

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE 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 :

**RAHMANI Souleyman**

**BENAICHE Hoceme**

**Intitulé**

**Caractérisation du sol de Chaaba El Hamra  
(wilaya de M'sila) traité au ciment Chamil  
et fortement compacté**

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

|                            |                                    |                   |
|----------------------------|------------------------------------|-------------------|
| <b>Dr MEDDAH Abdelaziz</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 TALLAH Naoui</b>     | <b>MCA, Université de M'SILA</b>   | <b>Examineur</b>  |

**Année universitaire : 2022 /2023**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *Dédicaces*

- \* A nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs soutiens et leurs prières tout au long de nos vie,
- \* A toute nos familles pour leurs soutiens tout au long de nos parcours universitaire,
- \* A tous nos meilleurs amis et à toute la promotion 2023.

**RAHMANI Souleyman et BENAICHE Hoceme**

## **Remerciements**

*Il est primordial de remercier « Allah » de nous avoir donné le courage, la patience et la sante qui nous ont été utiles tout au long de nous années d'études et pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur 'Dr. MEKKI Lakhdar' pour son aide et son encadrement, ses encouragements et surtout sa compréhension durant toute la période de préparation de ce travail.*

*Nous gratitude aux membres de jury qui me font l'honneur de juger nous travail de fin d'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.*

*Nous remercions Dr. Gouffi Abdelmalek pour son aide.*

*Nous tenons à remercier toute personne du corps enseignant ou administratif de Génie civil, ayant contribué de près ou de loin à nous formation.*

**RAHMANI Souleyman et BENAICHE Hoceme**

## ملخص

نظرًا للطبيعة الجيولوجية لبلدنا، غالبًا ما نواجه تربة غير مناسبة عالية البلاستيك وذات قدرة تحمل منخفضة، لذلك كان علينا كجيو تقيين معالجة هذه التربة وتحسينها لجعلها مناسبة للبناء.

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين خصائص التربة المأخوذة من موقع الشعبة الحمراء (ولاية المسيلة) بإضافة نسب مختلفة من الأسمنت (الشامل) 2، 4، 6، 8 و 10%. بالإضافة إلى اختبارات التوصيف، يتضمن البرنامج التجريبي الذي تم إجراؤه اختبارات الضغط نوع بروكتور المعدل، واختبارات CBR الفورية والمغمورة، والضغط البسيط. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها تحسينات كبيرة في الخصائص الجيوتقنية لهذه التربة.

**الكلمات الدالة:** معالجة التربة، الاسمنت، الضغط البسيط، بروكتور المعدل، CBR

## Résumé

En raison de la nature géologique de notre pays, nous rencontrons souvent des sols inappropriés qui sont très plastiques et ont une faible capacité portante, nous avons donc comme des géotechniciens dû traiter et améliorer ces sols pour les rendre aptes à la construction.

Cette étude vise à améliorer les caractéristiques d'un sol prélevé du site du ChaabaEl Hamra (wilaya de M'sila) en ajoutant différents pourcentages de ciment (Chamil) 2, 4, 6, 8 et 10%. Outre les essais d'identification, le programme expérimental exécuté comporte des essais de compactage type Proctor modifié, des essais CBR immédiat et imbibé, de compression simple. Les résultats obtenus montrent des améliorations significatives des propriétés de géotechnique du ce sol.

**Mots-clés** : traitement du sol, ciment, Proctor modifié, CBR, compression simple.

## **Abstract**

Due to the geological nature of our country, we often encounter unsuitable soils which are very plastic and have low bearing capacity, so we as geotechnical engineers had to treat and improve these soils to make them suitable for construction.

This study aims to improve the characteristics of soil taken from the Chaaba El Hamra site (wilaya of M'sila) by adding different percentages of cement (Chamil) 2, 4, 6, 8 and 10%. In addition to the identification tests, the experimental program carried out includes modified Proctor-type compaction tests, immediate and soaked CBR tests, simple compression. The results obtained show significant improvements in the geotechnical properties of this soil.

**Keywords:** soil treatment, cement, modified Proctor, CBR, simple compression.

# Sommaire

|   |    |
|---|----|
| Introduction générale .....                                       | 1  |
| Chapitre I : Synthèse Bibliographiqu.....                         | 20 |
| I.1 Introduction .....  | 20 |
| I.2 Définition d'un sol .....                                     | 20 |
| I.3 Cractérisation des sols instables .....                       | 20 |
| I.3.1 les Argiles.....  | 21 |
| I.3.2 Les Limons.....   | 23 |
| I.3.3 Les Marnes.....   | 23 |
| I.4 Problèmes des sols instables .....                            | 24 |
| I.4.1 Gonflement.....   | 24 |
| I.4.2 Tassement .....   | 26 |
| I.4.3 Glissement .....  | 26 |
| I.4.4 Affaissement.....   | 27 |
| I.5 Traitement des sols .....                                     | 28 |
| I.5.1 Objectifs du traitement des sols .....                      | 28 |
| I.5.2 Techniques de traitement des sols .....                     | 29 |
| I.5.2.1 Méthodes mécaniques .....                                 | 29 |
| I.5.2.1.1 Compactage.....   | 29 |
| I.5.2.2 Méthodes thermique .....                                  | 30 |
| I.5.2.1.1 Cuisson .....   | 30 |
| I.5.2.1.2 Congélation .....                                       | 30 |
| I.5.2.3 Méthodes Chimique .....                                   | 31 |
| I.5.2.4 Le traitement chimique par additifs .....                 | 31 |
| I.5.2.4.1 Traitement à la chaux.....                              | 33 |
| I.5.2.4.2 Traitement au ciment.....                               | 33 |
| I.5.2.4.3 Traitement mixte (chaux-ciment) .....                   | 34 |
| I.6 Traitement des sols par ciment.....                           | 35 |
| I.6.1 Le Ciment.....  | 35 |
| I.6.2 Les Constituants du Ciment .....                            | 36 |
| I.6.3 Types de ciment.....  | 36 |
| I.6.4 Réactions physico-chimiques du ciment .....                 | 37 |
| I.6.5 Réactions physiques.....                                    | 37 |
| I.6.6 Technique de Traitement des sols par ciment.....            | 37 |
| I.6.7 Les Avantages de traitement des sols par ciment.....        | 39 |
| I.7 Conclusion.....   | 40 |
| Chapitre II : Programme expérimental et procédures d'essais ..... | 43 |
| II.1 Localisation du site de Chaaba El Hamra.....                 | 43 |
| II.2 Programme expérimental.....                                  | 43 |
| II.2.1. Essais d'identification.....                              | 44 |
| • La granulométrie.   |    |
| • Les limites de consistance.                                     |    |
| • L'essai bleu de méthylène.                                      |    |
| II.3.1 Essais de mécanique.....                                   | 44 |
| • Essais Proctor Modifié.   |    |

- Essais C.B.R (Californie Bearing Ratio)
- Essais de compression simple

|   |    |
|---|----|
| II.3 Description des essais .....                                   | 44 |
| II.3.1 Essais d'identification .....                                | 44 |
| II.3.1.1 Analyse granulométrique .....                              | 44 |
| II.3.1.2 Les limite d'Atterberg .....                               | 45 |
| II.3.1.3 L'essai au bleu de méthylène .....                         | 46 |
| II.3.2 Essais de mécanique.....                                     | 47 |
| II.3.2.1 L'essai Proctor modifié .....                              | 47 |
| II.3.2.2 Essai CBR .....  | 47 |
| a. Essai C.B.R immédiat   |    |
| b. Essai C.B.R apres immersions                                     |    |
| II.4.2.3 Essai de compression simple .....                          | 49 |
| Chapitre III : Présentation et analyse des résultats d'essais ..... | 51 |
| III.1 Introduction.....   | 51 |
| III.2 Résultats Des Essais .....                                    | 51 |
| III.2.1 Les essais d'identification .....                           | 51 |
| III.2.1.1 Analyse granulométrique .....                             | 51 |
| III.2.1.2 Limites d'Atterberg .....                                 | 52 |
| • Limite liquidité .....  | 52 |
| • Limite de plasticité .....  | 53 |
| III.3.1.3 Essai au bleu de méthylène .....                          | 54 |
| III.3.2 Les essais mécaniques .....                                 | 56 |
| III.3.2.1 Essais Proctor Modifié.....                               | 56 |
| III.3.2.2 Essai CBR .....   | 58 |
| a) ESSAI CBR Immédiat .....   | 58 |
| b) ESSAI CBR Immersion .....  | 59 |
| III.3.2.3 Compression simple.....                                   | 61 |
| CONCLUSION GENERALE .....   | 64 |

## Références Bibliographiques

# LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau I.1</b> : Caractéristiques de certaines familles d'argile.....  | 23 |
| <b>Tableau I.2</b> : Modèles empiriques de calcul du taux de gonflement ( $\epsilon_g$ ) et de la pression de gonflement ( $\sigma_g$ )... | 32 |
| <b>Tableau I.3</b> : Les avantages et les inconvénients des différentes techniques de stabilisation.....                                   | 34 |
| <b>Tableau III.1</b> : Les résultats d'essai N°02 de la limite de liquidité du sol non traité.....   | 52 |
| <b>Tableau III.2</b> : Limite de plasticité du sol non traité (Essai N°02).....  | 53 |
| <b>Tableau III.3</b> : Classification des sols selon GTR.....  | 55 |
| <b>Tableau III.4</b> : Résultats de l'essai n°1 de Proctor Modifié du sol non traité.....  | 56 |

# LISTE DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure I.1</b> : Couche Tétraédrique.....   | 21 |
| <b>Figure I.2</b> : Couche Octaédrique.....  | 21 |
| <b>Figure I.3</b> : Schéma de la particule de kaolinite.....   | 22 |
| <b>Figure I.4</b> : Schéma de la particule de montmorillonite.....   | 22 |
| <b>Figure I.5</b> : Schéma de la particule d'illite.....   | 22 |
| <b>Figure I.6</b> : Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles.....                   | 23 |
| <b>Figure I.7</b> : Fissuration due au retrait et gonflement des sols.....                                 | 24 |
| <b>Figure I.8</b> : Schéma présentant les différentes origines du gonflement (Gens et Alonso, 1992).....   | 25 |
| <b>Figure I.9</b> : Diagramme de classification du potentiel de gonflement (Seed et al. 1962).....         | 26 |
| <b>Figure I.10</b> : Glissement de terrain sur la route menant Bab el oued vers Chevalley (Alger ; 2018).. | 27 |
| <b>Figure I.11</b> : Schéma expliquant l'affaissement minier et l'effondrement.....                        | 27 |
| <b>Figure I.12</b> : Affaissement de terrain à route national 24 (Alger). .....                            | 28 |
| <b>Figure I.13</b> : Technique de Vibro-compactage .....   | 29 |
| <b>Figure I.14</b> : Compactage dynamique du terrain .....   | 30 |
| <b>Figure I.15</b> : La congélation du sol sur chantier.....   | 31 |
| <b>Figure I.16</b> : Critères d'utilisation du traitement chimique (Dept. Of the Army,1983).....           | 32 |
| <b>Figure I.17</b> : Traitement des sols à la chaux .....  | 33 |
| <b>Figure I.18</b> : Traitement des sols au Ciment .....   | 34 |
| <b>Figure II.19</b> : La composition du ciment .....   | 36 |
| <b>Figure II.20</b> : Préparation de la couche de forme .....  | 38 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure I.21</b> : Malaxage du ciment sur chantier.....   | 38 |
| <b>Figure I.22</b> : Le compactage du mélange de sol.....   | 39 |
| <b>Figure II.1</b> : Localisation du site de Chaaba El Hamra .....  | 43 |
| <b>Figure II.2</b> : Analyse granulométrique par tamisage.....  | 45 |
| <b>Figure II.3</b> : Analyse granulométrique par sédimentométrie .....                                    | 45 |
| <b>Figure II.4</b> : Essai limite d'Atterberg.....  | 46 |
| <b>Figure II.5</b> : L'essai au bleu de méthylène (VBS).....  | 46 |
| <b>Figure II.6</b> : Eessai Proctor modifié.....  | 47 |
| <b>Figure II.7</b> : Essai C.B.R. ....  | 48 |
| <b>Figure II.10</b> : Immersions des éprouvetes.....  | 48 |
| <b>Figure II.11</b> : Essai Compression simple. ....  | 49 |
| <b>Figure III .1</b> : Courbe d'analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie).....                | 51 |
| <b>Figure III .2</b> : La courbe de limite de liquidité du sol non traité. (Essai N°02).....              | 52 |
| <b>Figure III.3</b> : les limite Atterberg en fonction de pourcentage de ciment .....                     | 53 |
| <b>Figure III.4</b> : Diagramme de Casagrande .....   | 54 |
| <b>Figure III.5</b> : Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment .....               | 54 |
| <b>Figure III.6</b> : courbe Proctor Modifié de sol naturel (l'essai n°1).....                            | 56 |
| <b>Figure III.7</b> : courbes Proctor Modifié de sol traité par ciment.....                               | 57 |
| <b>Figure III.8</b> : Les densités sèches en fonction des différents teneurs en ciment.....               | 57 |
| <b>Figure III.9</b> : Les teneurs en eau en fonction des différents teneurs en ciment .....               | 58 |
| <b>Figure III.10</b> : Courbes des essais CBR immédiat du sol non traité.....                             | 58 |
| <b>Figure III.11</b> : Effet de ciment sur le comportement du sol au poinçonnement immédiat.....          | 59 |
| <b>Figure III.12</b> : Effet de ciment sur l'indice CBR immédiat .....                                    | 59 |
| <b>Figure III.13</b> : Courbes des essais CBR apres immersion du sol non traité .....                     | 60 |
| <b>Figure III.14</b> : Effet des ciments sur le comportement du sol au poinçonnement apres immersion..... | 60 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure III.15 :</b> Effet de ciment sur l'indice CBR apres immersion.....                       | 61 |
| <b>Figure III.16 :</b> Les courbes de compression simple après 7 jour du sol non traité .....      | 61 |
| <b>Figure III.17 :</b> Récapitulatif des courbes des essais de compression simple à 7 jour .....   | 62 |
| <b>Figure III.18 :</b> Récapitulatif des courbes des essais de compression simple à 14 jour.....   | 62 |
| <b>Figure III.19</b> Récapitulatif des courbes des essais de compression simple à 28 jour.....     | 63 |
| <b>Figure III.20 :</b> La résistance de compression simple en fonction de la teneur en ciment..... | 63 |

# LISTE DES NOTATIONS

**LCPC** : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

**CRR** : Centre de Recherches Routières

**CEM II à V** : Classes de Ciment (selon NF EN 197-1).

**Cu** : Coefficient

**Cc** : Coefficient

**Mt** : Masse de tare(g)

**Mh** : masse de humide

**Md**: masse de sol sec (g).

**Mw**: masse d'eau (g).

**W**: Teneur en Eau (%)

**Wl** : Limite de liquidité (%).

**Wp** : Limite de plasticité (%).

**Ip** : Indice de plasticité

**M** : Masse (g).

**V**: volume (cm<sup>3</sup>).

**VBS** : Valeur du bleu de méthylène (cm<sup>3</sup>/g).

**C** : Température (°)

**Pdopt**: Masse volumique sèche Optimum

Proctor

**Wopt** : Teneur en eau à L'optimum Proctor

(%)

**γ**: Poids volumique.

**γd** : Poids volumique sèc (g/cm<sup>3</sup>)

**$\gamma_h$** : Poids volumique humide( $g/cm^3$ ).

**$\gamma_w$** : Poids volumique de l'eau.

**Ic** : Indice de consistance

**IPI** : Indice portant immédiat.

**CBR** : California Bearing Ratio.

**RC**: Résistance de Compression de l'éprouvette

(Mpa)

**F** : charge maximale supportée par l'éprouvette

(kN).

