REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Etude numérique d'un remblai stabilisé par l'ajout de ciment

Présenté par

Kara bernou Ratiba

Assain imene

Proposée et Dirigée par

Dr. Otsmane Lalahoum

Promotion Juin 2023

Remerciement

Avant tout, nous remercions ALLAH, le Tout-Puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté d'accomplir ce travail.

Nos sincères remerciements vont tout d'abord à notre promotrice, Madame OTSMANE.L, qui a manifesté une grande volonté en supervisant ce travail.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers les membres du jury, qui mettront des efforts dans l'évaluation de ce modeste travail. Nous remercions également tous les enseignants du département de Génie civil.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents : Ma mère, qui a travaillé pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils. Pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, je lui exprime à travers ce travail, aussi modeste soit-il, mes sentiments et ma gratitude éternelle.

À mes frères et ma sœur : "Nasro, Mohamed et Anfel", vous m'avez soutenu en toutes circonstances.

À ma chère binôme, Assain Imene, pour sa compréhension

À Monsieur Houssine Tayeb Rahmani, Monsieur Rahmoune Amine, Madame Amri Salima et toute l'équipe de MAPA pour leur aide dans ce travail. À tous les enseignants qui ont contribué à ma formation."

À mes collègues Abderraouf.,Mounir , Abderrahmane et ali .

À mes amis : Imene, Meriem, Amel, Amina, Nessrine, Faiza, Warda, Karima, Yakout, Maria, Soumia et Nour El Houda pour leur aide et leur soutien dans les moments difficiles.

À toute la promotion 2022-2023.

Ratiba kara bernou

Dédicace

je dédie ce mémoire

A ma chère mère ,qui nous a quitte : affable , aimable : tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence , la source et tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cesse de m'encourager et de prier pour moi . Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifies que tu n'as cesse de me donner depuis ma naissance , durant mon enfance et même a l'âge adulte .

A mon père qui m' a encouragé à aller de l'avant et qui m'donne tout son amour

A mes sœurs : ASMAA, ZINBE et MAZOURA. A mon petit frère FARES

A toute la famille Assain et Bassour

mes meilleurs amis IMENE et RATIBA qui m'ont donné envie de continuer Et mes amis Faiza et Maria, Soumia, Warda, Karima, yakout, Nour Al-Huda, Marwa

À mes collègues ,Mounir , Abderrahmane et ali et tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Imene assain

ملخص

نظرًا لخصائص التربة الرملية، والتي غالبًا ما تعتبر تربة سيئة المعايرة ذات نفاذية عالية، واستخدامها المتكرر كطبقة أساس أو ردم في طبقات الأساس والأساس للطرق والطرق السريعة، فإن الاستقرار مطلوب لتحسين خصائص هذه المواد. يعد تثبيت التربة، عن طريق إضافة الأسمنت، تقنية مثيرة للاهتمام، من أجل تحسين خصائصها الميكانيكية والفيزيائية، وخاصة مقاومة القص.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إجراء تحليل رقمي لسلوك الردم منخفض الارتفاع معالج بإضافة الأسمنت من أجل رؤية تأثير الأسمنت على استقرار الردم رمز حساب تم إجراء التحليل العددي باستخدام Plaxis 8.2

الكلمات المفتاحية :

التربة الرملية ، ردم ، تحسين ، اسمنت ،تحليل رقمي

Résumé

En raison des propriétés des sols sableux, qui sont souvent considérés comme des sols mal calibrés à haute perméabilité, et de leur utilisation fréquente en tant que couche de fondation ou de remblai dans les couches de base et de fondation des routes et autoroutes, il est nécessaire d'effectuer une stabilisation afin d'améliorer les caractéristiques de ces matériaux.

La stabilisation du sol, par ajout de ciment est une technique intéressante, dans le but d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques et physiques, notamment leurs résistances au cisaillement.

L'objectif principal de cette étude est de procéder à une analyse numérique du comportement d'un remblai de faible hauteur traitée par l'ajout de ciment,une analyse numérique a été effectuée à l'aide de code de calcul Plaxis 8.2 en vue de voir l'effet de ciment sur l'évolution du tassement et la stabilité du remblai.

Les mots clés :

sols sableux , remblai, stabilisation, amélioration, ciment, analyse numérique, Plaxis 8.2

Abstract

Due to the properties of sandy soils, which are often considered poorly graded soils with high permeability, and their frequent use as a foundation or embankment layer in the base and foundation layers of roads and highways, it is necessary to carry out soil stabilization in order to improve the characteristics of these materials.

Soil stabilization, through the addition of cement, is an interesting technique aimed at improving their mechanical and physical properties, particularly their shear strengths.

The main objective of this study is to conduct a numerical analysis of the behavior of a low-height embankment treated with the addition of cement.

The numerical analysis was performed using the Plaxis 8.2 computational software to assess the effect of cement on the settlement evolution and stability of the embankment.

Keywords:

sandy soils, embankment, stabilization, improvement, cement, numerical analysis, Plaxis

Sommaire

REMERCIEMENT II

DEDICACE III

ملخص V

RESUME V

ABSTRACT VI

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLS

ABREVIATION

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES SOLS

I.1. INTRODUCTION 3

I.2. GENERALITE SUR LES SOLS 3

I.2.1. DEFINITION DE SOL 3

I.2.2. TYPE DES SOLS 4

I.2.2.1. LES SOLS PULVERULENTS 4

I.2.2.1.1. LES SABLES 4

I.2.2.1.2. LES CARACTERISTIQUES DES SABLES 5

I.2.2.1.3. TYPES DES SABLES 6

I.2.2.2. LES SOLS COHERENTS 8

I.2.2.2.1. LIMON 8

I.2.2.2.2. LES CARACTERESTIQUES DE SOL LIMONEUX 9

I.2.2.2.3. AVANTAGES DU SOL LIMONEUX 9

I.2.2.2.4. LES INCONVÉNIENTS 9

I.3. TRAITEMENT DES SOLS 9

I.3.1. OBJECTIF DE TRAITEMENT DU SOL 9

I.3.2. LES TECHNIQUES DES TRAITEMENTS DES SOLS 10
I.3.2.1. TRAITEMENT MECANIQUE 10
1. STATIQUE 10
2. DYNAMIQUE : 11
I.3.2.2. TRAITEMENT PHYSIQUE 12
I.3.2.3. TRAITEMENT CHIMIQUE 12
A) TRAITEMENT PAR LA CHAUX 12
B) TRAITEMENT PAR LE CENDRE VOLANTE 12
C) TRAITEMENT PAR LE CIMENT 13
1. DEFINITION 13
2. FABRICATION DU CIMENT 13
3. COMPOSITION CHIMIQUE 14
4. LES DIFFERENTS TYPES DE CIMENT 15
5. AVANTAGES DE LA STABILISATION PAR LE CIMENT 17
6. INCONVENIENTS DE STABILISATION PAR LE CIMENT 17
7. L'ACTION DU CIMENT SUR LES SOLS 17
8. TECHNIQUES DE TRAITEMENT DU SOL AVEC CIMENT SUR CHANTIER 17
I.3.3. DOMAINE D'APPLICATION DES ADDITIFS CHIMIQUES 20
1) LES REMBLAIS 21
2) LES MATERIAUX DES REMBLAIS 21
3) PROBLEMES POSES PAR LA CONSTRUCTION DES REMBLAIS 22
4) METHODES DE DIMENSIONNEMENT DES REMBLAIS 24
I.4. CONCLUSION 25

CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES ET RESULTATS DES MATERIAUX UTILISES

II.1. INTRODUCTION 26
II.2. LES MATERIAUX UTILISENT 26
II.2.1. SABLE LIMONEUX 26
II.2.2. CIMENT 27
II.3. LES RESULTATS DES ESSAIS AU LABORATOIRE 28

II.3.1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE 28
II.3.2. LES LIMITES D'ATTERBERG (NF P 94-051) 30
II.3.3. ESSAI PROCTOR NORMAL (NF P 97-093) 32
II.3.4. LA MASSE VOLUMIQUE DES PARTICULES SOLIDES DES SOLS (METHODE DU PYCNOMETRE EAU) (NF P 94-054) 33
II.3.5. LES MASSES VOLUMIQUES MINIMALE ET MAXIMALE DES SOLS (NF P 94-059) 34
II.3.6. ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT 34
1) EFFET DE LA TENEUR EN CIMENT SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN SABLE LIMONEUX A 0 JOUR DE DURCISSEMENT 37
2) EFFET DE LA TENEUR EN CIMENT SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN SABLE LIMONEUX A 7 JOURS DE DURCISSEMENT 40
3) EFFET DE LA TENEUR EN CIMENT SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN SABLE LIMONEUX A 14 JOURS DE DURCISSEMENT 42
4) EFFET DE LA TENEUR EN CIMENT SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN SABLE LIMONEUX A 28 JOURS DE DURCISSEMENT 45
5) EFFET DU TEMPS DE DURCISSEMENT SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN SABLE LIMONEUX 48
II.4. CONCLUSION 57

CHAPITRE III : MODELISATION NUMERIQUE

III.1. INTRODUCTION 59
III.2. LE LOGICIEL PLAXIS 8.2 59
III.3. LES ETAPES DE MODELISATION PAR PLAXIS 60
III.4. MODELE DE LA MODELISATION (MOHR-COULOMB) 62
III.5. PARAMETRES DE LA MODELISATION 63
III.6. PRESENTATION DU CAS ETUDIE 67
III.7. LES PARAMETRES DE LA MODELISATION : 67
III.8. CONCEPTION DE MODELE 69
III.9. LES PHASES DE CALCUL 69
III.10. LES RESULTATS 71
III.11. CONCLUSION 77
CONCLUSION GENERALE 76

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Liste des figures

Chapitre I : généralité sur les sols

Figure I. 1:Les trois phases du sol 3
Figure I. 2:Exemples des types des sols pulvérulents 4
Figure I. 3: Microstructure des sols granulaires 5
Figure I. 4: Exemples des sables naturels 7
Figure I. 5:Sable artificiels (sable concassé) 7
Figure I. 6:Structure des sols cohérents 8
Figure I. 7:Méthode de traitement statique 10
Figure I. 8:Méthode de traitement dynamique 11
Figure I. 9:Fabrication du ciment 14
Figure I. 10:Préparation de la couche de forme, avant épandage du ciment et malaxage du sol à traiter 18
Figure I. 11:Malaxage du ciment sur chantier 18
Figure I. 12:Réglage. 19
Figure I. 13:Compactage 19
Figure I. 14:Protection superficielle 20
Figure I. 15: Schéma présentant un remblai 21
Figure I. 16:Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation 23

Chapitre II : matériaux choisir

Figure II. 1:Matériaux utilisés 26
Figure II. 2:Caractéristique de ciment CEM I 42.5 N SR3 LH (SPA BISKRA CIMENT) 27
Figure II. 3:Essai de l'Analyse granulométrique 28
Figure II. 4:Courbes granulométrique des matériaux utilisés. 29
Figure II. 5:Les limites d'Atterberg 30
Figure II. 6:Courbe de détermination de la limite de liquidité de l'échantillon 30
Figure II. 7:Classification des sols fins selon le système USCS/LCPC 31
Figure II. 8:Essai Proctor normal 32
Figure II. 9:Poids volumique sec en fonction de la teneur en eau du sable-limoneu 33
Figure II. 10: Pycnomètre et Mode opération. 33
Figure II. 11:Préparation des mélanges (sable limoneux/ciment) à l'état sec 36
Figure II. 12:Préparation des mélanges avec une teneur en eau de 14% 36
Figure II. 13:Préparation des échantillons et laisser sécher 36
Figure II. 14:Courbes de contrainte au cisaillement/déplacement horizontal à 0 jour de durcissement 37
Figure II. 15:Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment 38

Figure II. 16: φ et C (0 jour) 39
Figure II. 17:Courbes de contrainte au cisaillement/déplacement horizontal à 7 jour de durcissement 40
Figure II. 18: Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment 41
Figure II. 19:φ et C (7 jour). 42
Figure II. 20: Courbes de contrainte au cisaillement/déplacement horizontal à 14 jour de durcissement 43
Figure II. 21: Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment 44
Figure II. 22:φ et C (14 jour) 45
Figure II. 23:courbes de contrainte au cisaillement/déplacement horizontal à 28 jours de durcissement 46
Figure II. 24:Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment 47
Figure II. 25:φ et C (28 jour) 47
Figure II. 26:Les courbes des contraintes de cisaillement des teneurs en ciment 48
Figure II. 27: L'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 100 kpa 49
Figure II. 28:Les courbes des contraintes de cisaillement des teneurs en ciment 50
Figure II. 29: L'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à200 kPa 51
Figure II. 30:Les courbes des contraintes de cisaillement des teneurs en ciment 52
Figure II. 31: L'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 300 KPa. 53
Figure II. 32:L’ angle de frottement en fonction du temps de durcissement 54
Figure II. 33:La cohésion en fonction du temps de durcissements 56

Chapitre III : Modélisation numérique

Figure III. 1:Fenetre principale du programme d'entrée des données(input)(mode de création géométrique) 60
Figure III. 2:Fenêtre principale du programme de calcul 61
Figure III. 3:Barre d'outils de fenêtre principale du programme output 61
Figure III. 4:Barre d'outils de la fenêtre principale du programme curves 62
Figure III. 5:Cercles de contrainte à la rupture;l'und'entre eux touche l'enveloppe de coulomb 62
Figure III. 6:Surface de rupture dans l'espace des contraintes principales pour un sol sans cohésion 63
Figure III. 7:Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb 63
Figure III. 8:La courbe de contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontal. 64
Figure III. 9:présentation de cas études 67
Figure III. 10:Les condition aux limites 69
Figure III. 11:Phase de condition initiale 69
Figure III. 12:Activation de la première couche de remblai 70
Figure III. 13:Activation de la deuxième couche de remblai 70
Figure III. 14:Activation des surcharges 70
Figure III. 15: Les déplacements total de remblais sans l'ajoute de ciment 71
Figure III. 16:Les déplacements total de remblais avec 0.5% de ciment 72
Figure III. 17:Les déplacements total de remblais avec 1.5% de ciment 73
Figure III. 18:Les déplacements total de remblais avec 2.5% de ciment 74

Figure III. 19:Les déplacements total de remblais avec 2.5% de ciment 75
Figure III. 20: Les graphes de déplacements totaux de remblai traité par différents pourcentages de ciment en fonction de temps 75

Liste des tableaux

Chapitre I : généralité sur les sols

Tableau I. 1:Composition approximative de l'oxyde limites du ciment portland.....15
Tableau I. 2: . Les types des ciments normalisé 16
Tableau I. 3: Ordre de grandeur de la pente d'un remblai en fonction de sa hauteur 25

Chapitre II : matériaux choisir

Tableau II. 1:Propriétés physique des matériaux utilisés 29
Tableau II. 2:Paramètres des limites d'Atterberg de limon utilisé 31
Tableau II. 3 :Masses volumiques des grains solides[.....34
Tableau II. 4:Masses volumiques et indices de vides (minimaux et maximaux) de sol utilise 34
Tableau II. 5:Programme des essais effectués.....35
Tableau II. 6:Évaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment. 38
Tableau II. 7: Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment. 41
Tableau II. 8:Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment. 44
Tableau II. 9:Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment 46
Tableau II. 10:L'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 100 kPa 49
Tableau II. 11: L'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 200 kPa 51
Tableau II. 12:L'effet du temps de cure (0,7,14,28 jours)à 300 kPa.....53
Tableau II. 13: Les résultats de l'angle de frottement à 0,7,14 et 28 jours de la cure.....55
Tableau II. 14: Les résultats de la cohésion et à 0,7,14 et 28 jours de la cure.....56

Chapitre III : Modélisation numérique

Tableau III. 1:Coefficient de perméabilité.....66
Tableau III. 2:Les caractéristiques de sols supports 68
Tableau III. 3:Les caractéristiques de remblai.....68
Tableau III. 4:les déplacements totale de remblai traité par différentes pourcentages de ciment en fonction de temps.....76

Liste des symboles

D: Diamètre équivalant

C: Cohésion

Φ: angle de frotement

α: la pente de remblai

K: permiabilité

K_x: permiabilité horizontal

K_y: permiabilité vortical

K_0: pression des tairres au repos

d_{max}: diametre maximale

W_L: limite de liquidité

W_p: limite de plasticité

I_P: indice de plasticité

γ_d: poid volumique sec

γ_s: poid volumique des grains solides

γ_{sat}: poid volumique saturé

γ_w: poid volumique d'eau

ρ_s: masse volumique des grains solides

$\rho_{d\ max}$: masse volumique sec maximale

$\rho_{d\ min}$: masse volumique sec minimale

w: la teneur en eau

e: indice des vides

e_{max}: indice des vides maximale

e_{min}: indice des vides minimale

τ: contrainte de cisaillement

σn: contrainte normale

E: module de Y'oung

E_{oed}: module de Y'oung oedometrique

G: module de cisaillement

ε: deformation

ν: coefficient de poisson

ψ: angle de dilatance

Qciment: quantité de ciment

Abréviations

CU: consolidé non-drainé

MC: mohr-coulomb

MEF: méthode des éléments finis

Introduction générale

Introduction générale

Le sol a toujours été un matériau largement utilisé dans la construction en raison de sa disponibilité et de son coût abordable, ce qui constitue ses principaux atouts. Toutefois, ses propriétés mécaniques ne sont pas toujours satisfaisantes, ce qui peut entraîner de nombreux problèmes lors de la construction de grandes structures. En particulier, lorsqu'il s'agit un remblai routier, plusieurs préoccupations se posent quant aux caractéristiques géotechniques de ce sol (faible résistance au cisaillement, par exemple).

Afin de réduire les problèmes liés aux sols, plusieurs techniques de stabilisation peuvent être utilisées. Le choix de la technique dépend de plusieurs paramètres tels que les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions environnementales. De nos jours, divers produits sont utilisés en association avec les sols afin d'obtenir un matériau de construction doté de propriétés supérieures à celles du sol d'origine.

Il existe plusieurs techniques disponibles pour améliorer le comportement géotechnique des remblais routiers, telles que le traitement chimique par le ciment. Cette méthode consiste à mélanger du ciment avec le sol du remblai, ce qui entraîne une réaction chimique permettant d'améliorer ses propriétés mécaniques. Cette technique est couramment utilisée pour augmenter la résistance du sol, réduire sa compressibilité et améliorer sa stabilité, contribuant ainsi à une meilleure performance du remblai routier.

Pour atteindre l'objectif visé, notre travail est divisé en trois chapitres sont :

Le premier chapitre est conservé aux généralités sur les sols ainsi que les différentes techniques de traitement, en mettant notamment l'accent sur le traitement chimique par le ciment. Nous procédons à une présentation détaillée de cette méthode qui consiste à utiliser du ciment pour traiter les sols.

Le deuxième chapitre est un résumé de l'étude réalisée l'année précédente par la promotion 2022 sur l'amélioration des sols par l'ajout de ciment. L'étude avait pour thème "Évaluation expérimentale du comportement mécanique du mélange sable limoneux-ciment". Nous présenterons leurs résultats obtenus au cours de cette étude, mettant en évidence les effets de l'ajout de ciment sur les propriétés mécaniques du mélange de sable limoneux.

Le troisième chapitre est réservé à l’analyse numérique réalisée à l'aide du logiciel de calcul par éléments finis "Plaxis 8.2". Cette analyse portera sur un remblai routier constitué de sable limoneux traité par le ciment. L'objectif de cette analyse sera de quantifier les

déformations (Tassement) et d'étudier l'influence des différents pourcentages de ciment utilisés en fonction du temps**.**

A la fin on a terminé notre travaille par une conclusion générale où on a récapitulé nos résultats .

Chapitre I :

Généralité sur les sols

I.1. Introduction

Les roches et les sols sont des matériaux constitués a la surface de l'écorce terrestre, le sol et un matériaux composes de matière organique, de minéraux, d'eau et d'aire. La volatilité de ces deux derniers éléments conduit à plusieurs problèmes qui peuvent être résolus en améliorant le sol de plusieurs façons, il est utilisé dans plusieurs projets (les routes, les remblais, les fondations,...)

I.2. Généralité sur les sols

I.2.1. Définition de sol

Le sol est un ensemble des particules minérales naturelles facilement séparé ou réduis en parties et dont la masse totale peut contenir de l'air, de l'eau et matière organique. Le sol est un matériau à trois phases : agrégats de particules minérales dont les vides peuvent être remplis de liquide et/ou de gaz. On distingue globalement :

- La phase solide ou squelette solide, constituée par les particules minérales ou organiques de l'agrégat ;
- La phase liquide, constituée par l'eau qui occupe les vides de l'agrégat. Si tous les vides sont remplis d'eau, le sol est dit saturé ; sinon, il est dit non saturé ou partiellement saturé ;
- La phase gazeuse, Dans un sol non saturé, une partie des vides de l'agrégat est remplie par du gaz, essentiellement de l'air **;**

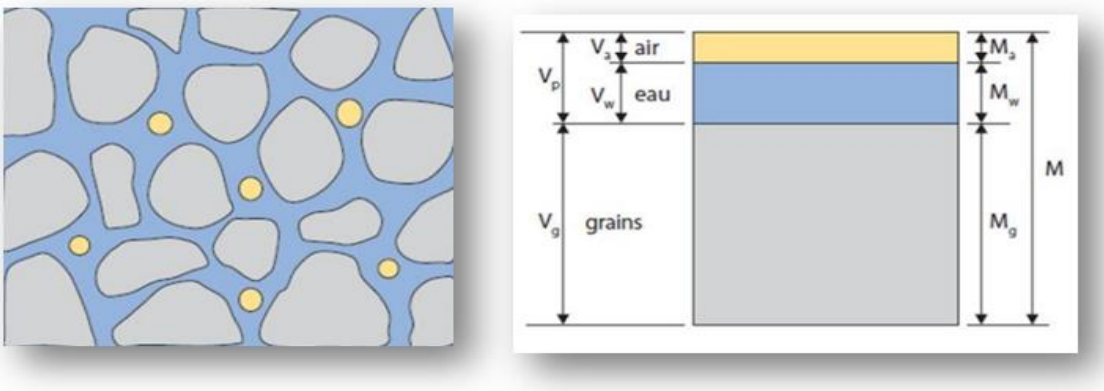


Figure I. 1: Les trois phases du sol

La coexistence, dans le matériau, de trois phases présentant de grandes différences dans leurs propriétés physiques et mécaniques explique la complexité du comportement mécanique des sols. La définition d'un sol repose donc sur une description précise des trois phases **[1]** .

I.2.2. Type des sols

On distingue deux types des sols (les sols pulvérulents «à gros grain» et les sols cohérons «à grain fin)

I.2.2.1. Les sols pulvérulents

Les sols pulvérulents sont constitués de particules indépendantes (D≥80µm) avec une cohésion négligeable (c), angle de frottement(φ) très élevé, indice de plasticité (I_P) très faible avec une grande perméabilité (K), une grande résistance au cisaillement et aucune résistance à la traction. En a 4 types des sols grenus(les blocs, les cailloux, les graviers et les sables)



Figure I. 2: Exemples des types des sols pulvérulents

(a) blocs (b) cailloux (c) graviers (d) sables

I.2.2.1.1. Les sables

Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meuble de faible cohésion(négligeable) et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0,062 et 5mm. Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths) ainsi que des débris calcaires de coquillage et de corail. Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (Taille des grains) et un aspect minéralogique (Nature minéralogique des grains). une particule individuelle est appelée grain de sable. Le sable peut avoir une origine naturelle ou artificielle ; d'origine naturelle, il provient

de la désagrégation naturelle de roches au cours de leur processus d'érosion, artificiel, il est obtenu par broyage de roches massives après des opérations de concassage et de criblage. La composition du sable varie d'un endroit à l'autre selon la nature des roches **[2]**.

I.2.2.1.2. Les caractéristiques des sables

- **Microstructure des sables**

La microstructure d'un sable consiste de trois formes :

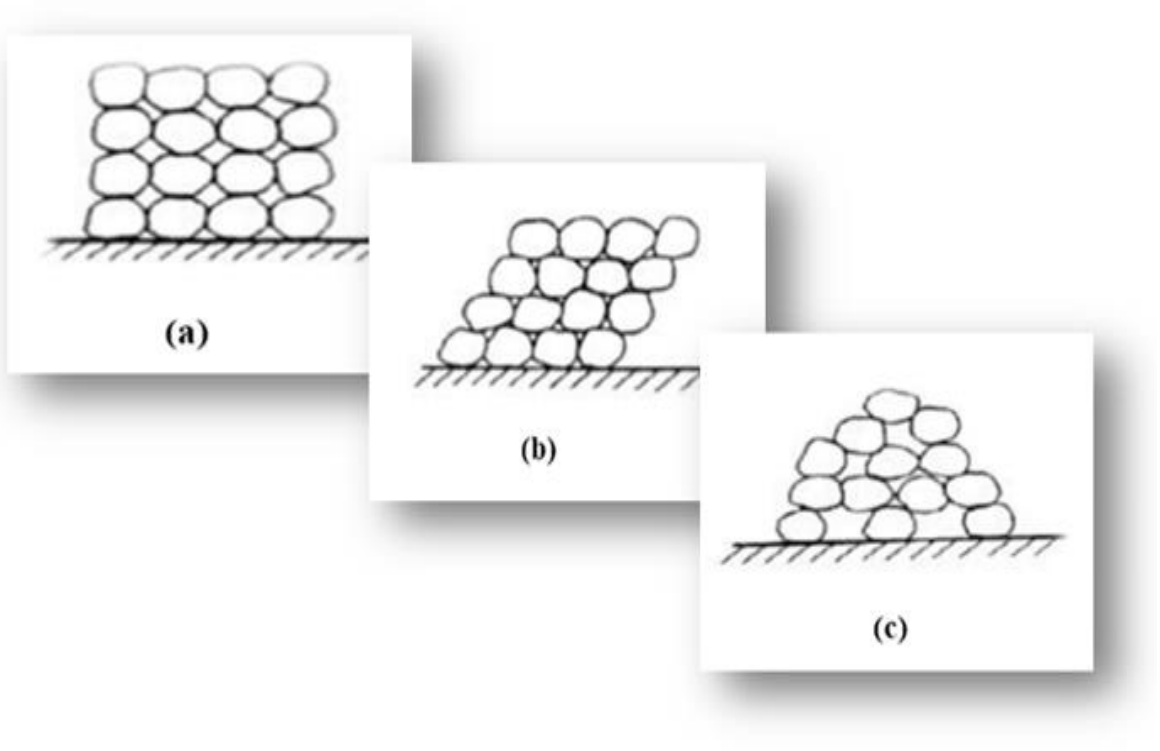


Figure I. 3: Microstructure des sols granulaires
(a)structure lâche(b) structure dense (c)structure en nid d'abeilles**[3] .**

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 **[3]**.

- **Propriété**

Les sables sont identifiés grâce à la granulométrie (la grosseur des grains). Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement. Le sable artificiel, obtenu par découpage ou broyage mécanique de roches, est principalement composé de grains aux aspérités marquées.

Il peut être également différencié un sable transporté par le vent d'un sable transporté par l'eau. Le premier est de forme plus ronde, sphérique, alors que le deuxième est plus ovoïde. De plus, le sable éolien présente une diaphanéité plus mate que le sable fluviatile ou marin qui est dit "émoussé-luisant". L'aspect de la surface du grain de sable éolien est dû aux multiples impacts que subit le sable lors de son déplacement.

La masse volumique du sable sec varie selon sa granulométrie et sa composition, de 1700 à 1900 kg/m^3, en moyenne 1850 kg/m^3.Le sable forme naturellement des pentes stables jusqu'à environ 30°, φ angle de frottement interne, il s'écoule par avalanches successives pour retrouver une pente stable **[3]** .

I.2.2.1.3. Types des sables

On distingue deux types des sables :

- **Sables naturels**

Les sables naturels peuvent être issus des rivières. Également appelé « sable des rivières » ou « sable alluvionnaire », il se caractérise par sa forme arrondie et sa dureté, et il provient de l'action de l'eau sur les rochers.

Un autre type de sable naturel est le sable de carrière, extrait des sablonnières et à la forme angulaire. Le sable de carrière est soit retiré du sol en masse, soit fabriqué à partir de roches extraites en carrière.

Quant au sable de mer, qui provient de roches sous-marines, il est particulièrement chargé en sel. L'utilisation de ce type de sable nécessite un rinçage minutieux et peut être à l'origine d'éventuelles efflorescences.

Enfin, le sable de feuilles est un sable fin, comportant de nombreux vides d'air qui imposent lors de son utilisation une association avec d'autres sables. Ce sable est récupéré sur les reliefs montagneux.



Figure I. 4: Exemples des sables naturels

(a) sable de rivières (b) sable de mer (c) sable de carrière

- **Sables artificiels**

Les sables artificiels comprennent les sables résultant du concassage de blocs de laitier des hauts-fourneaux, le sable concassé obtenu de façon identique mais sans filler, le laitier granulé ayant subi un refroidissement rapide, et le laitier broyé obtenu à partir du concassage du laitier granulé**[4]** .



Figure I. 5: Sable artificiels (sable concassé)

I.2.2.2. Les sols cohérents

Les sols cohérents sont constitués de particules liées (D≤20µm) et caractérisée par un grande cohésion (c), angle de frottement(φ) très faible, indice de plasticité (I_P) très élevée, peut perméable (K≈0) avec une grande résistance au cisaillement et traction. En a 3 types des sols fins (Limon, Argile, Marne)

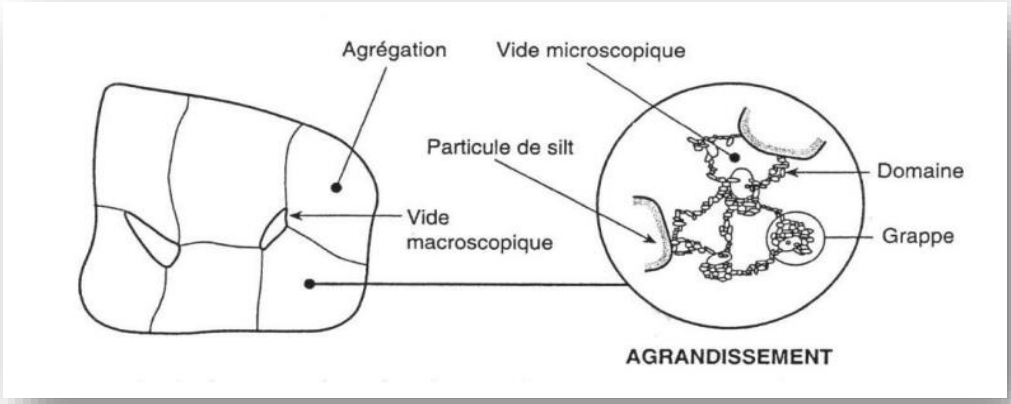


Figure I. 6: Structure des sols cohérents**[5] .**

I.2.2.2.1. Limon

Les limons possèdent un squelette siliceux à silicocalcaire à grains fins. Leur taille est située entre celle des sables et celle des argiles (la teneur en argile est variable). Ils sont constitués par des éléments de dimensions comprises entre 2 et 20 µm. le principal minérale constitutifs est le quartz associé le plus souvent l'argile, la calcite, les feldspaths, les oxydes des hydroxydes de fer, le mica ou les minéraux lourds. L'origine du limon peut être fluviatile ou éolienne ; dans ce dernier cas, on lui donne souvent le nom de lœss. Le lœss, habituellement de couleur jaunâtre ou brun, est un sol caractérise par un très bon tri granulométrique dû à son origine éolienne, avec essentiellement des grains compris entre 10 et 50 µm. Il contient, en proportion moindre des sables et des argiles (ces dernières pouvant être agglomérées et former des grains de limon fin).Les limons peuvent contenir des graviers des galets, des concrétions**[6]**.

