



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

**Université 20 Août 1955-Skikda.**

**Faculté de technologie**

**Département :Génie civil**

**Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master 2 en Génie**

**CIVIL**

**Option : Géotechnique**

**Intitulé:**

**L'effet de la granulométrie de l'ajout sur le comportement  
mécanique d'un sol traité**

**Réalisé par :Oussama Boukarine**

**Encadré par :Dr Ouahiba Mansouri**

**Le 30/06/2024 devant le jury:**

**Dr Noura Houssou**

**Présidente**

**Université de Skikda**

**Dr Ouahiba Mansouri**

**Encadreur**

**Université de Skikda**

**Dr Nawel Bousbia**

**Examinatrice**

**Université de Skikda**

**Promotion: 2023/2024**

## *Remerciements et reconnaissance*

Au nom de Dieu, le Miséricordieux,

Louange à Dieu, prières et salutations sur le Prophète Mohammed, ainsi que sur sa famille, ses compagnons et ceux qui l'ont suivi. Après cela :

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers ma chère famille, qui a été le soutien essentiel et primordial tout au long de mon parcours pour obtenir mon diplôme de master en géotechnique. Votre soutien et vos encouragements ont eu un impact significatif sur mon succès. Sans votre présence constante et votre soutien inconditionnel, je n'aurais pas pu accomplir cette grande réussite.

Je remercie également la respectueuse superviseure, le Dr Mansouri O , pour ses précieux conseils et son soutien continu tout au long de mon parcours académique. Vos efforts nobles ont été un facteur clé dans mon orientation vers la réussite et la réalisation de mes objectifs académiques.

Je souhaite également exprimer ma gratitude sincère à tous mes chers professeurs qui ont partagé avec moi leurs connaissances et leur expertise, et qui ont contribué à enrichir mon parcours éducatif et à élargir mes horizons académiques. Leur présence et leur soutien ont grandement contribué à mon développement académique et professionnel.

Enfin, je n'oublie pas mes chers amis, qui ont été à mes côtés tout au long de cette longue et enrichissante périple, me fournissant le soutien et l'encouragement nécessaires.

En conclusion, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce parcours académique. Que Dieu les récompense tous généreusement et place leurs actions dans la balance de leurs bonnes actions.

Louange à Dieu, Seigneur de l'univers.

Avec mes salutations respectueuses et mon profond respect,

[BOUKARINE OUSSAMA]

## *Dédicace*

### **Je dédie ce projet:**

À mes chers parents, qui ont toujours été un soutien et un pilier tout au long des défis que j'ai rencontrés dans mon parcours académique.

À ma famille bien-aimée, qui a été le moteur principal derrière mon succès et la réalisation de cette grande réussite.

Au directeur de l'École d'Ingénierie Civile et à tous ses professeurs et employés, qui ont contribué à renforcer mes capacités et à me guider vers l'excellence et l'innovation.

À mes précieux enseignants, qui n'ont pas hésité à partager leur savoir et leur expérience, et qui m'ont inspiré par leur esprit scientifique et leur engagement dans la recherche.

À mes fidèles amis, qui ont été à mes côtés à chaque étape de ce voyage, me soutenant avec des conseils, du courage et de l'inspiration.

Au directeur du Laboratoire National du Logement et de la Construction, qui m'a offert l'opportunité de travailler et d'innover, et m'a permis de bénéficier d'expériences pratiques précieuses qui ont enrichi mes compétences techniques et scientifiques.

Aux travailleurs du laboratoire, dont le dévouement et la loyauté ont été essentiels pour la réussite de ce projet.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à cette réalisation, vous n'avez pas seulement été des contributeurs mais les piliers de cette réussite, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Enfin, à tous mes proches et amis qui ont toujours été là pour me soutenir et m'encourager, vous avez été une partie indispensable de ce magnifique voyage.

Merci à vous tous pour votre confiance et votre soutien continus

## Résumé

Dans le domaine du génie civil, les sols naturels sont souvent inadéquats pour supporter des charges lourdes sans modifications de leurs propriétés. C'est làqu'intervient **le traitement des sols**, un domaine qui s'occupe de l'amélioration des propriétés des sols pour répondre aux exigences de la construction et de l'ingénierie.

**Le traitement des sols** comprend diverses techniques qui incluent l'utilisation de matériaux additifs tels que le ciment, les cendres volantes, la chaux, ainsi que d'autres matériaux comme les déchets industriels recyclés. Ces dernières années, l'utilisation du **déchet de marbre**, issue de l'industrie du marbre, a attiré l'attention des chercheurs en tant qu'additif pour améliorer les propriétés géotechniques des sols.

Cette étude vise à explorer l'effet de l'ajout de **déchet de marbre** au **sol** à des **proportions variées (6 %, 8 %, 10 %)** avec **des granulométries différentes (0.4mm et 0.6mm)** sur **ses propriétés géotechniques**. À travers une série de tests en laboratoire, on présente l'effet de ces proportions sur la **densité sèche optimale**, la teneur en eau optimale, plasticité et la résistance du sol. Les résultats obtenus ont montrés la performance du déchet de marbre d'une part et l'influence de la granulométrie du déchet sur le traitement du sol d'autre part.

**Mots clés** :Amélioration ;déchet ;Argile ; Marbre ; comportement.

## تلخيص

في مجال الهندسة المدنية، تكون التربة الطبيعية في كثير من الأحيان غير مناسبة لدعم الأحمال الثقيلة دون تعديل والهندسة خصائصها. هنا يأتي دور معالجة التربة، وهو المجال الذي يهتم بتحسين خصائص التربة لتلبية متطلبات البناء

يشمل معالجة التربة مجموعة متنوعة من التقنيات تشمل استخدام مواد إضافية مثل الإسمنت ورماد الفحم والجير، بالإضافة إلى مواد أخرى مثل النفايات الصناعية المعاد تدويرها. في السنوات الأخيرة، جذب استخدام نفايات الرخام، التي تنتج عن صناعة الرخام، انتباه الباحثين كمواد إضافية لتحسين الخصائص الهندسية للتربة

تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف تأثير إضافة نفايات الرخام إلى التربة بنسب متفاوتة (6%، 8%، 10%) مع حبيبات مختلفة الحجم (0.4 مم و 0.6 مم) على خصائصها الهندسية. من خلال سلسلة من الاختبارات في المعمل، يتم عرض تأثير هذه النسب على الكثافة الجافة الأمثل، والرطوبة الأمثل، واللدونة، ومقاومة التربة. أظهرت النتائج المحصلة أداء نفايات الرخام من جهة، وتأثير حجم الحبيبات على معالجة التربة من جهة أخرى

**الكلمات المفتاحية:**تحسين؛ نفايات؛ طين؛ رخام؛ سلوك.

## *Abstract*

In the field of civil engineering, natural soils are often inadequate to support heavy loads without modifying their properties. This is where soil treatment comes into play, a field that focuses on improving soil properties to meet construction and engineering requirements.

Soil treatment includes various techniques involving the use of additive materials such as cement, fly ash, lime, as well as other materials like recycled industrial waste. In recent years, the use of marble waste, from the marble industry, has attracted attention as an additive to enhance the geotechnical properties of soils.

This study aims to explore the effect of adding marble waste to soil in varying proportions (6%, 8%, 10%) with different particle sizes (0.4 mm and 0.6 mm) on its geotechnical properties. Through a series of laboratory tests, the impact of these proportions on optimal dry density, optimal moisture content, plasticity, and soil strength is presented. The results obtained demonstrated the performance of marble waste on one hand, and the influence of particle size on soil treatment on the other.

**Keywords:** Improvement; Treatment; Clay; Marble; behavior

# Sommaire

Remerciement et reconnaissances

Dédicace

Résumé

Listes des tableaux

Listes des figures

Introduction générale

## Chapitre 1 : Généralité sur les sols

|   |    |
|---|----|
| I.1.Introduction .....  | 10 |
| I.2.Généralité sur les sols .....   | 10 |
| I.3.Les argiles.....  | 15 |
| I.3.2 Organe des argiles .....  | 15 |
| I.3.2.Définition géotechnique des argiles .....   | 15 |
| I.3.3.Minéralogie des argiles.....  | 16 |
| I.3. 4.Structure des argiles.....   | 17 |
| I.3. 5.Principales familles d argile .....  | 18 |
| I.3. 6. propriétés et rôle des minéraux argileux.....   | 20 |
| I.3.7.Les principales caractéristique des minéraux argileux qui influencent legonflement..... | 22 |
| I.4. Problèmes des sols argileux :.....   | 23 |
| I.5. Quelques cas pathologiques.....  | 24 |
| I.6. Conclusion.....  | 25 |

## Chapitre II: Techniques d'amélioration des sols

|   |    |
|---|----|
| II.1.Introduction:.....   | 26 |
| II.2. Méthodes mécaniques :.....  | 26 |
| II.2.1.Vibrocompactage :.....   | 26 |
| II.2.2. le Compactage dynamique (ou pilonnage) :..                                    | 29 |
| II.2.3. Colonnes ballastée:.....  | 34 |
| II.3. Méthodes hydromécaniques.....   | 38 |
| II.3.1. Accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux..... | 38 |
| II.4. Méthodes thermiques .....   | 39 |
| II.4.1.Déshydratation.....  | 39 |
| II.4.2.Congélation .....  | 39 |
| II.5. Méthodes chimiques.....   | 40 |
| II.6. Conclusion.....   | 41 |

## Chapitre III : Les Essais Réalisés

|   |    |
|---|----|
| III.1.Introduction.....   | 43 |
| III.2. Matériaux et matériels.....                                  | 43 |
| III.3. Les essais réalisés .....                                    | 43 |
| III -4 : Essai Granulométrie : « NF P 94-056 ».....                 | 44 |
| III.5. Limites d'Atterberg selon la norme NF p 94-051.....          | 47 |
| III. 6. Compactage : Proctor normal-Proctor modifié (NF94-093)..... | 53 |
| III.7.. Essai de compression uni axiale «NF P 949».....             | 58 |

|  |    |
|--|----|
| III.8. Essai C.B.R (California Bearing Ratio) «NF P 94-078»..... | 60 |
|--|----|

|                       |    |
|-----------------------|----|
| III.9.Conclusion..... | 63 |
|-----------------------|----|

## **Chapitre IV :Résultats et Interprétations**

|                          |    |
|--------------------------|----|
| IV.1. Introduction ..... | 64 |
|--------------------------|----|

|  |    |
|--|----|
| IV.2. Résultats et interprétation..... | 64 |
|--|----|

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| IV.2.1. Sols non Traité :..... | 64 |
|--------------------------------|----|

|                         |    |
|-------------------------|----|
| IV.2.2.Sols Traité..... | 71 |
|-------------------------|----|

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| - Essai de compactage ..... | 71 |
|-----------------------------|----|

|  |    |
|--|----|
| Effet du traitement sur le compactage..... | 71 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| Effet de la granulométrie du marbre sur le compactage ..... | 80 |
|---|----|

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| - Essai de la compression simple..... | 86 |
|---------------------------------------|----|

|  |    |
|--|----|
| Effet du traitement sur la compression ..... | 86 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| Effet de la granulométrie du marbre sur la compression..... | 96 |
|---|----|

|                       |    |
|-----------------------|----|
| IV;3. Conclusion..... | 96 |
|-----------------------|----|

Conclusion générale

Références et bibliographies

## *Listes des figures*

**Figure I.1** : Les phases des sols

**Figure.I.2** : Classification des sols selon la dimension du particule

**Figure I.3** : Diagramme de plasticité de Cas grande.

**Figure.I.4** : Structure des argiles. Dessin de droite

**Figure I.5** : Feuillet de kaolinite.

**Figure I.6** : Particule de kaolinite

**Figure I.7** : La liaison entre les particules de montmorillonite.

**Figure I.8** : La liaison entre les particules de l'illite.

**Figure.I.9** : Fissures au niveau d'une Structure de génie civil

**Figure. I.10**: Déformation d'une chaussée de sol instable

**Figure II.1** : Étapes du vibrocompactage des sables et graviers

**Figure II.2** : vibrocompactage – mise en œuvre

**Figure II.3** : vibrocompactage – mode d'action

**Figure II.4**;exemples de chantiers de compactage dynamique

**Figure II.5** : Réalisation du compactage selon un maillage bien défini

**Figure II.6** : comparaison des caractéristiques du sol avant et après consolidation dynamique

**Figure II.7** : chantier de compactage dynamique ( aéroport de Nice-France)

**Figure II.8** : Colonnes ballastées sous dallage

**FigureII.9** :Préparation

**FigureII.10** : Remplissage

**FigureII.11**: Fonçage

**Figure II.12** : compactage

**Figure II.13**: Finition

**Figure II .14** : ColbondDrain\_PVD-for-soil-consolidation

**Figure II .15** : Travaux souterrain : la congélation des sols

**Figure II.17** : Traitement de sol au ciment aéroport de liège

**Figure III.1**: Série de tamis

**Figure III.2**: Définition des Limites d'Atterberg

**Figure III.3**: Boite de Cas grande

**Figure III.4 :** Détermination la Limite de Liquidité

**Figure III.5 :** Détermination de la Limite de plasticité

**Figure III.6 :** Essai de Proctor

**Figure III.7 :** Schéma essai de Proctor.

**Figure III.8 :** Appareillage essai de Proctor

**Figure III.9 :** la machine de Compression

**Figure III.10 :** Essai CBR Immersion pendant 4 jours dans l'eau

**FigureIV.1:**Résultats de l'essai analyse granulométrie

**FigureIV.2 :**la courbe de la limite de liquidité du sol naturel

**FigureIV.3 :** Appareil de la limite d'Atterberg

**FigureIV.4 :**La courbe de compactage du sol naturel

**FigureIV.5:** la courbe de l'essai de Compression simple du sol naturel

**FigureIV.6 :**La courbe de compactage avec 6% de marbre passant de tamis 0.6 mm

**FigureIV.7:** la courbe de compactage avec 8% de marbre passant de tamis 0.6 mm

**FigureIV.8:** la courbe de compactage avec 10% de marbre passant de tamis 0.6 mm

**FigureIV.9 :** Les Courbes Proctor avec les pourcentages de marbre passant de tamis 0,6 mm

**Figure IV.10 :**Courbe la teneur en eau en fonction des pourcentages du marbre passat de tamis 0.6 mm

**FigureIV.11:** Courbe de la densité  $\rho_d$  en fonction des pourcentages du marbre passant de tamis 0.6 mm

**FigureIV.12 :** La Courbe de compactage avec 6% de marbre passant de tamis 0.4 mm

**FigureIV.13 :** La Courbe de compactage avec 8% de marbre passant de tamis 0.4 mm

**FigureIV.14 :** La Courbe de compactage avec 10% de marbre passant de tamis 0.4 mm

**FigureIV.15 :** Les Courbes Proctor avec les pourcentages de marbre passant de tamis 0.4 mm

**FigureIV.16 :**Teneur de eau en fonction du pourcentages de marbre passant de tamis 0.4mm

**FigureIV-17 :** La densité  $\rho_d$  en fonction du pourcentages du marbre passant de tamis 0.4 mm

**Figure IV.18 :** les courbes de compactage avec 6% de marbre passant de tamis 0.6 mm et 0.4 mm

**FigureIV.19 :** la courbe montre les modification de  $\rho_d$  Optimum dans Tamis

**FigureIV.20 :**La courbe montre les changements W Optimum a Tamis

**Figure IV.21** : Les courbes de compactage avec 8% de marbre passant de Tamis 0.6 mm et 0.4 mm

**Figure IV.22** : La variation de la densité  $\rho_d$  avec les différents Tamis

**Figure IV.23** : La variation W Optimum avec les différents tamis

**Figure IV.24** : Les courbes de compactage avec 10% du marbre passant de tamis 0.6 mm et 0.4 mm

**Figure IV.25** : la densité sèche  $\rho_d$  en fonction des tamis des différents pourcentages de marbre.

**Figure IV.26** : La teneur en eau W Optimum en fonction des tamis des différents pourcentages de marbre.

**Figure IV.27** : Densité sèche maximale  $\rho_d$  (g/cm<sup>3</sup>) en fonction de marbre

**Figure IV. 28**: Teneur en eau optimal Wop (%) en fonction de marbre

**Figure IV.29**: Courbe de compression du sols traité avec 6% de marbre passant de tamis 0.6 mm

**Figure IV.30**: Courbe de compression avec 8% de marbre passant de tamis 0.6 mm

**Figure IV.31**: Courbe de compression avec 10% de marbre passant de tamis 0.6 mm

**Figure IV.32**: Courbes de compression avec les pourcentages de marbre passant de tamis 0.6mm

**Figure IV.33**: Courbe de contrainte de compression en fonction des pourcentages de marbre passant de tamis 0.6mm

**Figure IV.34** : Courbe des déformations en fonction des pourcentages de marbre passant de tamis 0.6 mm

**Figure IV.35**: Courbe de compression du sols traité avec 6% de marbre passant de tamis 0.4 mm

**Figure IV.36**: Courbe de compression avec 8% de marbre passant de tamis 0.4mm

**Figure IV.37** : Courbe de compression avec 10% de marbre passant de tamis 0.4mm

**Figure IV.38**: Courbe de contrainte de compression en fonction des pourcentages de marbre passant de tamis 0.4mm

**Figure IV.39** : Courbe de déformation en fonction des pourcentages de marbre passant de tamis 0.4mm

**Figure IV.40** : Courbe de compression avec 6% de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm

**Figure IV.41 :** Courbe de compression avec 8% de marbre passant des Tamis 0.4mm et 0.6mm

**Figure IV.42 :** Courbe de la déformation avec 10% de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm

**Figure IV.43 :** Courbe contrainte fonction de Tamis

**Figure IV.44 :** Courbe Contrainte déformation Tamis 0.4 / 0.6

**Figure IV.45 :** Courbe Contrainte fonction de tamis 0.4 / 0.6

**Figure IV.46 :** Barres de graphique montrant les changements de contrainte en termes de proportions de marbre

## *Listes des tableaux*

**Tableau I.1:** Classification des sols selon leurs propriétés mécaniques

**Tableau I.2:** Surface spécifique et la capacité d'échange cationique (CEC) de quelques minéraux argileux

**Tableau III.1 :** Classification des sols en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité

**Tableau III.2 :** La différence entre Proctor Normal et Modifié.

**Tableau III.3:** Classification des sols en fonction de l'indice de CBR

**Tableau IV-1 :** les résultats de la limite de liquidité

**Tableau IV.2 :** Résultats de la limite de Liquidité

**Tableau IV.3:** Les résultats des paramètres de l'essai Proctor

**Tableau IV.4:** Les résultats des paramètres de l'essai de compression

**Tableau IV.5 :** Résultats de L'essai de CBR

**Tableau IV.6:** les paramètres de l'essai Proctor

**Tableau IV.7 :** Les paramètres de l'essai Proctor avec 8% de marbre passant de tamis 0.6mm

**Tableau IV.8 :** les paramètres de l'essai Proctor avec 10% de marbre passant de tamis 0.6mm

**Tableau IV.9 :** Valeurs de la densité  $\rho_d$  optimal et la teneur en eau  $W$  Optimum des pourcentages de marbre passant de tamis 0.6mm

**Tableau IV.10:** Les paramètres de l'essai Proctor avec 6% de marbre passant de tamis 0.4mm

**Tableau IV.11:** Les paramètres de l'essai Proctor avec 8% de marbre passant de tamis 0.4mm

**Tableau IV.12:** les paramètres de l'essai Proctor avec 10% de marbre passant de tamis 0.4mm

**Tableau IV.13 :** Tableau montre le rapport en marbre et  $\rho_d$  optimal et  $W$  optimum pourcentages de marbre passant de tamis 0.4mm

**Tableau IV.14:** Résultats d'essai de compactage avec 6% de marbre passant des tamis 0.6mm et 0.4mm

**Tableau IV.15 :** Résultats d'essai de compactage de sol traité par 8% de marbre passant des tamis 0.6mm et 0.4mm

**Tableau IV.16 :** Résultats d'essai compactage de sol traité par 10% de marbre passant de tamis 0.6mm et 0.4mm

**Tableau IV.16:** Les paramètres de l'essai de compression avec 6% de marbre passant de tamis 0.6mm

**Tableau IV.17:**Les paramètres de l'essai de compression avec 8% de marbre passant du tamis 0.6mm

**Tableau IV.18:**Les paramètres de l'essai de compression avec 10 % de marbre passant du tamis 0.6mm

**Tableau IV.19 :**les paramètres de l'essai de compression des pourcentages de marbre passant du tamis 0.6 mm

**Tableau IV.20:**Les paramètres de l'essai de compression avec 6% de marbre passant du tamis 0.4mm

**Tableau IV.21:**Les paramètres de l'essai de compression avec 8% de marbre passant du tamis 0.4mm

**Tableau IV.22:**Les paramètres de l'essai de compression avec 10% de marbre passant du tamis 0.4mm

**Tableau IV.23 :** Les paramètres de l'essai de compression en fonction des pourcentages du marbre passant du tamis 0.4

**Tableau IV.24 :** Les résultats de l'essai de compression avec 6% de marbre en fonction des tamis

**Tableau IV.25 :** Les résultats de l'essai de compression avec 8% de marbre en fonction des tamis

**Tableau IV.26 :** Les résultats de l'essai de compression avec 10% de marbre en fonction des tamis

**Tableau IV.27 :** Résultats d'Essai de CBR avec 8% de marbre passant de tamis 0.4mm

## Introduction générale

A travers la géologie des terrains de notre pays, des sols peu convenables présentant une plasticité élevée et une faible capacité de portance sont fréquemment rencontrés, il a été donc nécessaire d'améliorer ces sols pour les rendre acceptables pour la construction. Ces limitations pourraient être surmontées par l'amélioration des propriétés géotechniques des sols en employant différentes méthodes mécaniques ou chimiques d'où le processus de stabilisation des sols.

Le Choix de l'une ces méthode dépende de plusieurs paramètres tels que, les considérations économiques, la nature du sol à traiter et la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux utilisés ainsi que les conditions d'environnement.

L'usage des ajouts minéraux pour la stabilisation des sols argileux est potentiellement promoteur. Ces ajouts combinés avec la chaux ont été longtemps employés comme stabilisants de sol tels que le calcaire, les cendres volantes, la fumée de silice, le laitier... mais certaines caractéristiques de l'ajout peuvent affecter le sol, par exemple la granulométrie.

Ainsi dans ce mémoire nous allons étudier l'effet de la granulométrie de l'ajout du déchet de marbre sur les comportements du sol argileux qualités en leurs rajoutant des proportions de déchet de marbre avec une granulométrie de(0,4mm, 0,6mm). Afin de connaître l'influence de la granulométrie de l'ajout du déchet de marbre sur le comportement mécanique de notre sol.

Pour atteindre le but visé, le travail sera divisé en quatre chapitres y compris une introduction générale et une conclusion générale.

**Le premier chapitre** présente généralités sur les argiles

**Le deuxième chapitre** présente les méthodes de traitement des sols.

**Le troisième chapitre** on expose les essais réalisés au laboratoire

**Dans le quatrième chapitre** ,on présente les résultats des essais et on termine notre travail par une conclusion générale.

### **I.1. Introduction**

La géotechnique fait appel aux techniques du génie civil, qu'elle applique à l'étude du sol et de la roche, c'est-à-dire aux matériaux naturels qui constituent l'écorce terrestre. Pour l'ingénieur, le sol se définit comme un agrégat peu compact, composé de minéraux, de matières organiques et de sédiments que l'on retrouve au-dessus du substrat rocheux. Les sols peuvent être fractionnés assez facilement en particules organiques ou minérales, contrairement à la roche, dont les grains minéraux sont retenus par une force cohésive et moléculaire très importante. Dans tous les projets de construction, une campagne de reconnaissance géotechnique est nécessaire. Elle a pour but d'étudier la structure géologique du sol (nature des matériaux du sol, profondeur des couches, niveau de la nappe phréatique...), et de déterminer certains paramètres décrivant le comportement du sol (contrainte du sol, la déformabilité,...); ces paramètres servent à la conception et au calcul des ouvrages géotechniques.

Les études géotechniques ont pour principal objet les études du sous-sol ; Elles traitent les phénomènes de mouvement du sol (glissement, affaissement et autres), de déformation (tassements sous charges) et résistance très vaste, il peut se comprendre comme l'augmentation de certaines caractéristiques mécaniques avec ou sans ajout de matériaux en agissant sur la réduction de l'indice des vides. Parmi les procédés d'amélioration de sol trouvent la stabilisation et le renforcement des sols.

### **I.2. Généralités sur les sols**

#### **I.2.1. Définition**

Un sol est constitué par un agrégat naturel de grains minéraux pouvant être séparés par des actions mécaniques légères (trituration ou agitation sous l'eau...), bien qu'il soit un matériau meuble, poreux, non homogène situé à proximité de la surface de la terre. De plus, les sols des roches qui peuvent être définies comme des agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes ; le sol constitue un matériau de base utilisé en génie civil, il sert de: Support pour les ouvrages: toutes les structures réalisées transmettent leurs charges au sol de fondation par l'intermédiaire de fondations superficielles ou profondes.

-Matériau de construction: exploité en carrière ou dragué en rivière, utilisé pour la fabrication des bétons (granulats), et dans les couches du corps de chaussée, la réalisation des digues et des barrages,...etc.

### I.2.2. les éléments constitutifs du sol

Le sol est un milieu tri-phasique qui se compose de:

- Grains solides formant le squelette du sol;
- La phase liquide composée de l'eau industrielle, si l'eau occupe tous les vides du sol, on dit qu'il est saturé;
- La phase gazeuse composée de l'air et éventuellement de l'eau évaporée.

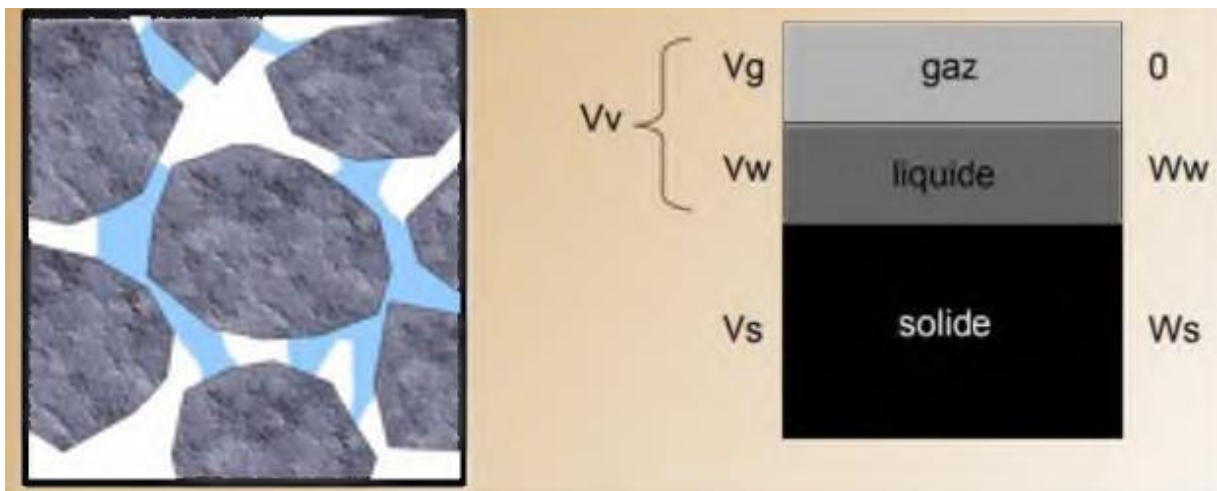


Figure I.1 : Les phases des sols

### I.2.3. Classification des sols

La classification géotechnique des sols a pour but de ranger les sols par catégories présentant des caractéristiques géotechniques voisines. Il existe plusieurs classifications géotechniques utilisant différents paramètres et caractéristiques distinctes. Deux sols peuvent être les mêmes d'un point de vue géologique mais différents selon leurs caractéristiques géotechniques et aussi selon la classification choisie.

