAIS***

Figure II- 1:Situation géographique du site de Chaaba el Hamra.....	27
Figure II- 2:Une série de tamis pour l'essai de l'analyse granulométrique. ....	29
Figure II- 3:L'Essai de Sédimentométrie .....	30
Figure II- 4:L'essai de Limite Atterberg.....	31
Figure II- 5:L'essai au Bleu de Méthylène. ....	31
Figure II- 6:Essai Proctor modife. ....	32
Figure II- 7:Appareil Essai CBR. ....	34
Figure II- 8:Essai Compression Simple.....	35

## ***CHAPITRE III: PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS***

Figure III- 1: Les Courbes des essais d'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie .....	37
Figure III- 2:La courbe de la limite de liquidité du sol non traité (Essai N°1).....	38
Figure III- 3:les limites Atterberg en fonction de teneur en ciment. ....	39
Figure III- 4:Diagramme de Casagrande .....	39
Figure III- 5:Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment .....	40
Figure III- 6:courbe Proctor de sol non traité (l'essai 02) .....	42
Figure III- 7:les courbes des essais Proctor modifié.....	42
Figure III- 8:Les teneurs en eau optimales en fonction des différents teneurs en ciment. ....	43
Figure III- 9:Les densités sèches maximales en fonction des différents teneurs en ciment .....	43

Figure III- 10:courbe CBR Immédiat de sol non traité (l'essai 01).....	44
Figure III- 11:Effet de ciment sur l'indice CBR immédiat. ....	45
Figure III- 12:Courbe CBR Imbibé du sol traité à 10% ciment.....	45
Figure III- 13:Effet de Ciment sur l'indice CBR imbibé. ....	46
Figure III- 14:Récapitulatif des courbes des essais de compression simple à 7 jour... <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure III- 15:Récapitulatif des courbes des essais de compression simple à 14 jour. <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
Figure III- 16:Récapitulatif des courbes des essais de compression simple à 28 jour. <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	

## ***LISTE DES TABLEAUX***

### ***CHAPITRE I: ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE TRAITEMENT DES SOLS***

Table I- 1:Caractéristiques de certaines familles d'argile (Morel R. 1996). .....	5
Table I- 2:les avantages et les inconvénients des différentes techniques de Stabilisation.....	9
Table I- 3:Définition des 5 classes de ciment courant .....	21

### ***CHAPITRE III: PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS***

Table III- 1:Les résultats d'essai d'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (essais n°1).....	37
Table III- 3:Les résultat de la limite de plasticité du sol non traité (Essai N°1).....	38
Table III- 4:Classification des sols selon GTR.....	41

# ***INTRODUCTION GENERALE***

L'utilisation de sols traités au ciment dans la construction routière a gagné en popularité ces dernières années en raison de ses nombreux avantages. En mélangeant du ciment avec des sols fins, il est possible de créer un matériau robuste et durable, idéal pour les fondations et les couches de base des routes. Ce processus de traitement renforce les propriétés mécaniques du sol, améliore sa stabilité et sa capacité portante, tout en réduisant les risques de détérioration due aux conditions environnementales. De plus, l'utilisation de sols traités au ciment permet souvent de réduire les coûts de construction et de favoriser une utilisation plus efficace des ressources naturelles.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude expérimentale qui a pour but de caractériser les propriétés de résistance et de déformation du sol de Chaaba el Hamra, ainsi que de déterminer les paramètres physiques et mécaniques du sol compacté dans des conditions optimales de Proctor modifié, avant et après traitement par différent pourcentage (0% sol témoin – 2% - 4% - 6% - 8% - 10%) de ciment Matine.

Ce mémoire se compose de trois chapitres :

- Le premier chapitre présente un état des connaissances sur l'utilisation de liants hydrauliques comme le ciment pour améliorer les propriétés géotechniques des sols fins.
- Le deuxième chapitre décrit le programme expérimental, ainsi que la description du site de prélèvement (Chaaba el Hamra ; wilaya de M'sila). Et regroupe l'ensemble des essais expérimentaux ainsi que les procédures suivis.
- Le troisième chapitre présente et analyse les résultats des essais effectués sur le sol avant et après traitement au ciment.
- Le mémoire se termine par une conclusion générale

# **CHAPITRE I**

## **ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE TRAITEMENT DES SOLS**

# I CHAPITRE I

## ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE TRAITEMENT DES SOLS

### I.1 Introduction:

Le traitement des sols est en effet une technique classique et éprouvée dans la construction routière. Il consiste à améliorer les caractéristiques des sols en les traitant avec des agents tels que la chaux, le ciment, les cendres volantes, les laitiers ou d'autres sous-produits industriels, ce chapitre présente les techniques de traitement disponibles, notamment le cas du traitement chimique aux liants hydrauliques et particulièrement le traitement au ciment.

### I.2 Les argiles:

#### I.2.1 Définition:

Les argiles sont des minéraux phyllosilicates hydratés, composés de feuillets élémentaires qui s'empilent pour former des particules argileuses. La structure des argiles est constituée d'empilements ou de cristallites, selon la terminologie utilisée par différents auteurs (push et al, 1999), ou cristallites par d'autres (Tessier & grimldi, 1993) . L'espace entre les feuillets est appelé espace interfoliaire.

Les particules argileuses sont formées par l'association de cristallites, qui se disposent en arrangements face à face. Dans le cas des smectites calciques, les empilements de cristallites laissent des espaces vides à l'intérieur des particules. Ces espaces vides jouent un rôle crucial lors de la dessiccation et de l'humidification des argiles.

Le nombre de feuillets par particule varie en fonction du type d'argile considéré. Dans le cas des smectites, ce nombre peut également varier en fonction de l'état hydrique de l'argile (ben rhaïem et al, 1986) .. Les smectites sont des argiles spécifiques qui présentent une capacité importante de rétention et de libération d'eau, ce qui influence leur comportement en termes de gonflement et de retrait.

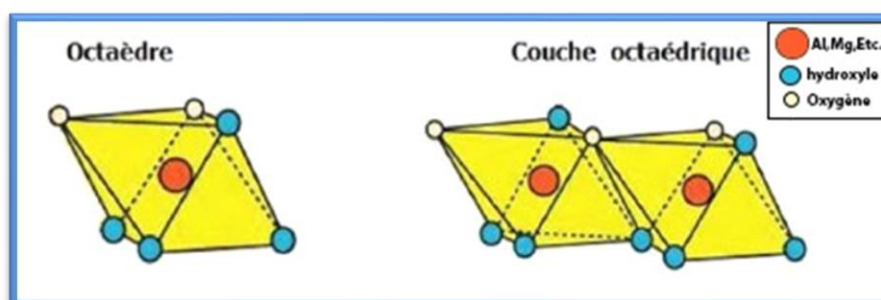


Figure I- 1: Présentation d'un octaèdre et d'une couche octaédrique

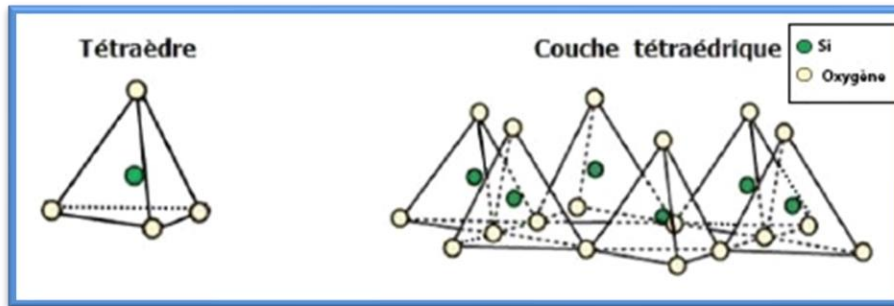


Figure I- 2:Présentation d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique

I.2.2 Les différents types d'argiles :

➤ **Kaolinite** : La kaolinite est un type d'argile qui appartient à la famille des argiles T-O (Tétraèdre-Octaèdre). Sa structure cristalline est composée d'une séquence alternée de couches de tétraèdres de silice ( $\text{SiO}_4$ ) et de couches d'octaèdres d'aluminium ou de gypsite ( $\text{Al}_2(\text{OH})_4$ ) reliées entre elles.

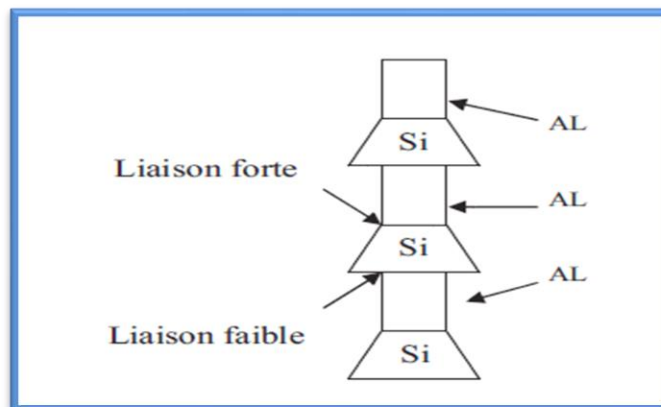


Figure I- 3:Structure de la montmorillonite [Lambe, 1953].

➤ **Montmorillonite** : la montmorillonite , parfois appelée smectite,est un minéral argileux très important qui appartient à la famille des argiles T-O-T (Tétraèdre-Octaèdre-Tétraèdre). Sa structure cristalline se compose de trois couches, avec deux couches de tétraèdres de silice ( $\text{SiO}_4$ ) et une couche d'octaèdres d'alumine (Gibbsite) située entre elles.

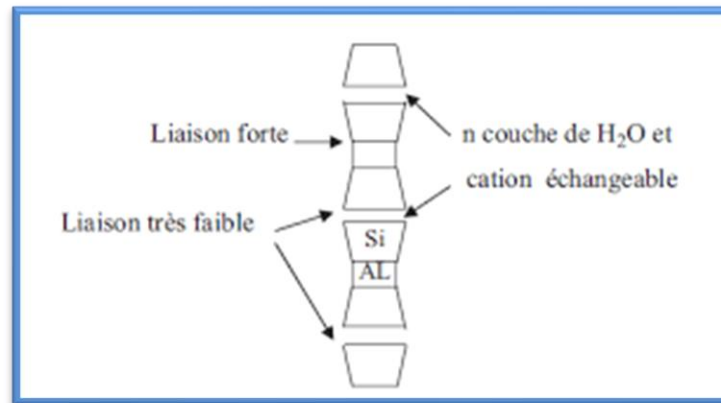


Figure I- 4:Structure de la montmorillonite [Lambe, 1953].

➤ **Illite** :l'illite est une autre composante importante des sols argileux. Sa structure est similaire à celle de la montmorillonite, mais elle contient des ions de potassium (K<sup>+</sup>) intercalés entre les feuillet tétraédriques. Cette présence d'ions potassium confère à l'illite une liaison relativement forte entre les couches, ce qui limite l'intercalation des molécules d'eau.

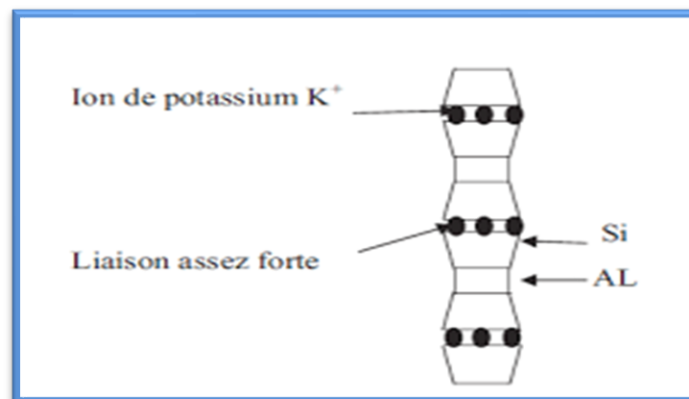


Figure I- 5:Structure d'illite [Lambe, 1953].

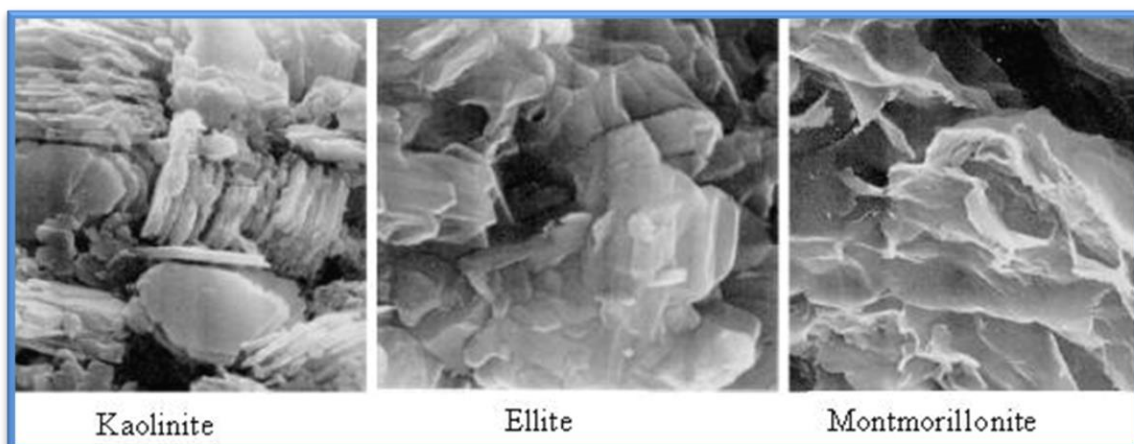


Figure I- 6:Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell,1986).

### **I.2.3 Texture des argiles :**

la texture des minéraux argileux peut varier en fonction du mode de sédimentation et de l'état de consolidation. Une roche argileuse qui présente une organisation serrée et orientée des particules d'argiles n'aura pas le même comportement de gonflement qu'un sol argileux où la sédimentation a été rapide et récente, ce qui entraîne une plus grande distance entre les plaquettes d'argile.

L'organisation des minéraux argileux est la principale cause du gonflement anisotrope, c'est-à-dire un gonflement qui se produit de manière non uniforme dans différentes directions. Cette anisotropie peut être observée lorsque les particules d'argile ont une orientation préférentielle ou sont plus fortement liées dans certaines directions.

Il est important de noter que les matériaux argileux ne sont pas composés uniquement d'argiles. Au sein de la fraction argileuse, différents types de minéraux peuvent coexister. Ainsi, la texture des matériaux argileux peut être influencée par la présence d'autres minéraux non argileux. Cette hétérogénéité rend la structure et la texture des argiles extrêmement complexes, surtout lorsque les minéraux argileux sont cimentés par d'autres minéraux, tels que des minéraux carbonatés.