En générale ,les sols limoneux contient moins de 10% d'argile.il est formé de grains de diamètre moyen, plus petite que les sables et plus gros que les argiles. Selon sa texture, on parle de (limon léger) ou de (limon moyen).

I.2.2.2.2. Les Caracterestiques de sol limoneux

Le sol limoneux possède des caractéristiques qui le rendent facilement reconnaissable. Au toucher, il est doux et agréable, offrant une texture lisse et veloutée. Lorsqu'il est sec, il prend une consistance poudreuse, se désagrégeant facilement sous la pression des doigts. De plus, ce type de sol est relativement léger, ce qui le rend facile à manipuler et à travailler. Sa composition riche en limon lui confère une bonne aptitude au drainage et à la rétention d'eau.

I.2.2.2.3. Avantages du sol limoneux

le sol limoneux a la particularité de se compacter aisément lorsqu'il est piétiné. En raison de sa texture fine et friable, le sol limoneux est facile à travailler. Il se réchauffe vite dès les premiers ensoleillements printaniers. Le sol limoneux est perméable à l'eau et à l'air ce qui signifie qu'il permet à l'eau de s'infiltrer facilement et de bien drainer.

I.2.2.2.4. Les inconvénients

Le sol limoneux peut avoir une capacité d'absorption d'eau limitée(Mal absorber l'eau), le sol limoneux a tendance à être très compact, collant et difficile à travailler lorsqu'il est humide,un autre inconvénient est que le sol limoneux peut avoir du mal à se réchauffer rapidement au printemps et à sécher rapidement et à devenir très dur en surface.

I.3. Traitement des sols

Le traitement des sols en géotechnique consiste à modifier les propriétés du sol en vue d'améliorer leur résistance, leur portance, leur perméabilité ou leur stabilité. Les techniques de traitement des sols sont utilisées pour modifier leur comportement pour répondre aux exigences d'un projet de construction.

I.3.1. Objectif de traitement du sol

Le traitement du sol consiste à modifier une des propriétés de leur sol, en vue d'améliorer ces performances techniques, cette opération a pour objet de:

- Augmenter la résistance, ou réduire sa sensibilité aux variations du milieu ambiant et plus spécialement aux variations de la teneur en eau;
- Augmenter ou diminuer la perméabilité;
- Diminuer sa compressibilité ;
- Diminuer le gonflement du sol **[7]** .

I.3.2. Les techniques des traitements des sols

I.3.2.1. Traitement mécanique

Il y a plusieurs méthodes de traitement mécanique classé en deux types :

1. Statique

En distingues trois techniques :

- Technique de pré-chargement seul utilisée sur des terrains dans le tassement va se prolonger durant plusieurs années, est tout simplement de place une surcharge en supplément au-dessus du sol qui nécessite un grand tassement de consolidation qui avoir lieu avant que la construction soit réalisée.
- Technique de pré-chargement avec drain verticaux en a le même principe de la technique de pré-chargement seul mes avec l'ajoute des drains pour accélérer le tassement.
- Technique de pré chargement par le vide consiste à mettre en place dans le sol à consolider, un réseau de drainage et de pompage à vide. Le système est recouvert d'une membrane étanche, et entouré de tranchées de confinement périphériques dans lesquelles est ancrée la membrane étanche **[8]** .

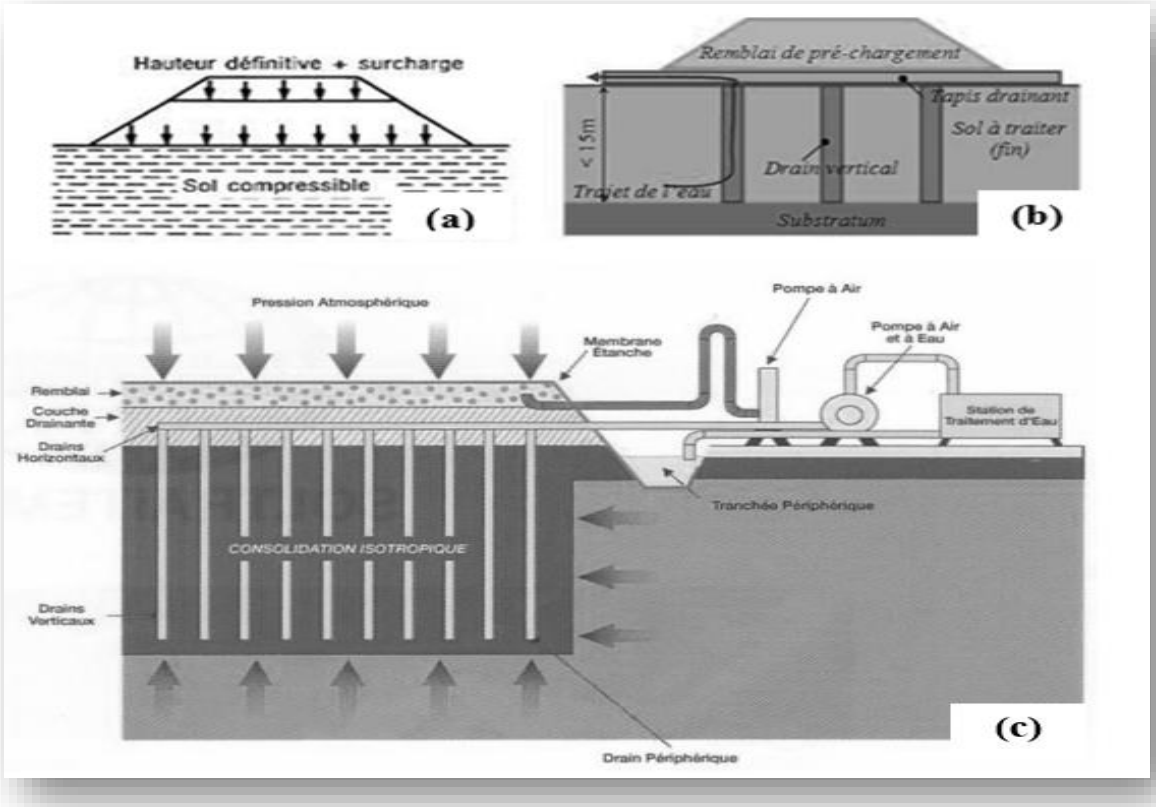


Figure I. 7:Méthode de traitement statique

(a)pré chargement seul (b) pré chargement avec drain verticaux (c) pré chargement par le vide

2. Dynamique :

En distingues trois techniques :

➢ Compactage de surface est un procédé de densification des sols en place. Ce procédé mène à une diminution des vides du sol par des moyens mécaniques aboutissant ainsi à une augmentation de la densité et de la résistance ainsi qu'une réduction de la compressibilité.

L'application des charges sur le sol à compacter par le biais de certains rouleaux de compactage statiques ou vibratoires induisent une densification dans le sol qui sera proportionnelle à l'énergie mécanique appliquée. Le compactage de surface peut être accompli sur différents types de sites **[9]** .

➢ Compactage dynamique est une méthode utilisée pour augmenter la densité d'un sol la plupart du temps à dominante granulaire (sable ou cailloux).

Les principes de base de la technique consistent en la transmission de haute énergie vers la couche de sol compressible afin d'améliorer les propriétés du sol en profondeur. La compaction dynamique est normalement associée à de nombreux tests in situ afin de vérifier que l'amélioration a été atteint**[10]**.

➢ Vibro-compactage est le procédé qui permet d'exécuter le compactage en profondeur du sol en place, à l'aide d'une aiguille vibrante, par ajout (ou non) d'un matériau pulvérulent. Sous l'effet simultané des vibrations et de saturation, les grains des sables lâches sont réarrangés à un état compact duquel résulte une augmentation de la contrainte latérale**[11]** .

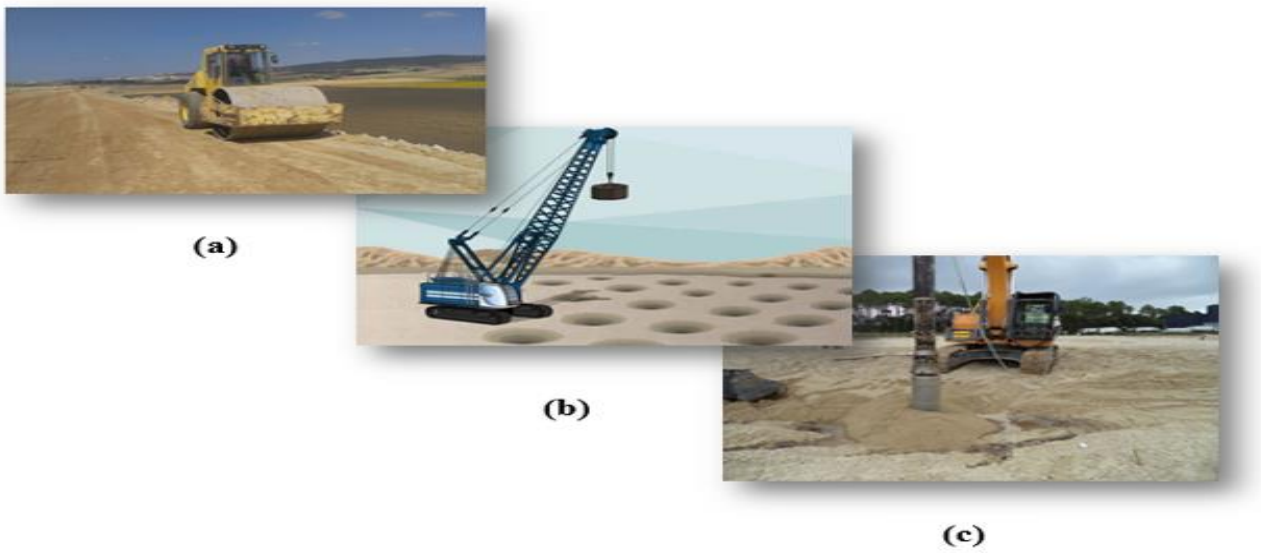


Figure I. 8:Méthode de traitement dynamique

(a) compactage de surface (b) compactage dynamique (c) vibro-compactage

I.3.2.2. Traitement physique

Généralement la technique de traitement physique est avec l'ajout de sable. l'utilisation du sable comme matériau stabilisant est une technique assez récente et son emploi n'est pas encore très répandu. Elle consiste à remplacer une partic du sol gonflant par du sable. Des études faites sur ce sujet montrent que l'ajout de sable réduit la plasticité du mélange argile-sable, donc réduit son potentiel de gonflement**[12]**.

I.3.2.3. Traitement chimique

Le traitement de sol ou la stabilisation chimique des sols est une technique économique qui permet de rendre apte à l'usage des matériaux qui ne l'étaient pas. Cette technique s'inscrit ainsi dans la démarche environnementale du développement durable en préservant les ressources naturelles des produits de carrières, et en valorisant les matériaux du site par leur réutilisation. Utilisation des matériaux de voisinage, réduite les volumes de dépôt de matériaux, donc diminution du coût. En effet la technique du traitement est une solution aux problèmes de dépôts et d'emprunts, et participe à l'optimisation du mouvement des terres. Le traitement de sol permet d'améliorer les performances mécaniques (portance), baisser la sensibilité à l'eau et au gel (protection), homogénéiser et valoriser les matériaux de voisinage du chantier **[6]**.

a) Traitement par La chaux

En général, tous les sols à grains fins traités à la chaux présentent une plasticité réduite, une facilité de travail améliorée et des caractéristiques de changement de volume réduites. Cependant, les sols ne présentent pas tous des caractéristiques de résistance améliorées. Il faut souligner que les propriétés des mélanges de chaux du sol dépendent de nombreuses variables. Le type de sol, le type de chaux, le pourcentage de chaux et les conditions de séchage (temps, température et humidité) sont les plus importants. La chaux est un solide blanc ou gris-blanc, inodore, grumeleux, très légèrement soluble dans l'eau, CaO, qui, lorsqu'il est combiné avec l'eau forme de l'hydroxyde de calcium (chaux éteinte). L'hydroxyde de calcium est utilisé principalement dans les mortiers, les plâtres et les ciments **[13]** .

b) Traitement par le cendre volante

La densité du sol avec les cendres de charbon est un paramètre important puisqu'il contrôle la résistance, la compressibilité et la perméabilité. Le poids unitaire compacté du matériau dépend de la quantité et de la méthode d'application d'énergie, de la distribution granulométrique, des caractéristiques de plasticité et de la teneur en humidité au compactage. La variation de la densité sèche avec la teneur en humidité des cendres volantes est moindre

que celle d'un sol bien classé, les deux ayant la même taille de grain. La tendance des cendres volantes à être moins sensibles aux variations de la teneur en humidité que du sol est due à un vide d'air plus élevé teneur en cendres volantes. La teneur plus élevée en vide pourrait avoir tendance à limiter l'accumulation de pression dans les pores pendant le compactage, permettant ainsi de compacter les cendres volantes sur une plus grande plage de teneur en eau**[14]**.

c) Traitement par le ciment

1. Définition

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite de réaction et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau. Le ciment agglomère fortement les matériaux inertes incorporés le mélange**[15]** .

2. Fabrication du ciment

La fabrication du ciment Portland se fait à partir de la pierre calcaire et de l'argile. Ces matériaux sont extraits des carrières, concassés et stockés, puis l'analyse chimique est faite pour déterminer le dosage des matières premières.

Après avoir été dosées, les matières premières sont broyées et mélangées.la poudre ainsi obtenue est introduite dans l'extrémité supérieure d'un four rotatif légèrement incliné. Un appareil est placé à l'extrémité inférieure du four pour que la température soit comprise entre 1450 et 1650 °C.

Une telle température provoque la fusion partielle des matériaux et transforme chimiquement les matières premières en clinker de ciment. Le clinker se retrouve sous forme de billes ayant un diamètre de 3 à 25mm.

Par la suite, le clinker est refroidi et broyé, puis on ajoute une faible quantité de gypse (environ 3 % de la masse de ciment contrôler la prise du ciment. Le produit ainsi obtenu constitue le ciment Portland **[16]** .

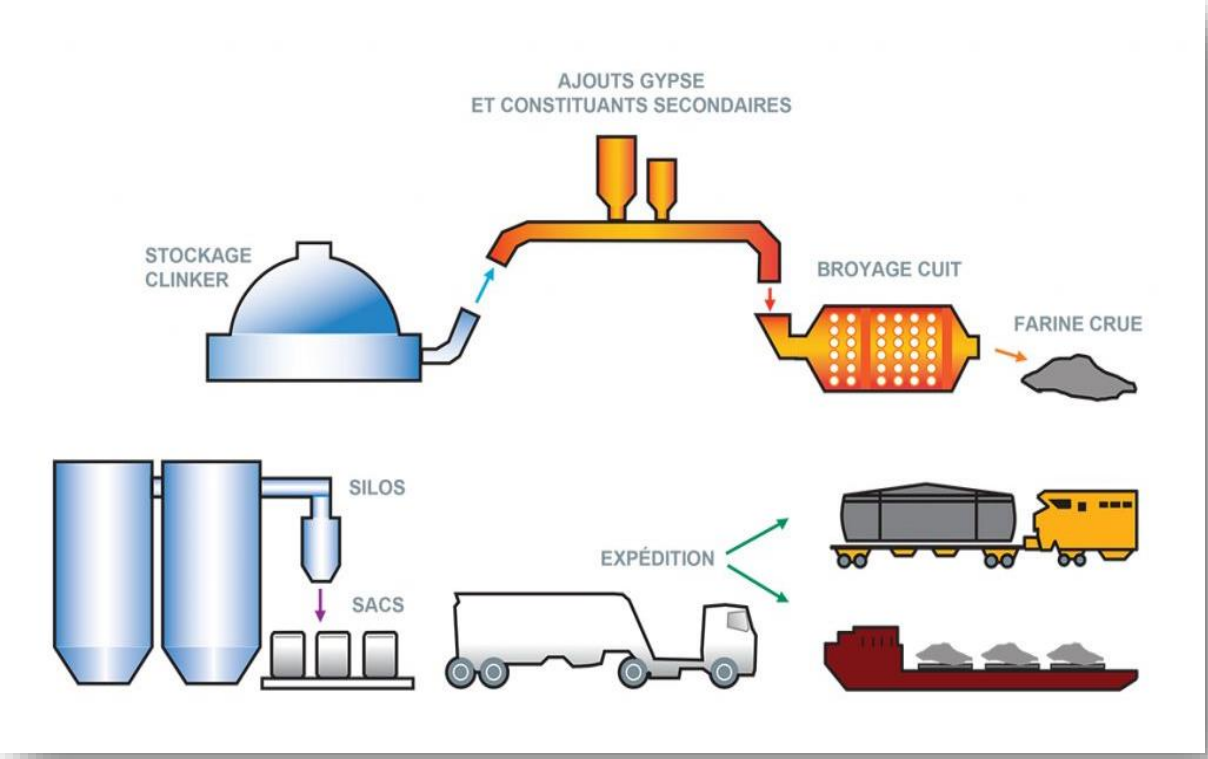


Figure I. 9: Fabrication du ciment

3. Composition chimique

De la composition chimique des matières premières et de leurs proportions dans le mélange, on déduit la nature des éléments chimiques présents dans le ciment portland. Le clinker portland comprend les constituants principaux suivants : CaO, SiO2, Al2O 3, Fe 2O3, qui sont généralement appelés oxyde majeur contient environ 90% du poids du ciment, les 10% restants sont constitués de MgO, K2O et Na2O, TiO2, SO3, P2O5. Ces pourcentages dépendent essentiellement de la composition de la farine crue qui, à son tour, dépend des fractions dosées en matières premières (calcaire, argile) et de leurs compositions. Cependant, CaO provient de la décomposition du calcaire par contre, SiO2, Al2O3 et Fe2O3 sont des constituants de l'argile .Les autres composés, en faibles teneurs, se trouvent comme impuretés dans la matière première. Il est à noter que la plupart de ces constituants se trouve dans le ciment à l'état lié, mais d'autres peuvent exister même à l'état libre ; on cite ici : la chaux (CaO), l'oxyde de magnésie (MgO) et l'oxyde de soufre (SO3) **[3]** .

Tableau I. 1: Composition approximative de l'oxyde limites du ciment portland**[3]**

Oxydes	Composition poids(%)
C_aO	60-67
SiO_2	17-25
Al_2O_3	3-8
Fe_2O3	0.5-6.0
MgO	0.1-5.5
K_2O+Na_2O	0.5-1.3
TiO_2	0.1-0.4
SO_3	1-3
P_2O_5	0.1-0.2

4. Les différents types de ciment

Le ciment peut être classé comme suit :

- **Selon ses résistances à la compression**

La norme NF EN 197-1, classes les ciments courant d'après leur résistance à la compression (résistance normale) déterminée conformément à la norme EN 196-1, mesurée à 28 jours en six classes de résistance.

- **Selon le type d'environnement**

Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux.

- **Selon sa composition**

Le teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme européenne NF EN 197-1 donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq types principaux à savoir :

- CEM I Ciment Portland Artificial.
- CEM II Ciment Portland composé.
- CEM III Ciment de haut fourneau.
- CEM IV Ciment pouzzolanique.
- CEM V Ciment aux laitiers et aux cendres .

Le tableau ci-dessous donne la liste des différents types de ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu'ils comportent **[16].**

Tableau I. 2: . Les types des ciments normalisé**[16]**

	Type de ciment	**Teneur en clinker**	**Teneur en%de l'un des constituants suivant : Laitier_pouzzolanes_cendres calcaires_schistes_fumées de silice**	**Teneur en constituants secondaires**	**Utilisation**
CEM1	Ciment portland	95 à 100%	-	-	Ouvrage d'art
CEM2/A	Ciment portland composé	80 à 94% 65 à 79%	6 à 20% de l'un constituants , sauf pour les fumées de silice limitées à 10% et les fillers à5% ;21 à 35% avec mêmes restrictions que ci-dessus	-	Bâtiment
CEM3/A , B ou C	Ciments de haut-foumeau	35 à64% 20 à34% 5 à19%	36 à 65% de laitier de haut-fourneau 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau 81 à 95% de laitier de haut-fourneau	0 à 5%	Ouvrage-en milieux agressif et industriels
CEM 4/A ou B	Ciment pouzzolanique	65 à 90% 45 à 64%	10 à 35% de pouzzolanes, cendres silicieuses ou fumées de silice (limitées à10%) 36 à 55% comme ci-dessus	-	Absent en france
CEM 5/A ou B	Ciments composés	40 à 64% 20 à 39%	18 à 30% de laitier de haut-fourneau et 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes 31 à 50% de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	-	Ouvrage en milieux agrissifs

5. Avantages de la stabilisation par le ciment

- Diminuer la plasticité
- Réduire le potentiel de variation de volume
- Augmenter la limite de retrait
- Augmenter la résistance
- Le coût est relativement faible
- Ciment du sol réduit les caractéristiques de gonflement du sol
- Il est très durable
- Il est largement disponible**[15]**.

6. Inconvénients de stabilisation par le ciment

- des fissures peuvent se forme dans le ciment du sol
- il est nocif pour l'environnement
- il nécessite un travail supplémentaire**[15]** .

7. L'action du ciment sur les sols

Le traitement des sols au ciment permet d'améliorer les caractéristiques initiales des matériaux et s'appliquent à des sols peu ou pas plastiques, dont les teneurs naturelles en eau trop élevées ne permettent pas de réaliser des remblais ou des couches des forme dans de bonnes conditions et avec des garanties suffisantes de qualité. Il est surtout utilisé dans le but d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques et des stabilités à l'eau et au gel**[17]** .

8. Techniques de traitement du sol avec ciment sur chantier

Les étapes de traitement peuvent se présenter dans un ordre différent suivant qu'il s'agit de traiter le sol en place, ou que l'on prévoit des mouvements de terre avant ou après le traitement. On distingue les étapes principales suivantes :

❖ **La préparation du sol à traiter :**

Cette opération, visant à faciliter le malaxage ultérieur, consiste :

soit d'éliminer de gros éléments susceptibles d'entraver le malaxage, soit de permettre la modification de l'état hydrique du sol par aération ou humidification. L'exécution de cette opération, qui n'est pas toujours nécessaire, s'effectue à l'aide d'un riper, d'une herse ou d'une charrue**[18]** .



Figure I. 10: Préparation de la couche de forme, avant épandage du ciment et malaxage du sol à traiter

❖ **Epandage :**

La technique de l'épandage "au sac" sur des plateformes préalablement quadrillées peut être envisagée pour des chantiers de surface très limitée (< 250 m^2) ou de géométrie complexe. Dans les autres cas, la répartition de ciment est réalisée à l'aide d'un épandeur à dosage pondéral, équipé en général d'un dispositif asservi à la vitesse du véhicule. l'épandage de ciment doit être réalisé avec un maximum de précision et de régularité. Le ciment est chargée pneumatiquement dans l'épandeur, soit directement à partir de la citerne de transport, soit via des silos-tampons installés sur chantier**[18]** .

❖ **Malaxage :**

Cette opération a pour but de faire foisonner le sol, et d'incorporelle ciment de façon homogène. En fonction de la nature du sol, de la taille et du type de chantier, il est exécuté à l'aide de pulvimixers, de roto bêches, de charrues à disques ou à socs. Pour les chantiers de faible importance, du matériel de type agricole peut être utilisé. Sur sites sensibles au niveau des poussières, il est recommandé d'utiliser des malaxeurs**[18]** .



Figure I. 11: Malaxage du ciment sur chantier

❖ **Réglage :**

Le réglage définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses. Il se fait le plus souvent à la niveleuse. Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués. L'épaisseur à raboter doit être prise en compte au stade du traitement, en prévoyant une surépaisseur suffisante du matériau traité (environ 3 cm) **[18]** .



Figure I. 12:Réglage**.**

❖ **Le compactage :**

Il doit être réalisé immédiatement après le réglage final et, dans tous les cas, avant expiration du "délai de maniabilité" du mélange sol-liant, pour apporter le complément de l'énergie exigée pour obtenir la qualité de compactage recherchée suivant la couche considérée **[18]**.



Figure I. 13: Compactage**[17]**.

❖ **Protection du matériau traité :**

Les techniques de protection superficielle pouvant être appliquées sont :

- réalisation d'un enduit de cure gravillonné ou éventuellement clouté
- réalisation d'une couche de fin réglage**[19]**.

Une couche de fin réglage, il d'agit d'une couche de quelques centimètres d'épaisseur, constituée d'un granulat très frottant, qui est réalisée à l surface d'une couche de forme en matériau granulaire insensible à l'eau mais relativement superficiel dans le cas de matériaux granulaires dont on a éliminé la fraction 0/d et dont la $\mathbf{d_{max}}$ est inferieur à 50 mm **[19]** .



Figure I. 14: Protection superficielle**[17].**

I.3.3. Domaine d'application des additifs chimiques

La stabilisation chimique des sols trouve son application dans une large gamme des domaine ,on distingué :

- Les chaussées (couche de base, couche de surface)
- Les remblais(les digues des barrages en terre, remblai routière,..)

Notre étude est basée sur la modélisation numérique d'un remblai routiére traitté par l'ajout de ciment (l'étude expérimentale à été réalisé par les deux étudiantes Halbigue.N et Baghdadi.F en 2022)

1) Les remblais

Le remblai par définition est une opération qui consiste à apporter un ensemble de terre ou de Matériaux inertes sur un terrain pour créer une plate-forme ou combler un vide. Le remblai est donc nécessaire pour la mise en place d'un terrassement **[20]**.

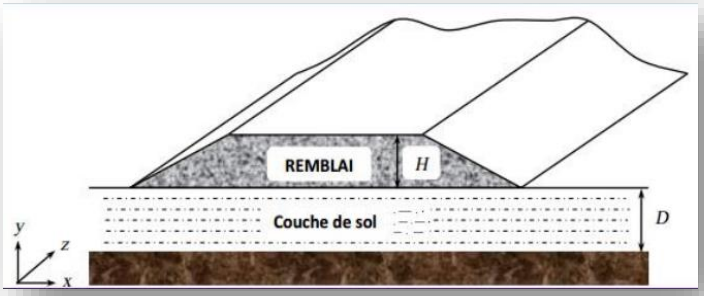


Figure I. 15: Schéma présentant un remblai**[5].**

Il existe plusieurs types de remblai :

- **Les remblais routiers**

Un remblai routier est un ouvrage en terre construit pour modeler la topographie naturelle du terrain de manière à assurer la géométrie imposée à la plate-forme sur laquelle la chaussée sera construite**[20]** .

- **Les remblais ferroviaire**

Un remblai ferroviaire est un ouvrage de grande taille.sa réalisation implique le déplacement de quantités considérables de terre (de bonne qualité) et d'importantes surfaces d'encombrement a la base. Cela entraine des frais pour la collectivité, liée aux expropriations mais aussi pour l'impossibilité d'utiliser autrement la surface occupée par ces ouvrages **[20]** .

2) Les matériaux des remblais

Le remblai peut être constitué de divers éléments adaptés aux conditions climatiques et mécaniques. Ainsi, nous avons :

- La terre de remblai, exceptions faites des terres argileuses, sableuses et humides
- Le sable de remblai.
- Les roches siliceuses (grès), très résistantes mais toutefois fragmentables.

- Les roches argileuses (schistes), cependant friables.
- La craie, uniquement pour les sols très secs.
- Les gravats, soit les débris de matériaux issus de la construction (morceaux de parpaings, de briques ou de blocs de ciment) qui auront été préalablement débarrassés de leurs éléments dégradables, matières susceptibles de gonfler, et ferrailles.

Bien souvent, le remblai est réalisé avec la terre extraite du sol au moment du déblai. un apport supplémentaire(de terre, sable, roches, etc.) peut toutefois être nécessaire**[21]**.

3) Problèmes posés par la construction des remblais

- **Problème de stabilité :**

La mise en place d'un remblai sur sol mou entraîne une augmentation des contraintes au sein de ce sol. Si cet accroissement des contraintes dépasse un seuil critique qui dépend des caractéristiques mécaniques du sol, ce dernier se rompt en cours de construction en provoquant un affaissement important et brutal du remblai. Parallèlement à cet affaissement, il se produit des déformations du sol porteur qui se traduisent par des soulèvements importants du terrain naturel autour du remblai **[2]**.

- **Problème de tassement :**

À l'inverse de la rupture par défaut de stabilité, le tassement est une déformation lente du sol sous le poids du remblai qui se traduit (figure I-16) :

- Au centre du remblai par un enfoncement vertical ;
- Sous l'emprise du remblai, par un enfoncement vertical combiné à un déplacement latéral de sol de fondation ;
- Hors de l'emprise du remblai, par un déplacement latéral de sol de fondation jusqu'à une distance fonction de l'épaisseur de sol compressible **[2]** .

