REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITEYAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité :Géotechnique

ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES PROPRIÉTÉS DE CISAILLEMENT D'UN SABLE LIMONEUX STABILISÉ PAR UNE EMULSION DE BITUME

Présenté par :

BOUTIARA Hocine

FERRAH Youcef

Proposé et Dirigé par :

Dr. OTSMANE Lalahoum

Mr. BENYAHIA Ahmed Bilal

Promotion Juin 2021

REMERCIMENTS

Remerciement

Nous remercions dieu le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté afin de poursuivre nos études Nous voulons remercier Dr. OTSMANE Lalahoum et Mr. BENYAHIA Ahmed Bilal nos encadreurs non pas par simple courtoise mais pour ses précieux conseils et son orientation qui a permis de mener à bien ce travail nous adressons nos vifs remerciements à messieurs les membres de jurys a qui voulut accepter de participer au jury de notre thèse une précieuse pensée est adressée au chef de laboratoire monsieur AISSOU Nadhir, et M^{elle} Kawther.

Un grand merci est adressé à tous les ingénieurs et les travailleurs du hall technologique pour son aide et sa disponibilité.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil qui nous ont offert tout ce savoir.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Nous les dits merci de tout notre cœur.

DEDICACES

Dédicace

Je dédie ce travail aux personnes les plus chères au monde après mon Dieu,

- A mes chères parents qui m'ont toujours entouré de leur affection, mes frères et mes sœurs que dieu les gardes et préserve, et toute la famille' **BOUTIARA**'.

- A mes directeurs de thèse Dr. OTSMANE Lalahoum et Mr. Benyahia Ahmed Bilal pour ses encouragements. J'apprécié grandement ces méthodes de travail et la liberté qu'il m'a accordé au cours de la préparation et l'organisation de ce travail de recherche.

- Et enfin, à tous ceux qui m'ont accompagné dans mes études et à tous mes chers amis sans exception.

BOUTIARA Hocine

Dédicace

Je dédie ce travail aux personnes les plus chères au monde après mon Dieu,

- A mes chères parents qui m'ont toujours entouré de leur affection, mes frères Sofian, Zakaria et Radouan et mes sœurs que dieu les gardes et préserve, et toute la famille' **FERRAH**'.

- A mes directeurs de thèse Dr. OTSMANE Lalahoum et Mr. BENYAHIA Ahmed Bilal pour ses encouragements. J'apprécié grandement ces méthodes de travail et la liberté qu'il m'a accordé au cours de la préparation et l'organisation de ce travail de recherche.

- Et enfin, à tous ceux qui m'ont accompagné dans mes études et à tous mes chers amis (amor, said ,khalifa , amer). promotion de « 2021 ».

FERRAH Youcef

RESUMES

ملخص:

تتنوع العواقب الناتجة عن الزلازل بشكل كبير وتؤثر على الأرض المنحدرة (الانهيار الأرضي) والتشوهات (الأفقية والرأسية) في البنية التحتية للطرق والسكك الحديدية.

بسبب توصيف التربة الرملية على أنها تربة متدرجة بشكل سيئ وذات نفاذية عالية ، واستخدامها كطبقة سفلية أو ردم في طبقات الأساس والأساس للطرق والطرق السريعة. بعض أشكال التثبيت ضرورية لتحسين خصائص هذه المواد.

في هذا الجانب ، هدفنا في هذه الدراسة هو تقديم مساهمة من أجل تقييم خصائص القص للرمل الغريني المعزز بمستحلب البيتومين ، مما يسمح بالتصاق الجسيمات الرملية الطينية لضمان الأداء الميكانيكي الجيد للمخاليط.

ستتم مقارنة النتائج المتوقعة في هذه الدراسة أولاً وقبل كل شيء في الأدبيات الحديثة.

الكلمات المفتاحية :

القص المباشر ، زاوية الاحتكاك ، التماسك ، قوة القص ، الرمل الغريني ، مستحلب البيتومين.

Résumé :

Les conséquence engendrées par les séismes sont trés variées et touchant les sols de façon d’un glissement de terrain, des déformations (horizontales et verticales) dans les infrastructures routière et ferroviaires.

En raison de la caractérisation des sols sableux comme des sols mal calibrés à haute perméabilité, et de leur utilisation comme couche de fondation ou remblai dans les couches de base et de fondation des routes et autoroutes. Une certaine forme de stabilisation est nécessaire pour améliorer les caractéristiques de ces matériaux.

Dans cette optique, notre objectif dans cette étude est d'apporter une contribution dans le but d'évaluation des propriétés de cisaillement d'un sable limoneux renforcés par une émulsion de bitume, permettant par adhésion des particules sablo-limoneuse d'assurer aux mélanges de très bonnes performances mécaniques.

Les résultats attendus dans cette étude seront de prime abord confrontés dans la littérature récente.

Mots-clés :

Cisaillement direct, Angle de frottement, cohésion, Résistance au cisaillement, sable limoneux, émulsion de bitume.

Abstract:

The consequences caused by earthquakes are very varied and affect sloping soils (landslides), deformations (horizontal and vertical) in road and rail infrastructures.

Due to the characterization of sandy soils as poorly graded soils with high permeability, and their use as foundation layer or fill in the base and foundation layers of roads and highways. Some form of stabilization is needed to improve the characteristics of these materials.

In this perspective, our objective in this study is to make a contribution to the evaluation of the shear properties of a silty sand reinforced by a bitumen emulsion, allowing by adhesion of the sandy-silty particles to ensure the mixtures of very good mechanical performances.

The results expected in this study will be confronted first of all in the recent literature.

Keywords :

Direct shear, Friction angle, cohesion, Shear strength, silty sand, bitumen emulsion.

Sommaire

Remercîments
Dédicaces
Résumes
Liste des figures
Liste des tableaux
Introduction général…….. 01

***Chapitre I :*synthèse bibliographique**

I.1. Introduction……. 03
I.2. Généralité sur les sols……. 04
I.2.1.Propriétés des sols…… 05
I.2.2 Types de sols…… 06
I.2.3 Propriétés physique et chimique des sols……. 06
I.3. Les sables…… 10
I.3.1. Composition du sable…….. 10
I.3.2. Minéraux du sable……... 11
I.3.3. Microstructure des sables…… 11
I.3.4. Quelques classifications de sable…… 12
I.4. Les limons……... 14
I.4.1. Composition…… 14
I.4.2. Source……. 15
I.4.3. Critères de grosseur de grain…… 15
I.4.4. Impacts environnementaux…… 15
I.5. Renforcement du sol……. 15
I.5.1. Renforcement mécanique ……... 15
I.5.2. Renforcement physique …….. 16
I.5.3. Renforcement chimique ……. 16
I.6. Quelques méthodes de renforcement chimique ……. 17
I.6.1. Utilisation de la chaux……. 17
I.6.2. Utilisation du ciment……... 18
I.6.3. Utilisation des ajoutes cimentaire ……. 18
I.6.4. Utilisation des bitumes……. 18
I.6.5. Émulsion de bitume…… 21
I.7. Influence de quelques paramètres sur le comportement mécanique…….. 23
I.7.1. Influence de la pression de confinement …… 23
I.7.2. Influence de la teneur en eau……... 24
I.7.3. Influence de la présence des fines …….. 24
I.7.4. Influence de la granulométrie ……. 25
I.7.5. Influence de la forme des grains …… 25
I.7.6. Effet de l'émulsion de bitume …… 26
I.8. Conclusion……... 28

***Chapitre II :* Matériaux utilisés et procédures des essais**

II.1. Introduction ……... 30
II.2. Matériaux utilisés……... 31

II.3. Analyse granulométrique……... 32
II.3.1. Méthodes par tamisage à sec après lavage (NF P 94-056) ……. 32
II.3.1.1. Principe de l'essai …… 32
II.3.1.2. Appareillage…… 33
II.3.1.3. Mode opératoire ……. 33
II.3.2. Méthode par sédimentation (NF P 94-057) …… 33
II.3.2.1. Principe de l'essai …… 34
II.3.2.2. Appareillage …….. 34
II.3.2.3. Mode opératoire ……... 34
II.3.2.4. Résultats d'essai analyse granulométrique……... 35
II.4. La masse volumique des particules solides des sols (Méthode du pycnomètre à eau) (NF P 94-054) …….. 36
II.4.1. Principe de l'essai……. 36
II.4.2. Appareillage……. 36
II.4.3. Mode opératoire .....…….. 36
II.5. Les masses volumiques minimale et maximale des sols (NF P 94-059)……... 37
II.5.1. Principe de l'essai ……. 37
II.5.2. Appareillage……... 38
II.5.3. Mode opératoire …… 38
II.6. Essai limites d'Atterberg (NF P 94-051) …….. 39
II.6.1. Principe de l'essai……. 39
II.6.2. Appareillage…….. 39
II.6.3. Mode opératoire …… 40
II.7. Essais de Proctor Normal (NF P 97-093)……. 42
II.7.1. Principe de l'essai…….. 42
II.7.2 Appareillage……... 42
II.7.3 Mode opératoire ……. 42
II.8. Essai de cisaillement direct à la boite de Casagrande (NF P 94-071-1)……... 44
II.8.1. Principe de l'essai……. 44
II.8.2. Appareillage…….. 44
II.8.2. Mode opératoire …… 45
II.9. Conclusion …… 49

Chapitre III : résultats et interprétation

III.1. Introduction……. 51
III.2. Effet des conditions d'essai humides et sèches sur le comportement mécanique de SRO ……. 52
III.3. Comportement du sable limoneux traité par l'émulsion de bitume……. 54
III.3.1. Effet de la teneur en émulsion de bitume (Q_{EB})……... 54
III.3.2. Effet du temps de durcissement …… 58
III.4. Conclusion……... 62
Conclusion générale……. 63
Référence bibliographique …… 64

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Constituants d'un sol humide non saturé ……. 04

Figure I.2 : Répartition moyenne en% des différentes phases du sol (In 'The Nature and Properties of soils', 1999) …….. 06

Figure I.3 : composition du sable (Quartz, feldspaths) ……... 10

Figure I.4 : Microstructure des sols granulaires ……. 12

Figure I.5 : Méthodes de Renforcement mécanique …… 16

Figure I.6 : Méthodes de Renforcement physique…… 16

Figure I.7 : Chantier utilisant la congélation du sol …… 17

Figure I.8 : Chantier de traitement d'un sol à la chaux ……... 17

Figure I.9 : Chantier de traitement du sol au ciment ……... 18

CHAPITRE II

Figure II.1 : Matériaux utilisés : (a) Sable concassé, (b) Les fines et (c) Sable de rivière …… 31

Figure II.2 : émulsion de bitume ……. 32

Figure II.3 : Appareillage de l'analyse granulométrique à sec après lavage……... 33

Figure II.4 : L'exécution de l'essai de l'analyse granulométrique par sédimentation. 35

Figure II.5 : Courbes granulométrique des matériaux utilisés …… 36

Figure II.6 : Pycnomètre et Mode opération . ……. 37

Figure II.7 : Appareil de casa grande et la réalisation de rainure. …….. 40

Figure II.8 : Courbe de détermination de la limite de liquidité de l'échantillon ……. 40

Figure II.9 : Evaluation de diamètre du rouleau de sol. …….. 41

Figure II.10 : Moule Proctor ……... 42

Figure II.11 : Rasage du sol surmontant le niveau du moule. ……. 43

Figure II.12 : Courbe de Proctor normalisée. …….. 43

Figure II.13 : la boite de cisaillement ……. 45

Figure II.14 : Préparation le sol non traité dans deux conditions sèche et humide….. 45

Figure II.15 : Préparation du sol traité avec différentes teneur en émulsion de bitume. …….. 46

Figure II.16 : Eprouvette préparée avec une émulsion de bitume de 5%..... 46

Figure II.17 : procédure de préparation …….. 47

Figure II.18 : Position de la boite de Casagrande sur le bâti. …….. 48

Figure II.19 : Schéma détaillé de l'appareil de cisaillement. …….. 48

CHAPITRE III

Figure III.1 : Variation de la contrainte de cisaillement de SRO à l'état sèche et humide, par rapport la contrainte normal. ……. 52

Figure III.2 : Courbes intrinsèques du ORS à l'état sec et humide. …… 53

Figure III.3 : Effet de la teneur en émulsion de bitume sur la contrainte de cisaillement de sous déférentes contrainte normal. …….. 55

Figure III.4 : Effet de la teneur en bitume d'émulsion sur la résistance au cisaillement du sable sous déférentes contraintes normales. …… 56

Figure III.5 : Courbes intrinsèques du SRO non traité et traité avec déférentes teneur en émulsion de bitume. …….. 57

Figure III.6 : La cohésion (a) et l'angle de frottement (b) en fonction de la teneur en émulsion de bitume. ……. 57
Figure III.7 : Effet du temps de durcissement (7,14 et 28 jrs) sur la contrainte de cisaillement de SRO traité par un 5% d'émulsion de bitume sous déférentes contrainte normal. ……. 59
Figure III.8 : Courbes intrinsèques du SRO traité par 5% d'émulsion de bitume en fonction du temps durcissement (7,14 et 28 jrs). ……. 60
Figure III.9 : L'angle de frottement (a) et la cohésion (b) en fonction du temps de durcissement d'un sable traité par un teneur de 5% d'émulsion de bitume…….. 61

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Principales caractéristiques physiques des sols ……. 07
Tableau I.2 : Caractéristiques physiques générales des sables ……... 14
Tableau I.3 : Classes granulaires du sable …….. 14
Tableau I.4 : Motifs hydrocarbonés composant la molécule de bitume ……. 20

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Les propriétés de l'émulsion de bitume tel que fourni par le fabricant. ……... 32
Tableau II.2 : Propriétés physique des matériaux utilisés …….. 35
Tableau II.3 : Masses volumiques des grains solides ……. 37
Tableau II.4 : Masses volumiques minimale et maximale de sol utilisé……. 39
Tableau II.5 : Paramètres des limites d'Atterberg de limon utilisé. ……... 41

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Les résultats de la résistance au cisaillement due à la contrainte normale appliquée, d'un SRO à l'état sèche et humide. ……... 53
Tableau III.2 : Résistance maximales au cisaillement sous déférentes contrainte normal. ……. 56
Tableau III.3 : Les résultats de la cohésion et l'angle de frottement d'un SRO sous l'effet de déférentes teneurs de l'émulsion de bitume ……. 58
Tableau III.4 : Résistance maximale au cisaillement après 7, 14 et 28 jours de durcissement sous différentes contraintes normales. …… 59
Tableau III.5 : Les résultats de la cohésion et l'angle de frottement à 7,14 et 28 jours de la cure. ……... 61

Introduction générale

Introduction générale

Au cours des années, la stabilisation est devenue une technique réalisable et attrayante pour améliorer les propriétés techniques des sols. Les sols stabilisés ont été utilisés dans la construction de routes, d'aéroports, de parkings, de barrages en terre, de fondations de bâtiments et de diverses autres constructions.

Les matériaux de stabilisation comprennent le ciment, la chaux, les cendres volantes et le bitume, selon le type de sol et les conditions du site.

Pour cela, ce mémoire expose une étude du comportement mécanique d'un sable limoneux traité l'émulsion de bitume, l'idée est de réaliser des essais en laboratoire à l'aide d'appareil de cisaillement direct pour étudier l'effet de la teneur en émulsion de bitume, ainsi que l'effet du temps de durcissement.

De ce fait notre travail se divise en trois parties, qui sont les suivantes :

- La première partie est consacrée à l'étude bibliographique, qui est une étude théorique, sur le sujet traité, ainsi des interprétations sur le comportement de sable limoneux de plusieurs paramètres qui peuvent influence ces caractéristiques mécaniques, a sa voir la résistance au cisaillement, (la cohésion, l'angle de frottement).
- Le deuxième chapitre décrit les essais pour la réalisation de cette étude (Proctor normal, cisaillement direct, limite d'Atterberg), ainsi que les méthodes adoptées pour la préparation de nos échantillons et les différentes étapes et procédures liées à la réalisation de nos essais.
- Le dernier chapitre contient la présentation des résultats d´une série d'essais de cisaillement direct non drainés pour évaluer le comportement mécanique des mélanges sable limoneux non traité et traité par différentes teneurs en émulsion de bitumes , soumis à quatre contrainte normales et préparés à une densités moyenne .
- Et on termine notre travail par une conclusion à la base des résultats expérimentaux obtenus.

Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Un problème difficile dans les travaux de génie civil se pose lorsque le sol est faible et ne peut supporter la charge des structures à construire dessus, qu'il s'agisse de routes, de bâtiments ou de ponts...etc., Il est très difficile pour l'ingénieur géotechnicien d'évaluer exactement les différentes propriétés des dépôts de sol naturel et il doit se maintenir sur des échantillons de sol qui sont testés en laboratoire.

Le processus d'amélioration des propriétés du sol telles que la résistance au cisaillement, la densité sèche et l'indice de plasticité, etc. par des méthodes mécaniques ou chimiques est connu sous le nom de stabilisation du sol, cette stabilisation est essentielle lorsqu'il y a une terre faible ou le transport de bons sols à partir des sites de prélèvement n'est pas économiquement faisable, dans les deux cas, le sol pauvre doit être amélioré par diverses méthodes.

Il existe diverses techniques pour améliorer le sol, certaines d'entre elles sont les suivantes : Compaction de surface, Méthodes de drainage, méthodes de vibration, précompression et consolidation, injection et injection de coulis, géosynthétiques, autres méthodes comme la stabilisation chimique par différents matériaux comme la chaux, qui est l'un des matériaux traditionnels les plus matériaux traditionnels les plus utilisés pour la stabilisation des sols.

Mais aujourd'hui, de nombreuses méthodes non traditionnelles comme l'ajout de bitume, de ciment, de cendres volantes, etc. sont également adoptées et des recherches approfondies sont menées à cet égard, mais on trouve peu de recherches qui ont été faites dans le domaine de la stabilisation des sols par émulsion de bitume, et l'étude de son effet sur le comportement et l'amélioration des sols.

L’objectif de toutes ces techniques est de permettre la construction d’un ouvrage sans qu’il n’y ait de déformations excessives en surface ou des défauts de stabilité.

Dans la présente étude, une série d’essais de cisaillement direct a été réalisée pour étudier le comportement mécanique d’un sable limoneux renforcé par l’émulsion de bitume, et l'influence de divers paramètres tels que la teneur en émulsion de bitume et le temps de durcissement sur le comportement de la résistance des mélanges sable limoneux-émulsion de bitume.

I.2. Généralité sur les sols

Les matériaux à la surface de l'écorce terrestre sont constitués de sols ou de roches. Le sol est un matériau hétérogène et anisotrope comportant un mélange d'éléments solides, d'eau et de gaz. La fluctuation de ces deux derniers éléments dans les vides fait de ce matériau tri phasique un sujet variable dans le temps. Un sol est défini par la géotechnique comme « un agrégat naturel de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère ».

Ce matériau discontinu est le résultat d'une altération naturelle physique ou chimique des roches. L'altération physique comprend l'érosion, le gel et dégel, la variation de température, et l'anthropisation, etc. L'altération chimique comprend l'hydratation, l'oxydoréduction et la carbonatation.

Certains sols, qu'on dit organiques, contiennent des débris végétaux ou d'animaux. Le caractère meuble ne suffit pas pour définir un sol naturel car certains matériaux fabriqués artificiellement à partir de sols ou de roches présentent aussi ce caractère [1].

Un sol est défini comme un mélange d'éléments solides (le plus souvent des particules ou grains) constituant le squelette solide, d'eau (pouvant circuler ou non entre les particules) et d'air ou de gaz. Il est donc, en général constitué de trois phases (voir la figure I.1) : phase solide, phase liquide, phase gazeuse.