Des observations microscopiques sur les argilites, effectuées par Montes et al. (cité par Wakim J., 2005), lors de cycles d'humidification et de dessiccation, ont révélé des fractures le long de surfaces localisées à proximité de matériaux rigides non gonflants. Cela montre que les variations de teneur en eau et les mouvements associés peuvent entraîner des contraintes et des fractures dans les matériaux argileux, en particulier lorsqu'ils sont en contact avec des éléments rigides qui ne gonflent pas ou peu.

En résumé, la texture des minéraux argileux, leur organisation, ainsi que la présence d'autres minéraux et de ciments peuvent influencer la structure et la complexité des matériaux argileux, notamment en ce qui concerne leur comportement de gonflement et leur réponse aux variations de teneur en eau.

Nom	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une particule ( $\mu\text{m}$ )	Epaisseur d'une particule ( $\mu\text{m}$ )	Surface spécifique $\text{m}^2/\text{g}$
Kaolinite	100-200	0,1-4	1-10	10,20
Illite	1-10	0,1-1	0,003-0,01	65-100
Montmorillonite (smectite)	1	0,1	0,001	700-840

**Table I- 1:**Caractéristiques de certaines familles d'argile (Morel R. 1996).

### I.3 Les Limons :

#### I.3.1 Définition:

Les limons, constitués de silt, de loess, possèdent un squelette siliceux à silico-calcaire à grains fins. le limon se distingue par une fraction granulométrique intermédiaire entre argile et sable dont la fraction granulométrique est de  $2/63\mu\text{m}$  [Holtz et Kovacs ; 1996] , [Robitaille et Tremblay ; 1997] , [ Dupain et Saint-Arreman ; 2009].

#### I.3.2 Particularisation spécifique des limons :

La classification d'un sol peut être déterminée en utilisant différentes méthodes et critères. Voici les principaux éléments utilisés pour la classification des sols :

❖ Courbe d'analyse granulométrique : Cette courbe permet de déterminer la répartition des différentes tailles de particules dans le sol, notamment les proportions de sable, de limon et d'argile. Cela aide à caractériser la texture du sol.

❖ Indice de plasticité (IP) et limites d'Atterberg ( $w_L$  et  $w_P$ ) : L'indice de plasticité est une mesure de la plasticité du sol, c'est-à-dire sa capacité à changer de forme sans se rompre. Les limites d'Atterberg, telles que la limite de liquidité ( $w_L$ ) et la limite de plasticité ( $w_P$ ), sont utilisées pour définir l'état de consistance du sol (sol liquide, plastique ou solide) en fonction de sa teneur en eau.

❖ Valeur Bleu Methylene (VBS) : La valeur Bleu Methylene est utilisée pour évaluer la sensibilité des sols fins aux variations de teneur en eau. Elle mesure la variation de couleur du sol lorsqu'il est soumis à des cycles d'humidification et de séchage.

❖ Argilosité et capacité d'adsorption : L'argilosité d'un sol fait référence à sa teneur en argile, qui est constituée de minéraux de petite taille. Les sols argileux ont une forte capacité d'adsorption d'eau et peuvent présenter des propriétés physico-mécaniques spécifiques telles que la plasticité, le retrait/gonflement, la compressibilité, la cohésion et une faible perméabilité.

Les limons font partie de la classe des sols fins (classe A) définie par le Guide des Travaux Routier et le LCPC-SETRA (France). Cette classe, très courante en Algérie, traitée améliorée par un mélange chaux-liant hydraulique, est utilisée comme matériau de couche de forme pour la construction des route, route à grande vitesse et autoroute [Cabane ; 2004] , [Abdo ; 2008] , [Chardard et Gandille ; 2008] .

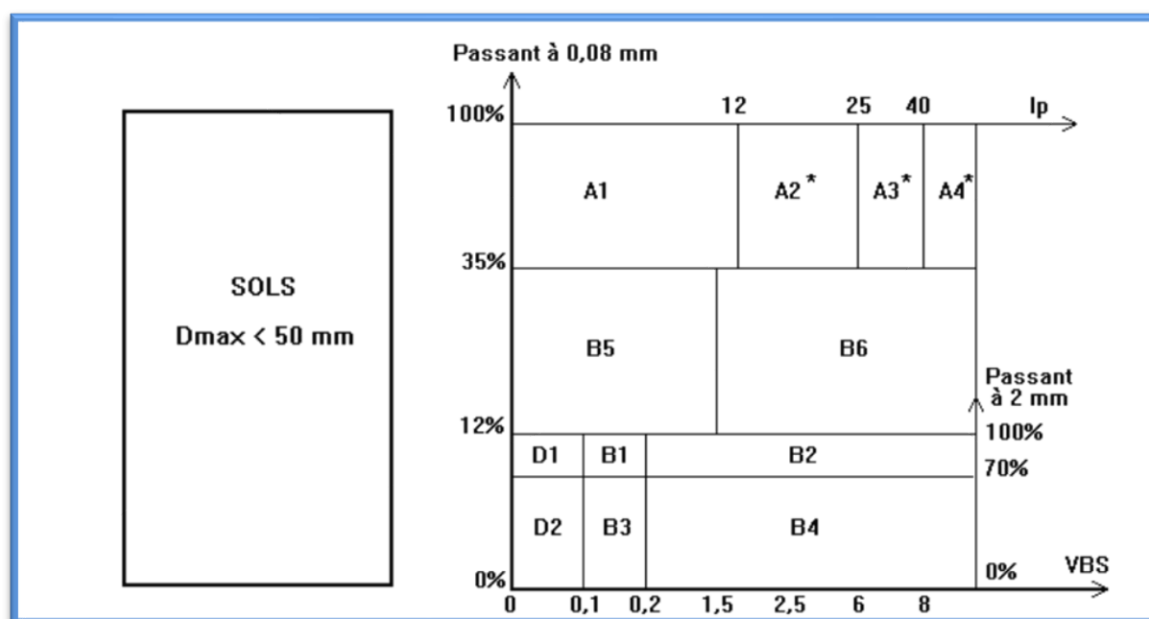


Figure I- 7:Classification des sols [LCPC-SETRA 1992].

Une classification intermédiaire peut également être utilisée pour évaluer l'état hydrique du sol en prenant en compte des paramètres tels que la teneur en eau naturelle et optimale, ainsi que l'indice portant immédiat (IPI) qui mesure la résistance au poinçonnement du sol compacté à une certaine teneur en eau.

Il est important de noter que l'étude pédologique du sol et la nature de l'eau du sol, ainsi que celle utilisée dans le traitement, sont des facteurs essentiels pour comprendre les origines des perturbations et des réactions du sol lorsqu'il est traité.

La classification des sols permet de mieux comprendre leurs propriétés et leur comportement mécanique, ce qui est crucial lors de la conception et de la construction d'infrastructures telles que les routes, les autoroutes et les voies ferrées.

#### I.4 Objectifs du traitement:

Des études géotechniques approfondies sont nécessaires pour évaluer la nature exacte des problèmes rencontrés dans les sols médiocres et les sols à problèmes, ainsi que pour déterminer les besoins spécifiques du site. En fonction des conditions spécifiques, différentes techniques de

traitements peuvent être utilisés pour répondre aux objectifs mentionnés précédemment. Certains exemples de techniques couramment utilisées sont les suivants :

❖ **Stabilisation du sol** : Utilisation de liants chimiques (comme la chaux ou le ciment) pour améliorer la stabilité et la résistance du sol, ainsi que pour réduire sa compressibilité. Les matériaux stabilisants sont mélangés au sol existant, ce qui entraîne une réaction chimique qui renforce le sol.

❖ **Consolidation du sol** : Utilisation de techniques de consolidation pour réduire la compressibilité des sols mous et augmenter leur capacité portante. Cela peut être réalisé en appliquant des techniques de préchargement, d'injection de colonnes, de drains verticaux ou d'autres méthodes visant à accélérer la consolidation du sol.

❖ **Amélioration de la capacité portante** : Utilisation de techniques de renforcement du sol, telles que l'ajout de matériaux granulaires (comme le sable ou le gravier) pour augmenter la capacité portante du sol. Cette méthode est couramment utilisée pour les sols faibles ou les sols à faible portance.

❖ **Contrôle de l'érosion** : Utilisation de revêtements protecteurs, tels que des géotextiles, des géogrilles ou des enrochements, pour stabiliser les pentes et prévenir l'érosion du sol. Des mesures de gestion des eaux pluviales peuvent également être mises en place pour contrôler le ruissellement et minimiser les effets de l'érosion.

❖ **Drainage du sol** : Installation de systèmes de drainage, tels que des drains horizontaux ou verticaux, pour améliorer le drainage des sols excessivement humides. Cela peut aider à prévenir les problèmes liés à l'excès d'eau, tels que l'affaissement du sol ou la liquéfaction.

❖ **Méthodes de compactage contrôlé** : Utilisation de techniques de compactage spécifiques pour réduire la compressibilité des sols expansifs ou pour stabiliser les sols effondrables. Le compactage est effectué en appliquant une énergie de compactage contrôlée pour obtenir une densité appropriée et minimiser les mouvements indésirables du sol.

Il est important de noter que la sélection de la méthode de traitement appropriée dépendra des caractéristiques spécifiques du sol, des conditions du site, des objectifs de construction et des considérations économiques. Une évaluation approfondie des conditions géotechniques est essentielle pour déterminer la meilleure approche de traitement des sols médiocres et des sols à problèmes.

Le guide des terrassements routiers en usage en France Classification des sol [LCPC-SETRA 1992] fixe les critères de classification des matériaux utilisables en construction routière.

### **I.5 Techniques de traitement possibles :**

Voici quelques techniques de traitement couramment utilisées pour améliorer les sols médiocres et les sols à problèmes, il existe trois techniques de traitement ou de stabilisation des sols en géotechnique routière:

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

Le choix de la technique de traitement dépend de plusieurs facteurs tels que les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée du processus de traitement, la disponibilité des produits thérapeutiques et des moyens de mise en œuvre, ainsi que les conditions environnementales. Il est important de mener une étude approfondie du sol et d'évaluer les avantages et les inconvénients de chaque technique avant de choisir la méthode de traitement appropriée.

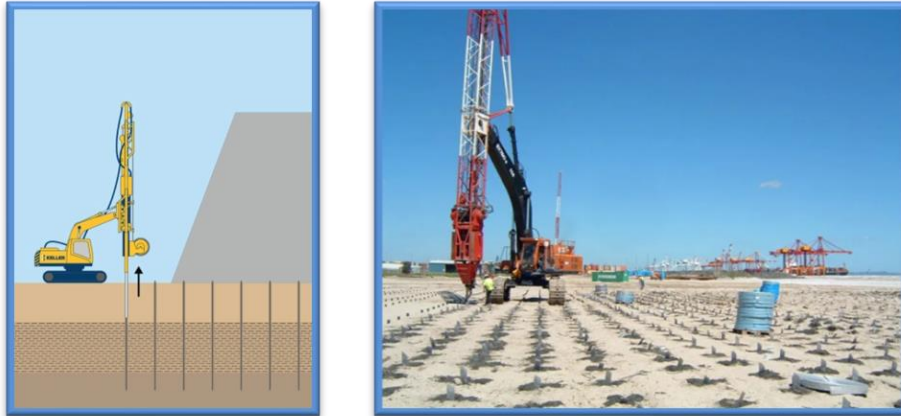
**Table I- 2:** les avantages et les inconvénients des différentes techniques de Stabilisation.

Technique	Procédés	Avantages	Inconvénient
Stabilisation Mécanique	Compactage	-Le compactage est Le plus économique -Réduire Le potentiel expansif.	-Il faut une grande quantité d'eaux (compacter au-dessus de l'optimum avec une $W_n$ élevée).
	Substitution		- l'épaisseur de la couche. -la disponibilité du matériau.
	Péhumidification		-le temps de l'opération. -la distribution uniforme de $W_n$ .
	Méthode de controle	-Minimiser l'humidification ou des séchement.	-la sensibilité a la variation de la teneur en eau.
Stabilisation Thermique	Augmenter la température	-Réduire la répulsion électrique entre les particules .	Très couteuse.
Stabilisation Chimique (par ajout des matériaux)	Les sels	-augmenter la concentration ionique de l'eau libre. -réduire le phénomène d'échange.	-Le choix de type de dosage et de la méthode d'addition d'un produit.
	Le ciment	-augmenter la résistance -diminuer la plasticité. -réduire le potentiel de variation de volume. -augmenter la limite de retrait.	-utilisation d'une dosage important.
	La chaux	-diminuer la plasticité , la densité sèche et la pression de gonflement -augmenter la résistance et $W_{opt}$ . -utilisation d'un faible dosage .	-Carbonation de la chaux .

### I.5.1 Le traitement mécanique :

#### I.5.1.1 Drainage :

L'amélioration par drainage est une technique utilisée pour améliorer les caractéristiques des sols en réduisant les problèmes d'excès d'eau et en favorisant un meilleur écoulement de l'eau.



**Figure I- 8:**Amélioration par drainage.

#### I.5.1.2 Substitution:

L'amélioration des sols par substitution est une technique qui consiste à remplacer une partie ou la totalité du sol existant par un matériau de substitution plus adapté ou de meilleure qualité. Cela vise à améliorer les caractéristiques du sol pour répondre aux exigences spécifiques du projet ou pour remédier à des problèmes liés au sol existant.



**Figure I- 9:**Substitution méthode simple (enlèvement et remplacement) des travaux de terrassement routière.

### I.5.1.3 Compactage :

Le compactage est une technique couramment utilisée pour améliorer les sols en augmentant leur densité et leur stabilité. L'objectif principal du compactage est de réduire les vides entre les particules du sol, ce qui améliore la portance, la résistance à la compression et la perméabilité du sol.



**Figure I- 10:**Compactage de Sol par Rouleau de Route

### I.5.1.4 Préhumidification:

La préhumidification est une technique utilisée pour améliorer les sols avant de les compacter. Elle consiste à ajouter de l'eau au sol avant le compactage afin d'atteindre une teneur en eau optimale pour obtenir la densité et la compaction souhaitées.