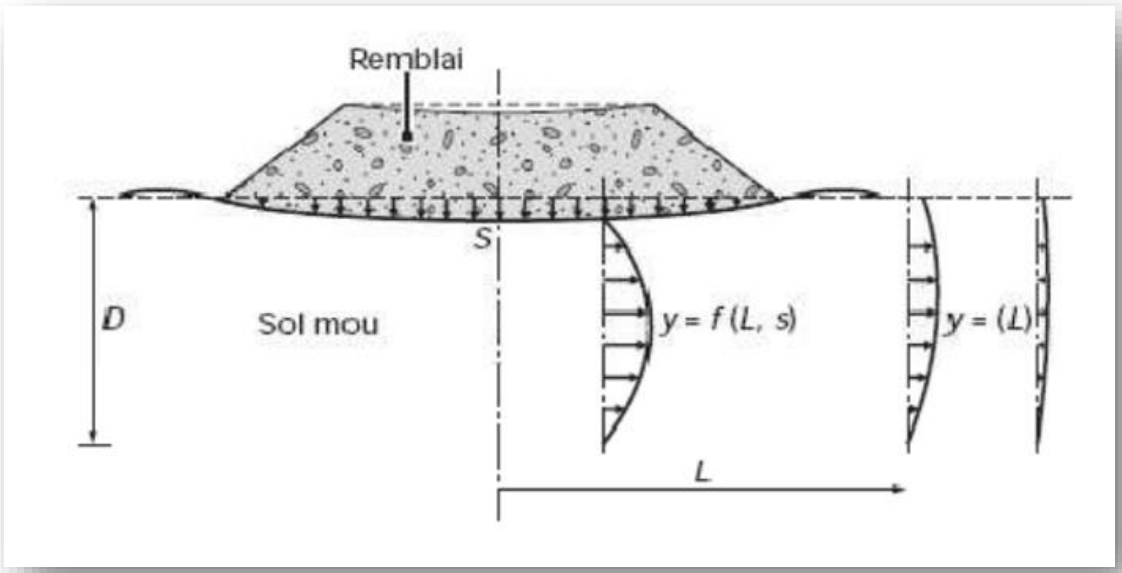


Figure I. 16: Schéma du tassement et du déplacement latéral du sol de fondation **[20].**

- **Problèmes d'écoulement des eaux :**

Les sols compressibles sont souvent situés en fond de vallée. La construction d'un remblai en travers de la vallée d'un cours d'eau ou le long de cette vallée perturbe l'écoulement des eaux en période de crues. Les écoulements de crues peuvent éroder le pied du remblai, qui doit alors être protégé. Ils nécessitent aussi souvent de prévoir des ouvertures à travers le remblai pour laisser passer l'eau. La déformation des sols compressibles peut influencer l'écoulement de l'eau dans la nappe**[20]** .

- **Problèmes liés aux interactions remblai-ouvrage**

Les déformations du sol mou sous le poids d'un remblai s'étendent au-delà des limites de la zone chargée en surface. La construction d'un remblai peut pour cette raison provoquer des tassements sous des ouvrages voisins existants (voies ferrées, autres voies, voie dont le remblai constitue un élargissement, fondations superficielles de bâtiment ou d'ouvrage d'art, etc.).

Les déformations verticales et horizontales des sols compressibles peuvent d'autre part iduire des efforts très importants sur les ouvrages fixes ou incapables de suivre les déplacements

des sols qui les entourent (fondations profondes d'ouvrages d'art, de bâtiment ou de quais, par exemple).

Cette interaction des remblais et des ouvrages existants ou à construire peut avoir des conséquences importantes sur les conditions d'exploitation des ouvrages. Elle doit être examinée avec soin lors de l'élaboration du projet et du phasage des travaux de construction**[22]**.

4) Méthodes de dimensionnement des remblais

- **La hauteur du remblai**

Le GTR limite les remblais à des hauteurs :

- ✓ Les remblais de faible hauteur sont limités à 5 m,
- ✓ Les remblais de hauteur moyenne sont limités à 10 m,
- ✓ Les remblais de grande hauteur dépassent 10 m.

Pour atteindre le niveau désiré pour le profil projeté, la hauteur totale du remblai à construire est donnée par la formule suivante :

$$\boldsymbol{R_t = \frac{H_r * 100}{(100 - T)}} \qquad \textbf{(I. 1)}$$

Où :

$\boldsymbol{R_t}$ **:**Hauteur totale du remblai à construire ;

$\boldsymbol{H_r}$:Hauteur prévue au-dessus de la surface du terrain naturel pour atteindre le niveau fixé pour la surcharge ;

$\boldsymbol{T}$ **:**pourcentage de tassement prévu**[20]** .

- **Pente de remblai**

En peut déterminer la pente avec l'équation suivant pour obtenir un remblai stable :

$$\boldsymbol{tan(\alpha) = \frac{h}{b}} \qquad \textbf{(I. 2)}$$

Avec :

$\boldsymbol{h}$ **:**La hauteur de remblai

$\boldsymbol{b}$ **:**La largeur de remblai

Tableau I. 3: Ordre de grandeur de la pente d'un remblai en fonction de sa hauteur **[20]**

Nature de matériaux	**Hauteur de remblai**		
	h≤5m	5≤h≤10m	h>10m
Sol et matériaux cohérents sensibles à l'eau ou matériaux rocheux issus de roche altérée ou argileuse mais fragmentable	Pente≤2/3	Pente≤1/2	Pas de régle générale :la pente doit résulter d'une etude de stabilité
Matériaux granulaires insensibles a l'eau d'origine alluvionnaire ou matériaux rocheux issus de roche tendre non argileuse	Pente≤1/1	Pente≤2/3	Pas de régle générale :la pente doit résulter d'une étude de stabilité
Matériaux issus de roche dure non altérée	Pente≤1/1	Pente≤1/1	Pente≤2/3 avec risberme

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la structure générale du sol ainsi que ses différents types. Nous avons également examiné en détail les différentes propriétés du sol utilisé dans le cadre de notre travail, notamment le sable, le limon et le ciment. Ensuite, nous avons identifié les différents types de traitement des sols, leurs définitions et leurs utilisations. Enfin, nous avons discuté brièvement des remblais de manière générale.

Chapitre II :

Caractéristiques et résultats des matériaux utilisés

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les essais et les résultats réalisés par N.halbigue et F. baghdadi en 2022 sous le theme : « évaluation expérimental sur le comportement mecanique du mélange sable limoneux-ciment »,une brève dexprition des materiaux utilisés et leur résultat trouvés à été rédigée dans ce chapitre .afin d'utiliser ces resultats dans la modélisation numérique d'un remblai qui est le but de notre mémoire (voir chapite III).

II.2. Les matériaux utilisent

Le sable limoneux utilise dans cette recherche ont choisi a la lumière de trois études de master (promo 2020,2021 et2022), la première intitule sous le thème d'eétude expérimentale sur les comportements mécaniques de sable limoneux renforce par les fibres de verre, et la deuxieme intitule sous le theme d'etude expérimentale sur les comportements mécaniques de sable limoneux traite par l'emulsion de bitume ; la troisieme intitule sous le theme evaluation experimental sur le comportement mecanique du melange sable limoneux-ciment ; c'est un melange de deux sables (caractériser par different morphologie (roule et anguleux))et un limon par des proportions qui ont donne des meilleurs resultats selon les recherches anterieurs .

II.2.1. Sable limoneux

Deux types de sables propres à différentes gradations et morphologiques ont utilisés, 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 par une proportion optimal donné (70% de sable de rivière + 30% de sable concassé) et substitué par un limon provenant de sable concassé (<0.08mm) avec un teneur en fin**[23]** .

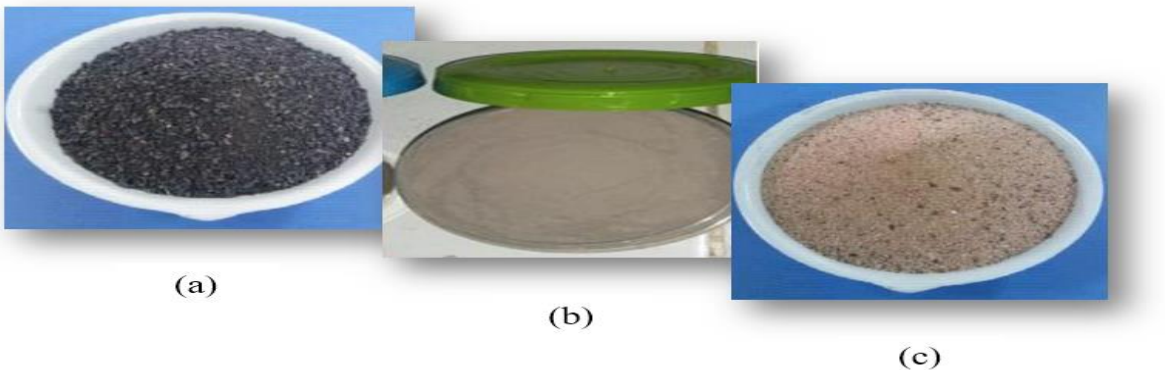


Figure II. 1: Matériaux utilisés

(a) Sable concassé, (b) Limon et (c) Sable de rivière **[22].**

II.2.2. Ciment

Elle ont choisie le ciment (CEM I 42.5 N SR3 LH produit par SPA BISKRA CIMENT), c'est un ciment gris à haute résistance aux environnements agressifs et a faible chaleur d'hydratation. Conforme à la norme algérienne (NA442-2013) (Voir la fiche technique au l'annexe).

Ces principaux constituants sont le Clinker (95 à 100 %), leurs caractéristiques techniques sont présentées dans la figure suivante : **[23]**

Analyses chimiques (%)	valeur
Perte au feu	2.6 – 3.7
Teneur en sulfates (SO3)	2.2 – 2.8
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 – 2.8
Teneur en Chlorures (Cl-)	0.03 – 0.07
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	**valeur**
C3S	56 – 66
C2S	5.1 – 7.2
Propriétés physiques	**valeur**
Consistance normale (%)	25.8 – 26.4
Expansion à chaud (mm)	0.25 – 1.0
Temps de prise (min)	**valeur**
Début de prise	150 – 190
Fin de prise	220-250



Résistence à la compréssion	valeur
2 jours (MPa)	20 – 29
28 jours (MPa)	42.5 – 52.5

Figure II. 2: Caractéristique de ciment CEM I 42.5 N SR3 LH (SPA BISKRA CIMENT) **[22]**

II.3. Les résultats des essais au laboratoire

Les resultats d'essais au laboratoire trouvés par N.halbigue et F. baghdadi (2022) sont **:**

II.3.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique par principe est pour déterminer la distribution relative des diamètres des grains d'un sol, elles ont réalisé l'essai de l'Analyse granulométrique par tamisage (NF P94-056) pour les sols dont les éléments supérieur à 80 µm et l'essai de l'Analyse granulométrique par sédimentrometrie (NF P94-057) pour les particules inférieures à 80µm.

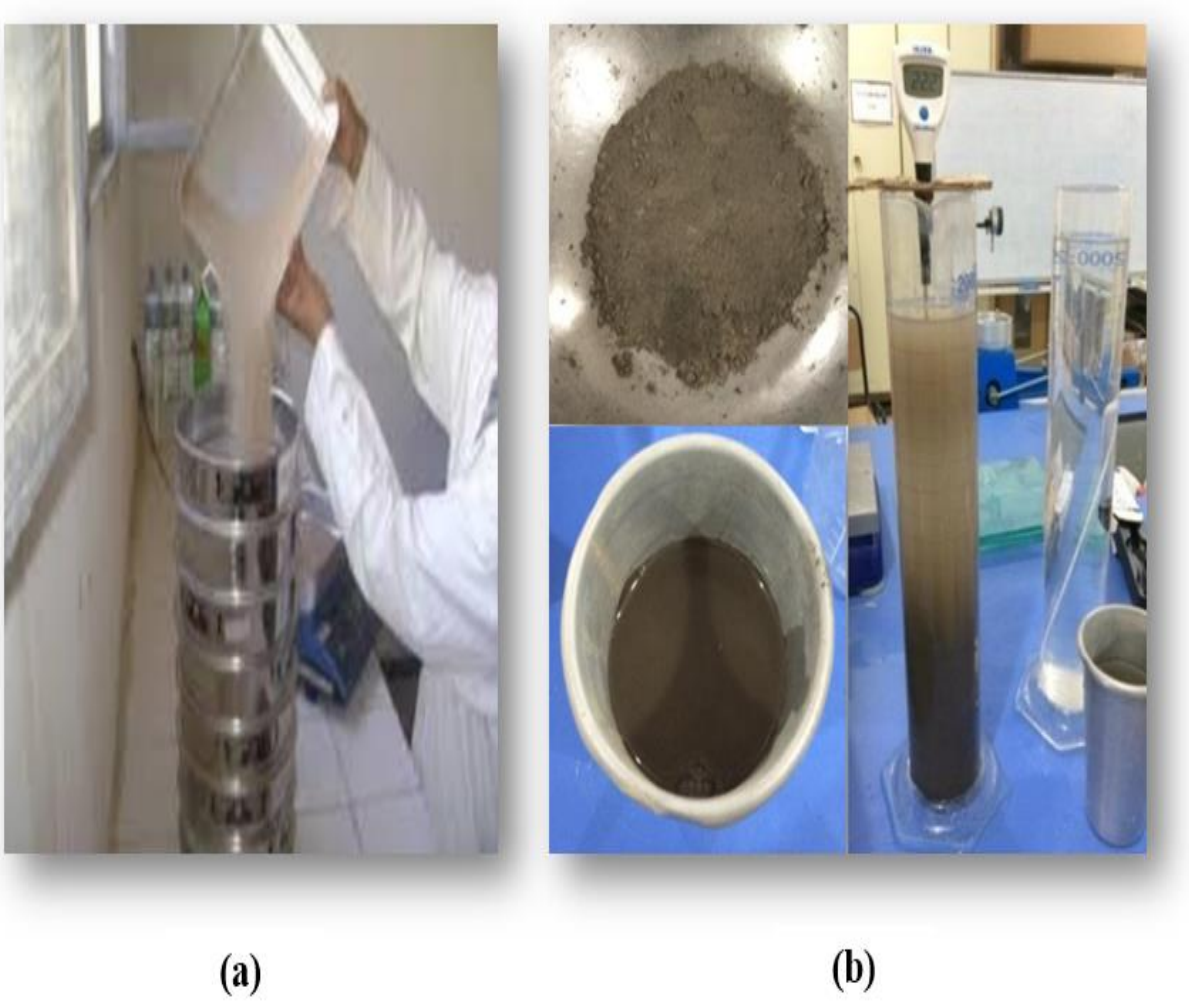


Figure II. 3: Essai de l'Analyse granulométrique

(a)par tamisage (b) par sédimentation **[22].**

Et Les résultats obtenus sont montrées dans les courbes granulométriques et le tableau ci-dessous :

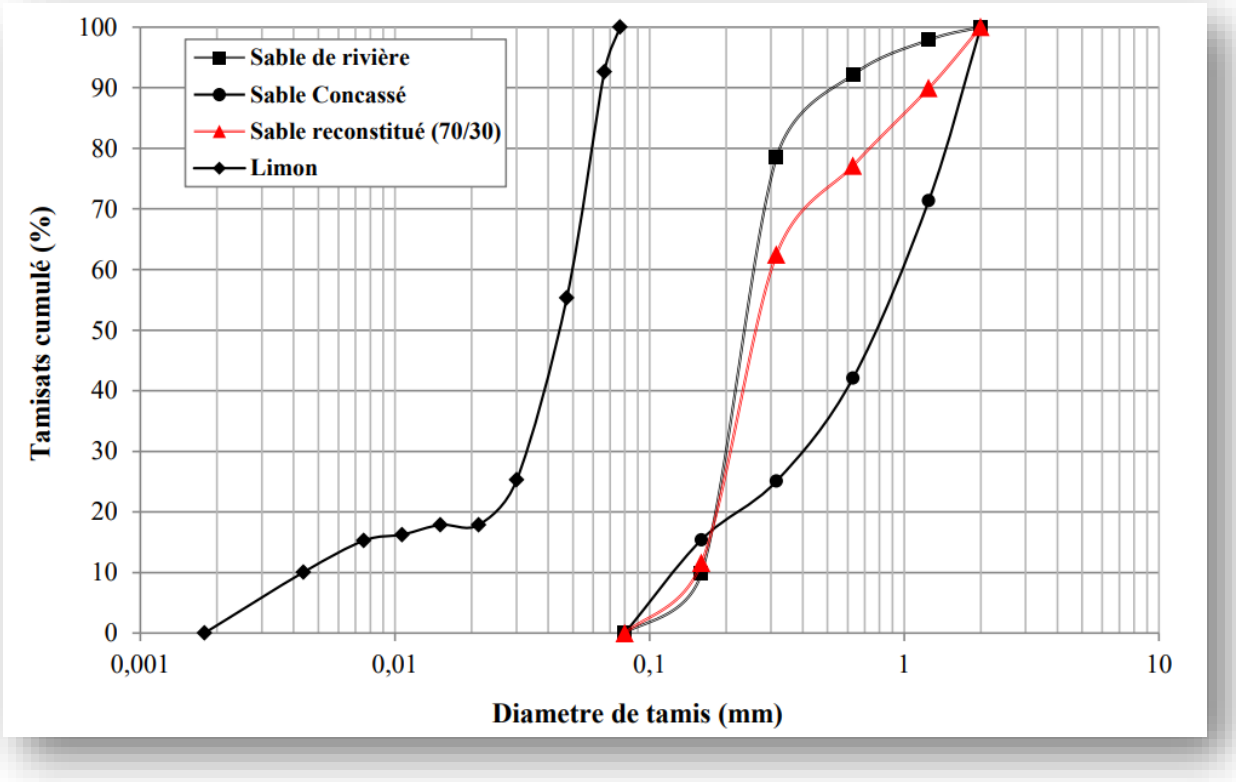


Figure II. 4: Courbes granulométrique des matériaux utilisés**[22].**

Tableau II. 1: Propriétés physique des matériaux utilisés*[23]*.

-	Sable de riviére	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

II.3.2. Les limites d'Atterberg (NF P 94-051)

elles ont réalisé cette essai pour déterminer la limite de liquidité a la coupelle de casagrande (W_L) et la limite de plasticité par la methode de rouleau (W_P) ,et l'indice de plasticité(I_P) suivant la norme (NF P 94-051).



Figure II. 5: Les limites d'Atterberg

(a) la limite de liquidité a la coupelle (W_L), (b) la limite de plasticité du rouleau (W_P) **[22].**

Les résultats obtenus après des essais répétitifs sont :

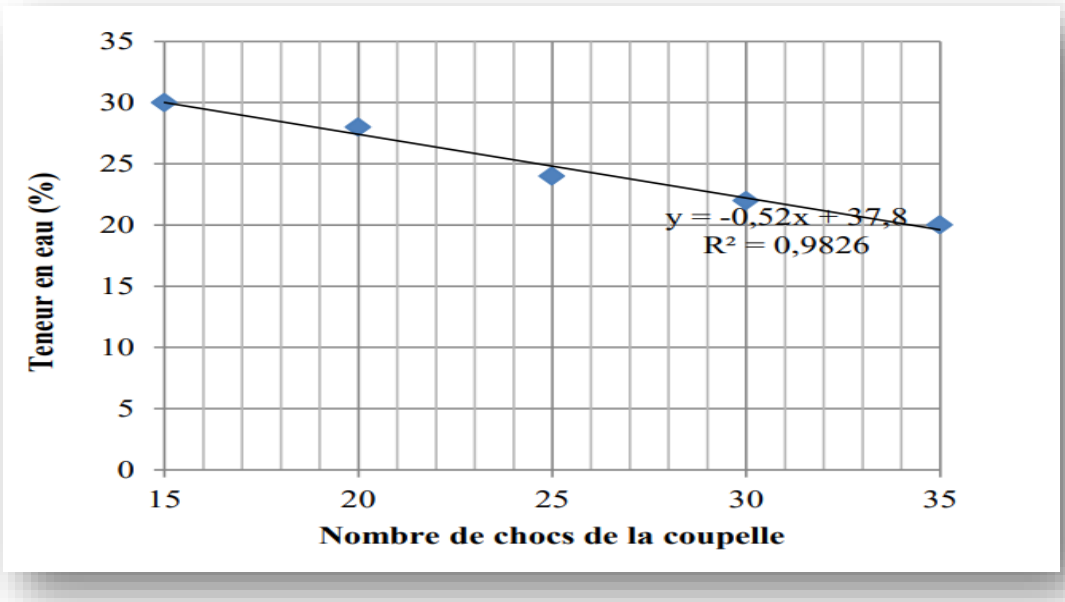


Figure II. 6: Courbe de détermination de la limite de liquidité de l'échantillon**[22]**

Tableau II. 2: Paramètres des limites d'Atterberg de limon utilisé*[23]*

Indice	Limon étudié
W_L(%)	24.96
W_P(%)	19.38
I_P(%)	5.58

A partir des résultats trouvées (Tableau II. 2) et d'après la classification LCPC comme un sol peu plastiques elles ont trouvée que le sol étudier est un sol peu plastique.

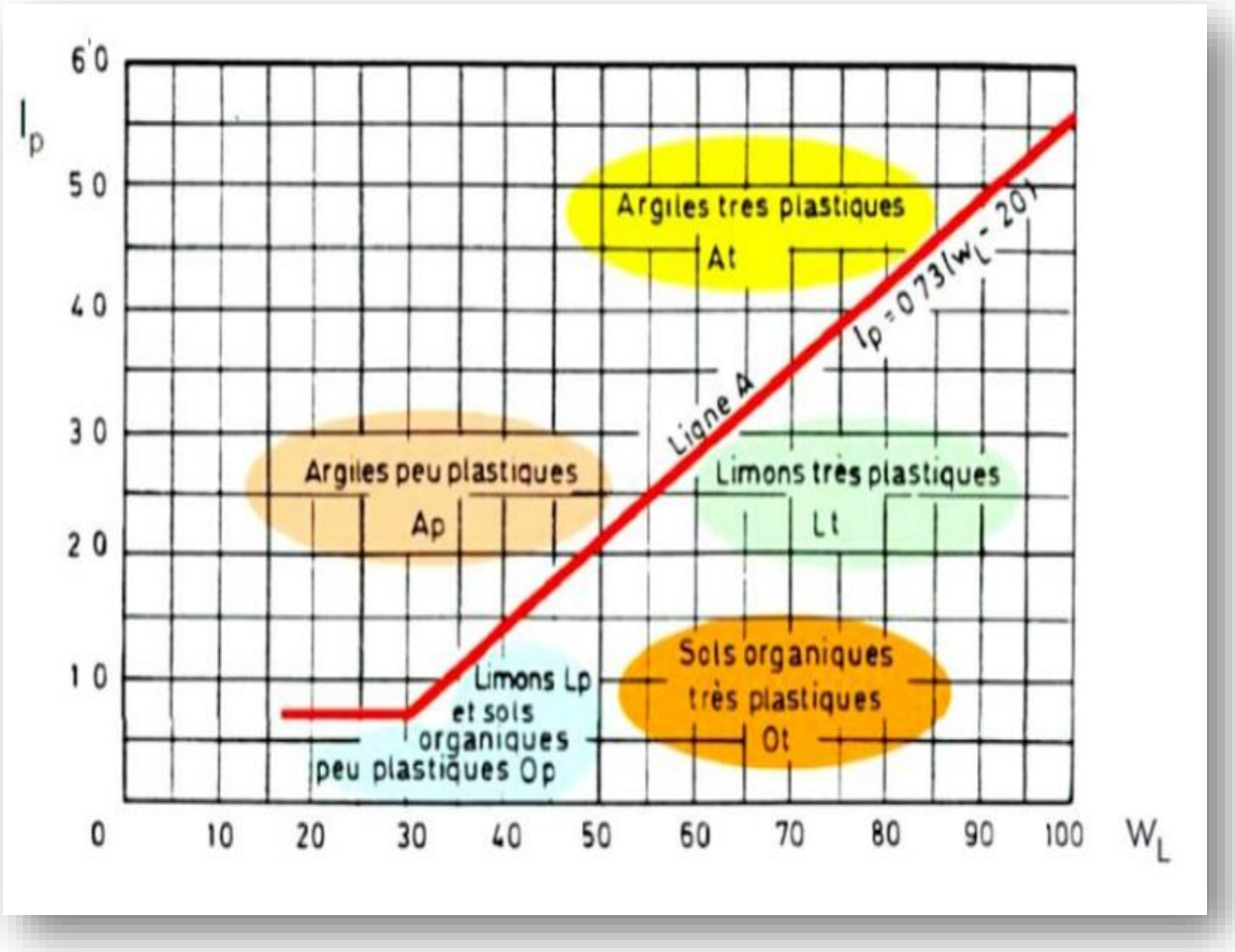


Figure II. 7: Classification des sols fins selon le système USCS/LCPC*[23]*

II.3.3. Essai Proctor Normal (NF P 97-093)

Elles ont réalisé cette essai par principe 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.

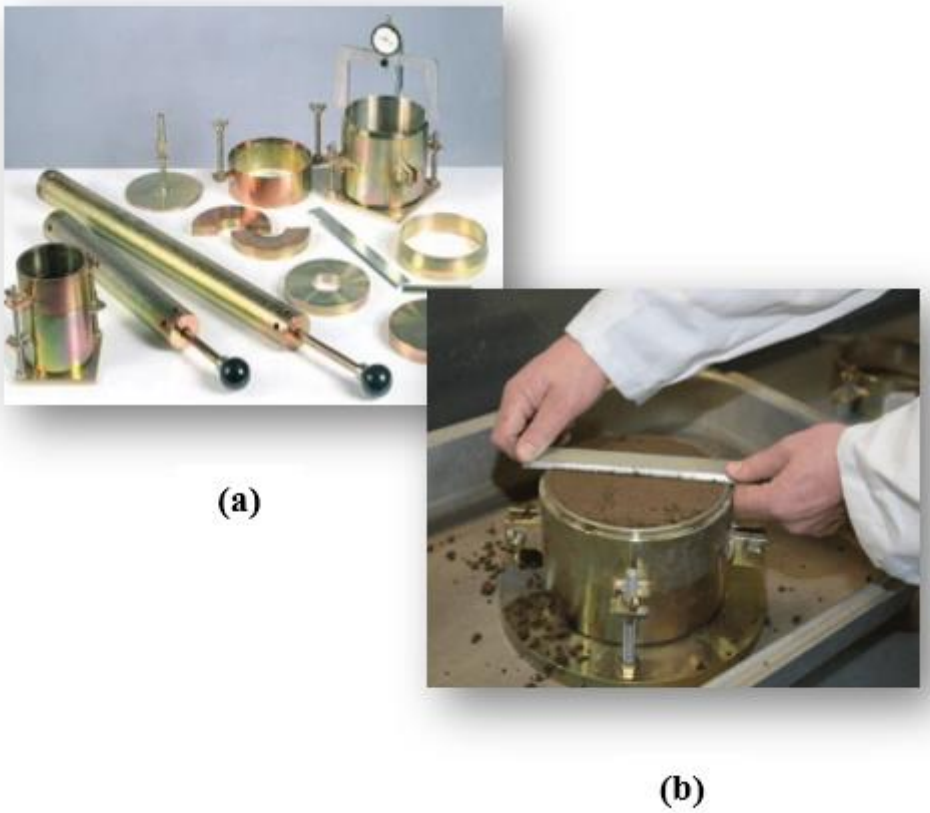


Figure II. 8: Essai Proctor normal

(a)Matériel d'essai Proctor (b) mode opératoire de l'essai **[23].**

L'essai est répété plusieurs fois au minimum 5 fois sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau et les points obtenus de cette manière forment une courbe dans l'espace (γ_d ; w) et le point dont l'ordonnée est la densité sèche maximale et l'abscisse est la teneur en eau correspondante représente à l'Optimum Proctor. La figure ci-dessous représente les séries d'essais de Proctor normalisé, elles ont constaté que la densité sèche maximale est 20.68 KN/m3 et la teneur en eau optimale est de 14%**[23]** .

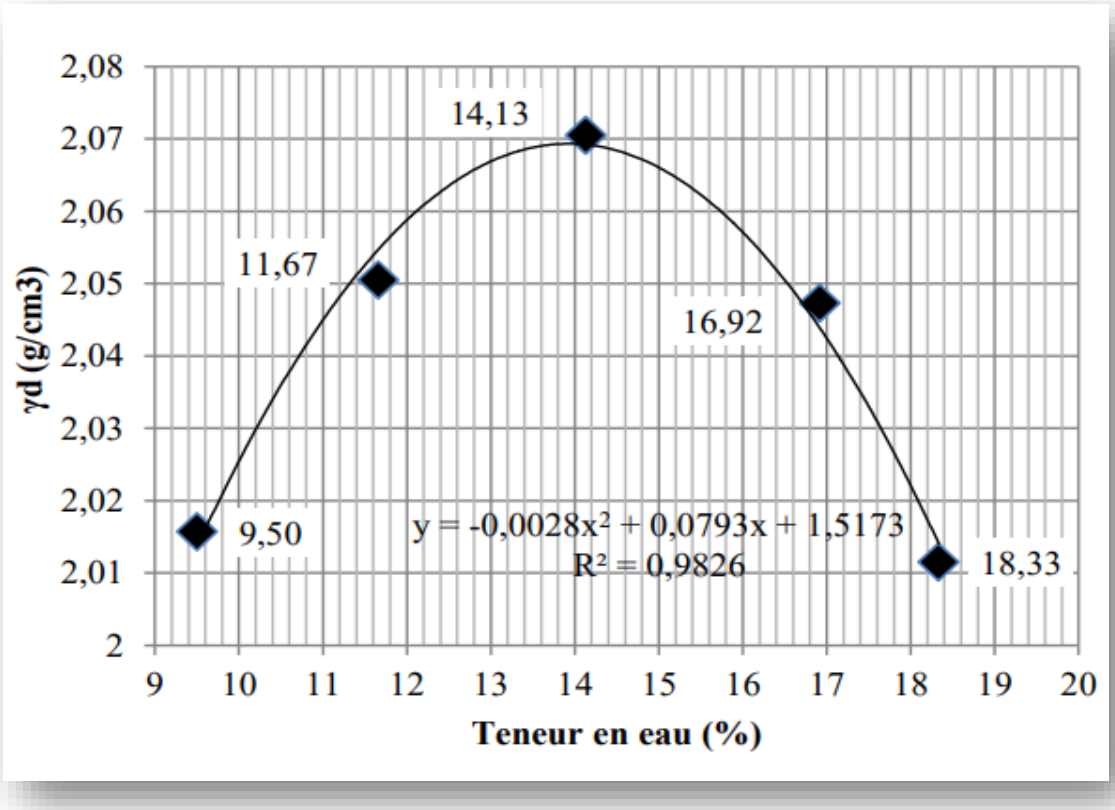


Figure II. 9: Poids volumique sec en fonction de la teneur en eau du sable-limoneux**[22] .**

II.3.4. La masse volumique des particules solides des sols (Méthode du pycnomètre eau) (NF P 94-054)

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.