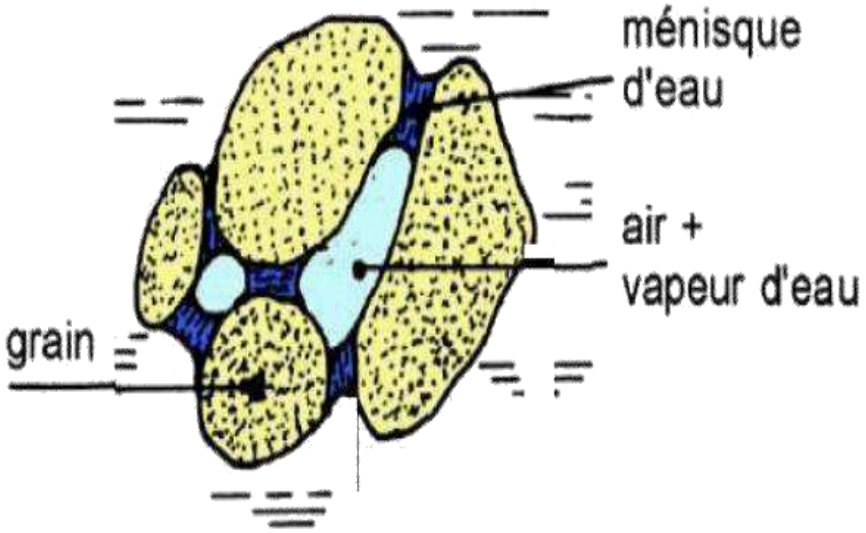


Figure I.1 : Constituants d'un sol humide non saturé

I.2.1. PROPRIETES DES SOLS

Entre les grains du squelette, les vides peuvent être remplis par de l'eau, par un gaz ou les deux â la fois.

Le gaz contenu dans les vides entre les particules est généralement de l'air lorsque le sol est sec ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide (cas le plus fréquent).

L'eau peut remplir plus ou moins tous les vides entre les grains et être mobile (écoulement plus ou moins rapide). Lorsque l'eau remplit tous les vides, le sol est dit saturé.

Dans les régions tempérées, la plupart des sols en place, â quelques mètres de profondeur sont saturés. L'étude complète des sols non saturés, qui constituent un milieu â trois phases, est très complexe [2].

a. Phase solide

Est constituée de grains essentiellement minéraux et est celle qui montre la plus grande variabilité [3].

b. Phase liquide

Généralement cette phase est constituée par de l'eau, qui intervient essentiellement par la nature des ions présents. Elle peut constituer une quatrième phase, sous forme de glace, dans les sols gelés [3].

Il existe différentes formes de l'eau dans les sols :

- **Eau de constitution** : elle fait partie du réseau cristallin et est difficilement déplaçable,
- **Eau liée** : elle est maintenue à la surface des grains par des forces d'attractions moléculaires,
- **Eau capillaire** : retenue par les pores du sol par les forces de capillarité,
- **Eau libre** : cette eau remplit l'espace resté libre des pores et interstices elle s'écoule dans le sol et obéit aux lois de l'hydraulique [4].

c. Phase gazeuse

Cette phase est constituée généralement par de l'air, mais peut dans certaines conditions, être de nature différente et vapeur d'eau et éventuellement de gaz provenant de la décomposition de matières organiques [3].

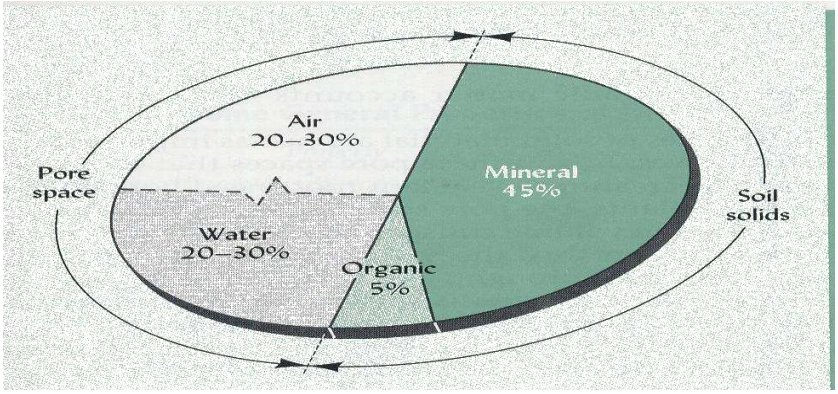


Figure I.2 : Répartition moyenne en% des différentes phases du sol.

I.2.2 Types de sols

Dans la nature, les sols sont plutôt composés d'une mixtion de particules de différentes dimensions, soit un état intermédiaire entre deux pôles à savoir les sols purement pulvérulents et les sols purement cohérents.

D'où on distingue deux catégories de sols :

- **Sols fins**, Le diamètre équivalent de ces particules est normalement inferieure à 0.08mm (colloïdes, argiles, limons).
- **Sols grenus**, La valeur de leur diamètre équivalent est normalement supérieure à 0.08 mm (sable, gravier, cailloux etc..).

I.2.3. Propriétés physiques et chimiques des sols

Les propriétés des sols peuvent être très variables. Elles dépendent de la nature du mélange complexe entre les différentes fractions granulaires. Selon la quantité de cailloux, de graviers, de sables, de silts, d'argiles, de colloïdes, de matières organiques, d'eau et de gaz.

a. Propriétés chimiques

La dégradation de la roche mère par l'eau conditionne, dans une large mesure, la composition chimique du sol qui en est le résultat final. Certaines substances chimiques sont lessivées et s'enfoncent dans les profondeurs du sol, où elles s'accumulent. D'autres substances, moins solubles, demeurent dans les couches supérieures du sol. Les éléments chimiques qui sont enlevés le plus rapidement sont les chlorures et les sulfates, suivis du calcium, du sodium, du magnésium et du potassium.

Les silicates et les oxydes de fer et d'aluminium se décomposent très lentement et sont rarement lessivés. Quand certains de ces éléments entrent en contact avec l'air du sol, il se produit des réactions chimiques, d'oxydation en particulier, qui ont pour effet de transformer les substances chimiques originelles en substances plus solubles ou plus fragiles. Il s'ensuit une accélération des processus d'altération, un lessivage plus intense des éléments chimiques et de nouvelles modifications de la composition chimique du sol [5].

b. Propriétés physiques

Avant d'analyser le comportement mécanique des sols, il est nécessaire de définir certains paramètres qui se rapportent aux diverses proportions dans lesquelles se trouvent le squelette solide, l'eau et l'air constituant le sol [1].

Les caractéristiques physiques suivantes : Poids volumique, teneur en eau, indice des vides, saturation, porosité sont obtenues en laboratoire à partir d'essais très simples tels que les pesées avant et après passage à l'étuve et les mesures de volume.

Tableau I.1 : Principales caractéristiques physiques des sols

γ_h	[KN/m^3]	Le poids volumique du sol humide dans l'état où il se trouve ;
γ_d	[KN/m^3]	Le poids volumique sec (après expulsion de l'eau libre) ;
γ_w	[KN/m^3]	Le poids volumique de l'eau, égal à 9,81 KN/m^3
γ_s	[KN/m^3]	Le poids volumique des grains solides (en général compris dans la fourchette 26 à 28 KN/m^3) ;
W	[%]	La teneur en eau : rapport du poids d'eau au poids de sol sec ;
W_{sat}	[%]	La teneur en eau à saturation : l'eau garnit tous les vides ;
e	-	L'indice des vides, rapport du volume des vides (air + eau) au volume des grains ;
n	-	La porosité, rapport du volume des vides au volume total ;
S_r	[%]	Le taux de saturation, rapport du volume d'eau au volume des vides ;
γ_{sat}	[KN/m^3]	Le poids volumique du sol saturé ;
γ'	[KN/m^3]	Le poids volumique déjaugé : $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

c. Propriétés fondamentales

L'étude exhaustive des propriétés de la terre n'est pas toujours nécessaire. Il convient surtout de connaitre quelques propriétés fondamentales qui sont :

- **La granulométrie** : La granulométrie a pour but d'étudier la taille des particules du sol mais aussi leur répartition, Il existe ainsi plusieurs classification granulométriques, en ce qui concerne les particules qui sont intéressantes pour l'analyse de sol exemple : cailloux, graviers, sables, limons, argiles et colloïdes [6].
- **Plasticité** : ou aptitude de la terre à être modelée.
- **Cohésion :** ou propriété des particules de la terre à rester associées.

➢ **Granulométrie des sols :**

La texture indique l'abondance relative, dans le sol, de particules de dimensions variées : sable, limon ou argile. De la texture dépendent la facilité avec laquelle le sol pourra être travaillé, la quantité d'eau et d'air qu'il retient, et la vitesse à laquelle l'eau peut entrer et circuler dans le sol.

Leurs propriétés mécaniques dépendent dans une large mesure des propriétés des éléments de chaque dimension.

La distribution en poids des particules solides d'un sol suivant leurs dimensions est appelée granularité ou composition granulométrique ou encore granulométrie [6].

Dans l'ordre des dimensions décroissantes on distingue ainsi :

- Les cailloux : correspondant aux ouvertures supérieures à 20 mm
- Les graviers : correspondants aux ouvertures comprises entre 20 et 2 mm
- Sables : correspondants aux ouvertures comprises entre 2 et 0,2 mm
- Les sables fins : correspondants aux ouvertures comprises entre 0.2 et 0.02 mm
- Les limons et silt : correspondants aux ouvertures comprises entre 20 et 2 µm
- Les argiles : correspondantes aux ouvertures comprises entre 2 et 0.02µm
- L'ultra argile : correspondante aux ouvertures inférieures à 0.022µm

- **Plasticité :**

La plasticité du sol désigne la propriété qu'ont des matériaux du sol lorsqu'ils sont mouillés de pouvoir changer d'une façon continue de forme, mais non de volume, sous l'effet d'une pression constante, et de garder la forme prise quand la pression disparaît [7].

La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg. Elles s'effectuent sur la fraction« Mortier fin »du sol (des particules <0.4 mm) la quantité d'eau exprimée en %, qui correspond à la limite de transition entre l'état de consistance fluide et l'état plastique est nommé limite de liquidité WL.

Entre l'état plastique et l'état solide la transition est nommée limite de plasticité W_P, le sol commence à manifester une certaine résistance au cisaillement.

L'indice de plasticité Ip = WL- WP précise la plage de comportement plastique du sol.

- **Cohésion**

La cohésion d'un sol exprime la capacité de ces particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction. La cohésion d'un sol dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier (fraction de grains de< 0.06 ou 0.08 mm selon la méthode utilisée de classification des sols) qui lie les grains inertes entre eux [4].

Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité collante des argiles. On peut classer les mortiers de la façon suivante (Guillaud, 1989) :

- Mortier sableux
- Mortier maigre
- Mortier moyen
- Mortier gras
- Argiles.

I.3. Les sables

Le sable est un mélange de petits grains de roche et de matériaux granulaires qui est principalement défini par la taille, étant plus fin que le gravier et plus grossier que le limon. Et allant de 0,06 (mm) à 2 (mm). Les particules supérieures à 0,0078125 (mm) mais inférieures à 0,0625(mm) sont appelées limon [8].

Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths) ainsi que des débris de calcaire et de corail [4].

Le sable se forme lorsque les roches se décomposent à cause des intempéries et de l'érosion sur des milliers, voire des millions d'années. Les roches mettent du temps à se décomposer, en particulier le quartz (silice) et le feldspath. Commençant souvent à des milliers de kilomètres de l'océan, les roches descendent lentement des rivières et des ruisseaux, se décomposant constamment en cours de route [8].



Figure I.3 : Composition du sable (a) Quartz, b) feldspaths) [9]

I.3.1. Composition du sable

Le sable est essentiellement constitué de matériaux granulaires non consolidés constitués de fragments de roche ou de particules minérales ou de matériaux océaniques. Il est principalement composé de minéraux silicatés et de particules granulaires de roche silicatée.

Le quartz est généralement le minéral le plus dominant ici car il possède des propriétés très résistantes aux intempéries. D'autres minéraux communs formant des roches comme les

amphiboles et les micas se trouvent également dans le sable. Les minéraux lourds tels que la tourmaline, le zircon, etc. peuvent également être présents dans le sable à des concentrations plus faibles. Mais à un niveau élevé, la plupart du sable sur la plage est composé de quartz gris ou beige et de feldspath [8].

Cependant, le minéral le plus courant dans le sable est le quartz, également connu sous le nom de dioxyde de silicium. Ceci se forme lorsque le silicium et l'oxygène se combinent. Le feldspath est le groupe de minéraux le plus trouvé à la surface de la terre et forme environ 65% des roches terrestres. Lorsque le vent et la mer montent sur les rives, ils transportent ces minuscules granules jusqu'à la plage et composent le sable avec cette combinaison [8].

I.3.2. Minéraux de sable

Les minéraux les plus abondants dans le sable sont les minéraux qui étaient autrefois abondants. Dans la roche à l'origine de ces sables, ils sont accompagnés de quelques minéraux moins abondants en Départ, mais ensuite centré. Dans les continents, le quartz c'est généralement le premier minéral en abondance dans la formation de sable. Pour le sable Plages marines et tropicales, où abondent mollusques, récifs coralliens et autres producteurs De la calcite, la calcite est souvent le premier minéral en abondance.

Autres minéraux tels que la magnétite (oxyde de fer naturel conféré fe3o4 Magnétique, solide et immuable, peut être concentré dans le sable, pour La disparition des métaux fragiles lors du transport.

Nous définissons «sable» un matériau granulaire composé de petites particules de Les roches sont dissoutes par le gel ou l'érosion.

I.3.3. Microstructure des sables

Un sol granulaire n'a pas la même microstructure qu'un sol argileux, donc la microstructure d'un sol dépend de sa granulométrie. Les sols granulaires sont des matériaux dont les grains ne sont pas de nature argileuse et donc, ne possèdent pas ou presque pas de propriétés colloïdales. Ils sont généralement tridimensionnels et non pas du type feuillet. Les liaisons entre les grains sont extrêmement faibles puisqu'il n'y a pas de couche d'eau adsorbée sur la surface du grain. Toutefois, lorsque le sol est en état non saturé, la succion fournit une certaine cohésion et donc renforce les liaisons entre les grains.

Les interactions entre grains sont principalement dues aux forces de contact. En conséquence, les frottements sont souvent grands dans les sols granulaires. Les grains

composant la structure sont imbriqués les uns dans les autres et de multiples possibilités d'arrangement existent.

Quelques structures représentatives des sols granulaires sont schématisées sur la figure I.4. [4]

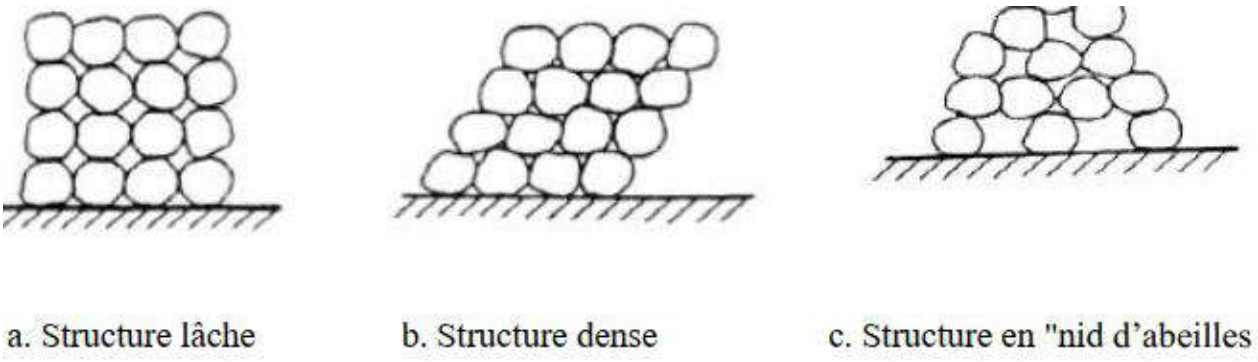


Figure I.4 : Microstructure des sols granulaires [4].

En raison de la structure granulaire et de l'absence de cohésion, les déformations d'un sol non cohérent peuvent s'expliquer par trois mécanismes, liés à la mobilité plus ou moins importante des grains.

- Réarrangement et compressibilité instantanée des grains.
- Glissement et rotation des grains.
- Rupture et écrasement des grains.

Ainsi, toute variation volumique d'un échantillon de sable s'explique par le déplacement relatif des grains : le désenchevêtrèrent des grains provoque la dilatation et l'enchevêtrement entraîne la compaction. Les résistances des sols ayant une structure lâche ou dense diffèrent fortement. Le comportement hydraulique est également influencé par la structure, en effet, la perméabilité d'un sable lâche est plus grande que celle d'un sable dense.

I.3.4. Quelque classification de sable

Il n'est pas possible de classer le sable, parce qu'il n'y a pas de classification officielle du sable. Le sable est une substance très variable et il est donc possible de tenter de le classer en catégories distinctes [8].

a. Sable de corail: Le sable de corail a plusieurs significations [8].

b. Sable de verre : Ce type de sable se compose principalement de dioxyde de silicium. et c'est l'élément principal de ce type de sable.

c. Sable immature : Sable composé des mêmes minéraux qui composaient ses roches mères.

d. Sable de gypse : Ce type de même se compose principalement de sulfate de calcium dihydraté. ($CaSO4 \cdot 2H2O$) [8].

e. Sable ooïde : Les ooïdes sont des granulés arrondis et sont également des grains sédimentaires à revêtement sphéroïdal. Et ce type de sable est formé de carbonate de calcium.

f. Sable de silice : Le sable de silice est du quartz presque pur.

j. Sable de fosse : Obtenu en formant des fosses dans le sol- Il est pointu, anguleux, poreux et exempt de sels nocifs

h. Sable de la rivière : Trouvé au lit et sur les berges des rivières, il est fin, rond et poli grâce à l'action de frottement des courants d'eau, a moins de résistance au frottement en raison de la rondeur, et sa couleur presque blanche. Leurs grains sont plus petits que le sable de la fosse, et donc plus adaptés aux travaux de plâtrage. Normalement disponible à l'état pur et peut donc être utilisé pour toutes sortes de travaux de génie civil.

i. Sable de mer : Obtenu au bord de la mer, il est fin, arrondi et poli grâce à l'action de frottement de l'eau.sa couleur marron clair. Le pire il contient beaucoup de sels. En outre, il contient des coquilles et des matières organiques qui se décomposent dans le corps du mortier et du béton et réduisent ainsi leur durée de vie et leur résistance.

g. Sable vert: Ayez des matériaux verdâtres [8].

Le sable est déterminé par la granulométrie (granulométrie). Il se distingue par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable coulera Facilement. Le sable artificiel, obtenu par découpe mécanique ou concassage de roches, est se compose principalement de granulés avec une rugosité notable. Une distinction peut également être faite entre le sable porté par le vent et le sable porté par le vent l'eau. Le premier est plus sphérique, tandis que le second est plus ovale.

De plus, le sable éolien a une légère hernie que le sable de rivière ou marin. Ce qui est dit "terne et brillant". L'aspect de surface du grain de sable éolien est dû à Les multiples influences auxquelles le sable est exposé lorsqu'il se déplace. La densité du sable sec varie selon la taille et la composition de ses particules, de 1700 à 1900 kg / m3, en moyenne 1850

kg / m3 Le sable forme naturellement des pentes régulières Jusqu'à environ 30, angle de frottement En interne, il traverse des avalanches successives pour trouver une pente stable [9].