### I.5.1.5 Par injection:

L'amélioration des sols par injection est une technique utilisée pour renforcer et stabiliser les sols en injectant des matériaux spécifiques à l'intérieur du sol. Cette méthode vise à améliorer les caractéristiques du sol en augmentant sa résistance, sa portance et sa stabilité.



**Figure I- 11:**traitement des sols par injection

**I.5.1.6 Pré-chargement:**

La pré-chargement est une technique utilisée pour améliorer les sols compressibles ou les sols faibles en réduisant leur tassement potentiel avant la construction. Cette méthode consiste à appliquer une charge statique sur le sol pendant une période prolongée afin de provoquer un tassement préalable contrôlé.

**I.5.1.6.1 Les avantages :**

- ❖ Ne nécessite que du matériel de terrassement conventionnel.
- ❖ Tout entrepreneur peut effectuer le travail (technique simple).

**I.5.1.6.2 Les Inconvénients :**

- ❖ Temps de téléchargement long, jusqu'à plusieurs mois ou années.
- ❖ Transport de grandes quantités de terre.
- ❖ Surface de remplissage importante (>10 fois de la dimension horizontale de la construction).

**I.5.1.7 Colonnes ballastées :**

Les colonnes ballastées, également connues sous le nom de colonnes de gravier, sont une technique d'amélioration des sols utilisée pour renforcer les sols mous, compressibles ou instables. Cette méthode consiste à installer des colonnes verticales dans le sol en utilisant des matériaux granulaires tels que le gravier ou les granulats. Voici comment les colonnes ballastées peuvent contribuer à l'amélioration des sols :

❖ Les colonnes ballastées renforcent le sol en augmentant sa capacité portante et sa résistance. Les colonnes verticales agissent comme des éléments de support qui répartissent la charge appliquée sur une plus grande surface du sol. Elles réduisent la compression du sol en répartissant les contraintes verticales sur une plus grande profondeur, ce qui renforce le sol et réduit les risques de tassement excessif.

❖ Les colonnes ballastées stabilisent les sols instables en améliorant leur cohésion et leur stabilité. Les colonnes agissent comme des éléments de confinement qui empêchent le mouvement latéral des particules du sol, en particulier dans les sols granulaires ou sableux. Elles réduisent les risques de glissements de terrain ou de mouvements de terrain, fournissant ainsi une base solide pour les structures.

❖ Les colonnes ballastées peuvent améliorer le drainage du sol en favorisant l'écoulement de l'eau. Les espaces entre les colonnes permettent à l'eau de circuler verticalement, réduisant ainsi la saturation du sol. Cela est particulièrement bénéfique pour les sols argileux ou limoneux qui ont une faible perméabilité naturelle. L'amélioration du drainage contribue à réduire les problèmes liés à la consolidation, à l'affaissement ou à la liquéfaction du sol.

❖ Les colonnes ballastées aident à réduire les mouvements différentiels du sol. En renforçant le sol de manière uniforme, elles minimisent les variations de tassement entre différentes parties du sol, ce qui réduit les risques de dommages aux structures dues aux mouvements différentiels. Cela est particulièrement important dans les projets nécessitant une répartition homogène des charges, tels que les routes, les plateformes industrielles ou les fondations de bâtiments.

❖ Les colonnes ballastées offrent une flexibilité dans la conception, car elles peuvent être adaptées aux conditions spécifiques du sol et aux exigences du projet. Les colonnes peuvent être installées à différentes profondeurs, espacements et diamètres en fonction des caractéristiques du sol et des charges attendues. Cela permet d'optimiser la performance de l'amélioration du sol en fonction des besoins spécifiques de chaque projet.

Il est important de noter que la conception et l'installation des colonnes ballastées nécessitent une expertise technique et une évaluation géotechnique approfondie. Les ingénieurs géotechniciens ou les professionnels du génie civil sont généralement impliqués dans la conception et la mise en œuvre de cette technique pour garantir son efficacité.



**Figure I- 12: Colonnes ballastées pour amélioration des sols**

**I.5.2 Traitement thermique :**

Le traitement thermique est une technique d'amélioration des sols qui utilise la chaleur pour modifier les propriétés du sol et renforcer sa performance géotechnique. Cette méthode est principalement utilisée pour les sols argileux ou les sols contenant une quantité élevée d'eau, qui peuvent présenter des problèmes tels que la faible portance, la faible perméabilité, l'instabilité ou la sensibilité à l'eau.

**I.5.3 Traitement chimique:**

Le traitement chimique est une technique d'amélioration des sols qui utilise des produits chimiques pour modifier les propriétés du sol et renforcer sa performance géotechnique. Cette méthode est principalement utilisée pour les sols instables, les sols expansifs, les sols faiblement portants ou les sols à faible perméabilité , on en distingue trois types:

### I.5.3.1 Traitement par ajout de matériaux inertes :

Le traitement par ajout de matériaux inertes comme les sables et les graviers utilisés en mélange avec le sol est une technique couramment utilisée pour améliorer les sols faibles ou instables. Cette méthode consiste à incorporer des matériaux inertes, tels que le sable, le gravier ou les granulats, dans le sol existant afin de renforcer ses propriétés géotechniques.

### I.5.3.2 Traitement par addition de solutions salines :

**Le traitement par addition de solutions salines (NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>) est une technique utilisée pour améliorer les sols expansifs ou argileux. Cette méthode implique l'application de solutions salines sur le sol afin de modifier ses propriétés géotechniques.**

### I.5.3.3 Traitement chimique par additifs :

**Le traitement chimique avec des additifs est une méthode couramment utilisée pour améliorer les propriétés du sol. Cette technique consiste à ajouter des additifs chimiques spécifiques au sol afin de modifier ses propriétés géotechniques. Voici quelques types d'additifs chimiques couramment utilisés pour l'amélioration des sols :**

❖ Les stabilisants chimiques, tels que le ciment, la chaux ou les liants hydrauliques, sont utilisés pour augmenter la résistance et la cohésion du sol. Ils interagissent avec les particules du sol, formant de nouvelles liaisons ou renforçant celles qui existent déjà. Cela améliore la capacité portante du sol, réduit les risques de tassement et de glissement et améliore la stabilité globale du sol.

❖ Certains additifs chimiques peuvent réduire la plasticité des sols, en particulier les sols argileux. Les agents réducteurs de plasticité réduisent la sensibilité des sols aux changements d'humidité, ce qui réduit le risque de déformation et d'instabilité. Ils aident à maintenir la cohésion du sol tout en permettant un meilleur compactage et une meilleure manutention des matériaux.

❖ Les agents d'éclaircissage chimiques sont utilisés pour briser les agrégats du sol, faciliter la pénétration de l'eau et améliorer la perméabilité du sol. Ces additifs chimiques peuvent être utilisés pour traiter des sols argileux ou des sols compacts à faible perméabilité, permettant un meilleur drainage et une meilleure gestion des eaux souterraines.

❖ Les agents imperméabilisants sont utilisés pour réduire la perméabilité du sol. Ces additifs chimiques forment une barrière étanche autour des particules de sol, ce qui réduit la migration de l'eau à travers le sol. Cette technique est couramment utilisée dans la construction de barrages, de tunnels ou de réservoirs où l'imperméabilisation du sol est nécessaire.

❖ Certains additifs chimiques peuvent être utilisés pour stabiliser les pentes des ponts ou des barrages. Ces agents renforcent les sols en augmentant la résistance au cisaillement et en améliorant

la cohésion des particules. Cela aide à prévenir les glissements de terrain et les effondrements de pente, assurant la stabilité et l'intégrité des structures environnantes.

L'utilisation d'additifs chimiques pour l'amélioration des sols doit être soigneusement évaluée en fonction des propriétés spécifiques du sol, des conditions environnementales et des objectifs du projet. Les quantités et les types d'additifs chimiques, ainsi que les méthodes d'application, doivent être déterminés par des ingénieurs civils spécialisés ou des géotechniciens. Il est également important de tenir compte des considérations environnementales et des réglementations locales lors de l'utilisation d'additifs chimiques dans les projets de construction.

#### **I.5.3.4 Traitement chimique par ajout de ciment :**

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

- ❖ Temps de prise assez long pour la mise en œuvre.
- ❖ Bonne résistance à moyen et long terme.
- ❖ Compatibilité avec le sol à traiter.
- ❖ Bon rapport qualité/prix.

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

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

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

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

#### **I.5.3.4.1 Techniques de réalisation des travaux de traitement :**

Les travaux de traitement et d'amélioration des sols peuvent être réalisés en utilisant différentes techniques. Voici quelques-unes des techniques couramment utilisées :

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



**Figure I- 13:**stabiliser des sols avec de la chaux ou du ciment

### I.5.3.5 Traitement chimique par ajout de la Chaux :

#### I.5.3.5.1 Définition :

La chaux est un liant minéral largement utilisé dans l'histoire de la construction et dans l'amélioration des sols. Lorsqu'on ajoute de 2% à 8% de chaux à un sol expansif, cela diminue visiblement son potentiel de gonflement. La chaux a une grande affinité pour l'eau, ce qui lui permet d'absorber une grande partie de l'eau présente dans le sol, contribuant ainsi à la réduction du potentiel de gonflement.

Des études sur le compactage des sols ont montré que l'ajout de faibles quantités de chaux peut augmenter le poids volumique à l'optimum Proctor. Par exemple, dans le projet de construction de l'aéroport de Dallas aux États-Unis, une couche de sol a été traitée avec l'ajout de chaux sur une épaisseur de 2,5 à 5 mètres. Le potentiel de gonflement du sol, qui était d'environ 10%, a été réduit à des valeurs satisfaisantes. Cette même technique a été utilisée dans la construction d'autoroutes aux États-Unis.

Cependant, il est important de noter que dans certains cas, lorsque le sol expansif contient des proportions importantes de gypse ou de sulfate (>3%), l'ajout de chaux peut entraîner un soulèvement plutôt qu'une stabilisation. Des réactions expansives peuvent se produire en présence de sulfate, notamment la formation d'ettringite et de traumatise, qui provoquent des expansions significatives du sol.

L'effet de l'expansion de l'ettringite peut être réduit en ajoutant un ciment résistant au sulfate. Il est donc essentiel de réaliser une analyse approfondie de faisabilité et de mise en œuvre avant d'appliquer le traitement à la chaux à un sol expansif. De plus, le traitement à la chaux réduit l'indice de plasticité du sol et augmente la limite de retrait de la montmorillonite, ce qui améliore les propriétés mécaniques du sol.

Cependant, il convient de noter que l'efficacité du traitement à la chaux peut varier selon les conditions locales, notamment les cycles d'humidification et de séchage. Dans certaines régions, l'ajout d'un faible pourcentage de cendres volantes peut améliorer les résultats. Il est également important de souligner que le traitement à la chaux ne constitue pas une imperméabilisation du sol, mais plutôt une réduction du potentiel de gonflement.

#### I.5.3.5.2 Différents types de chaux :

La chaux est produite en calcinant un calcaire, qui représente environ 20% de la croûte terrestre. Selon la nature du calcaire utilisé, plusieurs types de chaux peuvent être fabriqués :

❖ **Chaux aérienne** : Elle est obtenue à partir d'un calcaire pur. Elle se présente sous deux formes principales :

❖ **Chaux vive** : Aussi appelée chaux non éteinte, elle est obtenue par la calcination du calcaire à une température élevée (environ 900 à 1000°C) sans contact avec l'eau. La chaux vive réagit vivement avec l'eau, libérant de la chaleur et formant de l'hydroxyde de calcium.

❖ **Chaux éteinte** : Également appelée chaux hydratée, elle est obtenue en éteignant la chaux vive avec de l'eau. Cette réaction chimique produit de l'hydroxyde de calcium hydraté, qui est la forme utilisée dans de nombreux domaines, y compris l'amélioration des sols.

❖ **Chaux magnésienne** : Elle est produite à partir d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium. La chaux magnésienne possède des propriétés spécifiques en raison de la présence de magnésium, ce qui peut influencer son utilisation dans certains cas.

❖ **Chaux hydraulique** : Elle est obtenue à partir d'un calcaire argileux. La présence d'argile confère à la chaux des propriétés hydrauliques, ce qui signifie qu'elle peut durcir même en présence d'eau. La chaux hydraulique est utilisée dans des applications où une prise et un durcissement rapides sont nécessaires, tels que les travaux de construction.

Dans le domaine de la technique routière, les chaux aériennes sont principalement utilisées. Elles peuvent être utilisées sous forme de chaux vive ou de chaux éteinte, en fonction des besoins spécifiques du projet



**Figure I- 14:**Traitement des sols à la chaux

#### **I.5.3.5.3 Traitement mixte à la chaux et au ciment:**

Le traitement mixte à la chaux et au ciment constitue un compromis entre les traitements individuels à la chaux et au ciment, qui sont recommandés respectivement pour les sols trop humides et peu argileux destinés à être utilisés dans les couches de forme routières.

L'action de ces deux liants est complémentaire : le traitement à la chaux permet d'assécher les matériaux humides, tandis que le traitement au ciment apporte une rigidification rapide au mélange. Ainsi, en réalisant un traitement préalable à faible dose avec de la chaux (0,5 à 2%), on amène le sol à un état optimal pour recevoir le traitement au ciment.

L'effet du traitement mixte à la chaux (1% de CaO) et au ciment (4% de CPJ-CEM II/A 32,5) peut être observé sur les courbes de compactage et de portance, qui permettent de déterminer les caractéristiques de mise en œuvre des sols traités pour les couches de forme.

Sur la courbe de compactage, on observe une diminution de la densité sèche maximale du sol traité et une augmentation de la teneur en eau optimale, ce qui se traduit par un décalage de la courbe de compactage vers la ligne de saturation. Cela indique une meilleure capacité d'assèchement du sol traité grâce à l'ajout de la chaux.

Sur la courbe de portance, on observe une augmentation de l'indice portant immédiat, qui correspond à la capacité du sol traité à supporter des charges immédiates. Cette augmentation est obtenue en utilisant une teneur en eau de mise en œuvre égale à 90% de la teneur en eau optimale, ce qui permet d'obtenir une meilleure portance du sol traité.

En résumé, le traitement mixte à la chaux et au ciment combine les avantages des deux liants pour améliorer les caractéristiques des sols destinés aux couches de forme routières. Il permet d'assécher les sols humides grâce à l'action de la chaux et de fournir une rigidification rapide grâce à l'ajout de ciment. Cela permet d'obtenir des sols traités avec une meilleure densité, une meilleure portance et une résistance accrue aux charges.



