REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIAUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahim Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : **Génie civil**

Spécialité : Matériaux en génie civil

Par

Benyahia abbas

Khlifi nabil

Etude du comportement mécanique d'un sol argileux fin stabilisé par un additif naturel

Soutenu le : 2024-2025

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Établissement
Dr. Khanoufr Abdelaziz		Président	Univ-BBA
Dr. Goufi Abdelmalik		Encadreur	Univ-BBA
Dr. Benslama Boualem		Co-Encadreur	Univ-BBA
Dr. Deboucha Sadek		Examinateur 1	Univ-BBA
Dr. Thabet Souad		Examinateur 2	Univ-BBA

REMERCIEMENT

Nous remercions tous les enseignants de la faculté des sciences et de La technologie – Université de Mohamed El- Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj qui ont participé à ma formation durant les cinq dernières années.
je remercie nos encadrants
Dr : Goufi abdelmalik et benslama boualem
les membres de jury qui a orientés et tous les professeures de ma section,

Je remercie du fond du cœur tous ceux qui ont contribué a la réalisation de ce mémoire et particulièrement nos parents et nos femmes mes frères et sœur et tous mes amis
(redhwen ,halim,imed,ridha,)

DÉDICACES

Tout d’abord, Je remercie
"Dieu" le tout puissant.

Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui

Contribue d’après au de loin à

Mon éducation, mon assistance
à savoir mes parents qui m'ont
éduqué

Soutenus transmis
beaucoup de choses
(savoir), à mes frères, à
mes sœurs,

à toute mes amis de proches.

Abstract
High plasticity clay soils are among the most challenging types of soils in construction due to their high content of clay minerals. However, their properties can be improved using various stabilization techniques.
Treatment with the addition of mineral materials is known for its rapid positive effect on key geotechnical properties such as compressibility, California Bearing Ratio (CBR), and compressive strength. Adding mineral materials for stabilizing clay soils is a promising option, as this method reduces plasticity and enhances soil strength. Due to the scarcity of high-quality soils, advanced laboratory experiments were conducted to study the mechanical behavior of natural fine clay soils improved with dune sand.
Keywords: Clay, Dune Sand, Behavior, Compressibility, California Bearing Ratio (CBR)

Résumé
Les sols argileux à forte plasticité comptent parmi les types de sols les plus difficiles à gérer dans le domaine de la construction, en raison de leur teneur élevée en minéraux argileux. Cependant, leurs propriétés peuvent être améliorées grâce à diverses techniques de stabilisation.
Le traitement par l'ajout de matériaux minéraux est reconnu pour son effet positif rapide sur les principales propriétés géotechniques telles que la compressibilité, le CBR (California Bearing Ratio) et la résistance à la compression. L'ajout de matériaux minéraux pour la stabilisation des sols argileux constitue une option prometteuse, car cette méthode permet de réduire la plasticité et d'augmenter la résistance du sol. En raison de la rareté des sols de bonne qualité, des essais en laboratoire avancés ont été réalisés pour étudier le comportement mécanique des sols argileux fins naturels améliorés par du sable de dunes.
Mots-clés : Argile, Sable de dunes, Comportement, Compressibilité, CBR (California Bearing Ratio)

الملخص
تُعد التربة الطينية ذات مؤشر اللدونة العالي من أكثر أنواع الترب التي تواجه صعوبات في أعمال البناء، وذلك بسبب احتوائها على نسبة مرتفعة من المعادن الطينية ومع ذلك، يمكن تحسين خصائص هذه الترب من خلال عدة تقنيات تثبيت.
تُعرف المعالجة بإضافة مواد معدنية بتأثيرها الإيجابي السريع على أهم الخصائص الجيوتقنية مثل ، الانضغاط، نسبة تحمل كاليفورنيا و مقاومة الضغط، .
تُعتبر إضافة المواد المعدنية لتثبيت التربة الطينية خيارًا واعدًا، حيث تساهم هذه الطريقة في تقليل اللدونة وزيادة مقاومة التربة. وبسبب ندرة الترب ذات الجودة العالية، تم إجراء تجارب مخبرية متقدمة لدراسة السلوك الميكانيكي للترب الطينية الطبيعية الدقيقة والمُحسّنة بواسطة رمل الكثبان.
الكلمات المفتاحية: طين، رمل الكثبان، السلوك، الانضغاط، نسبة تحمل كاليفورنيا

Table des Matières

Remerciements
Dédicaces
Résumé
Abstract
ملخص
Sommaire
Liste des figures
Liste des tableaux
Liste des notation

Sommaire

Introduction
générale…….……..
1

CHAPITRE :1REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction sur le sol
…….2
1- Les sols
argileux……
…..3
2-1 Nature des
argiles……..4
1- 3 caractéristiques des
argiles……...5
2- Problèmes posés par les sols argileux en géotechnique
…….6
2-1 Gonflement et retrait
sols……..7
A). Nature du phénomène de gonflement dans le cas des sols argileux
…….8
B).Conséquences dues au gonflement
……9
1.2. Amélioration des sols:
……10
• Principales méthodes d'amélioration des sols… ……
…… ……...11

• Effet de l'utilisation des matériaux granulaires (comme le sable des dunes) sur les propriétés géotechniques de l'argile (Proctor, densité et CBR)
…….12

CHAPITRE 2 : MATÉRIAUX ET MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE
Introduction ……
……...13
2-1 Matériaux utilisés…….14

*Description du sol
argileux……...15

*Les caractéristiques physiques, chimiques des sol argileux……16
* Description de Sable de dunes…….17

Les caractéristiques physiques chimiques de Sable de dunes ……..18
2-2 programme expirimentel……19
2.2.1 Conception expérimentale ……..….20
2.2.2 Mélanges étudiés……..…21
2.2.3 Essais réalisés……...22
3.1.1Détermination des caractéristiques de compactage (Proctor)……23
3.1.2Essai de compression uni axial……..24
3-1-3 Essai CBR (California Bearing Ratio……..25
2.3 Préparation des échantillons……26
2.3.1 Procédures de mélange et de compactage ……27
2.3.2 Conservation et préparation pour les essais……..28
2.3.3 Conservation et Préparation pour les Essai de compression uni axial…….….29
2.3.4 Conservation et Préparation pour les Essai de CBR (California Bearing Ratio)…30

CHAPITRE3 : Présentation et interprétation des résultats

3-1 Introduction ……31
Les paramètres de compactage……...32
Les caractéristiques de compression……..,,,,33
3-2 Compactage (Proctor)……..34
3-3 La résistance à la compression Rc ……35
a- Importance de la résistance à la compression (Rc)……..36
b- Classification typique selon Rc……37
c- Application à votre sol argileux (naturel et amélioré)……..38
d- Interprétation générale……39
3-4 CBR……..40

a- Classification des sols selon l'indice CBR……,..41
b- Ap c- Effet de l'ajout de sable et classification associée plication à l'arg …….….42
c- Dégradation de la portance à forte teneur en sable ile naturelle……..43

Conclusion générale et Perspectives

Perspectives

1. Optimisation granulométrique des mélanges.....44
2. Étude du comportement à long terme.....…45
3. Intégration de liants hydrauliques….....46
4. Analyse microstructurale (SEM, DRX).....47
5. Modélisation numérique……48
6. Applications en contexte réel.....49

Liste des figures

Chapiter 01

Figure I.1 Photo d'une argile……..….1

Figure I.2. Vue rapprochée de fentes de dessiccation dans l'argile……...…2

Figure I.3. Retrait-Gonflement…….…....3

Figure I.4.Fissurations des façades des maisons…….…4

Figure I.5. Désordres de chaussées dues au gonflement…….5

Figure I.6.Phénomène du tassement……6.

Figure I.7. Tassement uniforme……...7

Figure I.8.Tassement différentiel…….8

Figure I.9. Glissement de terrain……...9

Figure I.10. Fissure profonde sur une maison……..10

Figure I.11. Route déformée et clôture penchée……..…11

.Chapiter 02

Figure 2.1 — Une carte montre le lieu de l'étude (Google maps)…….12

Figure 2.2 — Localisation de Sidi Hadjres- M'sila (Algérie)…….13

Figure 2.3 Argile avent broyé……14

Figure 2.4 — Les sacs de sol argile……..15

Figure 2.5 — Tuve…….16

Figure 2.6 — Le sol argile dans le tuve……..17

Figure 2.7 — Le sol aprés broyé…….18

Figure 2.8 — La distribution granulométrique du sol et du sable de dune utilisés et de leur combinaison…….……19

Figure 2.9 — Photo de tamisage de sol argile……20

Figure 2.10 — Photo de tamisage de sable de dune……..…….21

Figure 2.11 — **Ensemble de moulage utilisé pour la confection des éprouvettes……..22**

Figure 2.12— Équipement d'essai de Proctor : (a) moule ; (b) dame…….23

Figure 2.13 — L'essai CBR (California Bearing Ratio)…….24

Figure 2.14— Photographie de l'équipement de l'essai de Proctor……...25

Figure 2.15— Photographie d'échantillons……

Figure 2.16 — Préparation pour les Essai de compression uni axial……..26

Figure 2.17 — l'échantillons de Essai de compression……...27

Figure 2.18 — Préparation pour les Essai de CBR (California Bearing Ratio) ……28

Figure 2.19 — Photographie de l'équipement de l'essai . CBR (California Bearing Ratio)…… ...29

Chapiter 03

Figure 3-1 : Évolution des paramètres de compactage d'un sol argileux en fonction du pourcentage de sable fin (SF) et de sable moyen (SM…….30

Figure 3-2 : Évolution de la résistance à la compression (Rc) d'un sol argileux en fonction du pourcentage de sable fin (SF) et de sable moyen (SM)……..31

Figure 3-3 : Variation de l'indice CBR d'un sol argileux en fonction de la teneur en sable fin (SF) et sable moyen (SM)…….32

Liste des tableaux

Chapitre 02

Tableau 1.1 — Propriétés géotechniques de l'argile de Sidi-Hadjeres, Algérie……*1*

Tableau 1.2 — Propriétés minéralogiques du sol…….2

Tableau 1.3 — Propriétés géotechniques du sable des dunes d'Oued-Souf……3

Tableau 1 .4 — Combinaisons des échantillons(sable fin +sol argile) **2**kg……..4

Tableau 1 .5 — Quantité de mélange pour l'essai CBR (California Bearing Ratio) ……5

Tableau 1 .6 — Quantité de mélange pour l'essai de compression simple……..6

Chapitre 03

Tableau 3-1 : Classification indicative des sols selon la résistance à la compression Rc……..7

Tableau 3-2 : Classification des sols selon l'indice CBR……8

Liste de notation

(ω_{opt})	(%)	Teneur en eau optimale
($\gamma_{d\text{-}max}$)	(kN/m3)	Densité sèche maximale
(W_L)	(%)	Limite de liquidité
(W_P)	(%)	Limite de plasticité
(IP)	(%)	Indice de plasticité
(Rc)	(MPa)	Résistance à la compression uni axial)

Introduction générale

Avant la réalisation des ouvrages d'infrastructure, la réutilisation des matériaux du site pour la construction nécessite un sol de bonnes caractéristiques (physiques et mécaniques). À cet effet, il faut réduire les impacts négatifs sur la nature et le fonds d'investissement du projet. Pour éviter les problèmes de réalisation, on utilise bien souvent des méthodes du traitement des sols pour améliorer les propriétés géotechniques insuffisantes des sols rencontrés sur le site pour une certaine fonction dans l'ouvrage.