Selon la taille des grains, il est à distinguer trois types de sable (voir tableau I.2)

Tableaux I.2 *:* Caractéristiques physiques générales des sables. [9]

Caractéristique physique	Notation	Valeur moyenne	unité
Poids volumique humide	$\gamma\ ou\ \gamma^h$	17 à 20	kN/m³
Poids volumique sec	γ^d	14 à 18	kN/m³
Poids volumique saturé	γ^{sat}	19 à 22	kN/m³
Poids volumique déjaugé	γ'	9 à 12	kN/m³
densité relative	G_S	2,65 à 2,67	/
Porosité	n	0,25 à 0,50	/
Indice de vides	e	0,50 à 1	/
Teneur en eau	W	1 à 15	%

Tableaux I.3: Classes granulaires du sable. [4]

Type de sable	Dimension des grains
Sable grossier	0,6 à 2 mm
Sable moyen	0,2 à 0,6 mm
Sable fin	0,06 à 0,2 mm

I.4. Les limons

Le sol limoneux contient moins de 10 % d'argile. Il est formé de grains de diamètre moyen plus gros que les argiles et plus petits que le sable . Selon sa texture, on parle de« limon léger » ou de « limon moyen ».

Les limons, constitués de silt, de lœss et de, possèdent un squelette siliceux à silico calcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles ; la teneur en argile est variable. Ils sont peu perméables et constituent des terres de culture fertiles. Leur assise est médiocre et sont donc à éviter pour les fondations [10].

I.4.1. Composition

Les limons sont généralement créés par l'abrasion de quartz et de feldspath, raison pour laquelle le limon est également parfois surnommé en anglais "poussière de roche" (stone dust) [11].

I.4.2. Source

Le silt est créé par une variété de processus physiques, capables de diviser les cristaux de quartz généralement de la taille du sable des roches primaires.

I.4.3. Critères de grosseur de grain

Dans l'échelle Udden–Wentworth (due à Krumbein), les particules de silt varient entre 0,0039 et 0,0625 mm, plus gros que l'argile (clay) mais plus petit que les particules de sable. L'ISO 14688 classe les silts entre 0,002 mm et 0,063 mm (subdivisé en trois grades fin, moyen et grossier 0,002 mm à 0,006 mm à 0,020 mm à 0,063 mm). En réalité, le silt est chimiquement distinct de l'argile [11].

I.4.4. Impacts environnementaux

Le silt se transport facilement dans l'eau ou dans un autre liquide et est suffisamment fin pour être transporté sur de longues distances par voie aérienne sous forme de poussière.

Les dépôts épais de matériau silteux résultant du dépôt par les processus éoliens sont souvent appelés lœss. Le silt et l'argile contribuent à la turbidité de l'eau. Le silt est transporté par les ruisseaux ou par les courants d'eau dans l'océan. Lorsque le silt apparaît comme un polluant dans l'eau, le phénomène est connu sous le nom de colmatage [11].

I.5. Renforcement du sol

L'amélioration des sols est un processus qui permet de modifier les propriétés d'un composé en le renforçant avec divers matériaux pour améliorer ses propriétés mécaniques, en assurant une faible variation de volume et une moindre porosité du matériau avec une bonne résistance aux intempéries.

Les méthodes d'amélioration des sols font partie des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformation rencontrés lors du développement d'un projet, et elles peuvent être classé de trois principaux processus :

I.5.1. Renforcement mécanique : Il est obtenu en exerçant des contraintes de compactage sur le matériau pour réduire la porosité, augmenter la densité et l’imperméabilité. (Figure I.5)

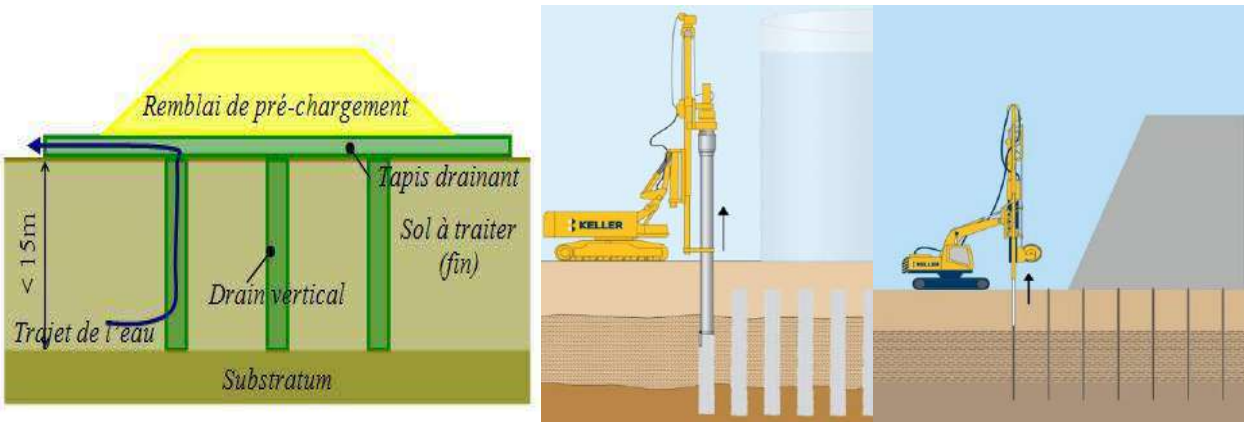


(a) **(b)** **(c)**

Figure I.5 :Méthodes de renforcement mécanique :

(a) Compactage de surface, (b) Compactage dynamique et (c) Vibrocompactage.

I.5.2. Renforcement physique : Il est obtenu en modifiant la granularité du matériau. Par exemple, pour le matériau argileux, l'ajout du sable à gros grain est nécessaire. Dans le cas des matériaux grossiers, l'ajout des éléments fins est nécessaire. (Figure I.6)



(a) **(b)** **(c)**

Figure I.6 : Méthodes de Renforcement physique :(a) Pré-chargement, (b) Drainage et (c) Inclusions.

I.5.3. Renforcement chimique: Pour la stabilisation chimique, on utilise des liants minéraux et bitumineux. Ils réagissent avec le sol pour en améliorer leurs caractéristiques mécaniques. La nature du sol à stabiliser détermine la quantité et le type de liant à utiliser.



Figure I.7: Chantier utilisant la congélation du sol.

I.6. Quelques méthodes de renforcement chimique :

Puisque nous utilisons ce renforcement chimique dans notre étude pour améliorer la qualité du sol, nous devons mettre en évidence les méthodes de renforcement chimique utilisées, notamment :

I.6.1. Utilisation de la chaux

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser l'argile était connue et constituait à l'époque l'un des matériaux d'amélioration des sols les plus efficaces.

En effet, de nombreuses études ont montré que les propriétés mécaniques des sols se modifient durablement lorsqu'ils sont traités à la chaux. La chaux est utilisée en ajoutant du monoxyde de calcium calciné (chaux vive, CaO) ou de l'hydroxyde de calcium (chaux éteinte, Ca (OH) 2.

En général, la chaux est plus efficace sur les sols argileux que sur les sols granulaires, par conséquent, les sols dont l'indice de plasticité est supérieur à 10 sont les plus visés par ce procédé, et la figure 1.8 ci-dessous montre un chantier du traitement d’un sol à la chaux calcaires.



Figure I.8 : Chantier de traitement d’un sol à la chaux.

I.6.2. Utilisation du ciment

Le ciment est un autre produit possible pour stabiliser certaines classes de sol, alors qu'il existe de nombreuses similitudes entre la chaux et le ciment en tant que stabilisateurs.

Lorsque le ciment est mélangé à l'eau, il provoque une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol, a mesure que les ions calcium sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile. La figure I.9 ci-dessous montre un chantier de traitement du sol au ciment.



Figure I.9 : Chantier de traitement du sol au ciment.

I.6.3. Utilisation des ajouts cimentaires

Les coûts élevés de la chaux et du ciment ont incité les chercheurs à trouver d'autres types de liants pour améliorer les sols instables à faible coût tout en étant respectueux de l'environnement, parmi lesquels les plus courants sont les cendres volantes, les scories, les fumées de silice, les cendres volcaniques et le calcaire. Il est souvent utilisé en combinaison avec la chaux dans les travaux de stabilisation et sa composition est similaire à celle du ciment.

Deux types de cendres volantes sont produits par la combustion du charbon à savoir les cendres volantes et les cendres basse. Les cendres basses relativement grossières s'accumulent au fond du four tandis que les cendres volantes sont séparées des gaz d'échappement par un dépoussiéreur électrostatique.

I.6.4. Utilisation des bitumes :

Le bitume est un sous-produit des hydrocarbures lourds, qui est un résidu noir du pétrole brut obtenu soit par distillation naturelle, soit par distillation en raffinerie. Le bitume de distillation directe est utilisé pour la confection d'enrobés à chaud [12].

Le bitume est un matériau léger, ductile et élastique avec de bonnes propriétés d'adhésion, car il est caractérisé par sa plasticité et son élasticité. Il est très peu réactif, insoluble dans l'eau et inerte à de nombreux agents chimiques, car il est soluble dans de nombreux solvants organiques [12].

a. Provenance du bitume :

Selon l'origine du bitume routier, on distingue trois types de sources, à savoir ;

- **Bitume pur :** Il Obtenu par le raffinage du pétrole brut et ne contient pas d'additifs (selon sa méthode de fabrication). Les conditions climatiques et le type de projet déterminent le choix du type approprié. Ainsi on peut obtenir des bitumes de différentes textures ; on distingue plusieurs types de bitumes allant du plus dur au plus mou identifiés par les classes : 20/30, 40/50, 80/100 [12].
- **Bitume naturel :** Il est naturellement présent sous forme de résidus d'anciens gisements pétroliers dont les éléments les plus légers, ils ont été éliminés au fil du temps par une sorte de distillation naturelle. Les gisements de bitume naturel se présentent soit sous la forme de véritables lacs, soit sous la forme de filonsen sous-sol. Pour certains usages spécifiques, les bitumes naturels sont rarement utilisés en tant qu'additifs, en raison de leurs propriétés particulières : aptitude à être colorés, effet stabilisateur pour les asphaltes coulés [12].
- **Asphalte naturel :**Il est constitué de roche calcaire imprégnée d'hydrocarbures lourds (jusqu'à 20%). L'asphalte naturel est traditionnellement utilisé dans la formation de l'asphalte coulé, qui peut également être utilisé comme additif dans les enrobés auxquels il apporte du liant et des fines [12].

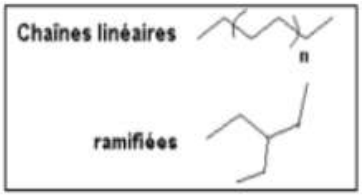
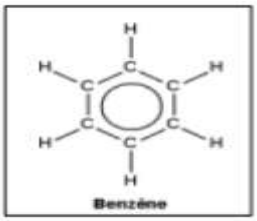
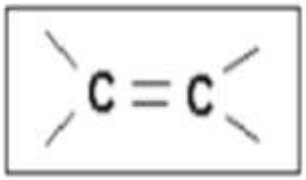
b. Composition :

Le bitume est constitué d'atomes de carbone (80-87% en masse) et d'hydrogène (8-12%), auxquels s'ajoutent des atomes hétérogènes tels que le soufre (1-9%), l'azote (0-1,5%) et l'oxygène (0,5-1,5%), également présents dans les minéraux bitumineux (principalement du vanadium (10-2000 ppm) ou du nickel (20-200 ppm) mais aussi de l'aluminium, du silicium, du chrome, du cuivre, du zinc, du plomb en quantités infimes.

La composition initiale du bitume dépend principalement de l'origine de son brut et dans une moindre mesure, des techniques de raffinage. Le bitume un mélange d'hydrocarbures de masses molaires et de compositions chimiques variables, qui appartiennent principalement aux groupes aliphatiques et naphténiques.

Les molécules des composés du bitume sont constituées de motifs hydrocarbonées de quatre types : (tableau I.4)

Tableau I.4 : Motifs hydrocarbonés composant la molécule de bitume [12].

Paraffiniques saturés linéaires ou ramifiés (chaines linéaires sans cycle)	
Naphténiques saturés cycliques (cycles à liaisons simples)	
Aromatiques : présence d'au moins un cycle avec doubles liaisons de type benzène	
Oléfines : chaine contenant une ou plusieurs doubles liaisons	

c. Les différents types :

Le bitume utilisé dans les enrobés confère des propriétés viscoélastiques aux revêtements de chaussées. Le bitume aux propriétés adaptées offre des performances élevées en termes de résistance à la fracture, à la fissuration thermique, à la fissuration induite par la fatigue et à l'arrachement; ces propriétés contribuent à la réalisation de revêtements sécuritaires, durables et économiques. Les types de liants bitumineux sont les suivants : [13]

- **Les bitumes naturels :** qui existent à l'état naturel sous forme d'anciens gisements de pétrole.
- **Les bitumes purs :** qui sont directement issus du raffinage du pétrole.
- **Les cut-backs :** qui sont des bitumes mélangés avec un solvant plus ou moins volatil d'origine pétrolière, généralement une coupe kérosène de qualité non

commerciale. La viscosité de ces produits se trouve ainsi abaissée, permettant une mise en œuvre à de faible température.

- **Les bitumes fluxés :** qui sont des bitumes mélangés avec une huile de faible viscosité. Ces liants sont souvent plus visqueux que les bitumes fluidifiés.
- **Les bitumes composés :** qui sont des mélanges bitume-goudron ou bitume-brai de houille dans lesquels le bitume est majoritaire.
- **Les bitumes modifiés :** qui sont des bitumes additionnés de substances d'origines diverses, généralement des polymères qui modifient certaines de leurs propriétés.
- **Les émulsions de bitume :** où l'huile de fluxage est un mélange de produits d'origine pétrolière et de produits de la houille.

I.6.5. Émulsion de bitume

Les émulsions de bitume fabriquées et distribuées par un grand nombre d'entreprises spécialisées dans l'ingénierie routière sont des émulsions directes constituées de bitume émulsifié dans l'eau. Une émulsion de bitume est une dispersion de bitume dans l'eau ; la tâche principale est d'empêcher la coalescence des microparticules de bitume, ce qui maintient les propriétés physico-chimiques de l'émulsion et sa qualité.

a. Composition :

L'émulsion de bitume est un liant polyvalent utilisé à basse température. Les propriétés physiques et chimiques du bitume peuvent différer d'un fabricant à l'autre, mais les principaux composants de l'émulsion de bitume restent les mêmes, comme suit :

- **Bitumes,** parfois accompagné d'additifs facilitant la mise en émulsion et améliorant les qualités de stabilité et d'adhésivité.
- **Fluidifiants** qui réduisent la viscosité des bitumes.
- F**luxant** qui ramollit les bitumes.
- **Eau permutée** (les ions calcium et magnésium sont remplacés par des ions sodium). En effet, les ions calcium et magnésium on tendance à dénaturer les émulsifiants.
- **Emulsifiants** : Ils facilitent la dispersion des gouttelettes de bitume en abaissant la tension superficielle de la phase aqueuse. Son rôle principal est d'assurer la stabilité

de l'émulsion en formant une pellicule protectrice mono-moléculaire adsorbée à la surface des particules de bitume.

- **Acides** (acide chlorhydrique) : Etant donné que les émulsifiants sont insolubles dans l'eau, il faut les transformer en sels pour permettre leur dissolution dans la phase dispersante [14].

b. types d'émulsions bitume :

Il y a deux principaux types d'émulsions de bitume: cationiques et anioniques : La principale différence entre les deux est que les émulsions anioniques sont moins sensibles à la présence de minéraux ou d'autres matières dans l'eau.

- Les **émulsions anioniques** : l'émulsifiant utilisé est alcalin dont on peut, d'une façon générale, représenter la structure par la formule : $(R-COO)^{-}Na^{+}$
- Les **émulsions cationiques** : les émulsifiants utilisé sont généralement des sels d'aminé du types :

$(R-NH)^{+}(C1)$

$(R-NH)^{+}(C1)^{-}$ Confère aux bitumes une charge électrique positive [14].

c. Propriété d'émulsion

Les émulsions de bitume présentent le grand avantage de pouvoir être utilisées à des températures inférieures à 100 °C. Au contact des agrégats, l'émulsion se rompt, l'eau se sépare du bitume puis s'élimine par évaporation il reste un liant bitumineux plus ou moins rigide. Les émulsions de bitume utilisées dans les travaux routiers doivent satisfaire à un certain nombre de conditions se rapportant à :

- **Stabilité**

La stabilité au stockage dépend de l'émulsifiant employé et de la grosseur moyenne des particules. Si les particules sont suffisamment fines, la sédimentation est très lente et provoque seulement un accroissement progressif de la concentration en bitume au fond des bacs de stockage. Le simple fait d'agiter redonne, dans ce cas, son homogénéité à l'émulsion.

Lorsque les particules sont trop grosses, la sédimentation est rapide et en s'accumulant au fond du récipient de stockage, les unes sur les autres, elles finissent par s'agglomérer et l'émulsion ainsi rompue ne peut plus être dispersée par simple agitation.

- **Viscosité**

Pour être utilisée de façon satisfaisante dans les travaux routiers, une émulsion de bitume doit avoir une viscosité suffisamment basse pour pouvoir être pulvérisée sans difficultés et

suffisamment élevée pour ne pas ruisseler sur les côtés de la route. La viscosité d'une émulsion dépend d'un grand nombre de facteurs parmi lesquels on peut citer, indépendamment du bitume lui-même, la teneur en bitume, la nature et la concentration des savons, la viscosité de la phase aqueuse, etc.

- **Vitesse de rupture**

Cette propriété caractérise l'aptitude de l'émulsion à faire prise, plus ou moins rapidement, après mise en œuvre. La vitesse de rupture varie principalement avec la teneur et la nature de l'émulsifiant.

Les deux principaux facteurs qui paraissent régir la rupture des émulsions sont, d'une part, la rupture à la surface de l'agrégat, conditionnée par la nature physico-chimique de ce dernier et, d'autre part, l'évaporation de l'eau constituant la phase aqueuse.

Il existe sur le marché toute une gamme d'émulsions, anioniques ou cationiques, de bitume pur ou de cut-back, de teneur en liant variant de 50 à 70 %, de vitesse de rupture plus ou moins grande, et qui apportent une solution à un grand nombre de problèmes routiers.

d. Avantages d'émulsion de bitume

Au plan économique, technologique et environnemental, l'émulsion de bitume s'est avéré être une excellente solution. En plus d'économie de l'argent sur la consommation d'énergie un et demi fois, la production d'émulsion nécessite moins de 30 à 40 % de bitume par rapport à l'utilisation de bitume à chaud.

I.7. Influence de quelques paramètres sur le comportement mécanique :

I.7.1. Influence de la pression de confinement :

Au 18ème siècle, Coulomb a réalisé des études sur la stabilité des sols, pour les besoins de constructions militaires. A l'aide d'une boite de cisaillement, il a réalisé des expériences qui lui permettent d'évaluer la résistance au cisaillement des sols à la rupture le long d'un plan de cisaillement. Lors de ses recherches, coulomb a remarqué que la résistance au cisaillement à la rupture était directement proportionnelle à la contrainte normale; plus cette dernière augmente, plus la résistance au cisaillement soit grande. Il a noté aussi que les sols cohérents présentent une certaine résistance au cisaillement dû à leur cohésion quand la contrainte normale est nulle [15].

De nombreuses études ont montré que le comportement d'un sable peut être largement Influencé par la pression de confinement. Wiebe, B., et al.,(1998) et Bouricha et al.,(2018) ;

ils ont constaté que Les augmentations de la pression de confinement entraînent initialement une augmentation de la résistance au cisaillement[16-17].

I.7.2. Influence de la teneur en eau :

Il est nécessaire d'étudier l'effet de l'humidité sur le comportement mécanique, et cela est dû aux facteurs externes qui affectent le sol tel que l'humidité de l'air et la pluie, surtout en hiver. La teneur en eau a un effet significatif sur la résistance au cisaillement du sable, selon une étude menée par D. Bouri et al.(2019), où il a été constaté que la teneur en eau réduit considérablement la résistance du sable de Chlef, l'angle de frottement et la cohésion[18].