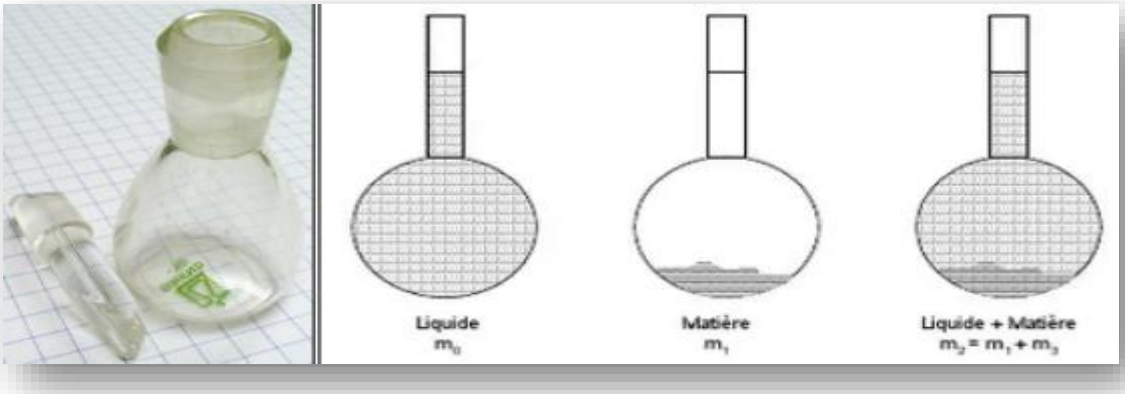


Figure II. 10: Pycnomètre et Mode opération**[23].**

Les masses volumiques des grains solides des matériaux utilisées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II. 3: Masses volumiques des grains solides**[23].**

-	Sable de riviére	Sable concassé	limon	Sable reconstituée
Gs(g/cm^3)	2.646	2.741	2.741	2.396

II.3.5.Les masses volumiques minimale et maximale des sols (NF P 94-059)

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**[23]** .

Les résultats de cette essai est présentées dans le tableau suivant :

Tableau II. 4: Masses volumiques et indices de vides (minimaux et maximaux) de sol utilise**[23].**

-	Sable reconstituée
e_{max}(-)	0.852
e_{min}(-)	0.547
$\rho_{d\ max}$ (g/cm3)	1.899
$\rho_{d\ min}$ (g/cm3)	1.461

II.3.6. Essai de cisaillement direct

Elles ont réalisé l'essai sur des éprouvettes préparées avec une variété de teneur en ciment Portland de (Q_{Ciment}= 0, 1.5, 2.5, et 3.5%), avec un teneur en eau optimale de 14%. soixante (60) échantillons avec une condition consolidé non drainé (CU) ont été préparés pour être testés à une densité relative moyenne de 50 %. Quinze (15) spécimens ont été préparés et testé le jour même et les autres échantillons ont été laissés à durcir pendant 7, 14 et 28 jours à température ambiante du laboratoire (22°+2°) ; selon le programme présenté dans le tableau suivant :**[23]**

Tableau II. 5: Programme des essais effectués **[23]**.

		Contrainte Normal ((kPa)	Teneur en Ciment Portland (%)	Temps de la cure (Jrs)
Essai1	3 Echantillons	100 ; 200 ; 300	0	0
Essai2	3 Echantillons		0.5	
Essai3	3 Echantillons		1.5	
Essai4	3 Echantillons		2.5	
Essai5	3 Echantillons		3.5	
Essai6	3 Echantillons	100 ; 200 ; 300	0	7
Essai7	3 Echantillons		0.5	
Essai8	3 Echantillons		1.5	
Essai9	3 Echantillons		2.5	
Essai10	3 Echantillons		3.5	
Essai11	3 Echantillons	100 ; 200 ; 300	0	14
Essai12	3 Echantillons		0.5	
Essai13	3 Echantillons		1.5	
Essai14	3 Echantillons		2.5	
Essai15	3 Echantillons		3.5	
Essai16	3 Echantillons	100 ; 200 ; 300	0	28
Essai17	3 Echantillons		0.5	
Essai18	3 Echantillons		1.5	
Essai19	3 Echantillons		2.5	
Essai20	3 Echantillons		3.5	

Les échantillons utilisées sont des 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%, elles ont ajouté le ciment avec un teneur varient de 0 à 3.5% comme montre le tableau II. 5.



Figure II. 11: Préparation des mélanges (sable limoneux/ciment) à l'état sec**[22].**



Figure II. 12: Préparation des mélanges avec une teneur en eau de 14%**[22].**

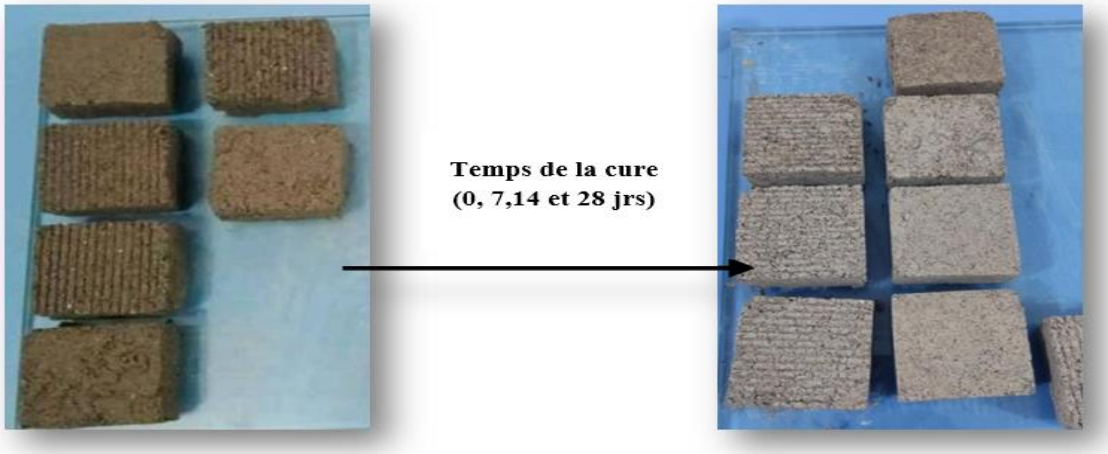


Figure II. 13: Préparation des échantillons et laisser sécher **[22].**

Les résultats de cet essai sont les suivants :

1) **Effet de la teneur en ciment sur le comportement mécanique d'un sable limoneux à 0 jour de durcissement**

- **Effet de la teneur en ciment sur la contrainte de cisaillement**

Les courbes (contrainte de cisaillement/déplacement horizontal) sont présentées dans les figures ci-dessous, les courbes montrent un comportement identique, où la contrainte de cisaillement augmente avec les déplacements imposés à l'éprouvette jusqu'à la fin de l'expérience**[23]** .

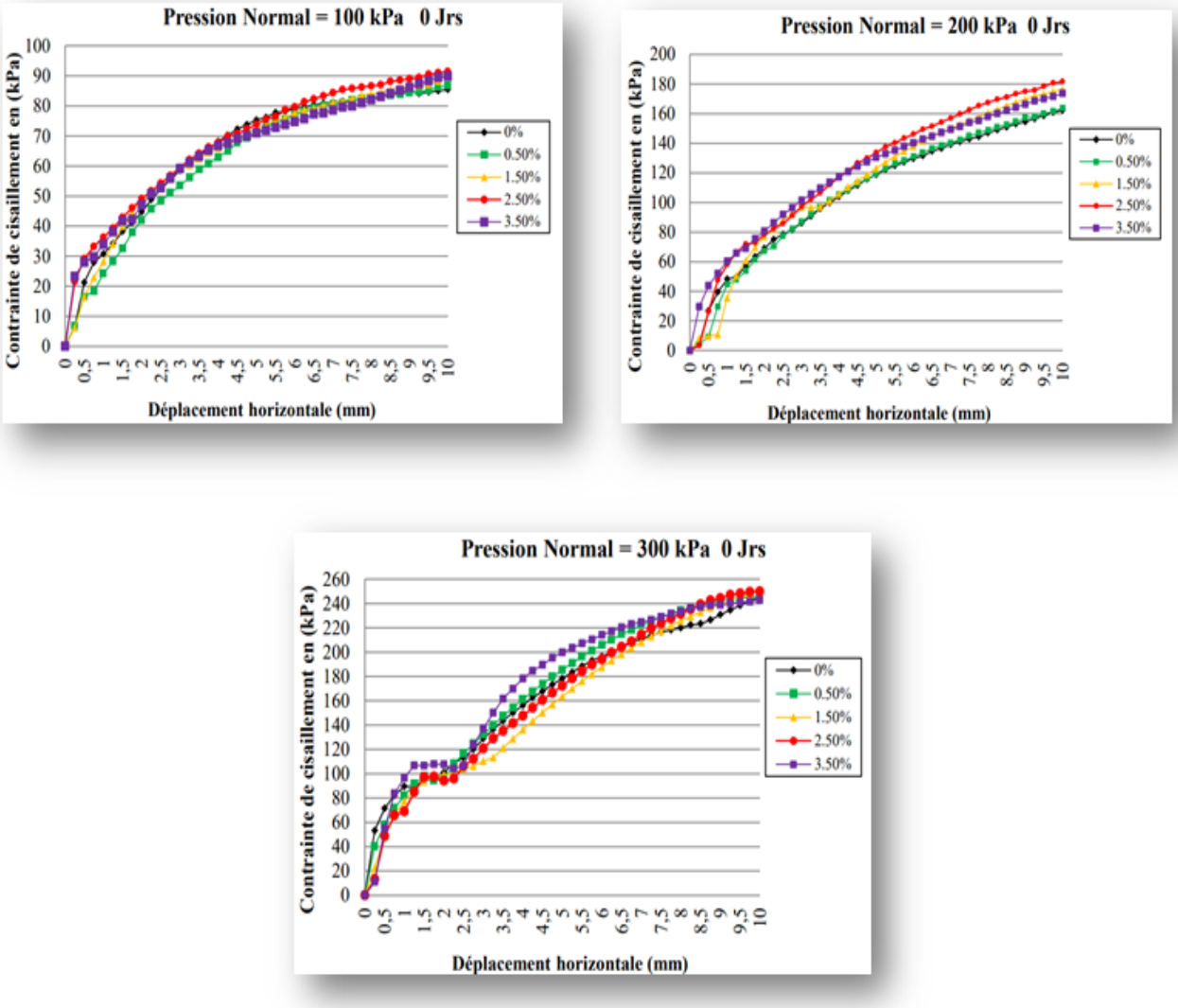


Figure II. 14: Courbes de contrainte au cisaillement/déplacement horizontal à 0 jour de durcissement**[22].**

elles ont rassemblé les contraintes de cisaillement maximales pour tous les essais dans le tableau suivant. Ensuite, elles ont tracé les courbes des contraintes maximales de cisaillement de trois contraintes normales (100, 200, 300 kPa) en fonction de la teneur en ciment.

Tableau II. 6:Évaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment**[23]**.

0 jours	**Teneur en ciment(%)**				
Contrainte(Kpa)	0	0.5	1.5	2.5	3.5
100	85.42	86.72	88.75	91.45	89.87
200	162.25	163.59	175.38	181.57	173.69
300	245.34	245.89	249.75	249.94	242.79

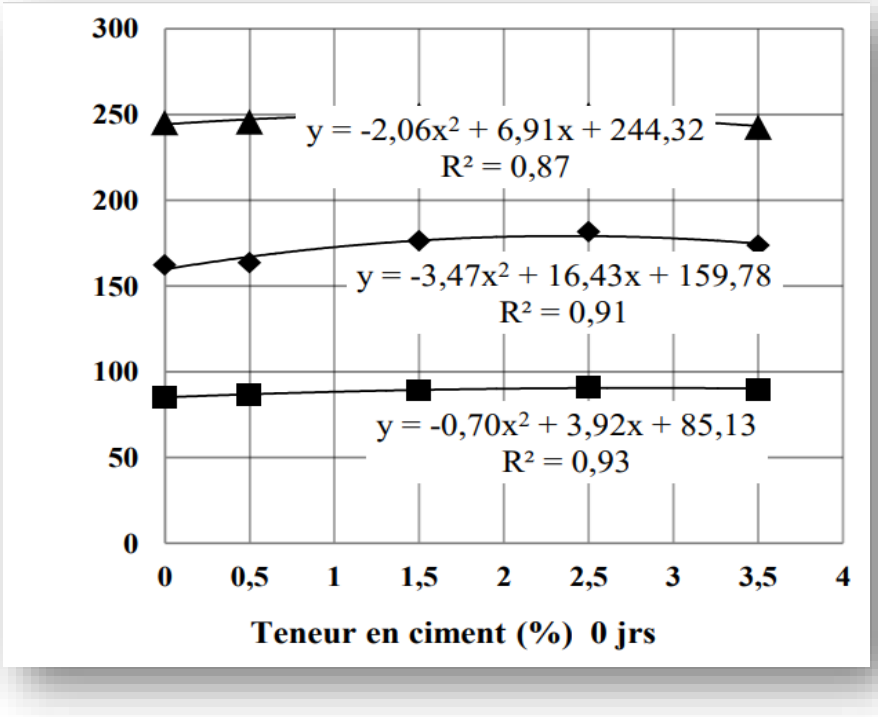


Figure II. 15: Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment**[22].**

À travers les courbes et le tableau, la résistance au cisaillement prend une tendance croissante avec l'augmentation de la teneur en ciment jusqu'à 2,5%, puis une légère diminution après ce pourcentage, ce qui est observé dans toutes les charges appliquées ; dans lesquelles la valeur des contraintes maximales de cisaillement a été augmentée à environ 7%, 11,9% et 1,87 pour 200, 100 et 300 kPa, respectivement ; À partir de ces résultats, on peut conclure que la teneur en ciment ajouté n'a pas d'effet significatif sur les charges de pression de 300 kPa, contrairement aux charges de 100 et 200 kPa**[23]**.

- **Effet de la teneur en ciment sur l'angle de frottement et la cohésion**

Les courbes ci-dessous représentent les valeurs de l'angle de frottement et de cohésion en fonction de teneur en ciment pour un temps de durcissement de 0 jour **[23]**.

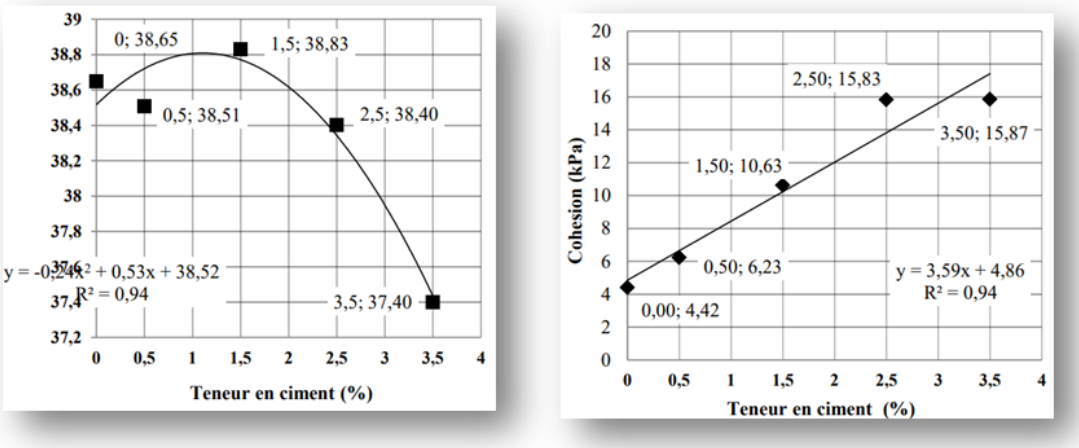


Figure II. 16: φ et C (0 jour) **[22].**

Concernant la valeur de l'angle de frottement, elles ont noté que sa valeur maximale a été enregistrée à une teneur en ciment de 2.5% égale à environ 38.83° (une amélioration estimée de 0.5% par rapport au sol non traité), et ensuite il diminue progressivement avec l'augmentation de la teneur en ciment, contrairement à la cohésion où il augmente linéairement avec l'augmentation de la teneur en ciment ; cette augmentation de la cohésion est due au processus d'hydratation du ciment Portland, dans lequel les hydrates d'alumine-calcique (C-A-H) et Ca(OH) 2. Où CS-H et C-A-H forment un réseau serviteur de "colle" qui donne une structure et de la résistance au mélange et augmente la liaison entre les particules du sol **[23]**.

2) Effet de la teneur en ciment sur le comportement mécanique d'un sable limoneux à 7 jours de durcissement

♦ Effet de la teneur en ciment sur la contrainte de cisaillement

Les figures suivantes montrent les résultats de l'effet de la teneur en ciment dans le cas d'un cisaillement direct sous des contraintes normales de 100, 200 et 300 kPa ; après 7 jours de durcissement**[23]** .

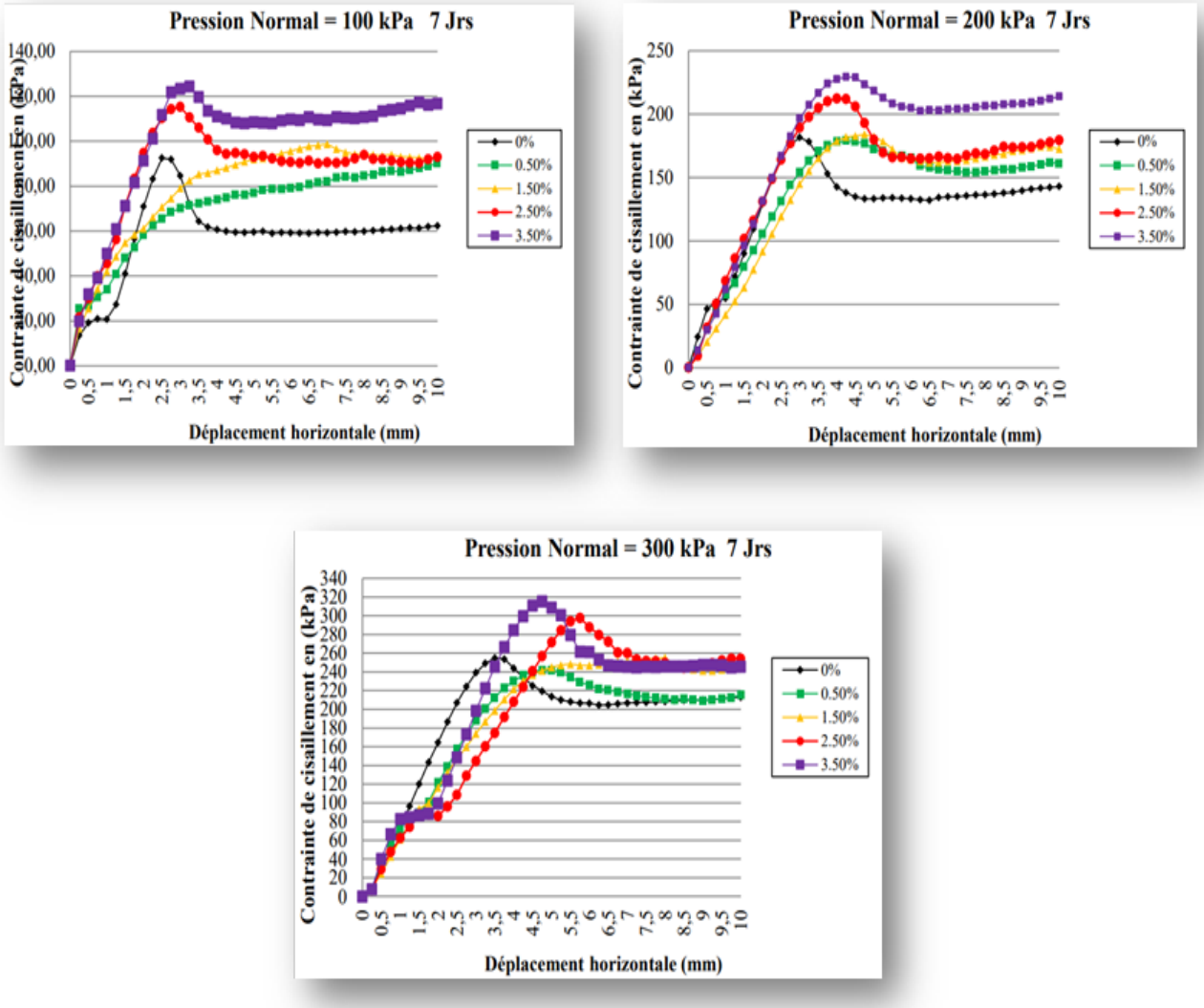


Figure II. 17: Courbes de contrainte au cisaillement/déplacement horizontal à 7 jour de durcissement**[22] .**

D'après le tableau et la figure suivants concernant l'évolution de la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la teneur en ciment sous différentes contraintes de chargement, elles sont observé que la contrainte de cisaillement a tendance à augmenter avec l'augmentation de la teneur en ciment pour toutes les charges appliquées ; où la valeur des contraintes de cisaillement maximales a augmenté d'environ 34,34%, 26,32% et 23,76 pour 100, 200 et 300 kPa, respectivement**[23]**.

Tableau II. 7: Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment**[23].**

7 jours	**Teneur en ciment(%)**				
Contrainte(Kpa)	0	0.5	1.5	2.5	3.5
100	92.49	90.17	98.64	115.24	124.25
200	181.45	178.68	184.02	212.19	229.21
300	254.72	242.12	255.13	297.65	315.25

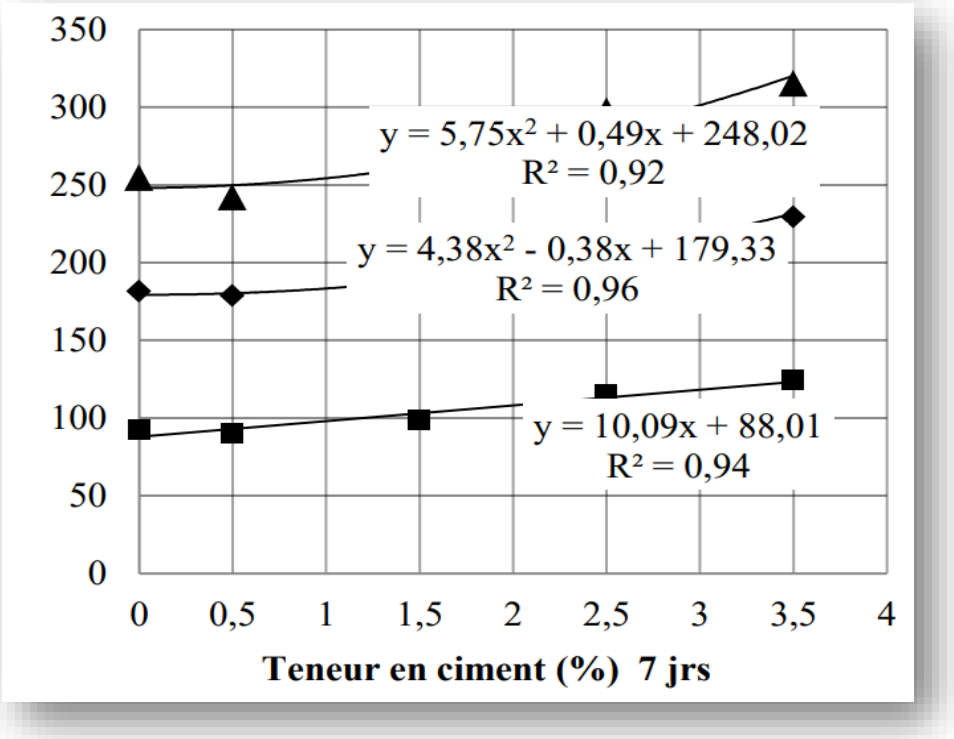


Figure II. 18: Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment**[22].**

♦ **Effet de la teneur en ciment sur l'angle de frottement et la cohésion**

A travers la figure, elles ont remarqué une diminution de la valeur de l'angle de frottements lors de l'ajout de 0,5% de ciment, puis une augmentation progressive après l'augmentation de la valeur de la teneur en ciment jusqu'à enregistrer sa valeur maximale à la teneur en ciment la plus élevée, estimée à 43,68°, ce qui représente une amélioration de 4.63° par rapport au sable non traité. Et Concernant la cohésion, une augmentation linéaire de sa valeur avec l'ajout de ciment remarquée dans la courbe, atteignant une valeur de 31.9 kPa pour une teneur en ciment de 3.5%, représentant une augmentation de 28% par rapport au sable non traité.

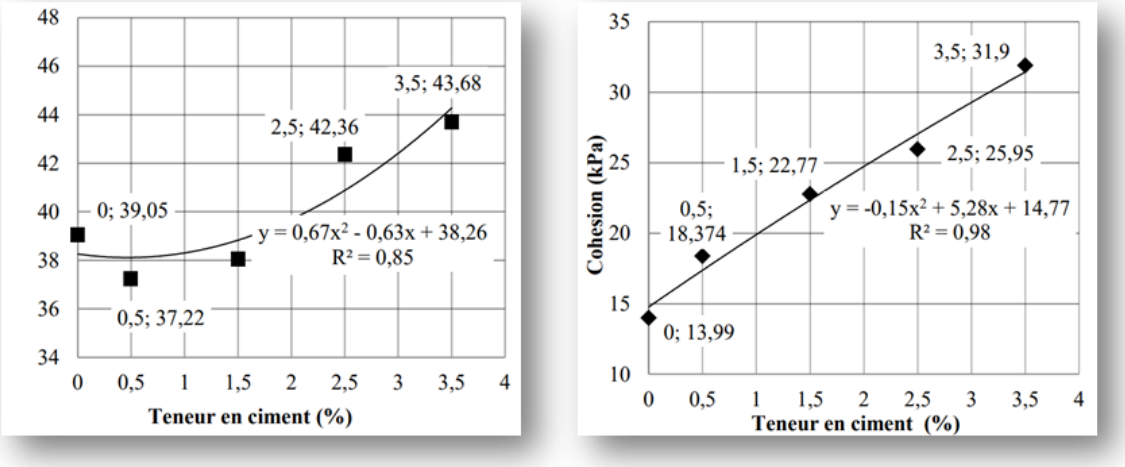


Figure II. 19:φ et C (7 jour) **[22].**

3) Effet de la teneur en ciment sur le comportement mécanique d'un sable limoneux à 14 jours de durcissement

♦ **Effet de la teneur en ciment sur la contrainte de cisaillement**

Au bout de 14 jours de durcissement, elles ont extrait ces résultats des éprouvettes cisaillées sous des contraintes de 100, 200 et 300 kPa, qui sont présentés dans la figure suivante.

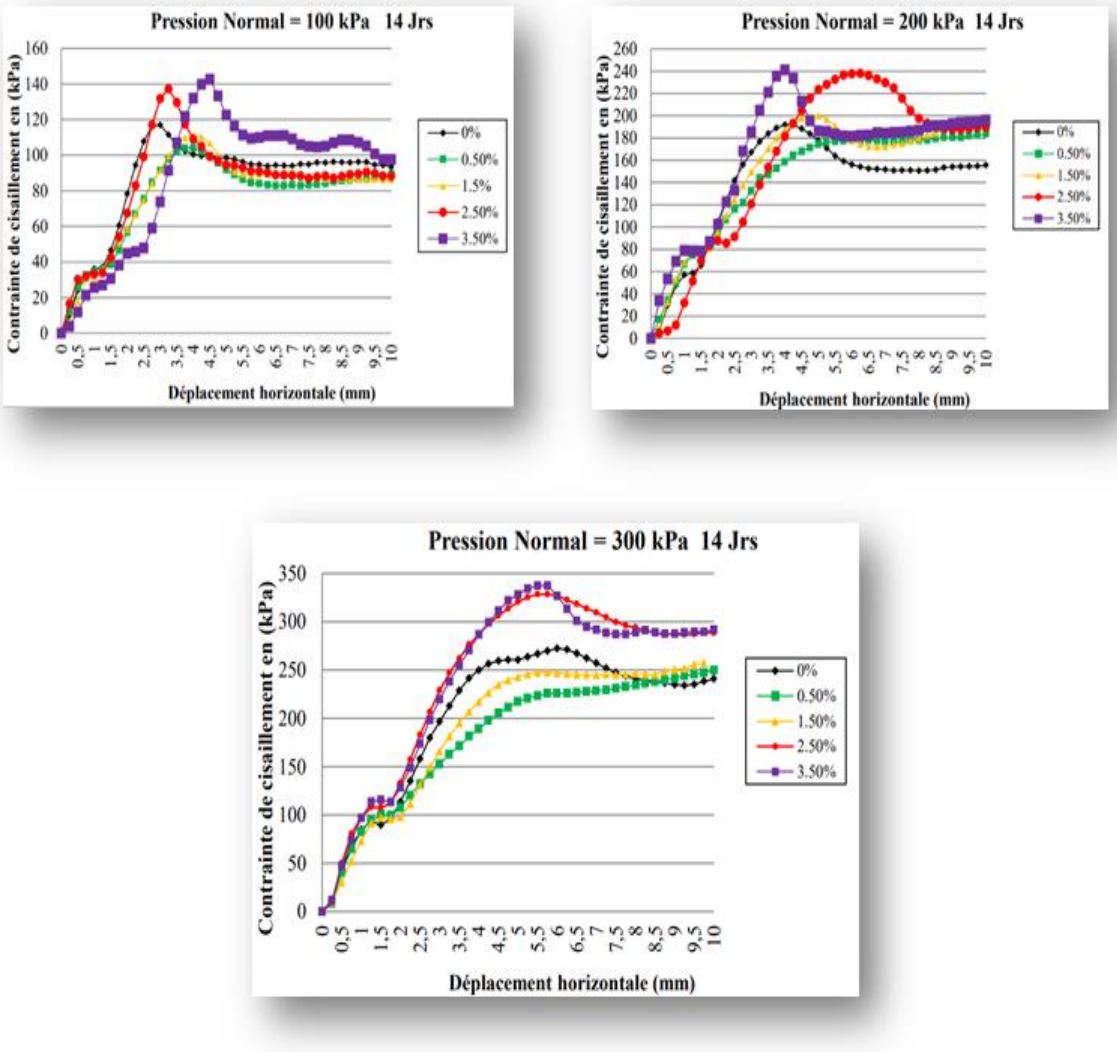


Figure II. 20: Courbes de contrainte au cisaillement/déplacement horizontal à 14 jour de durcissement**[22].**

A travers les courbes et le tableau ci-dessous, liés à l'évolution de la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la teneur en ciment sous différentes contraintes de chargement, elles ont observé que la contrainte de cisaillement diminue immédiatement après l'ajout d'une quantité de 0.5% de ciment puis augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment pour enregistrer sa valeur la plus élevée pour la teneur en ciment égale à 3,5 % ; Où la valeur des contraintes de cisaillement maximales a été augmentée à environ 4.35 %, 25.63 % et 18.46% pour 100, 200 et 300 kPa de contraintes normales, respectivement **[23]**.