**Figure I- 15:**Traitement a la chaux ou Ciment

## I.6 Traitement des sols par le ciment :

### I.6.1 Les ciments :

#### I.6.1.1 Définition :

Effectivement, le ciment est généralement fabriqué en chauffant à environ 1450°C un mélange de calcaire et d'argile. Cette cuisson permet d'obtenir des nodules durs appelés clinkers. En broyant très finement ces clinkers et en ajoutant un peu de gypse, on obtient le ciment Portland.

Il est également possible d'obtenir d'autres types de ciment en mélangeant le clinker broyé avec d'autres constituants qui présentent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques. Ces constituants peuvent être des laitiers de hauts fourneaux granulés, des cendres volantes ou des pouzzolanes, qu'elles soient naturelles ou artificielles.

Il existe également des ciments spéciaux tels que les ciments alumineux ou les ciments sur-sulfatés. Ces ciments ont des caractéristiques particulières qui les rendent adaptés à des utilisations spécifiques.

La principale utilisation du ciment est dans la fabrication du béton, où il agit comme composant actif. Le béton est largement utilisé dans la construction pour ses propriétés de résistance et de durabilité. Le ciment entre également dans la composition des mortiers utilisés pour les maçonneries ou les enduits.

Il est intéressant de noter que le ciment, tel que nous le connaissons aujourd'hui, est un matériau relativement récent. Son invention remonte à 1824 lorsque l'écossais Aspdin a breveté la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il a appelé "ciment Portland". Ce nom a été choisi en raison de la similitude de l'aspect durci du liant avec la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland. Depuis cette invention, le ciment a connu un développement continu et a progressivement remplacé la chaux dans de nombreuses applications.

Au cours du XXe siècle, les ciments artificiels ont pris de plus en plus d'importance, notamment dans le domaine de la construction de logements neufs à partir d'éléments préfabriqués. Les performances supérieures des ciments par rapport à la chaux ont contribué à leur popularité croissante. Les progrès dans les techniques de fabrication, tels que l'utilisation de fours rotatifs et de broyeurs à boulets, ont également contribué à l'augmentation de la production de ciment.

Le tableau 1 mentionné dans le texte donne des informations sur les différentes classes de ciment selon la norme NF EN 197-1. Les classes CEMI à CEMV correspondent aux classes courantes de ciment, et le tableau indique la proportion de clinker, constituant de base du liant hydraulique, pour chaque classe

Table I- 3: Définition des 5 classes de ciment courant

Classe	Dénomination	Proportion de clinker (%)	Autres constituants principaux (%)
CEMI	Ciment Portland	95-100	-
CEMII	Ciment Portland composé	65-94	6-35 Laitier de haut fourneau (S) Fumée de silice (D) Pouzzolane naturelle (P) Pouzzolane naturelle calcinée (Q) Cendre volante siliceuse (V) Cendre volante calcique (W) Schiste calciné (T) Calcaire (L) (LL)
CEMIII	Ciments de hauts fourneaux	5-64	36-95 Laitier de haut fourneau (S)
CEMIV	Ciments pouzzolaniques	45-89	11-55 Fumée de silice (D) Pouzzolane naturelle (P) Pouzzolane naturelle calcinée (Q)
CEMV	Ciments au laitier et aux cendres ou ciment composé	20-64	36-80 Laitier de haut fourneau (S) Pouzzolane naturelle (P) Pouzzolane naturelle calcinée (Q) Cendre volante siliceuse (V)

### I.6.2 Types de ciment :

La classification des principaux ciments selon la classification NA, largement inspirée d'AFNOR, en fonction de leur composition et de leur résistance, est la suivante :

❖ Les ciments CPA (Ciments Portland purs) : Ils sont composés uniquement de clinker, qui est un constituant principal du ciment. Les ciments CPA ne contiennent pas d'ajouts supplémentaires.

❖ Les ciments CPJ (Ciments Portland composés) : Ils contiennent au moins 65% de clinker, ainsi que des ajouts tels que du calcaire, des fillers ou des pouzzolanes. Les ciments CPJ sont les plus couramment utilisés en Algérie.

❖ Les ciments CHF (Ciments de hauts-fourneaux) : Ils contiennent entre 60 et 75% de laitier de hauts-fourneaux, qui est un sous-produit de la production de fonte dans les hauts-fourneaux.

❖ Les ciments CLK (Ciment de laitier de clinker) : Ils contiennent 80% de laitier de hauts fourneaux mélangé à du clinker.

❖ Les ciments CLX (Ciment de laitier à la chaux) : Ils sont composés de laitier mélangé à de la chaux.

❖ Les ciments prompts : Ce sont des ciments à prise rapide qui durcissent rapidement après leur mélange avec de l'eau.

En plus de leur composition, les ciments sont également classés en fonction de leur résistance à la compression. Les types de ciments les plus couramment produits et commercialisés en Algérie sont les CPJ 32.5 et 42.5, qui sont les plus demandés. Le CRS (Ciment résistant aux sulfates) est également largement utilisé dans les régions du sud de l'Algérie en raison de ses propriétés spécifiques pour résister à l'attaque des sulfates.

Le ciment fabriqué localement en Algérie est généralement livré en vrac, mais il est également disponible en sacs de 50 kg, qui sont souvent des sacs double ou triple plis pour assurer une meilleure résistance à l'emballage.

### **I.6.3 Réactions physico-chimiques du ciment :**

Effectivement, le ciment est un liant hydraulique qui, lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par le processus d'hydratation. Une fois durci, le ciment conserve sa résistance et sa stabilité, même en présence d'eau.

Le ciment Portland est l'une des variétés de ciment les plus couramment utilisées. Sa composition typique est principalement constituée de clinker, qui est un matériau produit par la cuisson d'un mélange spécifique de calcaire et d'argile. La composition typique du clinker de ciment Portland est la suivante :

67% de CaO (oxyde de calcium)

22% de SiO<sub>2</sub> (dioxyde de silicium)

5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (oxyde d'aluminium)

3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (oxyde de fer)

3% d'autres composés

Le clinker de ciment Portland contient quatre phases principales :

L'alite (3CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>3</sub>S) : C'est la phase principale responsable de la résistance mécanique initiale du ciment durci.

La bélite (2CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>2</sub>S) : Elle contribue également à la résistance mécanique du ciment, mais sa réactivité est plus lente que celle de l'alite.

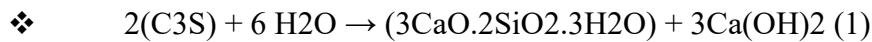
La célite : C'est un mélange d'aluminate de calcium (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C<sub>3</sub>A) et de ferroaluminate de calcium (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C<sub>4</sub>AF). Ces phases contribuent à la réactivité du ciment et peuvent influencer certaines propriétés spécifiques.

D'autres phases, telles que les sulfates d'alcalins ou l'oxyde de calcium, peuvent également être présentes en très faibles quantités dans le clinker de ciment Portland.

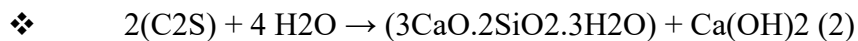
Il est important de noter que les proportions exactes des composants peuvent varier en fonction du type spécifique de ciment Portland et de sa classe de résistance.

### I.6.3.1 Réactions chimiques :

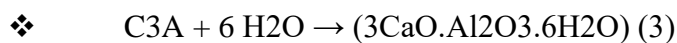
Les réactions chimiques décrites sont responsables de l'hydratation du ciment en présence d'eau, ce qui entraîne sa solidification. Voici une explication de ces réactions :



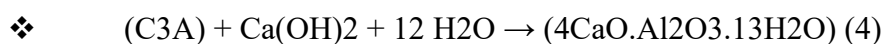
Cette réaction implique l'alite (C3S) et l'eau, produisant du silicate de calcium hydraté ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) et de l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Cette réaction est rapide et contribue à l'augmentation des résistances mécaniques à court terme.



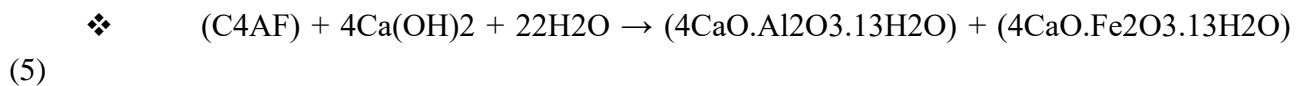
Dans cette réaction, le belite (C2S) réagit avec l'eau pour former du silicate de calcium hydraté ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) et de l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Cette réaction est plus lente que la réaction (1) et contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques à long terme.



L'aluminate tricalcique (C3A) réagit avec l'eau pour produire de l'hydrate de calcium alumineux ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ).



Cette réaction implique l'aluminate tricalcique (C3A), l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) et l'eau, formant de l'hydrate de calcium alumineux ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ).



La réaction (5) concerne le ferroaluminate de calcium (C4AF), l'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) et l'eau, produisant de l'hydrate de calcium alumineux ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ) et de l'hydrate de calcium ferrique ( $4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ).

Pour retarder la prise en masse du ciment, on ajoute du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), qui réagit avec l'aluminate tricalcique pour former des cristaux d'étrangéité ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ).

Lorsque le ciment est mélangé avec de l'argile ou de la latérite en présence d'eau, les mêmes réactions chimiques se produisent que dans les mélanges d'argile et de chaux. La portlandite produite lors de l'hydratation du ciment réagit avec le dioxyde de carbone de l'air et les minéraux argileux pour former respectivement de la calcite et du silicate de calcium ou de l'hydrate de calcium alumineux.

Il est également mentionné que l'échange cationique et la floculation-agglomération se produisent dans les mélanges d'argile et de ciment. Cependant, la réaction pouzzolanique impliquant les minéraux argileux n'est pas prédominante en raison de la présence abondante de portlandite dans le ciment.

#### I.6.4 Réactions physiques:

Pendant la prise du ciment, différentes réactions physiques se produisent. Voici une explication de ces réactions:

❖ Formation d'une pâte de particules solides : Lorsque le ciment est mélangé avec de l'eau, une réaction chimique d'hydratation se produit, formant une pâte composée de particules solides. Les espaces entre les particules sont interconnectés et remplis d'eau capillaire.

❖ Formation d'un revêtement d'étrangéité : À la surface des grains de ciment, se forme un revêtement d'étrangéité. Ce revêtement empêche une prise trop rapide du ciment et permet un développement plus contrôlé des réactions d'hydratation.

❖ Formation de cristaux fibreux (CSH) : Environ deux heures après le début de la prise, des cristaux fibreux appelés silicates de calcium hydratés (CSH) se forment. Ces cristaux sont souvent désignés sous le nom de tobermorite. Ils se développent dans la pâte de ciment et jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des propriétés mécaniques des mélanges argile-ciment ou latérite-ciment.

❖ Les cristaux de tobermorite lient les composants du mélange argile-ciment, renforçant ainsi la structure globale et contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau durci.

Il est important de noter que ces réactions physiques et chimiques se produisent progressivement et peuvent varier en fonction des types de ciment, des conditions environnementales et des proportions des mélanges utilisés.

#### I.6.5 choix du type ciment utilisé pour le traitement :

Lors du choix du type de ciment pour le traitement des sols, plusieurs critères doivent être pris en compte :

❖ **Temps de prise** : Il est préférable de choisir un ciment avec un temps de prise suffisamment long pour permettre une mise en œuvre adéquate sur le site. Cela permet de travailler avec le matériau pendant une période appropriée avant qu'il ne commence à durcir.

❖ **Résistance à moyen et long terme** : La résistance du ciment est un facteur important à considérer. Il est nécessaire de choisir un ciment qui offre une bonne résistance à moyen et long terme, assurant ainsi la durabilité et la stabilité des structures construites sur le sol traité.

❖ **Compatibilité avec le sol** : Il est essentiel de choisir un ciment qui soit compatible avec le sol à traiter. Certains sols peuvent avoir des caractéristiques particulières qui nécessitent l'utilisation d'un type spécifique de ciment pour obtenir les résultats souhaités. La compatibilité entre le ciment et le sol garantit une réaction appropriée et une amélioration efficace des propriétés du sol.

❖ **Rapport qualité/prix** : Le coût est un facteur important dans tout projet de construction. Il est donc judicieux de choisir un ciment qui offre un bon rapport qualité/prix, en fournissant les performances requises à un coût raisonnable.

Dans le domaine du traitement des sols, les ciments de haut-fourneau de classe de résistance 32,5 N ou 42,5 N (CEM III) sont généralement les plus couramment utilisés. Ces ciments offrent une combinaison appropriée de résistance, de durabilité et de rapport qualité/prix. En revanche, les ciments à prise rapide (CEM I) ne sont généralement pas recommandés pour le traitement des sols, car leur durcissement rapide peut limiter la possibilité de travailler avec le matériau sur le site.

#### **I.6.6 Domaine D'utilisation :**

Pour les projets de construction nécessitant des résistances mécaniques élevées mais ne présentant pas de besoins spécifiques en termes de béton exposé à des conditions sévères, les deux classes de ciment couramment utilisées sont les ciments de classe de résistance 32,5 N et 42,5 N.

Ces deux classes de ciment offrent des résistances mécaniques élevées et conviennent à la plupart des applications courantes dans la construction, telles que les fondations, les dalles, les murs, etc. Elles sont adaptées aux charges normales et aux contraintes structurelles habituelles.

L'utilisation de ces classes de ciment garantit des performances adéquates en termes de résistance, de durabilité et de stabilité des structures, tout en étant économiquement avantageuse. Ces ciments répondent aux exigences de nombreux projets de construction standards.

Cependant, si le projet implique des conditions plus sévères, telles que des environnements chimiquement agressifs ou des besoins spécifiques en résistance à la chaleur, il peut être nécessaire d'utiliser d'autres types de ciments spécifiquement conçus pour répondre à ces exigences particulières.



**Figure I- 16:**Procédé classique d'épandage du ciment.

---

**CHAPITRE II**

**PROGRAMME**

**EXPERIMENTAL ET**

**PROCEDURES D'ESSAIS**

## CHAPITRE II

### PROGRAMME EXPERIMENTAL ET PROCEDURES D'ESSAIS

#### II.1 Description du site:

Le site de Chaaba El Hamra est située au Nord de Cité Boukhmisa (Nord de la commune de M'sila), près de l'intersection de la route nationale RN45 avec l'évitement Nord– Este de M'sila (figure II.1). Le site est situé entre les lignes latitudinales ( $35^{\circ}49' 24''$ ) et longitudinales ( $4^{\circ}32' 26''$ ), à une altitude moyenne de 597 m. L'extension du site de cette zones comporte la construction des infrastructures routier comme un échangeur (ouvrage d'art) et une maison de maintenance a été construite pour la Direction des Travaux Publics Avec l'extension urbaine de la zone ainsi que les équipements (station de service, restaurants ... etc.) de l'autre côté de la route.