Dans une autre étude de N. Aoualietal.(2019), qui a testé le sable limoneux par cisaillement direct, a enregistré une diminution de la résistance au cisaillement maximale et de la résistance au cisaillement résiduelle avec l'augmentation de la teneur en eau, ce qui signifie une diminution des propriétés physiques telles que l'angle de frottement interne[19].

D'autre part le comportement de la cohésion et l'angle de frottement peut signifier que l'humidité a un effet négatif sur le comportement en résistance au cisaillement qui a été établi par une faible résistance par rapport au cas sec, dans l'étude de Bian, H, et al.2007 ; Ils ont noté que la présence de l'eau n'affecte que légèrement le comportement du sable dense[20].

Della, N. et al 2012 ; ils ont fait une série d'essais triaxiaux de compression non drainé a été réalisée sur des échantillons (sec et humide),dans le cas de sable sec caractérisé par un état dilatant, dans le cas humide ce comportement rend compte de l'état très contractant du sable[21].

I.7.3. Influence de la présence des fines :

Des nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des mélanges sable et sols fins, mais les résultats sont contradictoires en ce qui concerne le rôle des fines ; Amini et Qi (Amini et Qi 2000) et Ling et al. 2009 [22-23].ont conclu que l'ajout de fines dans les sols granulaires augmente la résistance des sols, alors que d'autres travaux ont montré que la résistance des sols granulaires diminue avec l'ajout de la teneur en fines ((Monkul et al. 2016) ; (Monkul et al. 2017) ; (Arab 2009) ; (Belkhatir et al.2010 ; Aouali et al. 2018)) [24-28].Même certaines études, comme celles de Benghalia et al.(Benghalia et al. 2015) et Bouferra et Shahrour (Bouferra et Shahrour 2004) indiquent que la résistance diminue jusqu'à une certaine valeur de teneur en fines et tend ensuite à augmenter à nouveau.[29-30].

Un autre point de vue a été rapporté par The vanayagam et Martin (2002), qui indique que la nature physique du sable limoneux est différente de celle du sable propre. Bouri et al. (2019) indiquent que la résistance au cisaillement d'un sol est le principal paramètre d'évaluation de la stabilité des sites de construction, il est donc important d'étudier le comportement en cisaillement d'un sable vulnérable, où Il sont réalisé une série de test de cisaillement direct sur le sable de Chlef basé sur les mélanges de sable et de limon ; leurs résultats indiquent que la résistance au cisaillement et l'angle de frottement diminuent avec l'augmentation de la teneur en limon et que la cohésion augmente également. [31-32]

Une étude réalisée par Ling et al. (2012) rapporte la performance sismique de trois systèmes de murs de soutènement segmentaires renforcés par des géosynthétiques remplis d'un mélange de sable limoneux. Les résultats de leurs tests indiquent que les murs d'armature verticale de 0,4 m, remblayés avec un sol contenant un grand pourcentage de pourcentage de fines, se sont mieux comportés que ceux ayant un sol sablonneux de bonne qualité dans des conditions identiques[33].

I.7.4. Influence de la granulométrie.

La granulométrie est l'une des propriétés importantes qui joue un rôle prépondérant sur les contraintes, la déformation et la résistance au cisaillement. La modification de la granulométrie entraîne une modification du taux de vide ainsi que de la surface de contact effective des particules, ce qui agite le mécanisme de répartition de la charge du contact particules/particules.

Dans une étude menée par A.CherifTaiba et al (2017) sur l'effet du coefficient d'uniformité et de la taille des grains sur le comportement des sables limoneux, il indique que la résistance maximale au cisaillement diminue à mesure que le coefficient d'uniformité augmente et que la taille des grains (D10, D30, D50 et D60) diminue[34].

De plus, Yilmaz et al (2008) et Janalizadeh C.A et al (2013) ont découvert que lorsque chacune des valeurs D10, D30, D50 et D60 diminue, la résistance au cisaillement du sable limoneux diminue progressivement [35-36].

I.7.5. Influence de la forme des grains.

La forme des grains est une caractéristique intrinsèque qui joue un rôle majeur dans le comportement mécanique des milieux granulaires. K. Shinohara et al.(2000) qui a étudié

l'effet de la forme des particules sur l'angle de frottement interne de différentes formes de particules et du même taille au moyen d'un essai de compression triaxiale., où il a été constaté que l'angle de frottement interne augmente avec l'augmentation de l'angularité de les particules et diminue le vide initial de l'échantillon en raison de l'augmentation de l'effet d'enchevêtrement[37].

Holtz et Gibbs (1956) ont observé que les matériaux de carrière angulaires ont résistance au cisaillement bien supérieur à celle des matériaux de rivière submergés et sub-angulaire, sur la base d'essais triaxiaux sur des mélanges de gravier et de sable[38].

Santamarina et Cho (2001) ainsi que Holtz et Kovacs (1981) ont constaté que laréponse contrainte-déformation des sables est influencée par l'angularité et que l'augmentation de l'angularité entraîne un pic de résistance au cisaillement plus élevéen raison de l'augmentation des forces de contact entre les particules de sable. Cho, Dodds et Santamarina (2006) ont observé, à travers l'analyse systématique de microphotographies de particules de sable et d'essais oedométrique, que l'augmentation de l'angularité des particules entraîne une augmentation de l'angle de frottement à volume critique constant[39-41].

Guo et Su (2007) ont observé à partir d'essais triaxiaux drainés sur deux sables avec des pressions de confinement et des rapports de vide différents que les forces inter particulaires induisent une augmentation de l'angularité des particules de sable, ce qui tend à élever l'angle de frottement maximal et affecte la qualité de la surface[42].

Yang et Wei (2015) ont indiqué que le sable de forme arrondie présentait une résistance au cisaillement significativement plus élevée que le sable de forme angulaire. De plus, ils ont constaté que le sable arrondi mélangé à du limon angulaire avait une résistance au cisaillement extrêmement faible[43].

I.7.6. Effet de l'émulsion de bitume.

Le mécanisme de base de la stabilisation au bitume est un phénomène d'imperméabilisation. Les particules du sol sont recouvertes de bitume qui empêche ou ralentit la pénétration de l'eau[44].

Terrel et al. (1984) ont indiqué que la stabilisation à l'aide de bitume émulsifié est efficace pour améliorer les propriétés inférieures des sols dont le pourcentage maximal de passage au tamis no 200 est inférieur à 25 %, dont l'indice de plasticité est inférieur à 6, dont la valeur

équivalente de sable est inférieure à 30 et dont le produit de l'indice de plasticité et du pourcentage de passage au tamis no 200 est inférieur à 72[45].

Wahhab et Abduljauwad (1989) ont utilisé différents pourcentages de chaux et de ciment pour améliorer les propriétés des sables de dunes traités à l'asphalte. Ils ont observé que les asphaltes liquides sont efficaces pour améliorer la stabilité à saturation d'un mélange de sable compacté [46].

a. Effet de la teneur en émulsion sur la résistance du sable stabilisé :

La résistance au cisaillement du sable étant entièrement due à ses propriétés de frottement, sa résistance est fonction de sa porosité et des contraintes de confinement auxquelles il est soumis.

L'ajout de bitume comme liant a pour effet de donner au sable non confiné une certaine force de cohésion ; mais, en général, il réduit aussi l'angle de résistance au cisaillement, donc des proportions différentes de bitume dans le sable donnent des valeurs variables de cohésion et d'angle de résistance au cisaillement.

A travers une étude de C. S. Dunn et M.N. Salem (1971), ont investigué l'effet de la teneur en émulsion sur la résistance au cisaillement en effectuant des tests triaxiaux conventionnels non drainés sur des échantillons séchés à l'air. Ils ont constaté qu'une teneur en émulsion comprise entre 7 et 10 % a donné la cohésion la plus élevée, l'angle de frottement et la résistance au cisaillement du sable ont été réduit proportionnellement au pourcentage d'émulsion ajoutée[47].

La même observation est faite avec les résultats des recherches de Lees, G (1969), qui ont trouvé que la cohésion maximale se développait lorsque la teneur de l'émulsion de bitume était d'environ 4 à 5 %, et que l'angle de frottement de cisaillement diminuait linéairement avec la teneur en bitume[48].

Al-Abdul Wahhabet al (1997) Ont constaté que Les résultats du mélange sable/émulsion de bitume ont indiqué que la teneur optimale en émulsion de bitume pour le sable de dune est de 8%[49].

D'autre part, à partir des expériences de SS Batra et JS Arora (2016), et Mayank Chandra et Sukhmanjit (2017),ont menées pour étudier l'effet de l'émulsion de bitume sur les paramètres de résistance au cisaillement, ils ont remarqué que la résistance maximale au cisaillement du

sol a été observée à 6% d'émulsion de bitume, ce qui entraîne une augmentation du frottement entre les particules de sol, mais la cohésion entre les particules de sol a été réduite [50-51].

b. Effet du temps de durcissement sur la résistance du sable stabilisé :

L'un des inconvénients de l'émulsion positive est que la stabilité du mélange a tendance à diminuer, ce qui signifie que l'émulsion se "fissure" après une courte période de mélange, il faut donc la laisser durcir pendant un certain temps jusqu'à ce qu'elle atteigne une certaine stabilité, il est donc important d'étudier le temps de durcissement et son effet sur le comportement du sol renforcé.

Selon les conclusions des expériences menées par C. S. Dunn et M.N. Salem (1971), (1973), sur l'effet du temps de traitement des échantillons fixés avec 6, 9 et 13 pour cent d'émulsion de bitume, les échantillons ont été traités pendant des périodes allant de 1 à 12 semaines. Ils ont remarqué que plus le teneur en émulsion de bitume était ajouté, plus la résistance était élevée à long terme[52-53].

La résistance de l'émulsion de bitume utilisée pour la stabilisation du sol augmente progressivement et peut prendre jusqu'à 6 mois pour atteindre sa résistance maximale ; par conséquent, du ciment et/ou de la chaux sont ajoutés afin d'augmenter la résistance initiale et de réduire le temps de durcissement[54-55].

I.8. Conclusion

D'après les recherches précédentes que nous avons abordées, nous avons maintenant un aperçu du comportement des sols renforcés par l'émulsion de bitume, mais leurs types sont très différents ainsi que les pourcentages et les méthodes de préparation. Par conséquent, nous étudierons à la fois l'effet de la quantité et de la durée de durcissement de l'émulsion de bitume sur le comportement mécanique des sables alluviaux.

En effet, on ne peut pas donner d'hypothèse générale sur l'effet de l'émulsion de bitume sur le comportement mécanique de sable limoneux, car elle nécessite des recherches sur tous types et conditions de préparation du mélange sable et émulsion de bitume ainsi que sur leur interaction avec l’eau (hydrophile).

Chapitre II : Matériaux utilisés et procédures des essais

II.1. Introduction :

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les matériaux utilisés et les procédures des essais effectués dans cette étude ; pour déterminer les paramètres physico-mécaniques d'un sable reconstitué non renforcé et renforcé par l'émulsion de bitume.

Premièrement, on a commencé de réaliser des essais de reconnaissance les paramètres physiques des matériaux utilisés (sables et limon) ; qui sont choisi à la lumière d'une étude de master (Promo 2019), intitulé sous le thème [***d'Etude expérimentale sur les comportements mécaniques de sable limoneux renforcé par les fibres de verre]***, donc nous prenons le matériau reconstitué optimal qui contient (70% de sable de rivière+ 30% de sable concassé) et substitué par 15% de limon, pour étudier l'effet de quantité d'émulsion de bitume et le temps de la cure sur le comportement mécaniques d'un sable limoneux.

En suite, on a déterminé les paramètres de compactage par l'Essai de Proctor Normal, quelque soit la masse volumique maximale et la teneur en eau optimal (Wopt), pour prendre-les en confédération dans la partie de préparation des échantillons.

Enfin, nous discutons la méthode du la préparation des mélanges adoptée, pour faire des essais mécaniques qui présentes des paramètres de résistance au cisaillement du sol, ainsi, l'angle de frottement interne(ϕ) et la cohésion(C) interviennent dans les calculs de stabilité des barrages ou des digues ; parmi les appareils qui évaluer les propriétés de résistance au cisaillement avec un privilégié en mécanique des sols est L'appareil de l'essai triaxial, il permet de contrôler la pression interstitielle (notée u) tout le long de l'essai et de mesurer la déformation axiale en fonction de la contrainte normale.

Un essai alternatif de l'essai de cisaillement rectiligne à la boîte. Il est plus facile à mettre en œuvre et il est moins coûteux et plus rapide, mais présente les inconvénients vis-à-vis de l'essai triaxial, d'une part d'imposer un plan de cisaillement qui ne correspond pas à une direction principale, d'autre part de ne pas permettre de contrôler les pressions interstitielles durant l'essai et l'essai n'est utile que dans des cas complètement drainés puisque n'a pas de maîtrise les conditions de drainage d'un sol pulvérulents.

II.2. Matériaux utilisés :

- ***Sables :***

Les essais en laboratoire ont été effectués sur deux types de sables propres à différentes gradations et morphologiques, un sable de rivière (d'une forme arrondie)étant prélevé à partir d'Oued Mzî dans la wilaya de Laghouat, et un sable concassé (d'une forme anguleuse), qui a été obtenu à partir d'une carrière d'agrégats dans la région du Moghorno commune de Berrouaghia, wilaya de Médéa. Ces deux types de sables sont mélangés avec des fines provenant de sable concassé (<0.08mm) avec un teneur en fines de 15%.



Figure *II.1* : Matériaux utilisés : (a) Sable concassé, (b) Les fines et (c) Sable de rivière.

- ***Emulsion de bitume :***

L'émulsion de bitume utilisée dans notre étude est un produit fabriqué par la société **NAFTAL** sous le nom commercial **"Emulsion Naftal, ECL 65%".** Son type est une émulsion cationique pour la couche d'accrochage ; nous avons choisi ce type en raison de leurs caractéristiques telles que :

- Insensibilité à l'eau et au gel.
- Faible sensibilité à la température.
- Bonne résistance à l'usure en surface.
- Excellente adhérence à une couche préexistante.
- Rugosité élevée.
- Aptitude à suivre des déformations lentes sans rupture complète (par exemple, glissement de terrain).

Les propriétés d'émulsion de bitume sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau II.1 Les propriétés de l'émulsion de bitume tel que fourni par le fabricant.

Caractéristiques	Unité	Spécifications	Classe
Teneur en liant	%	63-67	7
Adhésivité avec granulats de référence		>75 >90	2 3
Indice de rupture		>170	5



Figure *II.2* : Emulsion de bitume

II.3. Analyse granulométrique :

II.3.1. Méthodes par tamisage à sec après lavage (NF P 94-056) :

L'analyse granulométrique par tamisage au moyen de tamis à mailles carrées de dimension inferieure ou égale à 100 mm et supérieure de 80 µm, s'applique aux sols.

II.3.1.1. Principe de l'essai :

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau, au moyen d'une série des tamis emboitées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieur des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis, et la masse de refus cumulés sur chaque tamis est rapportés à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

II.3.1.2. Appareillage :

Il comprend :

- Une colonne de tamis d'ouvertures de maille carrées (5 ; 2 ; 1.25 ; 0.63 ; 0.315 ; 0.16 ; 0.08).La colonne est coiffée par un fond et un couvercle.
- Une tamiseuse mécanique.
- Etuve à température réglable à 105°C et à 50°C.
- Une balance de précision et Un pinceau souple pour nettoyage des tamis. (figure II.3)

II.3.1.3. Mode opératoire :

- Préparer une quantité de matériau, séché et pesé (La masse utilisée est 0.8 kg).
- Peser chaque tamis vide.
- Préparer la colonne des tamis d'ouverture de maille décroissante d'haut en bas (5 ; 2 ; 1.25 ; 0.63 ; 0.315 ; 0.16 ; 0.08).
- Verser la totalité du matériau en sommet d'une colonne de tamis qui sont posé sur la tamiseuse mécanique, puis lancer l'agitation mécaniquement.
- A la fin de tamisage mécanique, peser le refus de chaque tamis, et remplier le tableau de l'essai pour le traçage de la courbe granulométrique de matériau.



Figure *II.3* :Appareillage de l'analyse granulométrique à sec après lavage.

II.3.2. Méthode par sédimentation (NF P 94-057) :

L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol, et qui peut être nécessaire à sa description et à sa classification, cette méthode s'applique aux éléments d'un sol naturel passant à travers le tamis à maille carrée de 80 µm d'ouverture.

II.3.2.1. Principe de l'essai :

La détermination de la distribution pondérale de la taille des particules fines (<80µm) d'un sol basé sur la loi de Stockes qui mesure la vitesse (v) de décantation des grains fin et très fins en fonction de leur dimension.

II.3.2.2. Appareillage :

Le matériel employé pour la préparation du sol est distingué de matériel utilisé pour la réalisation de l'essai :

- Etuve à température réglable à 105°C et à 50°C.
- Balance
- Tamis à maille carré de 80 µm d'ouverture.
- Agitateur mécanique avec son récipient de 600 cm^3 et une vitesse de rotation jusqu'à 10 000 tr/min.
- 2 Eprouvettes témoins de 2000 cm^3.
- Eau distillée et défloculant (440 cm^3 et 60 cm^3).
- Densimètre.
- Thermomètre de 10 à 35 °C.
- Chronomètre.

II.3.2.3. Mode opératoire :

A-Préparation de la prise d'essai :

- Etuvage le tamisât inferieur de 80µm (4h le cas de 105°C / 8h le cas de 50°C).
- Introduire la prise d'essai (80±10g) dans un récipient utilisée avec l'agitateur mécanique.
- Ajouter 500 cm3 de la solution (Eau+ défloculant)
- Laissé pendant au moins de 15h à la température ambiante
- Agiter la prise d'essai pendant 3 min à 10 000 tr/min.

B-Exécution de l'essai :

- Verser la suspension dans une éprouvette d'essai (N°1)
- Rincez le récipient, l'axe et les palettes de l'agitateur par la solution (Eau+ défloculant)
- Compléter jusqu'à 2000 cm3 par la solution (Eau+ défloculant)
- Versé 2000 cm3 de la solution (Eau+ défloculant) dans l'éprouvette N°02

- Plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propres dans l'éprouvette (N°2)
- Faire les lectures aux temps suivants en minutes : 0.5- 1 -2 -10 – 20 -40 -80 -240 - 1440.



Figure *II.4* :L'exécution de l'essai de l'analyse granulométrique par sédimentation.

II.3.2.4. Résultats d'essai analyse granulométrique

Les propriétés des matériaux utilisés sont montrées dans le tableau 2.1**,** même les courbes granulométriques des échantillons sont présentées sur la Figure ***2.5***.