Tableau II. 8: Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment **[23].**

14 jours	Teneur en ciment(%)				
Contrainte(Kpa)	0	0.5	1.5	2.5	3.5
100	116.91	104.09	111.41	137.29	142.63
200	191.93	183.56	199.98	237.93	241.13
300	284.88	249.88	259.84	328.43	337.47

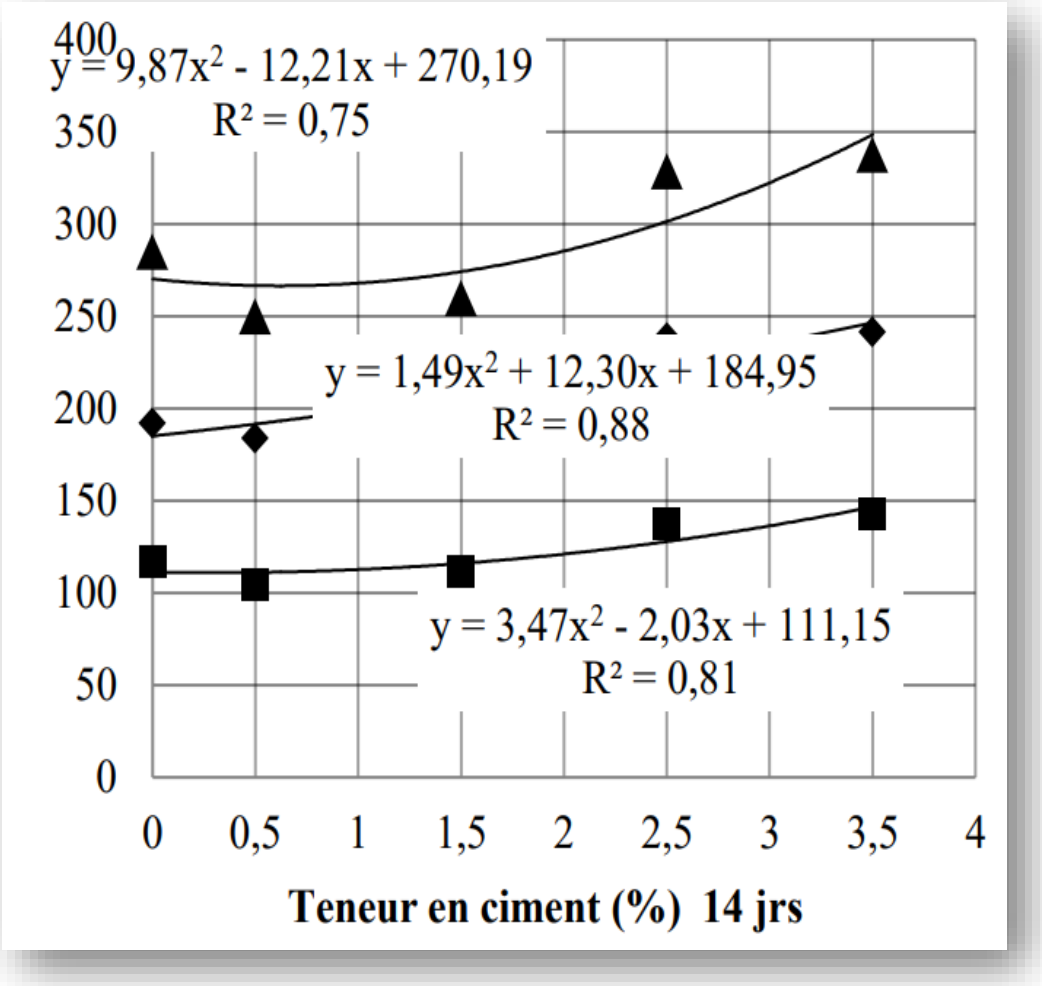


Figure II. 21: Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment **[22]**.

♦ **Effet de la teneur en ciment sur l'angle de frottement et la cohésion**

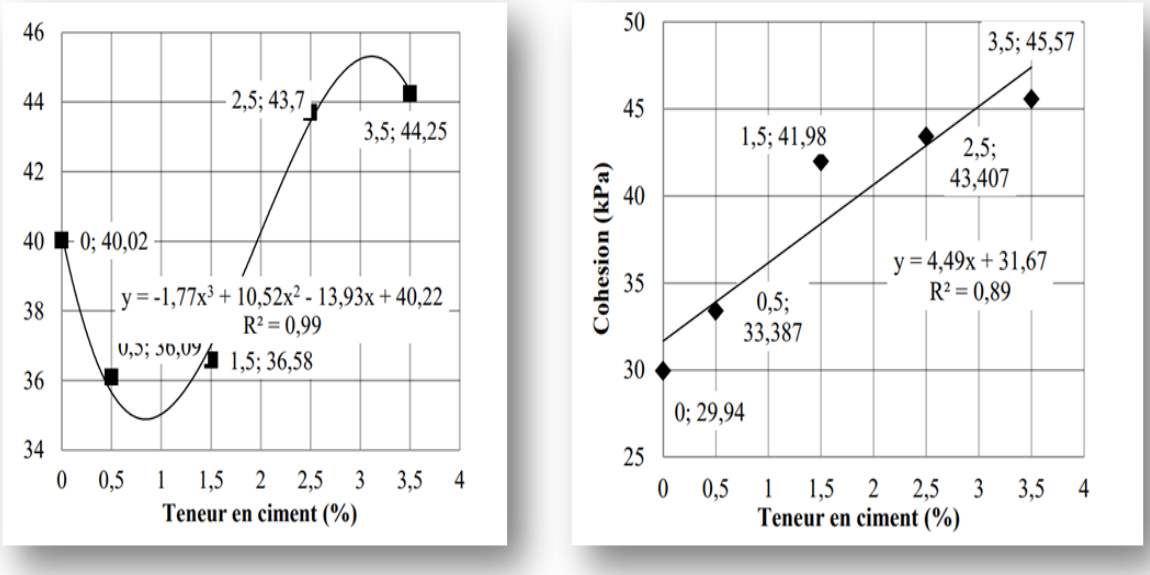


Figure II. 22:φ et C (14 jour) **[22].**

A travers la figure, elles ont remarqué une diminution de la valeur de l'angle de friction lors de l'ajout de 0,5% de ciment, puis une augmentation progressive après l'augmentation de la valeur de la teneur en ciment jusqu'à enregistrer sa valeur maximale à la teneur en ciment la plus élevée de 3.5%, estimée à 44.25°, ce qui représente une amélioration de 4.23° par rapport au sable non traité. Et Concernant la cohésion, une augmentation linéaire de sa valeur avec l'ajout de ciment, atteignant une valeur de 45.57 kPa pour une teneur en ciment de 3.5%, représentant une augmentation de 52.20% par rapport au sable non traité.

4) Effet de la teneur en ciment sur le comportement mécanique d'un sable limoneux à 28 jours de durcissement

♦ **Effet de la teneur en ciment sur la contrainte de cisaillement**

Au bout de 28 jours de durcissement, ils ont extrait ces résultats des éprouvettes cisaillées sous des contraintes de 100, 200 et 300 kPa, qui sont présentés dans la figure suivante

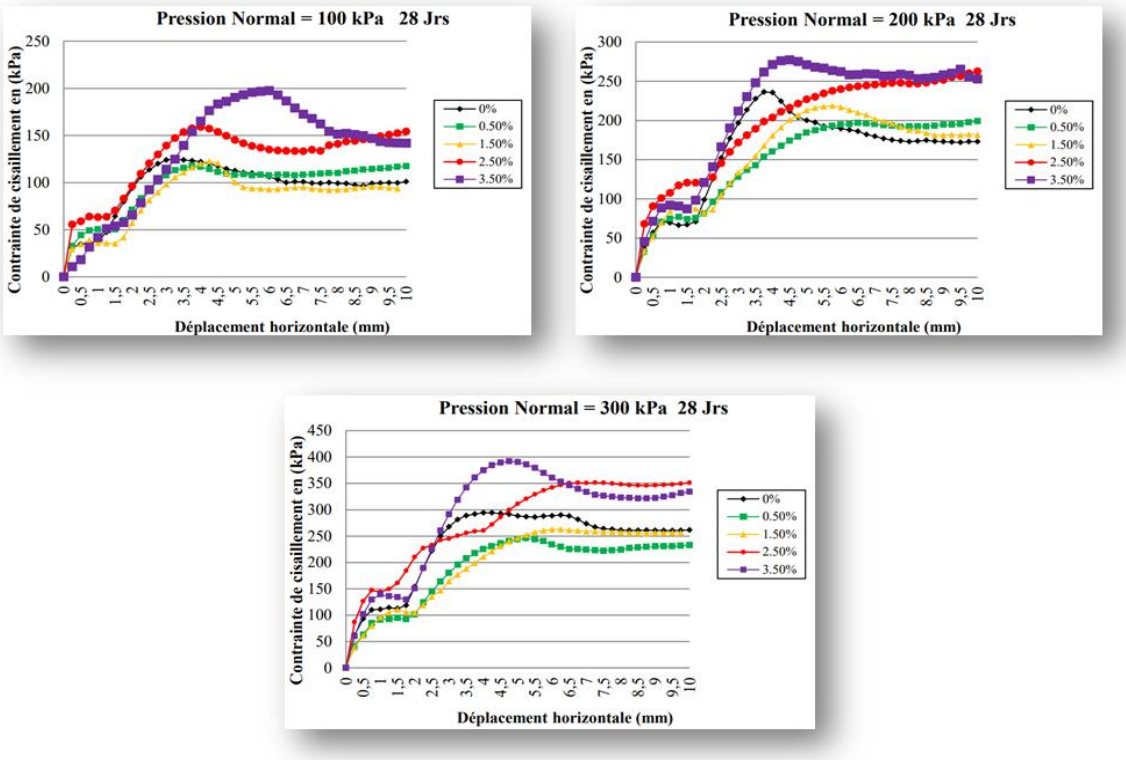


Figure II. 23:courbes de contrainte au cisaillement/déplacement horizontal à 28 jours de durcissement**[22].**

A travers les courbes et le tableau ci-dessous, liés à l'évolution de la contrainte de cisaillement maximale en fonction de la teneur en ciment sous différentes contraintes de chargement, elles ont observé que la contrainte de cisaillement diminue immédiatement après l'ajout d'une quantité de 0.5% de ciment puis augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment pour enregistrer sa valeur la plus élevée pour la teneur en ciment égale à 3,5 % ; Où la valeur des contraintes de cisaillement maximales a été augmentée à environ 58 %, 17.27 % et 33% pour 100, 200 et 300 kPa de contraintes normales, respectivement **[23]**.

Tableau II. 9: Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment**[23]**

28 jours	**Teneur en ciment(%)**				
Contrainte(Kpa)	0	0.5	1.5	2.5	3.5
100	125.15	117.69	122.56	158.95	197.45
200	236.28	198.98	218.79	262.55	277.08
300	294.34	245.83	263.02	351.29	391.98

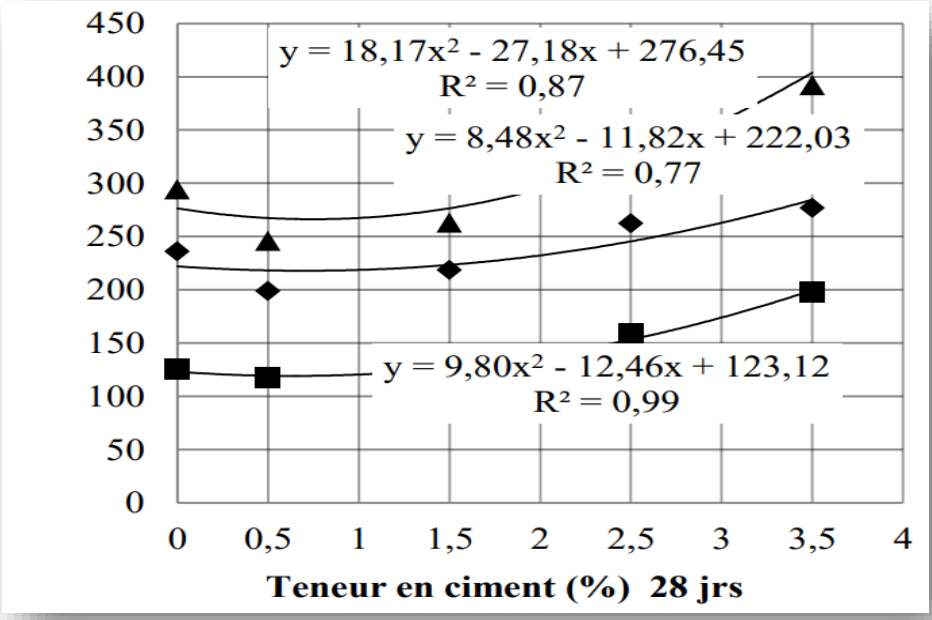


Figure II. 24: Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment**[22]**

- **Effet de la teneur en ciment sur l'angle de frottement et la cohésion**

A travers la figure, ils ont remarqué une diminution de la valeur de l'angle de friction lors de l'ajout de 0,5% de ciment, puis une augmentation progressive après l'augmentation de la valeur de la teneur en ciment jusqu'à enregistrer sa valeur maximale à la teneur en ciment la plus élevée de 3.5%, estimée à 44.21°, ce qui représente une amélioration de 4 ° par rapport au sable non traité. Et Concernant la cohésion, une augmentation linéaire de sa valeur avec l'ajout de ciment, atteignant une valeur de 94.31 kPa pour une teneur en ciment de 3.5%, représentant une augmentation de 91% par rapport au sable non traité.

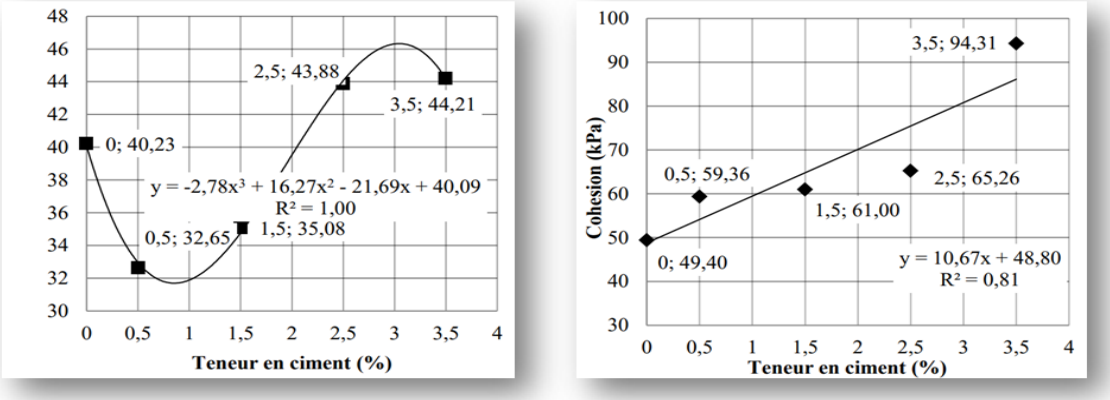


Figure II. 25:φ et C (28 jour) **[22]**

5) Effet du temps de durcissement sur le comportement mécanique d'un sable limoneux

- **Effet du temps de durcissement sur la contrainte de cisaillement**

Elles ont présenté les résultats sous la forme de courbes de contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal pour 0, 7, 14 et 28 jours de durcissement, pour différentes contraintes normales (100, 200 et 300 kPa), qui sont discutées dans cette section.

- **A 100 kPa de contrainte normale**

la figure suivant représenté les courbes des contraintes de cisaillement des teneurs en ciment (0, 0,5, 1,5, 2,5 et 3,5%) en fonction du temps de durcissement et cisaillées sous une pression de charge de 100 kPa.

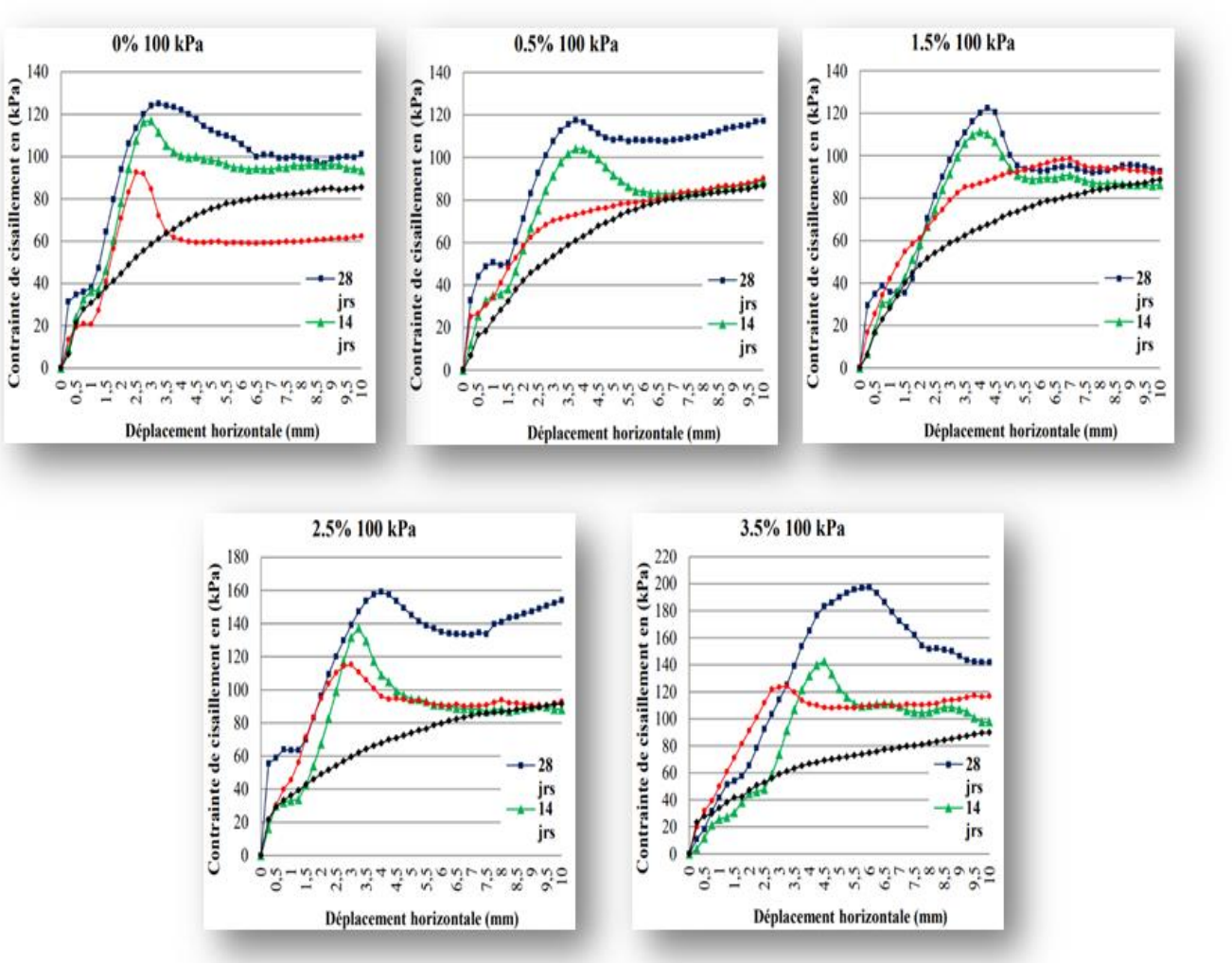


Figure II. 26: Les courbes des contraintes de cisaillement des teneurs en ciment (0, 0,5, 1,5, 2,5 et 3,5%) en fonction du temps de durcissement à 100 kPa**[22] .**

La courbe et le tableau suivantes représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) sur les échantillons traités avec du ciment sous une pression normale de 100 kPa**[23]**.

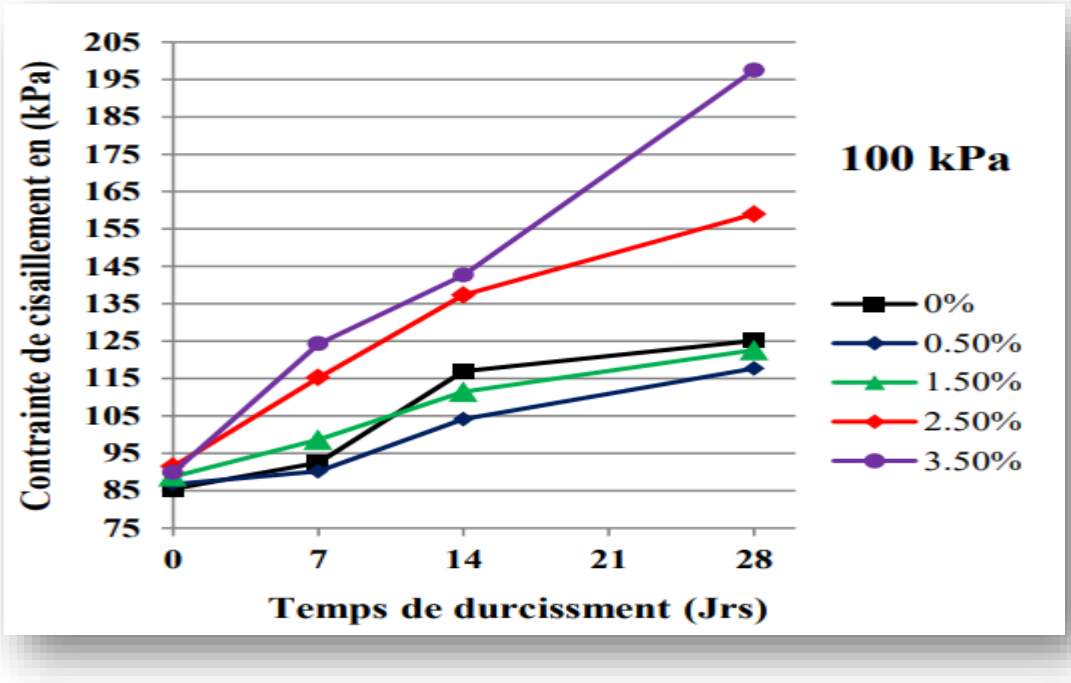


Figure II. 27: L'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 100 kpa **[22]**

Tableau II. 10:L'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 100 kPa**[23]**

100KPa	**Teneur en ciment(%)**				
Temps de durcissement (Jrs)	**0**	**0.5**	**1.5**	**2.5**	**3.5**
0	85.42	86.72	88.75	91.45	89.87
7	92.49	90.17	98.64	115.24	124.25
14	116.91	104.09	111.41	137.29	142.63
28	125.15	117.69	122.56	158.95	197.45

Elles ont remarqué que les courbes pour les teneurs en ciment de 0%, 0,5% et 1,5% augmentent légèrement avec l'augmentation du temps de durcissement, tandis que les échantillons à 2.5 et 3.5% de teneur en ciment présentent un grand angle de pente qui indique une grande croissance de la courbe avec l'augmentation du temps de durcissement.

- **A 200 kPa de contrainte normale**

la figure suivant représenté les courbes des contraintes de cisaillement des teneurs en ciment (0, 0,5, 1,5, 2,5 et 3,5%) en fonction du temps de durcissement et cisaillées sous une pression de charge de 200 kPa.

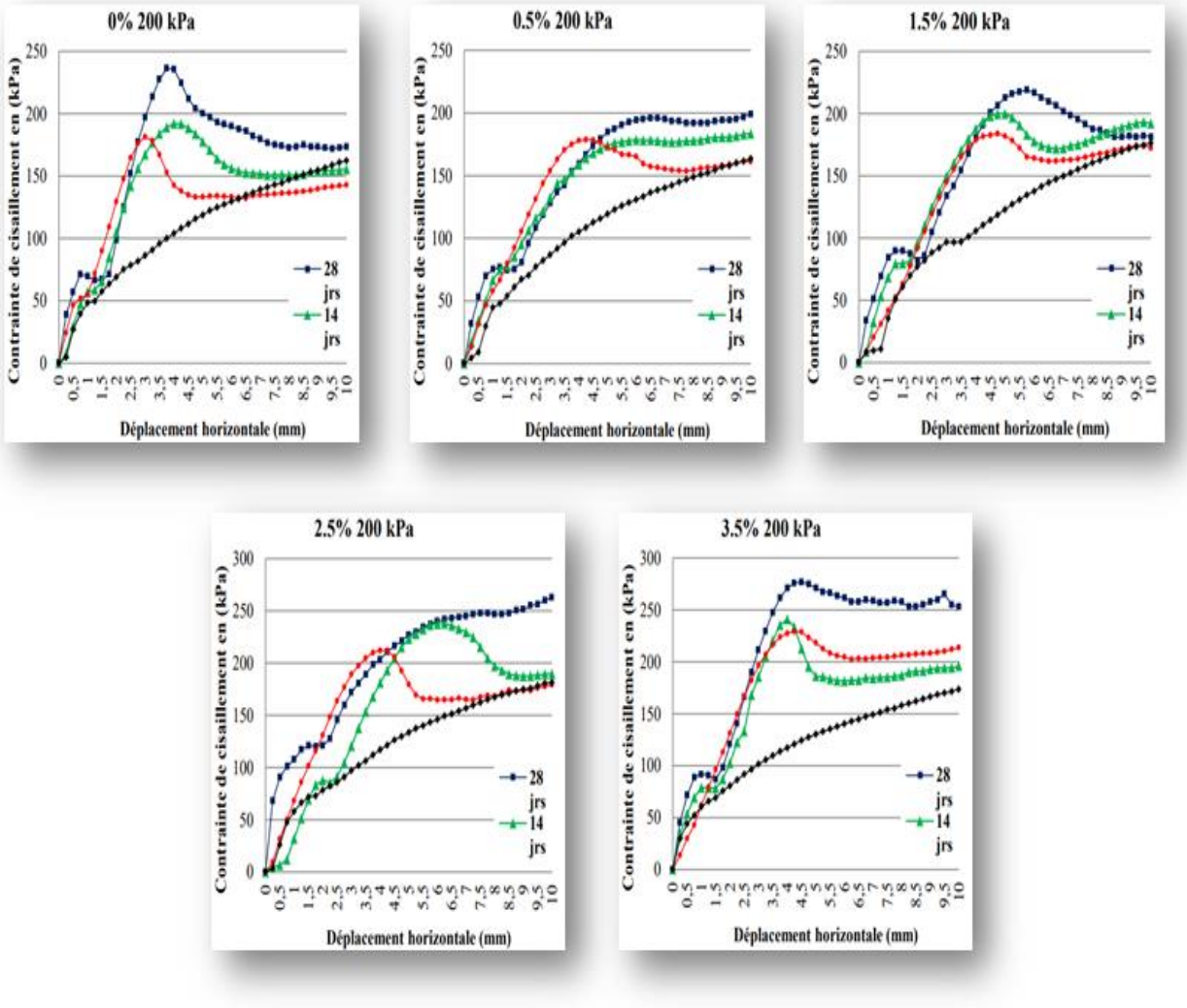


Figure II. 28: Les courbes des contraintes de cisaillement des teneurs en ciment (0, 0,5, 1,5, 2,5 et 3,5%) en fonction du temps de durcissement à 200 kPa **[22]**

La courbe et le tableau suivantes représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) sur les échantillons traités avec du ciment sous une pression normale de 200 kPa **[23]**.

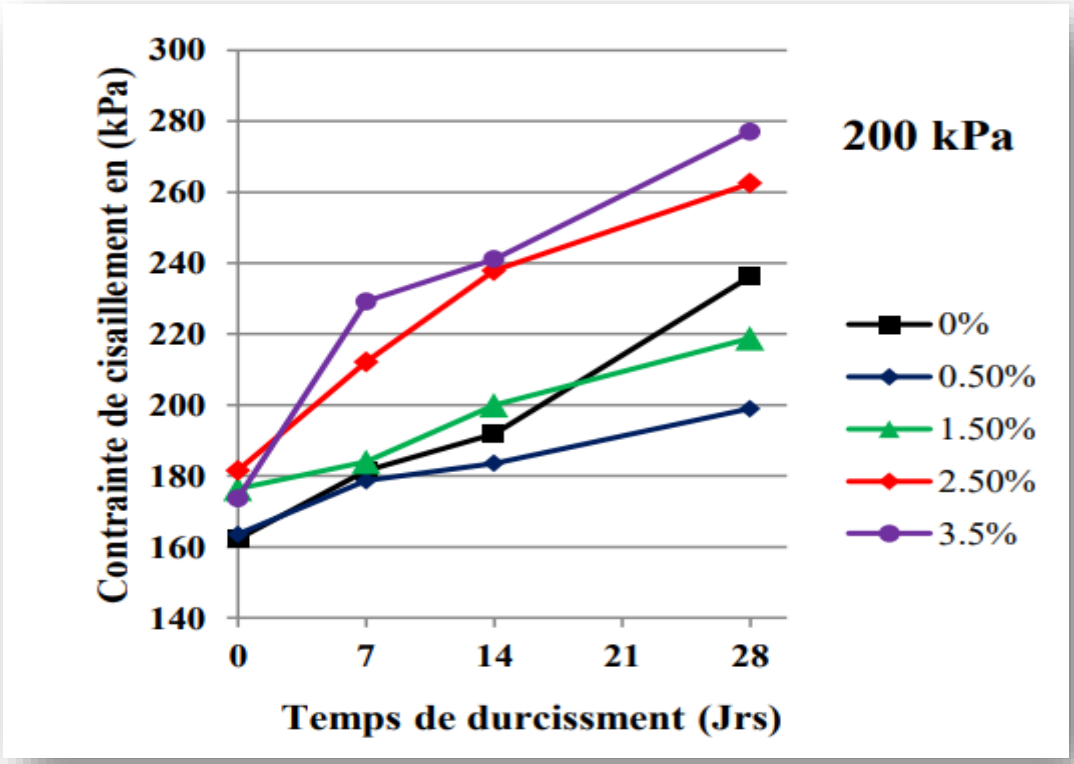


Figure II. 29: L'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à200 kPa **[22]**

Tableau II. 11: L'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 200 kPa **[23]**

200KPa	**Teneur en ciment(%)**				
Temps de durcissement (Jrs)	**0**	**0.5**	**1.5**	**2.5**	**3.5**
0	162.25	163.59	176.38	181.57	173.69
7	181.45	178.68	184.02	212.19	229.21
14	191.93	183.56	199.98	237.93	241.13
28	236.28	198.98	218.79	262.55	277.08

Pour les échantillons à 0,5 % et 1,5 % de teneur en ciment, elles ont constaté une augmentation lente et progressive au fil du temps, et nous avons enregistré une légère variation de l'augmentation entre eux, Concernant les échantillons à 0, 2,5% et 3,5% de teneur en ciment, ils ont enregistré une augmentation progressive au fur et à mesure du temps de durcissement, pour enregistrer les valeurs les plus élevées à 28 jours de durcissement.