## Introduction générale

Les principales activités d'un ingénieur civil est la stabilisation des sols. Le terme regroupe un ensemble de techniques destinées à augmenter la résistance des sols et/ou à limiter les déformations sous les ouvrages existants. De plus, le renforcement de la fondation ou du remblai comprend l'amélioration de ses propriétés mécaniques et physiques. En géotechnique, plusieurs techniques sont utilisées pour stabiliser le sol.

Ces techniques reposent parfois sur des méthodes purement mécaniques, des méthodes chimiques par ajout de matériaux cimentaires (ciment, chaux, cendres volantes, laitier, etc.) ou en associant des éléments rigides au sol (sol renforcé).

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude expérimentale qui a pour but, d'une part, de caractériser les caractéristiques de résistance de sols les propriétés géotechniques du sol de Chaaba El Hamra (12 km Nord-est de la ville de M'Sila), et d'autre part, de déterminer l'effet du traitement par différent pourcentage (0% sol témoin – 2% - 4% - 6% - 8% - 10%) de ciment type Chamil sur les paramètres physiques et mécaniques de ce sol compacté dans les conditions optimales de Proctor modifié.

Ce mémoire se compose de trois chapitres :

- La premier Chapitre présente une synthèse bibliographique sur le sol et les défèrent classes des sols instables, Il se termine ensuite par citer les techniques de traitement des sols possible.
- Chapitre II : présente le contexte de l'étude avec 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.
- Chapitre III : 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 et une liste de références bibliographiques.

## **Chapitre I**

# **Synthèse Bibliographique**

## Chapitre I

# Synthèse Bibliographique

### I.1 Introduction :

Les sols sont des matériaux souvent hétérogènes avec des propriétés variables. Ils peuvent présenter divers problèmes, tels qu'une capacité portante réduite et des déformations (tassements). Grâce aux avancées constantes de la mécanique des sols et aux recherches menées dans le domaine de la géotechnique, un large éventail de techniques a été développé pour améliorer les propriétés mécaniques des sols de qualité médiocre.

Ce chapitre décrit le sol et les diverses techniques pour améliorer le sol, mécaniques, hydrodynamiques, thermiques et chimiques.

### I.2 Définition d'un sol :

Un sol est un assemblage hétérogène de particules ou de cristaux aux propriétés très variables : dimensions, formes, propriétés physico-chimiques, etc. Un sol contenant de l'argile sera influencé par la teneur en eau, c'est une question centrale en géotechnique.

Le sol est un matériau à trois phases, phase solide (Squelette minéral), phase liquide et phase gazeuse. Chaque phase joue un rôle bien précis dans le comportement du sol.

### I.3 Caractérisation des sols instables :

Les sols fins, en particulier l'argile, sont composés de particules minérales de petite taille, généralement inférieure à 2  $\mu\text{m}$ . Ces matériaux ont fait l'objet de nombreuses recherches pour comprendre leurs propriétés minéralogiques. Au niveau minéralogique, les argiles sont des silicates simples ou complexes d'aluminium, de magnésium et de fer. La plupart des minéraux argileux sont organisés en couches, ce qui leur donne une structure en feuillets, d'où leur nom de phyllosilicates. Chaque particule est constituée d'un empilement de dizaines voire de centaines de feuillets. La minéralogie de l'argile et ses propriétés sont déterminées par l'épaisseur et l'espacement des couches (feuillets). globalement, on identifie trois principaux types d'argiles dans les sols : la kaolinite, la smectite et l'illite. Ces types d'argiles peuvent être présents en différentes proportions dans les sols, en fonction de leur composition chimique et de leur origine géologique.

### I.3.1 Les Argiles :

Les argiles se forment par l'altération et la dégradation des roches. Elles subissent une altération physique due aux variations de température, ainsi qu'une altération chimique lorsqu'elles entrent en contact avec l'eau, ce qui les dégrade en particules très fines. Leur diamètre équivalent varie généralement de 1 nm à 0,002 mm. Les argiles ont une perméabilité pratiquement imperméable, ce qui signifie qu'elles ont une faible capacité à laisser passer l'eau. Cependant, leur compressibilité est élevée et, en général, elles ont une capacité portante bien inférieure à celle du gravier et du sable.[1].

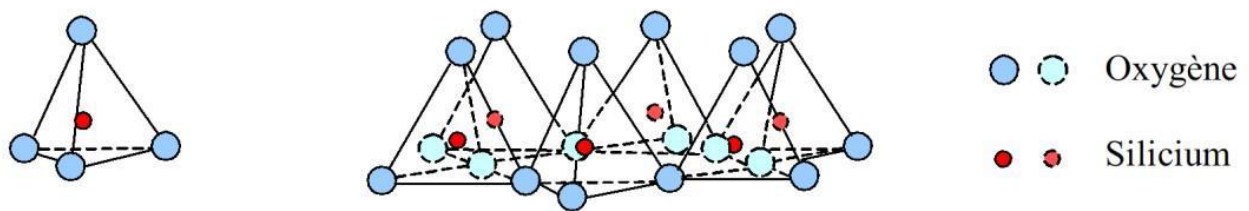


Figure I.1 : Couche Tétraédrique. [2].

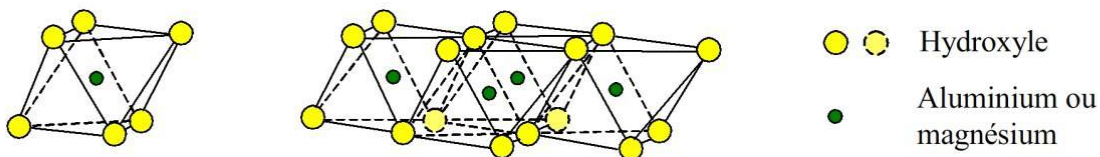


Figure I.2 : Couche Octaédrique. [2].

#### I.3.2.1 Différents types d'argile :

Trois grands types d'argiles peuvent être identifiés. Il y a tout d'abord le groupe de la kaolinite dont le feuillet élémentaire comporte une couche tétraédrique et une couche octaédrique. Les liaisons entre les feuillets sont de type hydrogène et peuvent être qualifiées de liaisons fortes. Les argiles de cette famille sont dites argiles T-O (figure I.4). Le deuxième grand groupe d'argile est celui des illites pour lequel les feuillets sont composés de trois couches : deux tétraédriques et une octaédrique. Les liaisons entre les feuillets se font par des ions potassium énergiquement fixes. Ces argiles sont appelées argiles T-O-T (figure I.5). Le troisième groupe est celui des smectites sont également formes de feuillets à trois couches et sont donc aussi des argiles T-OT (figure I.6). Il n'existe pas de liaison hydrogène entre les feuillets élémentaires ni de cation interfoliaire capable de maintenir fortement les feuillets entre eux de plus les substitutions d'aluminium par du fer ou du magnésium au sein des octaèdres et tétraèdres sont assez fréquentes. La montmorillonite est une argile de famille des smectites comme la bentonite qui est aussi une roche issue de l'altération de cendres volcaniques (Foucault & Raoult, 1995) [3].

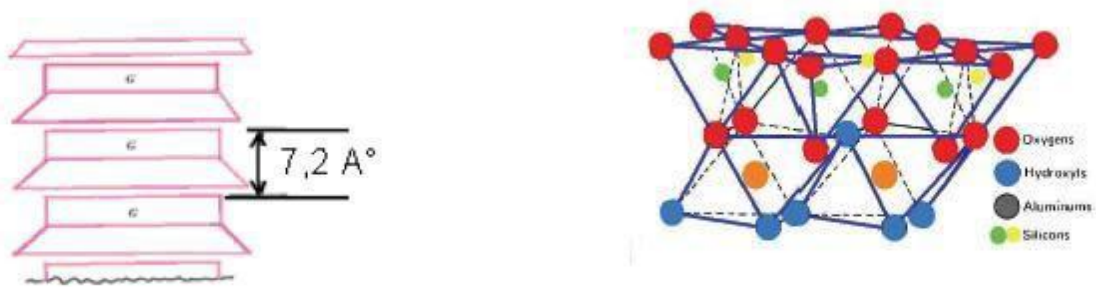


Figure I.3 : Schéma de la particule de kaolinite.[3].

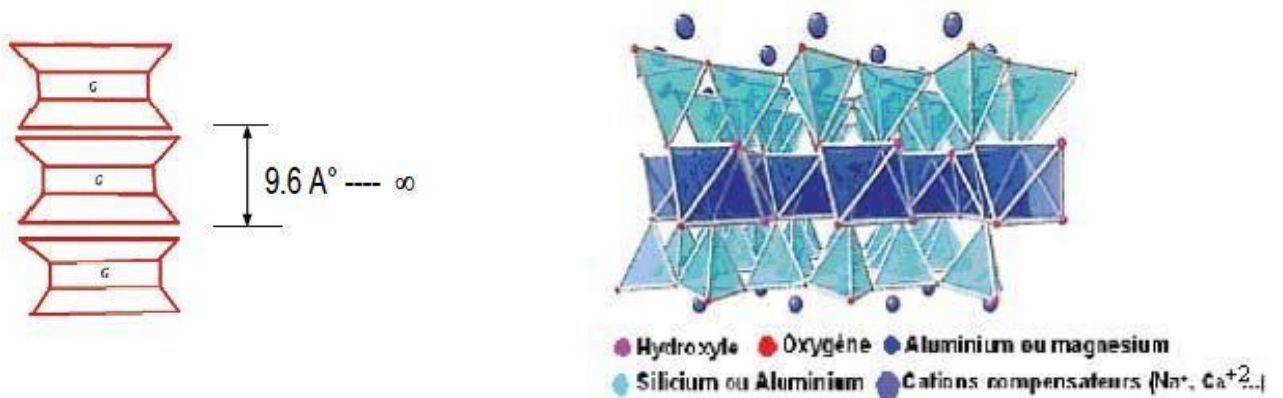


Figure I.4 : Schéma de la particule de montmorillonite. .[3].

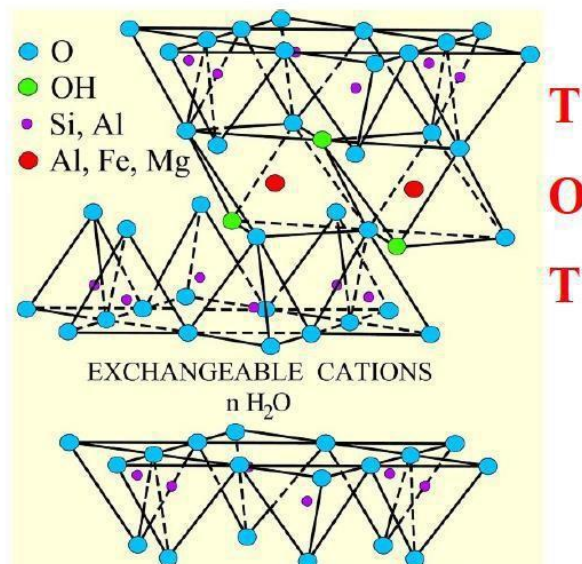
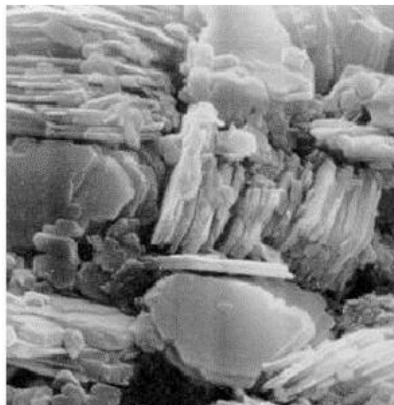
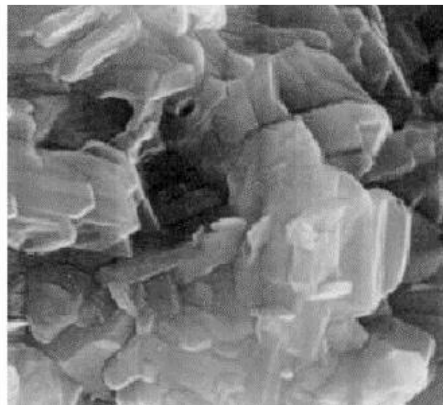
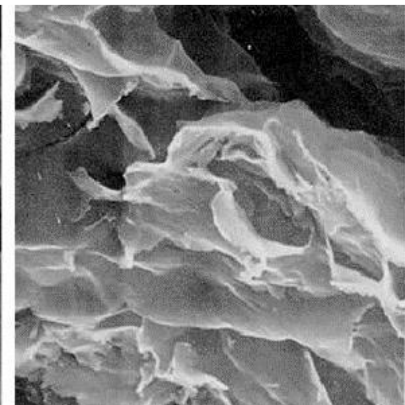


Figure I.5 : Schéma de la particule d'illite.[3].

**Tableau I.1** : Caractéristiques de certaines familles d'argile .

| 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                                  |

**Kaolinite****Illite****Montmorillonite****Figure I.6** : Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles.[3]

### I.3.2 Les Limons :

Les limons sont des sols constitués de particules fines, comprenant du silt et du loëss. Ils possèdent un squelette composé de grains fins à base de silice et de silicocalcaire. Leur taille se situe entre celle du sable et de l'argile, bien que la teneur en argile puisse varier. Les limons ont une perméabilité relativement faible et sont connus pour être des sols fertiles pour l'agriculture. Cependant, en ce qui concerne les fondations ou les plateformes de construction, les limons peuvent poser des problèmes en raison de leur caractère instable. Par conséquent, il est recommandé d'éviter les limons comme arrière-plan pour les fondations ou les plateformes de construction.

### I.3.3 Les Marnes :

Roches tendres de diverses proportions d'argile et de calcaire mélangées à du sable, Il a la propriété de se dissoudre et est utilisé pour l'amélioration des sols en fonction de sa composition, fabrication de ciment, carreaux et céramiques. Considérons trois grandes catégories, selon leur composition :

- Les marnes argileuses qui contiennent 5 à 35 % de carbonate de calcium.
- Les marnes proprement dites et les calcaires marneux avec des taux respectivement de 35 à 65 % et 65 à 95 %.

