REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : géotechnique

Evaluation expérimental sur le comportement Mécanique du Mélange sable Limoneux-Ciment

---

Présenté par

Halbigue Nouha

Baghdadi Fatima

Proposé et Dirigé par

Dr. OTSMANE Lalahoum

Mr. BENYAHIA Ahmed Bilal

Promotion Juin 2022

Remerciement

Il est primordial de remercier «ALLAH EL KARIM» de nous avoir donné la force.

Ce travail n'aurait pas été riche et réussi sans l'aide et l'encadrement de Madame OTSMANE.L nous la remercions pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, sa patience, sa précision et sa disponibilité lors de la préparation de cette recherche.

Nous remercions également Monsieur BENYAHIA Ahmed Bilal pour son aide pratique, son soutien moral et ses encouragements pour mener à bien ce travail de la meilleure façon.

Nous tenons également à remercier tous nos professeurs pour la grande générosité et la patience dont ils ont fait preuve à notre égard, malgré les difficultés académiques et professionnelles.

Merci à tous.

Dédicace

Je tiens à dédier cette mémoire à mes chers parents ; Ma mère et mon père pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements à mon égard.

A mes frères, mes amis, mes collègues, sans oublier tous les enseignants, qu'ils soient à l'école primaire, au moyen et au lycée, ainsi que dans l'enseignement supérieur.

BAGHDADI Fatima

Dédicace

Je remercie tous les membres de ma famille, en particulier mon père et ma mère pour leur amour, leur confiance, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel qui m'ont permis de réaliser mes études auxquelles je me destinais, notamment cette mémoire.

HALBIGUE Nouha

ملخص

معالجه التربة الضعيفة بتقنيات التثبيت أصبح أمر لابد منه ومتداول بكثرة في مجال الهندسة المدنية وبالأخص مشاريع الطرق، من بينها معالجة التربة الرملية والتي تعتبر تربة ذات تدرج سيئ وذات نفاذية عالية ، حيث يتم استخدامها كطبقة سفلية في طبقات الأساس وكذلك للطرق السريعة. لهذا أردنا القيام بدراسة لتقييم الخصائص الميكانيكية لرمل غريني معاد تشكيله طبقا لدراسات سابقة، ومعالجته بمادة الاسمنت البورتلاندي، الذي يساهم بالتصاق الجسيمات الرملية فيما بينها لضمان أداء ميكانيكي جيد للخليط. من خلال التجارب التي قمنا بها على عدة عينات من الرمل غريني معاد تشكيله الممزوج بنسب مختلفة من الإسمنت البورتلاندي(0، 0.5 ، 1.5، 2.5 و 3.5%) والمتروكة للتصلب لمدة (0 ، 7، 14 و 28 يوم)، توصلنا الى نتائج متمثلة في تحسن الخصائص الميكانيكية للعينات كلما أضفنا نسبة الاسمنت ومدة التصلب.

الكلمات المفتاحية :

القص المباشر ، زاوية الاحتكاك ، التماسك ، قوة القص ، الرمل الغريني ، الاسمنت.

RESUME

Le traitement des sols faibles par des techniques de stabilisation est devenu inévitable et largement utilisé dans le domaine du génie civil, en particulier dans les projets routiers, parmi lesquels le traitement des sols sableux, qui sont des sols mal classés et très perméables, car ils sont utilisés comme substrat dans les couches de fondation ainsi que pour les autoroutes.

Par conséquent, l'objectif de cette étude était d'évaluer les propriétés mécaniques d'un sable limoneux reconstitué selon des études antérieures, et traité avec du ciment Portland, qui contribue à l'adhésion des particules de sable entre elles pour assurer une bonne résistance mécanique du mélange.

A travers les essais que nous avons menées sur plusieurs échantillons de sable limoneux reconstitué et mélangé avec différentes proportions de ciment Portland (0 , 0.5 , 1.5, 2.5 et 3.5 %) et laissé à durcir pendant (0, 7, 14 et 28 jrs), nous avons atteint des résultats présentés une amélioration des propriétés mécaniques importante pour les échantillons testés à chaque fois que nous ajoutons le pourcentage de ciment et le temps de durcissement.

Les mots clés :

Cisaillement direct, angle de frottement, cohésion, résistance au cisaillement, sable limoneux, ciment Portland.

ABSTRACT

The treatment of weak soils by stabilization techniques has become inevitable and widely used in the field of civil engineering, especially in road projects, among which the treatment of sandy soils, which are poorly classified and very permeable soils, as they are used as a substrate in sub-base layers as well as for highways.

Therefore, the objective of this study was to evaluate the mechanical properties of a silty sand reconstituted according to previous studies, and treated with Portland cement, which contributes to the adhesion of the sand particles between them to ensure a good mechanical strength of the mixture.

Through the experiments we conducted on several samples of reconstituted silty sand and mixed with different proportions of Portland cement (0, 0.5, 1.5, 2.5 and 3.5 %) and left to cure for (0, 7, 14 and 28 days), we reached results presenting a significant improvement in mechanical properties for the tested samples each time we add the percentage of cement and curing time.