- **A 300 kPa de contrainte normale**

la figure suivant représenté les courbes des contraintes de cisaillement des teneurs en ciment (0, 0,5, 1,5, 2,5 et 3,5%) en fonction du temps de durcissement et cisaillées sous une pression de charge de 300 kPa.

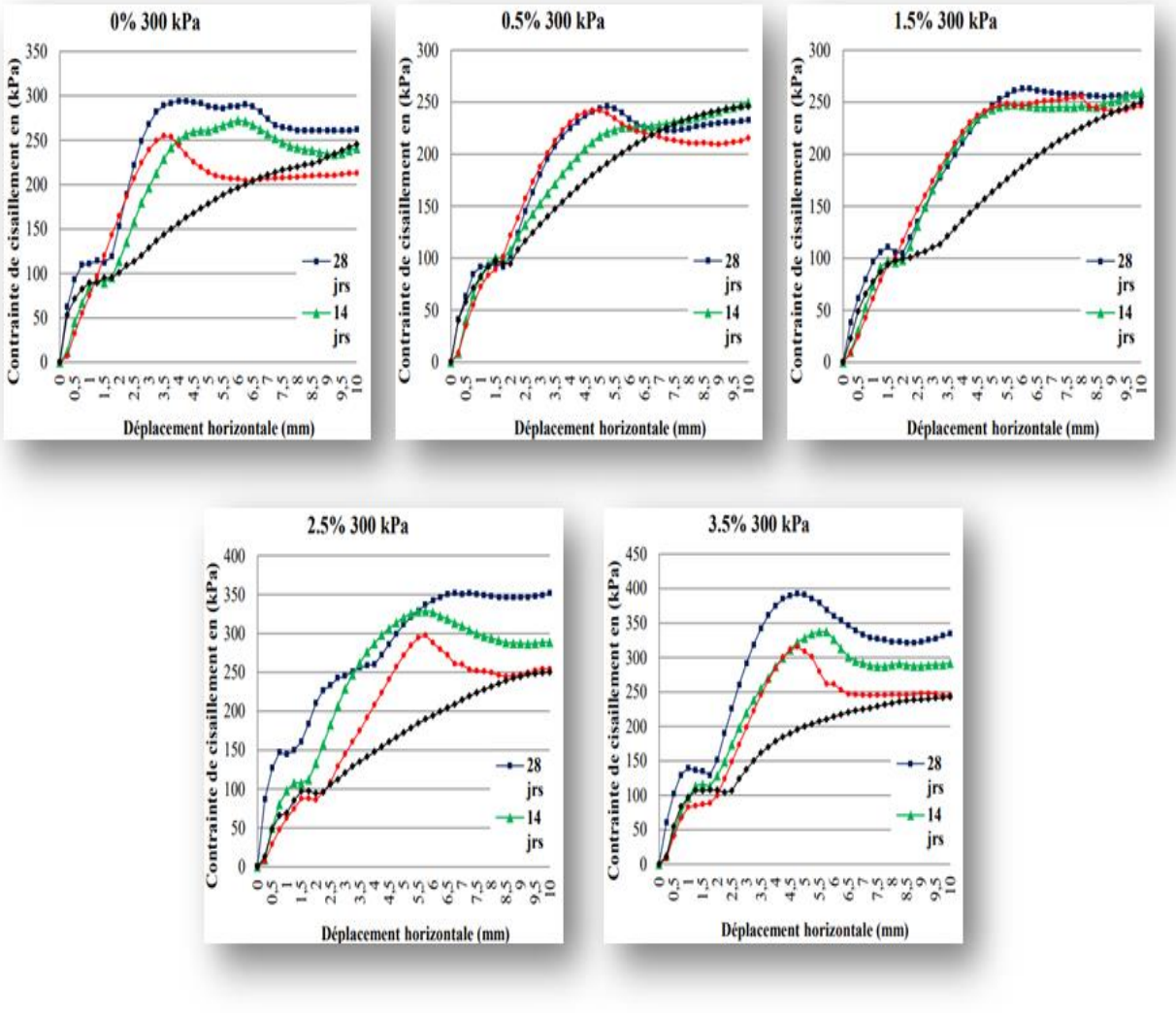


Figure II. 30: Les courbes des contraintes de cisaillement des teneurs en ciment (0, 0,5, 1,5, 2,5 et 3,5%) en fonction du temps de durcissement à 300 kPa **[22]**

La courbe et le tableau suivantes représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) sur les échantillons traités avec du ciment sous une pression normale de 300 kPa **[23]** .

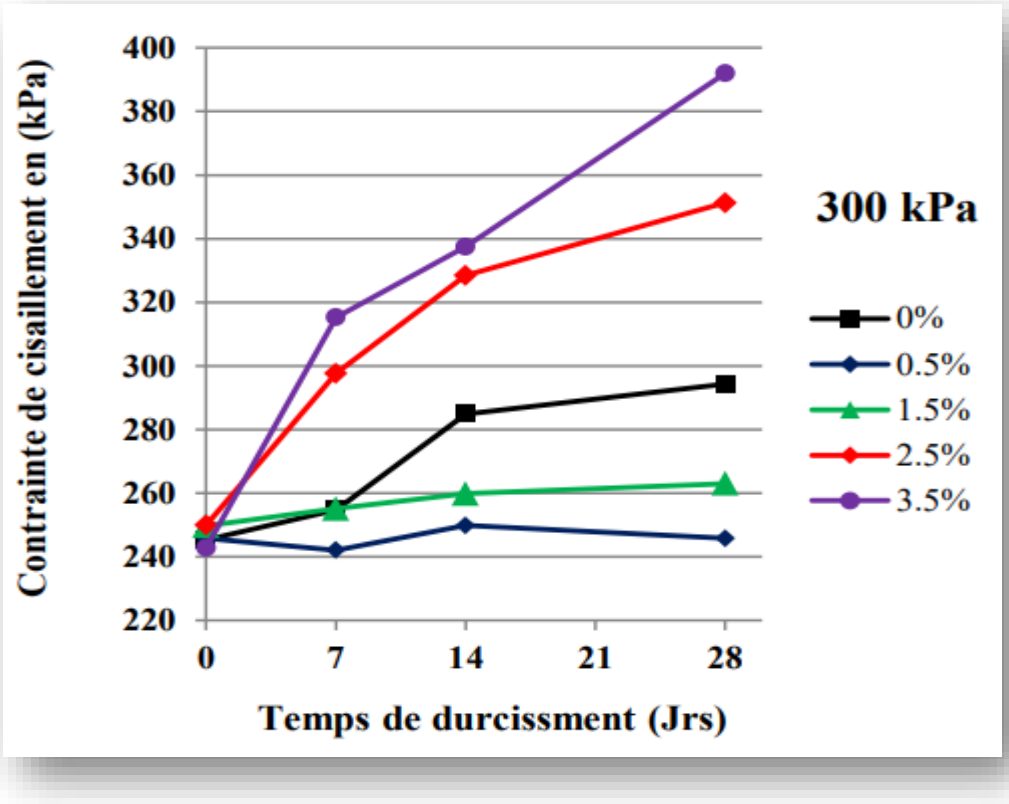


Figure II. 31: L'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 300 KPa **[22]**.

Tableau II. 12:L'effet du temps de cure (0,7,14,28 jours)à 300 kPa **[23]**.

300KPa	Teneur en ciment(%)				
Temps de durcissement (Jrs)	**0**	**0.5**	**1.5**	**2.5**	**3.5**
0	245.34	245.89	249.75	249.94	242.79
7	254.72	242.12	255.13	297.65	315.25
14	284.88	249.88	259.84	328.43	337.47
28	294.34	245.83	263.02	351.29	391.98

Elles ont constaté que les courbes des teneurs en ciment de 0,5 % et 1,5 % augmentent très légèrement avec l'augmentation du temps de durcissement, par rapport au 0 % qui augmente plus rapidement pendant les périodes de durcissement de 14 et 28 jours, tandis que les échantillons à 2,5 et 3,5 % de teneur en ciment montrent un taux de croissance significatif avec l'augmentation du temps de durcissement, en particulier pour les échantillons à 3,5 % de teneur en ciment.

- **Effet du temps de durcissement sur l'angle de frottement et la cohésion**

➢ **L'angle de frottement**

La figure et le tableau suivants représentent l'effet du temps de durcissement sur l'angle de frottement pour les échantillons de sable traités avec des teneurs en ciment (de 0 à 3.5%)

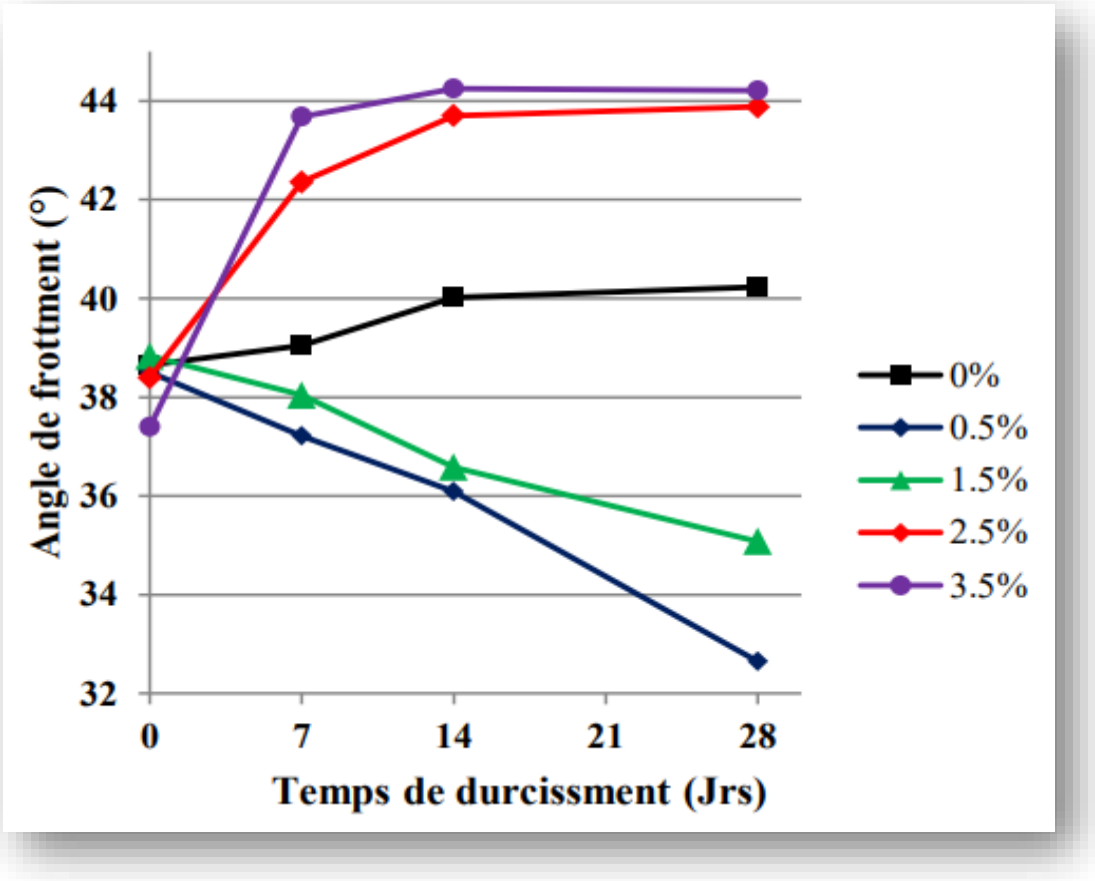


Figure II. 32:L' angle de frottement en fonction du temps de durcissements**[22]**

Tableau II. 13: Les résultats de l'angle de frottement à 0,7,14 et 28 jours de la cure **[23]**

φ(°)	Teneur en ciment(%)				
Temps de durcissement (Jrs)	**0**	**0.5**	**1.5**	**2.5**	**3.5**
0	38.65	38.51	38.83	38.40	37.40
7	39.05	37.22	38.04	42.36	43.68
14	40.02	36.09	36.58	43.70	44.25
28	40.23	32.65	35.08	43.88	44.21

Pour 0%, la courbe augmente légèrement, puis se stabilise après 14 jours de durcissement et atteint sa valeur maximale en 28 jours avec 40.23° à un taux de croissance estimé à 1.6°,Alors que les courbes de 0.5 et 1% présentent une diminution linéaire de la valeur de l'angle de frottement avec le temps de durcissement, où la valeur de l'angle de frottement à 0,5% elle atteint 32,65° et à 1% atteint 35.08° avec un taux de diminution estimé à -5.86° et -3.75%, respectivement. Alors que les courbes de 2,5 et 3,5 % étaient presque identiques et augmentaient progressivement, pour se stabiliser légèrement après 14 jours de durcissement, ainsi que la valeur la plus élevée enregistrée après 28 jours de durcissement, où la valeur de l'angle de frottement à 2.5 % atteint 43.88° et à 3,5 % il atteint 44.21° avec une un taux de croissance estimé à 5.5° et 6.8°, respectivement **[23]** .

- **La cohésion**

La figure et le tableau suivants représentent l'effet du temps de durcissement sur la cohésion pour les échantillons de sable traités avec des teneurs en ciment (de 0 à 3.5%) **[23]**

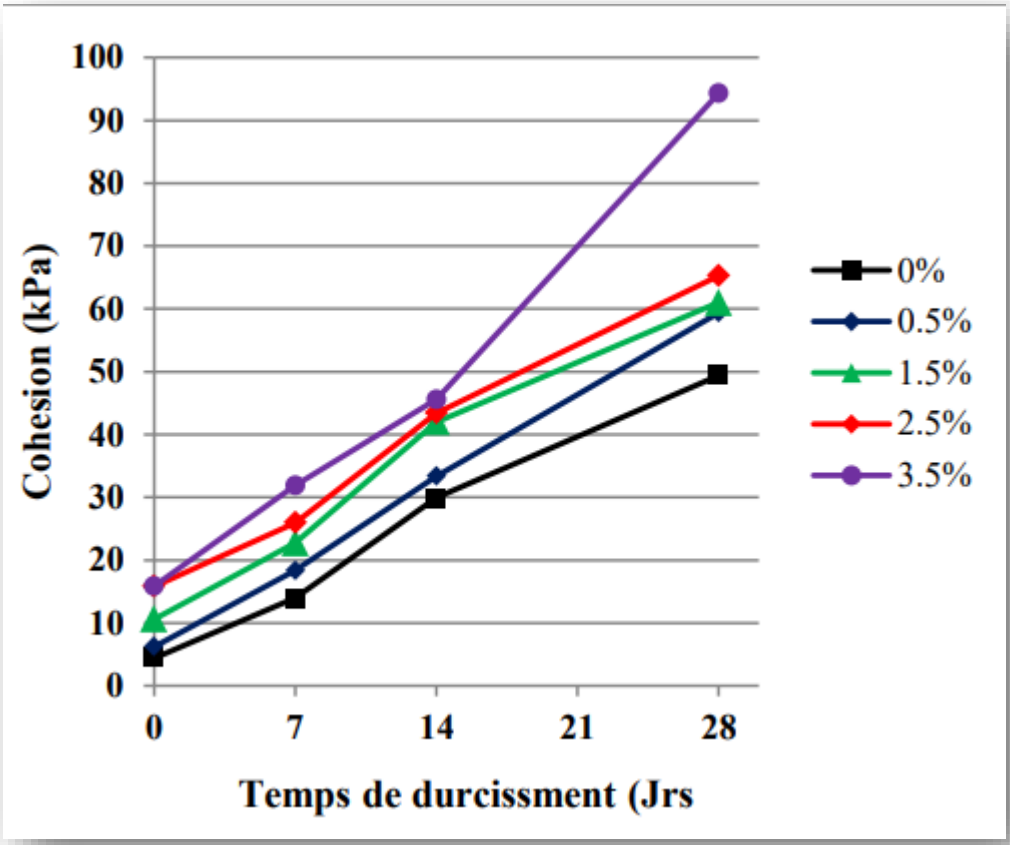


Figure II. 33: La cohésion en fonction du temps de durcissements **[22]**

Tableau II. 14: Les résultats de la cohésion et à 0,7,14 et 28 jours de la cure **[23]**

C (kPa)	**Teneur en ciment(%)**				
Temps de durcissement (Jrs)	**0**	**0.5**	**1.5**	**2.5**	**3.5**
0	4.42	6.23	10.63	15.83	15.87
7	13.99	18.39	22.77	25.95	31.90
14	29.94	33.39	41.98	43.41	45.57
28	49.40	59.36	61.00	65.26	94.31

La courbe représente la cohésion de la solidification dans le temps, car les courbes 0%, 0,5%, 1,5% et 2,5% étaient presque identiques dans le taux de croissance calculé par l'angle d'inclinaison, où l'on constate que les valeurs augmentent linéairement avec l'augmentation du temps de solidification. Pour la courbe de 3,5%, la différence réside dans sa courbe ascendante rapide après 14 jours de durcissement, où la valeur de cohésion la plus élevée de 94,31 kPa a été enregistrée après 28 jours de durcissement **[23]** .

II.4. Conclusion

Ce chapitre est le resumé des résultats N.Halbigue et F.Baghdadi en 2022 sous le thème "Evaluation expérimental sur le comportement Mécanique du Mélange sable Limoneux-Ciment" elles ont conclu :

Concernant l'effet de la teneur en ciment :

- ✓ Lorsque la teneur en ciment augmente, la résistance maximale augmente, sous toutes les contraintes normales.
- ✓ L'angle de friction (φ) augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment, la même chose est observée avec la cohésion qui augmente linéairement avec l'augmentation de la teneur en ciment.

Concernant l'effet du temps de durcissement :

- ✓ On a remarqué que plus le temps de durcissement est élevé, plus la valeur de la contrainte est élevée pour tous les spécimens étudiés et traités avec la teneur en ciment, en particulier dans les proportions supérieures ou égales à 2,5%.
- ✓ Avec l'augmentation du temps de durcissement, pour une teneur en ciment inférieure à 1,5%, l'angle de frottement diminue directement, et pour une teneur en ciment supérieure ou égale à 2,5%, la valeur de l'angle de frottement augmente et se stabilise légèrement après 14 jours de durcissement.
- ✓ En ce qui concerne la cohésion, ses valeurs augmentent avec l'augmentation de la période de durcissement pour tous les échantillons traités au ciment **[23]** .

Et comme suite à cette étude, on va faire une étude numérique avec le programme plaxis pour comparer ces résultats.

Chapitre III :

Modélisation numérique

III.1. Introduction

Après l'étude qui à été réalisée dans la mémoire de fin d'étude de master (promo2022), base sur le traitement de sol « sable limoneux » avec différant pourcentages de ciment, nous avons fait une étude numérique par le logiciel PLAXIS 8.2 sur la stabilité d'un remblai(sable limoneux traités par ciment). Il sera question de montrer l'effet des différents pourcentages de ciment sur la stabilité de ce dernier on à étudier 5cas :sable limoneux, sable limoneux avec pourcentage de ciment (0.5%, 1.5%, 2.5% , 3.5%) dans des périodes(0jour, 7 jour, 14jour, 28jour) pour étudier l'évolution du tassement (déformation) en fonction de temps de durcissements

III.2. Le logiciel plaxis 8.2

PLAXIS 8.2 est un programme informatique à éléments finis bidimensionnel à usage spécial. Il est utilisé pour effectuer des analyses de déformation et de stabilité pour de nombreux types d'ouvrages géotechniques. Des situations réelles peuvent être modélisées soit par une déformation plane, soit par un modèle axisymétrique. L'interface d'utilisateur se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves) qui sont exécutés pour être utilisés successivement dans une modélisation géotechnique. Ces sous-programmes peuvent être traités un par un, formant une méthodologie logique. Le comportement du sol est représenté par une loi qui l'assimile à un milieu continu. Cette loi souvent appelée «loi de comportement » décrit la relation entre les contraintes et les déformations provoquées par ces contraintes. Elle traduit, lorsqu'on passe d'un matériau à un autre, les différences de comportement constatées expérimentalement sous l'effet d'actions extérieures de comportement d'un sol. PLAXIS 8.2 propose différents modèles, qui permettent de simuler le comportement de sol :

- Modèle élastique linéaire
- Modèle de Mohr-Coulomb
- Modèle pour les roches fracturées (Jointed Rock Model)
- Modèle de sol avec écrouissage (Hardening Soil Model)
- Modèle pour les sols mous (Soft Soil Model)
- Modèle pour les sols mous avec fluage (Soft Soil Creep Model)

Toutes les modélisations réalisées dans ce qui suit supposent qu'on travaille en comportement élasto-plastique, répondant au modèle à critère de rupture de Mohr-Coulomb, qui est le modèle le plus couramment utilisé en mécanique des sols **[6]** .

III.3. Les étapes de modélisation par PLAXIS

➢ Le programme d'entrée des données(Input)



cette icone représente le programme d'entrée données (input).ce programme contient tout ce qui nécessaire pour créer et modifier un modèle géometrique,pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.la génération des condition initiales et faite dans un menu spécifique du programme input (mode conditions initiales).la description se concentre tout d'abord sur la création d'un modèle géométrique et d'un maillage d'éléments finis (mode de création géométrique) **[24]** .

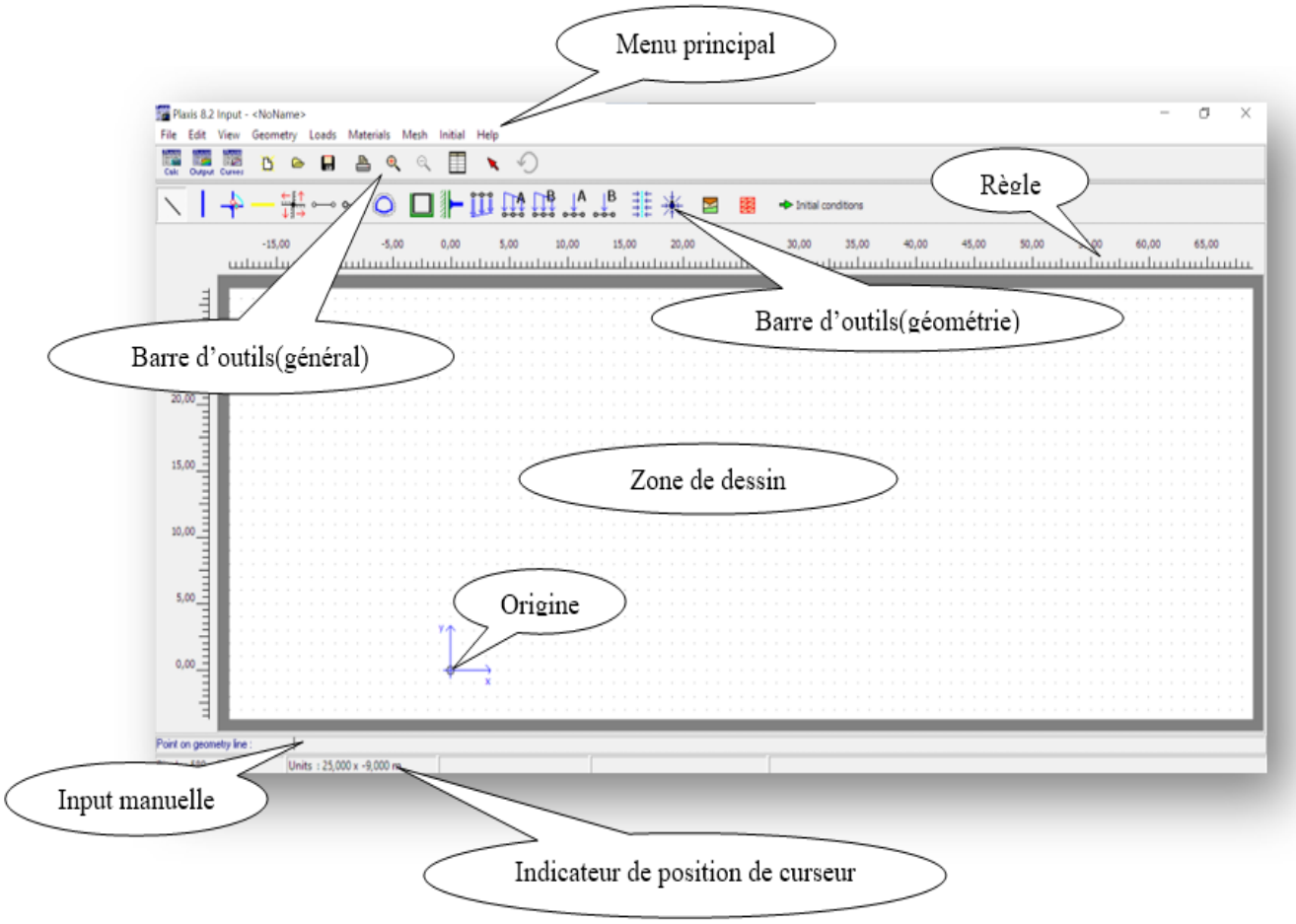


Figure III. 1: Fenetre principale du programme d'entrée des données(input)(mode de création

➢ **le programme de calcul**



cette icone represente le programme de calcul(calculations).celui-ci contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis **[24]** .

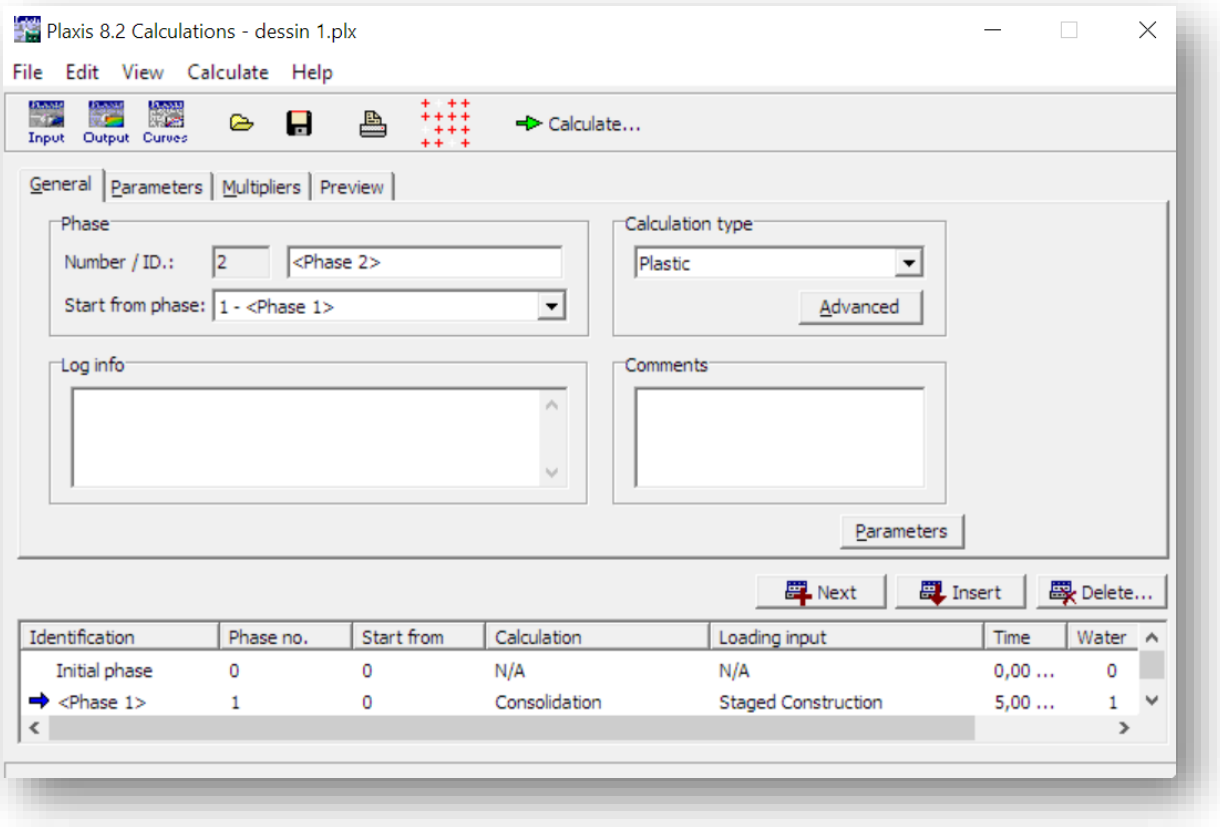


Figure III. 2: Fenêtre principale du programme de calcul

➢ **Le programme de résultats(output)**



Cette icone represente le programme de resultats(output). Celui-ci contient tous les éléments qui permettent de visualiser les resultats des calculs aux éléments finis.au lancement du programme de resultats,l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcul

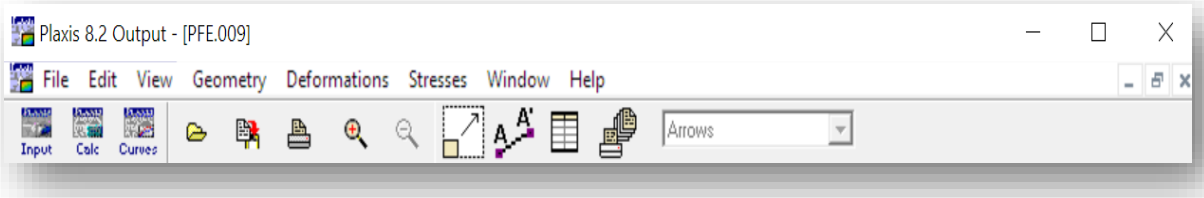


Figure III. 3: Barre d'outils de fenêtre principale du programme output

appropriés ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés. Après cette section, une premiere fenetre de resultats ets ouverte, celle-ci affiche le maillage déformé **[24]**.

- **Le programme courbes(curves)**



Cette icone represente le programme curves.ce programme contient toutes les options nécessaires pour générer des courbes charge-déplacement, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations **[24]**.