### Classification des sols : sols grenus, sols fins

Première classification : limite adoptée :  $20\mu\text{m}$

Sols grenus  $d > 20\mu\text{m}$  ;

Sols fins  $d < 20\mu\text{m}$  ;

On distingue selon la classification des sols : Cailloux, grave, sable Limon, argile

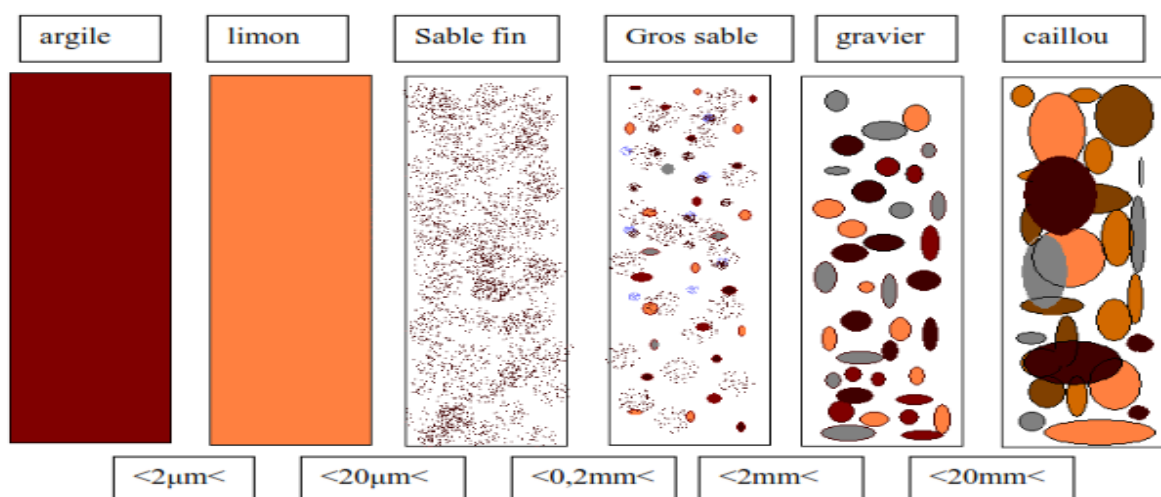
- Blocs, cailloux (fragments de la roche mère) : éboulis de pente, alluvions grossières, moraines  $20\text{mm} < d < 200\text{mm}$

- Grave (fragment de roche mère) : sédiments détritiques généralement formés de plusieurs minéraux  $2\text{mm} < d < 20\text{mm}$ .

- Sables (fragment de roche mère) : sédiment détritique généralement formés d'un seul minéral :  $20\mu\text{m} < d < 2\text{mm}$

- Limons (fragment de roche mère) : mélange de très fins de sable, mêlés en général à des particules argileuses :  $2\mu\text{m} < d < 20\mu\text{m}$ .

- Les argiles (altération physico-chimique de certains minéraux des roches) : particules  $< 2\mu\text{m}$ .



**Figure.I.2** : Classification des sols selon la dimension du particule ([genie-civile.blogspot.com/2013/04/classificatio-et-geotechnique-des-sols.html](http://genie-civile.blogspot.com/2013/04/classificatio-et-geotechnique-des-sols.html))

**Tableau I.1:** Classification des sols selon leurs propriétés mécaniques

| Classe de sol                 | Pressiomètre P1 (Mpa) | Pénétromètre QC (Mpa) |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Argiles et limons             |                       |                       |
| A-Argiles et limons mous      | <0,7                  | <3,0                  |
| B-Argiles et limons fermes    | 1,2 à 2,0             | 3,0 à 6,0             |
| C-Argiles très fermes à dures | >2,5                  | >6,0                  |
| Sables et graves              |                       |                       |
| A-Lâches                      | < 0,5                 | <5                    |
| B-Moyennement                 | 1,0 à 2,0             | 8 à 15                |
| C-compact                     | >2,5                  | >20                   |
| Marnes                        |                       |                       |
| A-Tendres marno-calcaires     | 1,5 à 4               | -                     |
| B-Fragmentées                 | >4,5                  | -                     |

Les résultats d'essai in-situ (Plessimètre et pénétromètre) permettent aussi de classer le sol évolutif en fonction de la pression limite et de la résistance à la pointe.

Les classifications des sols existant sont le triangle de texture de Taylor, la classification du Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées (L.C.P.C), le Guide de Travaux Routiers (G.T.R).....

La classification L.C.P.C est basée soit sur les résultats classiques d'essais de laboratoire (Granulométrie, limites d'Atterberg), ou l'appréciation visuelle et des tests simples sur le chantier.

Il faut avoir une grande expérience pour employer correctement la méthode rapide ou méthode de chantier. Pour particulièrement les sols évolutifs (fins) deux étapes indissociables sont à observer au laboratoire:

La première subdivision (analyse granulométrique), ou les sols sont classés selon la proportion massique des grains inférieurs ou supérieurs à 0,08mm.

-Les sols grenus: lorsque plus de 50 % des éléments > 0,08mm.

-Les sols fins: quand plus de 50 % des éléments < 0,08mm.

On peut classer les sols par l'utilisation de la courbe de Casa grande (utilisation des résultats des limites d'Atterberg).

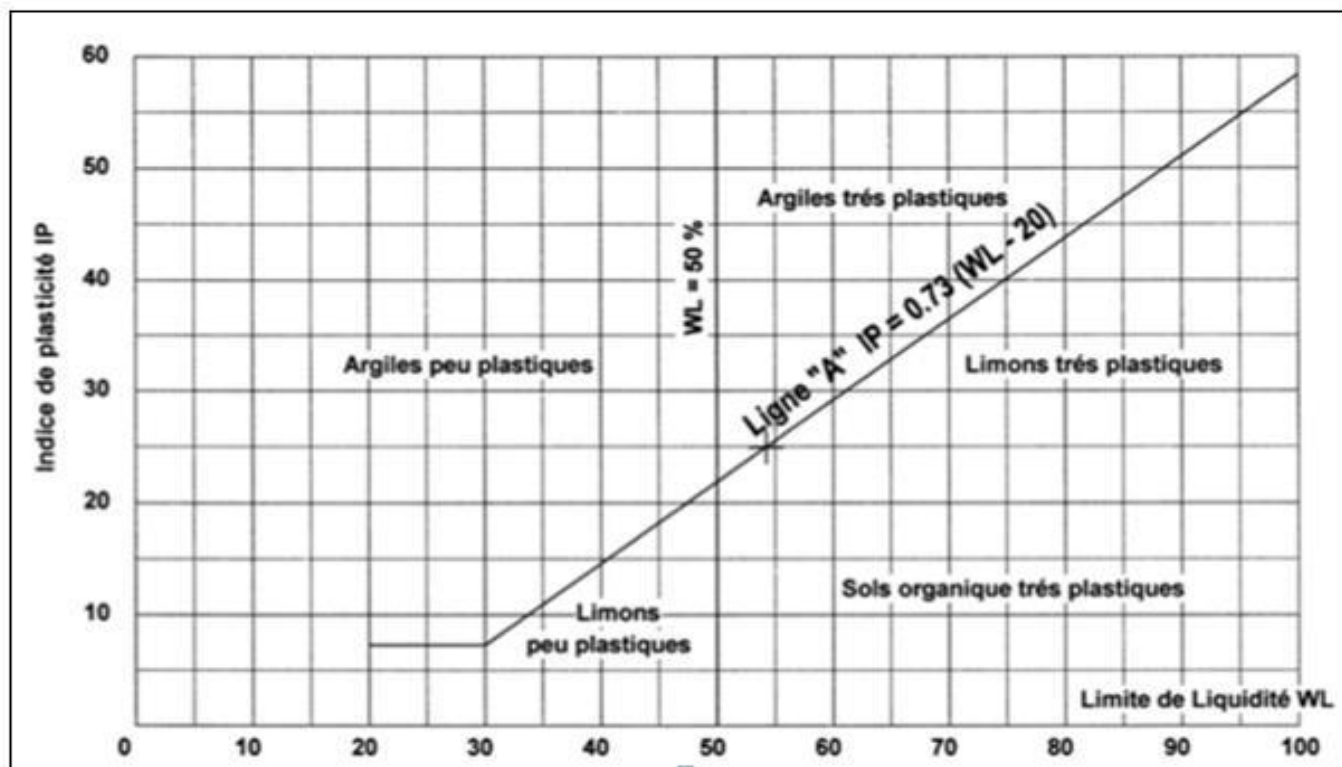


Figure I.3 : Diagramme de plasticité de Cas grande.

La classification des sols selon le contenu en matière organique (MO) se fait comme suit:

- Pour  $MO < 3\%$ , la matière organique n'a pas d'influence sur le sol.
- Pour  $3 < MO < 10\%$ , le sol est faiblement organique.
- Pour  $MO > 10\%$ , il est considéré comme un sol organique.

### **I.3. Les argiles**

#### **I.3.1. Origine des argiles**

Les argiles résultent de la désagrégation en surface de roches silicatées très répandues dans la couche terrestre comme le granit, le gneiss ou les schistes. Ils sont transportés par l'eau et déposés. Certains dépôts se transforment par diagenèse (déshydratation et compactage), et forment des roches argileuses compactes et des schistes. Les sédiments argileux ayant subi une métamorphose sont souvent structurés en couches minces en raison de la présence de phyllosilicates. Ces derniers sont des minéraux argileux (les micas par exemple) dont la dimension des feuillettes peut atteindre  $5\mu\text{m}$ , donc une taille supérieure à celle des argiles au sens strict. Ces phyllosilicates confèrent aux roches argileuses la structure litée typique des schistes. La dissolution du calcaire donne également naissance à des dépôts argileux. L'activité végétale produit également des argiles, jusqu'à  $30\text{ kg par an et par hectare}$ .

#### **I.3.2. Définition géotechnique des argiles**

Du point de vue du géotechnicien, les argiles désignent la fraction des particules du sol dont la taille est inférieure à  $4\mu\text{m}$ . Les particules d'une taille inférieure de  $2\mu\text{m}$  ne sont plus visibles avec un microscope optique. Il faut alors recourir à la sédimentométrie pour pouvoir déterminer la quantité de particules contenues dans un sol et déterminer la nature à l'aide des méthodes basées sur la diffraction des rayons X (DRX). En effet, la nature des argiles ont une grande incidence sur les propriétés mécaniques des sols, en particulier sur leur comportement avec l'eau.

Les argiles constituent la fraction la plus fine des sols. A l'opposé, la fraction la plus grossière des sols est appelée «squelette» qui comprend des pierres et des blocs. Entre ces deux extrêmes, on trouve la fraction des limons ou silts, des sables et des graviers.

La définition géotechnique des argiles est liée aux caractéristiques chimiques de ceux-ci. Les argiles sont des minéraux des phyllo silicates, ils se distinguent par une structure en feuillets formés de cristaux en arrangement octaédrique (O) ou tétraédriques (T) capable d'intégrer des cations hydratés (Ca, Na, Fe, Al,...etc.) dans les espaces interfoliaire. Le critère de classement des argiles est basé sur la forme de succession des couches dans les feuillets. Il y'a trois grandes classes: les feuillets TO,TOT et TOTO.

Dans la pratique, on utilise très souvent le terme générique de «fines». Il s'agit alors des argiles telles qu'elles sont définies plus haut et des limons. Les normes européennes définissent les fines comme le pourcentage (massique) des passants au tamis de 0,063 mm.

### **I.3.3. Minéralogie des argiles**

Les minéraux argileux sont de très petites particules très actives sur le plan électrochimique. Lorsque le pourcentage d'argile augmente, l'influence de la portion argileuse sur le comportement global du sol augmente proportionnellement. Selon le climat, l'origine des minéraux est variable :

- Héritage : à partir de la roche-mère ;
- Transformation : à partir d'autres minéraux argileux ;
- Néof ormation : formés à partir des ions transportés par l'eau du sol.

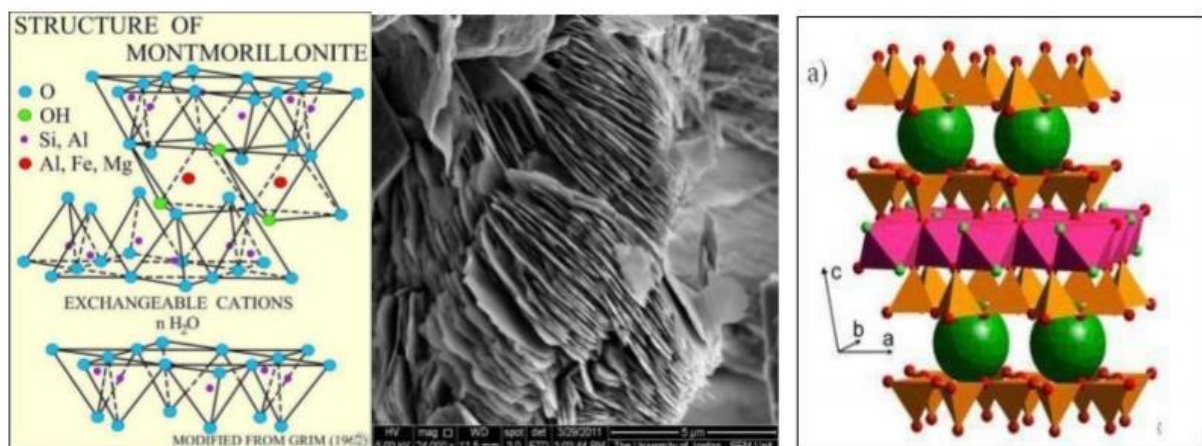
### I.3.4. Structure des argiles

Les argiles s'organisent par des structures en feuillets:

- Empilement de minéraux d'oxyde de silicium (cristaux tétraédriques ou octaédriques) en feuillets entrecoupés par des espaces. Souvent, l'atome de silicium est remplacé par Al (tétraédrique) ou Al, Fe, Mg, Li (octaédriques).
- Charges négatives à la surface (généralement en raison de l'incorporation d'hydroxyles OH).
- Les charges négatives sont compensées par l'incorporation de cations dans les espaces entre les couches

L'illustration ci-après montre la structure d'une montmorillonite (droite et gauche), avec l'alternance des couches T et O, ici une séquence TOT avec l'adsorption d'eau dans l'espace inter foliaire (en vert). La macroscopie du milieu représente un empilement de kaolinite qui est beaucoup moins réactive avec l'eau, c'est pourquoi elle est utilisée pour fabriquer la porcelaine.

La montmorillonite, qui peut absorber énormément d'eau, serait inapte à la fabrication de poterie ou de porcelaine en raison du retrait lors de la cuisson.



**Figure.I.4** : Structure des argiles. Dessin de droite : Laboratoire Léon Brillouin [llb-sec@cea.fr](mailto:llb-sec@cea.fr)

### I.3.5. Principales familles d'argile

Les types d'argiles fréquents sont: la kaolinite, la montmorillonite et l'illite.

#### I.3.5.1. Les Kaolinites

Le feuillet de kaolinite résulte de la liaison d'un feuillet tétraédrique avec un feuillet octaédrique, la liaison se faisant par les atomes d'oxygène.

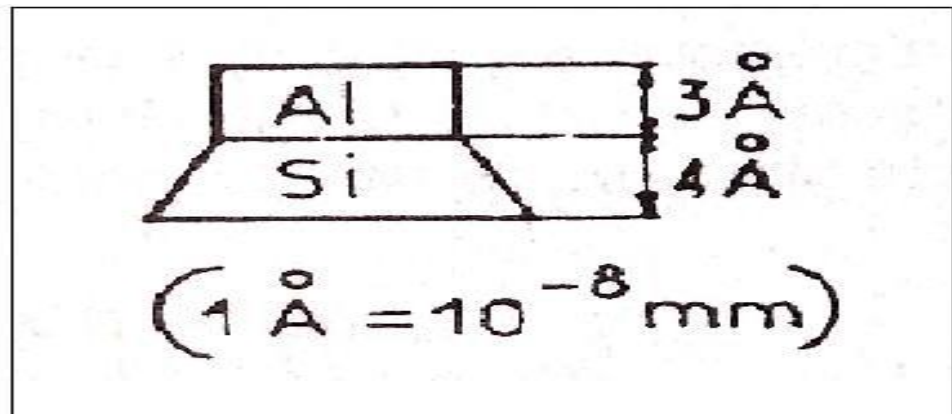


Figure I.5 : Feuillet de kaolinite.

La particule de kaolinite est formée d'un empilement de ces feuillets, les liaisons entre ces feuillets étant du type «liaison hydrogène», donc des liaisons faibles. Aux extrémités, la particule est chargée électriquement, car les feuillets ne sont pas tous identiques.

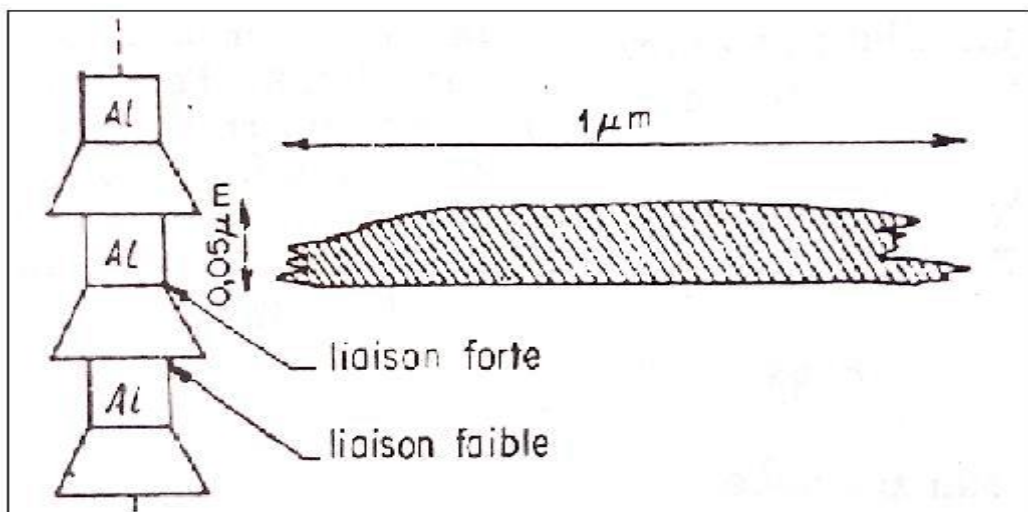
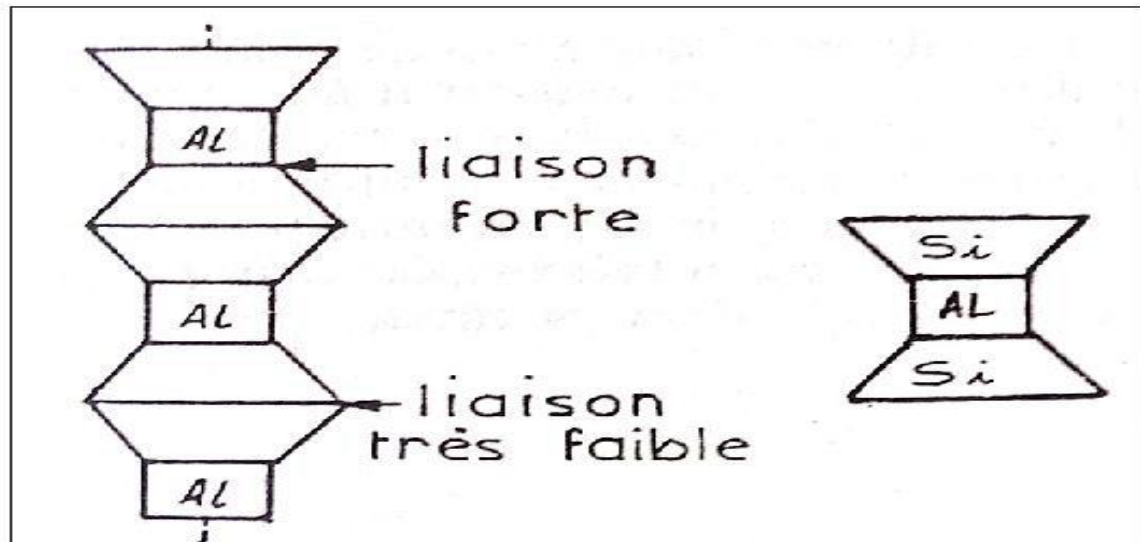


Figure I.6 : Particule de kaolinite

### I.3.5.2. Montmorillonite

La particule de montmorillonite résulte de l'empilement des feuillets élémentaires suivants:



**Figure I.7** : La liaison entre les particules de montmorillonite.

La liaison entre deux feuillets est une liaison de type hydrogène, maîtres faibles de telle sorte que des molécules d'eau peuvent s'installer entre les feuillets. Il peut y avoir jusqu'à cinq à six couches de molécules d'eau. Ainsi, les sols dont la teneur en montmorillonite est élevée sont susceptibles de gonflement ou de retraits importants suivant les variations de la teneur en eau. Par suite de la faiblesse de la liaison, les particules de montmorillonite ont des dimensions très faibles:

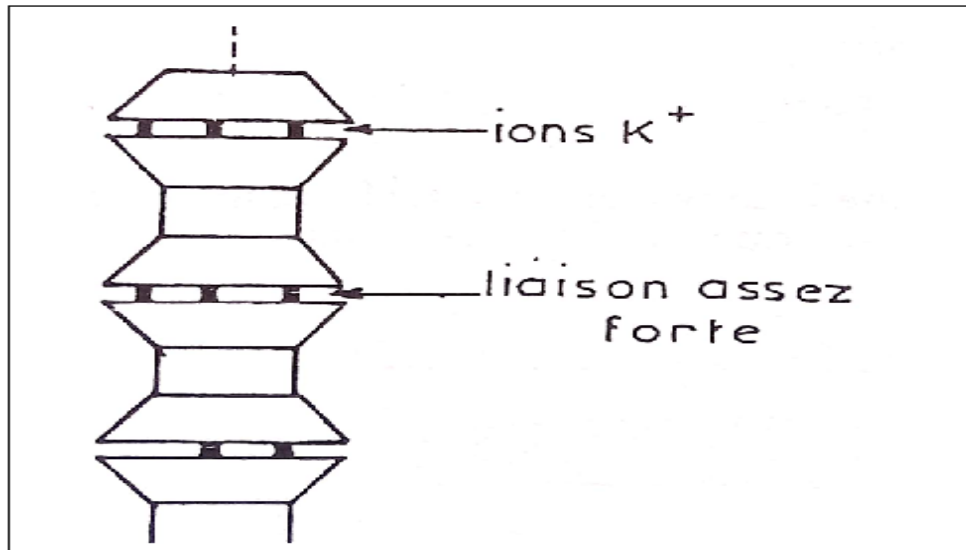
- Diamètre: 0,05  $\mu\text{m}$ ;
- Epaisseur: 1/400 du diamètre.

Ces particules sont également chargées électriquement à leurs extrémités.

### I.3.5.3. L'illite

Cette argile a une structure analogue à la montmorillonite mais des ions potassium sont intercales entre les feuillets tétraédriques. Grâce à ces ions la liaison est relativement forte et les molécules d'eau ne peuvent pratiquement plus s'intercaler. L'atome d'aluminium du feuillet octaédrique qui se trouve sous forme d'un  $\text{Al}^{+3}$  peut être remplacé par d'autres ions comme  $\text{Mg}^{+2}$  principalement dans la montmorillonite et dans l'illite.

Il en résulte un déséquilibre électrique qui est compensé par l'adsorption à la surface de cations  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ . Aux extrémités de la particule d'argiles, y a également des déséquilibres électriques et adsorption de cations. Ces cations dits «échangeables» jouent un rôle important dans le comportement des argiles.



**Figure I.8** : La liaison entre les particules de l'illite.

### I.3.6. Propriétés et rôle des minéraux argileux

Les propriétés bien particulières des minéraux argileux sont dues à la petite taille, la structure en feuillets et la charge négative des particules. Elles forment avec l'eau des solutions colloïdales qui flocculent lorsque les charges de surface des particules sont neutralisées par des ions. Ce phénomène est réversible: les particules retrouvent l'état dispersé lorsque les ions sont éliminés par rinçage. Les argiles fixent l'eau par adsorption à leur surface et augmentent de volume par gonflement. Elles constituent ainsi une réserve d'eau. L'argile sèche développe une tension de succion importante pour l'eau qui peut s'opposer à celle des racines des plantes. Avec adjonction croissante d'eau, la tension de succion diminue, l'ensemble eau-argile devient plastique, puis visqueux et finalement les particules d'argile se dispersent dans l'eau en formant une solution colloïdale. L'argile imprégnée d'eau qui se dessèche se rétracte et se casse par des fentes de retrait.

Les argiles confèrent au sol sa structure et ses propriétés mécaniques. Elles sont associées aux autres composants et constituent les complexes argilo-humiques (ou organominéral); leur teneur peut atteindre 50%. Elles sont généralement à l'état flocculé, généralement par l'action des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{H}^+$ , ce qui donne au sol ses qualités

agronomiques: bonne aération entre les agrégats, retrait modéré à la dessiccation, bonne perméabilité à l'air et l'eau. En revanche, les sols dont les argiles sont dispersées, et non floculées, présentent des caractères défavorables à la culture: mauvais état structural, mauvaise circulation de l'air et de l'eau, retrait important à la dessiccation, forte adhérence aux outils travaillant le sol. Les mêmes inconvénients se retrouvent dans les sols saturés par l'ion sodium, comme dans les polders; leur mise en culture exige au préalable un lessivage du sol par les eaux douces, de façon à éliminer le Na<sup>+</sup> qui est remplacé par l'ion Ca<sup>2+</sup> fourni sous forme de sulfate (gypse).

**Tableau I.2:** Surface spécifique et la capacité d'échange cationique (CEC) de quelques minéraux argileux.

| Minéral     | Surface interne<br>(m <sup>2</sup> /g) | Surface externe<br>(m <sup>2</sup> /g) | Surface totale<br>(m <sup>2</sup> /g) | C.E.C (millié-<br>-quivalent /100) |
|-------------|--|--|---------------------------------------|------------------------------------|
| Kaolinite   | 0                                      | 10 -30                                 | 10 -30                                | 5-15                               |
| Illite      | 20 -55                                 | 80 -120                                | 100 -175                              | 10 -40                             |
| Smectites   | 600 -700                               | 80                                     | 700 -80                               | 80 -150                            |
| Vermiculite | 700                                    | 40 -70                                 | 760                                   | 100 -150                           |
| Chlorite    |  | 100                                    | 100 -175                              | 10 -40                             |

### **I.3.7. Les principales caractéristiques des minéraux argileux qui influencent le gonflement**

Sont les Suivantes :

#### **I.3.7.1. Densité de charge spécifique**

Deux types de charge existent dans les milieux argileux:

- Une charge permanente ou structurelle liée aux substitutions ioniques (dans la couche tétraédrique ou octaédrique);
- Une charge de surface variable selon le pH du milieu liée aux réactions chimiques, qui se produisent à la surface des minéraux.

La densité de charge spécifique renseigne sur le pouvoir de la particule à repousser les autres, cette répulsion étant la capacité de gonflement des minéraux argileux. L'augmentation de la densité de charge spécifique réduit le gonflement ou la pression de gonflement des matériaux argileux. Cette augmentation entraîne l'attraction des ions, ce qui va provoquer une condensation de la double couche, donc une diminution de son épaisseur. Plus cette concentration est élevée, plus la couche est mince ou comprimée, donc induit une diminution de gonflement.

#### **I.3.7.2. Capacité d'échange cationique (CEC)**

La capacité d'échange cationique est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argiles, et varie dans le même sens que la densité de charge surfacique. Donc, pour les argiles ayant une valeur élevée de CEC, elles ont tendance à peu gonfler, et cela à surfaces spécifiques égales.

#### **I.3.7.3. Surface spécifique**

L'argile est composée de la surface externe comprise entre les particules, et la surface interne correspondant à l'espace inter foliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important, et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé.

### **I.4. Problèmes des sols argileux**

En Algérie le gonflement, le glissement et le tassement sont des risques multipliés selon la sismicité de la zone, et aussi de l'activité anthropique.

#### **I.4.1. Tassement des sols**

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes, argiles) sous l'effet de charges appliquées, et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation.

#### **I.4.2. Glissements de terrain**

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites. La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement, qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes visibles ou non, et de formes diverses.