**Figure II- 1:**Situation géographique du site de Chaaba el Hamra

## **II.2 Programme expérimental**

I Le programme expérimental a été réalisé dans laboratoire du génie civil de l'université de M'sila en parallèle avec le laboratoire de travaux publique LTPC antenne de M'sila et le laboratoire Laboratoire de Travaux Publics et Batiments Derardja Farid Sidi Aissa.

Ce programme est réparti en deux parties :

### **Essais d'identifications:**

- L'analyse granulométrique (par tamisage) (NF P 94-057).
- L'analyse granulométrique (par sédimentométrie).
- Les limites d'Atterberg.
- L'essai au bleu de méthylène.

### **Essais mécaniques**

- Essais Proctor Modife.
- Essais CBR (Imbibé, Immédiat).
- Essais de compression simple.

#### **II.2.1 Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-057) :**

L'essai décrit consiste à déterminer la distribution granulométrique des particules constituant le squelette des sols, dans le but de les classer. Voici les étapes de cet essai :

- Une masse connue de matériau est prélevée.
- Le matériau est brassé sous l'eau afin de séparer les grains agglomérés.
- Une fois séché, le matériau est fractionné en utilisant une série de tamis (2-1-0.63-0.5-0.315-0.2-0.16-0.08) de différentes tailles.
- Le refus cumulé, c'est-à-dire la masse des particules retenues sur chaque tamis, est mesuré successivement.
- La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon initial soumis à l'analyse.
- Ce procédé permet d'obtenir des informations sur la répartition des différentes tailles de particules dans le matériau, ce qui est important pour la classification et l'étude des propriétés du sol.



**Figure II- 2:**Une série de tamis pour l'essai de l'analyse granulométrique.

### **II.2.2 Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P94-057):**

Dans le contexte de l'essai décrit, une fraction spécifique de particules, celles ayant une taille inférieure à 80  $\mu\text{m}$ , est séparée du reste du sol par tamisage. Cette fraction est ensuite mise en suspension dans de l'eau à laquelle une défloculation a été ajoutée. La défloculation aide à disperser les particules et à empêcher leur agrégation.

Une fois en suspension, les particules commencent à se déposer ou à sédimenter à des vitesses différentes en fonction de leur taille. Plus précisément, les particules plus grandes ont tendance à se déposer plus rapidement que les particules plus petites.

Pour mesurer l'évolution de ce processus de sédimentation, un densimètre est utilisé. Le densimètre permet de mesurer la masse volumique de la solution, qui varie à mesure que les particules se déposent. De plus, la profondeur d'immersion de l'appareil dans la solution est également mesurée au fil du temps.

À partir des données obtenues à l'aide du densimètre, il est possible de calculer la distribution pondérale de la taille des particules dans la suspension. Cette distribution pondérale indique la proportion de particules de différentes tailles présentes dans l'échantillon, ce qui fournit des informations sur la granulométrie du sol étudié.



**Figure II- 3:**L'Essai de Sédimentométrie

### **II.2.3 Les limites d'Atterberg (NF P 94-051) :**

Les limites de consistance, également connues sous le nom de limites d'Atterberg, sont des indices importants en géotechnique. Elles sont mesurées à l'aide d'un appareillage normalisé sur le mortier, c'est-à-dire la fraction de sol qui passe au tamis de 400 mm. Trois limites sont définies :

**Limite de liquidité ( $w_L$ ) :** C'est le point auquel un sol passe de l'état liquide à l'état plastique. Il est déterminé en mesurant la teneur en eau à laquelle le sol a une consistance spécifique lorsqu'il est pénétré par un appareil normalisé appelé le cône de liquidité.

**Limite de plasticité ( $w_P$ ) :** C'est le point auquel un sol passe de l'état plastique à l'état solide. Il est déterminé en mesurant la teneur en eau à laquelle le sol cesse d'être malléable et peut être façonné en une petite forme de filament sans se rompre.

La différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute, est appelée indice de plasticité (IP). L'indice de plasticité est une mesure de l'étendue du domaine plastique du sol, ce qui indique sa capacité à se déformer sans se rompre. Il permet également d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon, ce qui définit l'argilosité de l'échantillon. En général, plus l'indice de plasticité est élevé, plus le sol contient une quantité significative d'argiles.



**Figure II- 4:**L'essai de Limite Atterberg

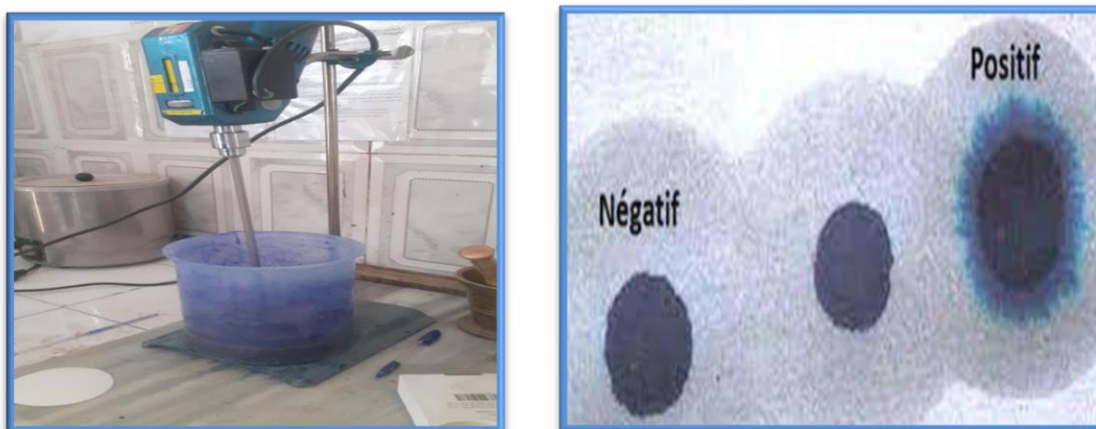
#### **II.2.4 L'essai au bleu de méthylène (NF P 94-068) :**

L'essai dont vous parlez est connu sous le nom d'essai au bleu de méthylène pour la détermination de la surface spécifique des particules argileuses. Cet essai est réalisé sur la fraction granulométrique 0/0,08 mm du sol.

L'objectif de cet essai est de déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour saturer les particules argileuses en suspension dans l'eau sous agitation constante. La valeur de bleu VBS est la quantité de bleu de méthylène absorbée par 30 g de matériau.

Une relation a été établie entre la surface spécifique totale  $S_{st}$  et la valeur de bleu de méthylène de la phase argileuse VBS ( $0/2 \mu m$ ). Selon cette relation, la surface spécifique totale  $S_{st}$  peut être calculée en multipliant la valeur de bleu de méthylène VBS ( $0/2 \mu m$ ) par 21.

Il convient de noter que cette relation entre la surface spécifique et la valeur de bleu de méthylène peut varier en fonction des conditions spécifiques de l'essai et des caractéristiques du sol étudié.



**Figure II- 5:**L'essai au Bleu de Méthylène.

**Les Essais mécanique :**

**II.2.5 Essai Proctor modifié (NF P 94-093):**

L'essai Proctor est un essai de compactage réalisé en laboratoire pour évaluer les propriétés de compactibilité d'un matériau en fonction de sa teneur en eau. Voici les conditions générales de l'essai :

- **Préparation de l'échantillon :** Un échantillon représentatif du matériau est prélevé et préparé en laboratoire. Il est généralement séché et tamisé pour obtenir une granulométrie homogène.
- **Variation de la teneur en eau :** Différentes quantités d'eau sont ajoutées à l'échantillon pour obtenir plusieurs teneurs en eau. Chaque teneur en eau est exprimée en pourcentage de la masse sèche du matériau.
- **Compactage :** Pour chaque teneur en eau, l'échantillon est placé dans un moule en couches successives et compacté à l'aide d'un pilon ou d'un appareil de compactage spécifique. La compaction est réalisée selon un procédé et une énergie standardisés.
- **Mesure de la masse volumique sèche :** Après le compactage, l'échantillon est démoulé et sa masse est mesurée. Ensuite, l'échantillon est séché pour éliminer toute trace d'humidité, puis sa masse sèche est mesurée. La masse volumique sèche est calculée en divisant la masse sèche par le volume du moule.
- **Construction de la courbe de compactibilité :** Les valeurs de la masse volumique sèche sont enregistrées pour chaque teneur en eau testée. Ces données sont utilisées pour tracer la courbe des variations de la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau.

L'analyse de la courbe de compactibilité permet de déterminer la teneur en eau optimale pour obtenir la masse volumique sèche maximale du matériau, également appelée "point Proctor" ou "point d'optimum". Cette teneur en eau optimale est utilisée pour le compactage des matériaux sur le terrain afin d'assurer une densité maximale et des performances mécaniques appropriées.



**Figure II- 6:Essai Proctor modife.**

**II.2.6 Essai CBR (NF P 94-078):**

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

**II.2.6.1 C.B.R immédiat :**

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

Approcher la face supérieure de l'éprouvette vers le piston, à l'aide des dispositifs prévus sur la presse jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériau.

Régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur mesurant l'enfoncement du poinçon.

Noter les efforts de poinçonnement correspondant aux enfoncements suivants :  
0,625 ; 1,25 ; 2 ; 2,5 ; 5 ; 7,5 et 10 mm

$$\frac{\text{Effort Normal 2.5 mm d'enfoncement (en KN)}}{13.35} * 100$$

$$\frac{\text{Effort Normal 5 mm d'enfoncement (en KN)}}{19.93} * 100$$

**II.2.6.2 C.B.R après imbibition :**

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

$$g(\%) = \left( \frac{\Delta h}{h} \right) * 100$$



**Figure II- 7:Appareil Essai CBR.**

### **II.2.7 Essais de compression simple (NF P 94-077) :**

L'essai de résistance à la compression uniaxiale est largement utilisé pour évaluer les caractéristiques de résistance du sol et du sol stabilisé. Cet essai permet de mesurer la capacité du matériau à résister à une charge compressive et fournit des informations sur sa résistance et sa déformabilité.

L'essai de compression uniaxiale est réalisé en appliquant une charge de compression sur un échantillon de sol préparé dans une forme cylindrique. L'échantillon est généralement compacté à sa densité sèche maximale avec une teneur en humidité optimale déterminée à partir des tests de compactage Proctor normal. L'éprouvette est ensuite placée sur une surface indéformable dans une machine d'essai de compression.

Pendant l'essai, la machine d'essai applique une charge de compression de manière continue ou à un taux de déformation spécifié. Les contraintes (force par unité de surface) et les déformations sont mesurées simultanément pendant l'essai. Les paramètres généralement mesurés comprennent la contrainte de rupture, la contrainte au seuil d'écoulement, la déformation à la rupture et la déformation au seuil d'écoulement.

Pour obtenir des résultats comparables en compression, il est important d'utiliser des échantillons de forme, de dimensions et de préparation identiques, et de les soumettre à des conditions spécifiées de traitement préalable, de température, d'humidité et de vitesse de mise en charge. Ces conditions sont définies par des normes ou des protocoles d'essai spécifiques, qui varient en fonction des pratiques et des réglementations en vigueur dans chaque pays.

L'essai de compression uniaxiale permet d'évaluer la résistance du sol et du sol stabilisé, de



**CHAPITRE III**  
**PRESENTATION ET**  
**ANALYSE DES**  
**RESULTATS**  
**D'ESSAI**

## **CHAPITRE III**

### **PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS**

#### **III.1 Introduction :**

Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats de l'essai réalisé sur le sol étudié et leur interprétation, il comporte :

- Les essais d'identification:
  - analyse granulométrie par tamisage et par sédimentaire,
  - les limites d'Atterberg
  - l'essai au Bleu de Méthylène.
- Les essais mécaniques
  - Essai Proctor Modifié,
  - Essai CBR
  - Essai de Compression simple.

#### **Résultats des Essais :**

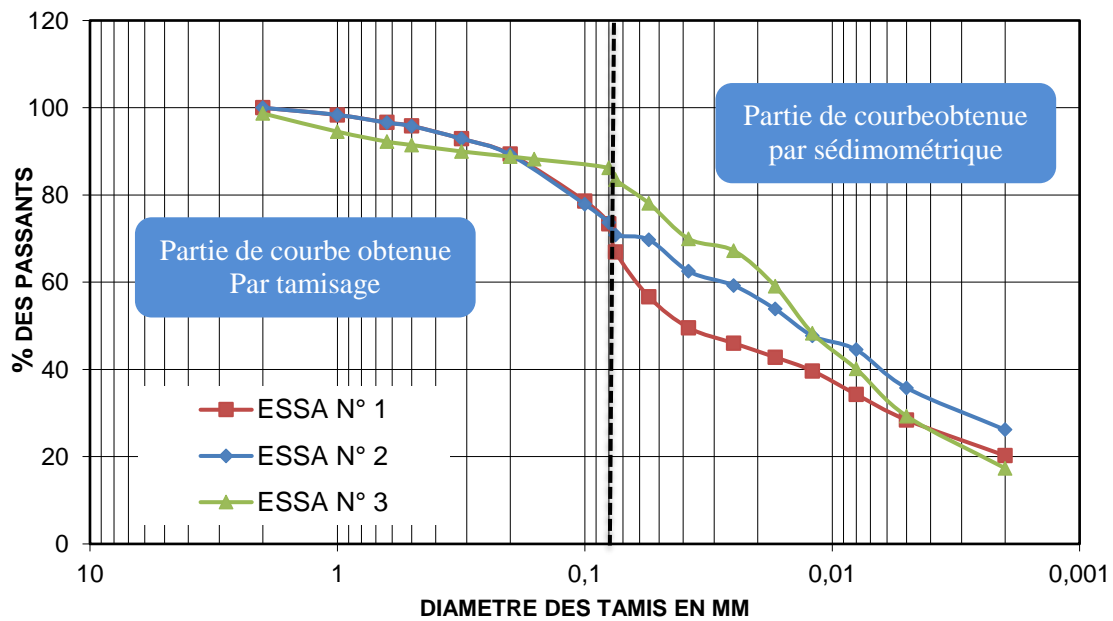
#### **III.2 Les essais d'identification :**

##### **III.2.1 Analyse granulométrique:**

Les tableaux III-1 présentent les résultats des essais de l'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie d'essais n°1. La figure III.1 regroupe les courbes d'analyse granulométrique (par tamisage et par sédimentométrie).