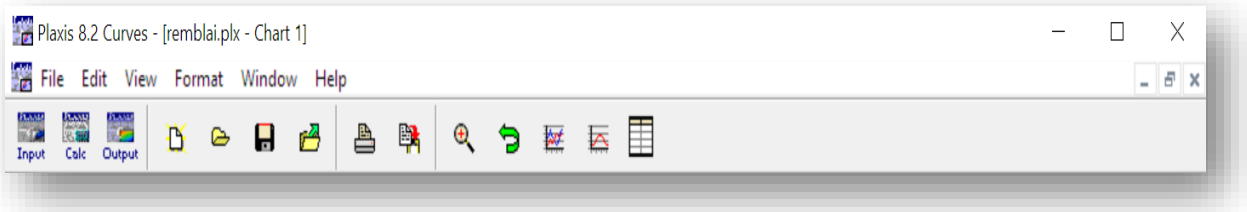


Figure III. 4: Barre d'outils de la fenêtre principale du programme curves

III.4. Modèle de la modélisation (Mohr-Coulomb)

Le comportement de Mohr-Coulomb présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs. Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan\varphi + c \qquad (III.\ 1)$$

Où σ_n et τ sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement. c et φ sont respectivement la cohésion et l'angle de frottement du matériau(figure III- 5) **[6]**.

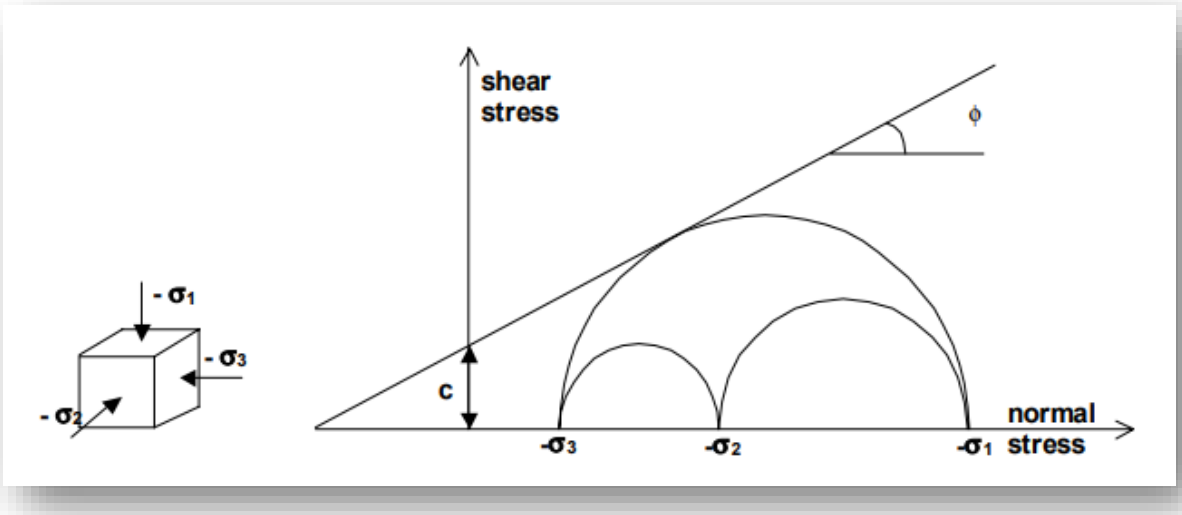


Figure III. 5: Cercles de contrainte à la rupture l'un d'entre eux touche l'enveloppe de coulomb **[23].**

Le critère de Coulomb à trois dimensions suppose que la contrainte intermédiaire n'intervient pas. La forme du critère est celle d'une pyramide irrégulière construite autour de la trisectrice (figure III- 5) sur l'hexagone irrégulier de Mohr-Coulomb **[6]** .

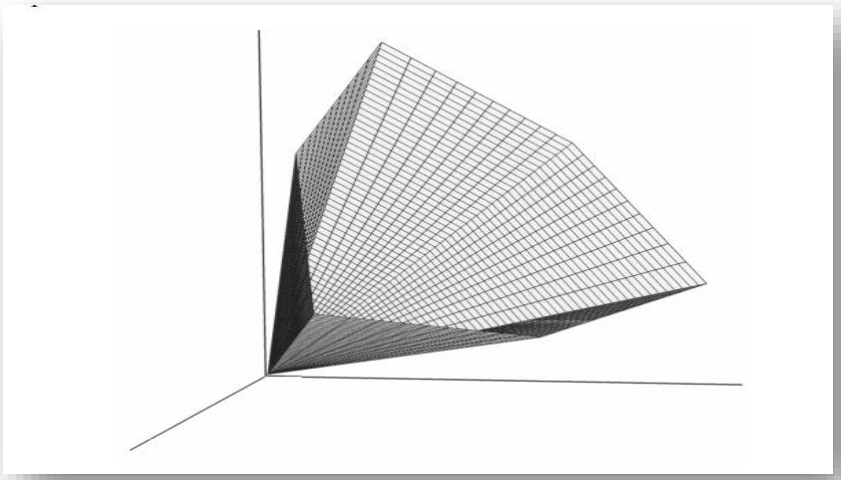


Figure III. 6: Surface de rupture dans l'espace des contraintes principales pour un sol sans cohésion **[23].**

III.5. Paramètres de la modélisation

Le modèle Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres. Les deux premiers sont E et μ (paramètres d'élasticité), les deux autres sont c et φ. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoire, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité **[6]** .

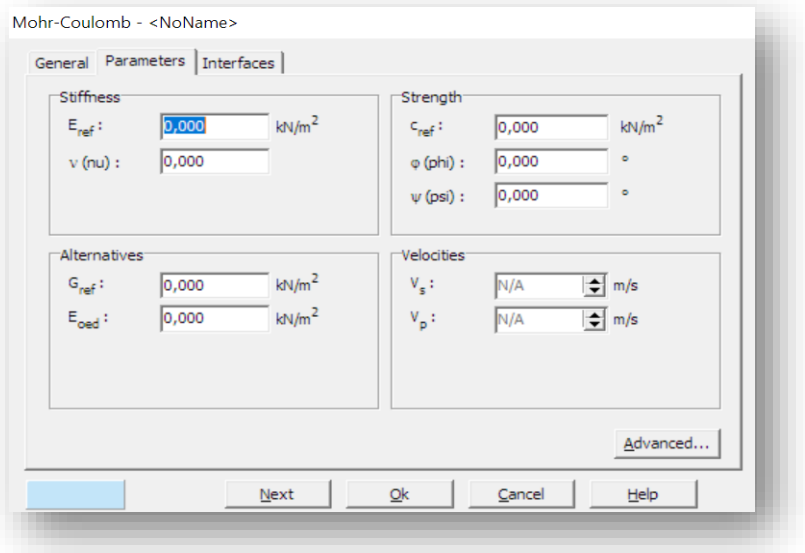


Figure III. 7: Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb

➢ **Le module d'Young (E)**

Le choix d'un module de déformation est l'un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il parait peu réaliste de considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au Gmax mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux**[6]**.

On a calculé le module d'Young (E) avec l'équation **(III. 2)** d'après la détermination de module de cisaillement à partir la courbe de contrainte de cisaillement en fonction de déformation horizontal **(III. 3) :**

$$E = 2(1 + \nu) * G \qquad \textit{(III. 2)}$$

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\varepsilon} \qquad \textit{(III. 3)}$$

Avec:

G **:**Module De cisaillement

$\Delta\tau$ **:**contrainte de cisaillement

$\Delta\varepsilon$ **:**déformation horizontal

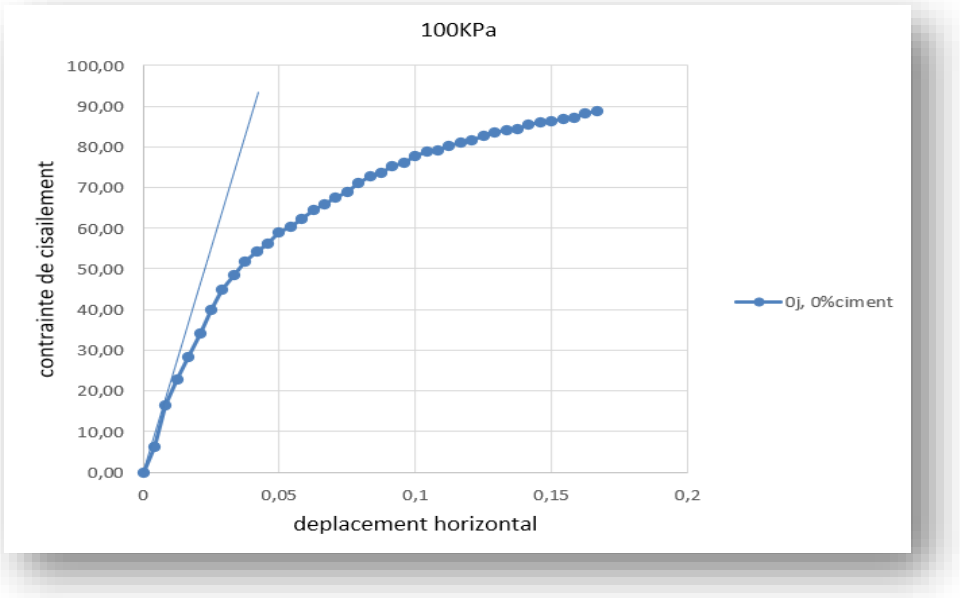


Figure III. 8: La courbe de contrainte de cisaillement en fonction de déplacement horizontal

- **Coefficient de poisson (ν)**

On conseille une valeur de 0,2 à 0,4 pour le coefficient de Poisson. Celle-ci est réaliste pour l'application du poids propre (procédure K0 ou chargement gravitaires). Pour certains problèmes, notamment en décharge, on peut utiliser des valeurs plus faibles. Pour des sols incompressibles **[17]** .comme il est difficile pour déterminer on a proposée que la valeur de (**ν**) est 0.28 .

- **Angle de frottement (φ)**

PLAXIS ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier.

On attire l'attention sur le fait que des angles de frottement supérieurs à 35° peuvent considérablement allonger les temps de calcul. Il peut être avisé de commencer des calculs avec des valeurs raisonnables d'angle de frottement, quitte à les augmenter dans la suite.

Cette valeur de 35° est compatible avec les angles de frottement φ_{cv} (à volume constant, au palier).

On peut déterminer l'angle de frottement à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb **(FigureIII- 5) [22]**.

- **Cohésion (c)**

La cohésion a la dimension d'une contrainte. PLAXIS peut manipuler des sables sans cohésion (c = 0), mais certaines options ne fonctionneront pas bien. Pour éviter les complications, il est conseillé aux utilisateurs peu expérimentés d'entrer au moins une valeur faible (prendre c> 0.2 kPa) **[24]** .

- **Angle de dilatance(ψ)**

Le dernier paramètre est l'angle de dilatance noté ψ ; c'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$$\psi = \varphi - 30° \text{ pour } \varphi > 30° \qquad (III.\ 4)$$

$$\psi = 0° \text{ pour } \varphi < 30° \qquad (III.\ 5)$$

Le cas où ψ < 0° correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique). La valeur ψ = 0° correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité.

C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faibles ou moyenne sous contraintes assez fortes **[22]** .

- **Coefficient de pression des terres au repos (K_0)**

Jacky (1944) a proposé une formulation de K_0 pour les sables et argiles normalement consolidés, en fonction de l'angle de frottement. La formule simplifiée de Jacky s'écrite :**[6]**

$$K0 = 1 - \sin\varphi \qquad (III.\ 6)$$

Dans l'étude d'année passée ils ont pas réalisé l'essai de perméabilité donc en peut pas déterminé directement , on a calculé le coefficient de perméabilité théoriquement d'après le tableau suivant(d'après BERTARAND HUBERT et col,1998):

Tableau III. 1:Coefficient de perméabilité

Nature	Ordre de grandeur k(Cm/s)	Degré de perméabilité
Graviers moyen et gros	10^{-1} à 10^{-3}	Trés élevé
Petits graviers, gros sable	10^{-3} à 10^{-5}	Assez élevé
Sable fin, sable silteux,loess	10^{-5} à 10^{-7}	Faible
Limons compacts, argile silteuse	10^{-7} à 10^{-9}	Trés faible
Argile	10^{-9} à 10^{-12}	Imperméable

On a choisi pour le sable limoneux la valeur moyenne dans l'intervalle de sable siliteux(10^{-6}cm/s) et (10^{-8} cm/s) pour l'argile (la valeur moyenne dans l'intervalle de l'argile silteux).

- **Le poids volumique saturé (γ_{sat})**

Pour déterminé le poids volumique γ_{sat} par l'equation suivante :

$$\gamma_{sat} = \gamma_d + (1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s})\gamma_w \qquad (III.\ 7)$$

Avec:

γ_{sat} :Poids volumique saturé [kN/m3]

γ_d: **Poids volumique sec**[**kN/m3**] (dans notre cas $\gamma_d = 20.68 KN/m^3$)

γ_s: Poids volumique des grains solides [kN/m3] (dans notre cas $\gamma_s = 26.5 KN/m^3$)

γ_w: Poids volumique de l'eau [kN/m3] (dans notre cas $\gamma_w = 10 KN/m^3$)

Donc:

$$\gamma_{sat} = 22.876\ KN/m^3$$

III.6. Présentation du cas étudié

Le modèle étudié dans cette étude est un remblai routier de faible hauteur ; exposé à un chargement de trafic de 10 KN/m² ; reposant sur deux couches d'argiles (argile1,argile2)ayant 6 mètres de profondeur. Le remblai est de 4m de hauteur et (20 x 2) m de largeur avec une pente de 1/3 pour assurer la stabilité pour faciliter les calculs, ou a étudie la symétrie du modèle comme indiquer la Figure(III- 9) .

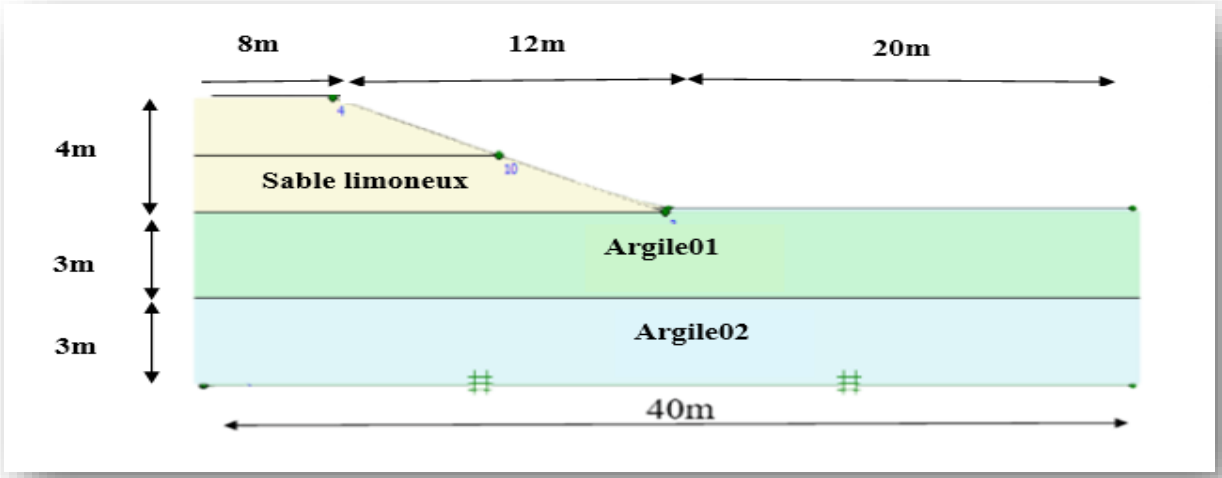


Figure III. 9:présentation de cas études

III.7. Les paramètres de la modélisation :

- **Les caractéristiques de sols supports**

On a deux couches d'argiles de 5m de hauteur et de 40m de l'argeur ces caracterestique de chaque couche sont présentés dans le tableau suivant **(Tableau III. 2)** ,ces donnees sont choisis a partir des modelles etudier dans la litérature(**[25]**).

Tableau III. 2: Les caractéristiques de sols supports

	γ_{insat}	γ_{sat}	E	K_x	K_y	ν	C	φ	ψ
Unité	KN/m^3	KN/m^3	KPa	m/day	m/day	-	KPa	°	°
Argile1	16.6	17.31	2000	8.64*10^{-6}	8.64*10^{-6}	0.28	33.02	1	0.0
Argile2	16.6	17.31	2000	8.64*10^{-6}	8.64*10^{-6}	0.28	12.01	1	0.0

- **Les caractéristiques de remblai**

Les caractéristiques de remblai est représenté dans le tableau suivant :

Tableau III. 3: Les caractéristiques de remblai

		γ_{nonsat}	γ_{sat}	E	K_x	K_y	ν	c	φ	ψ
Unité		KN/m^3	KN/m^3	KPa	m/day	m/day	-	KPa	°	°
Sable limoneux	0	20.68	22.876	4085.76	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	4.42	38.65	8.65
	7	20.68	22.876	5084.16	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	13.99	39.05	9.05
	14	20.68	22.876	5084.16	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	29.94	40.02	10.02
	28	20.68	22.876	8936.44	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	49.40	40.23	10.23
Sable limoneux+0.5% De ciment	0	20.68	22.876	8586.24	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	6.23	38.51	8.51
	7	20.68	22.876	8232.96	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	18.39	37.22	7.22
	14	20.68	22.876	8177.664	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	33.39	36.09	6.09
	28	20.68	22.876	10285.056	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	59.36	32.65	2.65
Sable limoneux+1.5% De ciment	0	20.68	22.876	13264.896	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	10.63	38.83	8.83
	7	20.68	22.876	9945.01	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	22.77	38.04	8.04
	14	20.68	22.876	9129.984	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	41.98	36.58	6.58
	28	20.68	22.876	8435.712	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	61	35.08	5.08
Sable limoneux+2.5% De ciment	0	20.68	22.876	7790.592	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	15.83	38.40	8.4
	7	20.68	22.876	9283.584	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	25.95	42.36	12.36
	14	20.68	22.876	18097.152	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	43.41	43.70	13.7
	28	20.68	22.876	19031 ,01	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	65.26	43.88	13.88
Sable limoneux+3.5% De ciment	0	20.68	22.876	20152.32	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	15.87	37.40	7.4
	7	20.68	22.876	18143.232	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	31.90	43.68	13.68
	14	20.68	22.876	29002,54	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	45.57	44.25	14.25
	28	20.68	22.876	29304,18	8.64*10^{-4}	8.64*10^{-4}	0.28	94.31	44.21	14.21

III.8. Conception de modelé

La figure ci-dessous (FigureIII.10) représente les conditions aux limites du modèle géométrique nous avons utilisés les conditions standards.

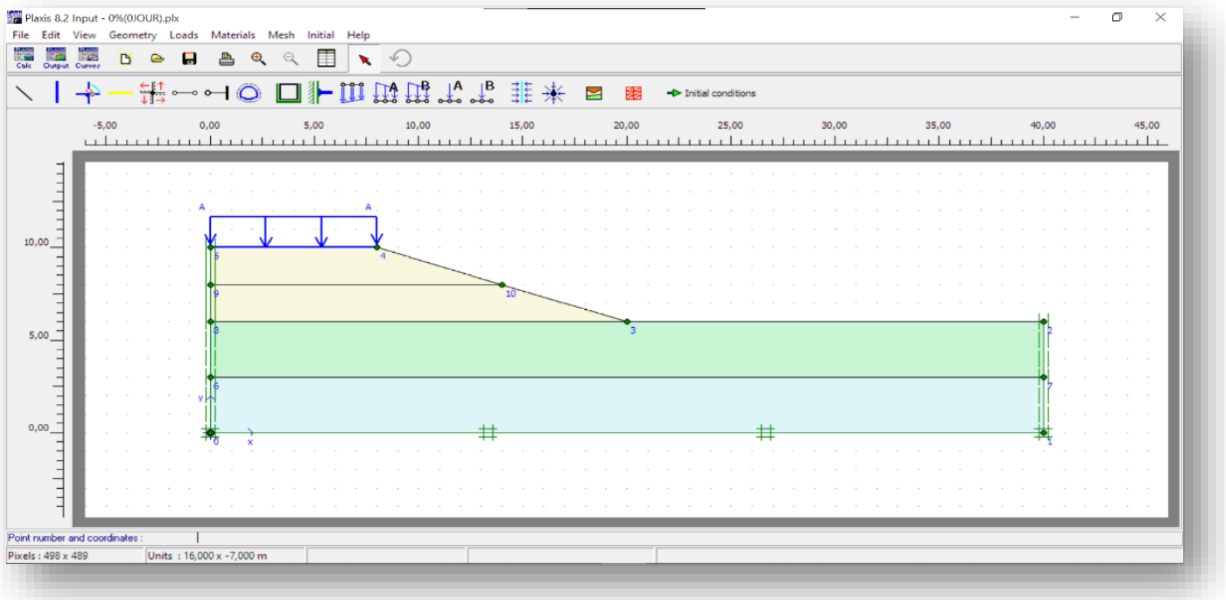


Figure III. 10: Les condition aux limites

III.9. Les phases de calcul

- **Condition Initial:** Avant de déclaré les phases il faux désactivé le remblai

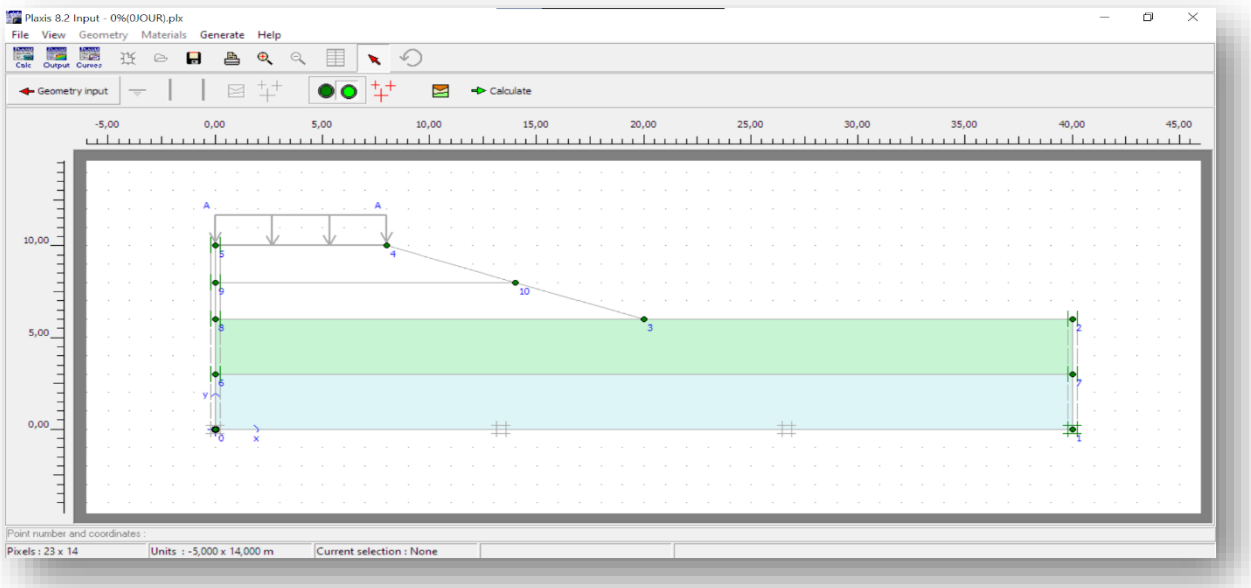


Figure III. 11: Phase de condition initiale

- **Phase 01:**Dans cette phase on à activé la première couche de remblai

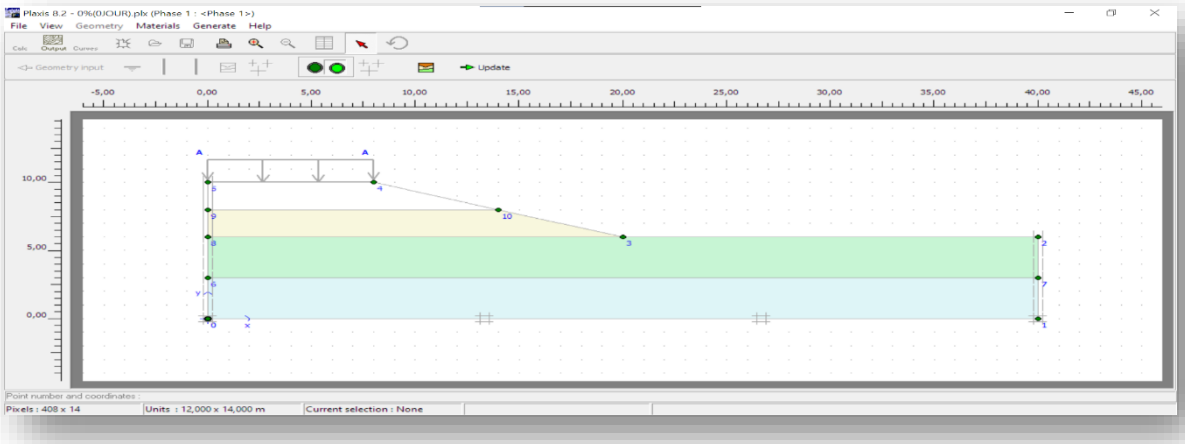


Figure III. 12: Activation de la première couche de remblai

- **Phase 02:**Dans cette phase on à activé la deuxième couche de remblai

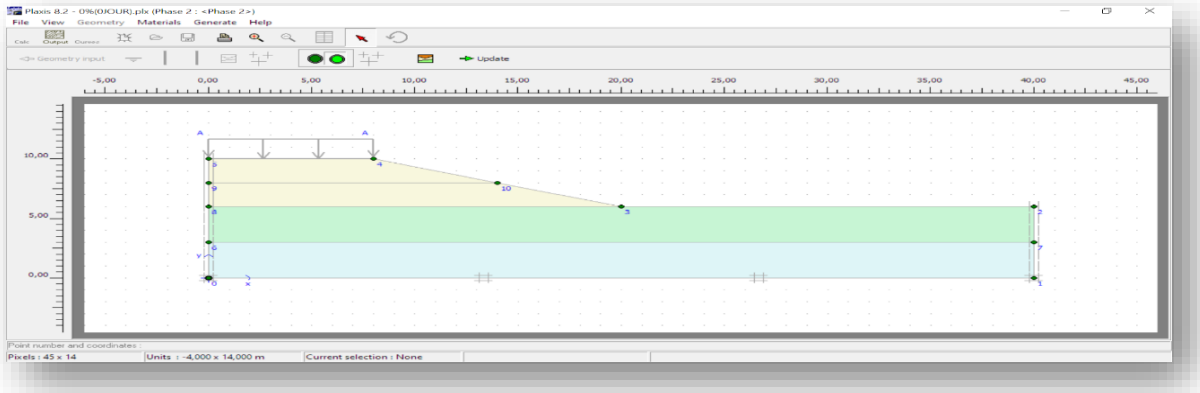


Figure III. 13: Activation de la deuxième couche de remblai

- **Phase 03:**Dans cette phase on à activé les surcharges sur remblai (10KN/m)

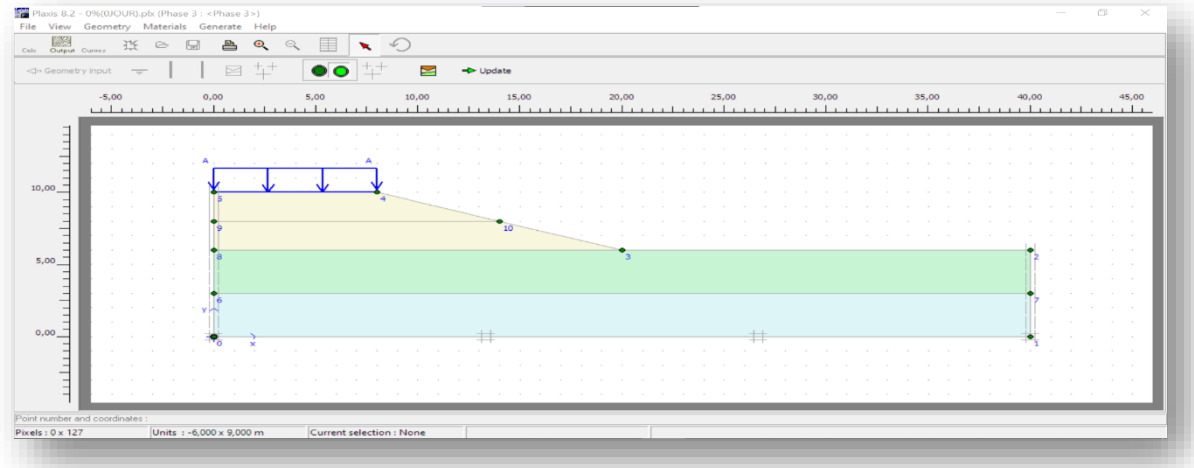


Figure III. 14: Activation des surcharges

III.10. Les résultats

Comme on à plusieurs cas de calcules varier en fonction de pourcentage de ciment ajoutée et le temps on peut classer comme suit :

- **Pour 0% de ciment :**

Les figures suivants représenté les déplacements totales de remblai (sable limoneux) sans l'ajoute de ciment :