Le comportement des sols est influencé par de nombreux éléments. Les plus importants sont : la minéralogie, la granulométrie, la microstructure, la saturation (la teneur en eau), la succion et l'état de surface. Bien entendu, le comportement hydromécanique des sols dépend également de la nature des sollicitations auxquelles il sera soumis.

L'étude du comportement des sols a mobilisé, depuis de nombreuses années, un important effort de recherche dans des disciplines diverses telles que la géologie, la mécanique des sols et des roches, le génie des procédés et la physique de la matière. L'activité économique autour du sol ne se limite cependant pas à des techniques industrielles anciennes. En parallèle, avec les besoins actuels de l'homme (bâtiments, barrages, tunnels, ponts, aérodromes …), s'impose la nécessité de nombreuses applications nouvelles, accompagnées de connaissances expérimentales et théoriques accrues, du comportement mécanique et rhéologique des sols pour optimiser leur exploitation, et faire face aux différents désordres (instabilité des pentes, tassements, tassements différentiels, liquéfaction, notamment suite aux tremblements de terre...) qui surviennent avant ou après la construction des différents ouvrages de génie civil.

Les sables et les argiles se présentent à l'état naturel comme matériaux plus ou moins homogènes, mais également sous forme de mélanges (sols hétérogènes) ou de multicouches (sols anisotropes). Les sols homogènes et plus ou moins les sols en mélanges (sable-argile) ont fait l'objet de plusieurs recherches en géotechnique. Des travaux ont permis de mieux appréhender leur comportement dans les ouvrages de génie civil et de travaux publics, malgré que la compréhension de leur comportement soit une tâche qui est loin d'être achevée. En fait, ces travaux ont permis de montrer que, même si chaque grain est un objet assez simple, l'ensemble de grains est un système très complexe, dans lequel le désordre et le caractère divisé du milieu jouent un rôle capital.

Cette étude a pour objectif, étude de comportement mécanique d'un sol argileux fin stabilisé par un additif naturel.

Pour atteindre le but visé, le travail sera divisé en trois chapitres compris une introduction

générale et une conclusion générale. Des essais sur les matériaux utilisés (sable, argile) sont également réalisés au niveau du laboratoire de génie civil du département de génie civil à l'université Mohamed el Bachir el'Ibrahimi a Bordj Bou Arreridj.

Le contenu de ce mémoire, est présenté comme suit :

Une introduction générale (problématique et objectif de la recherche).

Chapitre I : « Les argiles » présente une synthèse bibliographique sur les problèmes posés par les sols argileux en géotechnique ainsi-que leurs caractéristiques et Principales méthodes d'amélioration des sols..

Chapitre II : Procédures expérimentales et identification des matériaux utilisés est consacré à la présentation des matériaux étudiés, et Préparation des échantillons et les différents essais essais de compactage et Essais de CBR et Essais de compression uniaxial.

Chapitre III : présente un effet du sable de dunes sur les propriétés physiques et mécaniques et les résultats obtenus sous forme de tableaux et de courbes.

À la fin, on présentera une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus pour cette étude.

Chapitre 1

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE DES SOLS

Introduction sur le sol :

Dans le domaine du génie géotechnique, le sol constitue l'un des éléments les plus importants influençant directement la conception et la réalisation des projets routiers. Le génie géotechnique s'intéresse à l'étude des propriétés des sols et des roches, à l'évaluation de leur comportement sous différentes charges, ainsi qu'à la détermination de leur aptitude à servir de support aux ouvrages de construction. Étant donné que les routes sont construites sur des couches de sol, l'évaluation de leurs caractéristiques est cruciale pour garantir la stabilité et la performance durable de la chaussée.

Les études géotechniques dans le domaine des routes incluent l'analyse de la capacité portante du sol, des tassements potentiels, de la perméabilité et des interactions avec l'eau — des facteurs qui influencent le comportement de la route au fil du temps. Ces analyses permettent de déterminer le type de fondations à utiliser et les méthodes d'amélioration du sol, si nécessaire, telles que le compactage, le renforcement avec des matériaux géotechniques ou le traitement chimique.

Le domaine fait également appel à plusieurs essais in situ et en laboratoire, comme l'essai de pénétration standard (SPT), l'essai de cisaillement direct et l'essai triaxial de compression, qui aident à comprendre le comportement du sol sous les charges dynamiques et statiques causées par le trafic et les conditions environnementales.

En résumé, la géotechnique fournit la base scientifique nécessaire à l'évaluation et à l'amélioration des propriétés du sol en fonction des exigences des projets routiers. Elle contribue à assurer la sécurité des infrastructures, à réduire les coûts d'entretien et à prolonger la durée de vie des routes.

1- **Les sols argileux:**

2-1 Nature des argiles:

De manière générale ‹le mot argile sert à désigner l'ensemble des particules dont la taille est inférieure à 2 µm En termes de taille de grain, le mot argile à deux sens. Il désigne d'abord, les particules faites des minéraux argileux dont les cristaux excèdent parfois 2 µm, les minéraux argileux proviennent essentiellement de l'altération chimique de certains minéraux composant la roche. Cette altération chimique agit de façon que certains minéraux silicates, comme les mi Cassou les feldspaths sont transformés en d'autres espèces minérales (kaolinite, illite, Montmorillonite), souvent de granulométrie plus fine. Les minéraux argileux sont surtout de la famille de silicates, formés à base de silice (Si) et d'oxygène (O), tels que le quartz et les feldspaths. Le mot minéral argileux comprend

les minéraux qui font partie du groupe des phyllo silicates, appelés aussi silicates de structure lamellaires. Un feuillet d'argile est formé par l'association des couches tétraédriques (T) à base de tétraèdres.

Le terme argile désigne ensuite les débris les plus fins de la désagrégation-altération physique des roches appelés la farine de roche (d <2 µm).Cette farine peut contenir une proportion de minéraux argileux plus ou moins importante.



Figure I.1 Photo d'une argile

1- 3 caractéristiques des argiles:

- **L'argile** est une matière naturelle composée de fines particules de roches et de minéraux des agrégés, mélangées à de l'eau. Elle possède plusieurs propriétés physiques et chimiques qui en font un matériau important dans de nombreux domaines. Voici quelques-unes de ses principales caractéristiques :
- **Composition** : L'argile est principalement constituée de minéraux silicatés tels que la kaolinite, la montmorillonite et l'illite. Elle contient également des proportions variables de sable et de limon.
- **Plasticité :** L'argile a la capacité de se modeler lorsqu'on y ajoute de l'eau, ce qui en fait un matériau idéal pour la fabrication de poteries et de briques.
- **Cohésion :** Lorsqu'elle sèche, l'argile devient dure et cohérente, ce qui la rend adaptée à la construction.

- **Absorption :** L'argile a une grande capacité d'absorption de l'eau, ce qui la rend utile en agriculture pour améliorer la fertilité des sols.
- **Conductivité thermique :** L'argile est un mauvais conducteur de chaleur, ce qui en fait un bon isolant thermique.
- Stabilité chimique : Elle est résistante à la corrosion chimique, ce qui la rend adaptée aux environnements difficiles.
- **Diversité :** Les types d'argile varient selon leur composition minérale et leur origine géographique, comme l'argile rouge, l'argile blanche (kaolin) et l'argile noire.
- **L'argile** est utilisée dans divers domaines tels que la construction, l'industrie, l'agriculture, et même dans les produits cosmétiques, en raison de ses propriétés uniques.

2- Problèmes posés par les sols argileux en géotechnique :

Les sols argileux représentent plusieurs défis en géotechnique en raison de leurs caractéristiques spécifiques. Voici les principaux problèmes qu'ils peuvent entraîner

2-1 Gonflement et retrait

Les sols argileux possèdent la propriété de voir leur consistance se modifier en fonction de leur teneur en eau. Ainsi, en contexte humide, un sol argileux se présente comme souple et malléable, tandis que ce même sol desséché sera dur et cassant. Des variations de volume plus ou moins conséquentes en fonction de la structure du sol et des minéraux en présence, accompagnent ces modifications de consistance. Ainsi, lorsque la teneur en eau augmente dans un sol argileux, on assiste à une augmentation du volume de ce sol, on parle alors de « Gonflement des argiles ».
Au contraire, une baisse de la teneur en eau provoquera un phénomène inverse de rétractation ou « retrait des argiles ».



Figure I.2.Vue rapprochée de fentes de dessiccation dans l'argile.

Le phénomène de retrait et de gonflement des sols argileux occasionne des dégâts considérables aux bâtiments.

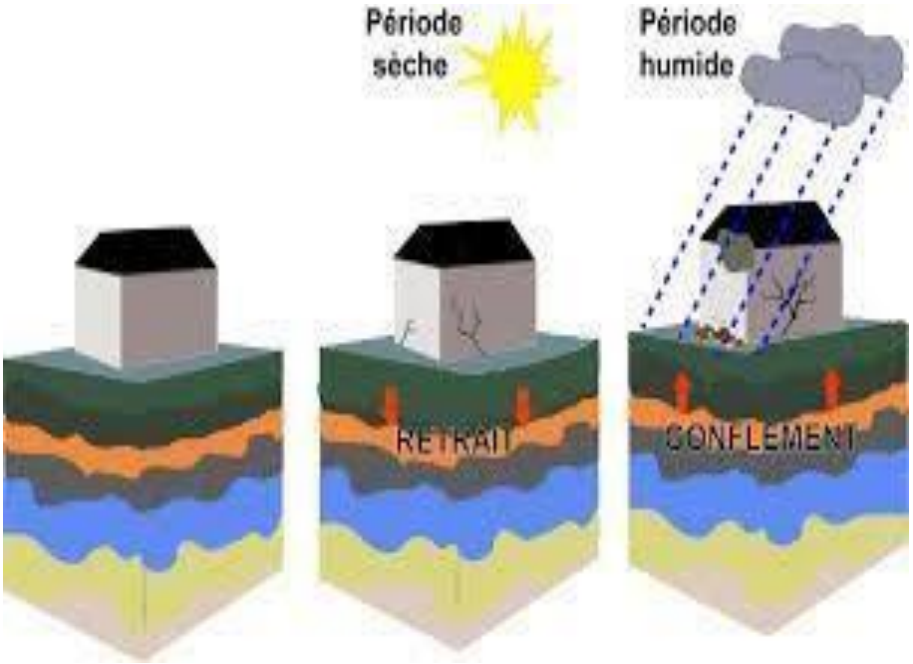


Figure I.3. Retrait-Gonflement.

A). Nature du phénomène de gonflement dans le cas des sols argileux

Les caractéristiques de la structure interne des minéraux argileux expliquent leur comportement face aux variations de teneur en eau :

-Ils présentent en effet une structure minéralogique « en feuillets », à la surface desquels les molécules d'eau peuvent s'adsorber sous l'effet de différents phénomènes physico-chimiques,

et ce de façons d'autant plus marquées que les grains du sol, fines et aplaties, ont des surfaces développées très grandes. Il en résulte un gonflement, plus ou moins réversible, du matériau. L'eau adsorbée assure les liaisons entre les grains et permet les modifications de structure du sol lors des variations de teneur en eau ;

-Certains grains argileux peuvent eux-mêmes voir un changement de volume par variation de la distance entre les feuillets argileux élémentaires, du fait d'échanges d'ions entre l'eau interstitielle et l'eau adsorbée ;

-Les pores du sol sont très fins et accentuent les phénomènes de capillarité.