**Table III- 1:** Les résultats d'essai d'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie (essais n°1)

	Ouverture des Tamis (mm)	Poids des Refus cumulés (grs)	Refus cumulés en (%)	Complément a 100 des Refus cumulés	Tamisats en (%)
<b>Analyse Granulométrique</b>	2	0.07	0.01	99.99	<b>99.99</b>
	1	8.28	1.66	98.34	<b>98.34</b>
	0.63	16.87	3.37	96.63	<b>96.63</b>
	0.5	20.87	4.17	95.83	<b>95.83</b>
	0.315	35.57	7.11	92.89	<b>92.89</b>
	0.2	53.27	10.65	89.35	<b>89.35</b>
	0.1	106.99	21.40	78.60	<b>78.60</b>
	0.08	133.18	26.64	73.36	<b>73.36</b>
<b>Analyse Sédimentométrique</b>	0.075			66.92	<b>66.92</b>
	0.055			56.62	<b>56.62</b>
	0.038			49.55	<b>49.55</b>
	0.025			46.02	<b>46.02</b>
	0.017			42.8	<b>42.80</b>
	0.012			39.66	<b>39.66</b>
	0.008			34.3	<b>34.30</b>
	0.005			28.42	<b>28.42</b>
	0.002			20.25	<b>20.25</b>



**Figure III- 1:** Les Courbes des essais d'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie

III.2.2 Les limites d'Atterberg :

Limite de liquidité (WL):

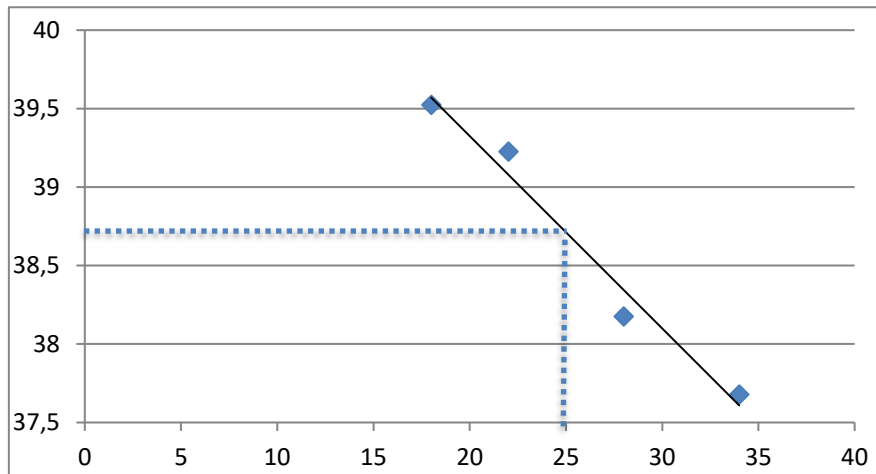


Figure III- 2:La courbe de la limite de liquidité du sol non traité (Essai N°1).

Limite de plasticité (Wp):

Table III- 2:Les résultat de la limite de plasticité du sol non traité (Essai N°1).

Masse de la terre	13.657	13.821	13.042
Masse de la terre+sol humide	15.539	15.218	14.613
Masse de la terre + sol sec	15.239	14.998	14.364
Masse d'eau	0.3	0.22	0.249
Masse de sol sec	1.582	1.177	1.322
Teneur en eau	18.96	18.69	18.84
Moyenne	18.83		

L'Indice de plasticité :

$$IP = W_L - W_P = 19.87 \%$$

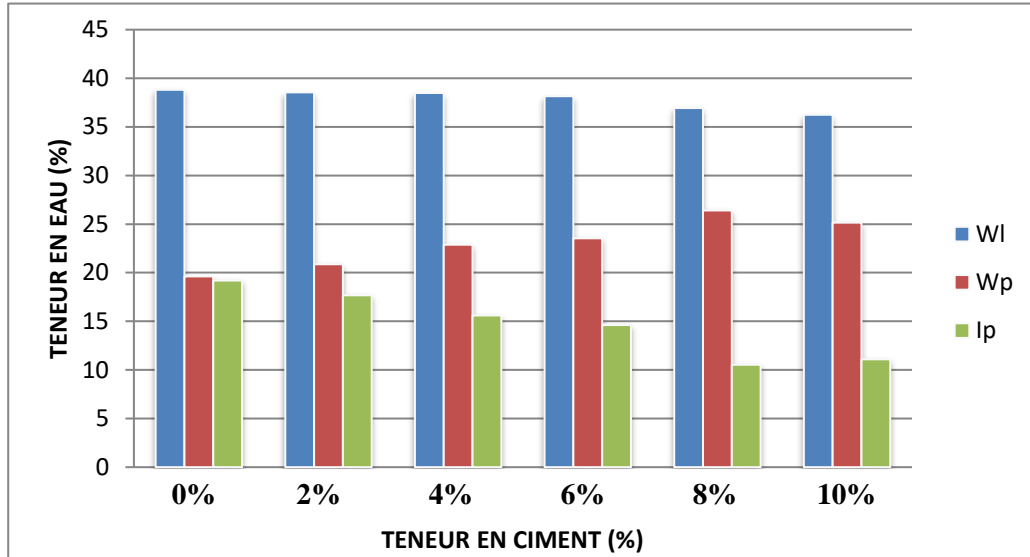


Figure III- 3:les limites Atterberg en fonction de teneur en ciment.

On constate que la limite de plasticité augmente avec cette augmentation de teneur en ciment, tandis que la limite de liquidité diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment.

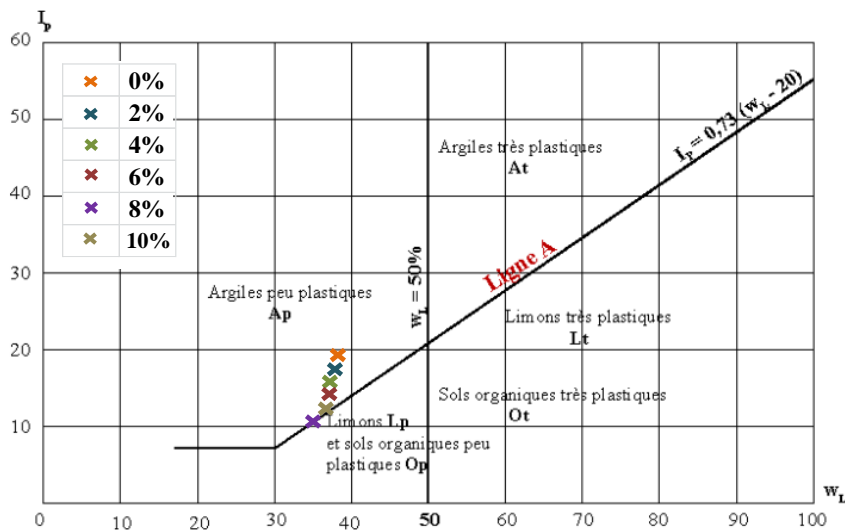
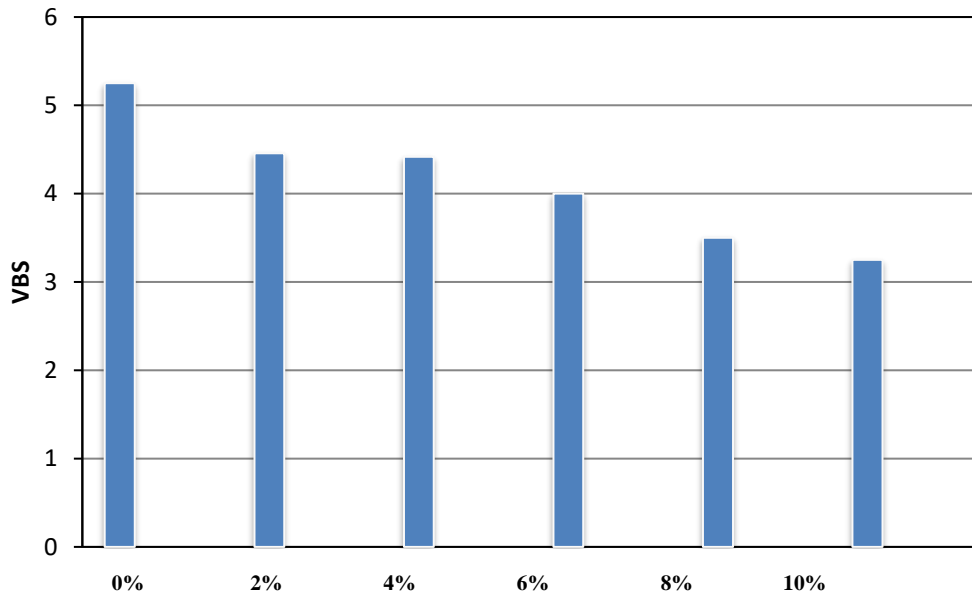


Figure III- 4:Diagramme de Casagrande

### III.2.3 L'essai au Bleu de Méthylène (VBS):

Les valeurs moyennes des résultats des essais de bleu de méthylène (VBS) en fonction des différents teneurs en ciment sont représentés sur la Figure III.5.



**Figure III- 5:**Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment

On remarque que la valeur de bleu de méthylène diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment dans le sol.

### III.3 Interprétation des résultats :

Pour le sol non traité on remarque que:

- $D_{max} = 20\text{mm} \leq 50\text{ mm}$
- La valeur Moyenne des passants à  $80\ \mu\text{m}$  est  $77.75\% > 35\%$ .
- L'indice de plasticité  $I_p = 19.18$  on a  $12 < I_p < 25$
- La valeur de bleu méthylène est égale à 5.25 on a  $2.5 < VBS \leq 6$

Donc : Selon la classification GTR, il s'agit d'un limon argileux peu plastique (classe A2).

Table III- 3:Classification des sols selon GTR

Classe <b>A</b>		Tableau 1 - <b>Classification des sols fins</b>			
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état
D <sub>max</sub> ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm > 35%	<b>A</b>  Sols fins	<b>VBS ≤ 2,5<sup>(*)</sup></b> ou <b>I<sub>p</sub> ≤ 12</b>	<b>A<sub>1</sub></b> Limons peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	<b>IPI<sup>(*)</sup> ≤ 3</b> ou <b>w<sub>n</sub> ≥ 1,25 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>1</sub> th</b>
				<b>3 &lt; IPI<sup>(*)</sup> ≤ 8</b> ou <b>1,10 ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,25 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>1</sub> h</b>
				<b>8 &lt; IPI ≤ 25</b> ou <b>0,9 W<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,1 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>1</sub> m</b>
				<b>0,7 W<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 0,9 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>1</sub> s</b>
				<b>w<sub>n</sub> &lt; 0,7 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>1</sub> ts</b>
		<b>12 &lt; I<sub>p</sub> ≤ 25<sup>(*)</sup></b> ou <b>2,5 &lt; VBS ≤ 6</b>	<b>A<sub>2</sub></b> Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	<b>IPI<sup>(*)</sup> ≤ 2</b> ou <b>I<sub>c</sub><sup>(*)</sup> ≤ 0,9</b> ou <b>w<sub>n</sub> ≥ 1,3 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub> th</b>
				<b>2 &lt; IPI<sup>(*)</sup> ≤ 5</b> ou <b>0,9 ≤ I<sub>c</sub><sup>(*)</sup> &lt; 1,05</b> ou <b>1,1 W<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,3 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub> h</b>
				<b>5 &lt; IPI ≤ 15</b> ou <b>1,05 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,2</b> ou <b>0,9 W<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,1 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub> m</b>
				<b>1,2 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,4</b> ou <b>0,7 W<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 0,9 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub> s</b>
				<b>I<sub>c</sub> &gt; 1,3</b> ou <b>w<sub>n</sub> &lt; 0,7 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>2</sub> ts</b>
		<b>25 &lt; I<sub>p</sub> ≤ 40<sup>(*)</sup></b> ou <b>6 &lt; VBS ≤ 8</b>	<b>A<sub>3</sub></b> Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	<b>IPI<sup>(*)</sup> ≤ 1</b> ou <b>I<sub>c</sub><sup>(*)</sup> ≤ 0,8</b> ou <b>w<sub>n</sub> ≥ 1,4 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>3</sub> th</b>
				<b>1 &lt; IPI<sup>(*)</sup> ≤ 3</b> ou <b>0,8 ≤ I<sub>c</sub><sup>(*)</sup> &lt; 1</b> ou <b>1,2 W<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,4 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>3</sub> h</b>
				<b>3 &lt; IPI ≤ 10</b> ou <b>1 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,15</b> ou <b>0,9 W<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 1,2 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>3</sub> m</b>
				<b>1,15 &lt; I<sub>c</sub> ≤ 1,3</b> ou <b>0,7 W<sub>OPN</sub> ≤ w<sub>n</sub> &lt; 0,9 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>3</sub> s</b>
				<b>I<sub>c</sub> &gt; 1,3</b> ou <b>w<sub>n</sub> &lt; 0,7 W<sub>OPN</sub></b>	<b>A<sub>3</sub> ts</b>
		<b>I<sub>p</sub> &gt; 40<sup>(*)</sup></b> ou <b>VBS &gt; 8</b>	<b>A<sub>4</sub></b> Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	
				<b>A<sub>4</sub> h</b>	
				<b>A<sub>4</sub> m</b>	
				<b>A<sub>4</sub> s</b>	

III.4 Essai mécanique :

III.4.1 Essai Proctor modifié:

La figure III.6 présente courbe Proctor de sol non traité. La figure III.7 regroupe les courbes des essais Proctor modifié en fonction de la teneur en ciment. Les figures III.8 et III.9 présentent respectivement les densités sèches maximales et les teneurs en eau en fonction des différents teneurs en ciment.