#### **I.4.3. Gonflement des sols argileux**

Ce phénomène est lié au changement d'humidité de certains sols très argileux (Montmorillonites, saponites et autres natronites), ou tourbeux qui sont capables de fixer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse. Le retrait-gonflement est un mouvement de tassement différentiel du sol spécifique aux terrains argileux (les argiles sont gonflantes, et varient en fonction de leur teneur en eau); la variation de volume d'un terrain est consécutive à l'alternance des périodes de sécheresse (déshydratation superficielle), et des périodes pluvieuses (réhydratation), et elle provoque des désordres dans les constructions (fissuration, décollement d'élément jointifs).

### I.5. Quelques cas pathologiques

Les désordres provoqués par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage. Les phénomènes de retrait et de gonflement de certains sols argileux ont été observés depuis longtemps dans les pays à climat aride et semi-aride où ils sont à l'origine de nombreux dégâts causés tant aux bâtiments qu'aux réseaux et voiries.

#### I.5.1. Cas des bâtiments

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

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

La figure.1.9, représente des fissures au niveau d'une structure légère de génie civil due au gonflement du sol de fondation.



**Figure. I .9 :** Fissures au niveau d'une structure de génie civil.

#### I.5.2. Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée. Ce phénomène est causé par des variations de la teneur en eau du sous-sol. Il peut être attribué au climat et à la surcharge. Le désordre subis par la chaussée se résume généralement à des fissures qui apparaissent à la fin de la saison sèche sur ses accotements.

En saison de pluie ces fissures permettent à l'eau de s'infiltrer plus facilement entraînant la saturation de ces zones et par conséquent leur gonflement, engendrant ainsi l'apparition de déformation à la surface de la chaussée, puis l'apparition de fissures longitudinales qui peuvent être assimilées à la chute de la portance dans les zones latérales de la chaussée entraînant l'affaissement des bords. Ces phénomènes sont accélérés par le flux routier. Ces désordres s'amplifient avec le début de la saison sèche (Figure. 1.10)



**Figure I.10:** Déformation d'une chaussée de sol instable

### I.6. Conclusion

A partir de cette étude bibliographique, nous avons conclu ce qui suit:

- Les argiles sont des phyllo silicates hydratés formés par l'association de feuillets élémentaires, qui s'accrochent entre eux pour former des éléments dénommés empilements par certains auteurs, ou cristallites par d'autres l'espace entre deux feuillets est appelé espace inter foliaire.
- Les minéraux argileux sont des substances cristallines qui tirent essentiellement, leurs origines de l'altération chimique de certains minéraux composant les matériaux parents. La famille des minéraux argileux regroupe tous les silicates hydratés appartenant au groupe des phyllo silicates.
- Les minéraux argileux se caractérisent par quatre propriétés principales: formes et surfaces spécifiques, la densité de charge spécifique, la capacité d'échange cationique (CEC), La charge spécifique

# Chapitre II : Amélioration des sols

---

## II .2. Introduction

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation.

Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

Les techniques d'amélioration des sols consistent à modifier les caractéristiques d'un sol par une action physique (vibrations par exemple) ou par l'inclusion dans le sol ou le mélange au sol d'un matériau plus résistant, dans le but de :

Augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement

Diminuer les tassements, tant absolus que différentiels, et le cas échéant les accélérer,

Diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou de vibrations importantes.

Les champs d'application des différentes techniques dépendent essentiellement de la nature et de la granulométrie des terrains que l'on désire améliorer

## II .2. Méthodes mécaniques

### II.2.1. Vibrocompactage

#### ❖ Origine et développement

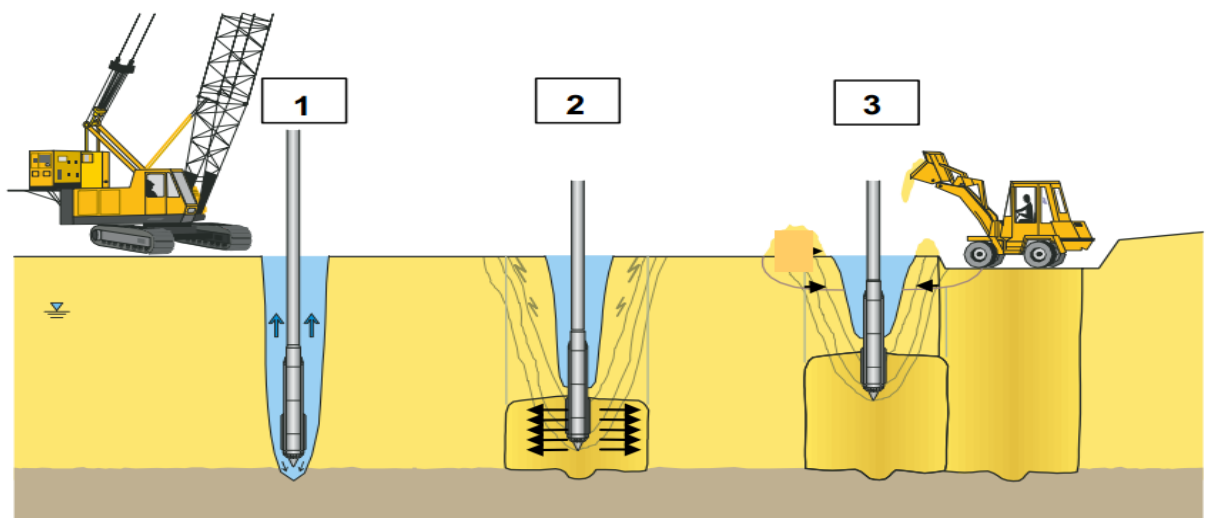
Le procédé de vibrocompactage, développé à la fin des années 30, permet de compacter localement ou dans la masse, les sols grenus sans cohésion (sables, graviers, cailloux) en place ou mis en remblai au-dessus ou en-dessous de la nappe et ceci jusqu'à des profondeurs maximum de plus de 50m. est une technique d'amélioration de sol des sols pulvérulents de type sablo-graveleux permettant de les densifier dans la masse sous l'effet de la vibration.

Ces vibrations, émises par l'outil, se propagent de grains en grains et provoquent un réarrangement optimal du volume initial occupé. La réduction de la porosité du

matériaux permet aussi d'augmenter sa capacité portante de manière significative. Il est courant d'obtenir des contraintes de sols améliorés de l'ordre de 0,5 à 0,8 MPa ELS après ce type de traitement.

### ❖ Principe de la technique

La technique de vibrocompactage (appelée aussi « vibroflottation ») consiste à foncer dans le sol un vibreur relativement puissant, qui densifie l'empilement des particules du sol, et à procéder à un apport de matériaux pour atteindre le niveau final de la plateforme (figure II.1)



1 :Fonçage du vibreur 2: Compactage des sols 3 :Apport des matériaux en finition

**Figure II .1 :** Étapes du vibrocompactage des sables et graviers (Document Keller

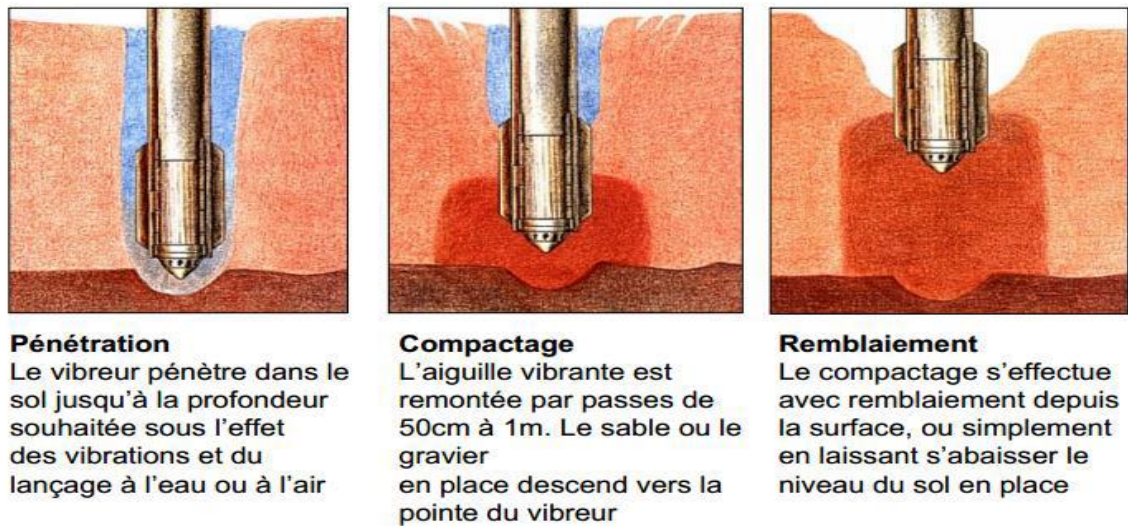
La densification du sol crée autour du vibreur un cône d'affaissement, qui l'on remplit de matériau granulaire de granularité comparable. L'application du procédé de vibrocompactage nécessite généralement deux caractérisations principales : une analyse granulométrique et des mesures mécaniques.

### ❖ Mode opératoire

Le mode opératoire est le suivant :

- Fonçage de l'outil jusqu'à la cote de traitement ; le vibreur est descendu par deux actions : la vibration et un fluide de lancement (généralement de l'eau).
- Lorsque la profondeur est atteinte, le vibreur est légèrement remonté de quelques décimètres et un cône d'affaissement va se créer. Ce dernier sera
- comblé soit par des matériaux d'apport ou en décapant progressivement les matériaux du site.

Le vibrocompactage est exécuté ainsi par passes successives jusqu'à la plateforme d'intervention.

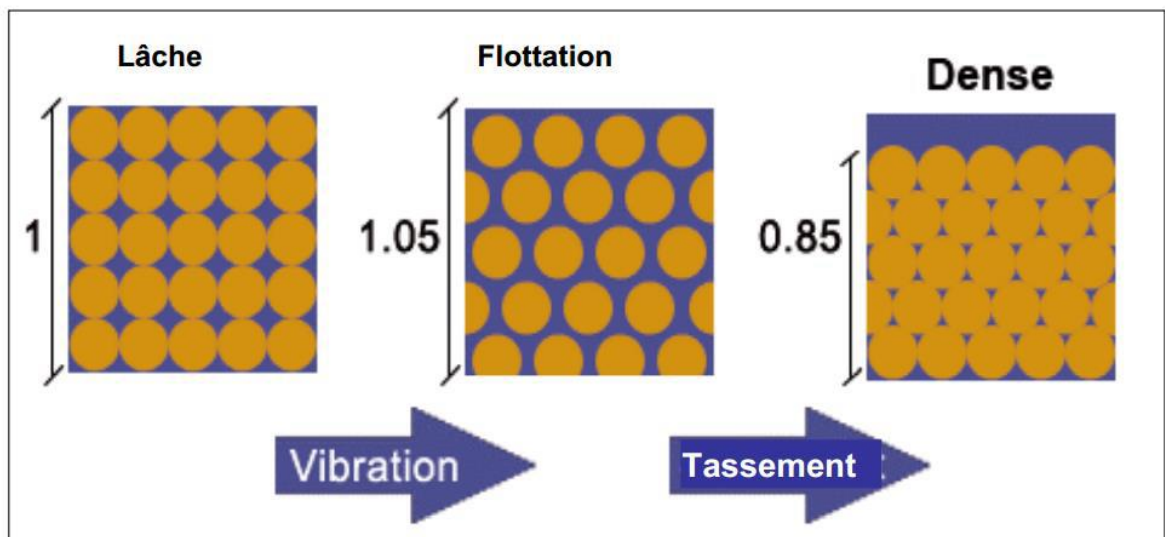


**Figure II .2 :** vibrocompactage – mise en œuvre(DESCRIPTIFS DES PROCÉDES

D'AMÉLIORATION ET RENFORCEMENT DE SOL-Jean-Marc DEBATS)

Au démarrage du chantier, une planche d'essais est réalisée avec pour objectif de valider le maillage des points de vibrocompactage en fonction des performances à obtenir.

À chaque phase de la production, des points de contrôles (enregistrement de paramètres, sondages...) assurent les caractéristiques et l'intégrité du traitement.



**.Figure II .3 :** vibrocompactage – mode d'action(DESCRIPTIFS DES PROCÉDES D'AMÉLIORATION ET RENFORCEMENT DE SOL-Jean-Marc DEBATS)

### Avantages

Le vibrocompactage apporte bien des avantages par rapport à d'autres solutions de fondations, entre autres :

- ❖ Amélioration de sol en place sans matériau d'apport (solution très économique),
- ❖ Grande souplesse aussi bien dans la mise en oeuvre des fondations (pas de recépage) qu'en dimensionnement (sol homogène sans points durs),
- ❖ Délai de production rapide,
- ❖ Co-activité avec les autres lots de la construction (gros-oeuvre, terrassement),
- ❖ Impact environnemental faible (peu de transport de matériaux, peu de bruits, propagation des vibrations limitées par l'utilisation de vibreurs spécifiques),
- ❖ Bilan carbone beaucoup plus faible que n'importe quelle technique utilisant du ciment Procédé connu pour être le plus efficace dans la réduction du potentiel de liquéfaction des sols ([www.kellerfrance.com/techniques/procedes/vibrocompactage](http://www.kellerfrance.com/techniques/procedes/vibrocompactage)).

### II.2.2. le Compactage dynamique (ou pilonnage)

#### ❖ Objectifs

Le compactage dynamique vise l'amélioration des propriétés géotechniques de sols lâches sur de grandes profondeurs par l'application d'impacts de très forte intensité.



**Figure II -4** exemples de chantiers de compactage dynamique (documents de Géopac® et Ménard et sol traitement®)

### ❖ Description du procédé

Le procédé consiste à faire chuter de façon méthodique et répétée à la cadence de une à trois fois par minute et selon un maillage orthogonal défini rapport à la nature des terrains de lourds pilons d'acier sur la surface du sol à traiter. Les impacts qui en résultent créent de puissantes ondes de choc qui se propagent en profondeur provoquent le resserrement des sol traités et l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques .A l'aide de puissantes grues sur chenilles adaptées. Les pilons sont levés pour ensuite retomber en chute quasi-libre.

Lamasse de ces pilons varies généralement entre 10 et 18 tonnes métriques, mais avec un système de levage spécial elle peut être portée à 30 tonnes ou davantage pour augmenter profondeur de traitement. La hauteur de chute varie habituellement entre 10 et 30 mètres au dessus de la travail.

L'énergie d'un impact appliquée au sol se mesure en tonnes-mètres (t-m) et la magnitude de<sup>1</sup>cette énergie par chute constitue un facteur déterminant dans la mesure et la profondeur de l'amélioration obtenue. Les autres facteurs qui affectent de façon significative la profondeur maximum et le degré d'amélioration sont la conception du programme d'application d'énergie. La séquence. Le bon nombre d'impacts par empreinte, et monitoring attentif de la réponse du sol tout au long des travaux. L'augmentation et le rythme de dissipation des pressions interstitielles, le tassement provoqué suite à l'application de chaque phase d'énergie et le gonflement sont autant d'éléments additionnels qui doivent être constamment suivis et pris en compte tout au long du traitement



**Figure II -5 :** Réalisation du compactage selon un maillage bien défini (documents de Ménard soltraitement®)

### ❖ Sols pouvant être traités

De toutes les techniques d'amélioration de sol, seul le compactage dynamique permet de traiter le plus large éventail de dépôts naturels ou de remblais. Cette méthode permet de traiter en profondeur par des actions de surface des sols

sablo- graveleux, et des matériaux argilo-limoneux saturés à condition qu'il y ait présence d'air occlus (1 à 4%) (Cas des tourbes ou des remblais récents avec matières organiques). Son emploi peut être intéressant pour consolider des couches sous l'eau. Seuls les sols présentant des caractéristiques de consolidation à long terme sous l'application de charges, tels que les argiles et sols organiques, ne répondront pas favorablement au traitement. Des remblais d'origine ont toutefois été traités pour en réduire les vides importants. Par ailleurs, certains dépôts ne pourront être améliorés que par compactage dynamique comme par exemple les sols d'origine morainiques, les débris de construction et remblais d'envasements renfermant de gros éléments.

Le compactage dynamique s'est révélé particulièrement efficace pour développer des sites jadis considérés comme impropres à la construction en raison des difficultés techniques ou des coûts élevés que représentaient les méthodes de fondation conventionnelles. C'est le cas notamment des sites où des remblais hétérogènes ont été déversés à tout hasard et que l'on retrouve en fortes concentrations à la périphérie de grands centres urbains, dans les carrières abandonnées, dans les zones portuaires ou pour des édifices résidentiels de prestige construits sur des terrains gagnés sur les rivières ou la mer.

### ❖ Améliorations obtenues

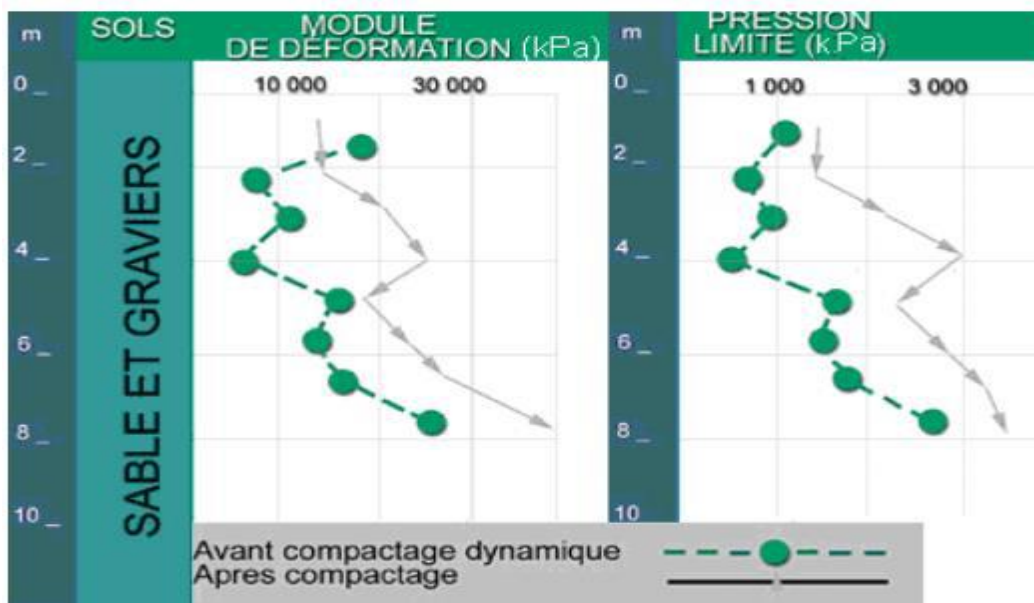
D'une façon générale, les caractéristiques géotechniques des sols granulaires traités par compactage dynamique augmenteront par un facteur variant de 2 à 4 et la profondeur d'amélioration se situera entre 10 et 6 mètres. Dans des sols fins, des silts aux sables, une partie non négligeable de cette amélioration ne surviendra que deux ou trois mois après la fin du traitement. Ce phénomène de vieillissement doit être anticipé lors des essais plutôt que de retarder la construction, solution rarement acceptable.

La portance admissible après traitement sera de l'ordre de 100 à 200 KPa dans le cas de sols ou de remblais silteux, et de 200 à 400 kpa , parfois plus, dans les sols ou remblais granulaires ayant une bonne perméabilité. Des capacités portantes de 800 kpa et des exigences sévères de tassement total et différentiel ont été obtenus dans des sols granulaires.

Ces chiffres ne représentent qu'un ordre de grandeur. Les résultats du traitement, qu'il s'agisse de la portance obtenue ou de la profondeur d'amélioration, dépendent d'un grand nombre de facteurs, les uns intrinsèques aux sols mêmes, tels leur nature, leur composition et leur perméabilité, les autres extrinsèques, dont les variables du programme de compactage.

L'analyse de ces facteurs et le choix des moyens à mettre en œuvre pour optimiser les résultats du traitement, il faut bien le rappeler, ne relèvent pas de la science, mais plutôt de l'art donc de l'expérience et de la compétence du spécialiste.

Le diagramme ci-dessous donne un aperçu des capacités portantes qui peuvent être obtenues dans différents types de sols celui-ci compare les valeurs pressiométriques, la pression limite et le module de déformation, mesurées avant et après le compactage dynamique effectué pour l'Aluminerie de grande-Baie (ALCAN) à Saguenay. ((DTU.13.2) (1992) «fondation profondes pour le bâtiment: Colonnes ballastées »).



**Figure II.6 :** Comparaison des caractéristiques du sol avant et après consolidation dynamique (DTU.13.2).

### ❖ **Domaine d'application**

L'utilisation la plus fréquente du compactage dynamique, et celle susceptible de générer les plus importantes économies de temps et de coûts, concerne l'amélioration des sols pour la construction d'un dallage sur sol et de fondation superficielles pour bâtiments ou autres ouvrages de génie civil. Le compactage dynamique remplace souvent l'excavation et le remplacement des sols en place ainsi que les fondations profondes avec des inclusions rigides.

Cette technique est un moyen efficace pour densifier profondément les terrains compressibles, et permettant de gagner sur la mer (exemple : piste de l'aéroport de Nice) ou de réaliser des sous-couches convenant à des dallages de bâtiments industriels ou de centres commerciaux.

La consolidation est associée à des systèmes de drainage, en particulier pour les sols fins, permettant ainsi de réduire les temps de dissipation des pressions interstitielles



**Figure II.7** : Chantier de compactage dynamique ( aéroport de Nice-France)(documents de Ménard soltraitement®)

Le compactage dynamique est également utiliser pour :

- Support faible pour fondations superficielles de tous de structures par l'amélioration des caractéristiques de portance et la satisfaction des critères de tassement total et différentiel sévères ;
- Assurer la bonne tenue de revêtement dans les aires de stockage ou de manutention de matériaux hautement chargées, telles celles des entrepôts, pistes d'aéroport, terminaux de conteneurs, etc. ;
- Réduire le potentiel de liquéfaction des sols dans les zones à haute sensibilité sismique ;
  - Stabiliser des pentes, barrages, digues, ...etc. ;
  - Réduire les vides dans les dépotoirs(décharges) ;
  - Défoncer cavernes et mines abandonnées ;
  - Densifier des sols marins et remblais placés sous
- Par contre, cette technique reste peu courante du fait de l'encombrement qu'occasionnent les appareils et le bruit engendré par les impacts, et s'utilisera surtout sur des surfaces importantes à l'écart d'habitations

### **II.2.3. Colonnes ballastées**

Les sols cohésifs ont souvent une portance insuffisante. Lorsqu'ils comportent plus de 10 à 15 % de limons et argiles, ils peuvent être améliorés par un réseau de colonnes ballastées. Ce procédé est également utilisable dans les remblais non évolutifs, tels que déblais de constructions, scories ou remblais hétérogènes. À noter que dans le cas de passages évolutifs,

le gravier de la colonne peut être remplacé par du béton prêt à l'emploi

#### **❖ Domaine d'application**

En augmentant la capacité portante du sol et en réduisant sa compressibilité, la colonne ballastée permet l'économie de pieux et de planchers portés en rendant possible la réalisation de dallages sur terre-plein. Ce renforcement de sol trouve une application dans tous les domaines de la construction (bâtiments de logements, industriels et commerciaux, ouvrages génie civil, remblais routiers et ferroviaires, plateformes portuaires). Il est une alternative, souvent très rentable, aux substitutions, puits béton et pieux. Toute extraction de déblais est évitée.

Les colonnes ballastées permettent aussi de lutter contre la liquéfaction des sols et les argiles gonflantes.

### ❖ Procédé à haute qualité environnementale

Technique entrant dans le cadre du développement durable et à faible incidence sur la pollution (mise en œuvre de matériaux naturels roulés et concassés dont la production engendre de faibles rejets en CO<sup>2</sup>

### ❖ Colonnes ballastées sous massifs de fondations

Le renforcement par colonnes ballastées permet d'augmenter la capacité portante du sol, en général jusqu'à 0,2 à 0,3 MPa ELS. Aucun recépage n'est à prévoir, et la semelle ou le radier sont coulés directement sur les colonnes. La forte résistance au cisaillement de la colonne ballastée permet de reprendre les efforts horizontaux et les moments. En zone sismique, elle permet de jouer le rôle de rotule plastique, de manière à pouvoir dissocier les effets inertiels

des effets cinématiques. Le dimensionnement des semelles superficielles filantes ou isolées se fait de manière conventionnelle

### ❖ Colonnes ballastées sous dallage

En supprimant tout effet de point dur, avec les colonnes ballastées, le dallage peut être dimensionné de manière classique selon le DTU 13.3 Dallages, à partir des sollicitations définies par son utilisateur (charges uniformément réparties, ponctuelles, dynamiques) et d'un module de sol amélioré homogénéisé ES, sans moment complémentaire significatif.

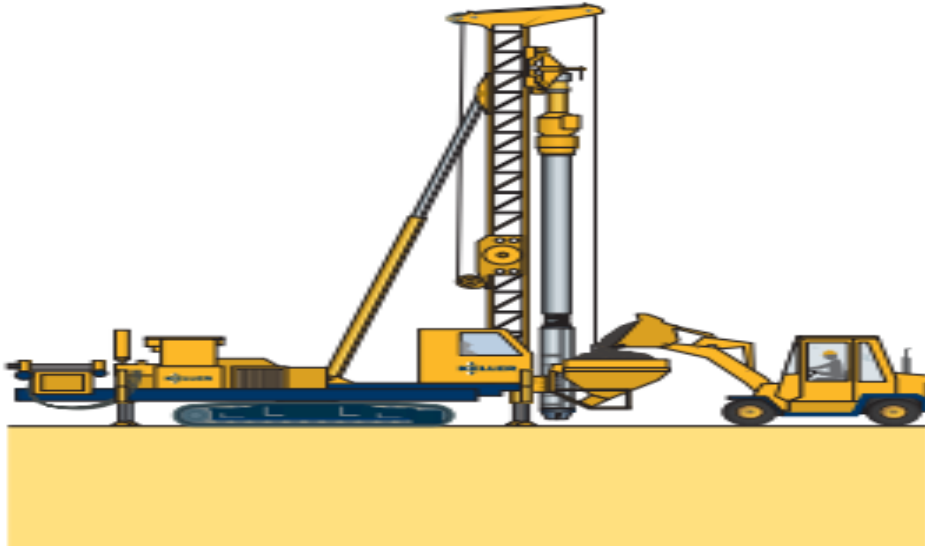


**Figure II. 8 :** Colonnes ballastées sous dallage  
([www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées](http://www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes%20ballastées)).

### ❖ Principe de réalisation

#### ➤ Préparation

La machine est mise en station au-dessus du point de fonçage, et stabilisée sur ses vérins. Un chargeur à godet assure l'approvisionnement en agrégats .



**Figure II .9 :**Préparation (www. Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnesballastées).

➤ **Remplissage**

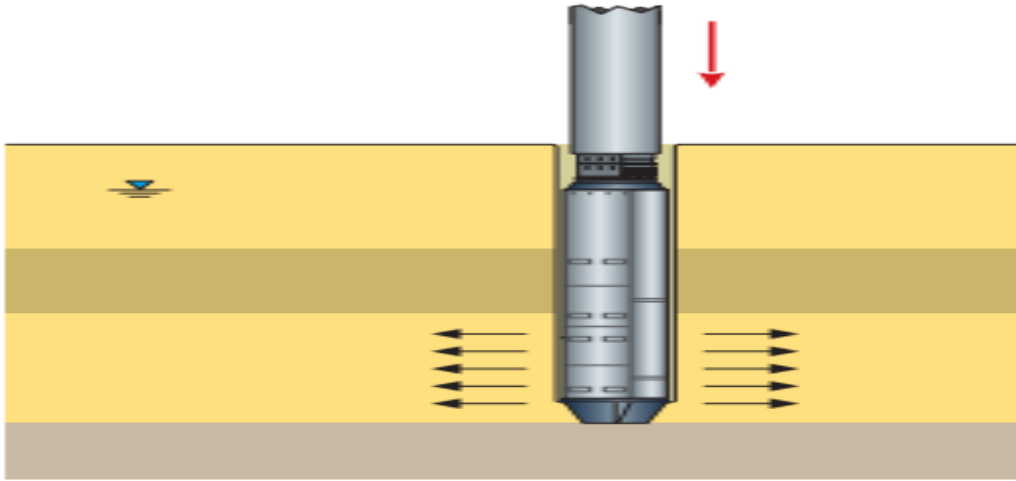
Le contenu de la benne est vidé dans le sas. Après sa fermeture, l'air comprimé permet de maintenir un flux continu de matériau jusqu'à l'orifice de sortie

**Figure II .10 :** Remplissage (www. Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées).

➤ **Fonçage**

Le vibreur descend, en refoulant latéralement le sol, jusqu'à la profondeur prévue, grâce

à l'insufflation d'air comprimé et à la poussée sur l'outil.