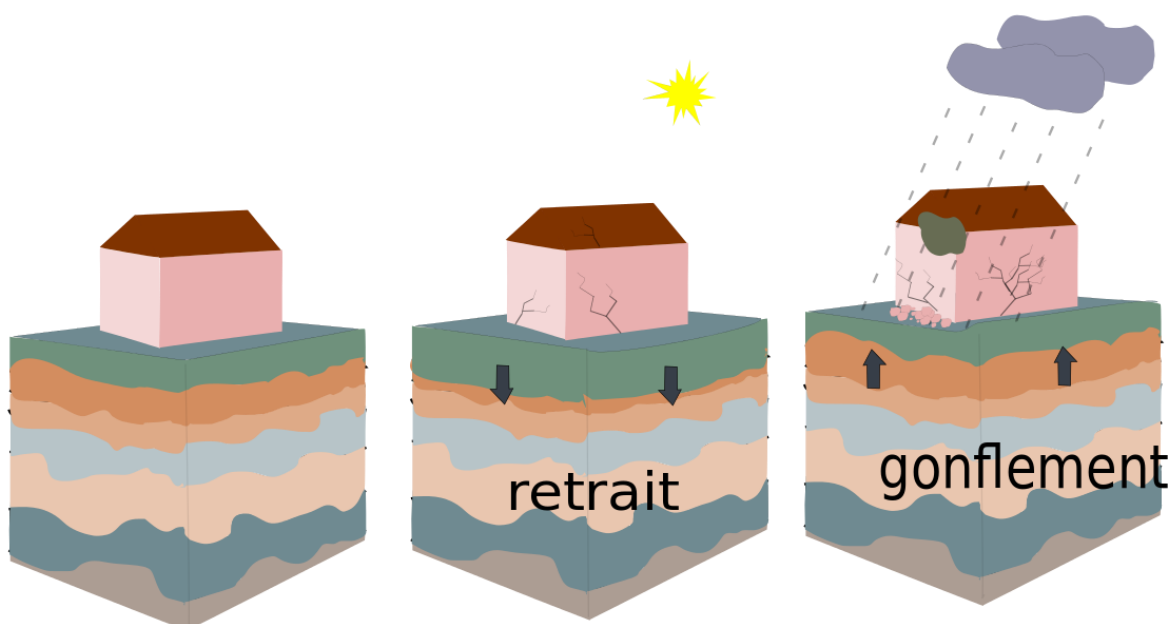
Comme l'argile, la marne argileuse présente l'inconvénient particulier de se fissurer à une certaine profondeur lorsqu'elle est séchée. En général, la marne en l'absence de gypse convient de fondation moyenne et bonne. Par contre, s'ils sont très argileux, ou s'ils sont sur un bloc de plâtre, ils sont médiocres et même dangereux, risquant de former des dolines. On peut conclure que le développement d'un sol finet dû à la présence de minéraux argileux dans le sol tels que : les marnes, les argiles....etc. Montre une excellente sensibilité à l'air (retrait, fissuration désagrégation progressive des couche de sol) et une forteaffinité pour l'eau (avec les conséquences classiques de l'humidification : gonflement, déconsolidation, perte des caractéristique mécaniques).

## I.4 Problèmes des sols instables :

Dans notre pays, l'urbanisation et l'aménagement des routes dans certaines parties de la ville sont confrontés à des défis tels que les problèmes d'expansion, de tassement et de glissement de terrain.

### I.4.1 Gonflement :

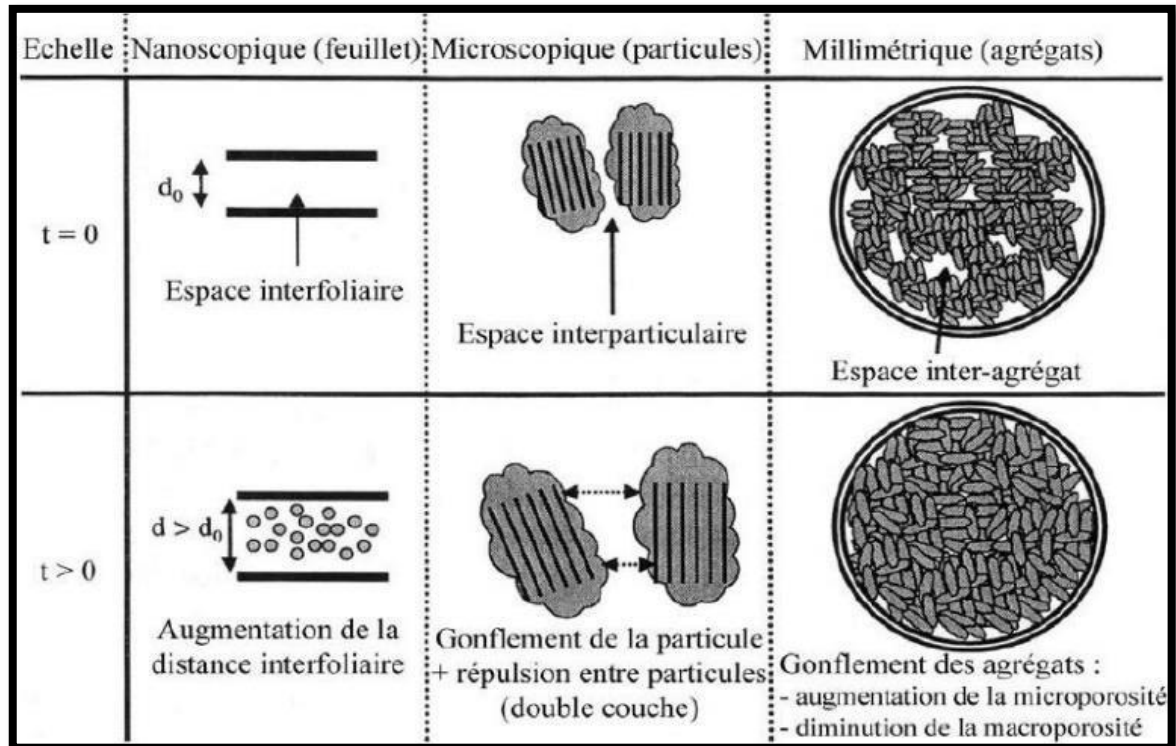
Le gonflement est la cause de l'obstruction fréquente des ouvrages légers. Ce phénomène est lié au changement d'humidité de quelques sols très argileux ou tourbeux qui sont possibles de clouer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse.



**Figure I.7 :** Fissuration due au retrait et gonflement des sols.

L'argile qui entre en contact avec l'eau est connue pour être un matériau qui a la capacité de gonfler. D'après Gens et Alonso (1992), Le phénomène de gonflement semble être dû à deux causes (Figure I.8) :

- L'hydratation des espaces interfoliaires entraînant un accroissement de leurs dimensions (augmentation de la porosité interfoliaire) : gonflement cristallin.
- La répulsion entre les particules (augmentation de la porosité inter foliaire et inter particulaire): gonflement osmotique.



**Figure I.8 :** Schéma présentant les différentes origines du gonflement (Gens et Alonso, 1992).

L'identification des sols gonflants est généralement abordée à partir des paramètres physico-chimiques facilement mesurables lors des essais préliminaires.

Cependant, l'identification indirecte de ce phénomène est rendue complexe en raison de l'existence de plusieurs approches qui diffèrent en termes de paramètres utilisés et de leur nombre. Néanmoins, l'utilisation de ces méthodes d'identification indirecte permet de soupçonner la présence d'un sol à caractère expansif. En revanche, les paramètres d'identification directs obtenus à partir des essais de gonflement offrent une caractérisation plus précise du comportement gonflant du sol [4].

En géotechnique, l'approche macroscopique est considérée comme la plus appropriée pour étudier le phénomène de gonflement. Cette approche distingue trois concepts : la pression de gonflement, le potentiel de gonflement et l'indice de gonflement. Ces concepts ne sont pas considérés comme des caractéristiques intrinsèques du matériau gonflant et ne peuvent pas être définis de manière objective, car ils dépendent des conditions spécifiques du processus de gonflement. Cependant, ils sont largement utilisés et ont influencé les procédures d'essais en laboratoire. Ils sont définis comme suit : le potentiel de gonflement ( $\varepsilon_g$ ) (Figure I.9).

### I.4.2 Tassement :

Il s'agit d'une baisse du volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes et argiles) sous l'action des charges appliquées et de la diminution du niveau de l'aquifère dû à la surexploitation (FigureI.11).



**Figure I.9 :** Fissures, tassements sur la route du Tlemcen.

### I.4.3 Glissement :

Les glissements de terrain sont souvent des formations marneuses et argileuses, qui se caractérisent par des loupes superficielles de glissement (appelées aussi loupes d'arrachement (et parfois de solifluxion), sortes de demi-sphères biconvexes avec des structures d'arrachement et de rupture en tête (partie haute de la loupe dégageant parfois une couronne et une niche d'arrachement) et de grosses déformations de la surface en pied et en front de glissement (partie basse de la loupe) [5].

Outre les dégâts humains et matériels qui surviennent parfois, ces événements peuvent modifier (parfois significativement) le paysage, créer des lacs ou petites retenues d'eau [6], plus ou moins durables ou instables, affecter des infrastructures et modifier le fonctionnement de la circulation locale de l'eau et des sédiments [7].



Figure I.10 : Glissement de terrain sur la route de Bab el oued vers Chevalley (Alger ; 2018)

#### I.4.4 Affaissement :

Un affaissement de terrain se produit lorsqu'il y a un déplacement progressif et continu du sol ou du sous-sol. Certains types de sols compressibles peuvent s'affaisser sous le poids des structures qui les surplombent. Le phénomène de collapse, quant à lui, se réfère à la diminution du volume de sol qui se produit après son exposition à certaines conditions, que ce soit avec ou sans charge. Cette réduction de volume entraîne une compression irréversible du sol qui était initialement lâche ou moins dense..

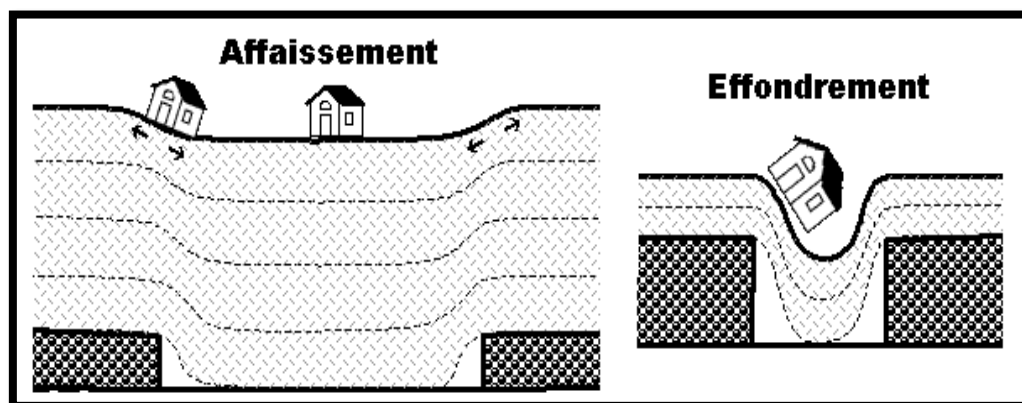


Figure I.11 : Schéma expliquant l'affaissement minier et l'effondrement.



**Figure I.12 :** Affaissement de terrain à route national 24 (Alger).

## **I.5 Traitement des sols :**

Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, de nombreuses techniques ont été développées par ces chercheurs pour améliorer l'ingénierie géotechnique et les propriétés mécaniques du sol. Le choix des méthodes de traitement des sols dépend principalement de la profondeur et de la capacité portante requises pour l'ouvrage en question. Ces techniques permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques initiales des sols et de leur conférer de nouvelles performances afin de soutenir les constructions de manière sûre et fiable.

### **I.5.1 Objectifs du traitement des sols :**

Le but de la stabilisation des sols est de réduire le volume des vides entre les particules solides, colmater les vides en créant des liens pour l'amélioration des liaisons existantes entre particules afin d'augmenter la résistance mécanique et de diminuer la sensibilité à l'eau.

Le traitement des sols à problèmes vise à répondre aux points mentionnés ci-dessous :

- Rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir.
- Éviter le décapage et le remplissage par des matériaux d'apport.
- L'assèchement des sols permettent de les rendre praticables aux engins de chantiers.
- L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable.
- Limiter la sensibilité des argiles à l'eau.
- Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre particules (résistance mécanique).
- Chez les sols argileux une réduction instantanée de l'angulosité avec la floculation.
- Diminuer les variations de volume dans le cas des sols gonflants.

## I.5.2 Techniques de traitement des sols :

Il existe plusieurs techniques de traitement des sols mal caractérisés. C'est une question de stabilisation, il existe de nos jours trois techniques de traitement ou de stabilisation des sols en géotechnique :

- **Mécanique** (densification par compactage, pré-chargement, ...).
- **Hydraulique** (drainage, rabattement de la nappe, ...).
- **Thermique** (congélation, cuisson, ...).
- **Chimique** (ajout de produits : chaux, ciment, ...).

Le choix de l'une de ces méthodes relie de plusieurs paramètres tels que ; rendre au compte les considérations économiques, la nature du sol à traiter, le temps de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les facteurs d'environnement.

### I.5.2.1 Méthodes mécaniques :

#### I.5.2.1.1 Compactage :

Le compactage est une méthode importante de la stabilisation des sols. Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques (apport d'énergie mécanique), qui conduisent à accroître la densité d'un sol

Le compactage peut faire ; une modification de la granulométrie, modification de la teneur en eau, réduction ou élimination des risques de tassement, augmentation de la résistance du sol et la stabilité dutalus, amélioration de la capacité portante, et limitation des variations de volume causées par gel, gonflement et retrait. Nous citerons deux méthodes de compactage :

Compactage dynamique et Vibro-compactage.

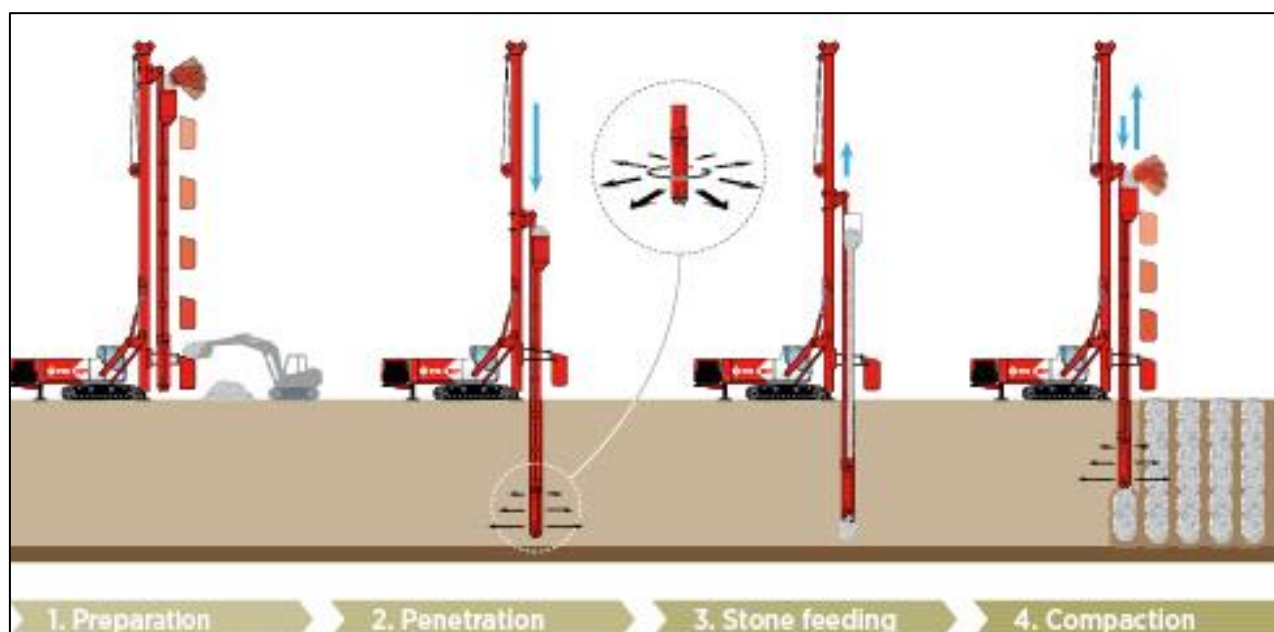
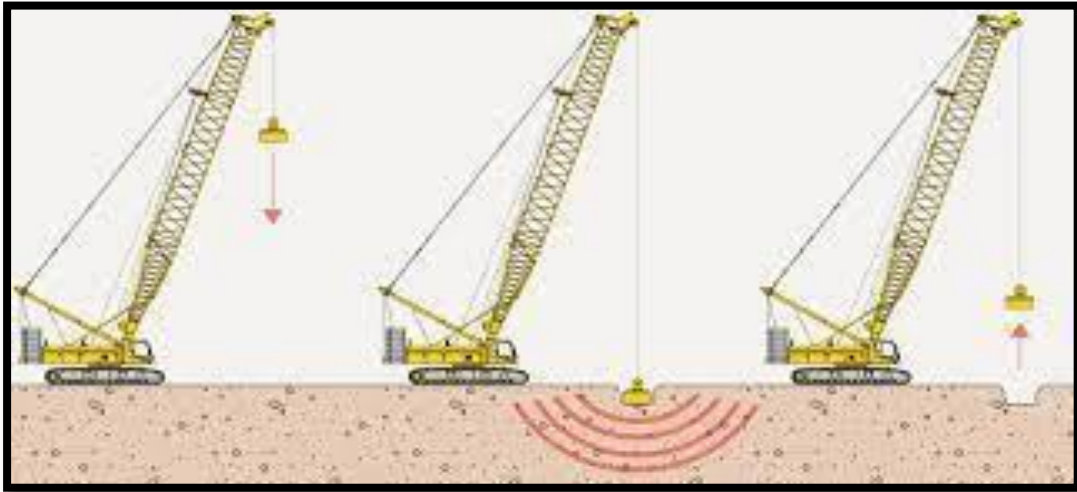


Figure I.13 : Technique de Vibro-compactage.