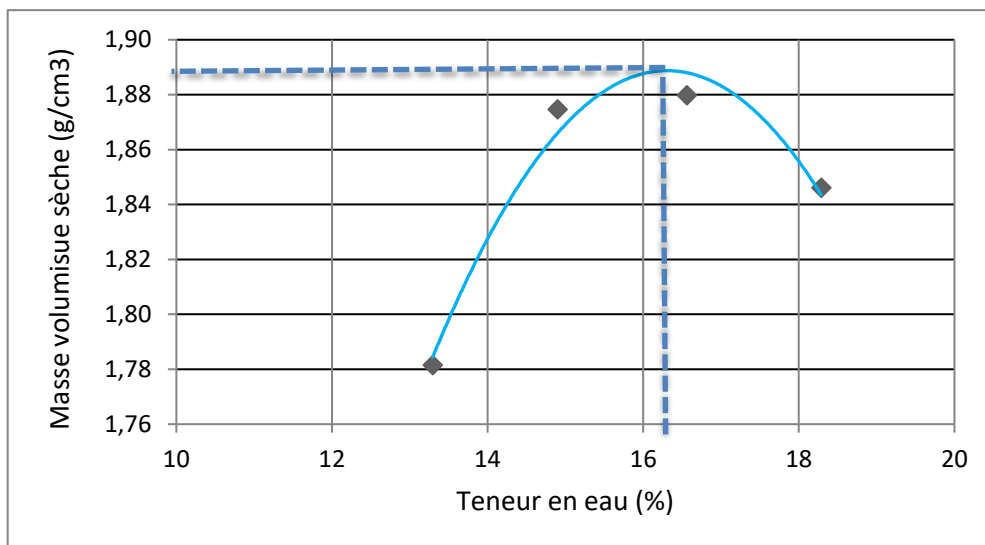


Figure III- 6: courbe Proctor de sol non traité (l'essai 02)

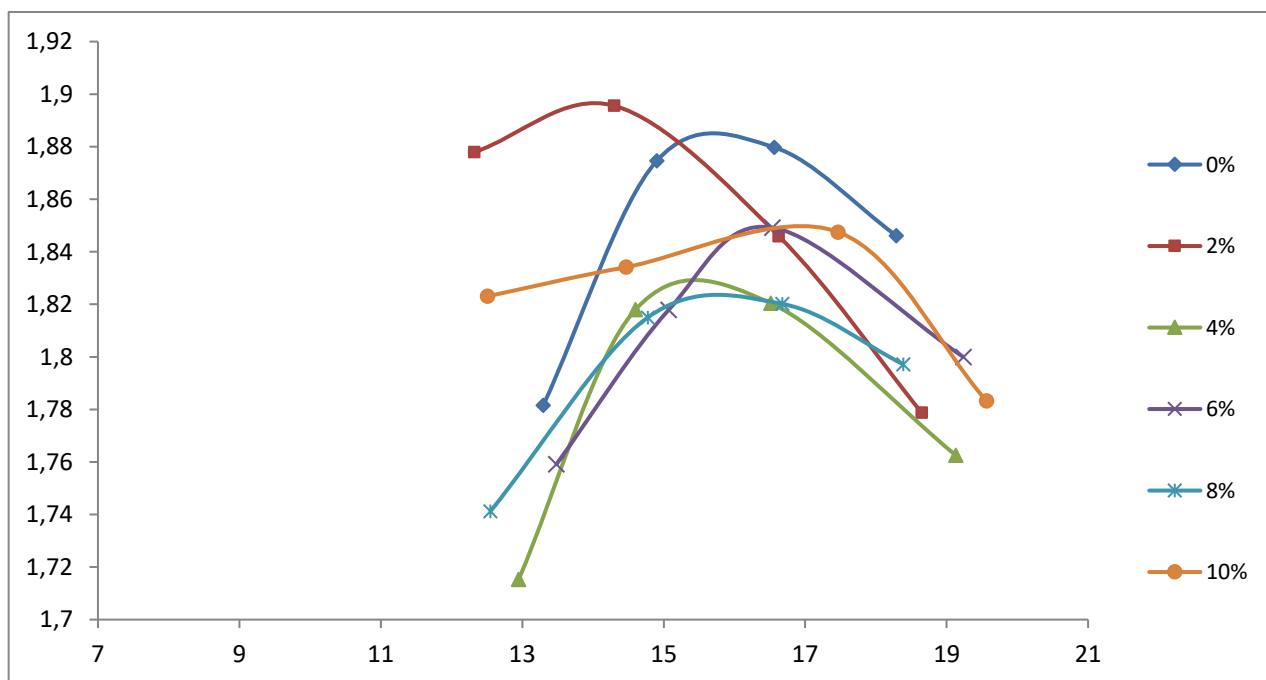


Figure III- 7: les courbes des essais Proctor modifié

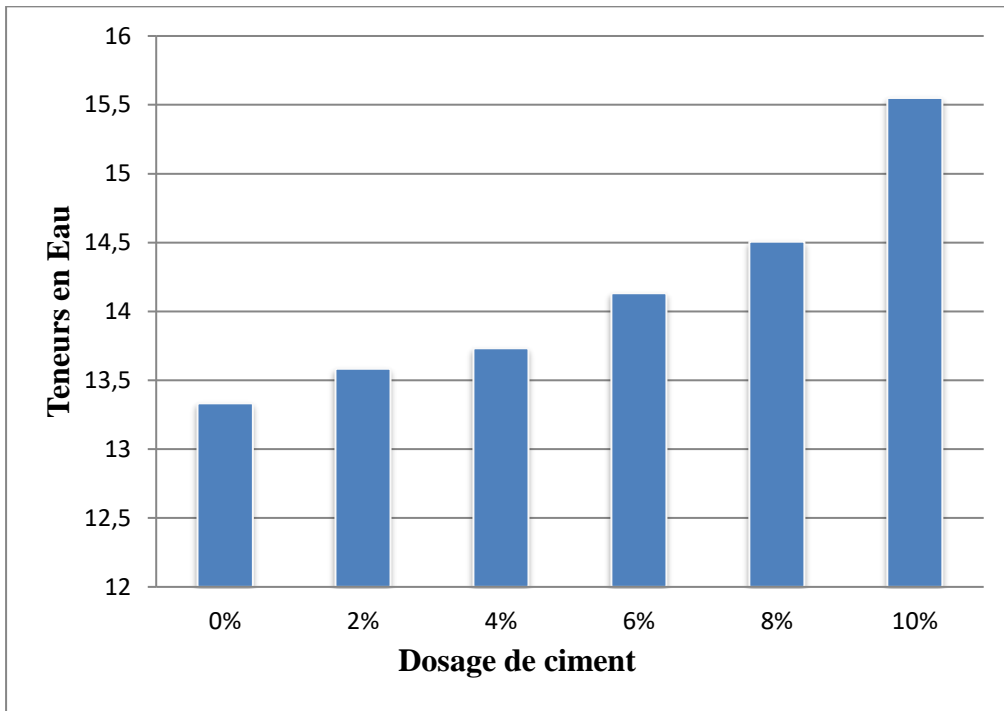


Figure III- 8: Les teneurs en eau optimales en fonction des différents teneurs en ciment.

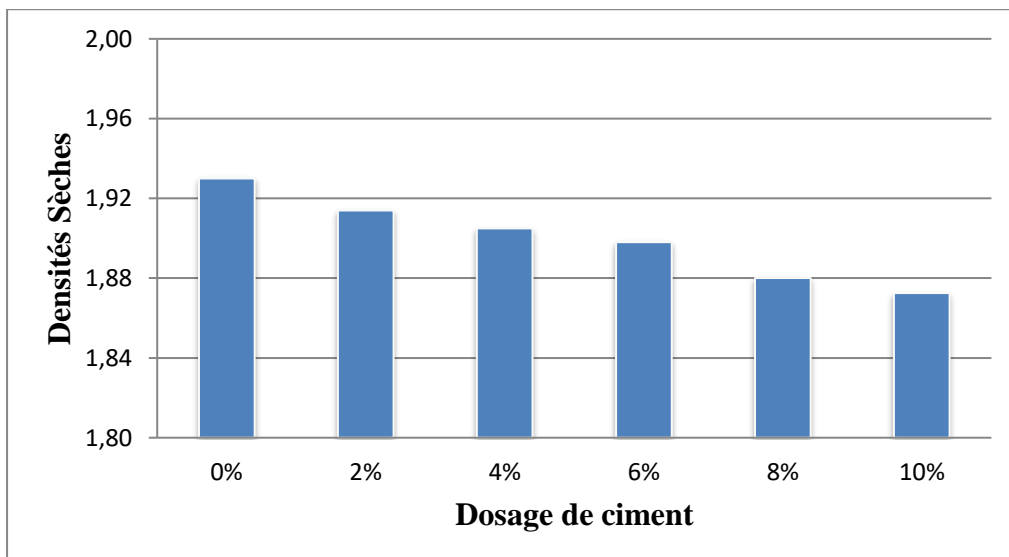
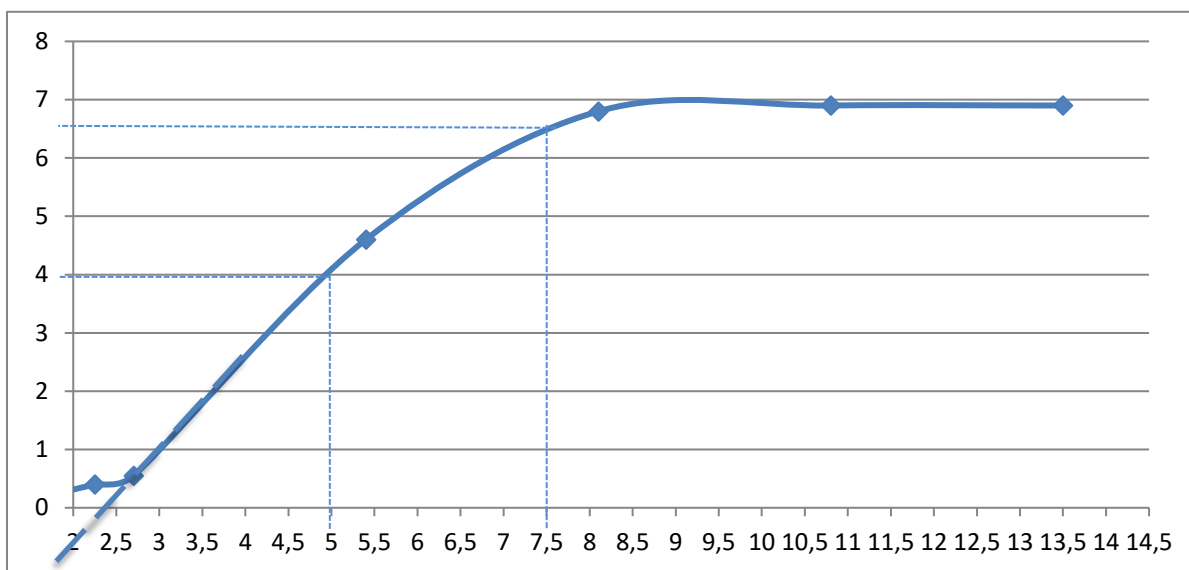


Figure III- 9: Les densités sèches maximales en fonction des différents teneurs en ciment

### III.4.2 Essai de CBR:

#### III.4.2.1 CBR Immédiat:

La figure III.10 présente sa courbe. La figure III.11 présente l'effet de ciment sur l'indice CBR immédiat.



**Figure III- 10:** courbe CBR Immédiat de sol non traité (l'essai 01)

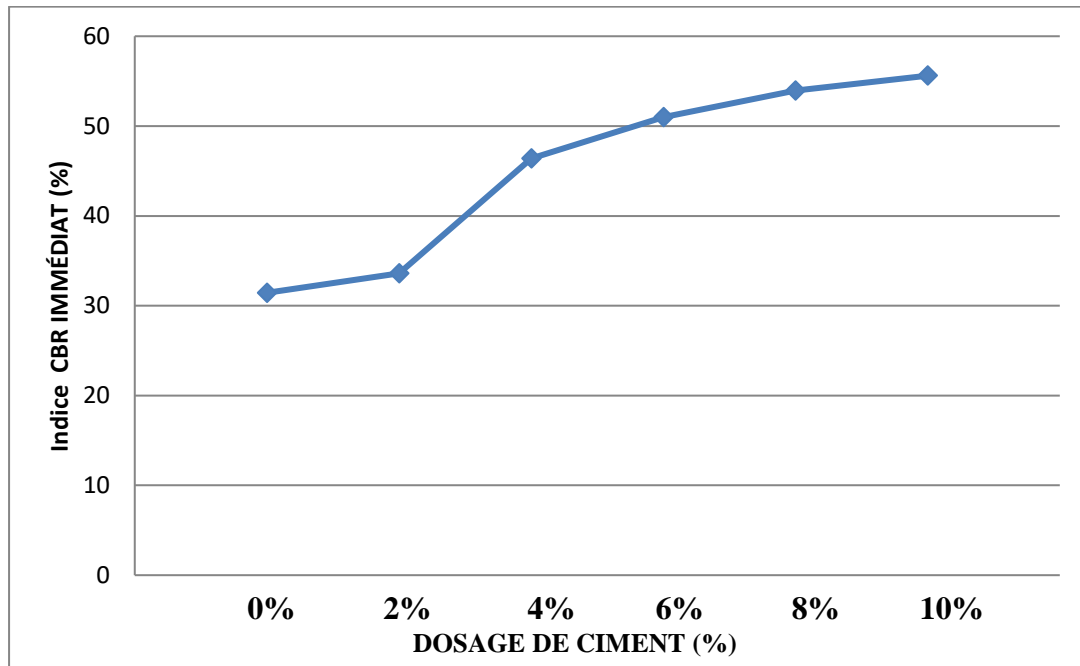


Figure III- 11:Effet de ciment sur l'indice CBR immédiat.

III.4.2.2 CBR Imbibé:

La figure III.12 présente ca courbe. La figure -III.13 présente l'effet de ciment sur l'indice CBR Imbibé.