Toutes les familles de minéraux argileux ne présentent pas la même prédisposition au phénomène de retrait-gonflement. L'analyse de leur structure minéralogique permet d'identifier les plus sensibles. Le groupe des smectites et, dans une moindre mesure, le groupe des interstratifiés (alternance plus ou moins régulière de feuillets de nature différente) font partie des plus sujets au phénomène (on parle d'argiles gonflantes).

Cette sensibilité est liée :

- à des liaisons particulièrement lâches entre les feuillets constitutifs, ce qui facilite l'acquisition ou le départ d'eau. Cette particularité permet à l'eau de pénétrer dans l'espace situé entre les feuillets, autorisant ainsi de fortes variations de volume (on parle de gonflement inter foliaire ou inter cristallin) ;

- au fait que ces argiles possèdent une surface spécifique particulièrement importante (800 m^2 / g pour la montmorillonite qui appartient aux smectites, 20 m^2/g pour la kaolinite), et que la quantité d'eau adsorbée que peut renfermer un sol est directement fonction de ce paramètre.

B).Conséquences dues au gonflement:

Le phénomène se manifeste par des tassements différentiels provoquant des dommages dans les constructions si les fondations et la structure ne sont pas assez rigides.

Cas des bâtiments

Les bâtiments, spécialement les maisons individuelles qui sont construit sans précaution sont les principales victimes de ce phénomène du fait de leur structure (légère et peu rigide, fondations superficielles). Avec l'humidité de la période hivernale, les argiles gonflent, puis se rétractent et craquellent en cas de pluviométrie déficitaire estivale. La variation de la teneur en

eau de ces argiles dites gonflantes occasionne des dégâts sur les constructions aux fondations peu profondes.

Ces dommages peuvent prendre plusieurs formes : fissurations en façade, décollements entre éléments jointifs (garages, perrons, terrasses), distorsion des portes et fenêtres, dislocation des dallages et des cloisons et, parfois, rupture de canalisations enterrées.



Figure I.4. Fissurations des façades des maisons

❖ **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 I.5. Désordres de chaussées dues au gonflement

2-Faible capacité portante : Les argiles ont généralement une faible capacité à supporter des charges, ce qui les rend inadaptées sans traitement ou fondations spécifiques.

3-Phénomène de tassement

Les sols argileux peuvent se modifier en fonction des variations d'eau du terrain. Lors des périodes de sècheresse, le manque d'eau entraine un tassement irrégulier du sol en surface Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles tels que les argiles) sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par sur exploitation.



Figure I.7. Phénomène du tassement.

Le tassement par définition est la variation de hauteur d'une couche de sol sous l'effet d'une charge. C'est la déformation verticale du sol due à l'application des contraintes extérieures. Cette déformation dépend de plusieurs paramètres :

-les charges appliquées ;

-la nature du sol ;

-les dimensions et la forme des fondations ;

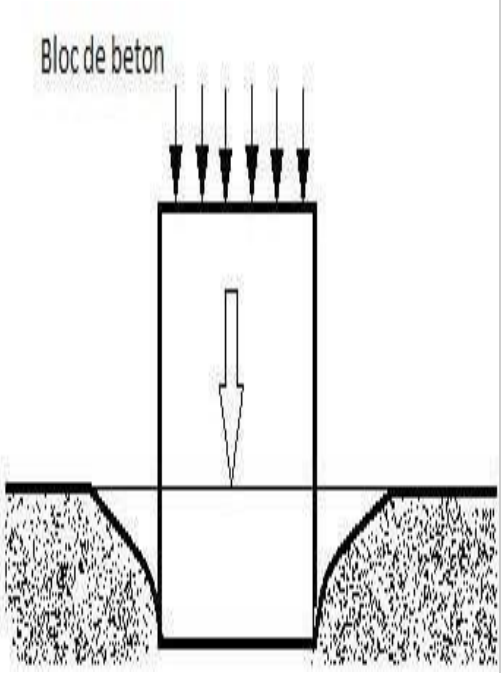
-le temps ;

-la nature des fondations et de la structure.
Les tassements peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature.

4- Le tassement uniforme : les tassements uniformément repartis affectent peu la structure, les mouvements qui en résultent peuvent cependant endommager les services et accessoires, les conduites d'eau et les passages souterrains [2].

5- Le tassement différentiel : est un mouvement d'enfoncement du sol qui n'est pas uniforme. Il peut de ce fait provoquer des dislocations des maçonneries comme l'apparition de fissures.

C’est un grave facteur de désordre qui est la plupart du temps irrémédiable [2].



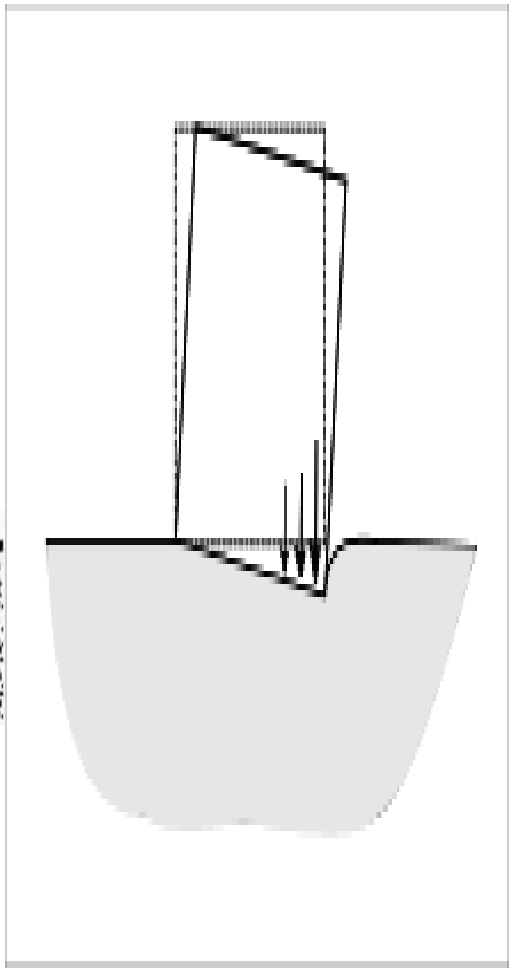


Figure I.8. Tassement uniforme **Figure I.9.**Tassement différentiel

6- Phénomène de glissement

Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent (de quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) par gravité d'un versant instable pouvant s'accélérer pour aller jusqu'à la rupture. Il peut être superficiel ou profond.

L'eau joue un rôle central dans les processus de glissements en milieux argileux. Elle exerce sur ces sols une influence particulière, qui se traduit de plusieurs manières.

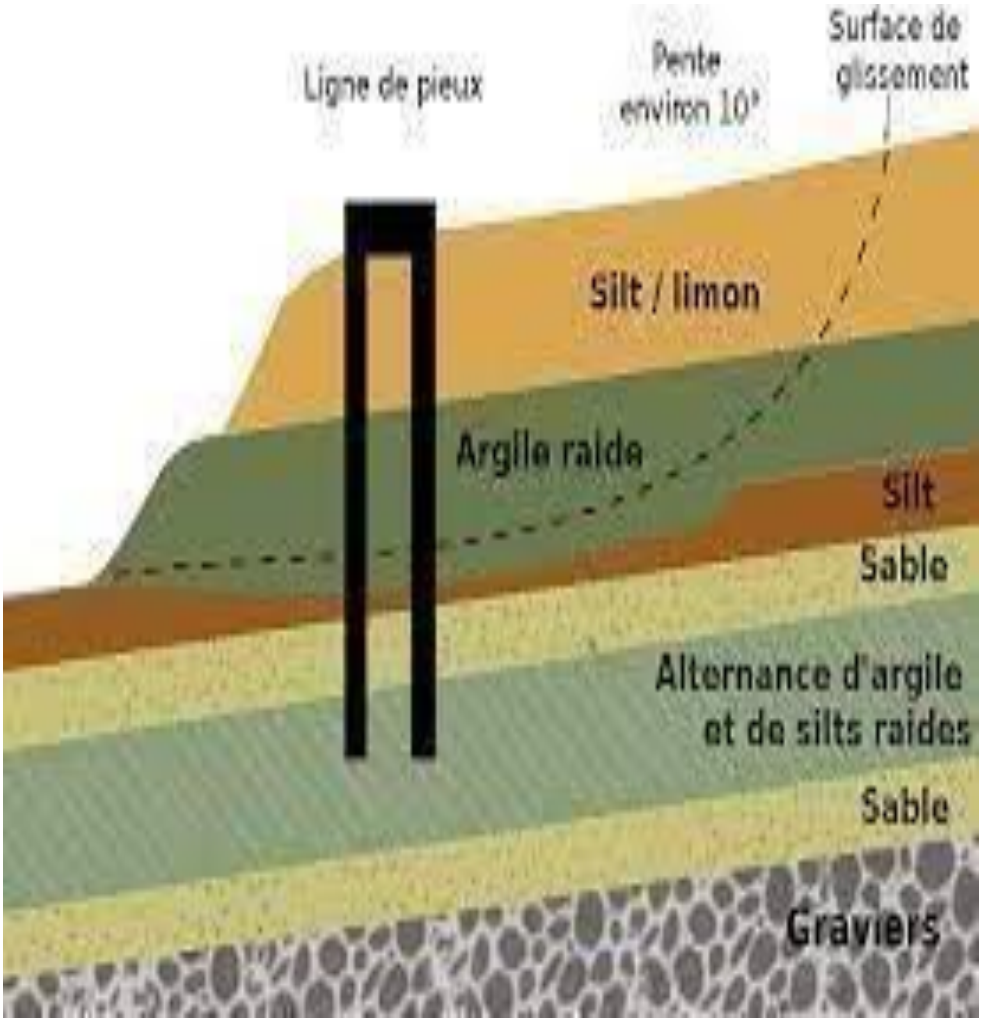


Figure I.10. Glissement de terrain.

Un glissement de terrain peut avoir comme conséquence ce qui suit :

-décollement, fissuration des dallages intérieurs et extérieurs ;

-fissures profondes sur les maisons individuelles ;

-déformation des routes et clôtures penchées ;

- déformation des réseaux enterrés.



Figure I.11. Fissure profonde sur une maison.



Figure I.12. Route déformée et clôture penchée

7- **Instabilité des pentes** : Saturés en eau, les sols argileux peuvent devenir instables, augmentant les risques de glissements de terrain ou d'effondrements.

8- **Difficulté de compactage :** Il est difficile de compacter uniformément les argiles, ce qui peut compromettre la qualité des travaux de construction.

9- Sensibilité à l'érosion : Les sols argileux sont souvent vulnérables à l'érosion, en particulier en présence d'eau, ce qui peut menacer la stabilité des terrains.

10- Problèmes de drainage : En raison de leur faible perméabilité, les sols argileux posent souvent des problèmes de drainage et favorisent l'accumulation d'eau.