**Figure II.11:** Fonçage ([www. Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnesballastées](http://www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnesballastées)).

➤ **Compactage :**

Lorsque la profondeur finale est atteinte, le vibreur est légèrement remonté et le matériau d'apport se met en place dans l'espace ainsi formé. Puis le vibreur est redescendu pour ex panser le matériau latéralement dans le sol et le compacter

**Figure II.12 :** compactage ([www. Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnesballastées](http://www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnesballastées)).

➤ **Finition**

La colonne est exécutée ainsi, par passes successives, jusqu'au niveau prévu. Les semelles de fondations sont alors réalisées de manière traditionnelle. ([www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées](http://www.Kellerfrance.com/technique/procèdes/colonnes ballastées)).



**Figure II . 13:** Finition([www.Keller-france.com/technique/procèdes/colonnes ballastées](http://www.Keller-france.com/technique/procèdes/colonnes ballastées)).

### ❖ **Avantage**

- ★ Une méthode polyvalente d'amélioration du sol qui peut être adaptée à une grande variété de conditions de sol et de fondations
- ★ Offre une solution économique pour le renforcement de sols
- ★ Peut être réalisé sur des profondeurs importantes
- ★ Exécution rapide permettant la réalisation des fondations immédiatement après
- ★ Le renforcement des sols permet la réalisation de fondations superficielles .

## **II.3. Méthodes hydromécaniques**

### **II.3.1.Accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux**

Les drains verticaux peuvent donc être utilisés dans beaucoup de cas pour accélérer le taux du tassement de la consolidation primaire à l'intérieur de la zone pré-chargée avec ou sans la surcharge ajoutée. Ce procédé est inefficace dans les sols tels que les argiles très organiques et les tourbes ou leur comportement de tassement est beaucoup plus dominé par la compression secondaire. Les drains verticaux permettent donc au drainage de s'effectuer horizontalement et verticalement (voir Figure II.14).



**Figure II .14 :** *ColbondDrain\_PVD-for-soil-consolidation\_copyrights-Low-Bonar\_Enka-Solutions-3*

Durant les années 1980, les drains verticaux sont constitués généralement de sable réalisés par différents procédés tels que le battage et le vibro-fonçage. A partir des années 1980, une nouvelle génération de drains qui sont les drains préfabriqués en forme de bande a fait son apparition. La part de ces drains a augmenté de façon très rapide.

### **II .4.Méthodes thermiques**

#### **II.4.1. Déshydratation**

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

#### **II.4.2.Congélation**

La congélation des terrains instables est un procédé ancien à caractère provisoire (voir figure II.15), employé pour le creusement des fouilles de puits ou de galeries. Cette technique rend le sol étanche et résistant provisoirement. Ce procédé est généralement développé pour les sols grenus mais il peut être appliqué aux argiles molles et aux limons. La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés

en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.



**Figure II.15 :** Travaux souterrain : la congélation des sols

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

### **II.5.Méthodes chimiques**

La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Aujourd'hui les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du Génie Civil à l'échelle mondiale.

Le recours massif à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts est due principalement aux facteurs suivants tels que la raréfaction des gisements naturels de matériaux nobles ; le souci écologique croissant imposant de préserver d'une part les ressources naturelles existantes et de limiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme. Les ajouts cimentaires et les produits chimiques les plus utilisés sont le ciment, la chaux, les cendres volantes, L'objectif principal du malaxage des ajouts

cimentaires avec le sol est l'amélioration de ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité.

Les différentes propriétés qui peuvent être améliorées sont la résistance, la plasticité, la compressibilité, la perméabilité, le potentiel de gonflement et le potentiel d'effondrement.

L'amélioration de ces propriétés s'effectue soit par l'augmentation de certaines d'entre elles telle que la résistance, soit par la réduction d'autres telles que la plasticité, la perméabilité et l'érosion. Un bon malaxage des ajouts cimentaires avec le sol à traiter est un facteur important affectant d'une façon significative la qualité des résultats .

### II.5.1. Utilisation du ciment

Le ciment Portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes et les revêtements de pistes d'aéroports. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment Portland comme stabilisants, le ciment Portland fournit en plus la chaux et la source de silice.

Lorsque le ciment Portland est mélangé à l'eau, l'initiation de l'hydratation occasionne une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol. À mesure que les ions de calcium sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile. La figure II.17 ci-dessous montre un chantier de traitement du sol au ciment stabiliser l'argile .La figureII.17 ci-dessous montre un chantier de traitement du sol au ciment



**Figure II.17 :** Traitement de sol au ciment aéroport de Liège

### II.5.2. Utilisation de la chaux

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente. Dans certains cas par exemple, un sol stabilisé à la chaux fournit une performance structurelle

équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou en concassé (Bell, 1978). L'utilisation de la chaux se fait par l'addition des produits calcaires calcinés de monoxyde de calcium (chaux vive,  $\text{CaO}$ ) ou d'hydroxyde de calcium (chaux hydratée,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

Généralement, la chaux vive est plus efficace que la chaux hydratée pour l'amélioration des sols. La chaux est plus efficace aux sols argileux que les sols granulaires. Par conséquent, les sols présentant des indices de plasticité au-delà de 10 sont les plus ciblés par ce procédé. La figure () ci-dessous montre un chantier de traitement d'un sol à la chaux [France ,2009].



**Figure II.18** : Chantier de traitement d'un sol à la chaux

De plus, la réussite de stabilisation à la chaux d'un sol nécessite d'une part une source de silice et/ou d'alumine et d'autre part des particules de petites dimensions susceptibles l'échange cationique ainsi que la durée de cure

### II .5.3. Utilisation des fibres de plastique

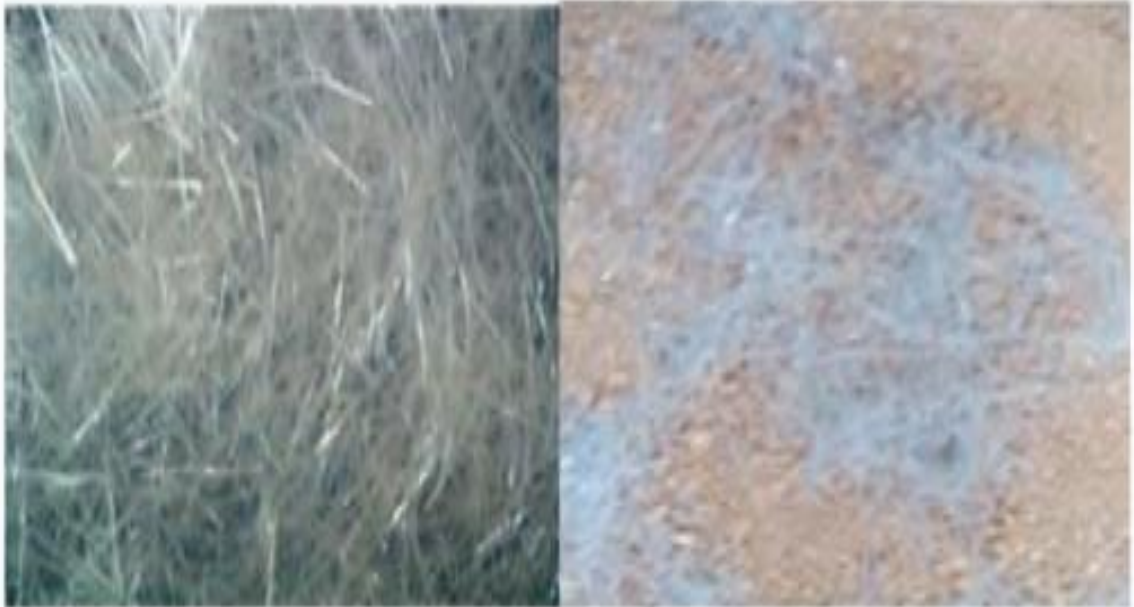
La bouteille plastique d'eau est la plus forte croissance de l'industrie des boissons dans le monde. Au cours de la dernière décennie 1,5 millions de tonnes de plastique sont utilisées pour la mise en bouteille de l'eau chaque année.

Les études montrent que 1500 bouteilles sont sous-évaluées comme déchets chaque seconde. D'autre part, le nombre de bouteilles recyclées ou retourné est très faible.

La fibre plastique est un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un semi-produit ou à un objet.

La matière de base (la résine) est un polymère. Les résines des matières plastiques sont issues de produits intermédiaires (éthylène, propylène, acétylène, benzène, etc.) dont les matières premières sont le pétrole.

Le type de ce matériel est en polyéthylène, les fibres plastiques sont coupées en morceaux formes 1mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur



**Figure II.19** : Fibre plastique

### **II. Conclusion**

Les différentes techniques pour l'amélioration des sols sont largement utilisées à travers le monde afin de prévenir les risques sismiques ou pour consolider des terrains à la structure hétérogène, inconstructibles en l'état: l'utilisation intensive de remblais sableux pour gagner des terrains sur la mer en est sans doute l'exemple le plus représentatif. Dans ce but, différentes techniques ont été développées et sans cesse améliorées depuis deux décennies.

Grâce à une large gamme de solutions disponibles pour le traitement des sols, qui sont sans cesse maintenues à la pointe de la technologie, en mesure d'apporter une solution globale de traitement pour chaque cas. Les nombreuses références acquises mettent en avant la pérennité et l'efficacité de ces solutions, s'agissant de délais et de qualité du traitement mis en oeuvre.

Ces choix doivent toujours être guidés par le souci constant de ne pas aggraver les désordres d'une autre structure qui présente déjà des insuffisances, ou de ne pas mettre en péril la bonne tenue des ouvrages voisins.

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente l'ensemble des essais réalisés pour l'identification du sol objet d'étude et déterminer ses propriétés physiques et mécanique. Ces essais géotechniques réalisés au laboratoire ont pu donner une classification du sol et une étude géotechnique du sol bien détaillé.

### III.2. Matériaux et matériels

Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 2 à 3m de la région de Collo wilaya de Skikda. Les prélèvements d'échantillons effectués par le biais d'une pelle mécanique. Après l'extraction, le sol a été placé dans des sachets en plastique et transporté au laboratoire pour préparation et exécution des essais géotechniques d'identification et de caractérisation. Sa classification a été déterminée suivant les normes.

L'ajout du traitement utilisé dans l'amélioration du sol est le déchet du marbre. Le marbre utilisé est provenu de Filfila Skikda.

### III.3. Les essais réalisés

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

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

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

- Essais in situ.
- Essais au laboratoire.

Dans cette étude les essais réalisés au laboratoire est :

- Essais d'identification du sol : permet de classer le sol et de calculer le divers paramètre donc il faut le reconnaître en prélevant des échantillons représentatifs.

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

- ❖ Granulométrie.
- ❖ Indice de plasticité (limites d'Atterberg).
- ❖ Compactage (Proctor normal).
- ❖ CBR
- ❖ Compression de confinement.
- Les essais du traitement par l'ajout du déchet de marbre est effectué avec des pourcentages raisonnables(6%, 8% et 10%).

Le déchet de marbre est pris avec une granulométrie différente. Le marbre utilisé pris du passant du tamis 0.4mm et 0.6mm avec les pourcentages cités au dessus.

Les essais du traitement dans le but d'améliorer quelques propriétés du sol sont:

- ❖ Indice de plasticité (limites d'Atterberg).
- ❖ Compactage (Proctor normal).
- ❖ Compression de confinement.

### III-4 : Essai Granulométrie : « NF P 94-056 »

#### ◆ Définition

La granulométrie c'est-à-dire la détermination de la grosseur des grains et les pourcentages pondéraux respectifs des différents familles des grains constituant les échantillons.

#### ◆ Objectif

L'analyse granulométrique consiste a déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 125 mm. On appelle :

- ❖ **Refus** sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis ;
- ❖ **Tamisât (ou passant)** : La quantité de matériau qui passe à travers le tamis.



Figure III.1: Série de tamis

### ❖ Principe de l'essai

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

#### ◆ Appareillage spécial pour l'analyse granulométrique

- balance ;
- tamis ;
- vibreur de tamis.

#### ◆ Préparation du sol

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

### ◆ Mode opératoire

- ✿ Tamiser par voie humide au tamis de 80  $\mu\text{m}$  ;
- ✿ Laisser reposer le mélange passant à 80 $\mu\text{m}$  jusqu'à obtenir l'eau claire ;
- ✿ Eliminer l'eau par siphonage et placer à l'étuve pour l'essai de sédimentométrie ;
- ✿ Finalement placé l'échantillon dans l'étuve à 105°C jusqu'à  $W=0$  ;
- ✿ Pour le refus à 80  $\mu\text{m}$  ;
- ✿ On sort le matériau que l'on verse sur les tamis disposés comme dans l'appareillage et on secoue à la main ou au vibreur de tamis, il y aura un passage selon le diamètre des tamis. On enlève chaque tamis et on pèse le refus, au fur et à mesure en faisant un cumul sur le tamis suivant.

### III.5. Limites d'Atterberg selon la norme NF p 94-051

#### ◆ Définition

Selon sa teneur en eau, un sol sensible à l'eau peut se présenter sous trois états :

- ✓ Etat solide .
- ✓ Etat plastique .
- ✓ Etat liquide.

Il s'agit de déterminer les teneurs en eau remarquables situées à la frontière entre ces différents états sont les « Limites d'Atterberg »

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles (Teneur en Eau pondérale) qui marque 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 deux limites sont utilisées afin de déterminer la classification des sols. Elle s'applique sur la fraction de sol passant à travers le tamis de 400  $\mu\text{m}$ .

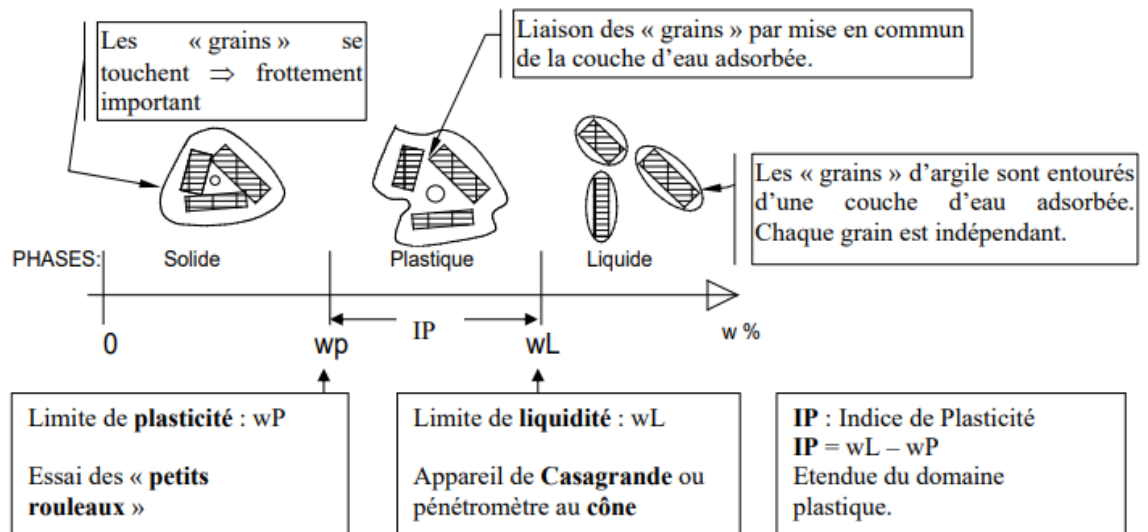


Figure III.2: Définition des Limites d'Atterberg.

- **Objectif**
- Classer les sols fins ( $< 80\mu\text{m}$ ) ;
- Identifier et caractériser l'argilosité du sol.

### III.5.1. Limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité)

- **Limite de liquidité  $W_L$**  : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.
- **Limite de plasticité  $W_p$**  : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.
- **Indice de plasticité  $I_P$**  : différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique :  $I_P = W_L - W_p$
- **L'indice de consistance :  $I_c = W_L - W / I_P$**

Il permet de caractériser la consistance d'un sol :

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

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

- **Principe de détermination des limites d'Atterberg**

L'essai s'effectue en deux phases :

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

### ➤ **Appareillage**

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

#### ◆ **Matériel pour la préparation du sol**

Un récipient d'eau moins 2L, un bac et un tamis à la maille carrée de 400 $\mu$ m d'ouverture

#### ◆ **Matériel pour la détermination la limite de liquidité**

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

#### ◆ **Matériel pour la détermination la limite de plasticité**

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



**Figure III. 3:** Boite de Cas grande au laboratoire.

### ◆ Préparation du sol

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

### ◆ Mode Opératoire

Détermination de la Limite de Liquidité à la coupelle

- Contrôler si le fonctionnement de l'appareil est bien.
- Malaxer la totalité du tamisât afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide.
- Mettre dans une coupelle propre et sèche, une masse du sol malaxé avec l'eau.
- Partager la pâte en deux au moyen de l'outil à rainurer.
- Fixer délicatement sur le support métallique de l'appareil de CASAGRANDE.
- Actionner la came de façon à soumettre la coupelle à une série de choc à la cadence de 2 coups/s.
- Noter le nombre N des chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1cm.
- Prélever environ de 5g de pâte de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées afin d'en déterminer la teneur en eau. On note poids total humide.
- Placer le prélèvement dans une capsule de masse connue et pesé immédiatement avant d'être introduit dans l'étuve pour dessiccations. On note poids total sec.
- Effectuer au moins 4 fois la même opération complète sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente à chaque fois. On note teneur en eau.

Détermination de la Limite de Plasticité au rouleau :

- Former une boulette à partir de la pâte préparée.
- Rouler la boulette sur une plaque lisse à la main ou éventuellement à l'aide d'une plaquette, de façon à obtenir un rouleau qui aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne un diamètre de 3 mm et une longueur d'environ 10 cm et ne doit être creux.
- La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteigne  $3 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$ .

Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau réintégré à la boulette et reformer à nouveau.

- Prélever, une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau, et placer la dans une capsule de masse connue, la peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau.
- Effectuer un deuxième essai sur une nouvelle boulette.



Figure III.4 : Détermination de la Limite de Liquidité au laboratoire.

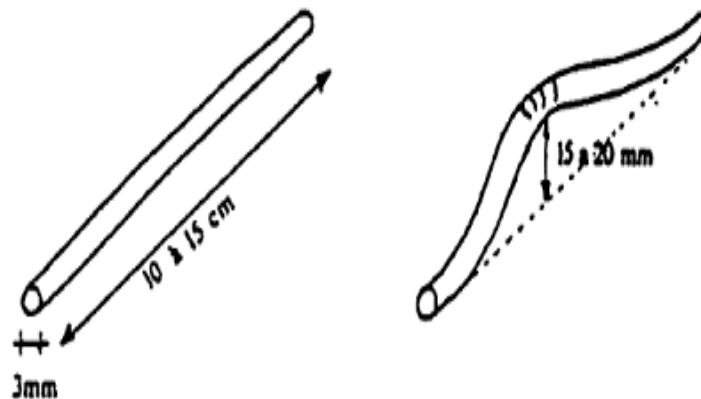


Figure III.5 : Détermination de la Limite de plasticité au laboratoire.

**Tableau III.1** : Classification des sols en fonction de la limite de liquidité et de l'indice de plasticité.

| <b>Limite de liquidité <math>W_L</math> (%)</b> | <b>Classification</b> |
|---|-----------------------|
| 0-20  | Non gonflant          |
| 20-35   | Gonflement faible     |
| 35-50   | Gonflement moyen      |
| 50-70   | Gonflement élevé      |
| 70-90   | Gonflement très élevé |
| >90   | Gonflement critique   |

| <b><math>I_p</math> (%)</b>     | <b>Classification</b> |
|---------------------------------|-----------------------|
| <b>0-5</b>                      | Non plastique         |
| <b>5-15</b>                     | peu plastique         |
| <b>15-40</b>                    | Plastique             |
| <b><math>I_p &gt; 40</math></b> | Très plastique        |

### III. 6. Compactage : Proctor normal-Proctor modifié (NF94-093)

#### ➤ Définition

Le compactage est une réduction pratiquement instantanée du volume du sol dû à la réduction des vides d'air. Il ne y'a aucune expulsion d'eau ce qui différencie le compactage de la consolidation.

L'étude du compactage s'effectue à l'aide d'un damage normalisé connu sous le nom de l'essai Proctor .



**Figure III.6 :** Essai de Proctor.

➤ **Objectif de l'essai**

Le compactage a pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée :

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

Le choix de l'intensité de compactage est fait en fonction de la surcharge que va subir l'ouvrage au cours de sa durée de vie. L'essai Proctor s'effectue généralement pour deux compactages d'intensités différentes :

- ❖ Essai Proctor normal : Résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ou peu chargé.
- ❖ Essai Proctor modifié : Forte résistance souhaitée, du type chaussée autoroutière.

**Tableau III.2 :** La différence entre Proctor normal et modifié.

| Type    | Nb total de coups | Hauteur de chute (cm) | Masse de la dame (kg) | Diamètre Du module (cm) | Hauteur de module (cm) | Energie KN.m/m <sup>3</sup> |
|---------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|
| normal  | 75                | 30,5                  | 2,490                 | 10,15                   | 11,65                  | 593                         |
| modifié | 280               | 45,7                  | 4,535                 | 15,20                   | 11,60                  | 2700                        |

### ➤ **Corrélation entre identification d'un sol et caractéristiques Proctor**

- Les argiles présentent une courbe Proctor très pointue avec un  $\gamma_d$  opm assez bas (<1,5) et un W assez haut (>20%). Ce sont donc des matériaux difficilement compactables puisqu'il faut les travailler dans un intervalle de teneur en eau étroit (puisque courbe Proctor pointue) et présentant même compactés de médiocres caractéristiques mécanique du fait de leur faible densité.
- Les sables propre à granulométrie serrés présentent une courbe Proctor aplatie. Cette forme de courbe signifie, au contraire d'une interprétation répandue, que le compactage est pratiquement impossible (du moins par des méthodes reliées au mode opératoire Proctor) et donc ne dépend pas de la teneur en eau.
- Les sols graveleux-sablo-argileux intermédiaires entre les précédent sont les meilleurs. l'intervalle de teneur en eau pour lequel on peut obtenir 95% de la densité sèche OPM est de l'ordre de 4 points, les valeurs habituelles des limites étant 7% et 15%. La densité sèche optimum d'un sol utilisé en courbe de chaussée est le plus souvent voisine de 1,9.

### ➤ **Le principe de ces essais**

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

### ➤ **Matériel Nécessaire**

Moule Proctor normal,

Dame Proctor normal,

Règle à araser,

Disque d'espacement,

Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau,

Tamis 5 mm,

Truelle,

Spatule ;

pinceau,

Burette à huile,

Eprouvette graduée 150 ml environ,

Petits récipients (mesures des teneurs en eau),

Balance portée 20 kg

Etuve 105°C.

### ➤ **Mode Opératoire**

- Préparer le mélange du sol : Le matériau doit être mis dans l'étuve jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai. une certaine quantité d'eau
- est malaxé avec le matériau ; on mélange doucement avec une pelle, après le mélange, le matériau est conservé dans une boîte ou un sac hermétique au moins de 24 heures pour être homogénéifié, le mélange du matériau constitue la phase la plus délicate de cet essai
- Solidariser le moule, l'embase et la rehausse : Cette étape est principalement pour protéger qu'il n'y a pas de décalage entre le corps, l'embase et la rehausse du moule pendant le compactage.
- Lubrifier la paroi du moule : La paroi du moule doit être lubrifiée à huile, la pour que l'on puisse retirer l'échantillon compacté plus facilement.
- Compactage : Introduire alors la quantité de matériau pour que la première couche après compactage soit légèrement plus haute que le tiers de la hauteur du moule, compacter cette couche avec la dame Proctor normal en appliquant respectivement 25 coups par couche comme la figure ().
- Répéter l'opération autant de fois pour la deuxième et la troisième couche.
- Araser et retirer l'échantillon : Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur de 1 ou 2 centimètres en pratique, cet excédent est arasé

soigneusement au niveau du moule en opérant radicalement du centre vers la périphérie du moule, ensuite, on retire l'échantillon.

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

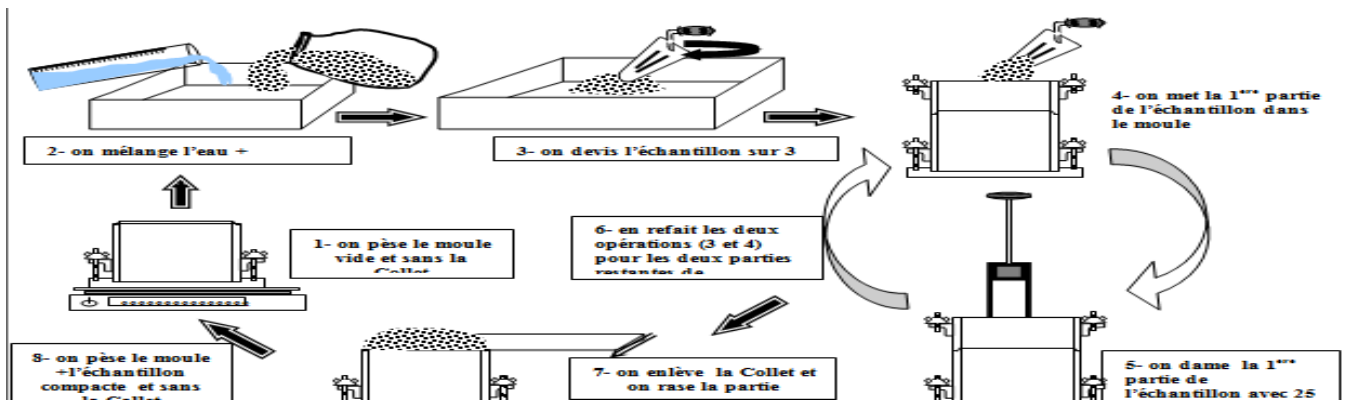


Figure III.7 : Schéma essai de Proctor.



Figure III.8 : Appareillage essai de Proctor.

### III.7.. Essai de compression uni axiale «NF P 949»

#### ➤ Définition

Le présent document s'applique à l'essai de compression uni axiale pratiquée sur des éprouvettes de sol de classe I, de forme cylindrique et de section circulaire ou carré orthogonale à l'axe.

#### ➤ Principe

L'essai s'effectue sur une éprouvette placée entre les deux plateaux parallèle d'une presse, l'axe de l'éprouvette cylindrique est orthogonal aux plateaux. L'essai consiste à mesurer la force axiale appliquée à l'éprouvette.

#### ➤ Appareillage

L'appareille nécessaire à la réalisation de l'essai comprend les matérielle et dispositifs suivants :

- Matériel de préparation et de découpage de l'éprouvette :

Carottier pour prélèvement d'éprouvette conforme à la norme XP P202 . 49

Petit matériel pour scier et découper les éprouvettes Gabarit de découpage des éprouvettes.

Le dispositif de chargement permettant d'imposer un déplacement à vitesse constante de deux plateaux horizontaux rigides de dimensions supérieurs ou égales à la dimension transversale des éprouvettes.

- Matériel de mesure :
  - Capteur permettant de la mesure de la force avec une incertitude 2/100.
  - Dispositifs de mesure de l'écartement des plateaux.
  - Chronomètre ou équivalent donnant la seconde.
  - Pied à coulisse 1/50 de millimètre.
  - Balance de portées minimal et maximale avec les masses à peser et telle que les pesées soient effectuées avec une incertitude 1 /1000 de la valeur mesurée.
  - Enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable 50° c et à 150°c de classe d'exactitude comme défini dans l'annexe A la norme NF X 150



Figure III.9 : la machine de Compression

### ➤ **Mode opératoire**

Préparation des éprouvettes :

Tailler, dans l'échantillon de matériaux, des éprouvette cylindriques de section transversale circulaire ou carrée orthogonale à l'élanement  $H/D$  entre 1.9 et 2.2 conformément à la norme XP P202. 49 Soit par carottage.