Tableau *II.2*: Propriétés physique des matériaux utilisés

-	**Sable de rivière**	**Sable concassé**	**Limon**	**Sable Reconstituée (70/30+15%)**
D_{50} (mm)	0,238	0.79	0.045	0.255
D_{60} (mm)	0,255	0.987	0.050	0.305
D_{30} (mm)	0,197	0.39	0.032	0.211
D_{10} (mm)	0,158	0.12	0.0045	0.152
Cu (-)	1.614	8.225	11.11	2.01
Cc (-)	0,963	1.284	4.55	0.960
USCS symbol				

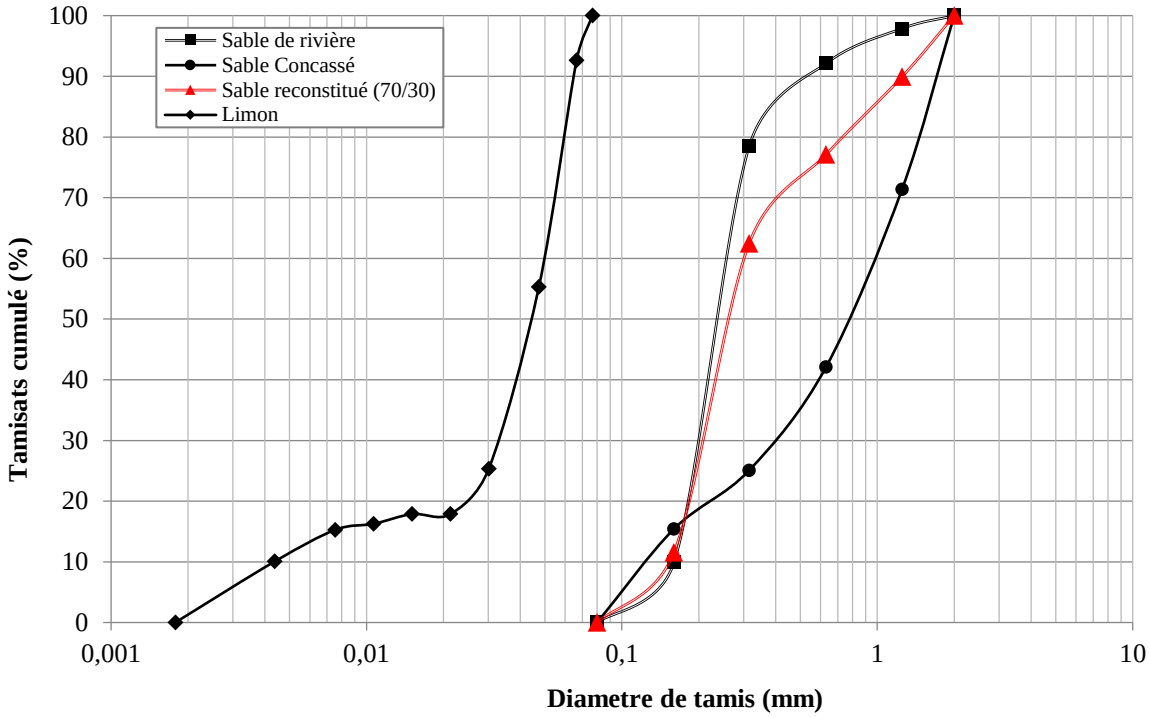


Figure *II.5* :Courbes granulométrique des matériaux utilisés.

II.4. La masse volumique des particules solides des sols (Méthode du pycnomètre à eau) : (NF P 94-054):

II.4.1. Principe de l'essai :

Mesure de la masse volumique est obtenue par connaître le volume des particules par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides.

II.4.2. Appareillage :

- Etuve à température réglable à 105°C et à 50°C.
- Balance
- Pycnomètres de 50 ml.
- Liquide d'immersion d'eau distillée ou déminéralisée.

II.4.3. Mode opératoire :

- Peser le pycnomètre vide sure la balance et faire le zéro.
- Remplir le pycnomètre de liquide jusqu'au repère
- Peser le volume de liquide (m_0)
- Vider le pycnomètre
- Introduire l'échantillon (m_1) dans le pycnomètre

- Compléter le remplissage du pycnomètre avec le liquide.
- Peser l'ensemble eau + échantillon (m_2)
- Calculer la masse d'eau $m_3 = m_2 - m_1$
- Répéter l'essai sur 3 échantillons.
- On utilise la formule suivante pour expression les résultats : $\rho_s = \frac{m_1 \rho_{eau}}{m_0 - m_3}$

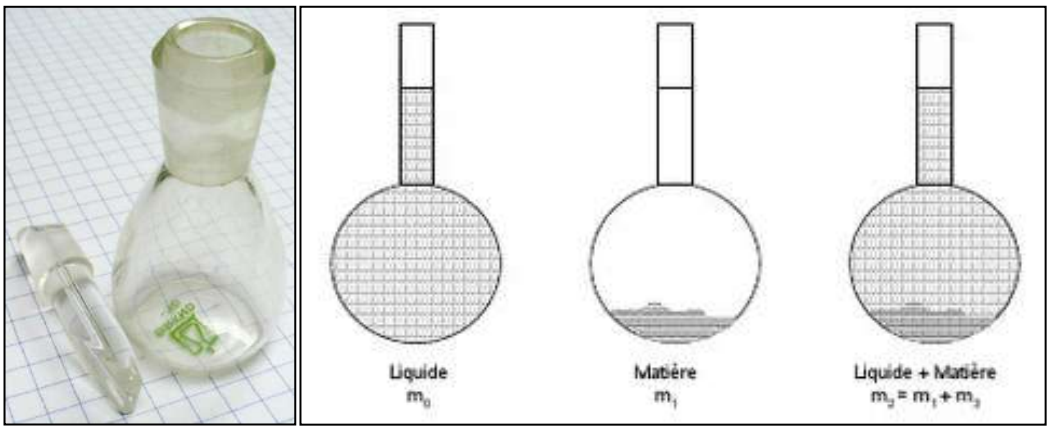


Figure *II.6* : Pycnomètre et Mode opération.

Les masses volumiques des grains solides des matériaux utilisés sont présentées dans le tableau II.3

Tableau *II.3* : Masses volumiques des grains solides

-	Sable de Rivière	Sable concassé	Limon	Sable Reconstituée (70/30+15%)
G_s(g/cm^3)	2,646	2.741	2,741	2.396

II.5. Les masses volumiques minimale et maximale des sols (NF P 94-059):

II.5.1. Principe de l'essai :

Cette méthode permettant de déterminer en laboratoire les masses volumique minimale et maximale des sols pulvérulents obtenus respectivement par déversement du matériau dans un état lâche ou par densification par compactage et épuisées pour calculer l'indice de densité relative. L'essai consiste à mettre en œuvre dans un moule normalisé, selon une procédure déterminée.

II.5.2. Appareillage :

- Etuve à température réglable à 105°C et à 50°C.
- Balance
- Moule cylindrique métallique à un volume connu avec une dame de compactage (dans notre cas on a utilisé un moule Proctor normalisé).
- Entonnoir
- Règle à raser rigide en acier.

II.5.3. Mode opératoire :

L'essai comporte au moins cinq prises d'essai réalisées comme suite :

➢ **Détermination de la masse volumique minimale :**

- Le matériau est en mise en place dans un moule à l'aide d'un entonnoir remplier par une quantité de matériau suffisante pour remplier le moule.
- Relever verticalement l'entonnoir en assurant que la hauteur de chute libre du matériau est presque nulle.
- Enlever le sol surmontant le niveau supérieur du moule au moyen d'une règle à raser.
- Eliminer les particules de sol pouvant subsister sur la surface extérieur du moule.

➢ **Détermination de la masse volumique maximale**

- Le matériau est en mise en place dans un moule en trois couches puis après avoir versé chaque couche on compacte a l'aide de la dame Proctor normal en 25 coups en respectant la hauteur de chute et en assurant une répartition équitable des coups sur la surface à compacter.
- Enlever le sol surmontant le niveau supérieur du moule au moyen d'une règle à raser.
- Eliminer les particules de sol pouvant subsister sur la surface extérieur du moule.

➢ **Mesures**

- Elles consistent à peser le moule et son contenu puis calculer les masses volumiques (minimale et maximale) et les indices de vides (e_{min} et e_{max}).
- Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau*II.4*:Masses volumiques minimale et maximale de sol utilisé.

-	**Sable Reconstituée (70/30+15%)**
e_{max}(-)	0.852
e_{min}(-)	0.547
ρ_{dmax} (g/cm3)	1.899
ρ_{dmin} (g/cm3)	1.461

II.6. Essai limites d'Atterberg (NF P 94-051) :

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état au moyen de son indice de consistance, Celles deux limites sont la limite de liquidité à la coupelle (W_L) et la limite de plasticité du rouleau (W_P).

II.6.1. Principe de l'essai :

L'essai s'effectue en deux phases, la première est de rechercher la teneur en eau pour laquelle une rainure pratique dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées doit se referme sur à peu près un centimètre sous l'effet d'environ 25 chocs répétés. Le deuxième est la recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée de diamètre 3mm est confectionné manuellement se fissure.

II.6.2. Appareillage :

- Etuve à température réglable à 105°C et à 50°C.
- Balance
- Appareil de Casagrande de avec ces accessoires ;
- Outils à rainurer (selon norme utilisée) ;
- Plaque en verre de 5 cm de largeur et de 10.5 cm de longueur, permettant d'apprécier le diamètre des rouleaux de sol de 3 mm $\pm$ 0.5 mm.
- Récipients.

II.6.3. Mode opératoire :

➢ **Limite de liquidité W_l :**

- Pour déterminer la limite de liquidité on étend sur une coupelle une couche du matériau dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V.
- On imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaire pour fermer la rainure sur 1 cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte.
- On réalise cinq essais qui doivent s'échelonner régulièrement entre15 et 35 ou, mieux, entre 20 et 30 chocs. (Figure *II.8* **)**



Figure *II.7* : Appareil de casa grande et la réalisation de rainure.

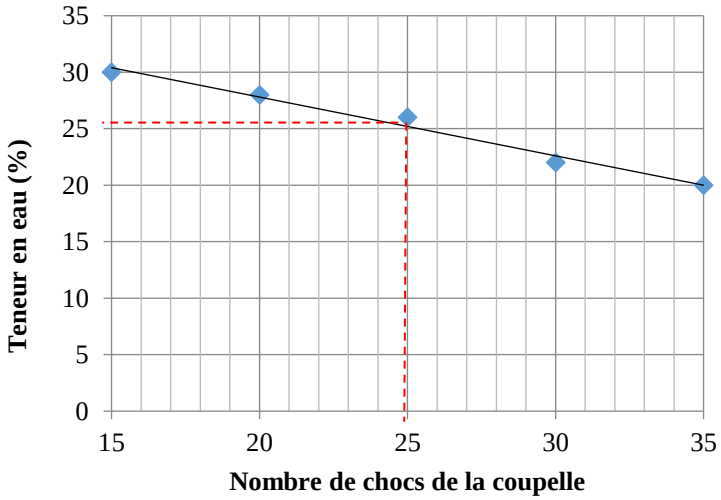


Figure *II.8* : Courbe de détermination de la limite de liquidité de l'échantillon.

- **Limite de plasticité W_P :**

- Pour détermine la limite de plasticité on roulant l'échantillon en forme d'un cylindre qu'on amincit progressivement.
- La limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 mm.
- Il faut réaliser des rouleaux de 3 mm de diamètre sans pouvoir faire de rouleaux plus fins.
- On exécute en générale deux essais pour détermine cette limite.



Figure *II.9* : Evaluation de diamètre du rouleau de sol.

- **Indice de plasticité I_P :**

L'indice de plasticité noté Ip, est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser des sols fins. Se l'exprime par la relation:= $W_l – W_p$

Les résultats présentés dans le tableau ***2.4*** ont été obtenus suite à des essais répétitifs pour limiter les marges d'erreur, vu qu'ils dépendent beaucoup de l'exécution. La répétabilité et la reproductibilité des essais ont été vérifiées.

Les résultats montrent que les échantillons ont une valeur d'indice de plasticité élevée, ceci permet de les classer parmi les sols peu plastiques.

Tableau *II.5* : Paramètres des limites d'Atterberg de limon utilisé.

Indice	Limon étudié
W_L(%)	26.52
W_P(%)	20.91
I_P(%)	5.61

II.7. Essais de Proctor Normal (NF P 97-093):

II.7.1. Principe de l'essai :

Le principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et le compacter à chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle.

Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau. Les résultats sont consignés sur un diagramme qui note en ordonnée la masse volumique sèche, exprimée en kg/m3 et en abscisse la teneur en eau, exprimée en % pondéral.

II.7.2. Appareillage :

Moule Proctor (H= 116.5 mm) et D= (101.5mm).

- Dame Proctor.
- Règle à raser.
- Balance.
- Etuve
- Eau et éprouvette graduée.



Figure *II.10* :Moule Proctor

II.7.3. Mode opératoire :

- On prend 2,5 kg de sable préalablement préparé qu'on verse dans un bac.
- On ajoute une certaine quantité d'eau proportionnelle au poids du sable utilisé.
- A l'aide de la truelle on malaxe bien le sable.
- On remplit le moule Proctor normalisé en trois couches puis après avoir versé chaque

  couche on compacte a l'aide de la dame Proctor normal en 25 coups en respectant la hauteur de chute et en assurant une répartition équitable des coups sur la surface à compacter.
- On procède de la même manière après la mise en place de la 2eme et 3eme couche.
- Enlever le sol surmontant le niveau supérieur du moule au moyen d'une règle à raser.



Figure *II.11* : Rasage du sol surmontant le niveau du moule.

On a réalisé cinq échantillons de mélange de sable limoneux reconstituent avec des différents pourcentages de teneur en eau, cet essai réalise pour déterminer la teneur en eau optimum et la densité sèche maximale, par définition la teneur en eau est le paramètre fondamental pour le compactage des sols, surtout dans le cas des sols fins pour lesquels ce paramètre ne peut changer que lentement en raison de l'affinité de l'eau avec les particules limoneux, il est répété plusieurs fois sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau et les points obtenus de cette manière forment une courbe dans l'espace ($\boldsymbol{\gamma_d}$; **w**) et le point dont l'ordonnée est la densité sèche maximale et l'abscisse est la teneur en eau correspondante représente l'Optimum Proctor.

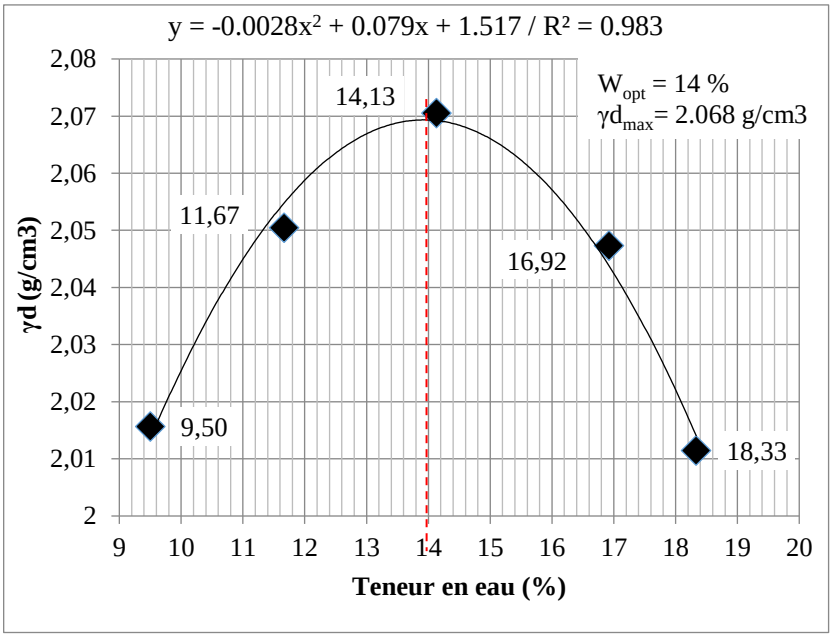


Figure *II.12 :* Courbe de Proctor normalisée.

La **figure *II.12*** représente les séries d'essais de Proctor normalisé, on a constaté que la densité sèche maximale est 2.06 g/cm3 correspond au teneur en eau optimales de 14%.

II.8. Essai de cisaillement direct à la boite de Casagrande (NF P 94-071-1):

II.8.1. Principe de l'essai :

L'essai consiste à placer un échantillon de sol représentatif d'une quantité suffisante dans la boite et soumettre la partie supérieure de l'échantillon à un effort vertical (N), résultant des poids placés sur le plateau, engendrant ainsi une contrainte normale respectivement de (25, 50,100, et 200 kPa), maintenue constante tout le long de l'essai. On applique ensuite à l'échantillon une charge horizontale T, que l'on augmente jusqu' à la rupture. Le plan de rupture se développe le long du plan horizontal imposé par le déplacement de la partie inférieure sur la partie supérieure de la boite de cisaillement.

En première approximation, on peut supposer que dans le plan de séparation des deux demi-boîtes la contrainte normale et la contrainte tangentielle sont constantes.

II.8.2. Appareillage :

L'appareillage spécifique à l'essai comprend :

- Le bâti de la machine et la boite de cisaillement.
- Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette.
- Le dispositif produisant un déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes.
- Un système de mesurage des efforts, des déplacements et du temps.
- Balances de portées maximale et minimale compatibles avec les masses à peser
- Une étuve.
- Les outils nécessaires au découpage et à la préparation des éprouvettes.
- Un chronomètre donnant la seconde.

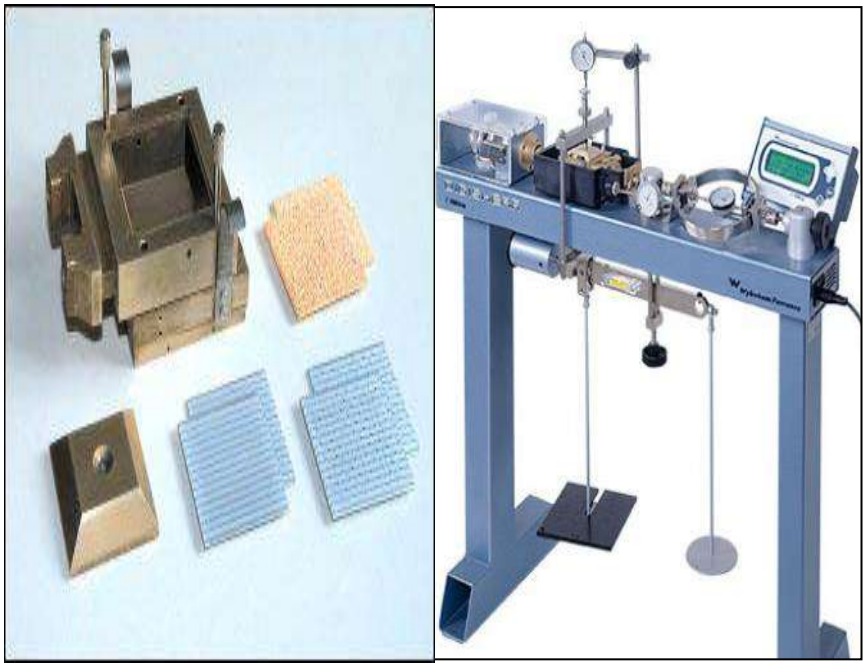


Figure *II.13 :* la boite de cisaillement

II.8.3. Mode opératoire :

A. préparation de l'échantillon :

1er partie : L'essai est réalisé sur des éprouvettes préparées avec une teneur en eau optimale de 14%.Huit (8) spécimens ont été préparés par un sol non traité à l'état sec et humide pour être testés à une densité relative moyenne de 50 %,tous les spécimens ont été cisaillée immédiatement.(voir figure II.14)

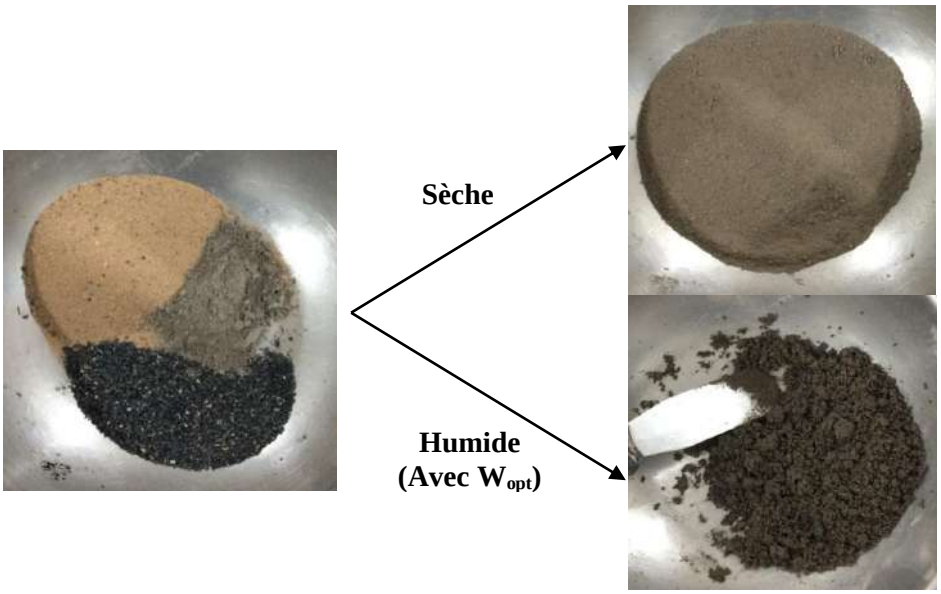


Figure *II.14* : Préparation le sol non traité dans deux conditions sèche et humide.