Pour atténuer ces problèmes, des techniques spécifiques sont souvent nécessaires, telles que le drainage, le compactage, l'utilisation de géotextiles ou le remplacement des sols argileux

1.2. Amélioration des sols:

- **Principales méthodes d'amélioration des sols**

1. Stabilisation mécanique:

- Compactage : utilisé pour augmenter la densité du sol et réduire les vides, ce qui améliore la capacité portante et diminue les tassements.
- Remplacement du sol : consiste à retirer le sol faible et à le remplacer par un matériau plus compétent.
- Renforcement : insertion de géogrilles ou de géotextiles dans le sol pour améliorer sa résistance.

2. Stabilisation chimique:

- Ajout de chaux : utilisé avec les sols argileux pour améliorer la plasticité et réduire le retrait et le gonflement.
- Ajout de ciment : augmente la résistance au cisaillement et la rigidité du sol.
- Ajout d'additifs industriels ou naturels (comme les cendres volantes ou les bio-additifs) : améliore certaines propriétés comme la perméabilité ou la résistance à l'eau.

3. **Injection (Grouting):**

- Injection de matériaux liquides : consiste à injecter un mélange dans le sol pour combler les vides et améliorer la cohésion.
- Appropriée pour les sols très perméables (comme les sables).

4. **Techniques par colonnes ou pieux**:

- Colonnes de pierre : insertion de colonnes de gravier compacté dans des sols mous pour améliorer la portance.
- Colonnes de chaux ou de ciment : utilisées pour solidifier et stabiliser les sols argileux.

5. **Stabilisation biologique:**

- Utilisation d'agents naturels comme des bactéries ou des enzymes pour favoriser les processus de liaison des particules du sol et accroître sa cohésion.

Choix de la méthode appropriée

- La nature du sol (sableux, argileux, etc.).
- Le niveau de la nappe phréatique.
- L'objectif de la stabilisation (augmentation de la portance, réduction du tassement, limitation du gonflement, etc.).
- Le budget disponible.

- **Effet de l'utilisation des matériaux granulaires (comme le sable des dunes) sur les propriétés géotechniques de l'argile (Proctor, densité et CBR)**

- **1. Densité sèche maximale (essai Proctor standard):**
- Effet : L'ajout de sable des dunes entraîne généralement une augmentation de la densité sèche maximale.

Raison : Le sable, étant un matériau granulaire non plastique, aide à réduire les vides et améliore l'agencement des particules, ce qui permet une meilleure compacité.

- **2. Teneur en eau optimale :**
- Effet : La teneur en eau optimale diminue souvent avec l'augmentation de la teneur en sable.

Raison : Le sable a une faible capacité de rétention d'eau comparée à l'argile, donc le mélange nécessite moins d'eau pour atteindre la densité maximale.

- **3. / Essai CBR (California Bearing Ratio)**
- Effet : Une augmentation significative du CBR est généralement observée avec l'ajout de sable, surtout à des pourcentages modérés (20–40 %).

Raison :

- Le sable augmente l'angle de frottement interne du sol, améliorant ainsi sa résistance mécanique.
- Il réduit la compressibilité du sol et améliore sa capacité portante sous charges.

- **4. Stabilité volumique et retrait/gonflement**

- Effet : L’ajout de sable réduit le retrait et le gonflement caractéristiques des sols argileux.

Raison : Le sable ne subit pas de variation volumique avec l’humidité, ce qui stabilise le

Remarque :

L’amélioration des propriétés géotechniques est optimale à un taux d’ajout de sable compris entre 20 % et 40 %. Un excès de sable peut entraîner une baisse de cohésion et nuire à la résistance globale du sol.

Chapitre 2

MATÉRIAUX ET MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

Introduction:

Dans ce chapitre, différents essais ont été réalisé pour étudier le comportement des sols traités sable de dunes et de leur combinaison en utilisant la procédure standard donnée par les normes American (ASTM), et une description détaillée des propriétés physiques du sol naturel ainsi que les caractéristiques des ajouts minéraux utilisés (sable de dune) sont présentés. De plus, un aperçu sur les essais réalisés ainsi que la préparation des échantillons sont présentés. L'étude expérimentale a été réalisée au sein du laboratoire de l'université Mohamed el Bachir el'Ibrahim a Bordj bou arreridj

2-1Matériaux utilisés:

Cette section est base principalement sur la préparation et l'identification des matériaux utilisés dans cette étude.

***Description du sol argileux:**

Dans cette étude, le sol utilisé a été prélevé à une profondeur d'environ (3 - 4 m) sous la surface naturelle du sol. Les échantillons ont été emballés dans des sacs en plastique et transportés au laboratoire. Dans un premier temps, le sol est passé à l'étuve à 60°C pendant 48h (séchage). Deuxièmement, le sol a été concassé et broyé pour la préparation et la réalisation des essais d'identification et de traitement.

Le sol utilisé dans cette recherche est prélevé de Sidi-Hadjres à M'sila (Algérie). Les coordonnées géographiques du site d'étude sont (35°40'30" N et 4°02'16" E).



Figure 2.1 — Une carte montre le lieu de l'étude (Google maps).



Figure 2.2 — Localisation de Sidi Hadjres- M'sila (Algérie).



Figure 2.3 Argile avant broyé



Figure 2.4 — Les sacs de sol argile

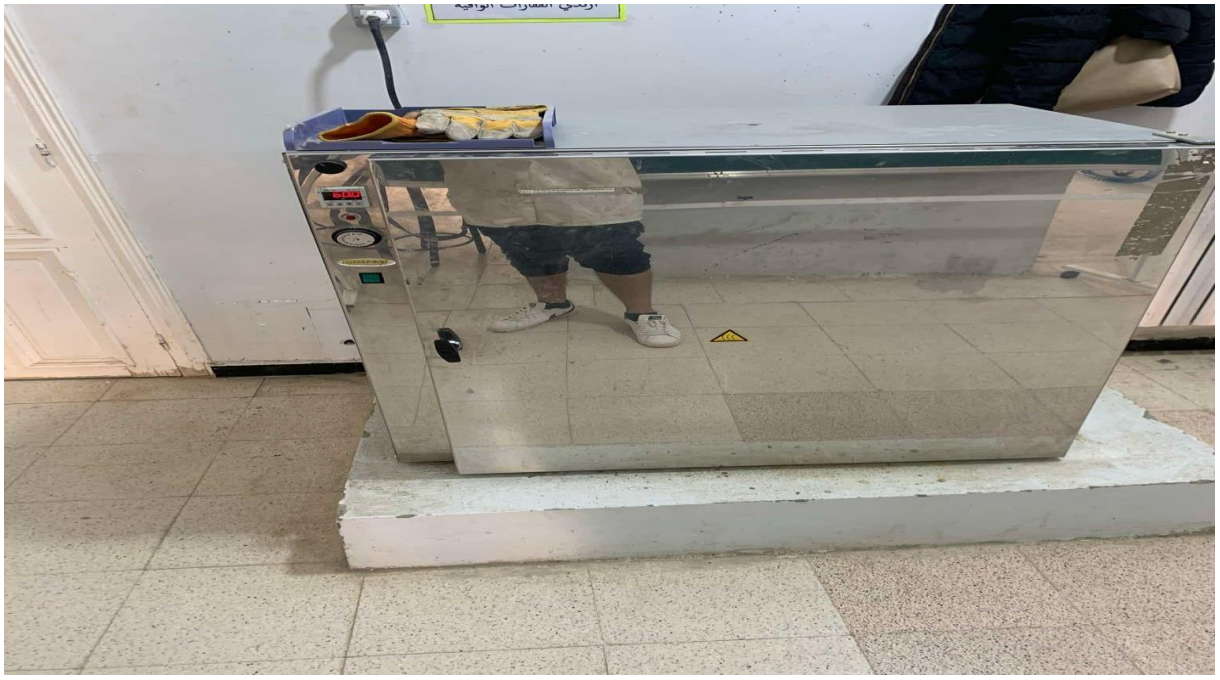


Figure 2.5 — Tuve



Figure 2.6 — Le sol argile dans le tuve



Figure 2.7 — Le sol après broyé

***Les caractéristiques physiques, chimiques des sol argileux**

Les tableaux 3.1 et 3.2 présentent respectivement les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques du sol étudié. La figure 3.3 montre la courbe de distribution granulométrique du sol étudié. Selon le système unifié de classification des sols (USCS (ASTM D2487)) ce sol est classé comme un sol argileux très plastique (CH).

Tableau 1.1 — Propriétés chimique de l'argile de Sidi-Hadjeres, Algérie.

Nom chimique	Formule chimique	%
Silice	**SiO_2**	**50,04**
Alumine	**Al_2O_3**	**14,44**
Ferrite	**Fe_2O_3**	**4,38**
Oxyde de calcium	**CaO**	**11,24**
Oxyde de magnesium	**MgO**	**2,63**
Sulfite	**SO_3**	**0,42**
Oxyde de potassium	**K_2O**	**1,7**
Oxyde de sodium	**Na_2O**	**1,24**

Tableau 1.2 — Propriétés minéralogiques du sol.

Nom minéralogique	%
R_wp	**7,32**
Calcite	**24,47**
Dolomite	**5,56**
Quartz	**27**
Pyrite	**0,03**
Illite	**24,72**
Chlorite	**1,78**
Kaolinite	**12,1**
Albite	**4,34**
Co2_XRD	**13,41**

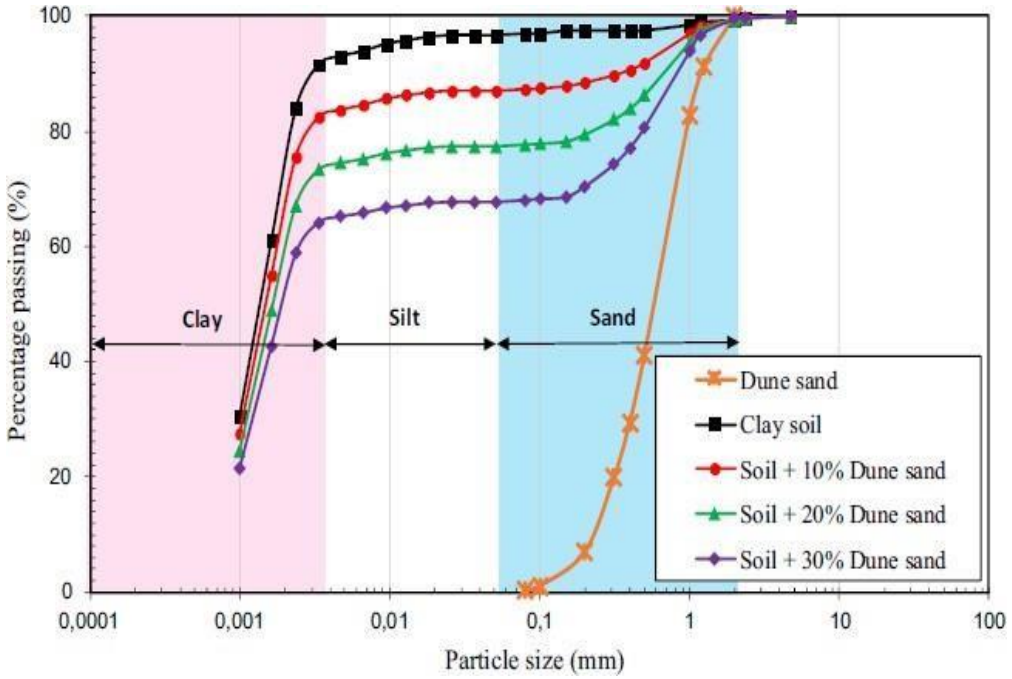


Figure 2.8 — La distribution granulométrique du sol et du sable de dune utilisés et de leur combinaison.