Soit par découpage ou fonçage.

La plus petite dimension transversale  $D$  de l'éprouvette doit être supérieur ou égale à 35 mm

La dimension transversale  $D$  de chaque éprouvette est déterminée au pied à coulisse selon deux directions perpendiculaires à mi-hauteur et aux deux extrémités de l'éprouvette.

Placer l'éprouvette sur la gabarit et rectifier les extrémités afin que leurs surfaces soient placées parallèles entre elles et orthogonale à l'axe longitudinale de l'éprouvette.

Mesure la hauteur initiale  $H$  de chaque éprouvette selon deux plans axiaux orthogonaux.

$H$  et  $D$  sont les moyennes arithmétiques de la valeur mesurée.

Peser chaque éprouvette  $m_h$ .

Procédé immédiatement à l'écrasement de chaque éprouvette. L'écrasement est réalisé pour 1 jour.

### **III.8. Essai C.B.R (California Bearing Ratio) «NF P 94-078»**

#### ➤ **But de l'essai**

D'évaluer la portance du sol en estimant sa résistance au poinçonnement, afin de pouvoir dimensionner la chaussée et orienter les travaux de terrassement, et détermination de l'indice.

#### ➤ **Définition**

L'indice CBR ( ) exprime en % le rapport entre les pressions produit dans le même temps

un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part et dans un matériau type d'autre part

(Grave concassée).

#### ➤ **Principe de l'essai**

L'indice CBR est déterminé pour des sols à vocation routière de manière purement empirique.

Après avoir compacté le matériau dans les conditions de l'essai Proctor modifié, on lui applique les conditions hydriques prévues :

- Immersion pendant 4 jours dans l'eau
- Immersion pendant 2 jours dans l'eau
- Pas d'immersion : essai immédiat.

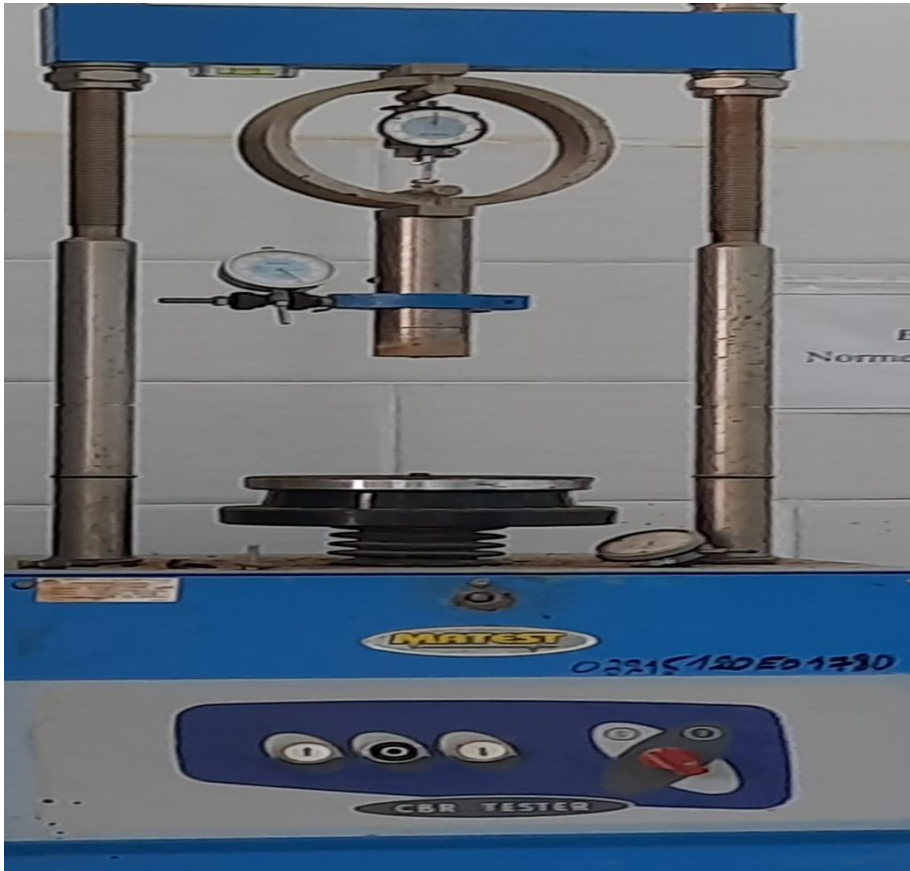
Le matériau à étudier étant placé dans un moule dans un état donné de densité et de teneur en eau, on applique ensuite une charge voisine de ce que sera la charge de service, puis on le poinçonne par un piston tout en mesurant les efforts et déplacements résultant.

**Tableau III.3:** Classification des sols en fonction de l'indice de CBR

| <b>I CBR</b>  | <b>Portance du sol</b> |
|---------------|------------------------|
| <b>&lt;3</b>  | <b>Mauvaise</b>        |
| <b>3 à 8</b>  | <b>Médiocre</b>        |
| <b>8 à 30</b> | <b>Bonne</b>           |
| <b>&gt;30</b> | <b>Très bonne</b>      |



**Figure III.10** : Essai CBR Immersion pendant 4 jours dans l'eau au laboratoire



**Figure III.11** :Appareil de CBR

### **III.9.Conclusion**

L'étude géotechnique est une étude très important, soit cette étude au laboratoire, soit in-situ.

Elle permet de définir l'ensemble des caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des terrains en place. Son but est de donner les éléments nécessaires pour les études de tous travaux de génie Civil.

### IV.1 :Introduction

Dans ce chapitre, on procédera, d'une part, à l'identification du sol utilisé dans les travaux expérimentaux en examinant les propriétés physiques et mécaniques du sol naturel et du sol traité , à savoir les paramètres de compactage, l'indice de portance immédiat, la plasticité, et la résistance à la compression simple.

### IV.2. Résultats et interprétation

#### IV.2.1. Sol non Traité

##### ❖ Essai Analyse Granulométrie

La courbe d'analyse granulométrie du sols non Traité est présentée sur la figure IV.1.

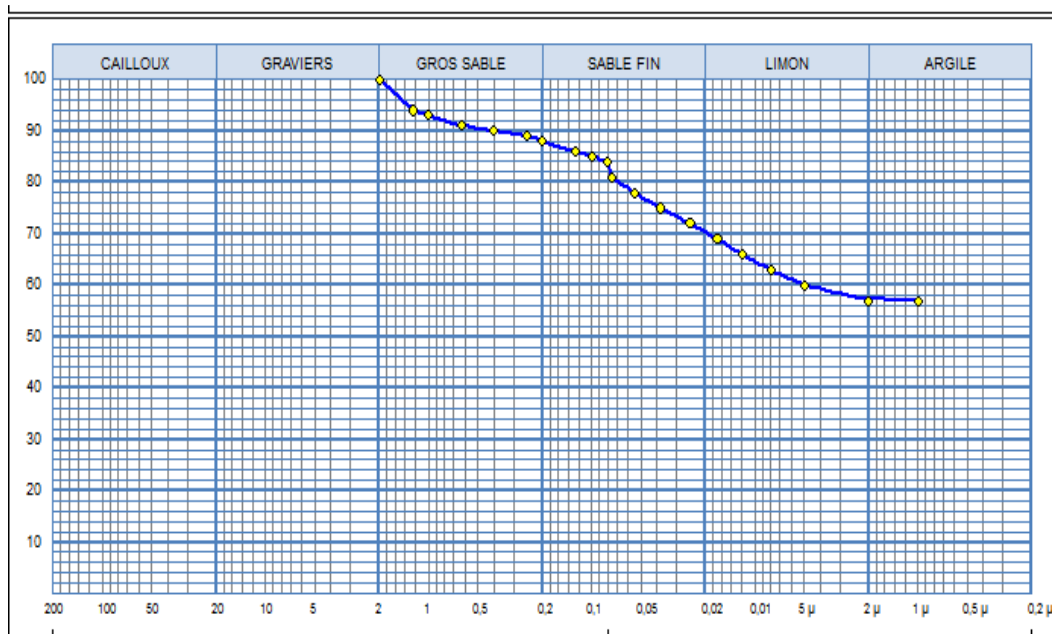


Figure IV.1: Résultats de l'essai d'analyse granulométrique

D'après le résultats le constitue de :

- 30% de sable
- 12% de limon
- 58% de d argile

##### ❖ Essai Limites d'Atterberg

Les Résultats de l'essai Limites d'Atterberg sont définies par la limite de liquidité, limite de plasticité et l'indice de plasticité.

##### ● Limite de Liquidité

Tableaux IV-1 : les résultats de la limite de liquidité

|                        | Essai 1 |        | Essai 2 |        | Essai 3 |        | Essai 4 |        |
|------------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| Nombre de coups        | 16      |        | 21      |        | 26      |        | 31      |        |
| N° de la tare          | B20     | 89     | E44     | 120    | A86     | F61    | A5      | E7     |
| Poids total humide (g) | 31.85   | 30.47  | 26.28   | 26.450 | 25.672  | 27.178 | 30.137  | 27.996 |
| Poids total sec (g)    | 23.140  | 22.360 | 19.870  | 20.050 | 19.680  | 20.660 | 22.690  | 21.080 |
| Poids de la tare (g)   | 8.920   | 9.090  | 9.270   | 9.480  | 9.640   | 9.750  | 10.020  | 9.280  |
| Poids de l'eau (g)     | 8.710   | 8.115  | 6.411   | 6.400  | 5.992   | 6.518  | 7.447   | 6.916  |
| Poids du sol sec (g)   | 14.220  | 13.270 | 10.600  | 10.570 | 10.040  | 10.910 | 12.670  | 11.800 |
| Teneur en eau (%)      | 61.25   | 61.15  | 60.48   | 60.55  | 59.68   | 59.74  | 58.78   | 58.61  |
| Moyenne                | 61.20   |        | 60.52   |        | 59.71   |        | 58.70   |        |

Détermination de la limite de liquidité

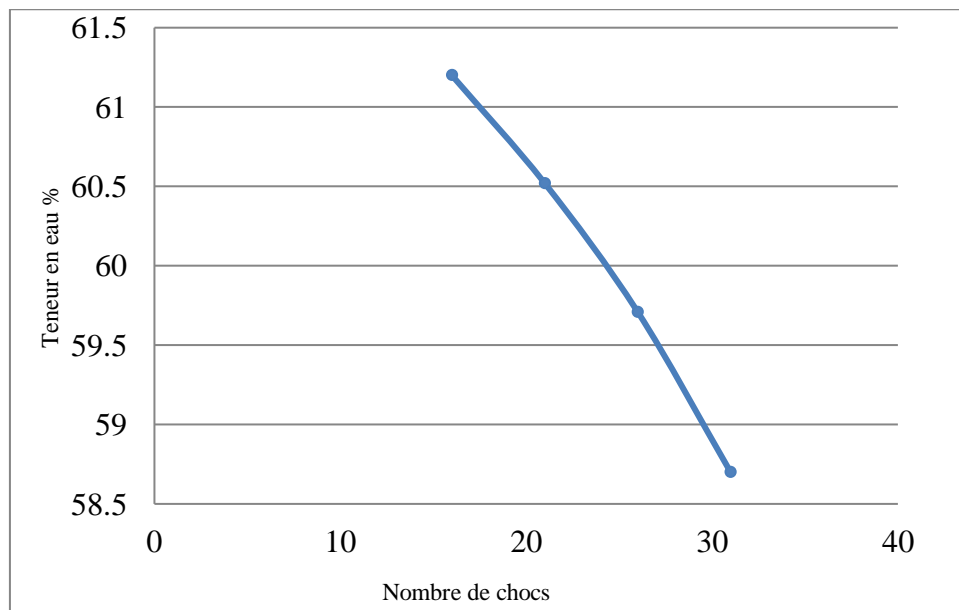


Figure IV.2 : la courbe de la limite de liquidité



**Figure IV.3** : Appareil de la limite d'Atterberg

La limite de liquidité moyenne  $W_L=60.3\%$

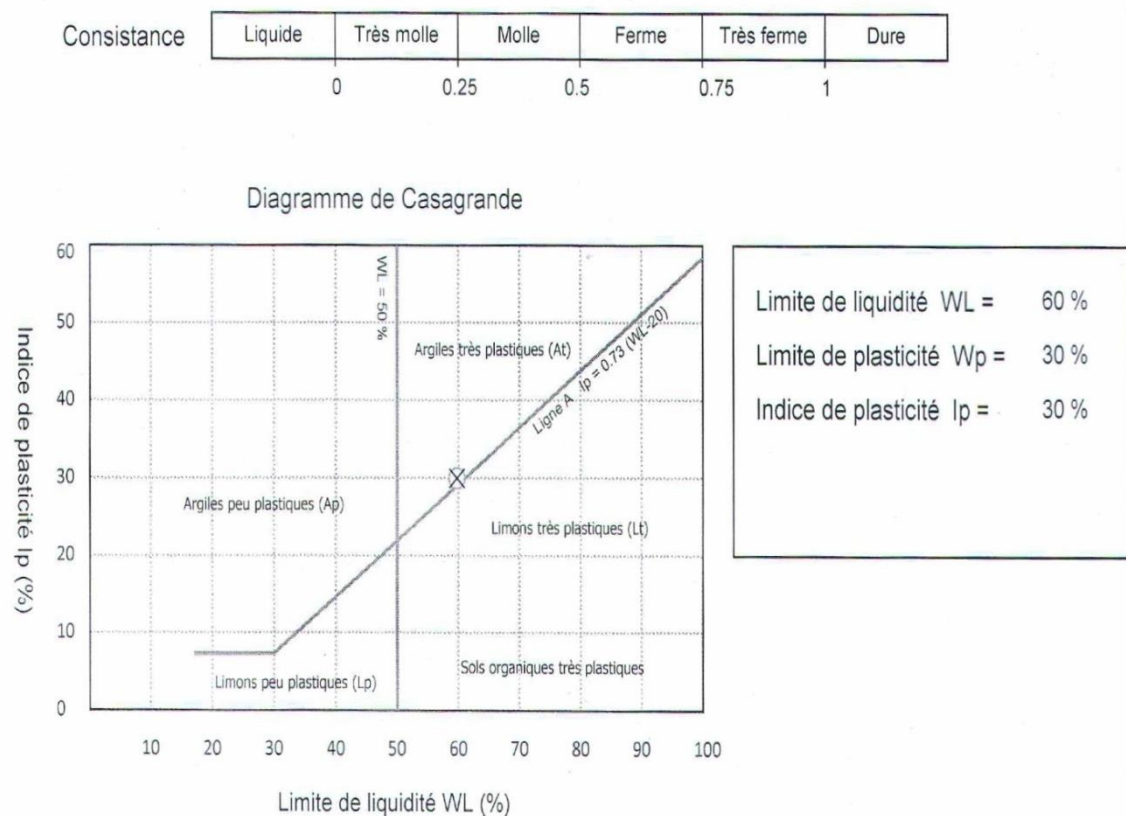
● **Limite de Plasticité ( $W_P$ )**

Les résultats de l'essai de plasticité sont présentes sur le tableau IV.2

**Tableaux IV. 2 : Résultats de la limite de plasticité**

|                             | Essai 1      |        | Essai 2 |
|-----------------------------|--------------|--------|---------|
| <b>Poids total humide g</b> | 15.320       | 14.667 | 15.349  |
| <b>Poids Total sec</b>      | 14.150       | 13.550 | 13.96   |
| <b>Poids de la tere</b>     | 10.25        | 9.770  | 9.350   |
| <b>Poids de l eau</b>       | 1.70         | 1.117  | 1.389   |
| <b>Poids du sol sec</b>     | 3.900        | 3.780  | 4.610   |
| <b>Teneur en eau</b>        | 30.01        | 29.55  | 30.14   |
| <b>Moyenne</b>              | <b>29.90</b> |        |         |

La limite de plasticité  $W_P =29,90 \%$



Les propriétés de plasticité du sol naturel sont:  **$WL = 60.03 \%$ ,  $WP = 29.90 \%$ ,**

**$IP = 30.13\%$**

**D'après la classification des sols,  $WI = (50-70)$  Gonflement élevé**

**$IP = (15-30)$  Sols plastique**

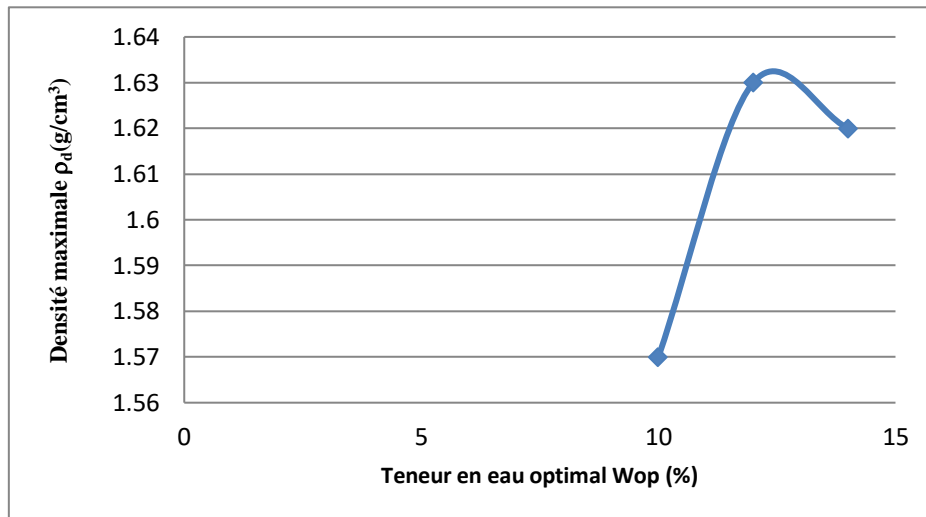
### ❖ Essai de Compactage

Les paramètres du compactage Proctor normal du sol naturel sont donnés sur le tableau IV.3

**Tableau IV.3:** Les résultats des paramètres de l'essai Proctor

| Essai | La teneur en eau<br>$W\%$ | La densité sèche<br>$\rho_d(g/cm^3)$ |
|-------|---------------------------|--------------------------------------|
| 1     | 10                        | 1,57                                 |
| 2     | 12                        | 1,63                                 |
| 3     | 14                        | 1,62                                 |

La figure IV.4 ci dessous présente la courbe de compactage Proctor du sol naturel



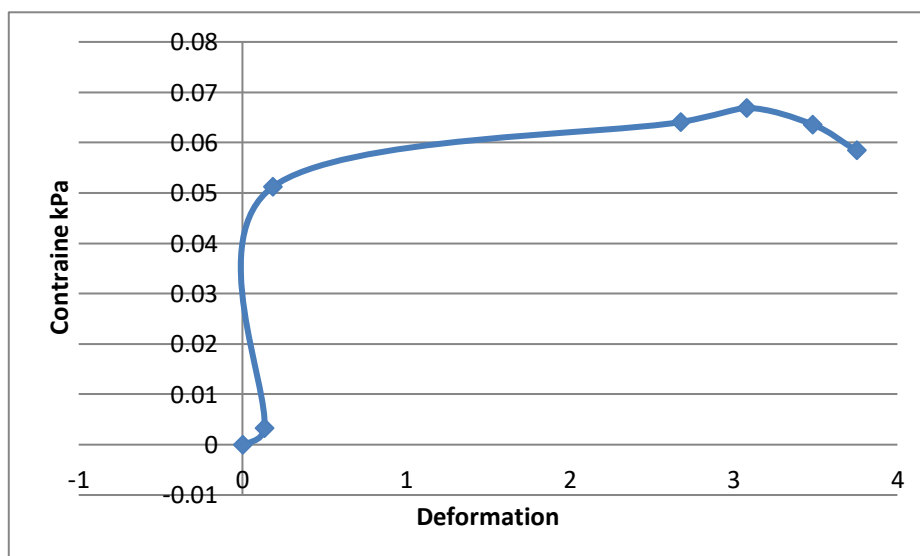
**Figure IV.4** : La courbe de compactage du sol naturel

### ❖ Essai de Compression

Les résultats de l'essai de compression simple uni-axial sont donnés sur le tableau IV.4.

**Tableaux IV.4**: Les résultats de paramètre de l'essai de compression

|                  |   |        |        |        |        |        |        |
|------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Contrainte (kPa) | 0 | 0.0032 | 0.0512 | 0.0641 | 0.0669 | 0.0636 | 0.0584 |
| Déformation      | 0 | 0.1339 | 0.185  | 2.678  | 3.080  | 3.482  | 3.75   |



**Figure IV.5**: la courbe de l'essai de Compression

❖ **Essai C.B.R (California Bearing Ratio)**

Les Résultats de l'Essai CBR après Immersion 4 jours donnés sur le tableau IV.5

**Tableaux IV.5** : Résultats de L'essai de CBR

| GONFLEMENT                        |   |                      |      |          |      |            |
|-----------------------------------|---|----------------------|------|----------|------|------------|
| Date de mise en immersion         |   | Durée de l'immersion |      |          |      |            |
| Temps                             | 0 | 24                   | 48   | 72       | 96   | H=12.4     |
| Lecture du comparateur en 1/100mn | 0 | 2600                 | 3400 | 470<br>0 | 5400 | DH :5.4    |
| Valeur de l'origine               | 0 | 2600                 | 800  | 130<br>0 | 700  | G=100 Dh/h |

|                                   |   |      |      |      |      |      |       |
|-----------------------------------|---|------|------|------|------|------|-------|
| Enfoncement (mm)                  | 0 | 1.25 | 2.00 | 2.5  | 5.00 | 7.5  | 10.00 |
| Forces                            | 0 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03  |
| Forces normalisées                | 0 | 0.44 | 0.44 | 0.44 | 0.44 | 0.67 | 0.67  |
| Indice de portant Immédiat (100%) |   |      |      | 3.29 | 2.20 |      |       |

Indice de CBR =3.29 Sols fable

**IV. 2.2. Sols Traité**

❖ **Essai de compactage**

■ **Effet du traitement sur le compactage**

➤ **Marbre de granulométrie (passant du tamis) 0.6mm**

✓ **Traitement avec 6 % a matériaux recycle (Marbre +Tamis 0,6 )**

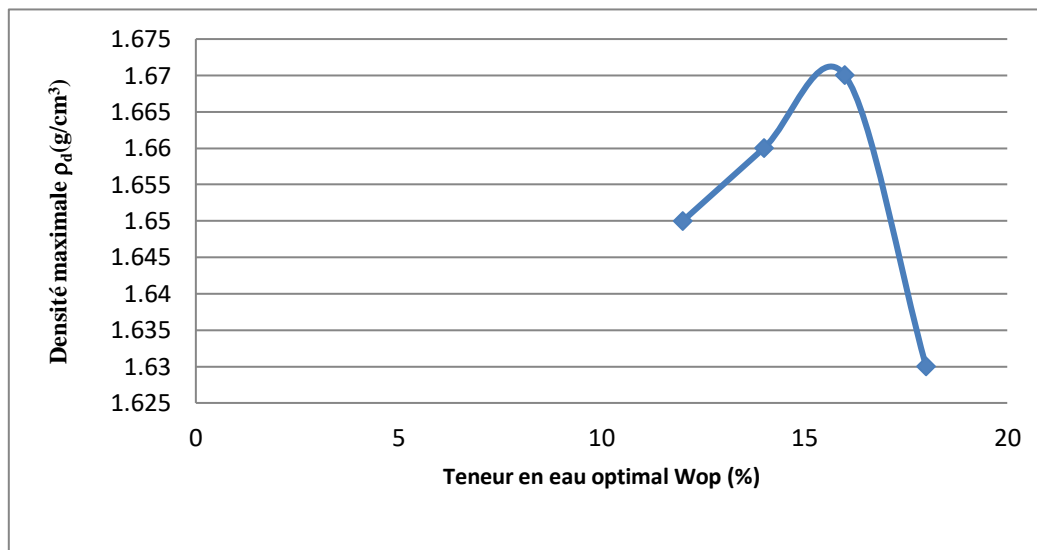
Les paramètres de compactage du sol traité par 6% de marbre passant de tamis 0.6mm sont donnés sur le tableau IV.6

**Tableau IV.6:** les paramètres de l'essai Proctor 6% de marbre passant de tamis 0.6mm

| Essais | W% | $\rho_d(g/m^3)$ |
|--------|----|-----------------|
| 1      | 12 | 1,65            |
| 2      | 14 | 1,66            |
| 3      | 16 | 1,67            |
| 4      | 18 | 1,63            |

La figure IV.6 Ci dessous présente la courbe de

compactage Proctor du sol traité par 6% de marbre de granulométrie 0.6mm



**FigureIV.6 :**La courbe de compactage avec 6%de marbre passant de tamis 0.6

D'après les résultats obtenus, la densité sèche maximale est augmentée jusqu'à la valeur de 1.67 g/cm<sup>3</sup> la teneur en eau optimal est augmentée jusqu'à la valeur de 16%

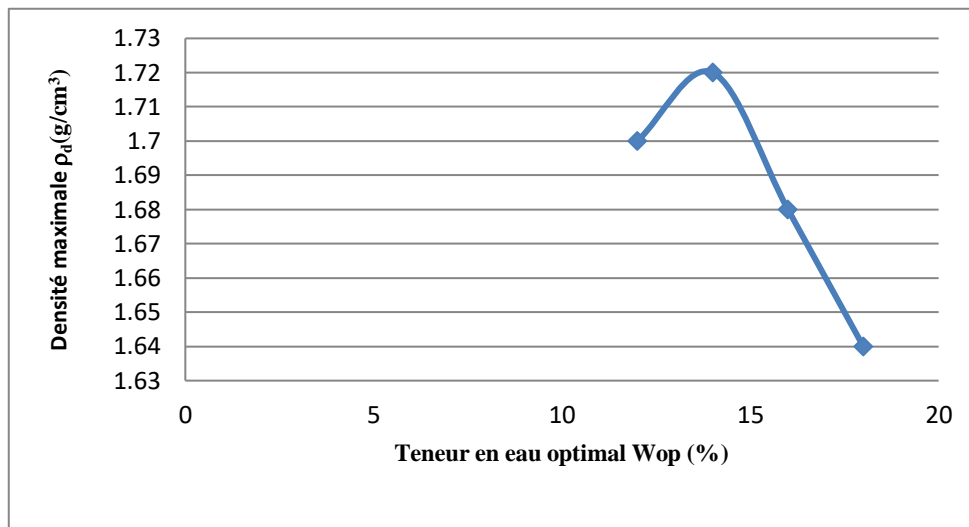
✓ **Traitement avec 8% de matériaux recycle (Marbre + Tamis 0.6)**

Les paramètres de compactage du sol traité par 8% de marbre passant de tamis 0.6mm sont donnés sur le tableau IV.7

**Tableau IV. 7:** les Résultats de l'essai Proctor avec 8% de marbre passant de tamis 0.6mm

| Essais | W% | $\rho_d(g/cm^3)$ |
|--------|----|------------------|
| 1      | 12 | 1,70             |
| 2      | 14 | 1,72             |
| 3      | 16 | 1,68             |
| 4      | 18 | 1,64             |

La figure IV.7 Ci dessous présente la courbe de compactage Proctor du sol traité par 8% de marbre de granulométrie 0.6mm



**Figure IV.7:** la courbe de compactage 8% de marbre passant du tamis 0.6mm

D'après les résultats obtenus, la densité sèche maximale est augmentée jusqu'à la valeur de 1.72 g/cm<sup>3</sup> la teneur en eau optimal est augmentée jusqu'à la valeur de 14%

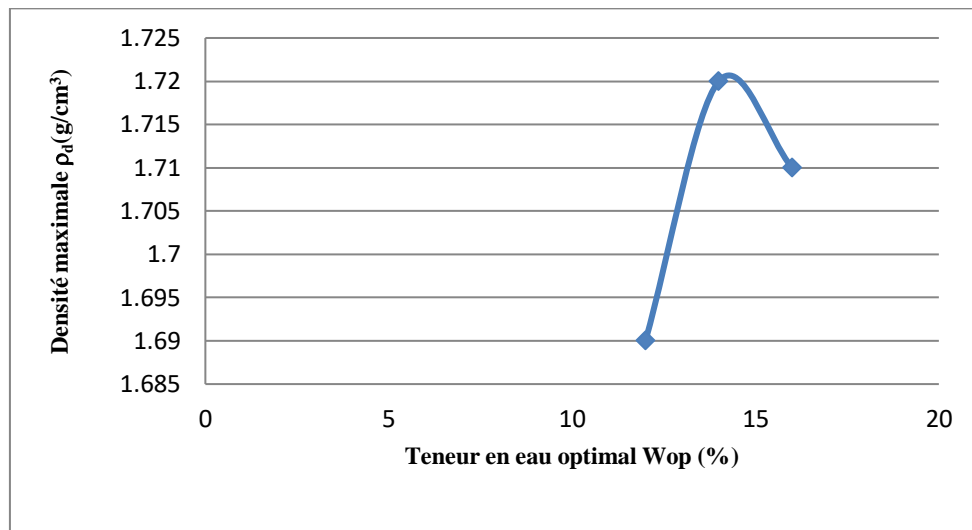
### ✓ **Traitement avec 10% matériaux recycle (Marbre + Tamis 0.6)**

Les paramètres de compactage du sol traité par 10% de marbre passant de tamis 0.6mm sont donnés sur le tableau IV.8

**Tableau IV.8 :** les Résultats de l'essai Proctor avec 10% de marbre passant de tamis 0.6mm

| Essais | W% | ρ <sub>d</sub> (g/m <sup>3</sup> ) |
|--------|----|------------------------------------|
| 1      | 12 | 1,69                               |
| 2      | 14 | 1,72                               |
| 3      | 16 | 1,71                               |

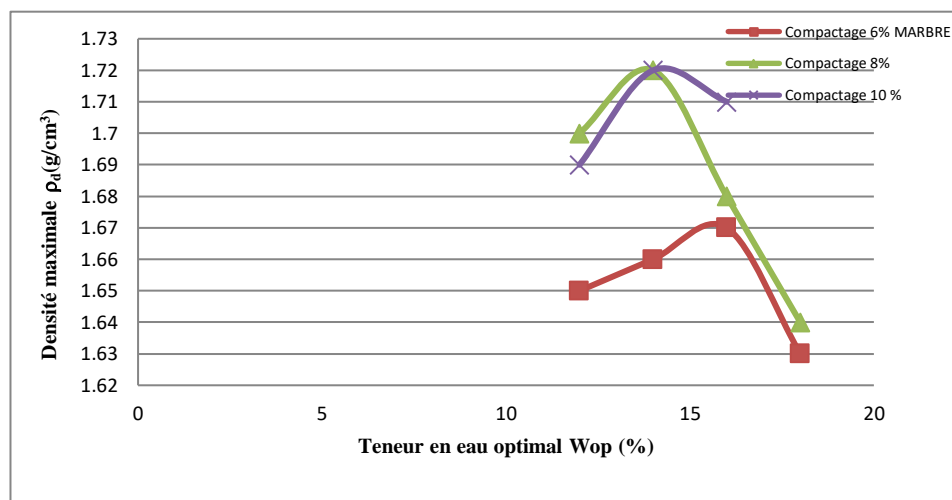
La figure IV.8 Ci dessous présente la courbe de compactage Proctor du sol traité par 10% de marbre de granulométrie 0.6mm



**Figure IV.8:** la courbe de compactage avec 10% de marbre passant du tamis 0.6mm

les résultats obtenus montrent que, la densité sèche maximale est augmentée jusqu'à la valeur de 1.72 g/cm<sup>3</sup> la teneur en eau optimale atteint la valeur de 14%

Les courbes de compactage des différents pourcentages du marbre de granulométrie 0.6mm sont illustrées dans la figure IV.9.