**Figure I.14 :** Compactage dynamique du terrain.

### **I.5.2.2 Méthodes thermique :**

Une augmentation de la température peut améliorer la résistance d'une argile en réduisant la répulsion électrique entre les particules, sous l'effet de la chaleur on provoque un écoulement de l'eau interstitielle due au gradient thermique appliqué [9].

#### **I.5.2.2.1 Cuisson :**

Cette méthode de traitement, destinée aux ouvrages de grande envergure, a été initialement proposée par Ostasheven (1934) et est décrite dans le guide technique LCPC/SETR (2000). Elle consiste à soumettre le sol à un processus de chauffage contrôlé. Pendant plusieurs jours, de l'air ou un gaz chauffé entre 200 et 800 degrés Celsius est injecté dans le sol. Ce procédé provoque la fusion du squelette du sol, permettant ainsi une fusion des contacts entre les particules.

#### **I.5.2.2.2 Congélation :**

La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé [10].



**Figure I.15 :** La congélation du sol sur chantier.

### **I.5.2.3 Méthodes Chimique :**

Le traitement chimique est une technique de l'objectif d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Le grand intérêt à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts. Cette méthode pour effet de réagir avec la fraction argileuse et de modifier leur environnement chimique et sa structure minéralogique.

Le traitement chimique des sols s'effectue à l'aide d'additifs. On en distingue trois types :

- Le traitement par ajout de matériaux inertes (sables, graviers).
- Le traitement aux liants hydrauliques (ciments et chaux).
- Le traitement par addition de solutions salines dont l'efficacité serait très influencée par la nature du fluide hydratant ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ) et de sa concentration.

### **I.5.2.4 Le traitement chimique par additifs :**

Elle est employé surtout pour des sols contenant une certaine quantité d'argile. Ils ont pour effet de réagir avec la fraction argileuse et de modifier leur environnement chimique et sa structure minéralogique. Parmi les traitements les plus couramment utilisées, on distingue : traitement par ajout de chaux, par ajout de ciment et traitement mixte (ciment-chaux).

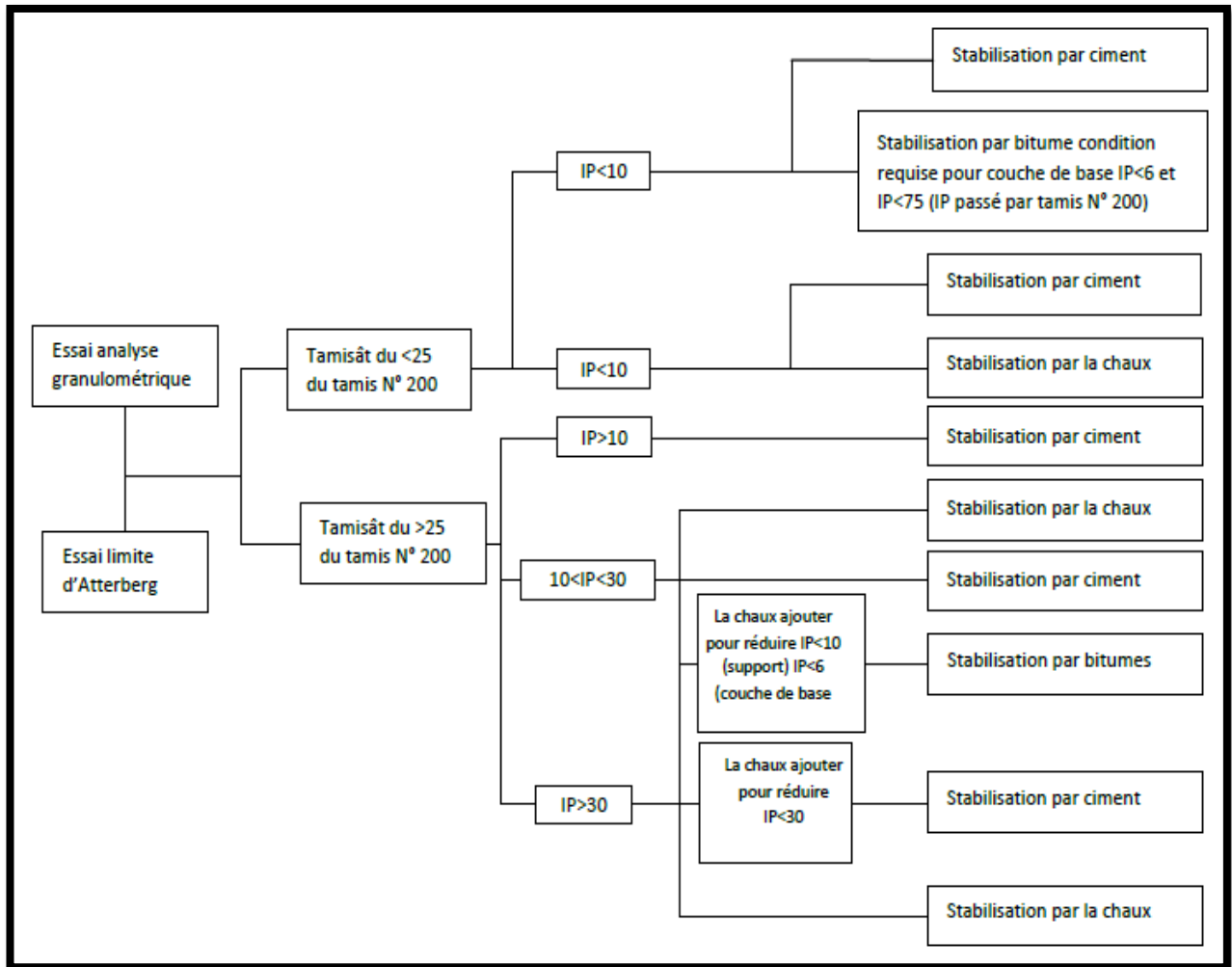


Figure I.16 : Critères d'utilisation du traitement chimique (Dept. Of the Army, 1983).

Tableau I.2 : Synthèse sur les dosages en stabilisants pratiqués pour le traitement des sols selon les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004).

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

#### I.5.2.4.1 Traitement à la chaux :

La chaux est un matériau contenant de l'oxyde de calcium et de magnésium ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) et/ou de l'hydroxyde de calcium et de magnésium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ). Selon la composition et les autres constituants, est utilisé comme liant, en traitement de sol. L'utilisation de la chaux pour stabiliser l'argile est connue depuis des décennies, savais du succès. En effet, dans certaines études, les propriétés mécaniques La quantité de sol traité à la chaux peut être modifiée en permanence. (Biczysko, 1996 ; Greaves, 1996 ; Kelley, 1988). Littré (1995), rapporte qu'en général, un sol stabilisé à la chaux fournit une performance structurale équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou en concassé. Le traitement à la chaux est recommandé pour les sols dont la teneur en argile est supérieure à 40%. Le comportement de ces sols fins est modifié par l'ajout de chaux. Plusieurs réactions sont initiées lors de l'ajout de la chaux à un sol : l'échange cationique et la floculation modifient presque instantanément la plasticité, la maniabilité, la résistance et les propriétés de déformation sous charge d'un sol (Moore, 1987).



Figure I.17 : Traitement des sols à la chaux.

#### I.5.2.4.2 Traitement au ciment :

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont a priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles, auxquels il apporte cohésion, résistance mécanique, stabilité à l'eau et au gel. Le ciment rigidifie rapidement le sol de manière irréversible mais s'il y a rupture de l'horizon traité (action mécanique) il n'y a pas de nouvelle prise.



Figure I.18 : Traitement des sols au Ciment.

**I.5.2.4.3 Traitement mixte (chaux-ciment) :**

L'ajout de ciment avec de la chaux aide à augmenter les propriétés mécaniques du sol traité. En général, le sol est traité d'abord avec de la chaux et en préparation pour l'ajout de ciment. Cette première étape permet de sécher le sol en absorbant et en évaporant l'eau. Ce processus de modification réduit considérablement l'indice de plasticité rendant le sol fragile et donc plus gérable. L'ajout de ciment mélangé fournit alors le pozzolan nécessaire pour que le sol gagne en résistance mécanique au fil du temps. Le sol avec un faible pourcentage d'argile, et donc moins de silice et d'alumine, ont besoin de ce ciment si les réactions pozzolanes (installation) sont souhaitables. Prusinski et al. (1999) Contrairement à une croyance répandue, le ciment Portland peut stabiliser le sol aussi efficacement que 50.

**Tableau I.3 : Les avantages et les inconvénients des différentes techniques de stabilisation [11]**

| Technique               | Procédés           | Avantage   | inconvénient  |
|-------------------------|--------------------|--|---|
| Stabilisation mécanique | compactage         | -Le compactage est le plus économique.<br><br>-Réduire le potentiel expansif | Il faut une grande Quantité d'eau. (compacter au-dessus de l'optimum avec une W. élevée). |
|                         | substitution       |  | -L'épaisseur de la Couche.<br>-La disponibilité du matériau.                              |
|                         | Pré humidification |  | -Le temps de l'opération.<br>-La distribution uniforme                                    |

|   |                          |  |   |
|---|--------------------------|--|---|
|   |                          |  | de W.   |
|   | Méthode de contrôle      | Minimiser l'humidification ou dessèchement   | La sensibilité à 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 de matériaux) | Les sels                 | -Augmenter la concentration ionique de l'eau libre,<br>-Réduire le phénomène d'échange   | Le choix de type de dosage et de la méthode d'addition d'un produit (Valence et rayon du cation). |
|   | Le ciment                | -augmenter la résistance<br>-diminuée la plasticité<br>-réduire le potentiel de variation de volume<br>-Augmenter la limite de retrait     | utilisation d'un dosage important.  |
|   | La chaux                 | -diminuer la plasticité, la densité sèche et la pression du gonflement Augmenter la résistance et Wopm.<br>-utilisation d'un faible dosage | Carbonations de la chaux  |

## I.6 Traitement des sols par ciment

### I.6.1 Le Ciment :

Le terme "ciment" vient du latin cémenteux, qui signifie mortier de liaison. Le ciment est un produit fragmenté du refroidissement du clinker contenant un mélange de silicates et d'aluminates de calcium fondu à 1450–1550 °C. Ensuite, vous faites des nœuds fermes, appelés clinker; Le ciment Portland est produit par un broyage très fin avec l'ajout d'une petite quantité de gypse. D'autres types peuvent être obtenus en mélangeant 98 % de ce clinker broyé avec des composants, eux aussi broyés, à propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques : il s'agit soit de laitier granulé de haut fourneau ou de cendres volantes, soit de pouzzolane naturelle ou artificielle.

Il existe différents types de ciments, notamment les ciments alumineux ou sursulfatés. Le ciment est principalement utilisé dans la fabrication du béton, où il joue un rôle actif en tant que composant principal. Cependant, il entre également dans la composition de mortiers pour la maçonnerie ou la construction de façades [14].



Figure I.19 : La composition du ciment.

### I.6.2 Les Constituants du Ciment :

- **Clinker :**

Le clinker est un constituant du ciment, qui résulte de la cuisson à très haute température d'un mélange composé d'environ 80 % de calcaire ( $\text{CaCO}_3$  qui apporte l'oxyde de calcium,  $\text{CaO}$ ) et de 20 % d'aluminosilicates (essentiellement des argiles : phyllosilicates) qui apportent les oxydes de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et de fer ( $\text{FeO}$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). La « farine » ou le « cru » est formé du mélange de poudre de calcaire et d'argile. La cuisson, ou clinkérisation, se fait à une température d'environ  $1450^\circ\text{C}$ , ce qui explique la forte consommation énergétique de ce processus.

- **Le gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) :**

L'ajout de gypse au clinker a pour objectif de réguler le processus de prise du ciment, en particulier pour les ciments contenant des proportions significatives d'aluminate tricalcique. Le gypse permet d'assurer que la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, se produit de manière contrôlée environ une demi-heure après le début de l'hydratation. En l'absence de gypse, la prise pourrait être irrégulière et se produire de manière trop rapide.

### I.6.3 Types de ciment :

Les ciments sont classés selon des appellations et des catégories précises en fonction de l'usage qui peut en être fait. Dans tous les cas, le ciment doit répondre à la norme NF EN 197-1 :

- Le ciment Portland : également appelé CEM I.
- Le ciment Portland composé : également appelé CEM II A ou B, qui contiennent au moins 65% de clinker, Cesont les plus utilisés en l'Algérie ; **(CEM II)**.
- Le ciment de haut fourneau, qui contiennent entre 60 et 75% de laitier de hauts-fourneaux ; **(CEM III)**.
- Les ciments CLK, ciment de laitier de clinker, qui contiennent 80% de laitier de hauts-fourneaux ; **(CEM IV)**.
- Les ciments CLX, ciment de laitier à la chaux ; **(CEM V)**.

Les ciments sont également magnificenceés en fonction de leur résistance à los angeles compression. Les ciments produits et commercialisés en Algérie, sont essentiellement constitués de CPJ32.et 42.5, et c'est les plus demandés et CRS (Ciment résistant aux sulfates) largement utilisé dans les régions du sud. Le ciment fabriqué localement est livré en vrac, soit en sac double ou triples plis de 50Kg et 25Kg.

#### **I.6.4 Réactions physico-chimiques du ciment :**

Le ciment est un matériau liant hydraulique qui, lorsqu'il est finement moulu et mélangé avec de l'eau, forme une pâte qui prend et durcit grâce à des réactions et des processus d'hydratation. Une fois durci, il conserve sa résistance et sa stabilité, même en immersion dans l'eau. Le ciment Portland est l'une des nombreuses variétés de ciment disponibles sur le marché.

La composition typique du clinker du ciment Portland est généralement de 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) et 3% d'autres composés. Il contient également quatre phases majeures : l'alite (3CaO.SiO<sub>2</sub> ou C3S), la bélite (2CaO.SiO<sub>2</sub> ou C2S), la célite, qui est le mélange d'aluminate de calcium (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C3A) et de ferro aluminate de calcium (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C4AF). En plus de ces phases, on trouve également plusieurs autres phases telles que les sulfates d'alcalins ou l'oxyde de calcium, mais en quantités très faibles [15].