*** Description de Sable de dunes**

Le sable (S) utilisé dans la présente étude est un sable de dune qui se caractérise par des grains naturellement arrondis de quartz approximativement pur, avec une densité de 2,65. Il présente une couleur orange clair et provient d'Oued-Souf, situé au nord-est du Sahara algérien.

En utilisant dans cette étude des catégories de sable selon la norme **ASTM D2487**, deux classes granulométriques ont été prises en compte : le **sable fin** et le **sable moyen**. Ces classes sont définies selon les dimensions suivantes :

- **Sable fin (Fine sand)** : particules comprises entre **0,075 mm** et **0,425 mm**.
- **Sable moyen (Medium sand)** : particules comprises entre **0,425 mm** et **2,00 mm**.

La classification granulométrique a été effectuée conformément aux limites fixées par le système unifié de classification des sols (USCS). Les propriétés physiques du sable utilisé sont données dans le tableau 3.4.

Les caractéristiques physiques chimiques de Sable de dunes :

Tableau 1.3 — Propriétés géotechniques du sable des dunes d'Oued-Souf.

Propriétés du sol	Norme de test	Symboles	Valeur
Gravité spécifique	**ASTM D 854**	**G_S**	**2.65**
Analyse granulométrique par tamisage	**ASTM D 421**	**Sable %**	**99.6**
		Limon %	**0.4**
		Fines %	
Coefficient d'uniformité	**ASTM D 421**	**C_U**	**2.53**
Coefficient de courbure		**C_C**	**1.16**
Classification du sol	**ASTM D 2487**	**USCS**	**SP**
Équivalent de sable	**ASTM D 2419**	**SE**	**86.39**

2.2 Programme expérimental :

2.2.1 Conception expérimentale :

Un programme expérimental rigoureux a été élaboré afin d'étudier l'effet de l'additif naturel (le sable) sur les propriétés mécaniques d'un sol argileux fin.

Différentes proportions de sable de dunes (sable de dunes fin et sable de dunes moyen) ont été sélectionnées pour être mélangées avec le sol argileux,

dans le but de déterminer la proportion optimale permettant d'obtenir la meilleure amélioration des performances géotechniques du sol. Le sol argileux a été tamisé à travers un tamis de 3,15 mm, comme illustré dans l'image :



Figure 2.9 — Photo de tamisage de sol argile

- Le sable a été tamisé à travers trois tamis de 2 mm, 400 µm et 100 µm, comme montré dans l'image :



Figure 2.10 — Photo de tamisage de sable de dune

Trois proportions en poids de sable de dunes moyen ont été retenues :

0 %, 10 %, 20 % et 30 % du poids sec du sol, en plus d'un sol de référence sans ajout utilisé comme témoin.

- Trois proportions en poids de sable de dunes fin ont également été utilisées : 10 %, 20 % et 30 % du poids sec du sol.

2.2.2 Mélanges étudiés:

Dans le cadre de cette étude, deux groupes distincts d'échantillons ont été élaborés afin d'évaluer l'effet de l'ajout de différentes classes granulométriques de sable sur les propriétés mécaniques d'un sol argileux. Le premier groupe comprend des échantillons de sol argileux traités avec du sable fin (diamètre compris entre 0,075 mm et 0,425 mm), tandis que le second groupe comprend des

échantillons traités avec du sable grossier (diamètre supérieur à 2 mm, conformément à la norme ASTM D2487).

Pour chaque groupe, des proportions croissantes de sable ont été incorporées au sol, à raison de 10 %, 20 % et 30 % en poids par rapport à la masse sèche de l'argile. Le mélange a été soigneusement homogénéisé à l'état sec, puis humidifié selon la teneur en eau optimale obtenue lors des essais Proctor, avant d'être compacté pour la réalisation des différents essais de caractérisation (Proctor, CBR,et compression). Cette méthodologie permet de comparer l'influence de la nature et de la quantité de sable (fin ou grossier) sur le comportement mécanique global du sol traité.

Ces matériaux ont été mélangés selon les proportions précises indiquées dans le tableau suivant pour Essai Proctor normal :

Tableau 1 .4 — Combinaisons des échantillons(sable fin +sol argile) 2**kg**

Mélange d'échantillons en (%)		**Mélange d'échantillons en(g)**	
Sol(%)	**Sable(%)**	**Sol(g)**	**Sable(g)**
100	**0**	**2000**	**0**
100	**0**	**2000**	**0**
100	**0**	**2000**	**0**
100	**0**	**2000**	**0**
90	**10**	**1800**	**200**
90	**10**	**1800**	**200**
90	**10**	**1800**	**200**
90	**10**	**1800**	**200**
80	**20**	**1600**	**400**
80	**20**	**1600**	**400**
80	**20**	**1600**	**400**
80	**20**	**1600**	**400**
70	**30**	**1400**	**600**
70	**30**	**1400**	**600**
70	**30**	**1400**	**600**
70	**30**	**1400**	**600**

L'essai Proctor a été réalisé dans le but de déterminer les **paramètres optimaux de compactage** du sol étudié, à savoir la **teneur en eau optimale (OMC)** et la **densité sèche maximale (MDD)**. Ces deux paramètres sont essentiels pour simuler, en laboratoire, les conditions de compactage réalistes du sol en place, telles qu'elles seraient obtenues lors de travaux de terrassement ou de fondation.

Les valeurs de w_opt et γd_{max} obtenues à l'issue de l'essai Proctor ont été utilisées comme références pour la préparation des échantillons destinés aux essais mécaniques, notamment :

- **L’essai de compression simple**, afin d’évaluer la résistance mécanique à court terme du sol traité.
- **L’essai CBR (California Bearing Ratio)**, destiné à estimer la portance du sol compacté, en particulier pour des applications routières ou de plateforme.

Pour chaque type de mélange (sol naturel, sol traité avec sable fin, sol traité avec sable grossier), les échantillons ont été préparés en respectant la teneur en eau optimale spécifique à chaque formulation, puis compactés pour atteindre la densité sèche maximale correspondante. Cette procédure garantit la reproductibilité des conditions de compactage et la fiabilité des résultats mécaniques obtenus lors des essais.

Tableau 1 .5 — Quantité de mélange pour l’essai CBR (California Bearing Ratio) :

Sable moyen

Combinaison	Eau (g)	Argile (g)	Sable(g)
S0	1300.2	5500	0
S10M	1210.1	4950	550
S20M	1133.482	. 4400	1100
S30M	1006.99	3850	1650

Sable fin

Combinaison	Eau (g)	Argile (g)	Sable(g)
S10F	1150.66	4950	550
S20F	1104.07	. 4400	1100
S30F	1061,81	3850	1650

Tableau 1 .6 — Quantité de mélange pour l’essai de compression simple:

Sable moyen

Combinaison	Eau (g)	Argile (g)	Sable(g)	quantité pour compression
S0	237.716	1005.57	0.00	388.53
S10M	234.075	905.01	100.56	387.39
S20M	224.482	804.45	201.11	384.39
S30M	208.084	703.90	301.67	379.27

Sable fin

Combinaison	Eau (g)	Argile (g)	Sable(g)	quantité pour compression
S10F	223.043	905.01	100.56	383.94
S20F	217.969	804.45	201.11	382.36
S30F	220.283	703.90	301.67	383.08

2.2.3 Essais réalisés:

Chaque mélange a été soumis à une série d'essais de laboratoire afin d'évaluer les changements dans les propriétés géotechniques du sol.

Les essais réalisés comprennent :

3.1.1 Détermination des caractéristiques de compactage (Proctor)

L'essai Proctor de compactage est une méthode de laboratoire utilisée pour déterminer expérimentalement la teneur en eau optimale à laquelle un type de sol donné atteint sa densité sèche maximale. Cet essai est essentiel pour comprendre les caractéristiques de compactage de différents sols en fonction de leur teneur en eau, y compris les sols argileux. Il simule les processus de compactage in situ généralement effectués lors de la construction de remblais, de couches de fondation de routes et d'autres ouvrages en terre. L'essai consiste à compacter un échantillon de sol à différentes teneurs en eau à l'aide d'une méthode standard de compactage, généralement réalisée à l'aide d'une dame ou d'un compacteur mécanique. La masse volumique sèche du sol compacté est ensuite mesurée, et une courbe de compactage est tracée pour déterminer la masse volumique sèche maximale et la teneur en eau optimale. Cet essai fournit des informations précieuses sur les caractéristiques de compactage du sol, ce qui est crucial pour la conception et la réalisation des ouvrages en terre. L'objectif de l'essai Proctor dans cette étude est de fournir les paramètres de compactage nécessaires à la préparation des échantillons de sol traité. Cette procédure est essentielle pour garantir que le sol compacté atteindra les performances requises sur le terrain.