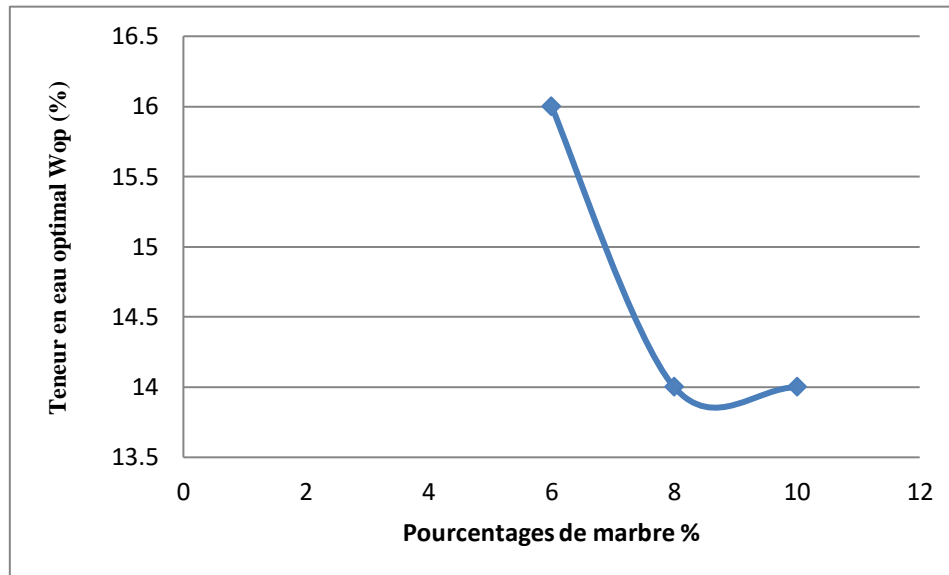
**Figure IV.9 :** Les Courbes de Proctor avec différents pourcentages de marbre passant du tamis 0,6mm

Les valeurs des paramètres de compactages des différents pourcentages de marbre passant du tamis 0.6mm sont données sur le tableau IV.9.

**Tableau IV.9 :** Le Tableau montre le rapport en marbre et  $\rho_d$  optimal et W Optimum

|                               | 0%   | 6%   | 8%   | 10%  |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.63 | 1,67 | 1,72 | 1,72 |
| Wop %                         | 12   | 16   | 14   | 14   |

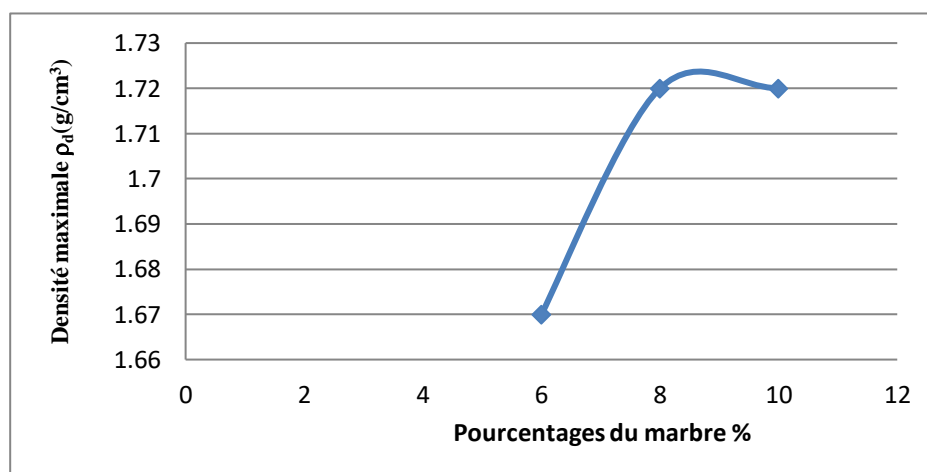
La variation de la teneur en eau optimal de compactage en fonction des différents pourcentages de marbre de granulométrie 0.6mm est présentée sur la figure IV.10.



**Figure IV.10 :** Variation de la teneur en eau W Optimum avec la variation des pourcentages de marbre de granulométrie 0.6mm

La teneur en eau optimal est augmentée à cause de l'absorption du marbre de l'eau.

La variation de la densité sèche maximale en fonction des pourcentages de marbre de granulométrie 0.6mm est présentée sur la figure IV.11.



**Figure IV.11:** La variation de la densité sèche max en fonction des pourcentages du marbre de granulométrie 0.6mm

La densité sèche maximale du compactage augmente avec l'augmentation du pourcentage du marbre pour atteindre la valeur de 1.72 g/cm<sup>3</sup>.

➤ **Marbre de granulométrie (passant du tamis) 0.4mm**

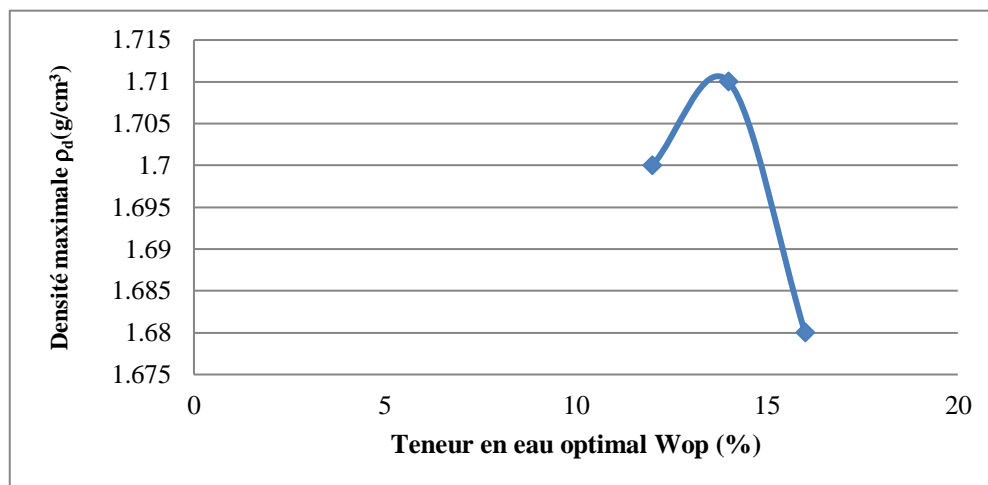
✓ **Traitement des sols avec 6 % a matériaux recycle (Marbre +Tamis 0,4 )**

Les paramètres de compactage du sol traité par 6% de marbre passant de tamis 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.10

**Tableau IV.10:** les paramètres de l'essai Proctor 6% de marbre passant de tamis 0.4mm

| Essais | W% | $\rho_d(g/cm^3)$ |
|--------|----|------------------|
| 1      | 12 | 1.70             |
| 2      | 14 | 1.71             |
| 3      | 16 | 1.68             |

La figure IV.12 Ci dessous présente la courbe de compactage Proctor du sol traité par 6% de marbre de granulométrie 0.4mm



**Figure IV.12 : La Courbe de compactage avec 6% de marbre passant de tamis 0.4mm**

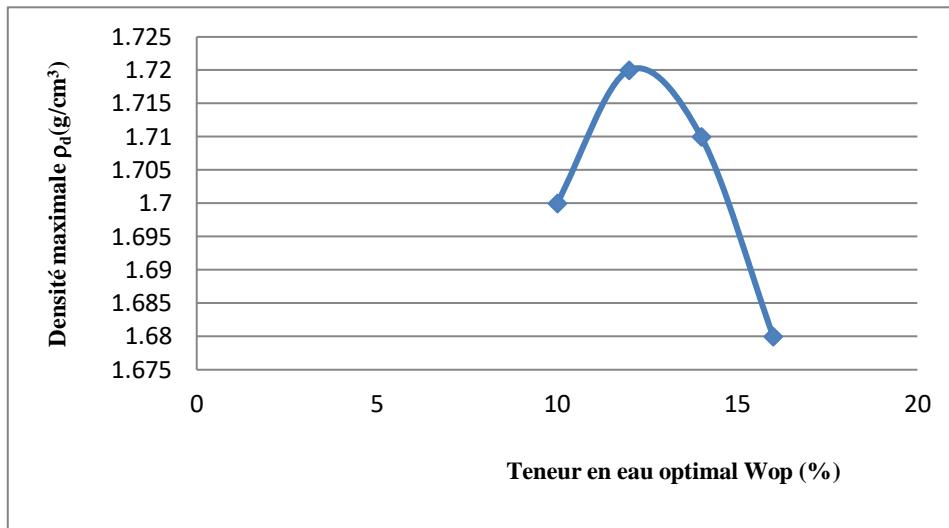
✓ **Traitement du sols avec 8 % à matériaux recycle (Marbre Tamis0,4 )**

Les paramètres de compactage du sol traité par 8% de marbre passant de tamis 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.11

**Tableau IV.11:** les paramètres de l'essai Proctor 6% de marbre passant de tamis 0.4mm

| Essais | W% | $\rho_d(g/cm^3)$ |
|--------|----|------------------|
| 1      | 10 | 1.70             |
| 2      | 12 | 1.72             |
| 3      | 14 | 1.71             |
| 4      | 16 | 1.68             |

La figure IV.13 Ci dessous présente la courbe de compactage Proctor du sol traité par 8% de marbre de granulométrie 0.4mm



**Figure IV.13 :** La Courbe de compactage avec 8% de marbre passant du tamis 0.4mm

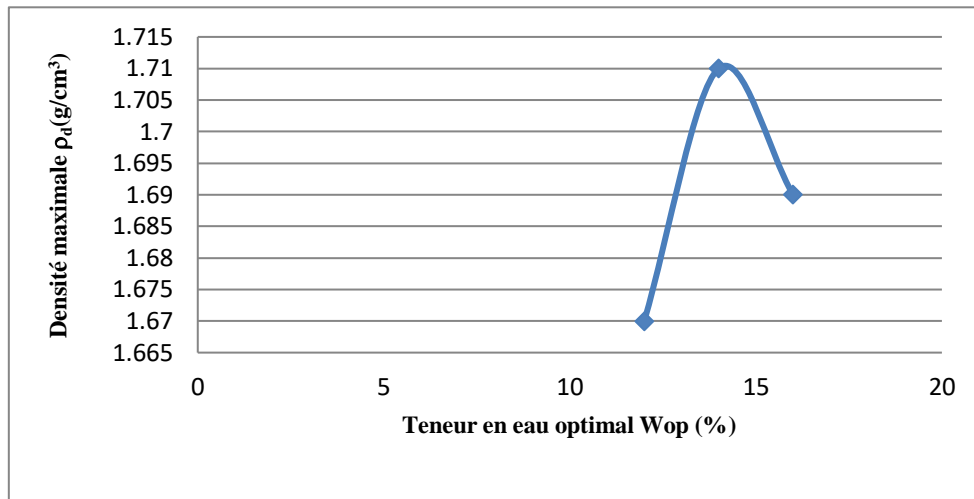
✓ **Traitement avec 10% matériaux recycle (Marbre + Tamis 0.4)**

Les paramètres de compactage du sol traité par 10% de marbre passant de tamis 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.12

**Tableau IV.12:** les paramètres de l'essai Proctor avec 10% de marbre passant de tamis 0.4mm

| Essai | W% | $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-------|----|-------------------------------|
| 1     | 12 | 1.67                          |
| 2     | 14 | 1.71                          |
| 3     | 16 | 1.69                          |

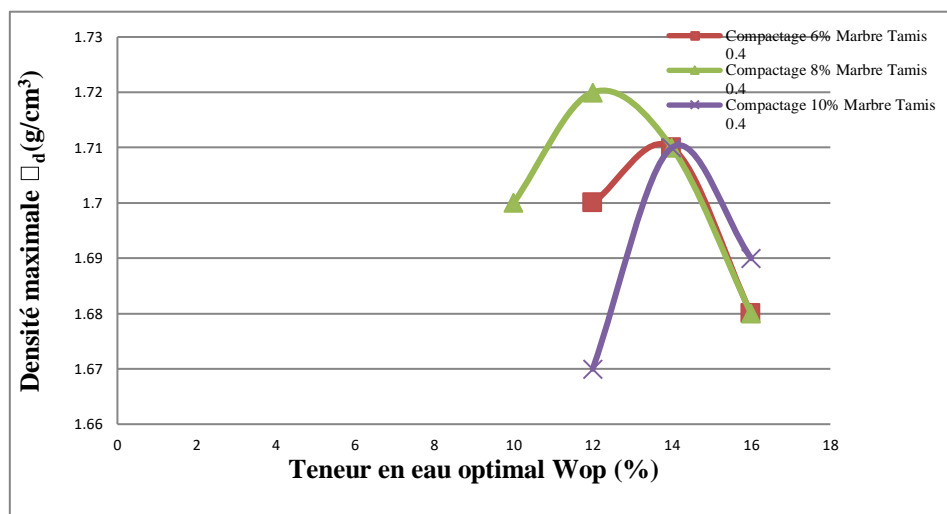
La figure IV.14 Ci dessous présente la courbe de compactage Proctor du sol traité par 10% de marbre de granulométrie 0.4mm.



**Figure IV.14** : La Courbe de compactage avec 10% de marbre passant du tamis 0.4mm

les résultats obtenus montrent que, la densité sèche maximale est augmentée jusqu'à la valeur de 1.71 g/cm<sup>3</sup> la teneur en eau optimal atteint la valeur de 14%

Les courbes de compactage des différents pourcentages du marbre de granulométrie 0.4mm sont illustrées dans la figure IV.15.



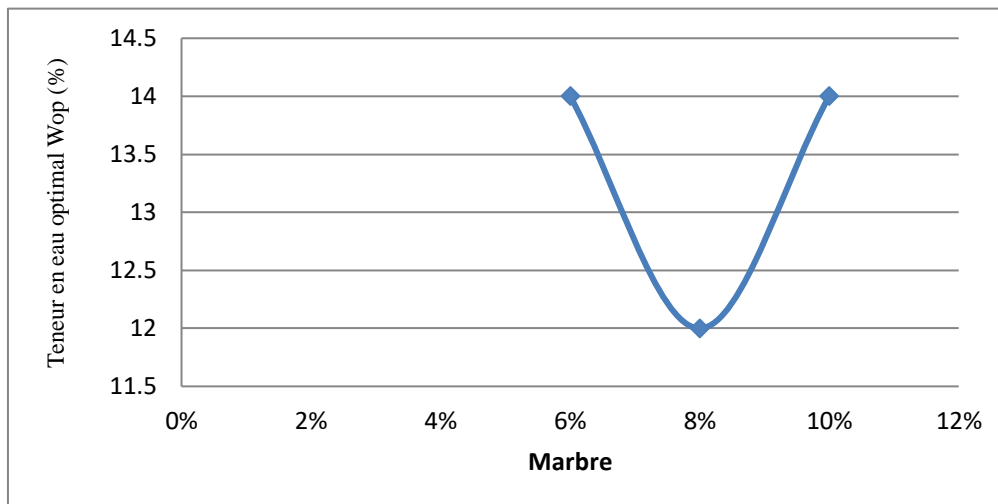
**Figure IV.15** : Les Courbes de Proctor avec différents pourcentages de marbre passant du tamis 0,4mm

Les valeurs des paramètres de compactages des différents pourcentages de marbre passant du tamis 0.4mm sont données sur le tableau IV.13.

**Tableaux IV.13** : Le Tableau montre le rapport en marbre et  $\rho_d$  optimal et W Optimum

|                               | 6%   | 8%   | 10%  |
|-------------------------------|------|------|------|
| W Optimum %                   | 14   | 12   | 14   |
| $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.71 | 1.72 | 1.71 |

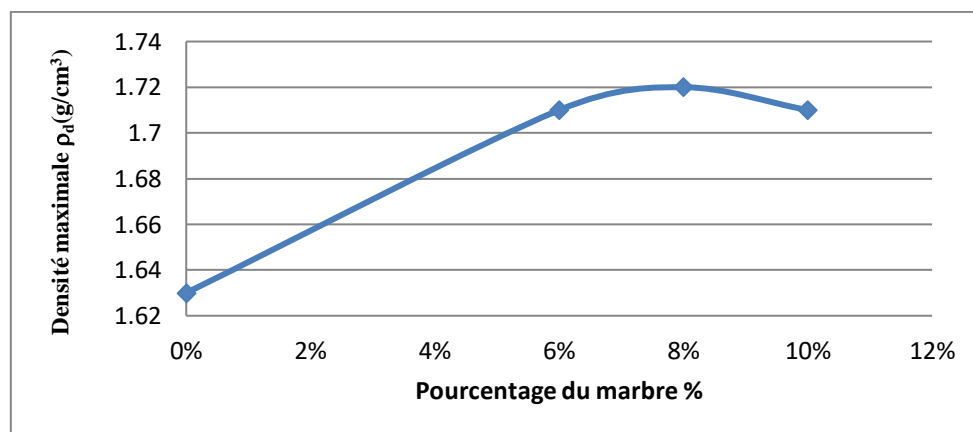
La variation de la teneur en eau optimal de compactage en fonction des différents pourcentages de marbre de granulométrie 0.6mm est présentée sur la figure IV.16.



**Figure IV.16 :** Variation de la teneur en eau W Optimum avec la variation des pourcentages de marbre de granulométrie 0.4mm

La teneur en eau optimale est augmentée à cause de l'absorption du marbre de l'eau.

La variation de la densité sèche maximale en fonction des pourcentages de marbre de granulométrie 0.4mm est présentée sur la figure IV.17.



**Figure IV.17 :** La variation de la densité sèche maximale en fonction des pourcentages de marbre de granulométrie 0.4mm

### ■ Effet du granulométrie du marbre sur le compactage

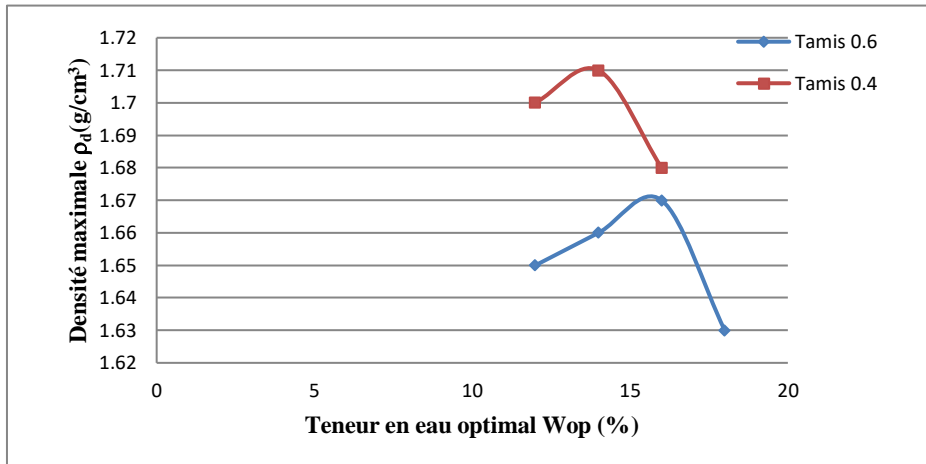
#### ➤ **Traitement avec 6% de marbre**

Les résultats du compactage du sol traité par 6% de marbre de granulométrie 0.6mm et 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.14.

**Tableau IV .14:**Les résultats du compactage du sol traité par 6% de marbre de granulométrie 0.6mm et 0.4mm

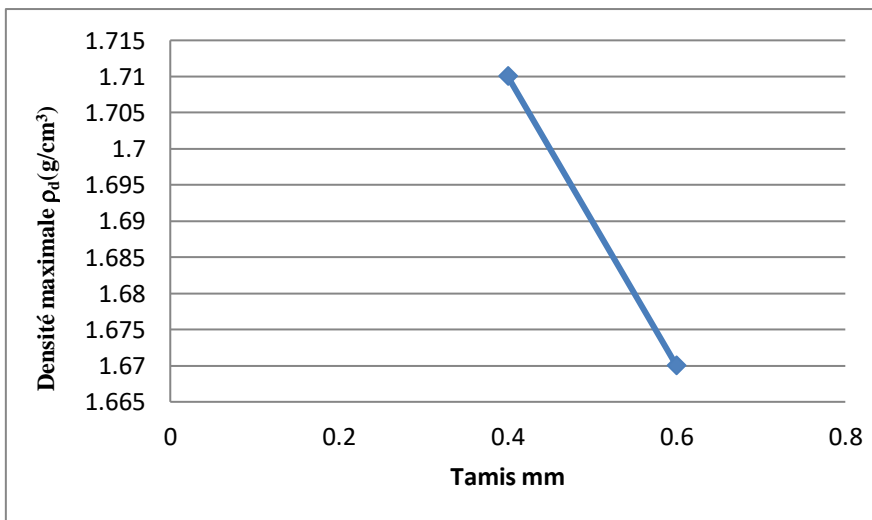
|                               | 0,4  | 0,6  |
|-------------------------------|------|------|
| $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.71 | 1.67 |
| W Optimum %                   | 14   | 16   |

Les courbes de compactage pour le sol traité par 6% de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm sont présentées sur la figure IV.18.



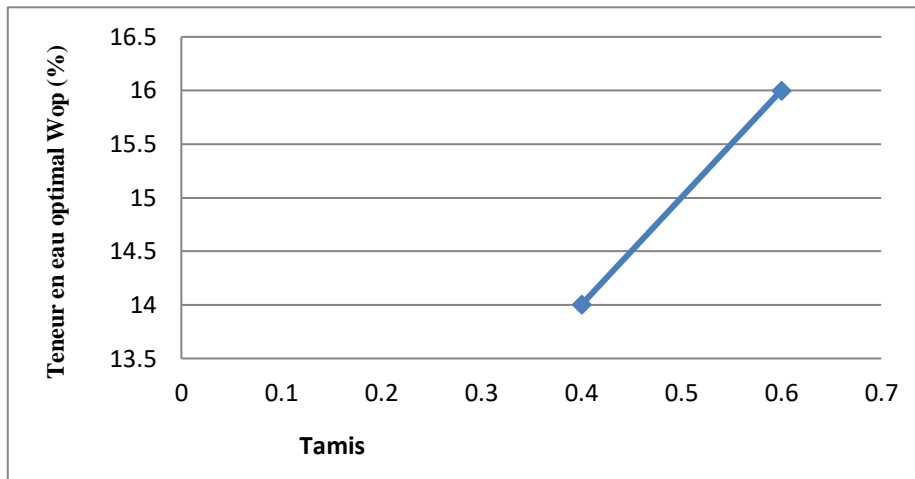
**Figure IV.18 :** Les courbes de compactage pour le sol traité par 6% de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm

La variation de la densité sèche maximale en fonction de la granulométrie du marbre est présentée sur la figure IV.19 pour 6%



**Figure IV.19 :**La variation de la densité sèche maximale en fonction de la granulométrie du marbre pour 6%.

La variation de la teneur en eau optimale en fonction de la granulométrie du marbre pour 6% est donnée par la figure IV.20.



**Figure IV.20 :** La variation de la teneur en eau optimale en fonction de la granulométrie du marbre pour 6%

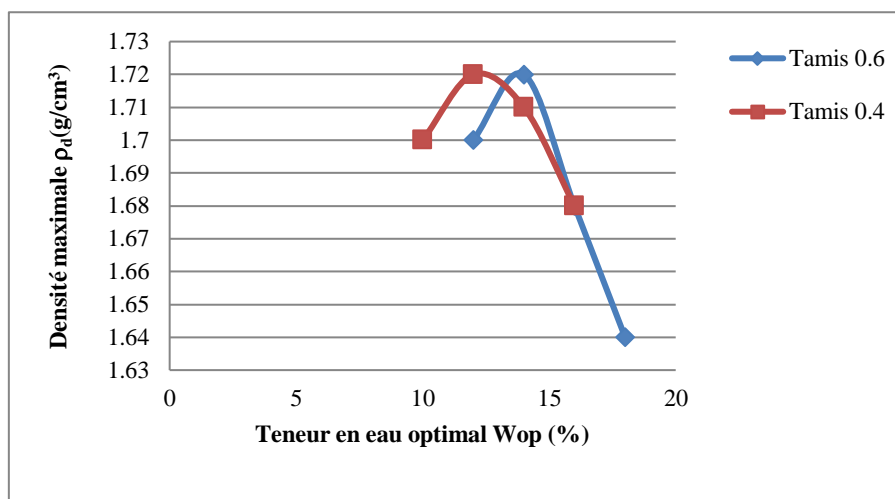
➤ **Traitement avec 8% de Marbre**

Les résultats du compactage du sol traité par 8% de marbre de granulométrie 0.6mm et 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.15.