#### **I.6.5 Réactions physiques :**

Différentes réactions physiques se produisent pendant la prise du ciment. Il y a d'abord la formation d'une pâte de particules solides. A cet effet, les espaces inter particules sont interconnectés et remplis d'eau dite eau « capillaire ». Se développe ensuite à la surface des grains de ciment, un revêtement d'ettringite empêchant la prise éclair. La réaction d'hydratation du ciment continue et après deux heures, il y a formation des cristaux fibreux qui sont des silicates de calcium hydratés (CSH).

#### **I.6.6 Technique de Traitement des sols par ciment :**

Dans certains endroits, la réalisation d'un traitement de sol implique un certain nombre de travaux fondamentaux qui nécessitent une planification précise, des connaissances techniques et des équipements spéciaux.

Les procédés de traitement des sols au ciment peuvent se faire dans un ordre différent selon que le traitement des sols est réalisé sur place ou non. Ou que des mouvements de terre sont à prévoir avant ou après le traitement. On distingue les principales étapes suivantes :

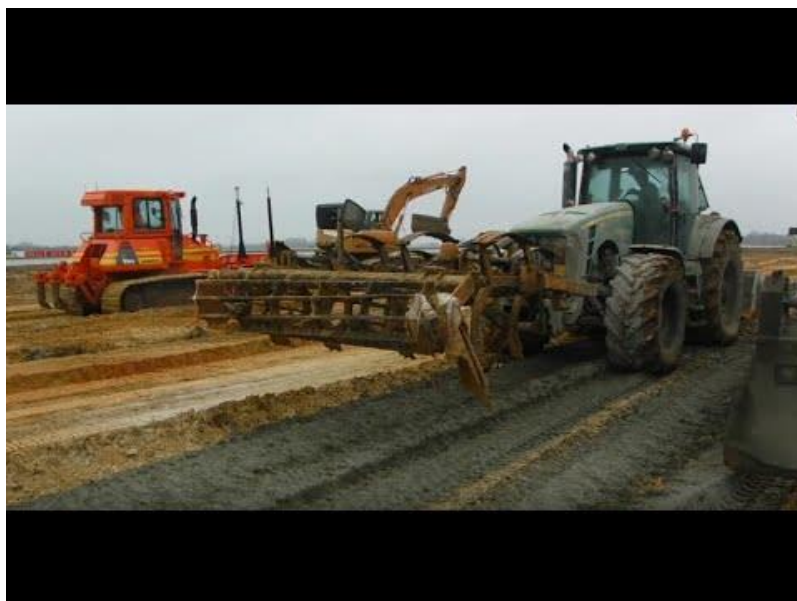
**Préparation du sol à traiter** : cette opération est destinée à faciliter le malaxage ultérieur et consiste à éliminer les éléments volumineux qui pourraient perturber le mélange ou permettre de modifier la teneur en eau du sol par aération ou humidification.. Cette opération n'est pas toujours nécessaire, mais elle se fait au grattoir, auréole ou charrue.



**Figure I.20 :** Préparation de la couche de forme.

**Épandage :** Le ciment est normalement épandu sur un épandeur à pesée équipé d'un dispositif de contrôle de la vitesse du véhicule. Le ciment doit être appliqué avec une extrême précision et régularité. Le ciment est chargé pneumatiquement dans l'épandeur, soit directement à partir du conteneur d'expédition, soit via un pont de silo installé sur le site..

**Malaxage** Le malaxage a pour objectif de réaliser une expansion du sol et d'assurer une répartition uniforme du ciment. En fonction des caractéristiques du sol, de la taille et du type de chantier, cette opération peut être effectuée à l'aide de différents équipements tels que des pulvimixeurs, des excavatrices rotatives, des charrues à disques ou des cisailles de charrue. Dans les espaces restreints, des outils agricoles peuvent être utilisés. L'utilisation d'un agitateur est recommandée sur un chantier sujet à la poussière afin de réduire la dispersion des particules.



**Figure I.21 :** Malaxage du ciment sur chantier.

**Réglage :**Le réglage final consiste à niveler uniformément sur toute la largeur à ajuster. Il est important de noter qu'il ne faut en aucun cas combler les points bas avec du matériau découpé. Cette opération est généralement réalisée à l'aide d'un niveleur. Le matériau excédentaire doit être retiré, en tenant compte de l'épaisseur retirée lors du rabotage. Il est essentiel de veiller à ce que l'épaisseur du matériau traité soit suffisante, généralement d'environ 3 cm.

**Le compactage :** doit être effectuée immédiatement après la prise finale et en tout cas avant la fin du "temps de travail" du mélange de sol, afin d'appliquer l'énergie nécessaire pour atteindre la densité de compactage souhaitée pour chaque couche considérée.



..

**Figure I.22 :** Le compactage du mélange de sol.

**Protection du matériau traité :** Cette couche de protection de surface a pour objectif d'imperméabiliser la zone traitée et de la préserver des intempéries, de l'évaporation de l'humidité et du trafic. Il est recommandé de réaliser cette étape dès que possible après la fin du compactage final.

### **I.6.7 Les Avantages de traitement des sols par ciment :**

Le traitement des sols au ciment sur place est une technique qui offre trois types d'avantages : techniques, économiques et environnementaux.

D'un point de vue technique, cette technique permet d'obtenir une couche de traitement homogène, durable et stable sur le remblai et la couche supérieure, avec des propriétés mécaniques comparables à celles du béton et des graves hydrauliques. De plus, la rigidité de la nouvelle structure permet de répartir uniformément la charge sur la poutre, ce qui facilite l'adaptation aux contraintes d'exploitation.

En termes d'intérêts économiques, le traitement cimentaire des sols sur site est une technique de traitement à froid peu énergétique. En réutilisant les matériaux sur place, il est possible de minimiser les incisions dues aux tracas, au coulage, à la fourniture d'agrégats et aux coûts de transport associés.

Finalement, cette technique présente également des avantages environnementaux importants. Le traitement à froid réduit considérablement la pollution et le rejet de gaz nocifs dans

l'atmosphère. La réutilisation des matériaux sur site permet la conservation des gisements de granulats (carrières, gravières), ressources naturelles non renouvelables, contribuant ainsi à la préservation de l'environnement.

### **I.6.8 Conclusion :**

La technique de traitement du sol avec du ciment présente de grands avantages. Il est donc possible d'utiliser des matériaux qui ne peuvent être recyclés d'aucune autre manière. La réglementation prévoit des enquêtes pour évaluer l'aptitude du sol aux travaux de construction.

# **2<sup>ème</sup> Partie**

## **Étude expérimentale**

# **Chapitre II**

**Programme expérimental  
et procédures d'essais**

## Chapitre II

### Programme expérimental et procédures d'essais

#### II.1 Localisation du site de Chaaba El Hamra :

Le site de Chaaba El Hamra est situé au Nord de de la commune de M'sila, près de l'intersection de la route nationale RN45 avec l'évitement Nord– Est de M'sila (figure II.1)



Figure II.1. Situation géographique du site de Chaaba el Hamra

#### II.2 Programme expérimental

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.

Ce programme est réparti en deux parties :

### III.2.1 Essais d'identification

- La granulométrie.
- Les limites de consistance.
- L'essai bleu de méthylène.

### III.3.1 Essais de caractérisation

- Essais Proctor Modifié.
- Essais C.B.R (Californie Bearing Ratio)
- Essais de compression simple

## II.3 Description des essais :

### II.3.1 Essais d'identification :

#### II.3.1.1 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions de grains de différentes tailles d'un matériau. Elle s'effectue :

- par tamisage (tamis à maille carrée) pour des grains de diamètre supérieur à 80  $\mu\text{m}$ ,
- par sédimentométrie pour les grains les plus fins. Elle consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente. (Loi de Stokes). La mesure de la densité de la suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion de grains de chaque diamètre.

Les analyses granulométriques par tamisage et par sédimentométrie ont été réalisées selon respectivement les normes **NF P18-560** et **NF P94-057**.



**Figure II.2** Analyse granulométrique par tamisage.



**Figure II.3** Analyse granulométrique par sédimentométrie.

### II.3.1.2 Les limite d'Atterberg

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

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

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence  $I_p = W_L - W_P$  qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon.

La détermination des limites d'Atterberg a été réalisée selon la norme **NF P 94-051**.



**Figure II.4** Essai de limite d'Atterberg.

### II.3.1.3 L'essai au bleu de méthylène :

Il permet de mesurer la capacité d'adsorption ionique des sols et granulats à l'aide du bleu de méthylène. Il a pour but de déterminer la quantité et l'activité de la fraction argileuse d'un sol d'une façon globale. Le résultat de l'essai dépend directement à la fois de la quantité et de la nature minéralogique de cette fraction. Le principe de l'essai consiste à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées. Il apparaît alors un début d'excès qui marque la fin de l'essai et que l'on détecte par le test dit à la tâche. Ce test consiste à former avec une goutte de la suspension déposée sur du papier filtre normalisé, une tâche qui est un dépôt de sol coloré en bleu soutenu, entourée d'une zone humide incolore. L'excès de bleu se traduit par l'apparition dans cette dernière zone d'une auréole bleu clair. On dira alors que le test est positif. L'essai a été réalisé selon la norme **NF P 94-068**.



**Figure II.5** L'essai au bleu de méthylène (VBS).

## II.3.2 Essais de mécanique

### II.3.2.1 Essai Proctor modifié

L'essai Proctor a pour objectif la détermination de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale pour un compactage normalisé d'intensité donnée. Il consiste à compacter de façon identiques des échantillons d'un même sol avec des teneurs en eau différentes. On constate que la densité sèche  $\gamma_d$  varie et passe par un maximum pour une teneur en eau déterminée dite optimale ( $W_{OPT}$ ). L'essai a été réalisé selon la norme **NF P 94-093**.



**Figure II.6** Essai Proctor modifié.

### II.3.2.2 Essai CBR

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

#### a) Essai C.B.R immédiat

Cet essai est un paramètre incontournable pour le dimensionnement mécanique des chaussées.

L'indice CBR est une grandeur utilisée pour caractériser un sol, en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée. Le principe général de l'essai servant à déterminer l'indice de portance CBR, consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique de  $19,35 \text{ cm}^2$  de section pour le faire pénétrer à la vitesse de  $1,27 \text{ mm/mn}$  dans une éprouvette de sol.

Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué les enfoncements de 2,5 et 5 mm sont alors rapportés, aux valeurs de 13,35 et 19,93 kN, qui sont respectivement les forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements.

$$CBR_1 = \frac{F_1}{13.35} \times 100$$

$$CBR_2 = \frac{F_2}{19.93} \times 100$$

F1 et F2 correspondent aux forces des enfoncements de 2,5 et 5 mm respectivement, elles sont exprimées en kN.

L'indice portant CBR est alors défini conventionnellement par la plus grande valeur, des rapports ainsi calculés.



Figure II.7. Essai C.B.R

#### b) Essai C.B.R après immersions

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

L'indice portant CBR est alors défini conventionnellement par la plus grande valeur, des rapports ainsi calculés. L'essai a été réalisé selon la norme **NF P 94-078**.



Figure II.8 Immersions des éprouvettes.

### II.3.2.3 Essais de compression simple :

L'essai a été réalisé suivant la norme **NF P18-406**. L'éprouvette est soumise à une charge monotonement croissante jusqu'à la rupture.

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette :

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

Où :

- $R_c$  : résistance à la compression de l'éprouvette en MPa.
- $F$  : charge maximale supportée par l'éprouvette en kN.
- $S$  : valeur moyenne de la section en  $\text{cm}^2$



**Figure II.9** Essai Compression simple.

# **Chapitre III**

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

## Chapitre III

### Présentation et analyse des résultats d'essais

#### III.1 Introduction :

Outre les essais d'identification, le programme expérimental exécuté comporte des essais de compactage type Proctor modifié, des essais CBR immédiat et imbibé et de compression simple.

Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats de l'essai réalisé sur le sol étudié et leurs interprétations.

#### III.2 Résultats Des Essais :

##### III.2.1 Les essais d'identification :

##### III.2.1.3 Analyse granulométrique :

La figure III.1 regroupe les courbes d'analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie.

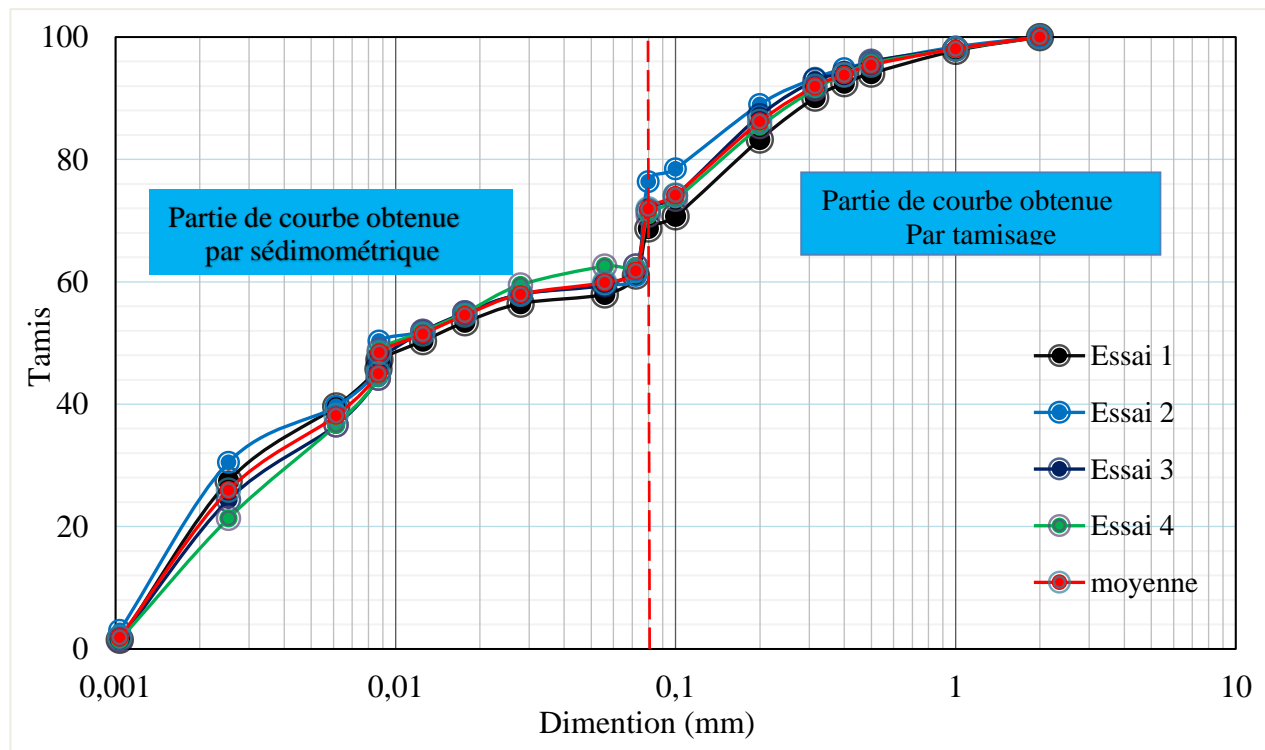


Figure III.1 : Courbe d'analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie).