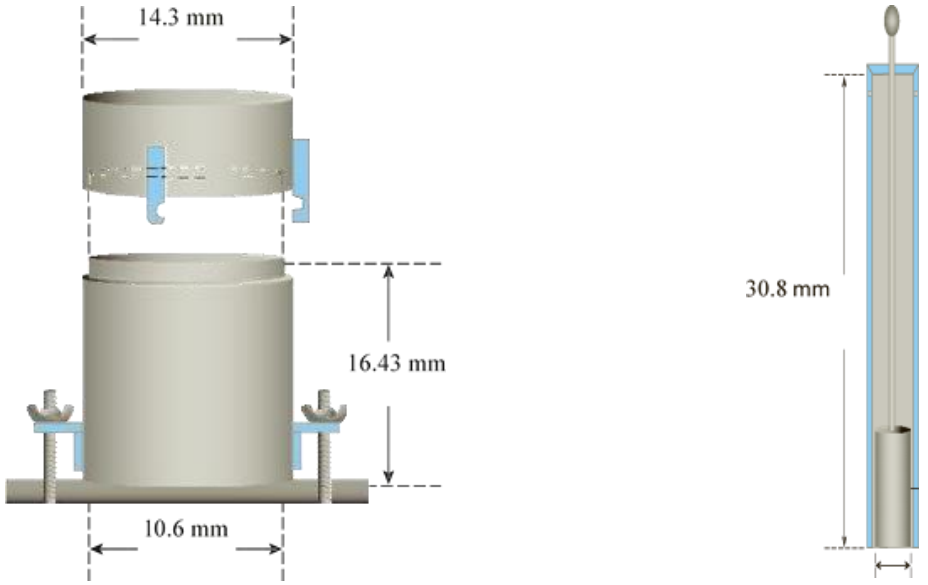
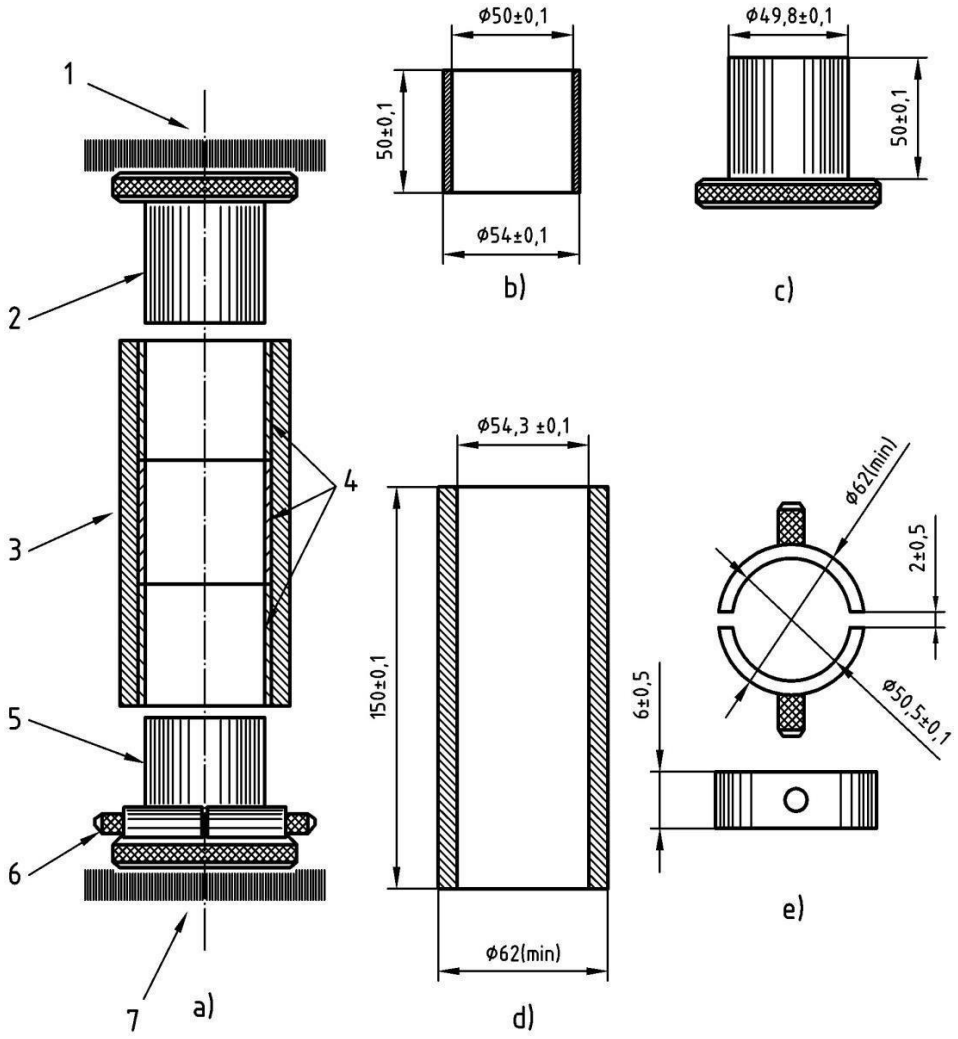


Figure 2.11— Équipement d'essai de Proctor : (a) moule ; (b) dame .

3.1.2 Essai de compression uni axial

La résistance à la compression simple des sols argileux est déterminée selon la norme ASTM D2166. Cette méthode couvre la détermination de la résistance à la compression simple des sols cohésifs à l'état non remanié, remanié ou compacté, en appliquant une charge axiale de manière contrôlée en déformation. L'essai donne une valeur approximative de la résistance des sols cohésifs en termes de contraintes totales. Il est applicable uniquement aux matériaux cohésifs qui ne suintent pas et ne perdent pas d'eau pendant la charge, et qui conservent une résistance intrinsèque après la suppression des pressions de confinement, comme les argiles ou les sols cimentés. Le principal objectif de cet essai est d'obtenir rapidement une mesure de la résistance à la compression pour les sols présentant une cohésion suffisante pour permettre un essai sans confinement. L'essai est utilisé en ingénierie géotechnique pour estimer grossièrement la résistance du sol et définir des techniques de construction appropriées. L'essai de compression simple est réalisé à l'aide d'une machine de compression uniaxiale (machine triaxiale), et les résultats sont exprimés en termes de résistance à la compression simple (qu) du sol.


1
2
3
4
5
6
7
a)
ϕ50±0,1
50±0,1
ϕ54±0,1
b)
ϕ49,8±0,1
50±0,1
c)
ϕ54,3 ±0,1
150±0,1
ϕ62(min)
d)
ϕ62(min)
2±0,5
ϕ50,5±0,1
6±0,5
e)

1Plateau supérieur de la presse	a) Ensemble de trois étuis disposés dans le contre-moule en position de moulage
2 Piston supérieur	b) Détail d'un étui — Matière : Acier inox
3 Contre-moule	c) Détail d'un piston — Matière : Acier mi-dur
4 Étuis	d) Détail du contre moule — Matière : Acier mi-dur
5 Piston inférieur	e) Détail des demi-coquilles d'espacement — Matière : Acier mi- dur
6 Coquilles d'espacement	7-Plateau inférieur de la presse

Figure 2.12 — Ensemble de moulage utilisé pour la confection des éprouvettes

3-1-3 Essai CBR (California Bearing Ratio)

L'essai CBR (California Bearing Ratio) est un outil essentiel en géotechnique et en ingénierie routière, jouant un rôle fondamental dans la stabilité et la durabilité des routes, pistes d'atterrissage et autres infrastructures. En mesurant la capacité portante des couches de fondation des chaussées (sol de fondation, couche de forme et couche de base), l'essai CBR permet aux ingénieurs de déterminer la résistance des matériaux et leur aptitude à supporter des charges importantes sans déformation excessive. Ces informations sont indispensables pour concevoir des structures de chaussée capables de résister aux charges de trafic et aux conditions environnementales sur le long terme. La valeur CBR influence directement l'épaisseur et la composition des différentes couches de la chaussée, garantissant ainsi une construction économique et durable. De plus, cet essai est largement utilisé dans le contrôle de qualité pendant les travaux de construction, en vérifiant que les matériaux répondent aux exigences de résistance spécifiées. Sans l'essai CBR, les ingénieurs manqueraient d'un outil fiable pour évaluer la résistance des sols, ce qui pourrait entraîner des défaillances prématurées de la chaussée, une augmentation des coûts de maintenance, et des risques pour la sécurité. L'essai CBR est donc indispensable pour la réalisation d'infrastructures de transport sûres, efficaces et durables.



Figure 2.13 — L'essai CBR (California Bearing Ratio).

2.3 Préparation des échantillons:

2.3.1 Procédures de mélange et de compactage:

Les échantillons ont été préparés en séchant puis en pesant avec précision le sol argileux et le sable selon les proportions choisies.
Un mélange manuel a été effectué pour assurer une répartition homogène du sable dans le sol.
Ensuite, la quantité d'eau correspondant à l'humidité optimale.
(déterminée à partir de l'essai Proctor normal) a été ajoutée, et le mélange a été placé dans un sac plastique pendant 24 heures pour permettre un équilibre hydrique interne.







Par la suite, le mélange a été compacté dans des moules cylindriques en utilisant un méthode manuelle compactage par couches égales,
afin d’obtenir des échantillons conformes aux exigences des essais.







Figure 2.14— Photographie de l'équipement de l’essai de Proctor.

- **2.3.2 Conservation et préparation pour les essais**

  Après le compactage, les échantillons ont été démoulés puis placés dans un four pendant 24 heures avant d’être sortis pour les essais.





Figure 2.15— Photographie d'échantillons
Dans le tuve pendant 24 heures pour calculer **Teneur en eau**

2.3.3 Conservation et Préparation pour les Essai de compression uni axial:



Figure 2.16 — Préparation pour les Essai de compression uni axial



Figure 2.17 — l'échantillons de Essai de compression

2.3.4 Conservation et Préparation pour les Essai de CBR (California Bearing Ratio)



Figure 2.18 — Préparation pour les Essai de CBR (California Bearing Ratio)



Figure 2.19 — Photographie de l'équipement de l’essai . CBR (California Bearing Ratio)

Chapitre 3

Présentation et interprétation des résultats

Présentation et interprétation des résultats

3-1 Introduction :

L'amélioration des sols argileux constitue un enjeu majeur en géotechnique, en raison de leurs faibles performances mécaniques, notamment une portance réduite, une forte compressibilité et une sensibilité à l'eau. Dans ce contexte, le recours à des matériaux d'amendement tels que les sables constitue une méthode simple, économique et écologique pour améliorer les propriétés de ces sols. Le traitement mécanique par ajout de sable permet notamment de modifier la granulométrie du mélange sol-traitement, influençant ainsi de manière significative les caractéristiques de compactage, de compressibilité et de portance.

Ce chapitre est dédié à l'étude expérimentale de l'effet de l'ajout de deux types de sable — sable moyen et sable fin — sur un sol argileux local. L'objectif principal est d'analyser et de comparer l'impact de ces deux types de sable sur les paramètres fondamentaux de comportement mécanique du sol, à savoir :

Les paramètres de compactage : densité sèche maximale et teneur en eau optimale, déterminés à partir de l'essai Proctor modifié ;

Les caractéristiques de compression : à travers l'essai de compressibilité uniaxiale ;

La portance du sol : évaluée au moyen de l'essai du California Bearing Ratio (CBR).

Les résultats obtenus permettront d'identifier le type de sable le plus efficace pour améliorer les performances de l'argile étudiée, en fonction des exigences spécifiques d'un projet de construction routière ou de plateforme industrielle.

3-2 Compactage (Proctor)

L'ajout de sable dans une matrice argileuse modifie de manière significative les paramètres de compactage, en particulier la densité sèche maximale (MDD) et la teneur en eau optimale (OMC). L'étude montre que lorsque la proportion de sable augmente (10 %, 20 %, puis 30 %), la densité sèche maximale du mélange augmente également, ce qui reflète une amélioration de la compacité du sol. Cette augmentation est plus marquée avec le sable moyen qu'avec le sable fin. En effet, les grains de sable moyen, de taille plus importante, remplissent plus efficacement les vides entre les particules fines d'argile, ce qui réduit la porosité globale du sol et permet un meilleur agencement des particules. Par conséquent, le mélange devient plus dense sous l'effet du compactage. En parallèle, on observe une diminution de la teneur en eau optimale à mesure que la teneur en sable

augmente, et cela s'explique par la nature moins hydrophile du sable comparée à celle de l'argile. L'argile, par sa structure minérale en feuillets, retient beaucoup d'eau dans ses interstices, tandis que le sable, surtout moyen, a une surface spécifique plus faible et ne retient pratiquement pas d'eau. Par conséquent, plus le pourcentage de sable augmente, moins le sol a besoin d'eau pour atteindre sa densité maximale. Le sable moyen, en particulier, favorise un drainage rapide de l'eau excédentaire et permet une compaction plus efficace à une teneur en eau plus faible. En résumé, l'utilisation de sable – et plus efficacement encore le sable moyen – permet non seulement d'augmenter la densité sèche maximale, mais aussi de réduire la quantité d'eau nécessaire pour atteindre cette densité. Cette amélioration des caractéristiques de compactage rend le sol traité plus stable et mieux adapté aux applications en génie civil, notamment dans les remblais, les plateformes et les couches de fondation.