**Tableau IV .15:** Les résultats du compactage du sol traité par 8% de marbre de granulométrie 0.6mm et 0.4mm

|                  |      |      |
|------------------|------|------|
|                  | 0.4  | 0.6  |
| $\rho_d(g/cm^3)$ | 1.72 | 1.72 |
| W Optimum %      | 12   | 14   |

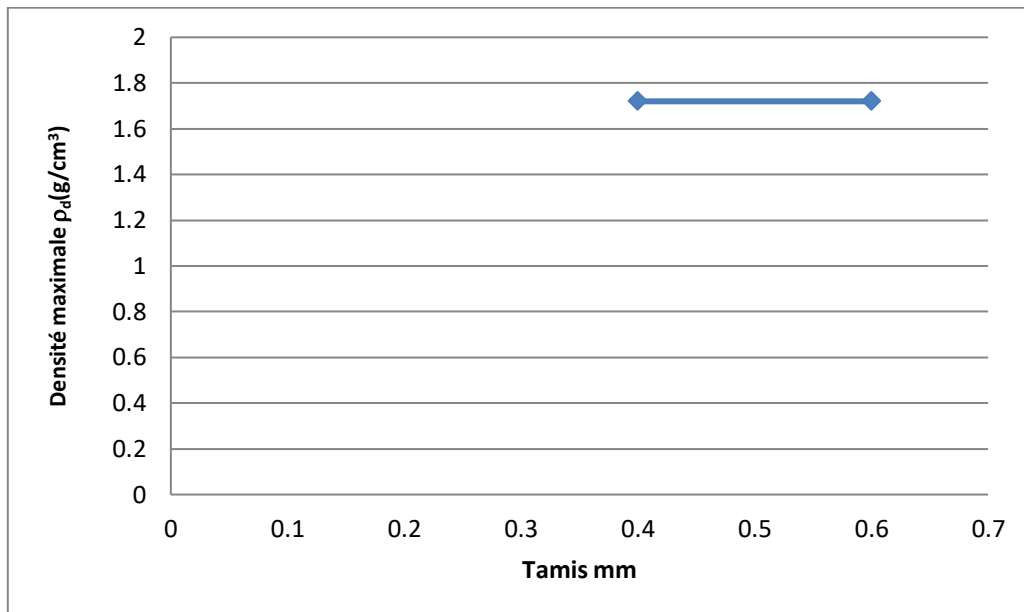
Les courbes de compactage pour le sol traité par 8% de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm sont présentées sur la figure IV.21.



**Figure IV.21 :** Les courbes de compactage pour le sol traité par 8% de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm

## Chapitre IV : Résultats et Interprétation

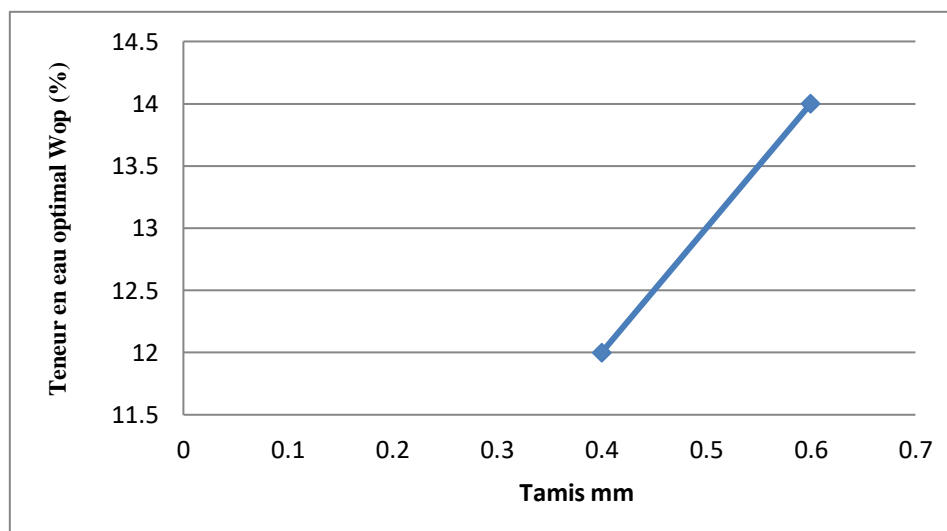
La variation de la densité sèche maximale en fonction de la granulométrie du marbre est présentée sur la figure IV.22 pour 8%



**Figure IV.22 :** La variation de la densité sèche maximale en fonction de la granulométrie du marbre pour 8%

La même valeur de la densité sèche maximale pour les deux granulométrie du marbre.

La variation de la teneur en eau optimale en fonction de la granulométrie du marbre est présentée sur la figure IV.23 pour 8%



**Figure IV.23:** La variation de la teneur en eau optimale en fonction de la granulométrie du marbre pour 8%

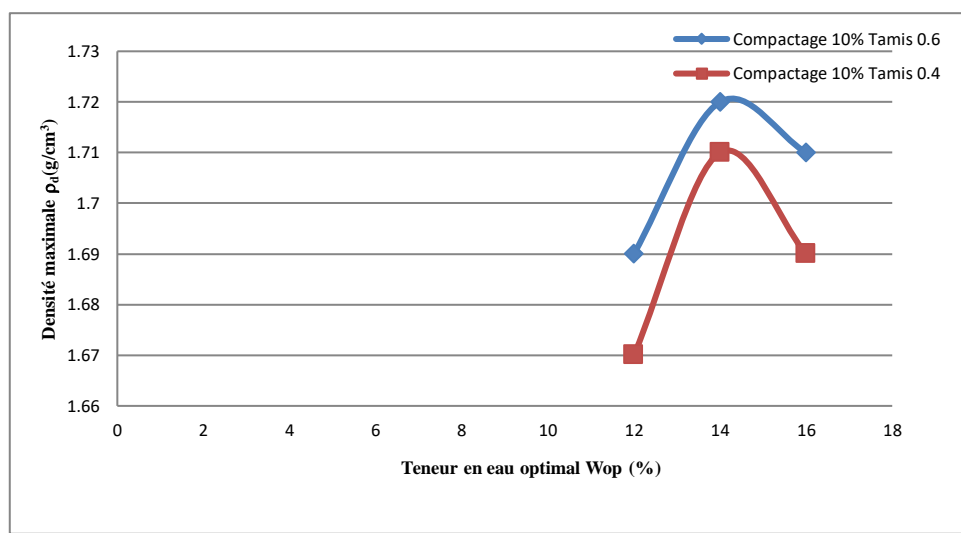
### ➤ Traitement avec 10% de Marbre

Les résultats du compactage du sol traité par 10% de marbre de granulométrie 0.6mm et 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.16.

**Tableau IV .16:** Les résultats du compactage du sol traité par 10% de marbre de granulométrie 0.6mm et 0.4mm

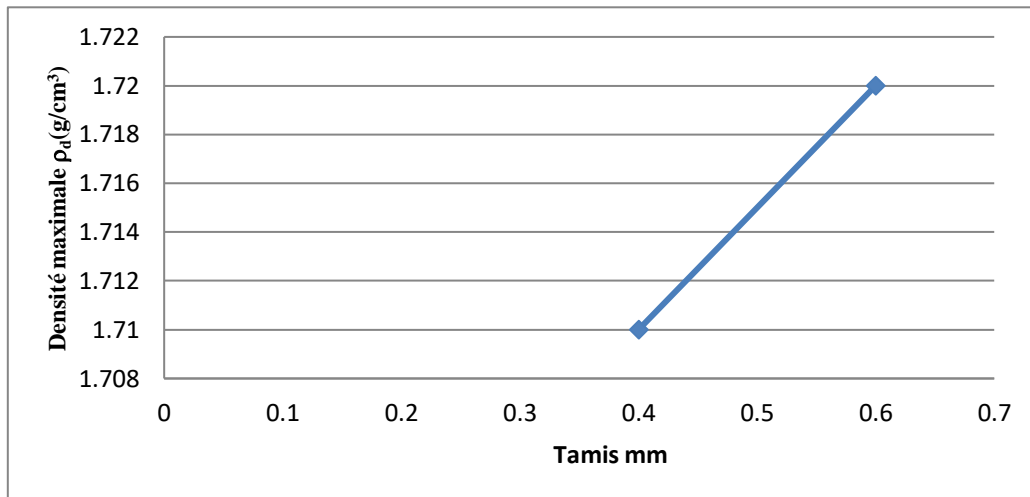
|                         | 0.4  | 0.6  |
|-------------------------|------|------|
| $\rho_d(\text{g/cm}^3)$ | 1.71 | 1.72 |
| W Optimum%              | 14   | 14   |

Les courbes de compactage pour le sol traité par 10% de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm sont présentées sur la figure IV.24.



**Figure IV.24 :** Les courbes de compactage pour le sol traité par 10% de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm

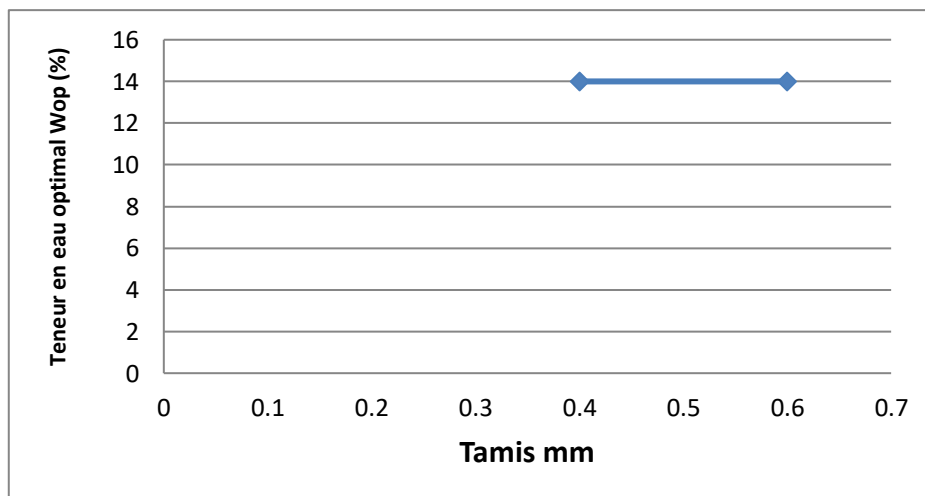
La variation de la densité sèche maximale en fonction de la granulométrie du marbre est présentée sur la figure IV.25 pour 10%.



**Figure IV.25 :** La variation de la densité sèche maximale en fonction de la granulométrie du marbre pour 10%.

Une augmentation de la densité en fonction de l'augmentation de la granulométrie du marbre ajouté.

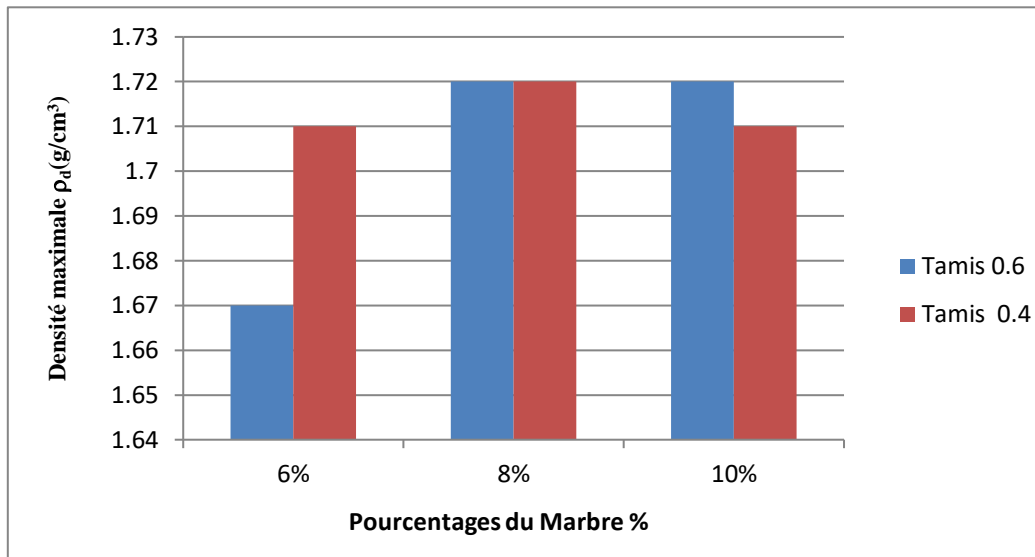
La variation de la teneur en eau optimale en fonction de la granulométrie du marbre est présentée sur la figure IV.26 pour 10%.



**Figure IV.26 :** La variation de la teneur en eau optimale en fonction de la granulométrie du marbre pour 8%

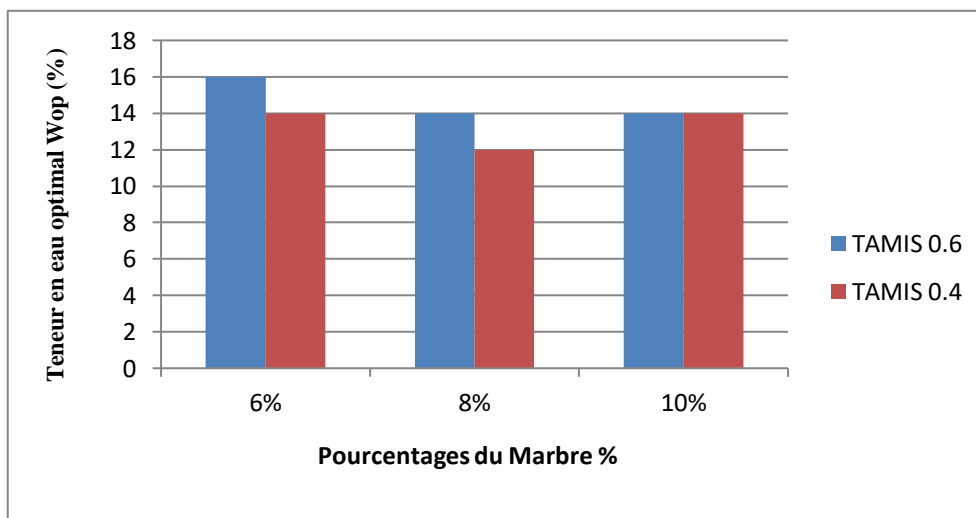
La même valeur de la teneur en eau optimale pour les deux granulométrie.

La figure IV.27 illustre les valeurs de la densité sèche maximale du compactage en fonction des pourcentages et les granulométrie du marbre.



**Figure IV. 27 :** Densité sèche maximale  $\rho_d(\text{g/cm}^3)$  fonction du pourcentages et la granulométrie du marbre

La figure IV.28 illustre les valeurs de la teneur en eau optimale du compactage en fonction des pourcentages et les granulométrie du marbre.



**Figure IV. 28:** Teneur en eau optimal Wop (%) en fonction du pourcentages et la granulométrie du Marbre

### ❖ Essai de compression simple

#### ■ Effet du traitement sur la compression simple

#### ➤ Traitement avec une granulométrie de 0.6mm de marbre

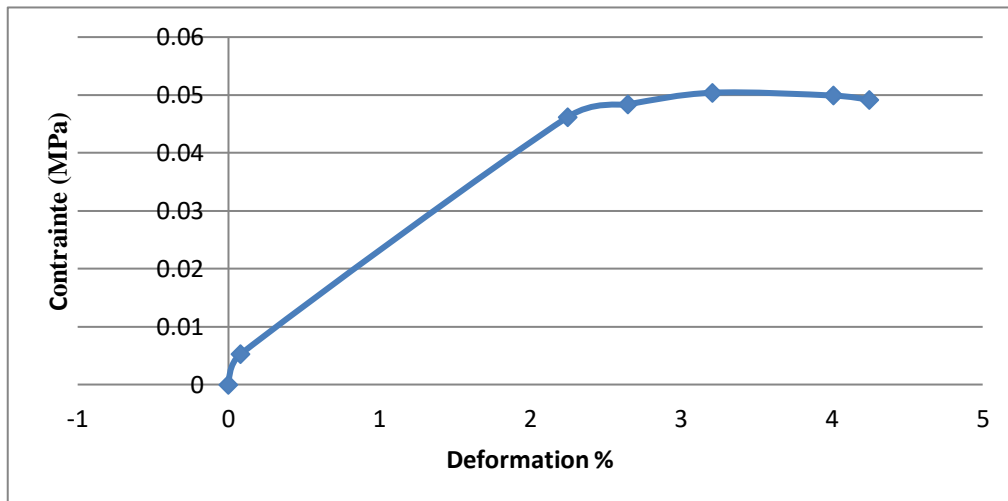
#### ✓ Essai de Compression avec 6% de Marbre

Les résultats de la compression du sol traité par 6% de marbre de granulométrie 0.6mm sont donnés sur le tableau IV.17.

**Tableau IV .17:** Les résultats de la compression du sol traité par 6% de marbre de granulométrie 0.6mm

|                  |   |         |        |        |        |        |        |
|------------------|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Contrainte (MPa) | 0 | 0.00524 | 0.0462 | 0.0484 | 0.0504 | 0.0499 | 0.0492 |
| Déformation      | 0 | 0.08    | 2.25   | 2.65   | 3.21   | 4.01   | 4.25   |

La courbe de compression simple contrainte- déformation est présentée sur la figure IV.29



**Figure IV. 29:** Courbe de compression sols traité avec 6% de Marbre passant du tamis 0.6mm

## Chapitre IV : Résultats et Interprétation

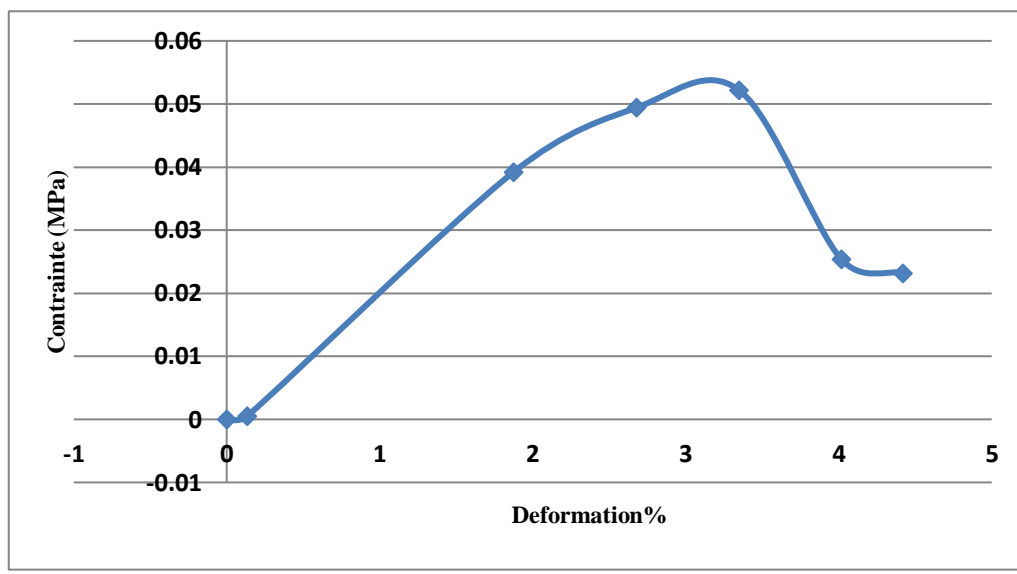
### ✓ Essai de Compression avec 8% de Marbre

Les résultats de la compression du sol traité par 8% de marbre de granulométrie 0.6mm sont donnés sur le tableau IV.18.

**Tableau IV .18:** Les résultats de la compression du sol traité par 8% de marbre de granulométrie 0.6mm

|                   |   |          |        |        |        |        |        |
|-------------------|---|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Contrainte ( MPa) | 0 | 0.000499 | 0.0392 | 0.0494 | 0.0522 | 0.0254 | 0.0332 |
| Déformation       | 0 | 0.133    | 1.875  | 2.672  | 3.348  | 4.017  | 4.419  |

La courbe de compression simple contrainte- déformation est présentée sur la figure IV.30



**Figure IV.30:** Courbe de Compression avec 8% de Marbre passant du Tamis 0.6mm

## Chapitre IV : Résultats et Interprétation

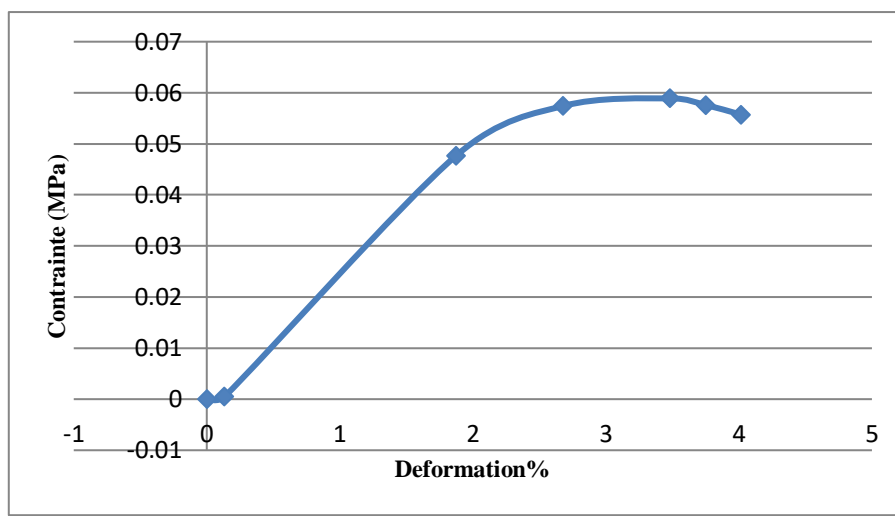
### ✓ Essai de Compression avec 10% de Marbre

Les résultats de la compression du sol traité par 10% de marbre de granulométrie 0.6mm sont donnés sur le tableau IV.19.

**Tableau IV .19:** Les résultats de la compression du sol traité par 10% de marbre de granulométrie 0.6mm

|                  |   |         |        |        |        |        |        |
|------------------|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Contrainte (MPa) | 0 | 0.00049 | 0.0477 | 0.0574 | 0.0589 | 0.0576 | 0.0557 |
| Déformation      | 0 | 0.133   | 1.875  | 2.678  | 3.482  | 3.75   | 4.0178 |

La courbe de compression simple contrainte- déformation est présentée sur la figure IV.31.



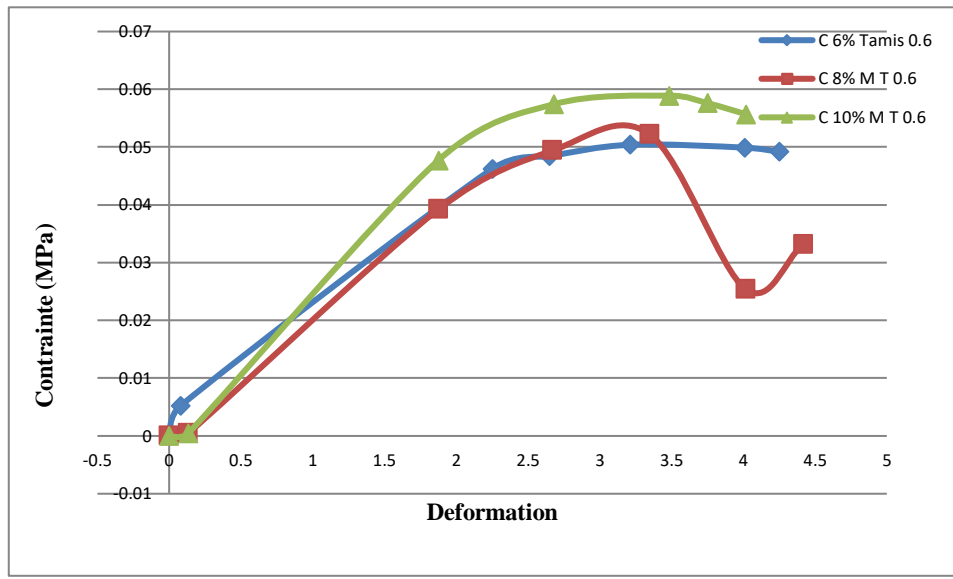
**Figure IV.31:** Courbe de compression avec 10% de Marbre passant du Tamis 0.6mm

les paramètres des essais de compression des différents pourcentages du marbre passant du tamis 0.6 mm sont donnés sur le tableau IV.19.

**Tableau IV.19;** les paramètres des essais de compression des pourcentages du marbre passant du tamis 0.6mm

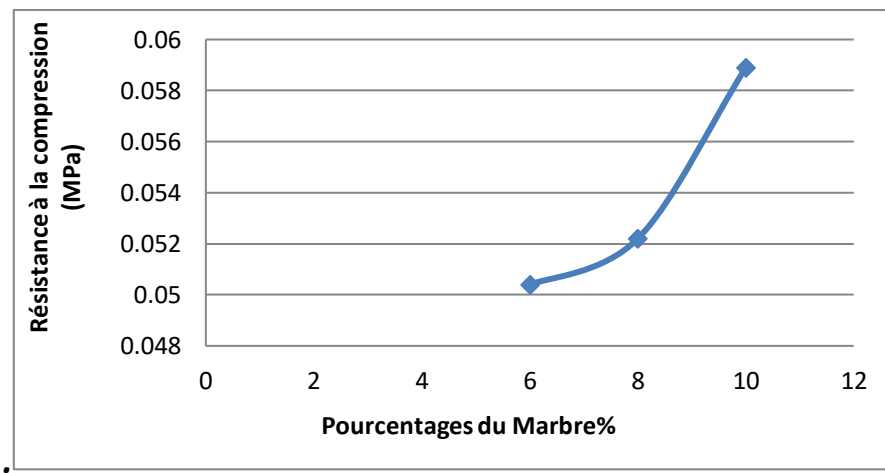
|                  | 6%     | 8%     | 10%    |
|------------------|--------|--------|--------|
| Résistance (MPa) | 0.0504 | 0.0522 | 0.0589 |
| Déformation      | 3.21   | 3.348  | 3.482  |

Les courbes de compression simple en fonction des pourcentages du marbre de granulométrie de 0.6mm sont présentées sur la figure IV.32



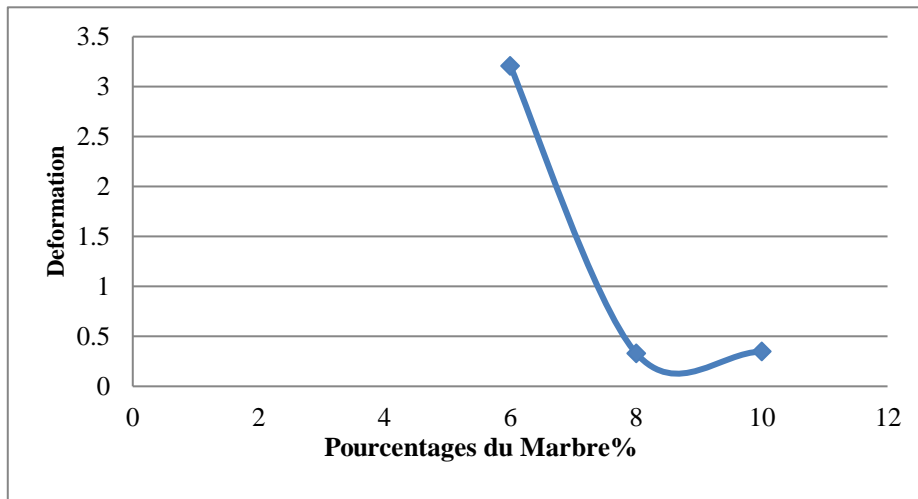
**Figure IV.32:** Les courbes de compression simple en fonction des pourcentages du marbre de granulométrie de .6mm

La variation de la résistance à la compression en fonction des pourcentages du marbre de granulométrie de 0.6mm est présentée sur la figure IV.33.



**Figure IV.33:** La variation de la résistance à la compression en fonction des pourcentages du marbre de granulométrie de 0.6mm

La variation de la déformation en fonction des pourcentages du marbre de granulométrie de 0.6mm présentée sur la figure IV.34.