## III.2.1.3 Limites d'Atterberg

- Limite liquidité :

Tableau III.1 : Les résultats d'essai N°02 de la limite de liquidité du sol non traité.

| Nombre de coups                          | 18           |       | 23           |       | 28           |       | 34           |       |
|--|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
| Tare N                                   | E            | A     | T10          | 5     | M1           | T5    | X1           | 6     |
| Masse de tare ; Mt(g)                    | 3.59         | 3.872 | 4.35         | 3.91  | 3.99         | 3.54  | 3.47         | 3.98  |
| Masse (du sol humide + tare)<br>(Mh +Mt) | 11.36        | 11.29 | 13.41        | 12.56 | 8.63         | 9.08  | 10.31        | 11.33 |
| Masse (du sol sec + tare)<br>(Md +Mt)    | 9.27         | 9.32  | 11.01        | 10.27 | 7.44         | 7.67  | 8.59         | 9.50  |
| Masse d'eau ; Mw (g)                     | 2.09         | 1.96  | 2.39         | 2.28  | 1.19         | 1.41  | 1.71         | 1.83  |
| Masse du sol sec ; Md (g)                | 5.67         | 5.45  | 6.66         | 6.36  | 3.44         | 4.13  | 5.12         | 5.51  |
| Teneur en eau ; W(%) ;<br>Mw/Md          | 36.88        | 36.08 | 35.91        | 35.94 | 34.54        | 34.20 | 33.50        | 33.15 |
| W moy(%)                                 | <b>36.48</b> |       | <b>35.93</b> |       | <b>34.37</b> |       | <b>33.33</b> |       |
| W <sub>L</sub>                           | <b>35.04</b> |       |              |       |              |       |              |       |

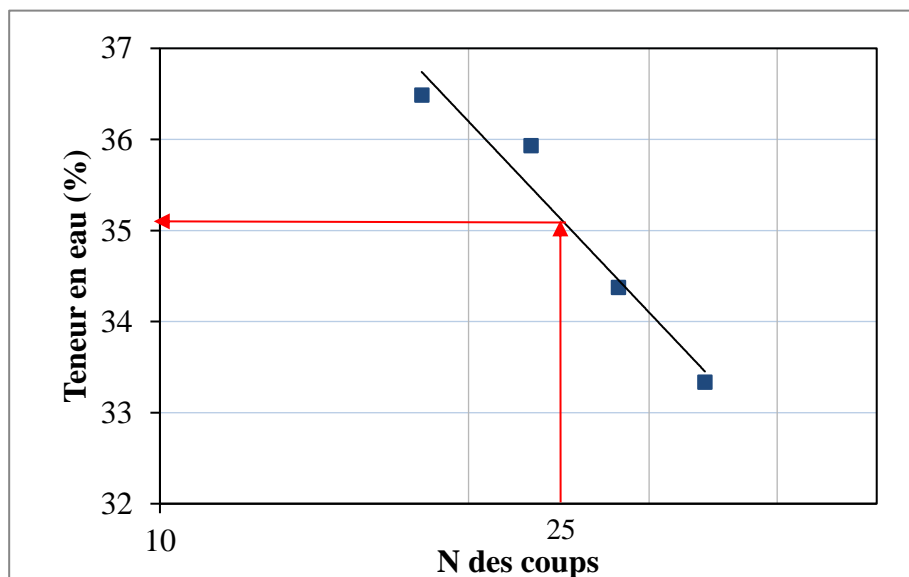


Figure III.2 : La courbe de limite de liquidité du sol non traité. (Essai N°02)

- Limite de plasticité :

Tableau III.2 : Limite de plasticité du sol non traité (Essai N°02).

|                                      | Essai 1      | Essai 2 | Essai 3 | Essai 4 |
|--------------------------------------|--------------|---------|---------|---------|
| Tare N                               | S4           | N1      | V       | M24     |
| Masse de tare ; Mt(g)                | 3.47         | 3.87    | 3.75    | 3.20    |
| Masse (du sol humide +tare) (Mh +Mt) | 3.92         | 4.43    | 4.13    | 3.92    |
| Masse (du sol sec +tare) (Md +Mt)    | 3.84         | 3.34    | 4.07    | 3.80    |
| Masse d'eau; Mw (g)                  | 0.07         | 0.09    | 0.06    | 0.12    |
| Masse du sol sec ; Md (g)            | 0.36         | 0.46    | 0.32    | 0.60    |
| Teneur en eau; W (%); Mw/Md          | 19.78        | 20      | 19.87   | 19.9    |
| Wp                                   | <b>19.88</b> |         |         |         |

Indice de plasticité (Essai N°02) :  $IP = WL - WP = 15.36$

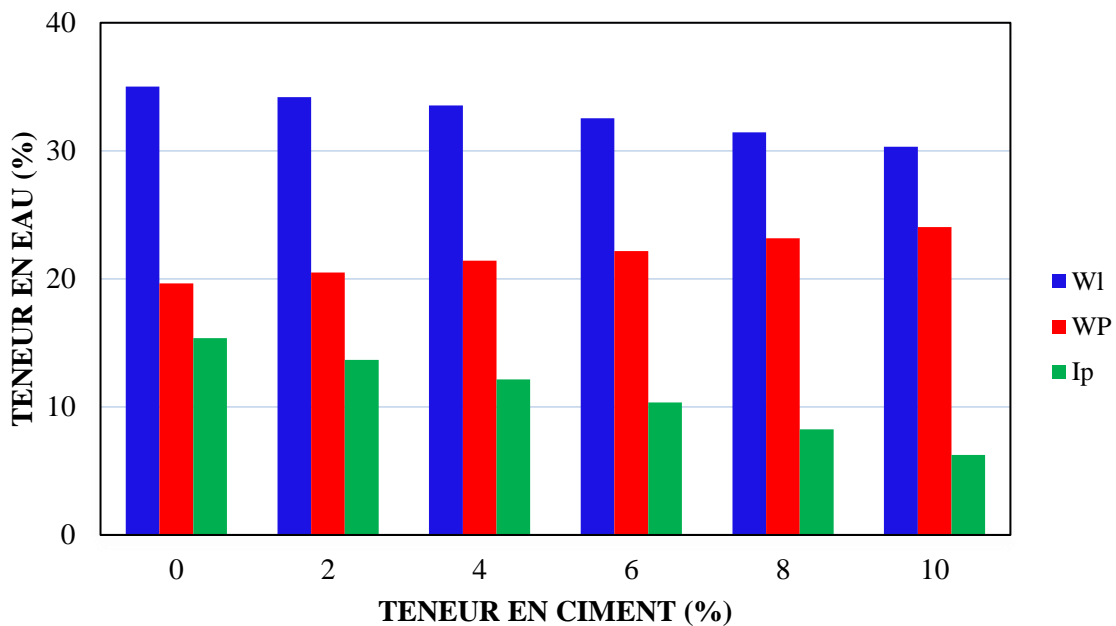


Figure III.3 les limite Atterberg en fonction de pourcentage de ciment.

*On remarque que la limite de liquidité diminue avec l'augmentation de teneur en ciment, par contre la limite de plasticité augmente avec l'augmentation de teneur en ciment.*

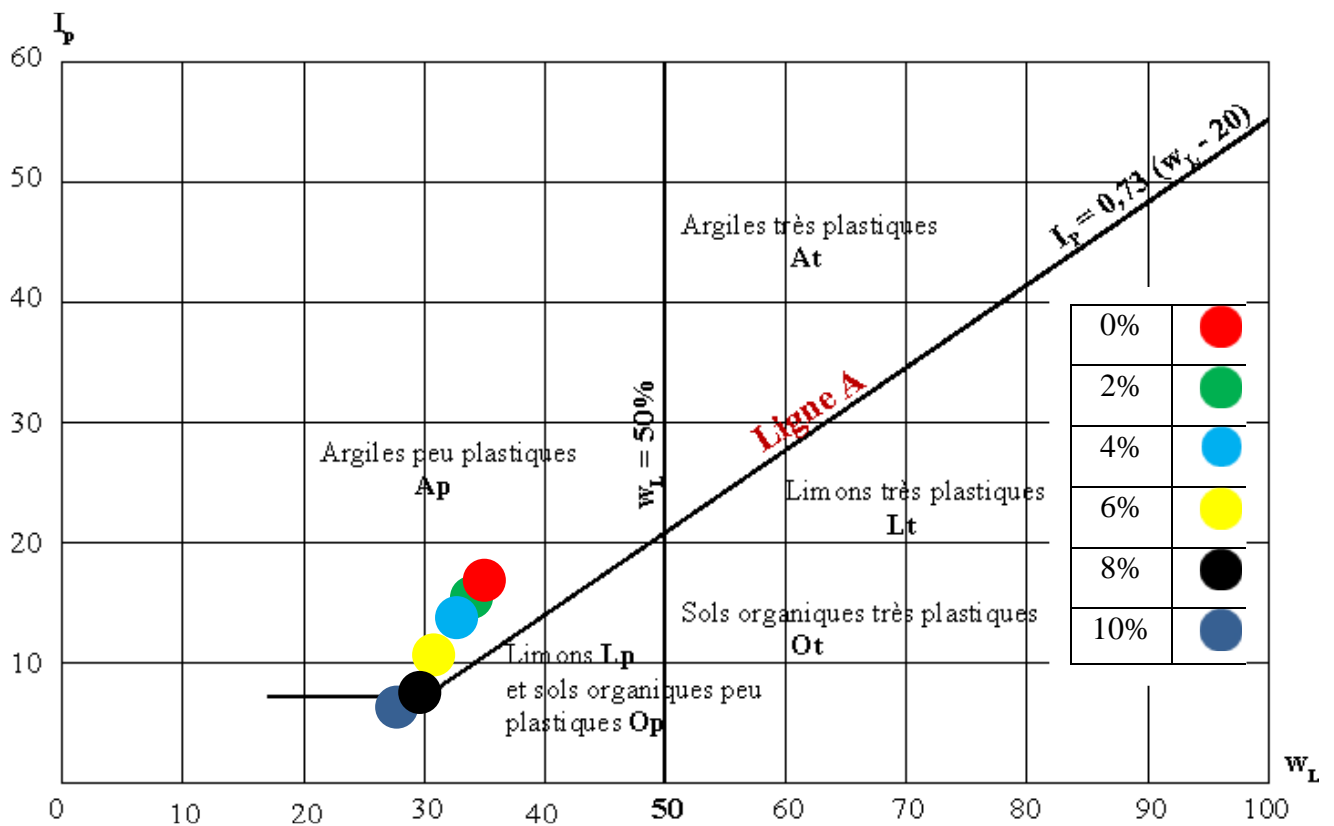


Figure III.4 : Diagramme de Casagrande.

**III.2.1.3 Essai au bleu de méthylène :**

La Figure III.5 présente les résultats des essais de bleu de méthylène (VBS) en fonction des différents teneurs en ciment

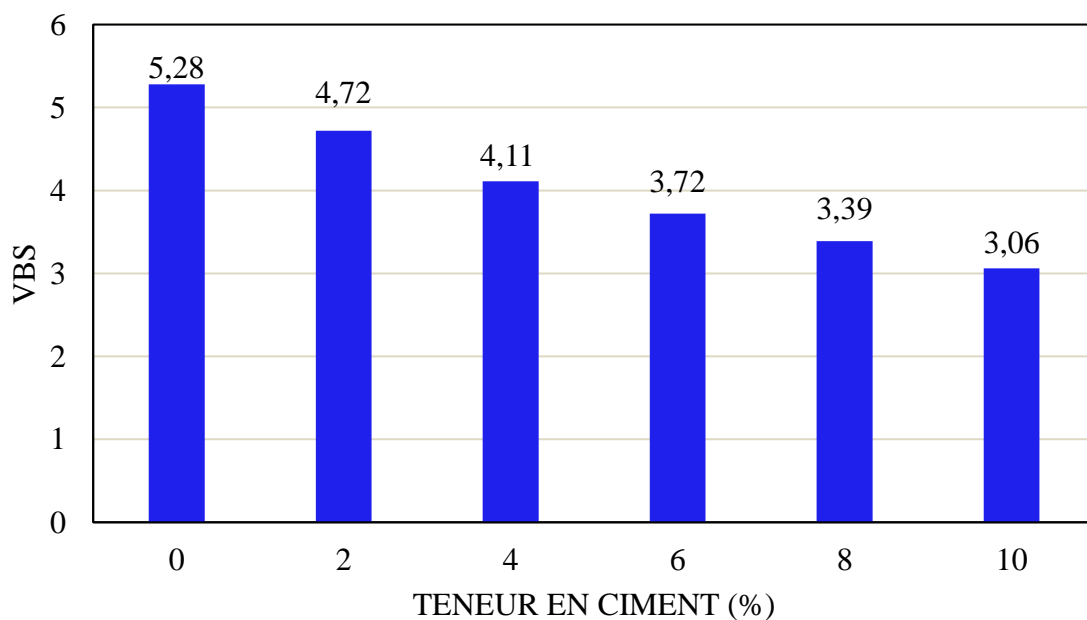


Figure III.5 : Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment.

*On remarque que la Valeur de bleu méthylène diminue avec l'augmentation de teneur en ciment.*

### Classification des sols.

Après les résultats des essais on remarque que :

- $D_{max} = 20\text{mm} \leq 50 \text{ mm}$
- Les passant à  $80 \mu\text{m} = 71.90\% > 35\%$ .
- L'indice de plasticité  $I_p = 15.36 \Rightarrow 12 < I_p < 25$
- La valeur de bleu méthylène est égale à  $5.28 \Rightarrow 2.5 < \text{VBS} \leq 6$

Donc :

*Selon la classification GTR, Notre sol appartient à la classe A2, il s'agit d'un limon argileux peu plastique.*

**Tableau 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<br>Premier niveau de classification                | Classe                | Paramètres de nature<br>Deuxième niveau de classification   | Sous classe fonction de la nature  | Paramètres d'état   | Sous classe fonction de l'état |
| $D_{max} \leq 50 \text{ mm}$<br>et<br>Tamisat à $80 \mu\text{m} > 35\%$ | <b>A</b><br>Sols fins | $\text{VBS} \leq 2,5^{(*)}$<br>ou<br>$I_p \leq 12$          | <b>A<sub>1</sub></b><br>Limons peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques... | $IPI^{(*)} \leq 3$ ou $W_n \geq 1,25 W_{OPN}$   | A <sub>1</sub> th              |
|   |                       |   |  | $3 < IPI^{(*)} \leq 8$ ou $1,10 \leq W_n < 1,25 W_{OPN}$                                      | A <sub>1</sub> h               |
|   |                       |   |  | $8 < IPI \leq 25$ ou $0,9 W_{OPN} \leq W_n < 1,1 W_{OPN}$                                     | A <sub>1</sub> m               |
|   |                       |   |  | $0,7 W_{OPN} \leq W_n < 0,9 W_{OPN}$  | A <sub>1</sub> s               |
|   |                       |   |  | $W_n < 0,7 W_{OPN}$   | A <sub>1</sub> ts              |
|   |                       | $12 < I_p \leq 25^{(*)}$<br>ou<br>$2,5 < \text{VBS} \leq 6$ | <b>A<sub>2</sub></b><br>Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...                             | $IPI^{(*)} \leq 2$ ou $I_c^{(*)} \leq 0,9$ ou $W_n \geq 1,3 W_{OPN}$                          | A <sub>2</sub> th              |
|   |                       |   |  | $2 < IPI^{(*)} \leq 5$ ou $0,9 \leq I_c^{(*)} < 1,05$ ou $1,1 W_{OPN} \leq W_n < 1,3 W_{OPN}$ | A <sub>2</sub> h               |
|   |                       |   |  | $5 < IPI \leq 15$ ou $1,05 < I_c \leq 1,2$ ou $0,9 W_{OPN} \leq W_n < 1,1 W_{OPN}$            | A <sub>2</sub> m               |
|   |                       |   |  | $1,2 < I_c \leq 1,4$ ou $0,7 W_{OPN} \leq W_n < 0,9 W_{OPN}$                                  | A <sub>2</sub> s               |
|   |                       |   |  | $I_c > 1,3$ ou $W_n < 0,7 W_{OPN}$  | A <sub>2</sub> ts              |
|   |                       | $25 < I_p \leq 40^{(*)}$<br>ou<br>$6 < \text{VBS} \leq 8$   | <b>A<sub>3</sub></b><br>Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...  | $IPI^{(*)} \leq 1$ ou $I_c^{(*)} \leq 0,8$ ou $W_n \geq 1,4 W_{OPN}$                          | A <sub>3</sub> th              |
|   |                       |   |  | $1 < IPI^{(*)} \leq 3$ ou $0,8 \leq I_c^{(*)} < 1$ ou $1,2 W_{OPN} \leq W_n < 1,4 W_{OPN}$    | A <sub>3</sub> h               |
|   |                       |   |  | $3 < IPI \leq 10$ ou $1 < I_c \leq 1,15$ ou $0,9 W_{OPN} \leq W_n < 1,2 W_{OPN}$              | A <sub>3</sub> m               |
|   |                       |   |  | $1,15 < I_c \leq 1,3$ ou $0,7 W_{OPN} \leq W_n < 0,9 W_{OPN}$                                 | A <sub>3</sub> s               |
|   |                       |   |  | $I_c > 1,3$ ou $W_n < 0,7 W_{OPN}$  | A <sub>3</sub> ts              |
|   |                       | $I_p > 40^{(*)}$<br>ou<br>$\text{VBS} > 8$                  | <b>A<sub>4</sub></b><br>Argiles et argiles marneuses, très plastiques...   | Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique              |                                |
| A <sub>4</sub> th   |                       |   |  |   |                                |
| A <sub>4</sub> h  |                       |   |  |   |                                |
| A <sub>4</sub> s  |                       |   |  |   |                                |