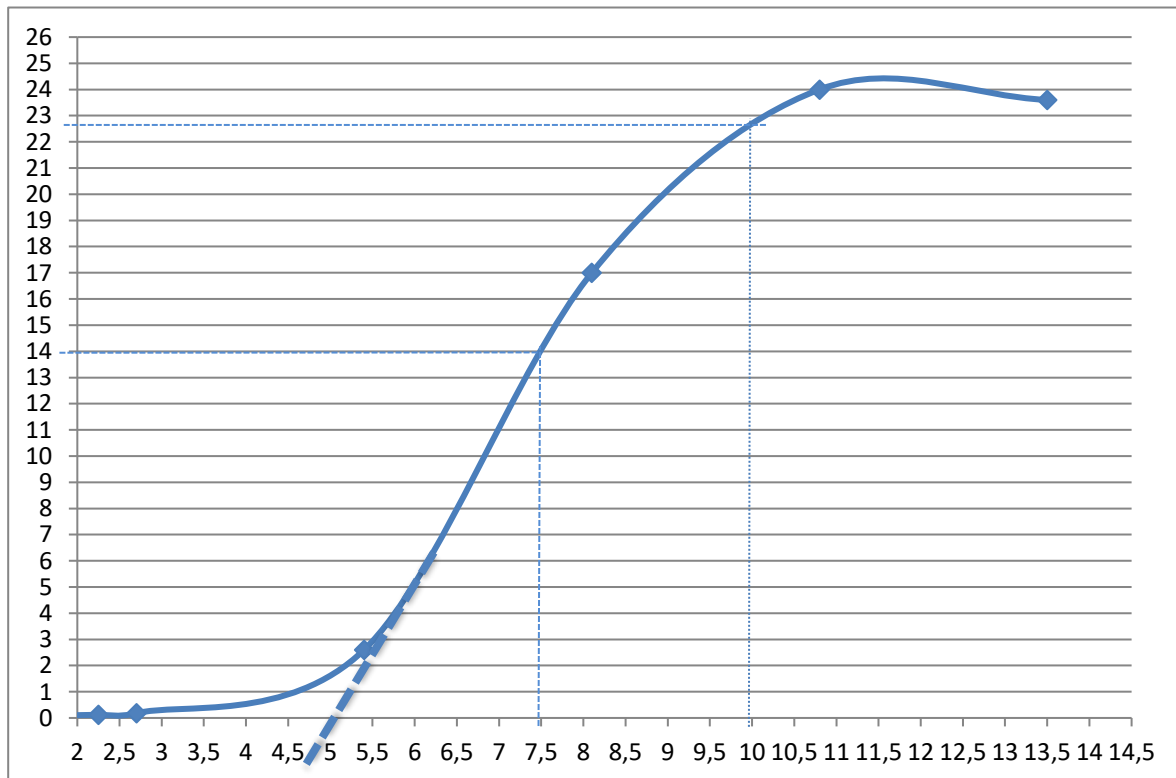
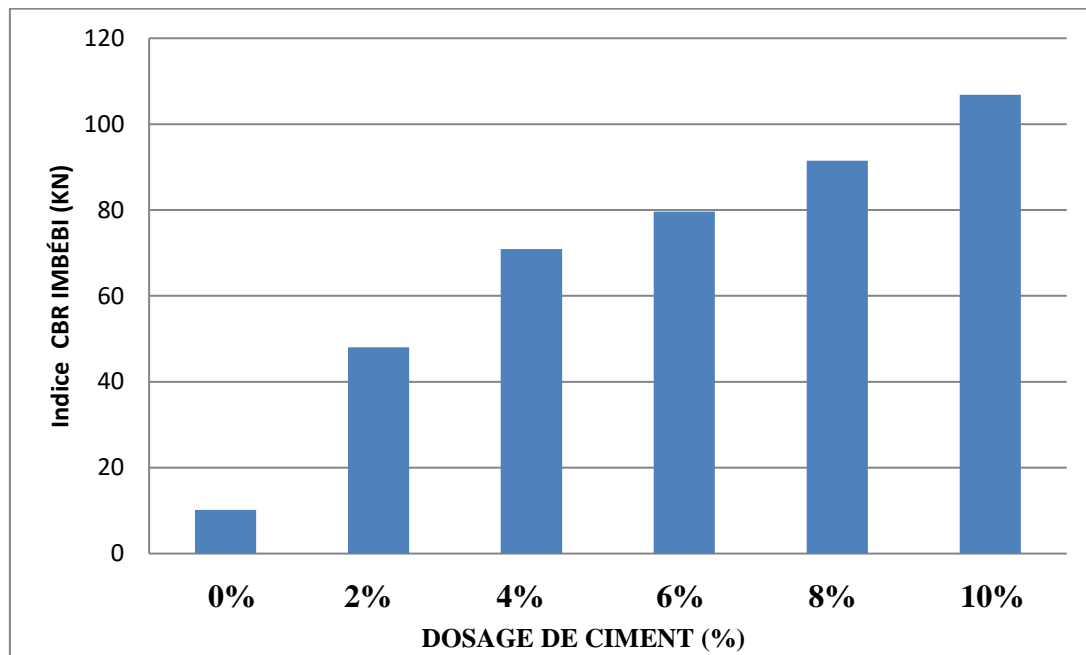


Figure III- 12:Courbe CBR Imbibé du sol traité à 10% ciment



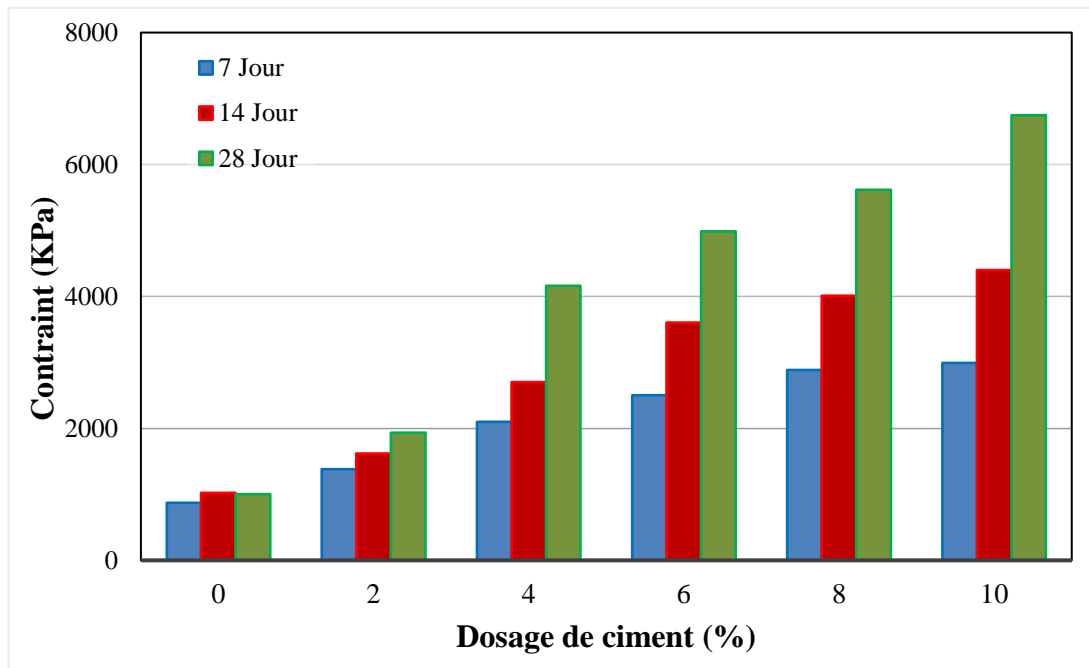
**Figure III- 13:**Effet de Ciment sur l'indice CBR imbibé.

#### III.4.3 Interprétation des résultats :

On remarque que les indices de portance (indice C.B.R) immédiat et imbibé augmentent avec l'augmentation de teneur en ciment. Cette augmentation suggère une meilleure stabilité du sol. Cela signifie qu'il est moins susceptible de se déformer ou de s'affaisser sous une charge appliquée. L'augmentation de la stabilité est cruciale pour les routes ou tout autre projet nécessitant un sol solide.

#### III.4.4 Essai de compression simple :

La figure III.14 présente les résultats des essais de compression simple après 7, 14 et 28 jours en fonction de la teneur en ciment.



**Figure III- 14** La résistance de compression simple en fonction de la teneur en ciment.

#### III.4.5 Interprétation des résultats :

On remarque l'augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en ciment et du temps de durcissement (7, 14 et 28 jours). Les interactions pouzzolaniques entre le ciment et le sol sont responsables de cette amélioration de la résistance.

### CONCLUSION GENERALE

Les conclusions tirées de cette étude sur l'ajout de différents pourcentages de ciment (type Matine) à un sol prélevé du site de Chaaba El Hamra (wilaya de M'sila) sont les suivantes :

## I CONCLUSION GENERALE

---

- La limite de liquidité diminue à mesure que la teneur en ciment augmente, tandis que la limite de plasticité augmente avec une augmentation de la teneur en ciment. Cela signifie que le sol devient moins sensible à l'eau.
- La valeur du bleu méthylène diminue à mesure que la teneur en ciment augmente. Le bleu méthylène est un indicateur de l'activité du sol, et sa diminution indique une diminution de sa sensibilité à l'eau.
- Selon la classification du GTR, le sol étudié est classé comme limoneux-argileux peu plastique de classe A2.
- La densité sèche diminue à mesure que la teneur en ciment augmente, tandis que la teneur en eau optimale augmente avec une augmentation de la teneur en ciment.
- L'augmentation du dosage de ciment a un impact direct sur l'augmentation des indices C.B.R (California Bearing Ratio), à la fois dans les conditions immédiates et imbibées. Cela indique une amélioration de la capacité portante du sol traité avec le ciment.
- La résistance à la compression simple du sol augmente à la fois avec l'augmentation du temps de durcissement (cure) et avec l'augmentation du dosage de ciment.

Ces conclusions soulignent les effets positifs de l'ajout de ciment sur les propriétés géotechniques du sol, notamment en termes de plasticité, de densité, de capacité portante et de résistance à la compression simple.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**AFNOR (1996) Norme Française : NF P 94-041** : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide.

**AFNOR (1992) Norme Française : NF P 94-057** : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie.

**AFNOR (1991) Norme Française : NF P 94-050** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des sols – Méthode par étuvage.

**AFNOR (1991) Norme Française : NF P 94-053** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire – Méthode du moule.

**AFNOR (1993) Norme Française : NF P 94-051** : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.

**AFNOR (1993) Norme Française : NF P 94-068** Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche.

**AFNOR (1999) Norme Française : NF P 94-093**Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.

**AFNOR (1997) Norme Française : NF P 94-078** Sols : reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

**AFNOR (1997) Norme Française : NF P 94-077**: Sols : Reconnaissance et Essais – Essais de compression simple.

A. MOUCHTACHI, R. EL GUERJOUA, J.C. BABOUX ET Y. JAYET (Modélisation de la propagation ultrasonore en milieu dispersif ; mesure de vitesse et application à la caractérisation des graphites)

**BULTEL. F(2001)** :Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels. Thèse docteur ENPC, 298 p

**GRYTAN SARKAR, MD. RAFIQU L ISLAM, MUHAMMED ALAMGIR, MD**

**ROKONUZZAMAN (2012)** Study on the Geotechnical Properties of Cement based Composite Fine-grained Soil; Department of Civil Engineering, Khulna University of Engineering & Technology, Khulna-9203, Bangladesh .

**Grim R.E.** (1962) Clay mineralogy in relation to the Engineering properties of clay materials. Mc Craw Hill, pp.204-277.

**Harichane K., Ghrici G., Kenai S., Grine K.** Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils. Geot. Geol. Eng., Springer 2011 ; 29:759-769.

**Harry Saroglou :** (2009) Compressive Strength of Soil Improved with Cement : Conference Paper ; National Technical University of Athens.

**Journal of Civil & Environmental Engineering** ( 2020 ) Cement Soil Stabilization as an Improvement Technique for Rail Track Subgrade, and Highway Subbase and Base Courses.

**Jean-Pierre MAGNAN et Georges PILOT (1987).** Mécanique des Sols 1 : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

**Khemissa M., Mahamedi A., Mekki L.** Mécanique des sols problématiques (enjeu national pour un développement durable). Communication au colloque Algéro-Canadien sur l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, Université de Tlemcen, 24-26 février 2014.

**Khemissa M., Mekki L., Bakir N.** Comportement oedométrique des argiles expansives de M'sila (Algérie). In: Magnan JP, Cojean R., Cui Y.J., editors. SEC 2008: Symposium international sécheresse et constructions. Presses du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées France; 2008, p. 229-234.

**Khabbaz H., Fatahi B.** Chemical stabilization of closed land fill sites using chemical agents. In: Anagnostopoulos A et al, editors. Proc. 15th Eur. Conf. Soil Mech. Geot. Eng. IOS Press; 2011, p. 1777-1782.

**LCPC-SETRA.** Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques: Application à la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique, France; 2000a.

**Louafi B., Bahar R.** Sand: an additive for stabilization of swelling clay soils. Int. J.

Geosciences 2012 ; 3:719-725.

**LCPC-SETRA.** (2000) Guide des terrassements routiers: Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Bagneux, France .

**MAHAMEDI A,** (2014) : Caractérisation et traitement des sols gonflants compactés en vue de leur utilisation en construction routière (application aux argiles expansives de M'sila).

Thèse de DOCTORAT Université de Mohamed Boudiaf de M'sila.

**MEKKI Lakhdar** (2008) methodologie d'etude et techniques d'identification des parametres de comportement des sols fins soumis à des cycles de secheresse prolongee (application aux argiles expansives de m'sila).Mémoire de magister, université de M'sila . p 12.

**MEKKI Lakhdar :** (2018) Comportement d'une argile expansive fortement surconsolidée : Thèse de DOCTORAT Université de Mohamed Boudiaf de M'sila , p 27.

**MAHAMEDIA.,KHEMISSA M.** (2012).Cement Stabilisation of Compacted Expansive clay. Communication to the International Science and Technology Conference, ISTE' 2012,Dubai,UAE,December 13-15, 2012.

**Magnan J.P.** Classification géotechnique des sols : A propos de la classification LPC.

Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées France 1980 ; 105 :49-52.

**MELLOUK NAOUAL :** (2014) Approche bibliographique de la stabilisation des limons par la chaux et les liants hydraulique pour les travaux routier ; Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme MASTER en génie civil l'Université de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie p. 11-26.

**Olivier C. (2002) :** Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés»

.Présentée en vue de l'obtention du grade de :docteur de l'IN.P.L.

**Routes 89.** Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme. Documentation technique, Routes n°89, 2004, p. 7-14.

**Dr. A. Meddah :** (2021) : Cours Amélioration des sols 2eme Année MASTER, p. 2-11.

**SUBHASHREE SAMANTASINGHAR** (2014) Géo-Engineering Properties of Lime Treated Plastics Soils : DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING NATIONAL

INSTITUTE OF TECHNOLOGY ROURKELA ROURKELA-769008, ORISSA, INDIA p.  
38-42.

**TOUMIAT .S (2011)** : Etude de la portance d'une argile expansive stabilisée à forte  
teneur en ciment.