**Figure IV.34 :** La variation de la déformation en fonction des pourcentages du marbre de granulométrie de 0.6mm

➤ **Traitement avec une granulométrie de 0.4mm de marbre**

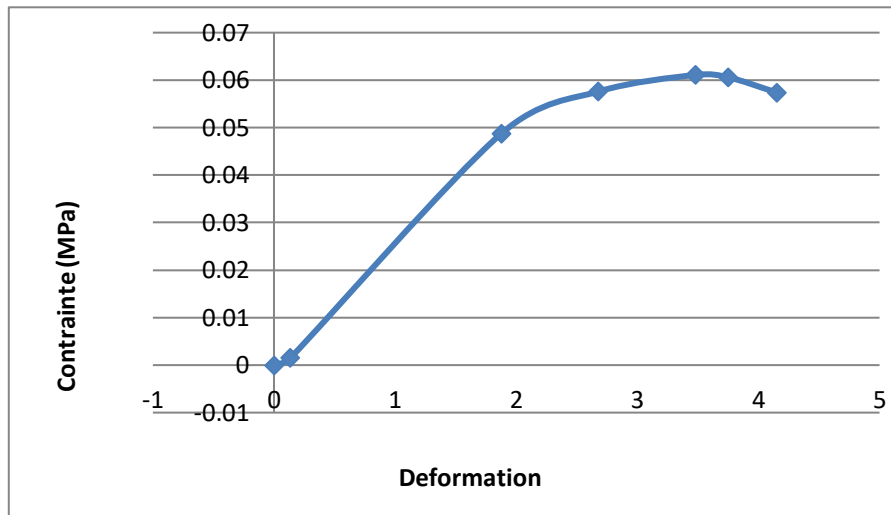
✓ **Essai de Compression avec 6% de Marbre**

Les résultats de la compression du sol traité par 6% de marbre de granulométrie 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.20.

**Tableau IV .20:** Les résultats de la compression du sol traité par 6% de marbre de granulométrie 0.4mm

|                         |   |         |        |        |        |        |        |
|-------------------------|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <i>Contrainte (MPa)</i> | 0 | 0.00149 | 0.0487 | 0.0576 | 0.0611 | 0.0606 | 0.0574 |
| <i>Déformation</i>      | 0 | 0.1339  | 1.875  | 2.678  | 3.482  | 3.75   | 4.151  |

La courbe de compression simple contrainte- déformation est présentée sur la figure IV.35



**Figure IV. 35:** Courbe de compression des sols traités avec 6% de Marbre passant du tamis 0.4 mm

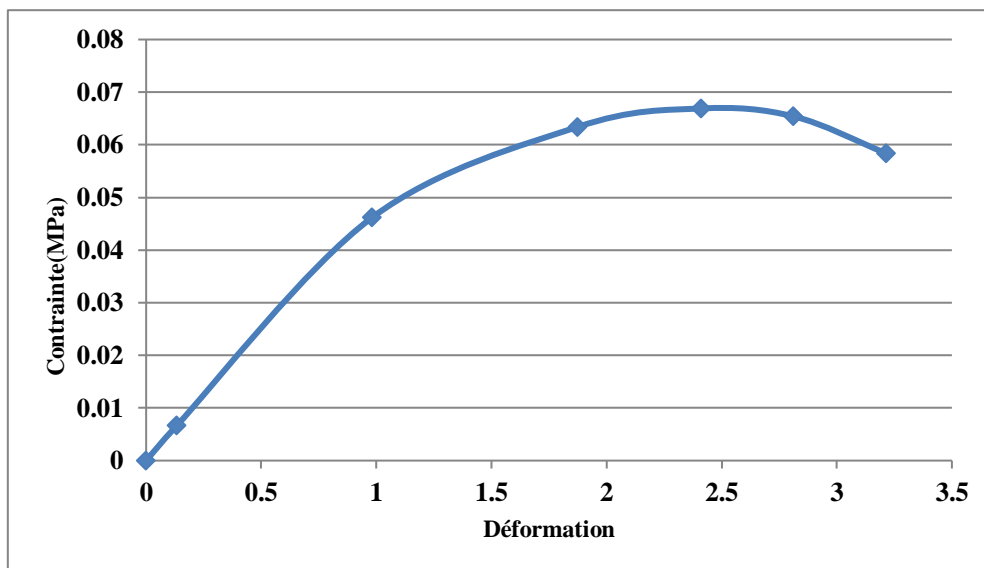
✓ **Essai de Compression avec 8% de Marbre**

Les résultats de la compression du sol traité par 8% de marbre de granulométrie 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.21.

**Tableau IV .21:** Les résultats de la compression du sol traité par 8% de marbre de granulométrie 0.4mm

|                 |   |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Contrainte(MPa) | 0 | 0.0067 | 0.0462 | 0.0634 | 0.0669 | 0.0654 | 0.0584 |
| Déformation     | 0 | 0.1339 | 0.982  | 1.875  | 2.41   | 2.812  | 3.214  |

La courbe de compression simple contrainte- déformation est présentée sur la figure IV.36



**Figure IV. 36:** Courbe de compression avec 8% de Marbre passant du tamis 0.4 mm

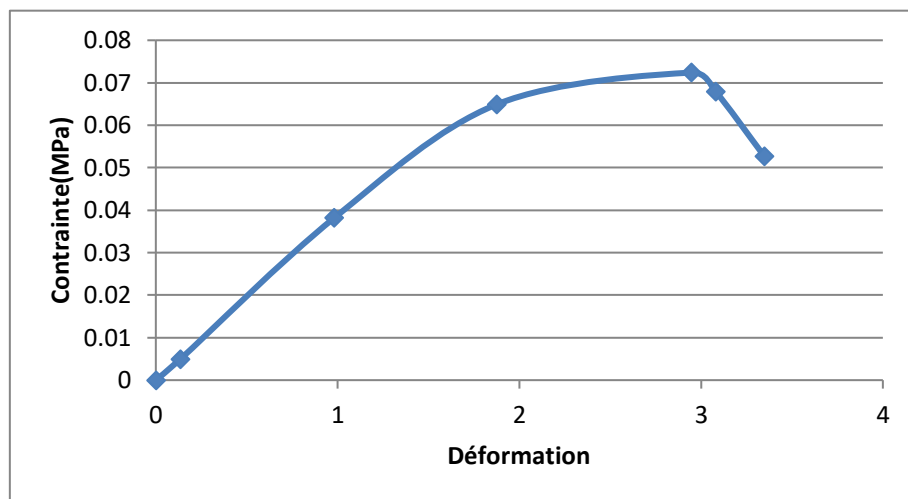
### ✓ Essai de Compression avec 10% de Marbre

Les résultats de la compression du sol traité par 8% de marbre de granulométrie 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.22.

**Tableau IV .22:** Les résultats de la compression du sol traité par 10% de marbre de granulométrie 0.4mm

|                  |   |        |        |        |        |        |        |
|------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Contrainte (MPa) | 0 | 0.0049 | 0.0382 | 0.0649 | 0.0724 | 0.0679 | 0.0527 |
| Déformation      | 0 | 0.1339 | 0.982  | 1.875  | 2.946  | 3.08   | 3.348  |

La courbe de compression simple contrainte- déformation est présentée sur la figure IV.37



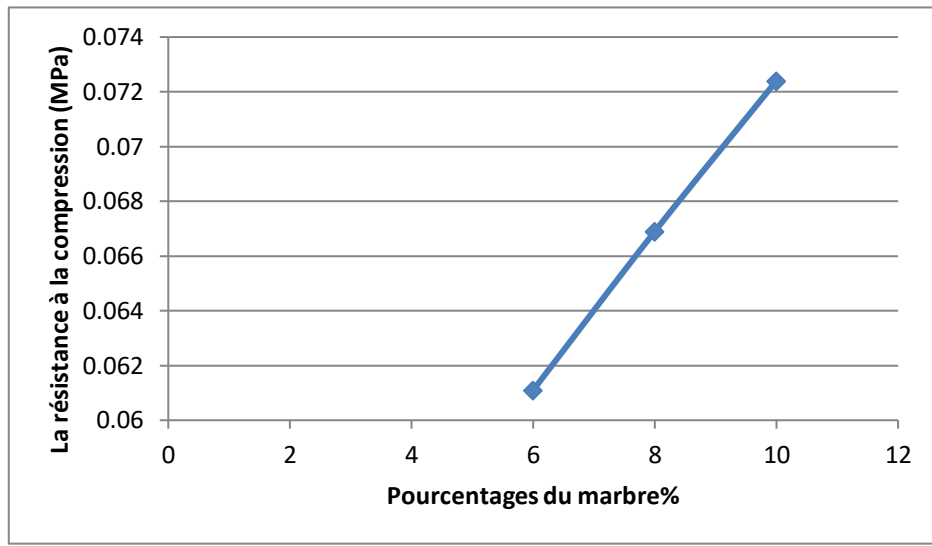
**Figure IV.37 :** Courbe de compression avec 10% de Marbre passant du tamis 0.4 mm

les paramètres des essais de compression des différents pourcentages du marbre passant du tamis 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.23.

**Tableau IV.23;** les paramètres des essais de compression des pourcentages du marbre passant du tamis 0.4mm

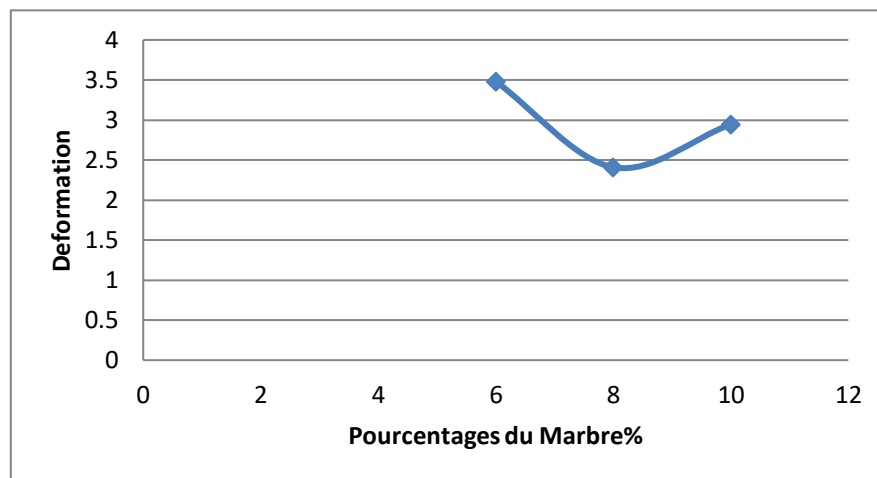
|                  | 6%     | 8%     | 10     |
|------------------|--------|--------|--------|
| Résistance (MPa) | 0.0611 | 0.0669 | 0.0724 |
| Déformation      | 3.482  | 2.41   | 2.946  |

La variation de la résistance à la compression en fonction des pourcentages du marbre de granulométrie de 0.4mm est présentée sur la figure IV.38.



**Figure IV.38 :** La variation de la résistance à la compression en fonction des pourcentages du marbre de granulométrie de 0.4mm

La variation de la déformation en fonction des pourcentages du marbre de granulométrie de 0.4mm est présentée sur la figure IV.39.



**Figure IV.39 :** La variation de la déformation en fonction des pourcentages du marbre de granulométrie de 0.4mm

### ■ Effet de la granulométrie du marbre sur la compression simple

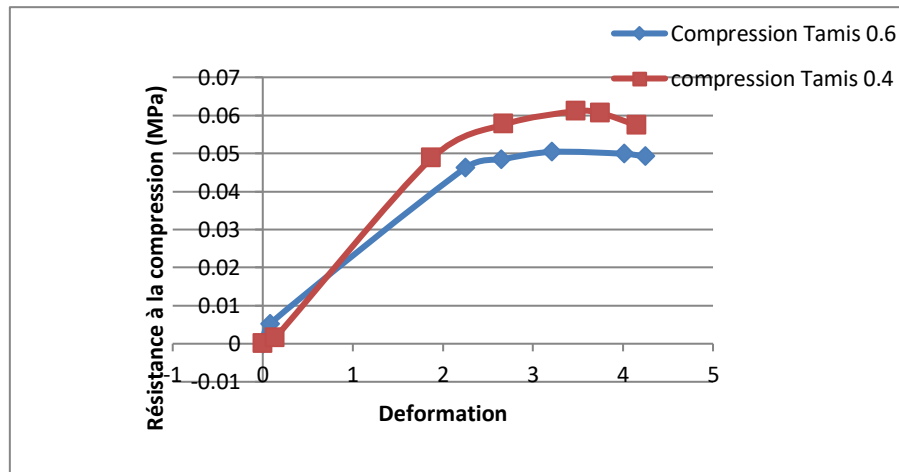
#### ➤ **Traitement avec 6% de marbre**

Les résultats de la compression du sol traité par 6% de marbre de granulométrie 0.6mm et 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.24.

**Tableau IV .24:**Les résultats de la compression du sol traité par 6% de marbre de granulométrie 0.6mm et 0.4mm

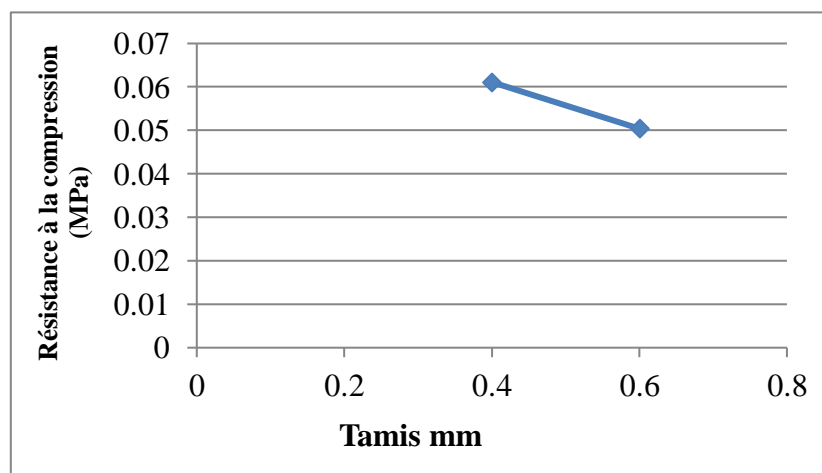
|                   |        |        |
|-------------------|--------|--------|
| Granulométrie(mm) | 0.4    | 0.6    |
| Résistance (MPa)  | 0.0611 | 0.0504 |

Les courbes de la compression simple pour le sol traité par 6% de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm sont présentées sur la figure IV.40



**Figure IV.40 :**Les courbes de compression pour le sol traité par 6% de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm

La variation de la résistance à la compression en fonction de la granulométrie du marbre est présentée sur la figure IV.41 pour 6%



**Figure IV.41 :**La variation de la résistance à la compression en fonction de la granulométrie du marbre pour 6%

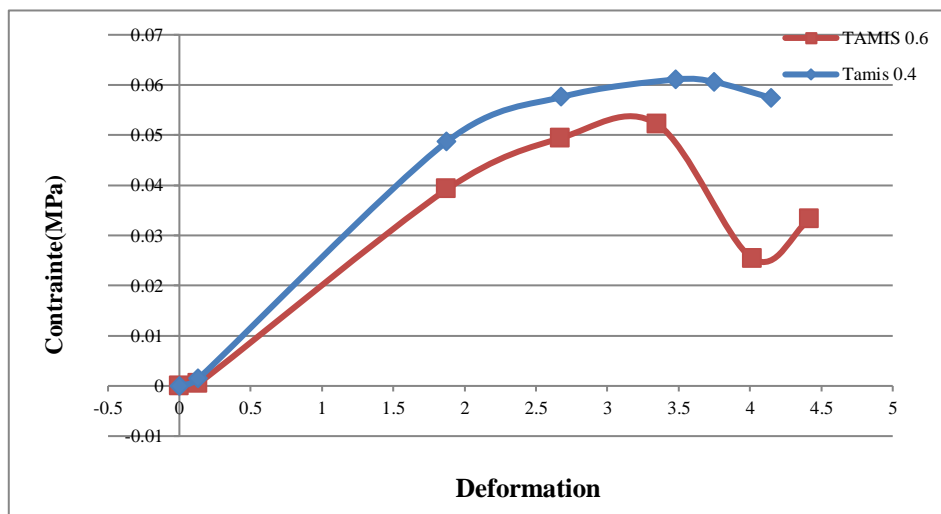
### ➤ **Traitement avec 8% de marbre**

Les résultats de la compression du sol traité par 8 % de marbre de granulométrie 0.6mm et 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.25.

**Tableau IV .25:** Les résultats de la compression du sol traité par 8% de marbre de granulométrie 0.6mm et 0.4mm

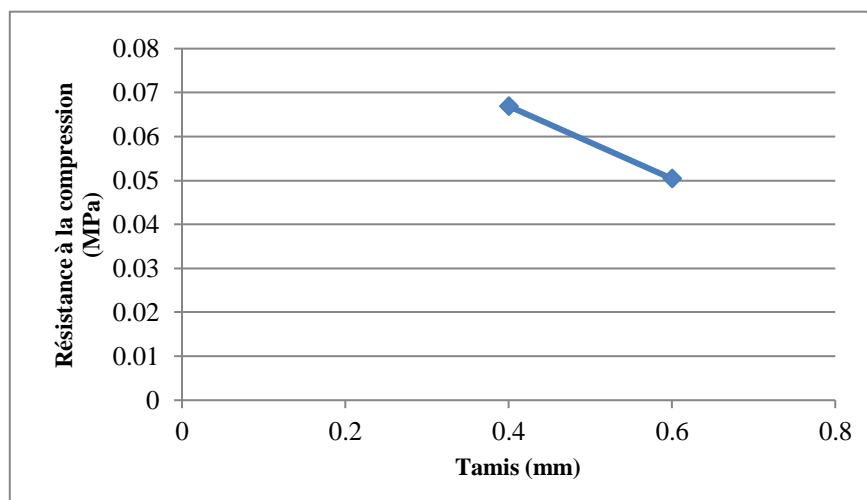
|                    |        |        |
|--------------------|--------|--------|
| Granulométrie (mm) | 0.4    | 0.6    |
| Résistance(MPa)    | 0.0669 | 0.0504 |

Les courbes de la compression simple pour le sol traité par 8 % de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm sont présentées sur la figure IV.41



**Figure IV.42 :** Les courbes de la compression simple pour le sol traité par 8% de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm

La variation de la résistance à la compression en fonction de la granulométrie du marbre est présentée sur la figure IV.42 pour 8%



**Figure IV. 43 :** La variation de la résistance à la compression en fonction de la granulométrie du marbre pour 8%

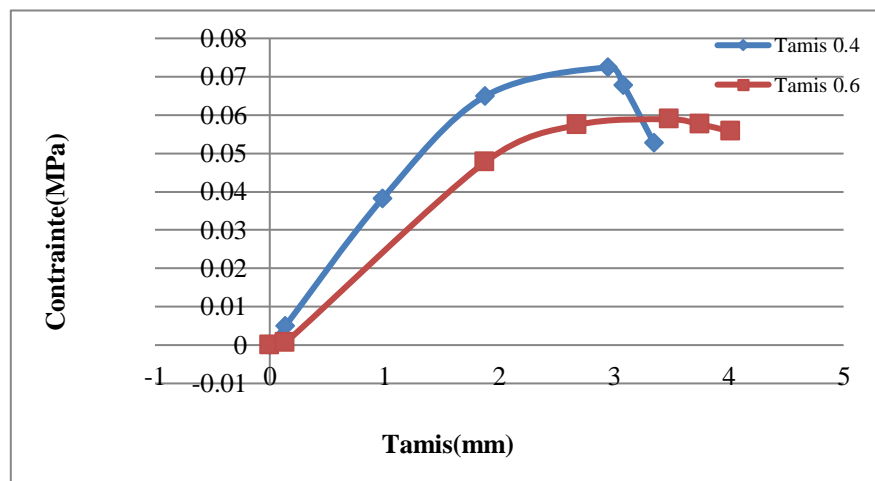
### ➤ Traitement avec 10% de marbre

Les résultats de la compression du sol traité par 10% de marbre de granulométrie 0.6mm et 0.4mm sont donnés sur le tableau IV.26

**Tableau IV .26:** Les résultats de la compression du sol traité par 10% de marbre de granulométrie 0.6mm et 0.4mm

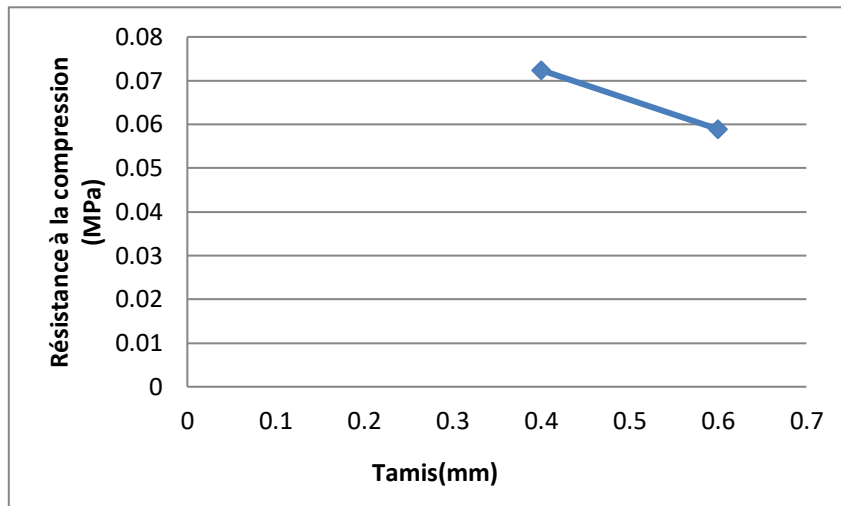
|                    |        |        |
|--------------------|--------|--------|
| Granulométrie (mm) | 0.4    | 0.6    |
| Résistance (MPa)   | 0.0724 | 0.0589 |

Les courbes de la compression simple pour le sol traité par 10 % de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm sont présentées sur la figure IV.44



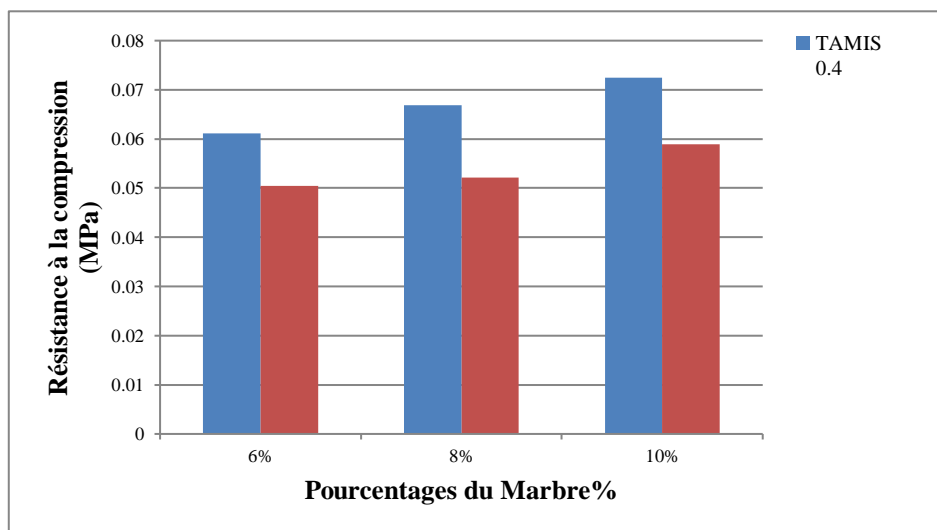
**Figure IV.44 :** Les courbes de la compression simple pour le sol traité par 8 % de marbre passant des tamis 0.4mm et 0.6mm

La variation de la résistance à la compression en fonction de la granulométrie du marbre est présentée sur la figure IV.45 pour 10%



**Figure IV.45 :** La variation de la résistance à la compression en fonction de la granulométrie du marbre pour 10%

La figure IV.46 illustre les valeurs de la résistance à la compression simple en fonction des pourcentages et les granulométrie du marbre.



**Figure IV.46 :** les valeurs de la résistance à la compression simple en fonction des pourcentages et les granulométrie du marbre.

❖ **Essai C.B.R (California Bearing Ratio)**

■ **Essai de CBR Immédiate du sol traité avec 8% de marbre passant du tamis 0.4mm**

**Tableau IV.27** : Résultats de l'essai CBR avec 8% de marbre passant du tamis 0.4mm

|                             |      |      |      |       |       |      |       |
|-----------------------------|------|------|------|-------|-------|------|-------|
| Enfoncement                 | 0.00 | 1.25 | 2.00 | 2.50  | 5.00  | 7.50 | 10.00 |
| Forces (kn)                 | 0.00 | 0.06 | 0.07 | 0.09  | 0.11  | 0.13 | 0.15  |
| Forces normalisées (kn)     |      | 1.33 | 1.56 | 2.00  | 2.44  | 2.89 | 3.33  |
| Correction de l'origine     | 0.00 | 1.25 | 2.00 | 2.50  | 5.00  | 7.50 | 10.00 |
| indice portant immédiat (%) |      |      |      | 14.98 | 22.07 |      |       |

Indice de CBR =22.07%

Une augmentation très remarquable de l'indice de portance

### **IV.4. Conclusion**

Les résultats obtenus à partir des essais effectués sur le sol étudié montrent la classification du sol comme une argile limoneuse peu plastique non gonflante.

Le traitement du sol par l'ajout du déchet de marbre influe sur les propriétés mécaniques et physiques du sol.

La résistance à la compression est augmentée par le traitement ainsi que la densité sèche et l'indice de portance.

La granulométrie de l'ajout influe sur le comportement du sol traité.

D'autres paramètres sont influencés par un faible dosage.

## Conclusion Générale

---

En conclusion, les résultats de cette étude montrent l'importance de l'ajout de déchets de marbre à des proportions variées pour améliorer les propriétés géotechniques des sols.

À travers des essais en laboratoire, il a été démontré que les déchets de marbre, à des proportions de 6%, 8% et 10%, contribuent de manière significative à augmenter la densité sèche optimale, à réduire la teneur en eau optimale et à améliorer la résistance du sol. De plus, l'effet positif de la taille des particules de déchets de marbre sur les propriétés du sol est mis en évidence, les tailles de particules différentes (0,4 mm et 0,6 mm) jouant un rôle important dans l'obtention de performances améliorées.

Les résultats indiquent que l'ajout de 8% de déchets de marbre entraîne une amélioration notable de la résistance du sol, et que l'utilisation de particules fines de 0,4 mm offre une résistance légèrement meilleure par rapport à une taille de 0,6 mm. Ces résultats renforcent la faisabilité de l'utilisation des déchets de marbre comme additif efficace dans les projets de renforcement des sols, contribuant ainsi à la durabilité environnementale grâce au recyclage des déchets industriels et à leur utilisation dans des applications techniques utiles.

## Références et bibliographies

- 1- AFNOR (1996) Norme Française : NF P 94-041 : sols :reconnaissance et essais analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide.
- 2- AFNOR (1992) Norme Française : NF P 94-050 : sols :reconnaissance et essais.
- 3- AFNOR (1991) Norme Française, NF P 94-053 : sols : reconnaissance et essais.
- 4- AFNOR (1993) Norme Française, NF P 94-068 : sols :reconnaissance et essais.
- 4- AFNOR (1993) Norme Française, NF P 94-068 : sols :reconnaissance et essais.
- 5- Belgali M, Merabti N, traitement des eaux usées huileuse de cevital par le kaolin KT 3B selon la méthode d'adsorption, mémoire de magister,université de Bejaïa.1014/2015.
- 6-Bendou S, utilisation des argiles traitées pour la décoloration des bains de teinture, mémoire de magister, université M'Hamed Bougara Boumerdes.12/2009.
- 7-Boulassel L, caractérisation et stabilisation de l'argile de Ben Azzouz, mémoire de magister, université 20 Aout 1955-Skikda.2012.
- 8- Caillere S, Henin S, minéralogie des argiles, Massonet ciel 1963.
- 9- Détermination de la teneur en eau pondérale des sols- méthode par étuvage.
- 10- Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache.
- 11-Douakha H, Mohamedatni H, amélioration des sols, mémoire de magister, université 8 Mai 1945- Guelma 2018.
- 12- Draou N, Nebati F, stabilisation des sols fins, mémoire de magister, université Aboubekr Belkaid Tlemcen.2016.
- 13-[Lambe, 1953]. Lambe, T. W. 1953.the structure of inorganic soil :proc. Amer. Soc-civil Eng.
- 14- Millot G, géologie des argiles, Tomel Masson 1954.
- 15- Rouabhia E, Zedadra H, amélioration des sols, mémoire de magister, université 8 Mai 1945-

Guelma.2017. 2019/2020Page 94

16- Zen S, Etude des propriétés physico-chimiques des argiles de l'est Algérien.  
Application à

l'adsorption des colorants de tannerie, thèse de doctorat, université 8 Mai 1945-  
Gelma.2015/2016.