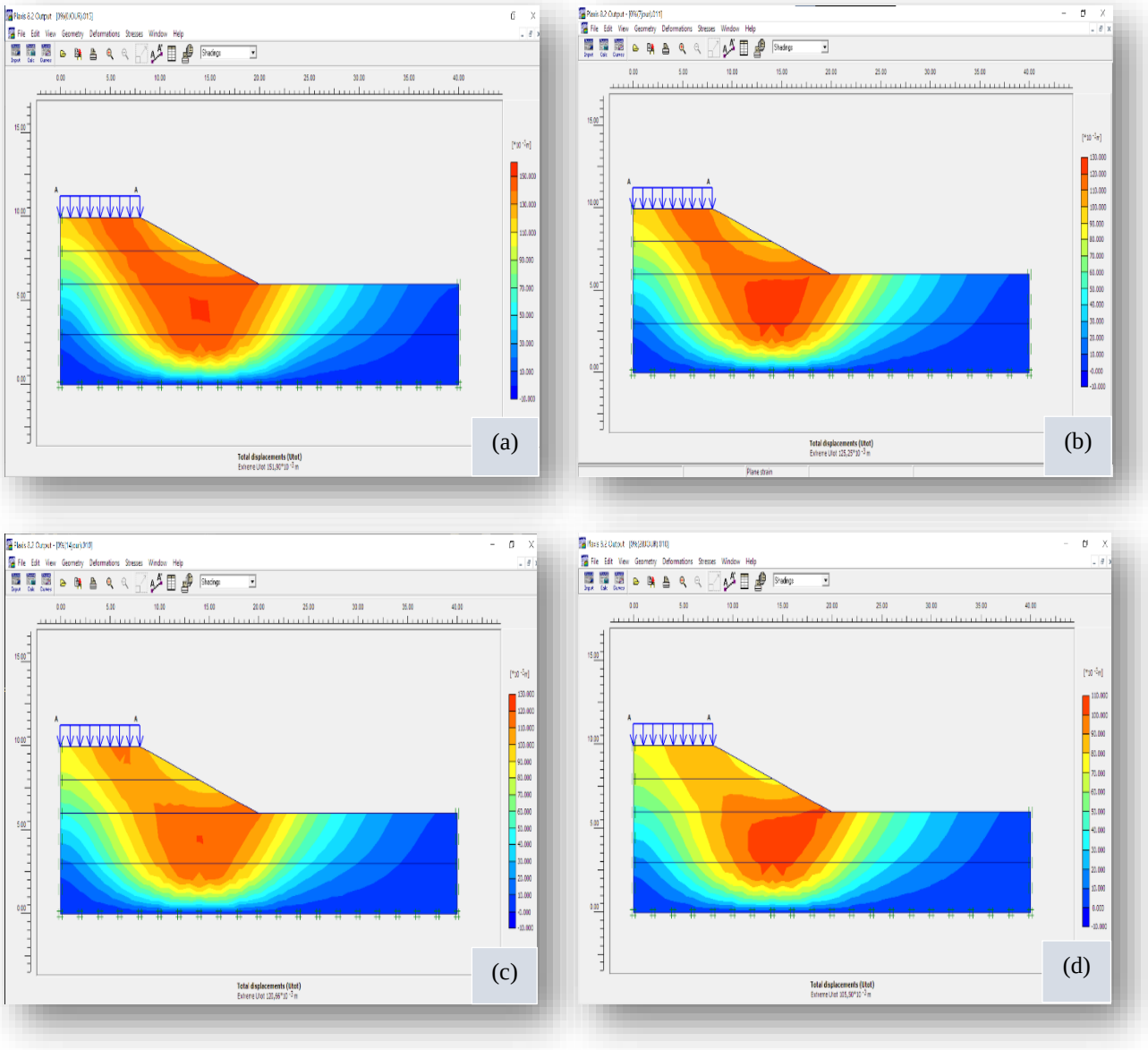


Figure III. 15: Les déplacements total de remblais sans l'ajoute de ciment

(a) 0jour, (b) 7 jour, (c) 14 jour, (d) 28 jour

➢ **Pour 0.5% de ciment :**

Les figures suivants représenté les déplacements totales de remblai (sable limoneux) avec l'ajoute de0.5% de ciment :

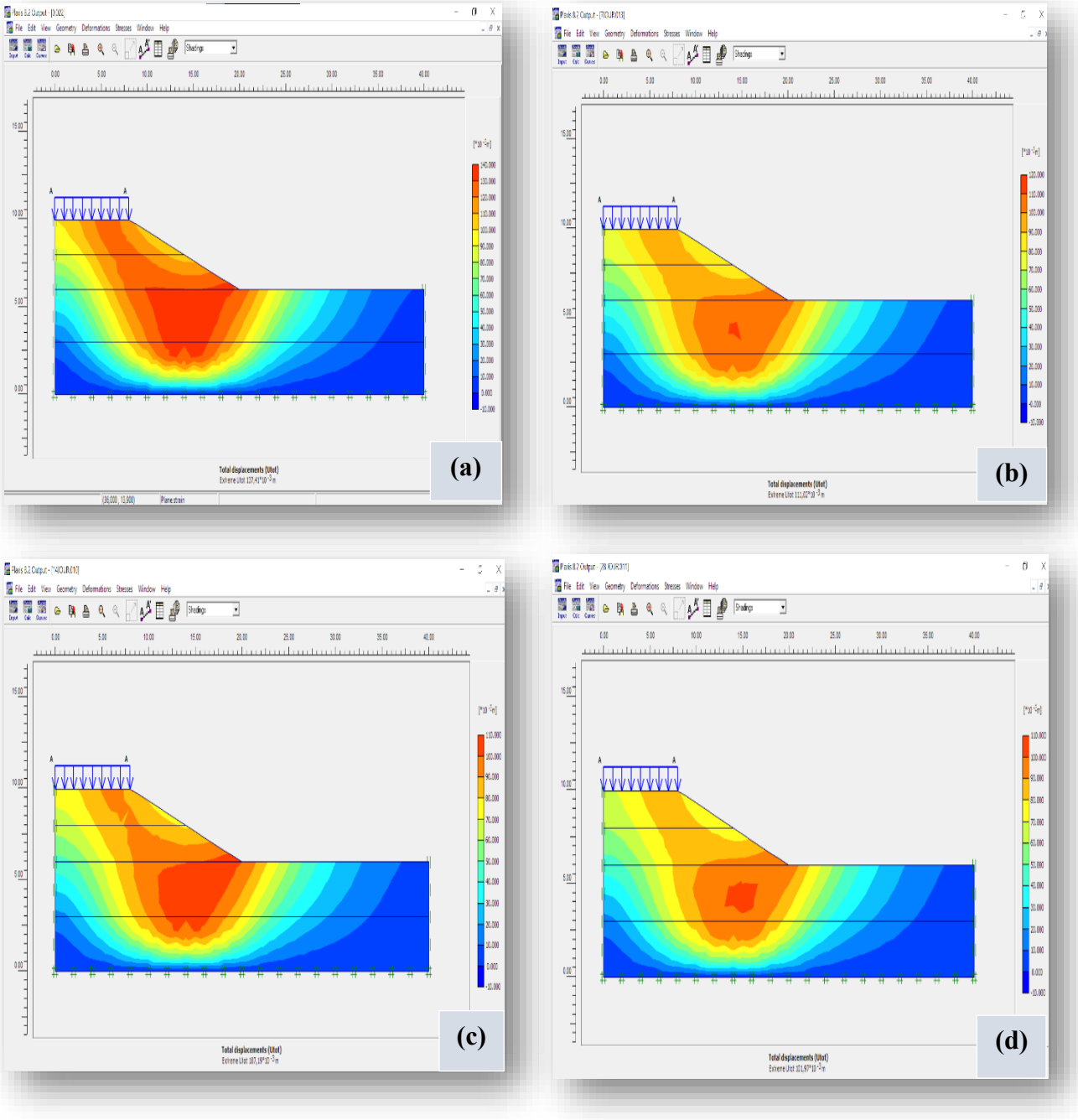


Figure III. 16: Les déplacements total de remblais avec 0.5% de ciment

(a) 0jour, (b) 7 jour, (c) 14 jour, (d) 28 jour

➢ **Pour 1.5% de ciment :**

Les figures suivants représenté les déplacements totales de remblai (sable limoneux) avec l'ajoute de1.5% de ciment :

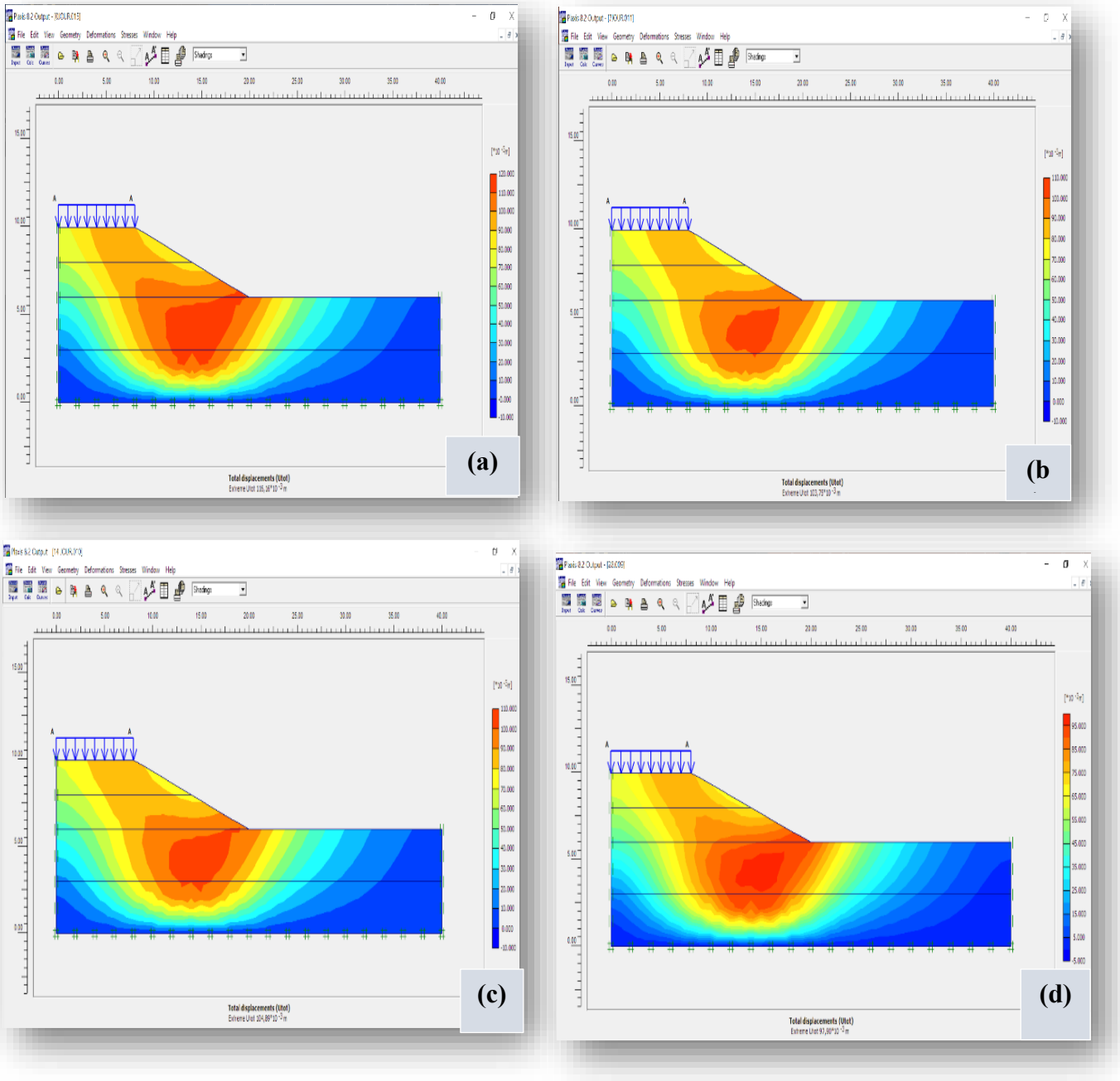


Figure III. 17: Les déplacements total de remblais avec 1.5% de ciment

(a) 0jour, (b) 7 jour, (c) 14 jour, (d) 28 jour

➢ **Pour 2.5% de ciment :**

Les figures suivants représenté les déplacements totales de remblai (sable limoneux) avec l'ajoute de2.5% de ciment :

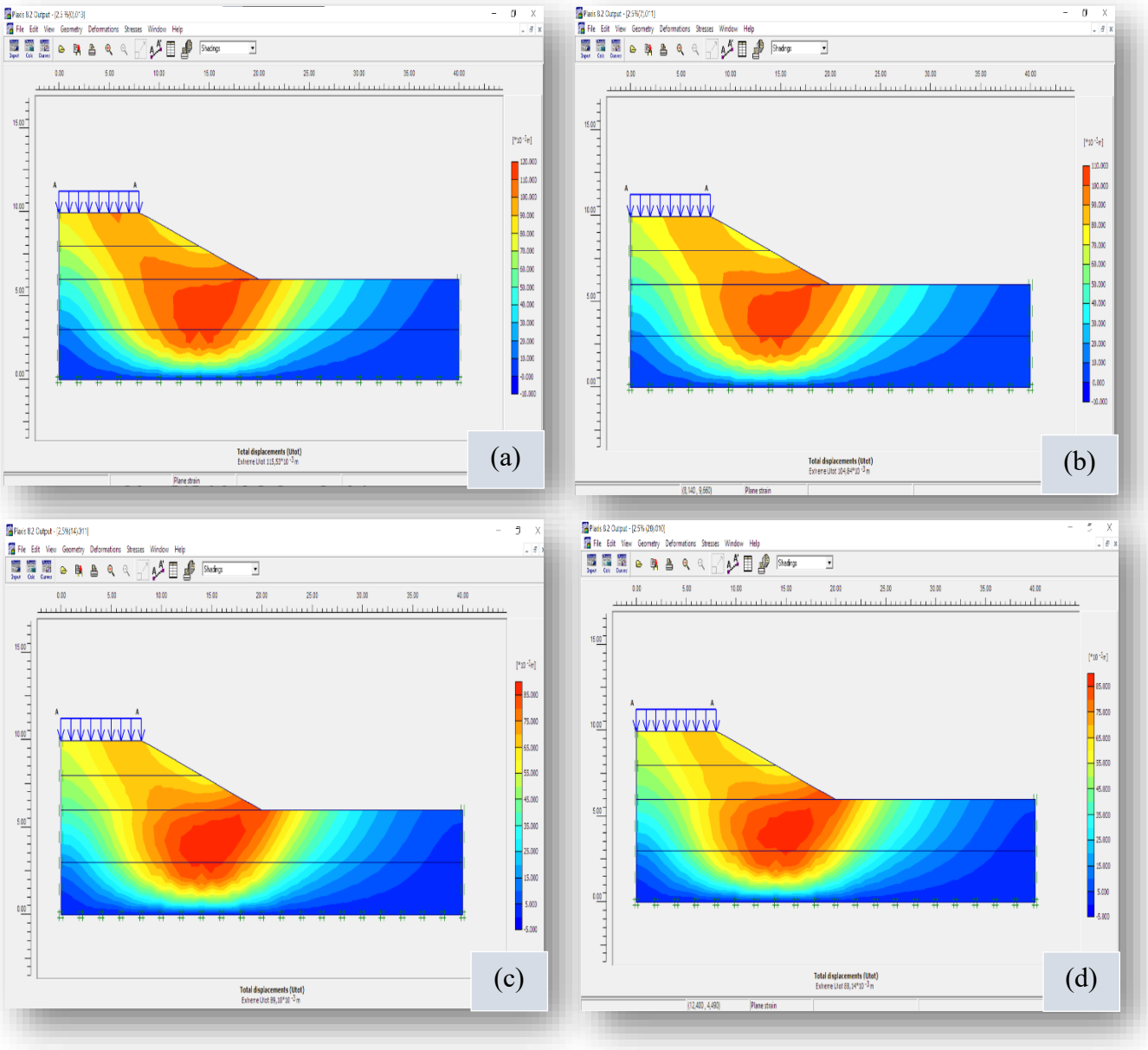


Figure III. 18: Les déplacements total de remblais avec 2.5% de ciment

(a) 0jour, (b) 7 jour, (c) 14 jour, (d) 28 jour

➢ **Pour 3.5% de ciment :**

Les figures suivants représenté les déplacements totales de remblai (sable limoneux) avec l'ajoute de3.5% de ciment :

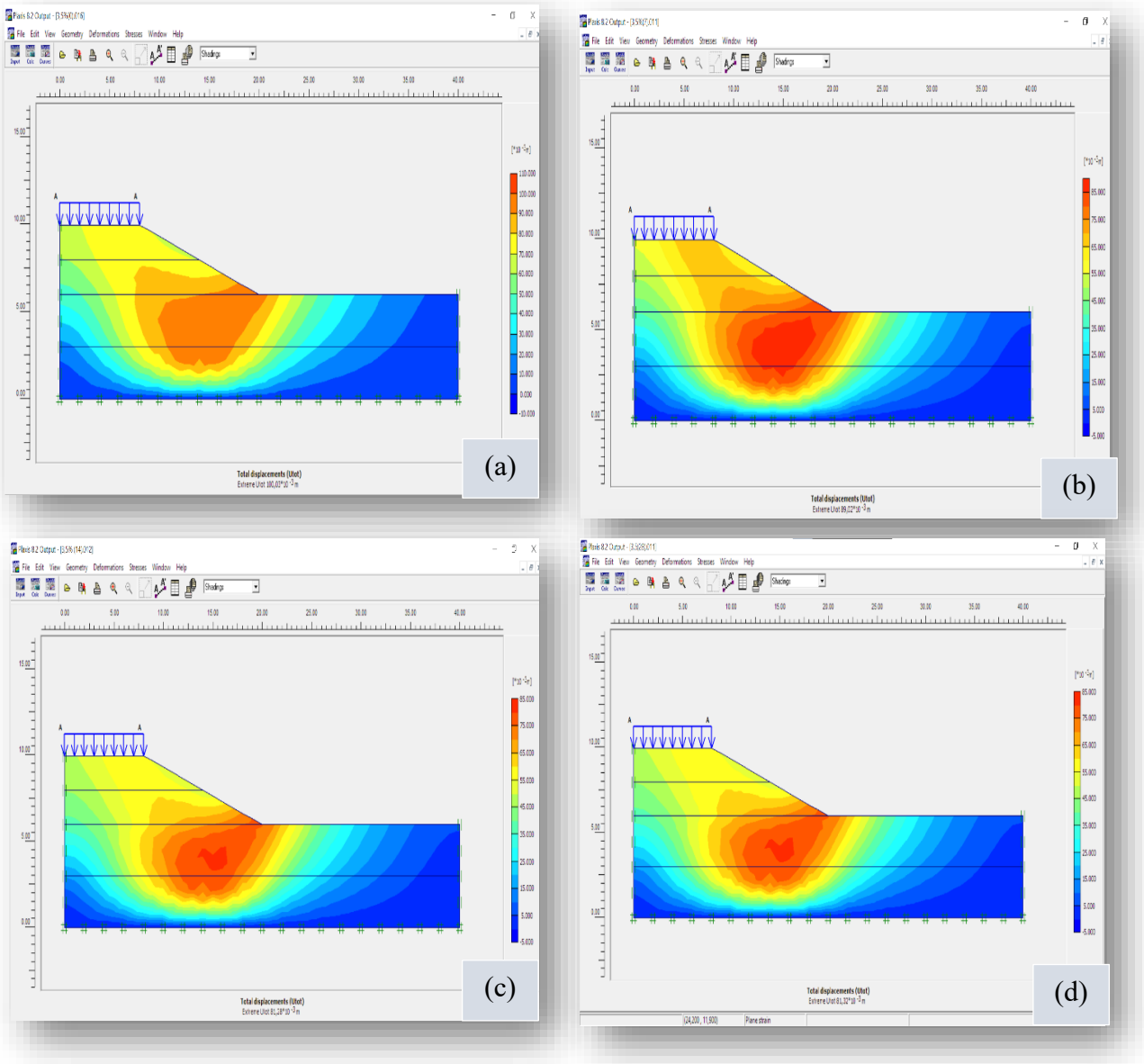


Figure III. 19: Les déplacements total de remblais avec 2.5% de ciment

(a) 0jour, (b) 7 jour, (c) 14 jour, (d) 28 jour

D'après ces figures représenté par logiciel **(plaxis8.2)**, nous obtenons les résultats suivants :

Tableau III. 4: Les déplacements totale de remblai traité par différentes pourcentages de ciment en fonction de temps

Déplacements totale (m)		Pourcentage de ciment(%)				
		0%	0.5%	1.5%	2.5%	3.5%
Temps(jours)	0	$151.90*10^{-3}$	$137.41*10^{-3}$	$116.16*10^{-3}$	$115.53*10^{-3}$	$100.03*10^{-3}$
	7	$125.25*10^{-3}$	$111.02*10^{-3}$	$103.75*10^{-3}$	$104.84*10^{-3}$	$89.02*10^{-3}$
	14	$120.66*10^{-3}$	$107.19*10^{-3}$	$104.89*10^{-3}$	$89.10*10^{-3}$	$81.28*10^{-3}$
	28	$105.20*10^{-3}$	$101.97*10^{-3}$	$97.9*10^{-3}$	$88.14*10^{-3}$	$81.31*10^{-3}$

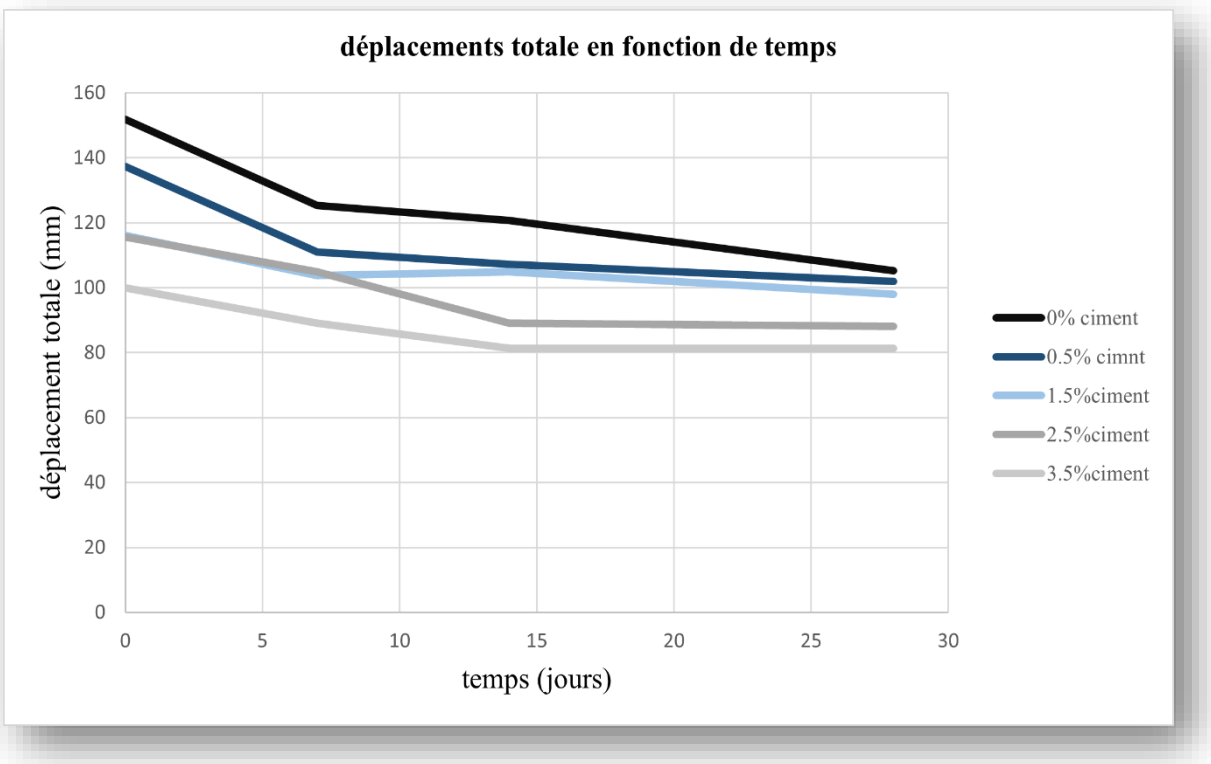


Figure III. 20: Les graphes de déplacements totale de remblai traité par différentes pourcentages de ciment en fonction de temps

À travers le tableau et les graphes quant le temps de durcissement est long on a :

Le graphe de (0 % ciment) met en évidence une diminution du déplacement, passant de 151,90 * 10^{-3} m à 105.20*10^{-3}m, avec une variation de 4.67 cm.

Le graphe de (0.5% ciment) met en évidence une diminution du déplacement, passant de 137.41*10^{-3} m à 101.97*10^{-3}m avec une variation de 3.5 cm

Le graphe de (1.5% ciment) met en évidence une diminution du déplacement, passant de 116.16*10^{-3}m à 97.9*10^{-3}m avec une variation de 1.8 cm

Le graphe de (2.5% ciment) met en évidence une diminution du déplacement, passant de 115.53*10^{-3}m à 88.14*10^{-3} m avec une variation de 2.7 cm

Le graphe de (3.5% ciment) met en évidence une diminution du déplacement, passant de 100.03*10^{-3}m à 81.31*10^{-3} m avec une variation de 1.8 cm

Donc on peut dire que le déplacement de remblai a été diminue lors que le pourcentage de ciment augmente jusqu'à 3,5% et le temps de durcissement est long (28 jours).

III.11. Conclusion

Les résultats précédents dus à l'étude numérique du remblai construit par l'utilisation de sable limoneux avec différents pourcentages de ciment (0, 0.5, 1.5, 2.5, 3.5%). Le tassement diminué et la résistance au cisaillement augmente dans les plusieurs cas de stabilisation par rapport au cas de sable limoneux seul celui qui montre que la simulation numérique en utilisant le code Plaxis 8.2 donne des résultats concordant de manière satisfaisant .

Conclusion générale

Dans cette étude, notre objectif principal est la modélisation d'un remblai routière sable limoneux stabilisé par l'ajout du ciment. Au préalable, plusieurs essais ont été effectués l'année dernière dans le cadre d'une étude (promo2021-2022) sur ce sable.

Pour traiter ce sable limoneux, différents pourcentages de ciment ont été ajoutés, puis des essais de cisaillement direct ont été réalisés en mode consolidé non-drainé afin de déterminer l'angle de frottement et la cohésion.

Les résultats obtenus ont été utilisés pour effectuer une modélisation numérique à l'aide du logiciel Plaxis 8.2, permettant ainsi d'analyser les déplacements du sable et leur évolution en fonction de différent pourcentage de ciment (0,0.5%, 1.5%, 2.5%, 3.5%) et le temps de durcisement (0,7,14,28 jours).

On a trouvé que le pourcentage de ciment a un effet sur le déplacement quand le pourcentage de ciment augmente le déplacement diminuer et la même remarque avec le temps de durcisement plus le temps de durcissement est élevé le déplacement du remblai est diminuer et le remblai rendre stable.

Référence

Bibliographique

Références

[1] S. Amri, « cours Amélioration des sols : Classification des sols ». université yahia fares medea.

[2] I. Azzaz, S. Chouikha, « Étude numérique de la stabilité d'un remblai sur sol mol traité par des colonnes ballastées entouré par de géosynthétique ». memoire de master, Université Ziane Achour - Djelfa, Faculté des sciences et de la Technologie, Département de Génie Civil, (2017).

[3] L. Kahina, « amelioration de la resistance, mecanique et a l'action de l'eau, d'un sable par incorporation des stabilisants », memoire de master, universite mouloud mammeri de tizi-ouzou faculte du genie de la construction departement de genie civil , (2016).

[4] Y. Beldjazia, A, Djeroud, « caracterisation des sols allege avec les residus de bois», memoire de master . L'universite 08 mai 1945 de guelma faculte des sciences et de la technologie, departement de genie civil et hydraulique, (2017).

[5] A. messaad , « cours mecanique des sols ». université yahia fares medea.

[6] L. GUEFAIFIA , . BENRDJEM, « TRAITEMENT ET RENFORCEMENT D'UN SOL FIN PAR DIFFERENTES TECHNIQUES D'AMELIORATION : ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE », Mémoire de Master, l'Université 8 Mai 1945 de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie, septembre (2020).

[7] R. NOUR, A. SADKAOUI, « Effet de la combinaison des ajouts (ciment et la chaux) et de la fumée de silice sur les propriétés géotechniques d'un sol argileux », memoire de master, Université de Mohamed Seddik Ben Yahia -Jijel, Faculté des Sciences et de la technologie Département génie civil et d'hydraulique, (2020).

[8] M. Bouassida, « Amélioration des sols en place. Introduction à la géotechnique », vol. Office de Publication Universitaire, p. 305-325, janv. 2011.

[9] H. Douakha, H. Mohamedatni, « Amélioration des sols ». Université 8 M ai 1945 de Guelma memoire de master, Faculté des Sciences et de la Technologie, (2018).

[10] S. SI HADJ M, « Comportement d'un sol renforcé par des inclusions rigides en zone sismique (FLAC2D) », memoire de master, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou , (2013).

[11] S. amri, « cours Amélioration des sols: Méthodes d'amélioration sols grenus », université yahya fares medea.

[12] F. kaoua, Z. Derriche, et N. Laradi, « mecanique des sol:contribution a l'etude de la stabilisation des sols gonflants par l'ajout de sable », Université des sciences et technologie houari boumediene.

[13] A. Bernal, C. Lovell, et R. Salgado, « A Review on the Soil Stabilization Using Low-Cost Methods », Purdue University, West Lafayette, IN, FHWA/IN/JHRP-96/12, 2087, 1996. doi: 10.5703/1288284313259.

[14] G. Takhelmayum, « Laboratory Study on Soil Stabilization Using Fly ash Mixtures », vol. 2, nº 1, 2013.

[15] R. Boudjadja , A. Benkedidah, « Etude de stabilisation chimique des sols », memoire de master, Université De Jijel, (2018).

[16] T. HAMMANI,K , Ch. BOUYAHIA, « Influence des effets de température et de conservation sur la résistance mécanique du béton », Mémoire de Master, Université Ahmed Draia Adrar, (2018).

[17] I. BOURBIA, H. BOUNAHAT, « Etude de stabilisation et renforcement des sols », memoire de master, UNIVERSITE de JIJEL, Département de Génie Civil et Hydraulique, (2017).

[18] M. Messaoudi, « Effet du traitement des sols limoneux par le ciment sur les caractéristiques de compactage », Mémoire de master, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL BOUAGHI, (2018).

[19] F. PORTET, N. OLIVIER, « geotechnique routiere: Conditions d'utilisation des matériaux en remblai et en couche de forme », Lab. CETE MÉDITERRANÉE CAROLE PORTILLO MATHIEU VERMEULEN ECOLE MINES DOUAI, (2011).

[20] A. BOUACHA, T. ELAKREDAR, « Analyse numérique de la stabilité d'un remblai sur sol compressible renforcé par géotextile (Application au cas du remblai d' Djen Djen-wilaya de Jijel) », Mémoire de Master, Université Yahia Farès DeMédéa, Faculté de Technologie,(2021).

[21] N. ROUIBAH, « VALORISATION DES RECYCLATS DANS LES REMBLAIS DES OUVRAGES GEOTECHNIQUE », Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie, (2021).

[22] I. chahboub, N. Mebrouki, « ROUTIER SITUE DANS UNE ZONE INONDABLE KASAR EL BOUKHARI-BOUGHZOUL », memoire de master, UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, Faculté de Technologie, (2022).

[23] N. Halbigue, F. Baghdadi, « Evaluation expérimental sur le comportement Mécanique du Mélange sable Limoneux-Ciment », memoire de master, UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, Faculté de Technologie, (2022).

[24] R. B. J. Brinkgreve, R. Al-Khoury, PLAXIS: version 8: manuel de référence. Delft: PLAXIS, (2003).

[25] Y. M. Bouteben, B. Zeineddine, « Mechanical behaviour of sandy soils embnkments treated with cement and reinforced with discrete elements (fibres) », Frat. Ed Integrità Strutt., vol. 16, nº 60, p. 174-186, (mars 2022), doi: 10.3221/IGF-ESIS.60.13.