2ème partie : L'essai est réalisé sur des éprouvettes préparées avec une variété de teneur en émulsion de bitume (Q_{EB}=0, 3.5, 5, 7 et 10.5%), avec un teneur en eau optimale de 14%. Vingt (20) spécimens ont été préparés pour être testés à une densité relative moyenne de 50 %, tandis que les spécimens ont été traités par l'émulsion de bitume et préparés avec le pourcentage optimal de fluide de 14%. Les échantillons ont été laissés à durcir pendant 7 jours à température ambiante du laboratoire (22°±2°) (Figure II.15)

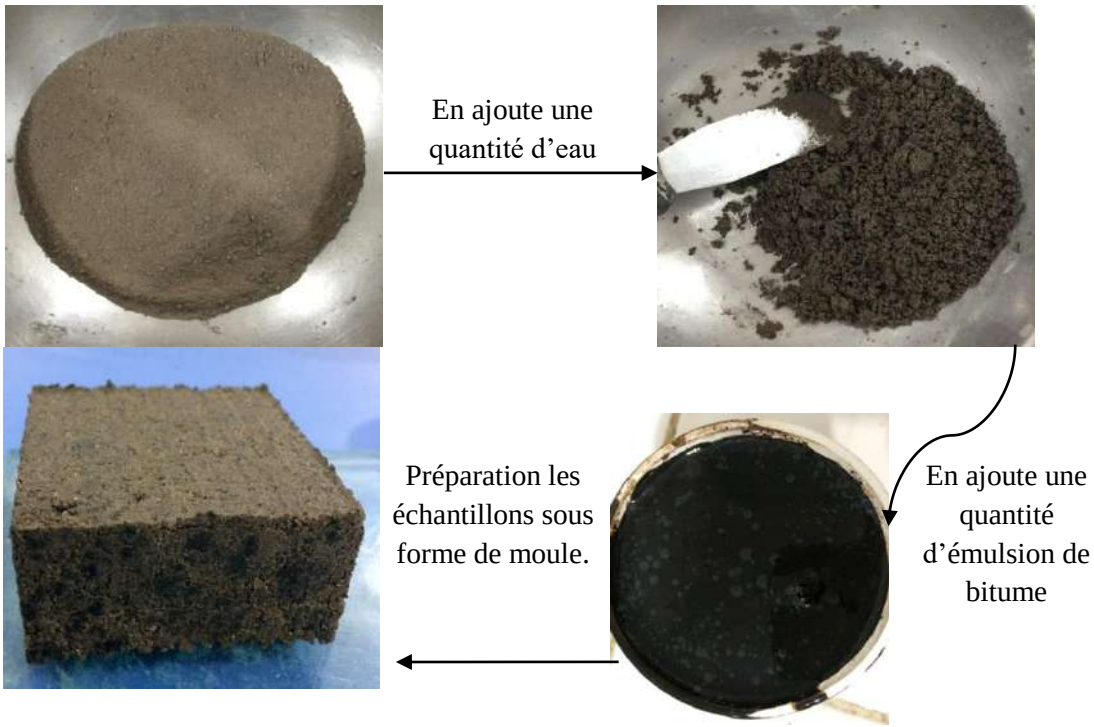


Figure *II.15* : Préparation du sol traité avec différentes teneur en émulsion de bitume.

3ème partie :à la base les résultats obtenu dans la 1er et ***2ème***partie, Douze (12) spécimens ont été préparés a le pourcentage optimal de l'émulsion de bitume (Q_{EB}= 5%) avec un teneur en fluide optimale de 14%, pour étudier les effets de le temps de durcissements, pour cela, tous les échantillons ont été laissés à durcir pendant 7 ,14 et 28 jours à température ambiante du laboratoire (22°±2°).Figure (II.16).

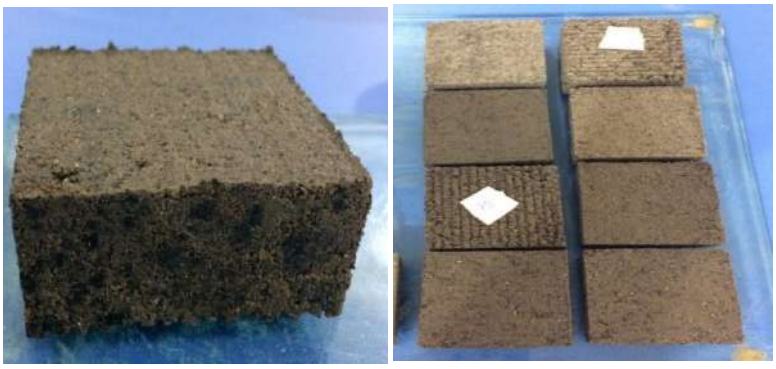


Figure *II.16* : Eprouvettes préparées avec une émulsion de bitume de 5%.

La procédure de préparation a exécuté comme ce de suite :

Le sable reconstitué a été préparé premièrement avec un mélange de trois matériaux essentiels avec leurs pourcentages optimal de 70% du sable de rivière, 30% du sable concassé et substitution de teneur en limon du sable concassé de 15%, ensuite, on a ajouté l'eau avec un teneur calculé pour assurer un teneur en fluide de 14%, puis un teneur d'émulsion de bitume a été ajouté au sol.

Le mélange a été malaxé manuellement de manière à ce que le mélange ait un caractère homogène. Enfin, tous les échantillons ont été compactés dans le moule de l'essai de cisaillement direct ayant les dimensions suivantes (60 x 60 x 25) mm et ils ont été laissés à durcir à la température ambiante (22°+2°) avant d'être testés.



Figure*II.17 :* procédure de préparation

B. Mise en place de l'échantillon :

Avant de poser l'échantillon dans la boite de Casagrande, nous mettons les deux demi-boîtes correctement l'une sur l'autre et on a fixé-les avec des goupilles en aluminium.

Ensuite, nous avons vissé les deux vis en métal dans la moitié supérieure de la boîte à partir du ce moment qu'entre en contact avec la boîte inférieure et serrer les vis un quart de tour supplémentaire pour minimiser le frottement entre les deux plaques.

Après la préparation des échantillons, on reverse la boîte de Casagrande et on fixe la boîte de cisaillement remplie du mélange sur le chariot mobile (N° 4) du bâti, puis en serrant les vis papillons et maintenir avec une main l'étrier de chargement (N° 8) en contact avec le piston de la boîte, régler en même temps l'horizontalité du bras de levier en tournant le volant (N° 16). Le pointeau (N° 14) doit être aligné avec la gorge de la bague (N° 15).

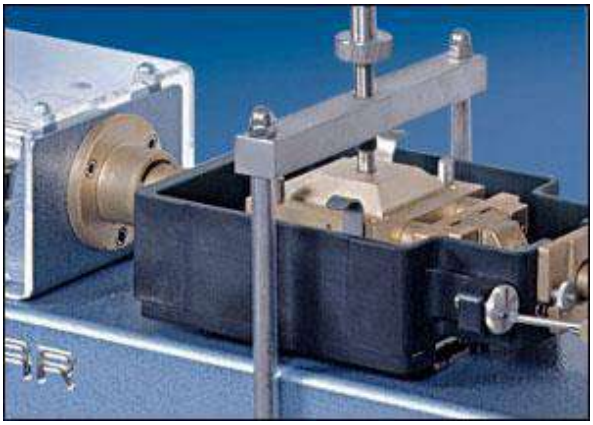


Figure II.*18* : Position de la boite de Casagrande sur le bâti.

Le plateau est chargé des masses préalablement calculées afin d'appliquer la contrainte normale désirée, puis positionner et bloquer l'anneau dynamométrique (le ressort supportant l'anneau dynamométrique permet de compenser le poids de l'anneau en le maintenant dans une position horizontale).

Si l'anneau dynamométrique n'est pas correctement en contact avec la queue de la demi-boîte supérieure, tournez le volant (n° 13) dans le sens des aiguilles d'une montre pour réaliser cette opération. Reliez ces deux éléments par vissage.

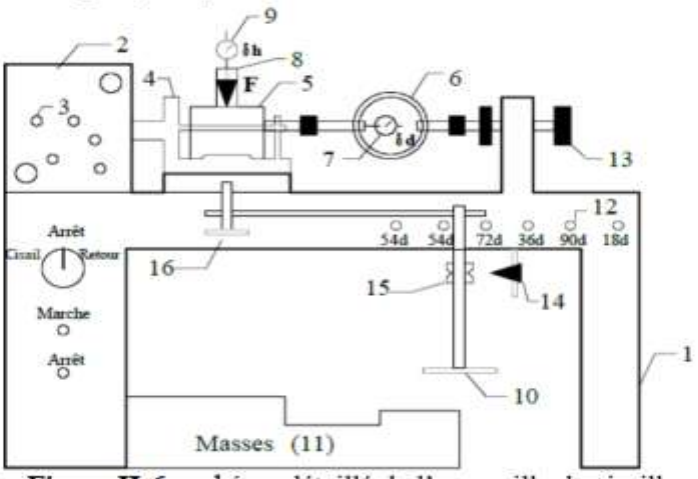


Figure II-6 : schéma détaillé de l'appareille de cisaillement

1 : bâti de la machine
2 : bloc moteur
3 : axes supports de pignons
4 : partie mobile du bâti, support de la boite.
5 : boite de cisaillement
6 : anneau dynamométrique
7 : comparateur de la déf. De l'anneau
8 : étrier de chargement
9 : mesure de δ h
10 : plateau supportant les masses
11 : masses
12 : pignons en attente
13 : volant d'approche de l'anneau
14 : pointeau
15 : bague de contrôle
16 : volant de réglage

Figure *II.19* : Schéma détaillé de l'appareil de cisaillement.

Pour supprimer les jeux, vous exercerez un léger effort de traction à l'anneau. Pour cela, agissez sur le volant (n° 13) dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Arrêtez-vous lorsque le capteur de l'anneau indique une valeur proche de -0.05 mm, et pour mesurer le déplacement vertical du piston (fonction du gonflement ou du tassement de l'échantillon en cours d'essai), placez un comparateur sur la partie supérieure de l'étrier et réglez son zéro de manière à ce que la tige du comparateur soit à mi-course.

On dévisse de quelques tours les trois vis métalliques de la demi-boîte supérieure. La demi-boîte supérieure reste bloquée verticalement par frottement avec le mélange et il n'y a plus aucun contact physique parasite (pas même par l'intermédiaire des vis) risquant de fausser les mesures de cisaillement.

L'essai pourra alors être considéré comme étant terminé et vous pouvez commencer par le cisaillement. La vitesse de cisaillement était de (1 mm/min) dans l'essai à l'état sec. Les contraintes normales utilisées dans l'essai étaient de (25, 50, 100 et 200) kPa.

Cette étude examine Trois aspects principaux du comportement du sable non renforcé et renforcé par l'émulsion de bitume :

- La résistance au cisaillement maximale ;
- L'angle de frottement et la cohésion ;
- Effet de déférentes contraintes normales.

II.9. Conclusion

Après l'identification des matériaux utilisés et détermination leurs paramètres physiques, on a préparé 40 échantillons pour faire des tests de cisaillement direct avec une condition (CU) consolidé non drainé et estimer le comportement mécanique de sable limoneux renforcé par l'émulsion de bitume en différentes teneur de 0, 3.5, 5 , 7 et 10.5%.

Chaque échantillons a été soumis aux quatre contraintes normales (25, 50 ,100 et 200 kPa) à une densité relative moyenne de 50%, pour etudier les effets de : la teneur en emulsion de bitume et le temps de durcissement.

Les résultats de ces essais sont donnés sous forme de courbes de : Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal ; Contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale (courbe intrinsèques), ces courbes sont présentées dans le chapitre trois.

Chapitre III : Résultats et interprétations

Résultats et interprétations

III.1. Introduction :

Cette partie consiste à étudier l'effet de la teneur en émulsion de bitume et le temps du durcissement sur un sable limoneux reconstitué par un pourcentage de 70 de sable d'oued MZI et 30% de sable concassée substitué par 15 % d'un limon.

Pour pouvoir conclure le pourcentage optimum d'émulsion de bitume et l'effet de la cure, on a procédé à la caractérisation du sable limoneux. En suite la caractérisation mécaniques des mélanges (sable-limon- émulsion de bitume).

Après l'identification des matériaux utilisés et détermination leurs paramètres physiques, on a préparé quarante (40) échantillons pour faire des tests de cisaillement direct avec une condition (CU) consolidé non drainé :

- Huit (8) spécimens ont préparés par un sol non traité à l'état sec et humide avec un teneur en eau optimale de14%, pour étudier l'effet de teneur en eau optimale sur le comportement mécanique de sable limoneux reconstitué.
- Vingt (20) échantillons ont préparées avec une variété de teneur en émulsion de bitume (Q_{EB}= 0, 3.5, 5, 7 et 10.5%), avec un teneur en fluide optimale de 14%, pour estimer le comportement mécanique de sable limoneux renforcé par l'émulsion de bitume en différentes teneur. Les échantillons ont été laissés à durcir pendant 7 jours à température ambiante du laboratoire (22°$\pm$ 2°).
- Deuze (12) échantillons ont été préparées avec l'optimum d'émulsion de bitume et laissés à durcir pendant 7, 14 et 28 jours à température ambiante du laboratoire (22°$\pm$ 2°), pour étudier l'effet du temps du durcissement sur le comportement mécanique de sable limoneux renforcé par l'émulsion de bitume.

Les résultats de ces essais sont donnés sous forme de courbes de : Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal ; Contrainte de cisaillement en fonction de contrainte normale (courbe intrinsèques).

III.2. Effet de la teneur en eau optimale sur le comportement mécanique de SRO :

Huit échantillons d'un mélange de sable limoneux reconstitué avec 70% de sable d'oued, 30% de sable concassé et substitué par 15% de limon ont été réalisés. Cette étape a pour but d'étudier l'effet de la teneur en eau optimale (Wopt=14%) sur le comportement du sable reconstitué.

Par définition, la teneur en eau est le paramètre de base de la pression du sol, d'autant plus dans le cas des sols fins que ce paramètre ne peut évoluer que lentement en raison de l'affinité de l'eau avec les particules de limon.

On a effectué des essais de cisaillement direct en deux conditions : sec et humide sous différentes contraintes normales de 25, 50, 100 et 200 kPa à une densité relative moyenne de 50%. Les figures ci-dessous montrent l'effet de la teneur en eau ainsi que de la contrainte normale sur la résistance au cisaillement du sable sec et humide.

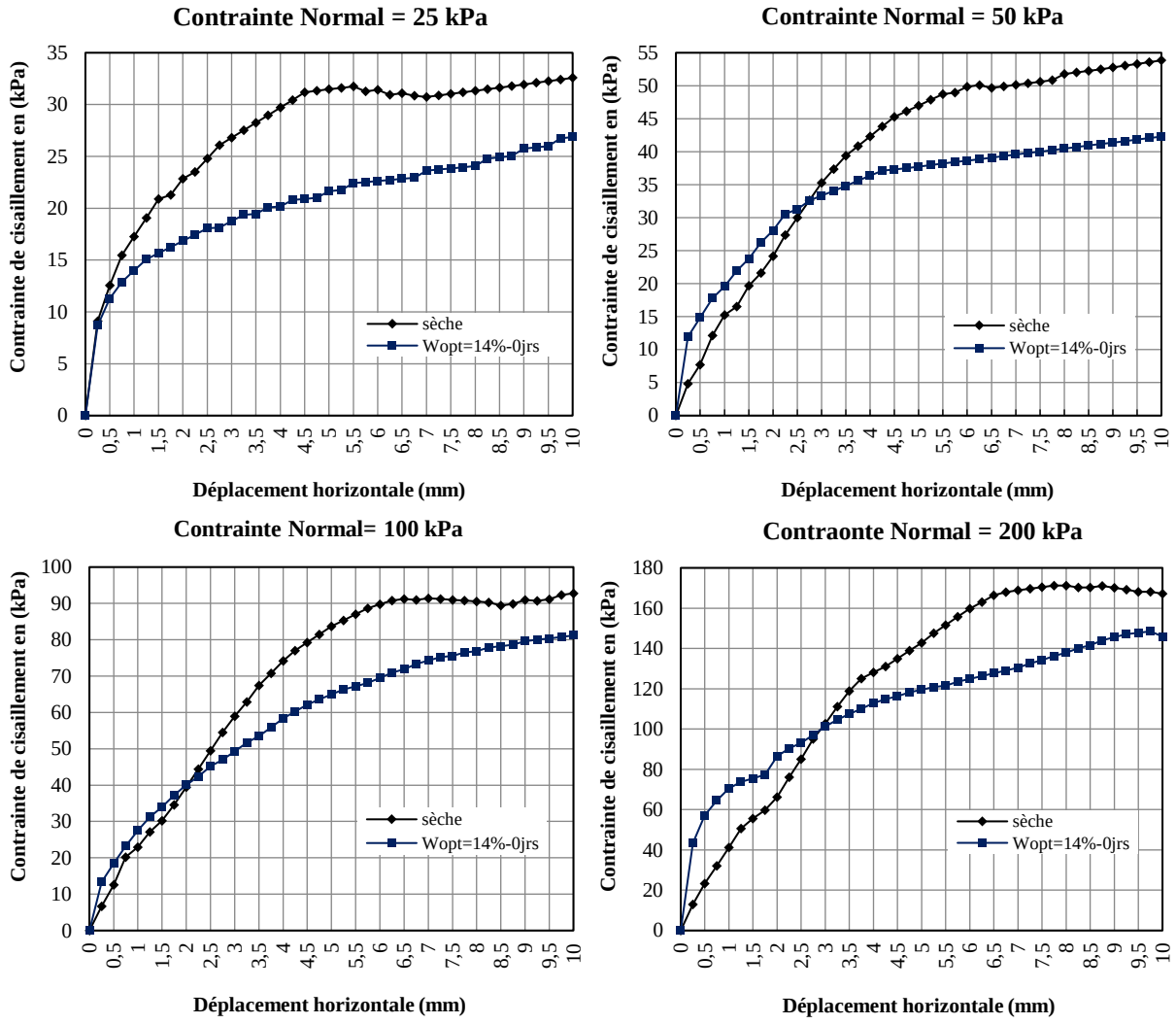


Figure III.1: Variation de la contrainte de cisaillement de SRO à l'état sèche et humide, par rapport la contrainte normal.

A partir de l'analyse des courbes de la figure III-1, on constate que la résistance au cisaillement à l'état sec est plus élevée qu'à l'état humide, ainsi l'ajout de la teneur en eau au mélange conduit à une diminution de la résistance au cisaillement de 17.5, 21.45, 12.5 et 13.26 % pour des pressions normales 25, 50, 100 et 200 kPa, respectivement.

Sous les pressions normales de 50, 100 et 200 kPa, on observe que les courbes de sable sec se situent en dessous des courbes de sable humide jusqu'au déplacement horizontal de 2,5 (mm), après ce déplacement les courbes deviennent supérieures à la courbe de sable humide. Contrairement à la courbe de pression normale de 25 kPa qui est toujours au-dessus de la courbe de sable humide.