III.2.2 Les essais mécaniques :

III.2.2.3 Essais Proctor Modifié :

Le tableau III.12 présente les résultats de l'essai n°1 du sol non traité. Le tableau III.13 présente la densité sèche et la teneur en eau en fonction des teneurs ciment. La figure III.6 présente la courbe Proctor Modifié, de l'essai n°1, du sol non traité. 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.

Tableau III.4 : Résultats de l'essai n°1 de Proctor Modifié du sol non traité.

| Teneur en eau approximative   | 8%    |       | 10%   |       | 12%   |       | 14%   |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Masse du moule (g)  | 3432  | 3432  | 3432  | 3432  | 3432  | 3432  | 3432  | 3432  |
| Volume du moule (cm <sup>3</sup> )                                    | 942   | 942   | 942   | 942   | 942   | 942   | 942   | 942   |
| Masse du sol humide avec moule(g)                                     | 5340  | 5340  | 5480  | 5480  | 5504  | 5504  | 5501  | 5501  |
| Masse du sol humide (g)   | 1908  | 1908  | 2048  | 2048  | 2072  | 2072  | 2069  | 2069  |
| Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )                           | 2.03  | 2.03  | 2.17  | 2.17  | 2.20  | 2.20  | 2.20  | 2.20  |
| Masse de la tare (g)  | 12.51 | 12.43 | 13.73 | 10.16 | 7.73  | 7.7   | 7.58  | 7.79  |
| Masse sol humide + tare(g)  | 34.18 | 36.89 | 40.59 | 39.36 | 29.27 | 24.86 | 34.79 | 36.22 |
| Masse sol sec + tare (g)  | 32.31 | 34.89 | 38.12 | 35.84 | 26.76 | 22.95 | 31.4  | 32.53 |
| Masse d'eau (g)   | 1.87  | 2     | 2.47  | 3.52  | 2.52  | 1.91  | 3.39  | 3.69  |
| Masse du sol sec (g)  | 19.8  | 22.46 | 24.39 | 25.68 | 19.02 | 15.2  | 23.82 | 24.74 |
| Teneur en eau W(%)  | 9.44  | 8.90  | 10.13 | 13.71 | 13.25 | 12.52 | 14.23 | 14.92 |
| Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ); $\rho_d = \rho_h / (1+W)$ | 1.85  | 1.86  | 1.97  | 1.91  | 1.94  | 1.95  | 1.92  | 1.91  |
| W <sub>opt</sub>  | 12.57 |       |       |       |       |       |       |       |
| $\gamma_{dmax}$   | 1.94  |       |       |       |       |       |       |       |

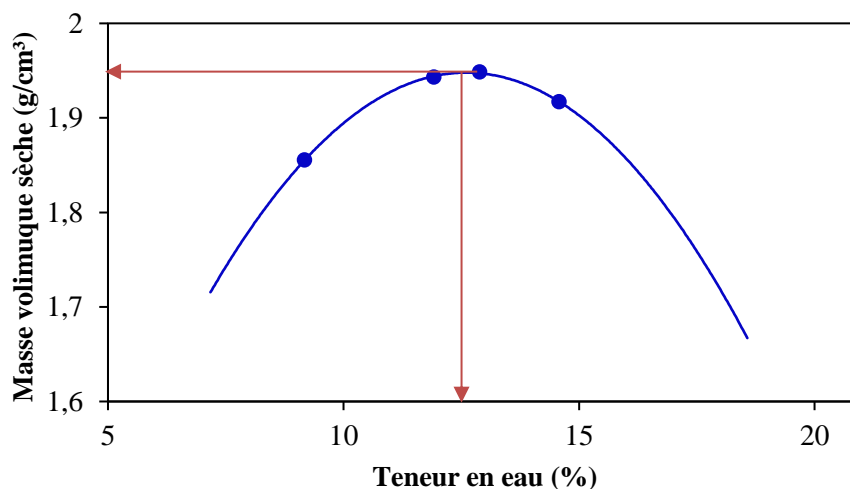


Figure III.6 : courbe Proctor Modifié de sol naturel (l'essai n°1).

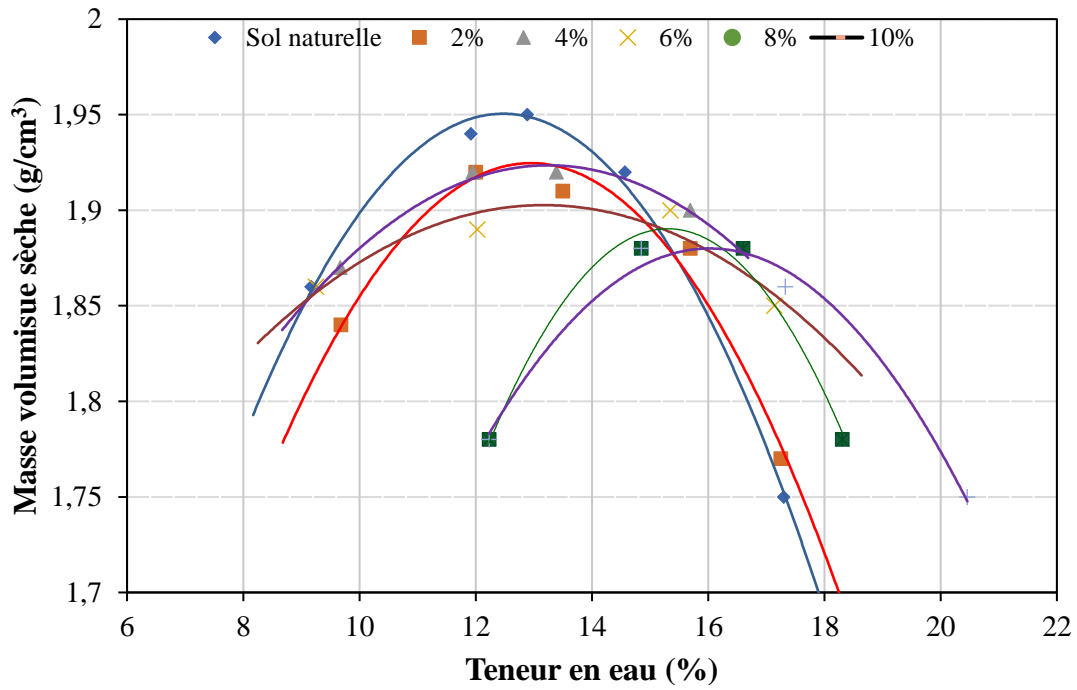


Figure III.7 : courbes Proctor Modifié de sol traité par ciment.

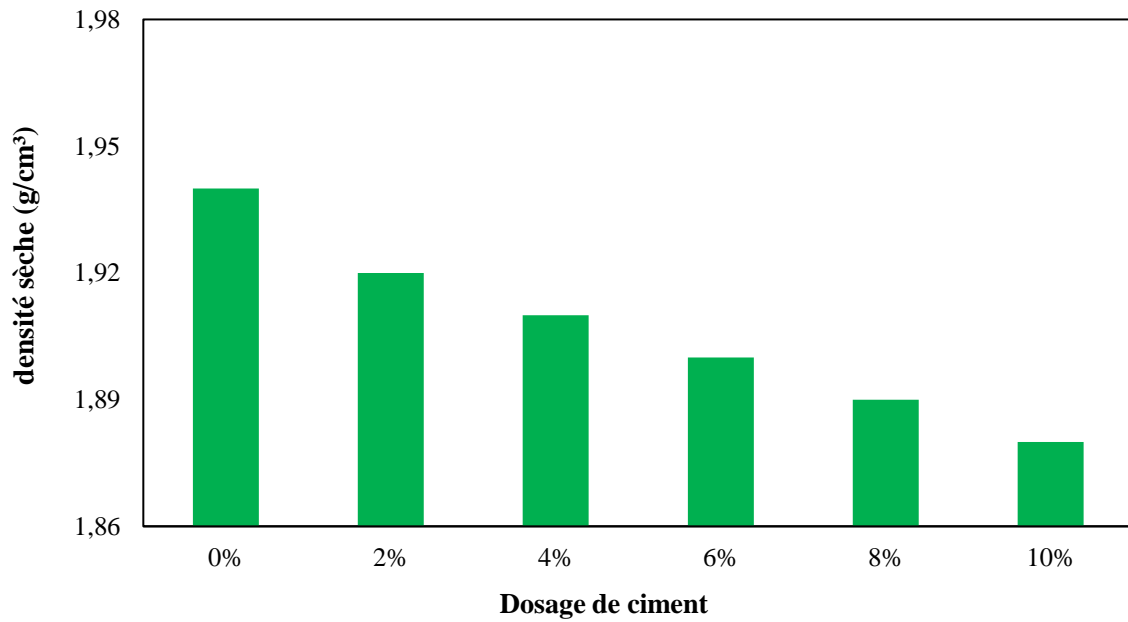
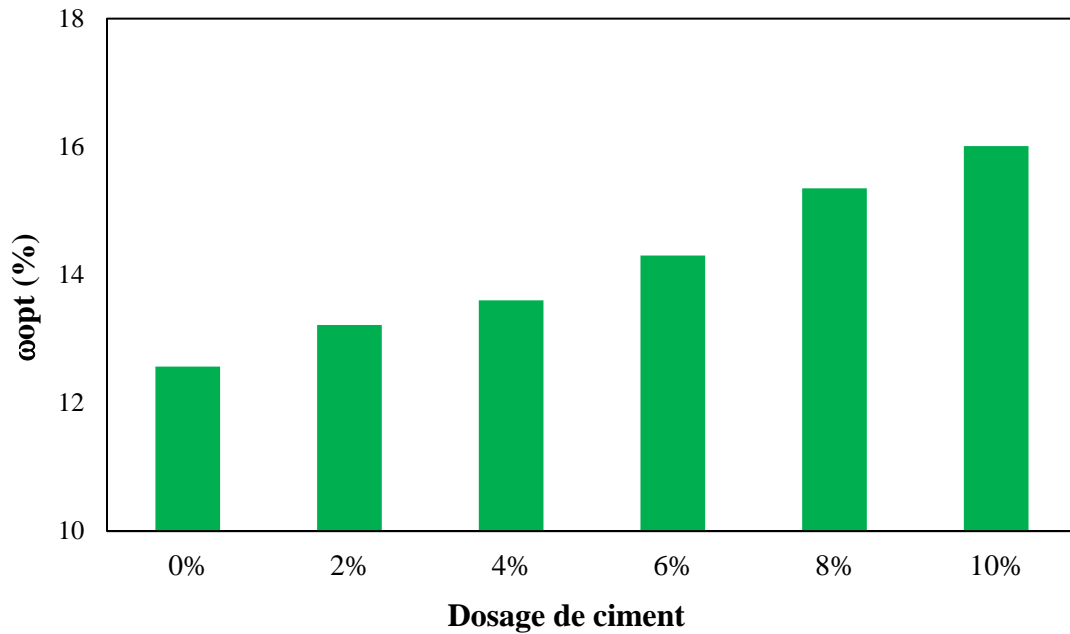


Figure III.8 : Les densités sèches en fonction des différents teneurs en ciment.



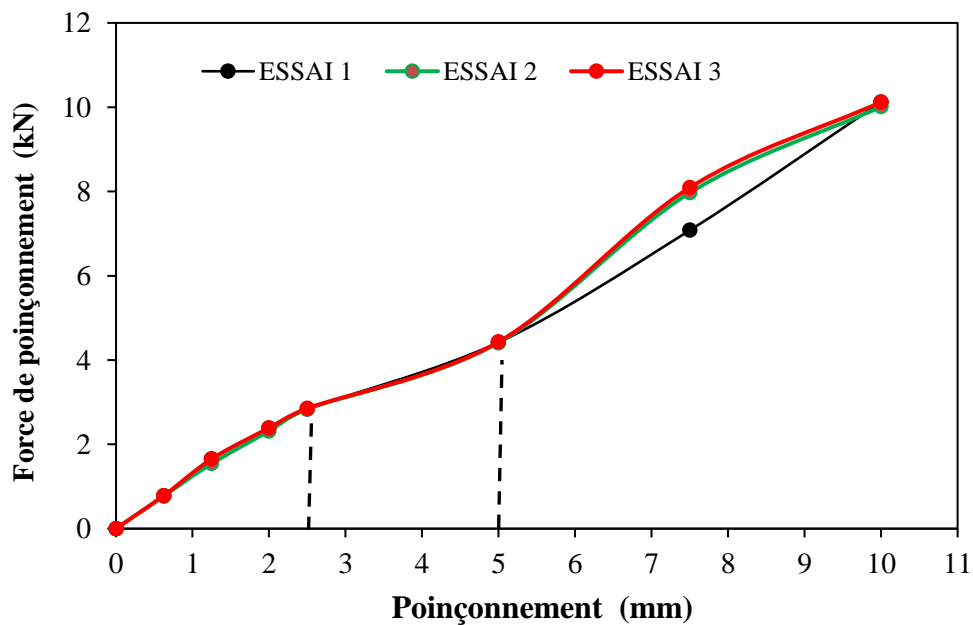
**Figure III.9 :** Les teneurs en eau en fonction des différents teneurs en ciment.

*On constate que la densité sèche diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment, par contre la teneur en eau optimale augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment.*

### III.2.2.3 Essai CBR

#### a) ESSAI CBR Immédiat

La figure III.10 présente ces courbes (essais CBR). La figure III.12 présente l'effet de ciment sur l'indice CBR immédiat.