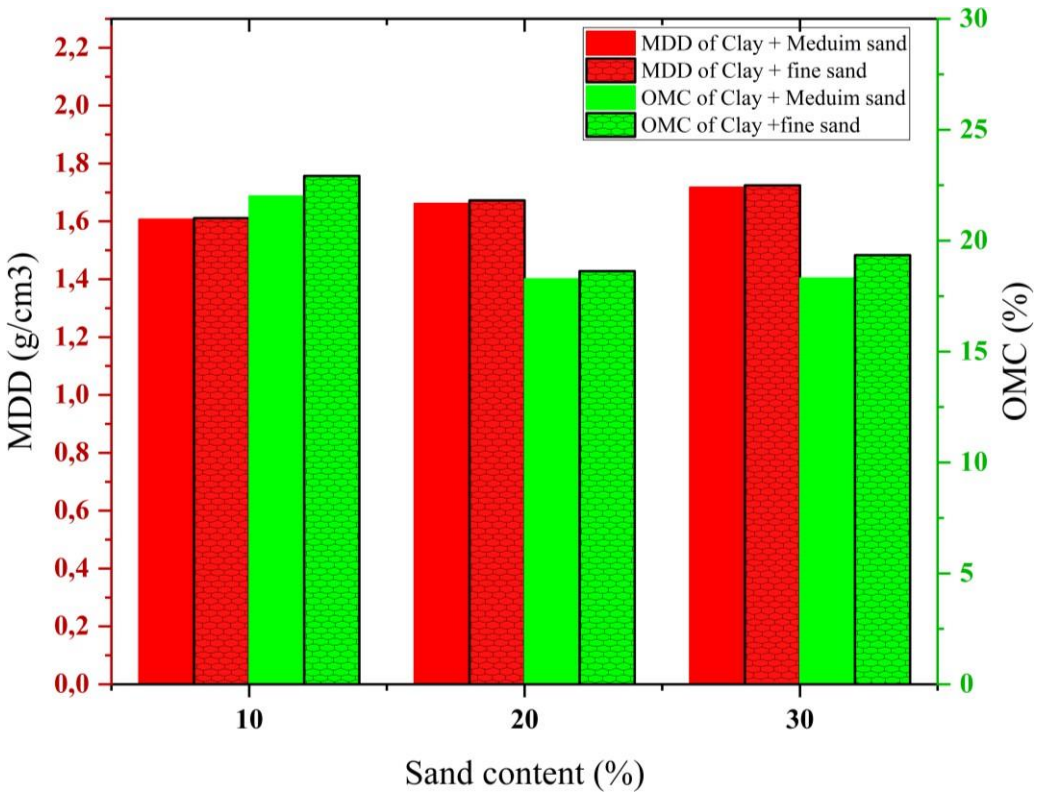


Figure 3-1 : Évolution des paramètres de compactage d'un sol argileux en fonction du pourcentage de sable fin (SF) et de sable moyen (SM).

3-3 La résistance à la compression Rc :

L'étude de l'évolution de la résistance à la compression (Rc) d'un sol argileux en fonction de l'ajout de sable moyen (SM) et de sable fin (SF) révèle un comportement non linéaire, influencé à la fois par la granulométrie du sable ajouté et par son taux d'incorporation. La résistance de l'argile naturelle, sans ajout de sable, est de 302,02 kPa et constitue la base de comparaison.

L’ajout de 10 % de sable, qu’il soit moyen ou fin, améliore significativement la résistance à la compression de l’argile. Cette amélioration est plus marquée avec le sable moyen, dont la résistance atteint environ 435 kPa, contre environ 410 kPa avec le sable fin. Cette augmentation s’explique par l’effet de stabilisation granulaire : les particules de sable remplissent les vides intergranulaires de l’argile, réduisent la compressibilité du sol, et favorisent la densification du mélange. Le sable moyen, par sa granulométrie plus grossière, forme un squelette granulaire plus rigide qui permet une meilleure transmission des charges, d’où une résistance plus élevée.

En revanche, à partir de 20 % de sable, la résistance à la compression diminue progressivement. Pour le sable moyen, la Rc chute à environ 360 kPa, et pour le sable fin, elle descend à 270 kPa. Ce comportement indique une dégradation de la matrice argileuse initiale, dominée par la nature cohésive du sol. Un excès de sable perturbe la continuité du réseau de liaisons interparticulaires argileuses, réduisant ainsi la cohésion globale du sol. L'effet bénéfique du sable devient donc contre-productif au-delà de cette limite.

À 30 % de sable, la résistance à la compression devient même inférieure à celle de l’argile naturelle. Les valeurs chutent à environ 240 kPa pour le sable moyen et 225 kPa pour le sable fin. Cela confirme que l’ajout excessif de sable altère la structure du sol et induit une perte de performance mécanique. Dans ce cas, le comportement du mélange tend vers celui d’un matériau granulaire peu cohésif, moins apte à résister à des charges de compression.

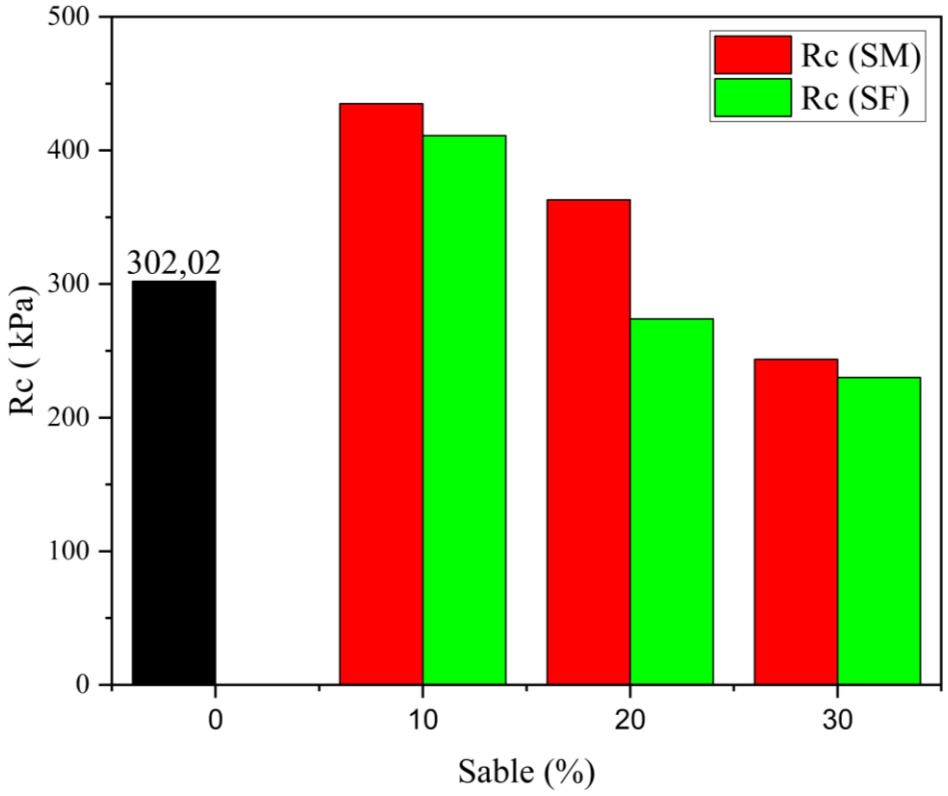


Figure 3-2 : Évolution de la résistance à la compression (Rc) d'un sol argileux en fonction du pourcentage de sable fin (SF) et de sable moyen (SM).

a- Importance de la résistance à la compression (Rc)

La résistance à la compression non confinée (Rc) est une propriété mécanique essentielle pour l'évaluation des sols cohésifs, notamment les argiles. Elle mesure la contrainte maximale que le sol peut supporter avant de se rompre, sans confinement latéral. Cette valeur permet de caractériser la cohésion du matériau et son comportement en portance dans des ouvrages comme les remblais, fondations superficielles ou digues. Plus la Rc est élevée, plus le sol est résistant et stable. Il existe des classifications empiriques qui permettent d'associer les valeurs de Rc à une qualité géotechnique du sol.

b- Classification typique selon Rc

Tableau 1 : Classification indicative des sols selon la résistance à la compression Rc.

Rc (kPa)	Qualité du sol	Portance estimée	Utilisation courante
< 100 kPa	Très faible	Très faible portance	Sols organiques, argiles très molles
100 – 200 kPa	Faible	Faible portance	Sols argileux mous, peu porteurs
200 – 300 kPa	Moyenne	Portance modérée	Argiles compactées, utilisables avec précautions
300 – 400 kPa	Bonne	Bonne portance	Sols améliorés, stabilisés, couches de forme
> 400 kPa	Très bonne	Excellente portance	Sols traités, mélanges optimisés, remblais structuraux

Cette classification varie légèrement selon les normes locales (NF P94-093, ASTM, etc.), mais elle offre un bon cadre général pour l'évaluation géotechnique.

c- Application à votre sol argileux (naturel et amélioré)

Dans votre étude :

Le sol naturel présente une résistance Rc de 302,02 kPa, ce qui le place dans la classe des sols de qualité moyenne à bonne. Cela signifie que le sol peut être utilisé en fondation pour des structures légères ou après amélioration pour des structures plus exigeantes.

Avec 10 % de sable, la Rc atteint ~440 kPa (SM) et ~410 kPa (SF), ce qui indique une amélioration significative de la cohésion et de la portance. Le sol passe alors dans la catégorie des sols très bons, capables de supporter des charges plus élevées.

À 20 % de sable, la Rc chute à environ 360 kPa (SM) et 270 kPa (SF). Bien que la performance reste correcte, on observe une diminution de la résistance, probablement due à une réduction du lien matriciel entre grains d'argile et sable.

À 30 % de sable, les Rc tombent à ~240 kPa (SM) et ~230 kPa (SF). Ces valeurs replacent le sol dans la classe moyenne, voire faible selon l'usage prévu. La structure du sol devient moins cohésive et donc moins performante mécaniquement.

d- Interprétation générale

Le comportement de la résistance à la compression montre que l'ajout modéré de sable (jusqu'à 10 %) renforce la structure interne de l'argile en comblant les vides et en augmentant la densité. Au-delà de ce seuil, l'excès de sable agit comme un élément perturbateur, cassant la cohésion initiale du sol argileux sans apporter suffisamment de frottement interne pour compenser. Le sable moyen (SM), avec ses grains plus grossiers, a un effet initial plus structurant, mais devient moins efficace à forte teneur. Le sable fin (SF) offre une meilleure intégration à la matrice argileuse, mais sa capacité à renforcer mécaniquement le sol est plus limitée.

3-4 CBR

L'analyse des résultats expérimentaux met en évidence l'impact significatif de l'ajout de sable, qu'il soit fin (SF) ou moyen (SM), sur l'amélioration de l'indice CBR d'un sol argileux. Le sol naturel présente un CBR de 7,19 %, traduisant une portance relativement faible et une capacité portante insuffisante pour des structures routières sans traitement. L'ajout de sable améliore cette performance, avec un effet particulièrement marqué à faible teneur.

À 10 % d'incorporation, les deux types de sable permettent un gain remarquable de portance. Le CBR atteint environ 13 % avec le sable moyen et 13,5 % avec le sable fin. Cette amélioration est due à la densification du sol, favorisée par l'intégration des particules sableuses dans la matrice argileuse. Le sable améliore la compacité et limite la déformation sous charge, en particulier dans le cas du sable fin qui, en raison de sa granulométrie plus réduite, se répartit plus uniformément entre les particules d'argile.