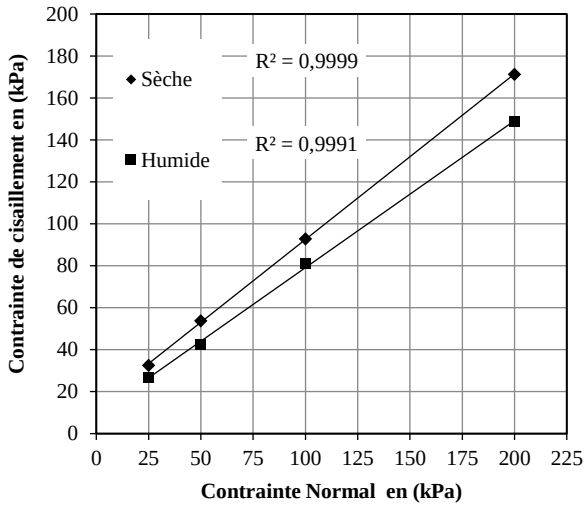


Figure III.2 : Courbes intrinsèques du ORS à l'état sec et humide.

Les paramètres déterminés à partir de la courbe intrinsèque présenté dans la Figure III-2 est l'angle de frottement interne, définit comme la pente de la droite dans le plan de contraintes principales ou plan de Mohr et la cohésion. D'après les courbes on eut remarqué que l'effet de la contrainte normale sur les courbes de cisaillement est plus remarqué au cas du sable sec que le sable humide.

Tableau III.1 : les résultats de la résistance au cisaillement due à la contrainte normale appliquée, d'un SRO à l'état sèche et humide.

Conditions de cisaillement	$\sigma_{25\ kPa}$	$\sigma_{50\ kPa}$	$\sigma_{100\ kPa}$	$\sigma_{200\ kPa}$	C (kPa)	φ (°)
Sèche	32.58	53.84	92.77	171.24	13.63	38.28
Humide (Wopt= 14%)	26.87	42.29	81.18	148.53	9.02	35.02

Sur la base de ces résultats, le tableau III-1 récapitule les résultats de la résistance au cisaillement due à la contrainte normale appliquée, ainsi que l'angle de frottement et la cohésion. On peut remarquer que : l'angle de frottement et la cohésion diminués avec l'ajout d'eau de 3.26° et 4.61 kPa, respectivement.

III.3. Comportement du sable limoneux traité par l'émulsion de bitume.

Dans le but d'étudier l'effet de renforcement du sable limoneux par l'émulsion de bitume, vingt échantillons ont été préparés pour estimer l'effet de la teneur en émulsion de bitume avec une variété de teneur en émulsion de bitume (Q_{EB}= 0, 3.5, 5, 7 et 10), tous les échantillons ont été laissés à durcir pendant 7 jours à la température ambiante du laboratoire (22°+2°) avant d'être testés. Douze échantillons ont été préparés avec une teneur optimale en émulsion de bitume et laissés à durcir pendant 7, 14 et 28 jours à la température ambiante du laboratoire (22°+2°), pour étudier l'effet du temps de durcissement sur le comportement mécanique du sable limoneux renforcé à l'émulsion de bitume.

Tous les échantillons ont été préparés avec une teneur optimale en fluide de 14% à une densité relative moyenne de 50%, et cisaillés sous des contraintes normales de 25, 50, 100 et 200 kPa.

III.3.1. Effet de la teneur en émulsion de bitume (Q_{EB}):

- **Contrainte de Cisaillement.**

La figure (III.3) présente les résultats d'essais au cisaillement direct du sable limoneux à l'état moyennement dense, dans le but d'analyser l'effet de l'ajout de l'émulsion de bitume sur la résistance au cisaillement de sable SRO, nous avons incorporé l'émulsion de bitume dans le sable ORS en différents pourcentages (Q_{EB}= 0, 3.5, 5, 7 et 10). Les échantillons d'ORS renforcé à l'émulsion de bitume ont été comparés au sable non renforcé. Pour chaque pourcentage d'émulsion de bitume, le sable a été cisaillé sous quatre contraintes normales (25, 50, 100 et 200 kPa),

A partir des résultats obtenus, nous allons interpréter les courbes selon les deux points suivants, la contrainte normale et les résistances maximale et résiduelle. On constate que la résistance maximale augmente avec l'augmentation de la quantité d'émulsion de bitume jusqu'à une valeur de 5%, puis elle diminue progressivement inferieur de la valeur du sable

non traité avec chaque augmentation de la teneur en émulsion de bitume, sous tous les contraintes normales.

Tandis que la valeur la plus élevée de la résistance résiduelle est enregistrée pour le sable non traité sous des contraintes normales de 25 et 50 kPa, où la valeur de la résistance résiduelle diminue progressivement avec l'augmentation de la teneur en émulsion de bitume.

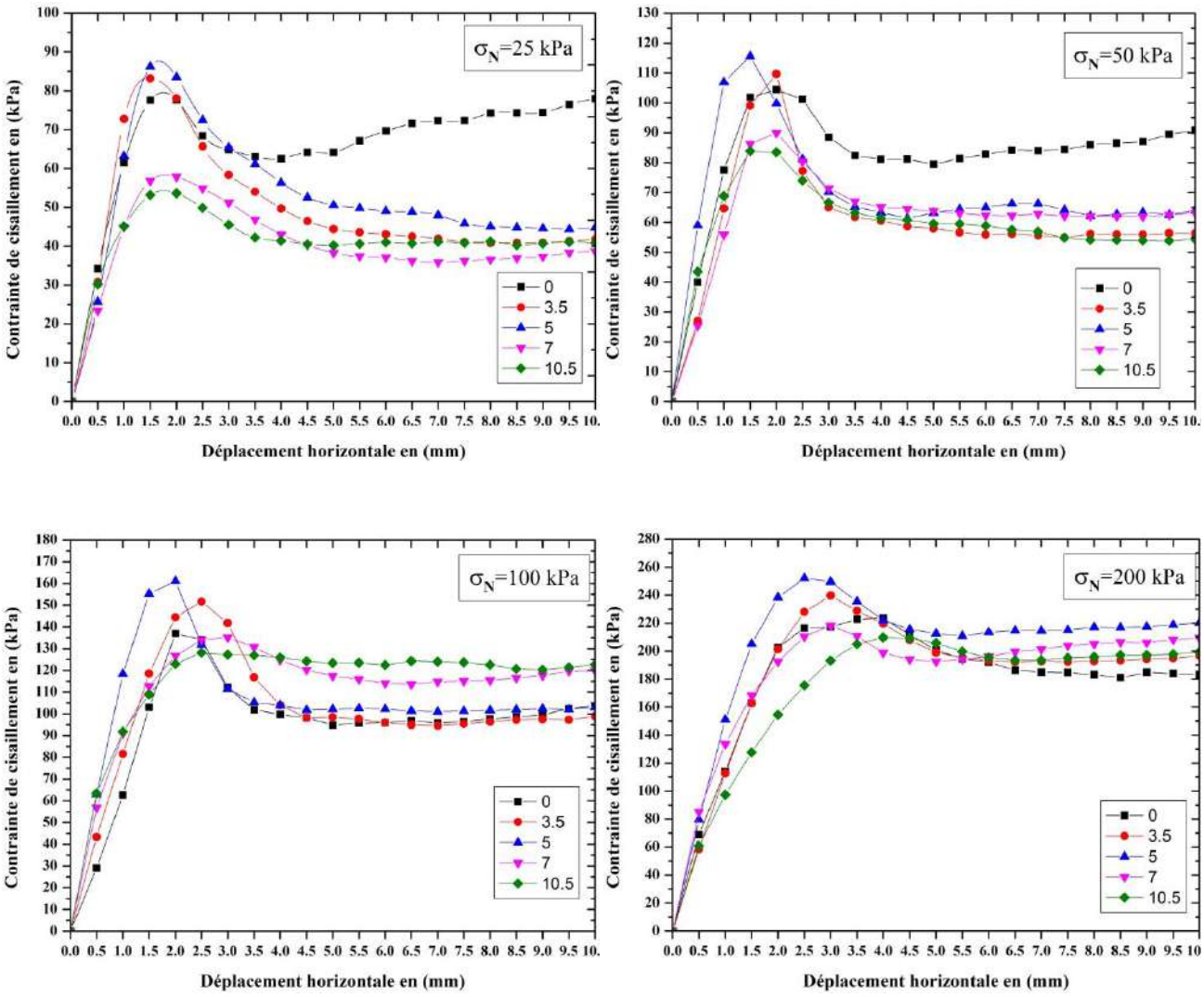


Figure III.3 : Effet de la teneur en émulsion de bitume sur la contrainte de cisaillement de sous différentes contrainte normal.

De plus, en ce qui concerne la valeur de la résistance résiduelle sous des contraintes normales de 100 et 200 kPa, on observe que tous les échantillons traités par l'émulsion de bitume montrent une meilleure performance par rapport à un sable non traité, la valeur augmente jusqu'à atteindre la valeur la plus élevée pour une teneur en émulsion de bitume de 5%, puis elle diminue immédiatement.

Le tableau III.2 ci-dessous représente les résistances maximales obtenues sous différentes contraintes normales pour chaque teneur en émulsion de bitume.

Tableau III.2 : Résistance maximales au cisaillement sous différentes contrainte normal.

Teneur en Emulsion de bitume (%)	$\sigma_{25\ kPa}$	$\sigma_{50\ kPa}$	$\sigma_{100\ kPa}$	$\sigma_{200\ kPa}$
0	80.24	104.56	141.06	223.53
3.5	85.24	109.65	151.62	239.61
5	86.61	115.7	164.2	253.16
7	58.19	90.77	135.22	218.26
10.5	53.97	85.93	128.75	210.68

La figure III.4 montre l'effet de la teneur en émulsion de bitume sur la résistance au cisaillement du sable reconstitué traité et non traité, sous des contraintes normales de 25, 50, 100 et 200 kPa, à une densité relative moyenne de 50%, la variation de la résistance maximale est une variance curviligne de tous les pourcentages, où enregistre son pic à une valeur de 5% de la teneur en émulsion.

A travers les résultats obtenus pour les spécimens contenant 5% d'émulsion de bitume par rapport au sable non traité ; l'augmentation de la résistance maximale a été enregistrée jusqu'à 86.64, 115.7, 164.2 et 253.16 kPa, il s'agit d'une amélioration de 8, 10.65, 16.40 et 13.25% ; sous des contraintes normales de 25, 50, 100 et 200 kPa, respectivement.

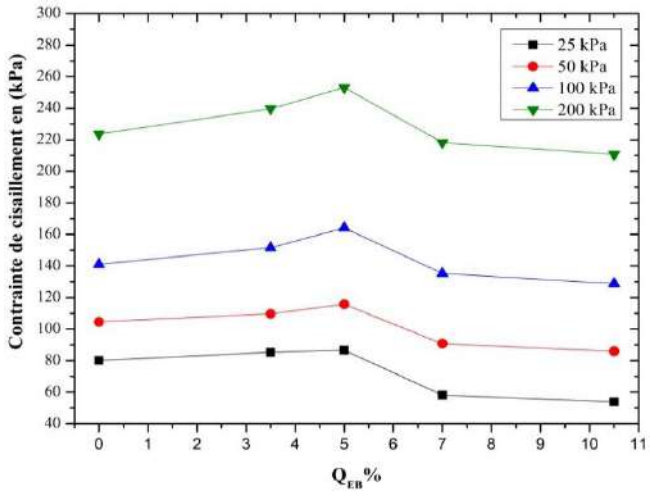


Figure III.4 : Effet de la teneur en bitume d'émulsion sur la résistance au cisaillement du sable sous différentes contraintes normales.

❖ L'Angle de frottement et la Cohésion

Les paramètres que nous extrayons des courbes intrinsèques présentées dans la Figure III-5 sont l'angle de frottement interne et la cohésion ; ils sont illustrés graphiquement dans la Figure III-6, où nous montrons l'effet de la teneur en émulsion de bitume sur l'angle de frottement et la cohésion pour une gamme de teneur en émulsion de bitume (Q_{EB}= 0, 3.5, 5, 7 et 10).

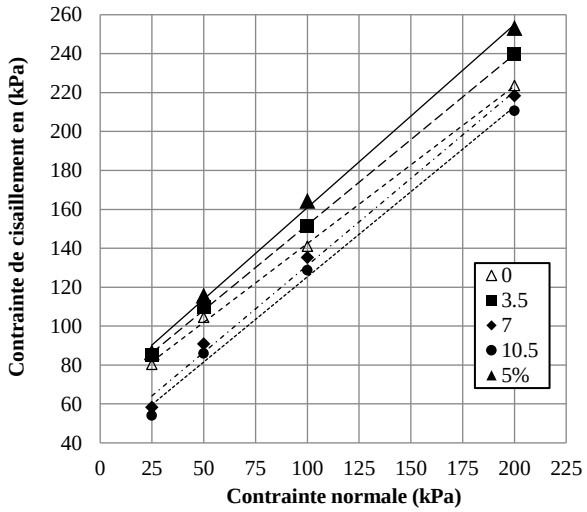


Figure III.5 : Courbes intrinsèques du SRO non traité et traité avec différentes teneur en émulsion de bitume.

La variation de l'angle de frottement et de la cohésion est curviligne ; le seuil est observé à la teneur en émulsion de bitume de 5% ; au-delà de cette valeur, l'angle de frottement et la cohésion diminuent. A travers les résultats obtenus et présentés dans le tableau III.3, l'angle de frottement et la cohésion augmentent jusqu'à 40.38° et 24.5 kPa, pour une teneur en émulsion de bitume de 5% ; après cette proportion (QEB > 5%), ces valeurs diminuent.

(a) **(b)**

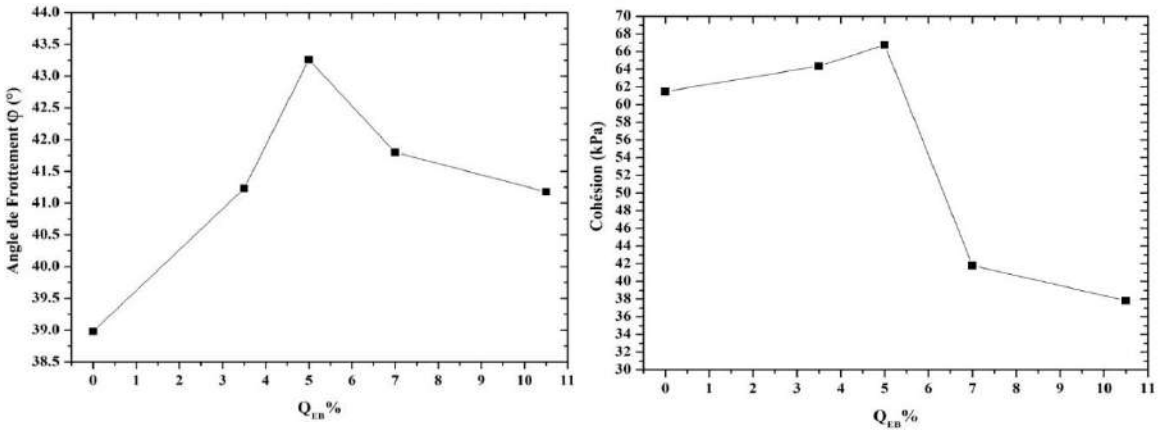


Figure III.6: la cohésion **(a)** et l'angle de frottement **(b)** en fonction de la teneur en émulsion de bitume.

Tableau III.3 : les résultats de la cohésion et l'angle de frottement d'un SRO sous l'effet de déférentes teneurs de l'émulsion de bitume

Teneur en Emulsion de bitume (%)	C (kPa)	φ (°)
0	61.48	38.98
3.5	64.36	41.23
5	66.75	43.26
7	41.80	41.80
10.5	37.82	41.18

III.3.2. Effet du temps de durcissement :

- **Contrainte de Cisaillement**

Dans le but d'analyser l'effet du temps de durcissement sur la résistance au cisaillement de sable SRO traité par un teneur de 5% d'émulsion de bitume, et testé après 7, 14 et 28 jours de durcissement ; les résultats d'essais au cisaillement direct cisaillé sous quatre contraintes normales (25, 50, 100 et 200 kPa),sont présentes sur la figure (III.6).

Les résultats des essais de cisaillement direct sous quatre pressions normales (25, 50, 100 et 200 kPa) sont présentés dans la figure III.6.

On peut voir que la résistance maximale augmente avec l'augmentation du temps de durcissement sous toutes les pressions normales et augmente également avec l'augmentation de la contrainte normale.

Alors que la différence de résistance résiduelle sous de faibles contraintes normales (25 kPa) peut être observée, la valeur résiduelle diminue après 14 jours de cure par rapport à 7 jours et revient ensuite à augmenter à 18 jours. De plus, sous une pression normale supérieure ou égale à 50 kPa, il n'y a pas d'amélioration significative entre un temps de 7 et 14 jours, puisque les valeurs sont étroitement et très proches.

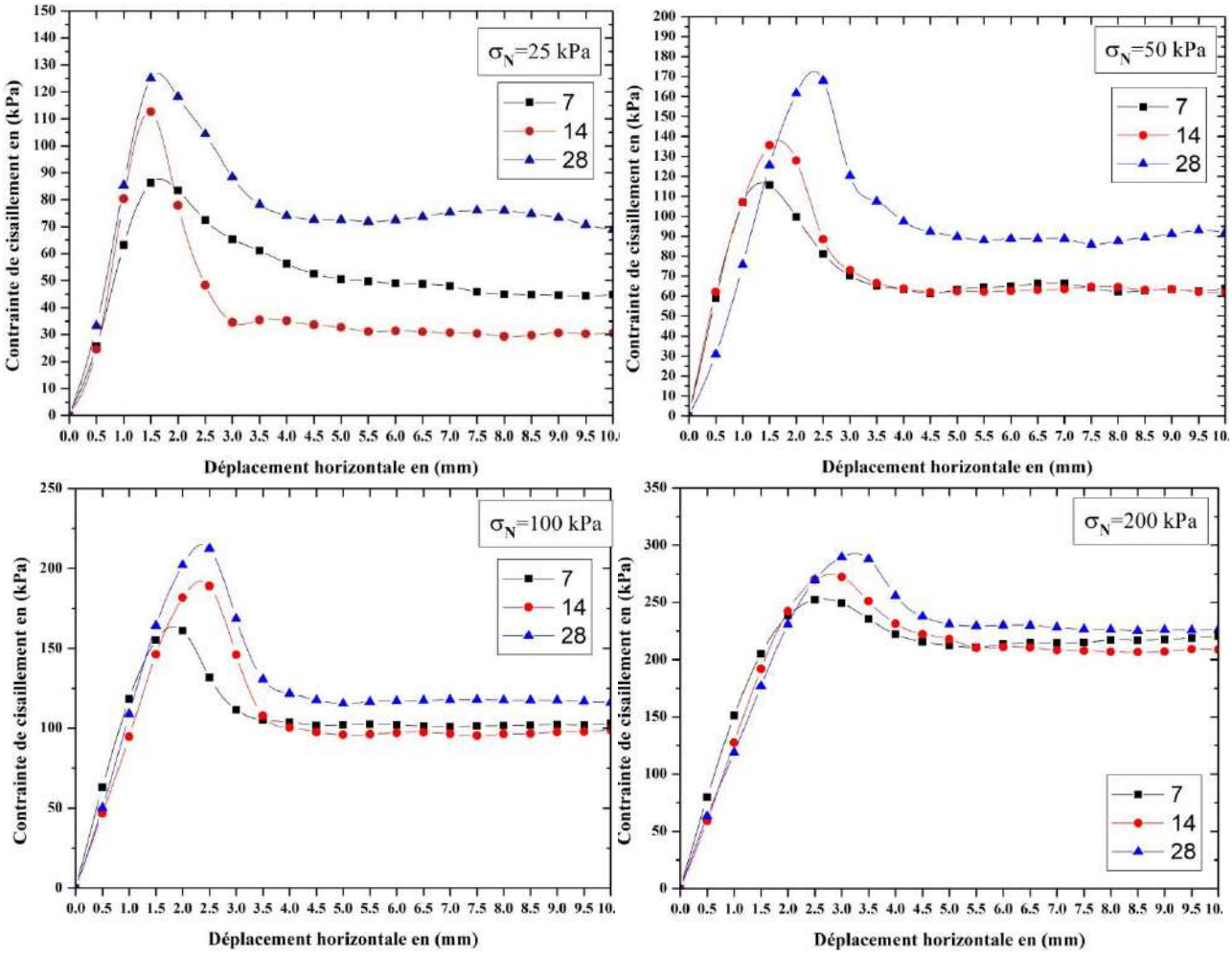


Figure III.7 : Effet du temps de durcissement (7,14 et 28 jrs) sur la contrainte de cisaillement de SRO traité par un 5% d'émulsion de bitume sous déférentes contrainte normal.