**Figure III.10:** Courbes des essais CBR immédiat du sol non traité.

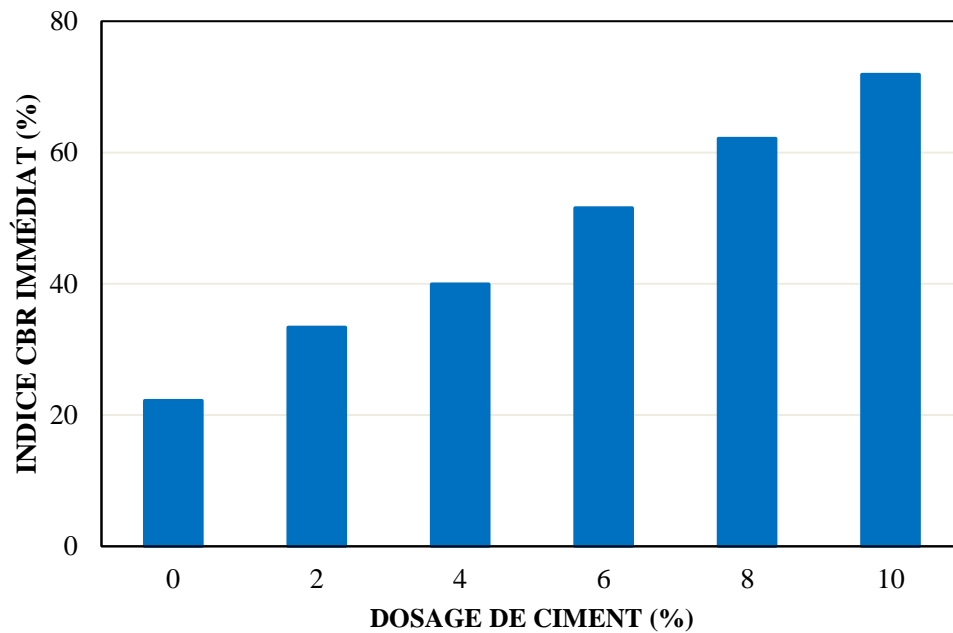


Figure III.12 : Effet de ciment sur l'indice CBR immédiat.

#### b) ESSAI CBR Imbibé

La figure III.13 présente ces courbes (essais CBR). La figure III.15 présente l'effet de ciment sur l'indice CBR Imbibé.

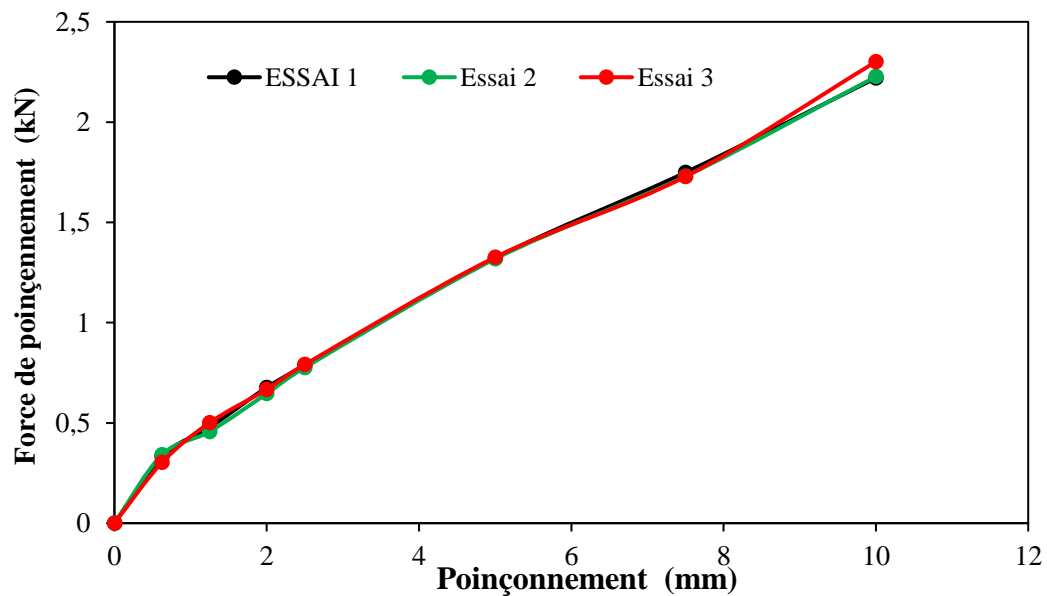
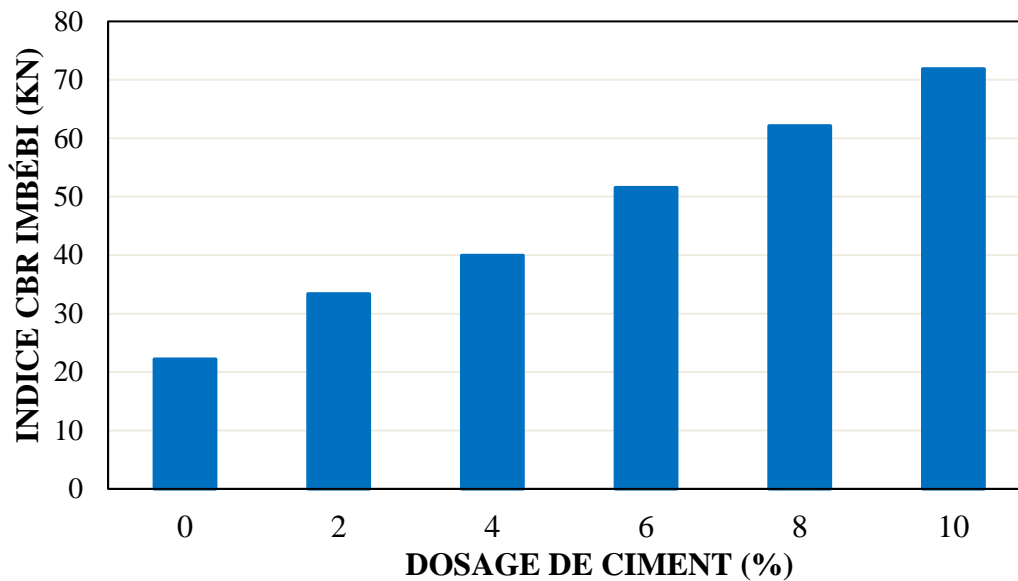


Figure III.13: Courbes des essais CBR imbibé du sol non traité.

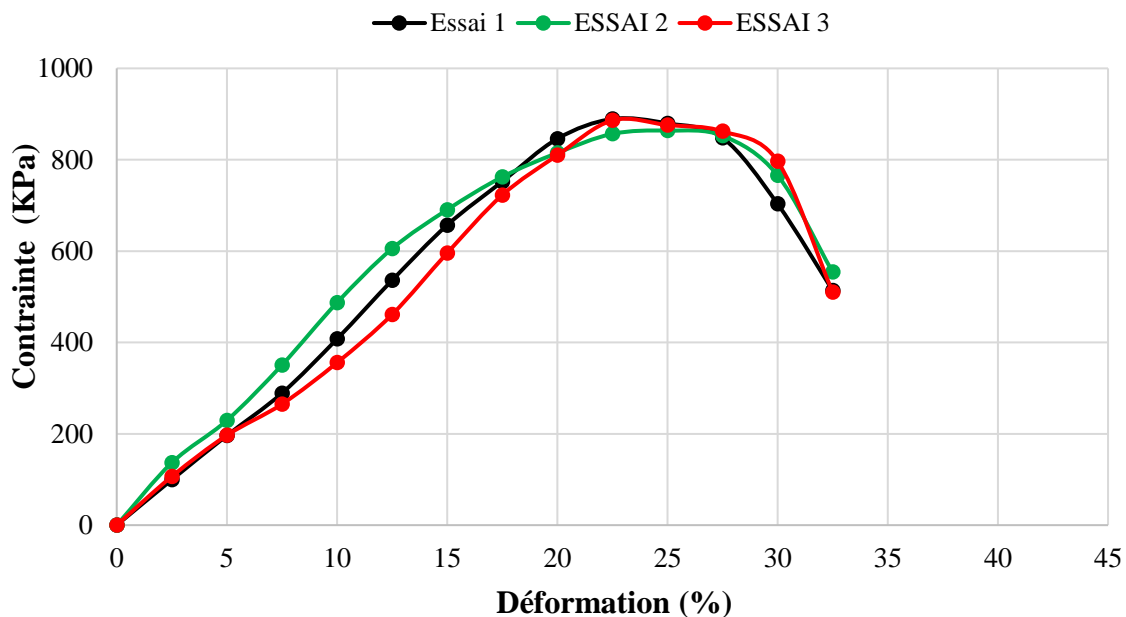


**Figure III.15 :** Effet de ciment sur l'indice CBR imbibé.

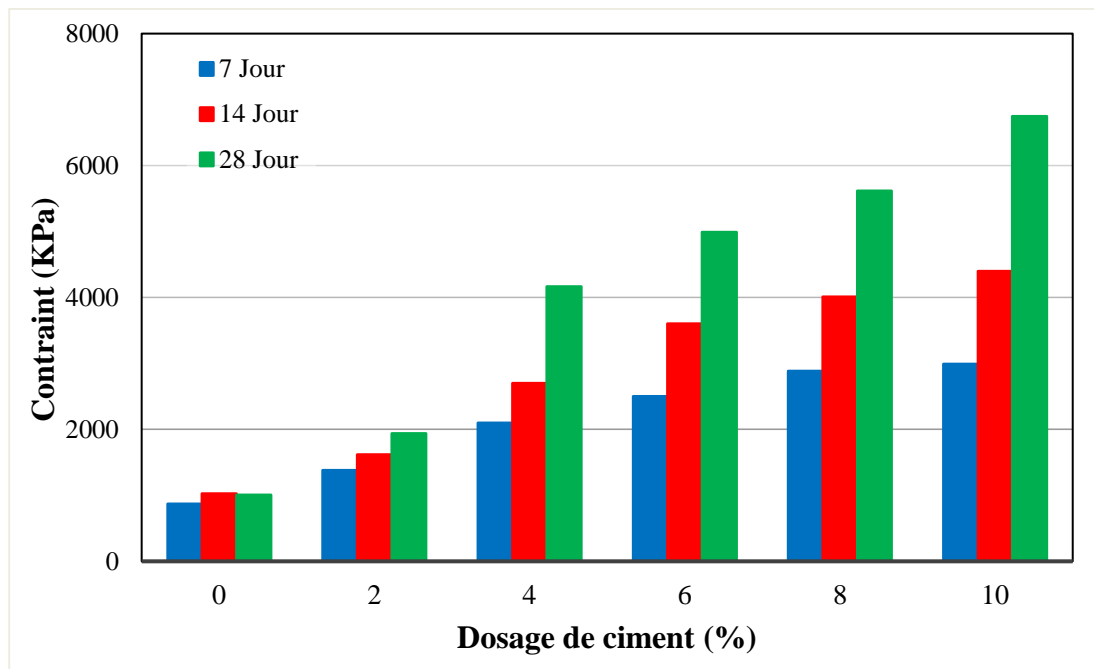
*On remarque que l'augmentation du dosage de ciment agit directement sur l'augmentation des indices de portance (indice C.B.R) immédiat et imbibé.*

### III.2.2.3 Essais de Compression simple

La figure III.16 présente ces courbes des essais de compression simple après 7 jours du sol non traité. La figure III.17 présente les résultats des essais de compression simple après 7, 14 et 28 jours en fonction de la teneur en ciment.



**Figure III.16 :** Les courbes de compression simple après 7 jours du sol non traité.



**Figure III.17 :** La résistance de compression simple en fonction de la teneur en ciment.

*On remarque que la résistance à la compression simple augmente avec l'augmentation du temps de cure et avec l'augmentation de dosage du ciment.*

## CONCLUSION GENERALE

Cette étude vise à améliorer les caractéristiques d'un sol prélevé du site du Chaaba El Hamra (wilaya de M'sila) en ajoutant différents pourcentages de ciment (Chamil) 2, 4, 6, 8 et 10%. Les résultats obtenus ont permis de dégager les conclusions suivantes:

- La limite de liquidité diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment, par contre la limite de plasticité augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment.
- La valeur de bleu méthylène diminue avec l'augmentation de teneur en ciment.
- La classification de notre sol selon le GTR montre qu'il s'agit d'un sol limoneux-argileux peu plastiques classe A2.
- La densité sèche diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment, par contre la teneur en eau optimale augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment.
- L'augmentation du dosage de ciment agit directement sur l'augmentation des indices de portance (indice C.B.R) immédiat et imbibé.
- La résistance à la compression simple augmente avec l'augmentation du temps de cure et avec l'augmentation de dosage du ciment.

# **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## Références Bibliographiques

[1] **MAHAMEDIA.,KHEMISSA•M.•**(2012).Cement Stabilisation of Compacted Expansive clay. Communication to the International Science and Technology Conference, ISTE C'2012,Dubai,UAE,December13-15,2012.

[2] **Lakhdar MEKKI.** « Comportement d'une argile expansive fortement sur consolidée », thèse de Doctorat, Université de m'sila, 2019

[3] **Olivier C. (2002)** : Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés». Présentée en vue de l'obtention du grade de : docteur de l'I.N.P.L.

[4] **SLAMANI Brahim.2015** : Etude des caractéristiques élastiques d'une Argile expansive stabilisée au ciment. Université Mohamed Boudiaf - M'sila.

[5] **A. Billard, T. Muxart, E. Derbyshire, Y. Egels, M. Kasser, J. Wang,** Glissements de terrain induits par les pluies dans les loess de la Province de Gansou, Chine In Annales de Géographie, Armand Colin, 1992, p. 520-540.

[6] **N.D. Perrin, G. T. Hancox,** Landslide dammed lakes in New Zealand, Newsletter-Geological society of New Zealand, (80), 1998, p. 75-76.

[7] **M. J. Page, L. M. Reid, I. H. Lynn,** Sediment production from Cyclone Bola landslides, Waipaoacatchment, Journal of Hydrology. New Zealand, 38(2), 1999, p. 289-308

[8] **Pierre DUFFAUT,** « AFFAISSEMENTS DU SOL », Encyclopædia Universalis [en ligne], consulté le 27 mai 2022.

[9] **Azzouz.Z (2006)** : Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen». Thèse de magister Université de Tlemcen

[10] **Kraimia Chahinez et Bouzghaia Rahma.** (Étude de caractérisation des sols gonflants traité au pouzzolane) Université Larbi tébessi, Tébessa 2018.

[11] **Département Ingénierie** « Traitement des sols à la chaux ou au ciment », Librairie des Haras nationaux, Novembre 2004.

[12] **Nicolas CABANE 2005** : Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation.

[13] **MAHAMEDI A., KHEMISSA M. (2013).** Etude de l'évolutivité d'une argile expansive traitéeaux liants hydrauliques. Communication à la 3ème Conférence Maghrébine en Ingénierie Géotechnique(3ème CMIG'13), Alger, 18-19 Novembre2013.

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

[15] **MILLOGO,Y (2008)** : Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques : application au génie civil (bâtiment et route).Présentée pour obtenir le grade de docteur de l'université d'Ouagadougou.

[16] **BENZAOUI Ismail et HIMER Mohammed Amin.** (Etude des effets du traitement mixte chaux-ciment sur le comportement des sols du Chott-El-Hodna (Wilaya de M'sila)) Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2021.

[17] **AFES (2008).** Référentiel pédologique. Association Française pour l'Etude du Sol. Ed. Quæ.

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

[19] AFNOR (1997) Norme Française : **NF P 94-078** Sols : Indice CBR immédiat — Indice Portant Immédiat.

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

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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.

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