Cependant, au-delà de 10 %, l'effet stabilisant du sable atteint un plateau. À 20 %, le CBR reste stable (~12,5–13 %) pour les deux types de sable. Ce comportement indique que l'apport supplémentaire de sable n'entraîne plus de gain net, probablement en raison de la dilution progressive de la phase argileuse qui joue un rôle clé dans la cohésion du mélange.

À 30 %, une baisse du CBR est observée pour les deux sables, avec des valeurs proches de 9 % pour le SM et 9,5 % pour le SF. Cette diminution s'explique par une rupture d'équilibre dans la structure du sol : une proportion excessive de sable conduit à un comportement granulaire, avec perte de cohésion et diminution de la capacité portante. Notons que le sable fin conserve de meilleures performances à ce stade, ce qui pourrait être lié à sa meilleure interaction avec la matrice fine de l'argile.

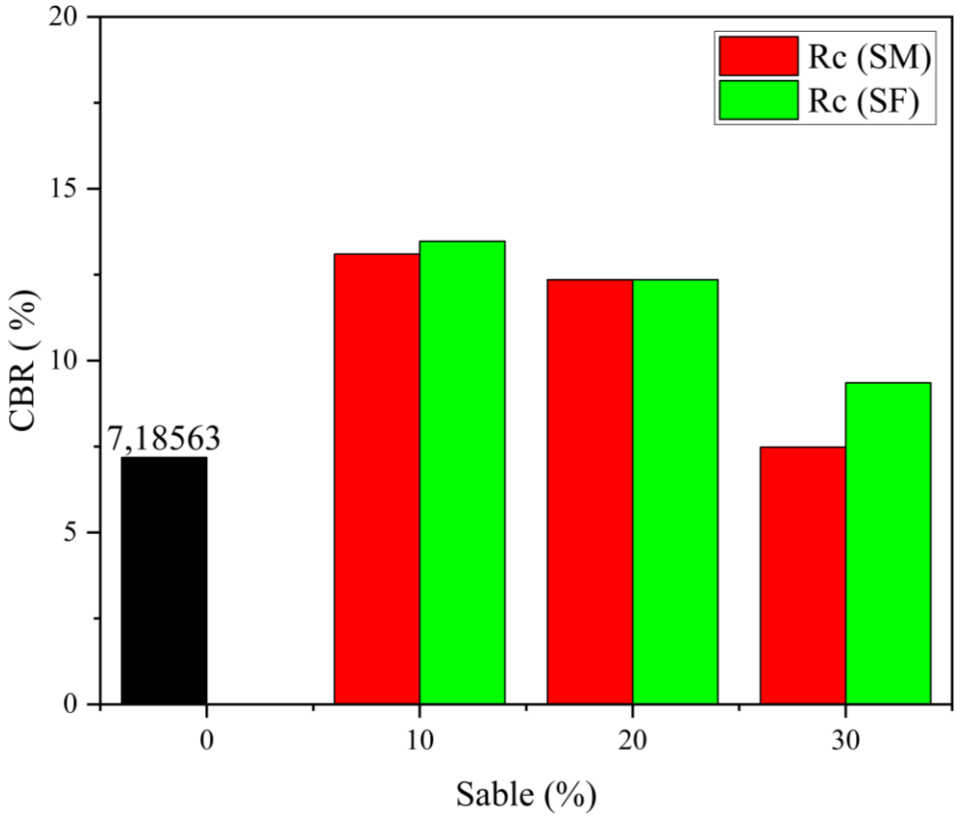


Figure 3-3 : Variation de l'indice CBR d'un sol argileux en fonction de la teneur en sable fin (SF) et sable moyen (SM).

a- Classification des sols selon l'indice CBR

L'indice CBR (California Bearing Ratio) est un paramètre largement utilisé en géotechnique pour estimer la portance d'un sol, en particulier dans le domaine des infrastructures routières. Il permet de classer les sols selon leur capacité à supporter les charges transmises par les couches supérieures

de la chaussée. Plus la valeur du CBR est élevée, plus le sol est apte à recevoir des charges importantes sans déformation excessive. La classification courante distingue plusieurs catégories de portance : un sol avec un CBR inférieur à 3 % est considéré comme de très faible qualité, tandis qu'un sol ayant un CBR supérieur à 20 % est classé comme excellent, généralement de nature granulaire et compacté.

b- Application à l'argile naturelle

Dans l'état naturel, le sol argileux présente un CBR de l'ordre de 7,19 %. Cette valeur situe le matériau dans la catégorie des sols de portance moyenne. Ce type de sol est généralement inadapté pour servir directement de fondation à des structures routières sans traitement, car il risque de se déformer sous les charges appliquées, en particulier en conditions humides où les argiles deviennent plastiques et instables. Il nécessite donc une amélioration mécanique ou chimique pour augmenter sa capacité portante.

c- Effet de l'ajout de sable et classification associée

L'incorporation de sable dans l'argile naturelle a permis d'augmenter sensiblement l'indice CBR. Avec 10 à 20 % de sable, qu'il soit moyen (SM) ou fin (SF), les valeurs du CBR atteignent environ 12,5 à 13 %, ce qui élève le sol dans la classe des sols de bonne qualité. Dans cette plage, le sol modifié devient apte à être utilisé comme couche de forme ou fondation pour routes faiblement ou moyennement circulées, selon les recommandations géotechniques usuelles. Cela reflète un effet bénéfique du sable qui améliore la compacité du mélange et limite la déformation sous charge.

d- Dégradation de la portance à forte teneur en sable

Au-delà de 20 %, notamment à 30 % de sable, une diminution du CBR est observée, avec des valeurs de 9,5 % (SF) et 7,8 % (SM). Ces résultats reclassent le sol dans la catégorie moyenne, signalant une perte de performance. Ce comportement peut s'expliquer par une dilution excessive de la matrice argileuse, qui joue un rôle essentiel dans la cohésion du mélange. Une quantité trop élevée de sable modifie la structure du sol, réduisant la compacité et augmentant les vides intergranulaires, ce qui affecte négativement la résistance à la pénétration. Ce phénomène est d'autant plus marqué avec le sable moyen, dont la granulométrie plus grossière limite l'interaction avec les particules fines d'argile.

Tableau 3-2 : Classification des sols selon l'indice CBR.

CBR (%)	Qualité du sol	Classe de portance	Utilisation typique
< 3 %	Très mauvaise	Très faible	Sols argileux mous, non utilisables sans amélioration
3 % à 5 %	Mauvaise	Faible	Couche de fondation faible, nécessite traitement
5 % à 10 %	Moyenne	Moyenne	Sols acceptables pour plateforme légère
10 % à 20 %	Bonne	Bonne	Couche de fondation ou de forme stabilisée
> 20 %	Très bonne	Excellente	Sols granulaires denses, utilisables en couche supérieure ou fond de forme

Conclusions Générales et Recommandations futures

Conclusion générale et Perspectives

L'étude menée sur l'argile naturelle et améliorée par l'ajout de sable fin (SF) et de sable moyen (SM) met en évidence des améliorations notables des performances mécaniques du sol, notamment en termes de résistance à la compression (Rc) et d'indice CBR. Ces propriétés sont fortement influencées par la **taux de compactage** appliqué, qui agit directement sur la densité sèche et la cohésion des particules.

L'ajout de sable dans une matrice argileuse permet de modifier sa structure interne. À **faibles teneurs (10 %)**, le sable joue un rôle positif en **améliorant la compacité, réduisant les vides** et en **renforçant l'ossature granulaire du sol**, ce qui se traduit par une augmentation de la résistance à la compression et de la portance (CBR). Cette amélioration est plus marquée avec le **sable moyen (SM)**, dont la granulométrie plus grossière permet une meilleure interconnexion des grains et une redistribution efficace des contraintes.

Cependant, à **des teneurs plus élevées (≥ 20 %)**, on observe une **diminution progressive de Rc et du CBR**. Cela s'explique par une perte de cohésion entre les particules d'argile, le sable devenant alors un élément dispersé qui fragilise la matrice. Le sol devient alors plus granulaire, moins plastique, mais aussi moins résistant en compression, surtout si le compactage n'est pas optimal. Cela confirme l'existence d'un **dosage optimal** en sable, situé autour de **10 %**, au-delà duquel les performances diminuent.

Le **compactage** joue un rôle déterminant dans l'ensemble des résultats. En effet, un bon compactage permet de rapprocher les particules, de réduire l'humidité interstitielle, et de maximiser les résistances mécaniques. Plus un sol est compacté de manière optimale (près de sa **Optimum Proctor**), plus ses performances en **Rc** et **CBR** sont élevées, quel que soit le type de sable utilisé. Un compactage insuffisant peut compromettre l'effet bénéfique du sable, tandis qu'un compactage excessif pourrait nuire à la perméabilité ou à la stabilité volumique du matériau.

En résumé, l'ajout modéré de sable (notamment moyen) combiné à un compactage adéquat constitue une **méthode efficace d'amélioration des sols argileux**, notamment pour des applications routières ou de plateformes. Toutefois, il est essentiel d'identifier la **teneur optimale en sable**, de contrôler soigneusement la **teneur en eau** et de respecter les **paramètres de compactage** pour garantir la stabilité et la performance mécanique du sol traité.

Perspectives

À la lumière des résultats obtenus, plusieurs **perspectives de recherche** et d'application peuvent être envisagées pour approfondir et optimiser l'amélioration des sols argileux par ajout de sable :

1. **Optimisation granulométrique des mélanges**

   Il serait pertinent de mener une étude granulométrique détaillée pour déterminer la courbe idéale de répartition des grains (argile + sable) qui maximise les propriétés mécaniques du sol. Un mélange bien gradué pourrait offrir une densité maximale et une meilleure stabilité à long terme.

2. **Étude du comportement à long terme**

   L'évaluation du comportement des sols traités sous des conditions réelles (humidité variable, cycles de mouillage–séchage ou gel–dégel) permettrait de juger de leur durabilité. Des essais de résistance en conditions climatiques simulées compléteraient utilement les données en laboratoire.

3. **Intégration de liants hydrauliques**

   L'association du sable avec un liant tel que la chaux ou le ciment pourrait renforcer encore davantage la cohésion du mélange. Une étude comparative entre sable seul et sable + liant permettrait d'identifier les solutions les plus économiques et performantes pour les couches de forme ou les plateformes industrielles.

4. **Analyse microstructurale (SEM, DRX)**

   L'utilisation d'outils de caractérisation microscopique permettrait de comprendre les mécanismes d'interaction entre les grains de sable et les particules d'argile. Cela aiderait à modéliser plus précisément l'impact des traitements granulaires sur la structure interne du sol.

5. **Modélisation numérique**

La modélisation par éléments finis ou par approche micromécanique pourrait être utilisée pour simuler le comportement du sol modifié sous diverses sollicitations. Cela permettrait d'anticiper les performances d'ouvrages réels à partir des résultats de laboratoire.

6. **Applications en contexte réel**

Il serait également intéressant de valider les résultats en **grande échelle**, en appliquant les mélanges optimisés sur un chantier pilote (voie d'accès, plateforme industrielle, route légère) pour confirmer leur efficacité et leur comportement en exploitation.