Le tableau **III.4**ci-dessous présente les valeurs des résistances maximales obtenues sous déférentes contraintes normales pour un teneur de 5% en émulsion de bitume.

Tableau III.4 : Résistance maximale au cisaillement après 7, 14 et 28 jours de durcissement sous différentes contraintes normales.

Temps de durcissement (Jrs)	σ25 kPa	σ50 kPa	σ100 kPa	σ200 kPa
7	86.61	115.70	164.20	253.16
14	112.67	138.99	189.06	274.50
28	128.87	189.06	213.37	293.08

❖ L'Angle de frottement et la Cohésion

A partir des courbes intrinsèques présentées dans la Figure III-7, les paramètres obtenus sont l'angle de frottement et la cohésion ; ils sont illustrés dans la Figure III-8 (a et b), où sont montrés les effets du temps de cure (7, 14 et 28 jours) des sables traités avec 5% d'émulsion de bitume sur l'angle de frottement et la cohésion.

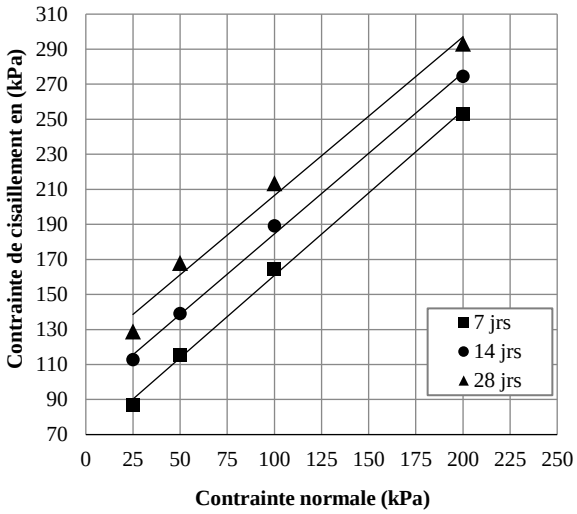


Figure III.8 : Courbes intrinsèques du SRO traité par 5% d'émulsion de bitume en fonction du temps durcissement (7,14 et 28 jrs).

D'après les figures III.7 qui présente l'effet du temps de durcissement sur la résistance au cisaillement du ORS traité par 5% d'émulsion de bitume en fonction du temps durcissement (7,14 et 28 jrs) sur quatre contraintes normales de 25, 50, 100 et 200 kPa.

On note que la résistance au cisaillement augmente linéairement jusqu'à une valeur supérieure aux quatre contraintes normales avec des optimums au 28 jrs de la cure.

L'effet du temps de durcissement sur l'angle de frottement et la cohésion d'un sable argileux reconstitué traité avec 5% d'émulsion de bitume est illustré à la Figure III-8 et cisaillé sous des pressions normales de 25, 50, 100 et 200 kPa, avec une densité relative moyenne de 50%. Cisaillé sous des pressions normales de 25, 50, 100 et 200 kPa, avec une densité relative moyenne de 50%.

On constate que la variation de la cohésion est une variation linéaire croissante, contrairement aux valeurs de l'angle de frottement qui varient avec une variance linéaire décroissante avec le temps de durcissement.

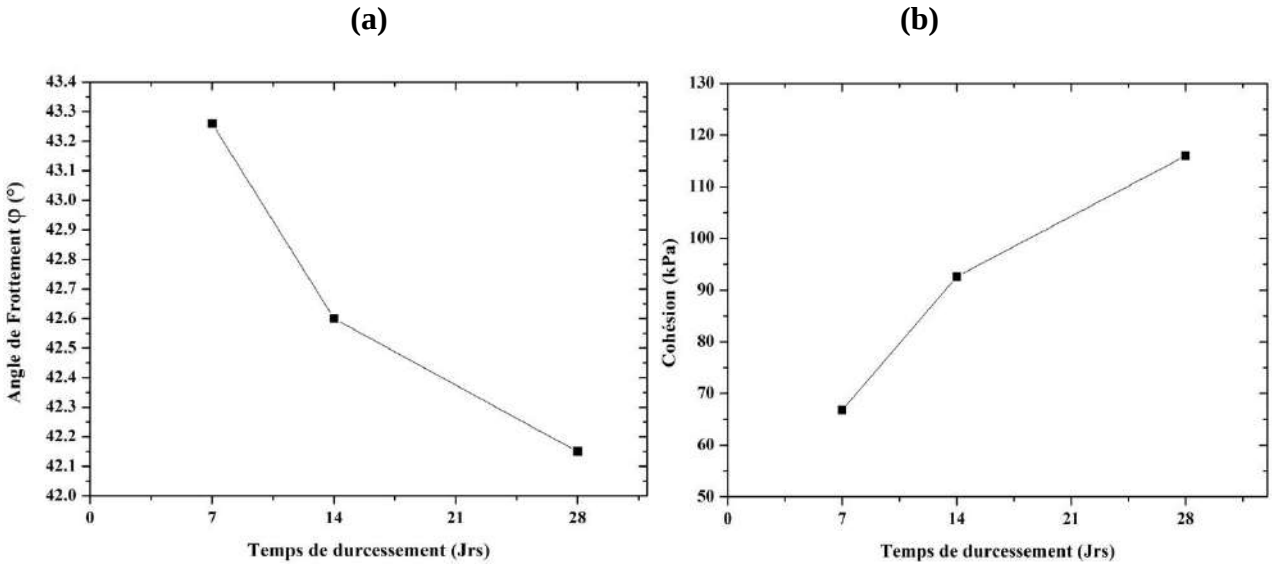


Figure III.9: L'angle de frottement **(a)** et la cohésion **(b)** en fonction du temps de durcissement d'un sable traité par un teneur de 5% d'émulsion de bitume.

A travers les résultats obtenus et présentés dans le tableau (III-5) qui présente les valeurs de la cohésion et l'angle de frottement obtenues en fonction du temps de durcissement de 7, 14 et 28 jours pour des sable reconstitué par 5% de teneur en émulsion de bitume, on observe que la cohésion augmente jusqu'à 115.96 kPa, il s'agit d'une amélioration de 74 %.

L'angle de frottement diminué jusqu'à 42.15°, cela signifie une baisse de 2.5 %, à un temps de durcissement de 28 jours, pour un sable traité par un teneur de 5% d'émulsion de bitume.

Tableau III.5 : les résultats de la cohésion et l'angle de frottement à 7,14 et 28 jours de la cure.

Temps de durcissement (Jrs)	C (kPa)	φ (°)
7	66.75	43.26
14	92.61	42.60
28	115.96	42.15

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on récapitule les principaux résultats obtenus d'une étude en laboratoire marquant une contribution d'émulsion de bitume sur le comportement mécanique des échantillons du sable (SRO) confectionné à une densité relative moyennement denses de Dr=50% et cisaillé sous déférentes contrainte normale de 25, 50, 100 et 200 kPa.

Les résultats sont énumérés ci-dessous :

1. La résistance maximale augmente avec l'augmentation de la quantité d'émulsion de bitume jusqu'à une valeur de 5%, puis diminue progressivement inferieur jusqu'à une valeur inférieure à celle du sable non traité. En outre, l'augmentation du temps de durcissement entraîne une augmentation de la résistance maximale sous toutes les contraintes normales.
2. Au fur et à mesure que l'émulsion de bitume est introduite, l'angle de frottement et la cohésion augmentent jusqu'à ce que la teneur en émulsion de bitume atteigne 5%, puis diminue progressivement. En ce qui concerne l'effet du temps de durcissement, la variation de la cohésion est une variation linéaire croissante, contrairement aux valeurs de l'angle de frottement, qui varient avec une variation linéaire décroissanteavec le temps de durcissement

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'étudier l'effet de la teneur en émulsion de bitume, ainsi que l'effet du temps de durcissement sur le comportement mécanique du sable limoneux reconstitué, il est étudié précédemment dans le cadre de l'obtention d'un master (Promo 2019), intitulé sous le thème d'Etude expérimentale sur les comportements mécaniques de sable limoneux renforcé par les fibres de verre.

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- L'ajout de la teneur en eau au mélange conduit à une diminution de la résistance au cisaillement, ainsi *que l'angle de frottement et la cohésion diminués.*
- L'angle de frottement (φ) augmente avec l'augmentation de la teneur en émulsion de bitume jusqu'à ce qu'il atteigne 5% de teneur en émulsion de bitume, puis diminue progressivement.
- Au fur et à mesure que le temps de durcissement augmente sous toutes les pressions normales, l'angle de frottement diminue linéairement.
- L'ajout de l'émulsion de bitume au sable reconstitué, la cohésion augmente jusqu'à ce que la teneur en émulsion de bitume atteigne 5%, puis diminue progressivement par la suite.
- En ce qui concerne l'effet du temps de durcissement, la variation de la cohésion est une variation linéaire croissante.
- Plus la quantité d'émulsion de bitume augmente, plus la résistance maximale augmente jusqu'à une valeur de 5% suivie d'une diminution progressive jusqu'à une valeur inférieure à celle du sable non traité. De plus, l'augmentation du temps de durcissement conduit à une augmentation de la résistance maximale sous toutes les contraintes normales.

Référence bibliographique :

[1]https://iast.univ-setif.dz/documents/Cours/Introduction_a_la_MDS.pdf -
[2] Sibille, Luc. "Bases de la Géotechnique Module MXG4 IUT Génie Civil et Construction Durable." (2018).
[3]http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap2/index.html
[4] Melle LAKHDARI Kahina, « amélioration de la résistance mécanique et l'action de l'eau, d'un sable par incorporation des stabilisation » mémoire de master, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.
[5]http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f04.htm
[6] https://www.capinov.fr/la-granulometrie.php
[7] https://www.aquaportail.com/definition-6517-plasticite-du-sol.html
[8]https://oceanservice.noaa.gov/facts/sand.html#:~:text=Sand%20forms%20when%20rocks%20break,breaking%20down%20along%20the%20way
[10]Aggoun Asma« Analyse du comportement draine et non draine du site de ouledfadel région de batna par l'essai triaxial et la boit de casagrand» mémoire de master, université de l'arbi ben m'hidioum-elbouaghi«2018 »
[11]https://fr.wikipedia.org/wiki/Silt
[12] KEBAÏLI, Nabil, 2017.« L'asphalte caoutchouc valorisation de la poudrette de caoutchouc en domaine routier », Thèse de doctorat en es sciences. OUARGLA : KasdiMerbah.
[13] IBEK Yahia et LITIEM Lamine ,«Etude des caractéristiques d'un bitume pur modifié par PVC», mémoire de master, université de KasdiMerbah 2019
[14] Site web "politamakine"<< émulsion de bitume >> http://politamakine.com/fr/les-emulsions-de-bitume/
[15] MERZOUG Karima,«caracterisation d'un sol sableux contenant des fibres caoutchouteuses»,mémoire de master, université de Mohamed Boudiaf - M'sila2015/2016
[16] wiebe, b., et all , influence of pressure, saturation, and temperature on the behaviour of unsaturated sand-bentonite. canadian geotechnical journal, 1998. 35(2): p. 194-205.
[17] bouarichaetal, glass fiber effect on the undrained static response of chlef sand (northern algeria): ierek interdisciplinary series for sustainable development 2018.
[18] Bouri, Djamel, et all . "Shear strength of compacted Chlef sand: effect of water content, fines content and others parameters." *Studiageotechnicaetmechanica* 42.1 (2020): 18-35.
[19] Aouali, Nawel, et all . "Shear strength response of fibre reinforced Chlef (Algeria) silty sand: laboratory study." *Geotechnical and Geological Engineering* 37.2 (2019): 1047-1057.
[20]bian, h., et all., influence de la saturation sur le comportement cyclique d'un sable. Laboratoire mécanique de lille and ashikagainstitute of technology, tochigi, japan, 2007.
[21]dellanoureddine, etude expérimentale de la réponse au cisaillement monotone d'un matériau granulaire: effet de l'état initial 22 octobre 2012 .
[22] Amini, F., Qi, G. Z.: Liquefaction testing of stratified silty sands. J. Geotech. Geoenviron.(2000)

[23] Ling, H.I., Wu,M.-H., Leshchinsky, D., Leshchinsky, B.: Centrifuge modeling of slope instability. J. Geotech. Geoenviron. Eng. ASCE. 135(6), 758–767 (2009)
[24] Monkul,M.M., Etminan, E., Şenol, A.: Influence of coefficient of uniformity and base sand gradation on static liquefaction of loose sands with silt soil. Dynamics and Earthquake Engineering. 89, 185–197 (2016).
[25] Monkul, M.M., Etminan, E., Şenol, A.: Coupled influence of content, gradation and shape characteristics of silts on static liquefaction of loose silty sands. Soil Dyn. Earthq. Eng. 101, 12–26 (2017).
[26] Arab, A.: Monotonic and cyclic behaviour of silty sand. C. R. Mecanique. 337, 621–631 (2009)
[27] Belkhatir, M., Arab, A., Della, N., Missoum, H., Schanz, T.: Influence of inter-granular void ratio on monotonic and cyclic undrained shear response of sandy soils. C. R. Mecanique. 338, 290–303 (2010)
[28] Aouali, N., Benessalah, I., Arab, A., Ali, B., Abed, M.: Shear strength response of fibre reinforced Chlef (Algeria) silty sand: laboratory study. Geotech. Geol. Eng. 37, 1047–1057 (2018).
[29] Benghalia, Y., Bouafia, A., Canou, J., Dupla, J.C.: Liquefaction susceptibility study of sandy soils: effect of low plastic fines. Arab. J. Geosci. 8, 605–618 (2015).
[30] Bouferra, R., Shahrour, I.: Influence of fines on the resistance to liquefaction of a clayey sand. Ground Improvement. (2004).
[31] Thevanayagam, S., Martin, G.R.: Liquefaction in silty soils-screening and remediation issues. Soil Dyn. Earthq. Eng. 22, 1035–1042 (2002).
[32] Bouri, D., Krim, A., Brahim, A., Arab, A.: Shear strength of compacted Chlef sand: effect of water content, fines content and others parameters. Studiageotechnicaetmechanica. 42, 18–35 (2019).
[33] Ling, H.I., Leshchinsky, D., Mohri, Y., Wang, J.-P.: Earthquake response of reinforced segmental retaining walls backfilled with substantial percentage of fines. J. Geotech. Geoenviron. 138(8), 934–944 (2012)
[34] CherifTaiba, Abdellah, et al. "EFFECT OF GRADATION MECHANICAL BEHAVIOR OF SILTY SAND SOILS." (2017)
[35] Yilmaz Y, Mollamahmutoglu M, Ozaydin V,&Kayabali (2008).“Experimental investigation of effect of grading characterstics on the liquefaction resistance of various graded sands.”EngGeolJ100 :91-100.
[36] JanalizadehC.A.,Ghalandarzadeh,A.,Esmaeili,M.,(2013). “Experimental study of the grading characteristic effect on liquefaction resistance of various graded sands and gravelly sands”. Arab Geosci DOI 10.1007/s12517-013-0886-5.
[37] Shinohara, Kunio, MikihiroOida, and Boris Golman. "Effect of particle shape on angle of internal friction by triaxial compression test." *Powder technology* 107.1-2 (2000): 131-136.
[38] Holtz, W. G. and Gibbs, H. J., 1956, “Triaxial Shear Tests onPervious Gravelly Soils,” J. Soil Mech. Found. Div., Vol. 82, No. 1, pp. 1–22.
[39] Santamarina, J. Carlos, and Gye Chun Cho. "Determination of critical state parameters in sandy soils—simple procedure." *Geotechnical testing journal* 24.2 (2001): 185-192.
[40] Holtz, Robert D., William D. Kovacs, and Thomas C. Sheahan. An introduction to geotechnical engineering.Vol.733.Englewood Cliffs: Prentice-Hall,1981.

[41] Cho, G. C., Dodds, J., and Santamarina, J. C., 2006, “Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands,” J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 132, No. 5, pp. 591–602,
[42] Guo, Peijun, and Xubin Su. "Shear strength, interparticle locking, and dilatancy of granular materials." Canadian Geotechnical Journal 44.5 (2007): 579-591.
[43] Yang, J., and L. M. Wei. "Static liquefaction of granular soils: The Role of Grain Shape and Size." International Workshop on Bifurcation and Degradation in Geomaterials. Springer, Cham, 2014.
[44] Onyelowe, K. C., and Okoafor, F. O. 2012. Geochemistry of Soil Stabilization. ARPN Journal of Earth Sciences 1 (1): 32-5.
[45] Terrel, R. L., Epps, J. A., Barenberg, E. J.. Mitchell, J. K. and Thompson, M. R., Soil Stabilization in Pavement Structures-A User’s Manual, Vol. 2, Mixture Design Consideration. Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1984.
[46] AI-Abdul Wahhab, H.I. and Abduljauwad, S.N., 1989. A study of soil stabilization in the Eastern Province of Saudi Arabia. Proc. l lth IRF World Meeting, Seonl, Korea, Vol. 3: 117-120.
[47] Dunn, C. S., and Salem, M. N. Influence of Processing Procedures on Strength of Sand Stabilized With Cationic Bitumen Emulsion. Highway Research Record 351, 1971, pp. 50-65.
[48] Lees, G. The Influence of Binder and Aggregate in Bituminous Mixtures. Jour. Institution of Highway Engrs., Vol. 16, No. 1, 1969, pp. 7-19.
[49] Wahhab, HI Al-Abdul, and I. M. Asi. "Improvement of marl and dune sand for highway construction in arid areas." Building and environment 32.3 (1997): 271-279.
[50] Batra, Simarpreet Singh, and Jashandeep Singh Arora. "Effect of cationic bitumen emulsion on shear strength parameters of soil." International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET) 5.09 (2016).
[51] MayankChandra ,Sukhmanjit. “A laboratory study on implementation of bitumen emulsion in gravel road” International Journal of Latest Research In Engineering and Computing (IJLREC) Volume 5, Issue 1 , Page No. 4-8 January-February 2017.
[52] Dunn, C. S., and Salem, M. N. Influence of Processing Procedures on Strength of Sand Stabilized With Cationic Bitumen Emulsion. Highway Research Record 351, 1971, pp. 50-65.
[53] Dunn, C. S., and M. N. Salem. "Temperature and time effects on the shear strength of sand stabilized with cationic bitumen emulsion." Highway Research Record 442 (1973).
[54] Al-Abdul Wahhab, H. and Hicks, R. G., Evaluation of emulsified asphalt treated mixes. In Proc. 3rd IRFMiddle East Regional Meeting, Riyadh, Saudi Arabia, 1988, pp. 3.159-3.174.
[55] Puzinauskas, V. P. and Jester, R. N., Design of Emulsified Asphalt Paving Mixes. NCHRP No. 259, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1983.