Keywords:

Direct shear, friction angle, cohesion, shears strength, silty sand, Portland cement.

Sommaire

Remercîments I

Dédicaces II

Résume III

Liste des figures IV

Liste des tableaux V

Introduction Général VI

***Chapitre I :* Généralité sur le sol**

I.1 Introduction…… 03

I.2 Définition…… 03

I.3 Classification de sol……. 05

I.3.1 Classification par la taille des grains solide d'un sol…… 05

I.3.2 Classification par le comportement de sol…… 05

I.3.3 Cas particulier des argiles ……. 05

I.4 Propriétés et caractéristiques de sol……. 06

I.4.1 Caractéristiques et propriétés physiques …… 08

I.4.2 Caractéristique mécanique de sol…… 08

I.4.3 Propriétés fondamentales…… 08

I.5 Le sable…… 09

I.5.1 Définition…… 09

I.5.2 Caractéristique physicochimique…… 09

I.5.3 Les différents types de sable…….. 10

I.6 Le limon…… 11

I.6.1 Définition…… 11

I.6.2 Composante du limon……. 11

I.6.3 Source……. 11

I.7 Le ciment……. 11

I.7.1 Définition…… 11

I.7.2 Fabrication du ciment…… 11

I.7.3 Propriétés physico-mécaniques du ciment…… 12

I.7.4 Les différents types de ciments……. 13

I.7.5 Domaine d'utilisation des différents ciments……. 13

I.8 Conclusion…… 14

Chapitre II : **Renforcement de sol** ***17***

II.1 Introduction…… 17

II.2 Techniques de renforcement des sols…… 17

II.2.1 Méthode de renforcement mécanique..... 17

II.2.1.1 Compactage dynamique …… 17

II.2.1.2 Vibro-compactage …….. 18

II.2.2 Méthode de renforcement physique …..…… 18

II.2.2.1 Pré chargement ou Pré compression…… 18

II.2.2. 2 technique de drainage…… 19

II.2.3 Méthodes de renforcement Thermiques …… 20

II.2.3.1 Déshydratation…… 20

II.2.3.2 Congélation……. 20

II.2.4 Méthode de renforcement chimique…… 21

II.2.4.1 Utilisation la chaux…….. 21

II.2.4.2 Utilisation des liants hydraulique rouliers ……. 21

II.2.4.3 Utilisation du ciment…… 22

II.3 Les avantages et Les inconvénients de traitements chimiques…… 31

II.3.1 Les avantage…… 31

II.3.1.1 Avantages techniques……... 31

II.3.1.2 Avantages économiques……. 31

II.3.1.3 Avantages écologiques et environnementaux……... 31

II.3.2 Les inconvénients…… 32

II.4 conclusion ……. 32

Chapitre III : **Matériaux et dispositifs utilisés**

III.1 Introduction …… 34

III.2 Matériaux utilisés ……. 34

III.2.1 Sable limoneux …….. 34

III.2.2 Ciment …… 35

III.3 Les essais au laboratoire …… 36

III.3.1 Analyse granulométrique …… 37

III.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1……. 37

III.3.1.1.1 principe de l'essai…… 37

III.3.1.1.2 Appareillage ……..……. 37

III.3.1.1.3 Mode opératoire…….. 38

III.3.1.2 Analyse granulométrique par sédimentaire …… 38

III.3.1.2.1 Principe de l'essai……..... 38

III.3.1.2.2 Appareillage……...……. 38

III.3.1.2.3 Mode opératoire …….. 38

III.3.2 Les limites d'Atterberg (NF P 94-051) ……. 40

III.3.2.1 Principe de l'essai……. 40

III.3.2.2 Appareillage…… 40

III.3.2.3 Mode opératoire ……. 40

III.3.3 Essai Proctor Normal (NF P 97-093)…… 43

III.3.3.1 Principe de l'essai……. 45

III.3.3.2 Appareillage 45

III.3.3.3 Mode opératoire ……. 45

III.3.4 La masse volumique des particules solides des sols (Méthode du pycnomètre eau) : (NF P 94-054)…….. 45

III.3.4.1 Principe de l'essai ……... 45

III.3.4.2 Appareillage……..... 45

III.3.4.3 Mode opératoire…….. 45

III.3.5 Les masses volumiques minimale et maximale des sols (NF P 94-059)… 46

III.3.5.1 Principe de l'essai……..... **46**

III.3.5.2 Appareillage ……... 46

III.3.5.3 Mode opération……... 46

III.3.6 Essai cisaillement direct …… 47

III.3.6.1 Principe de l'essai……. 47

III.3.6.2 Appareillage……. 47

III.3.6.3 Mode opératoire…… 48
III.4 Conclusion …… 53

Chapitre IV : Résultat

IV.1 Introduction …… 54
IV.2 Effet de la teneur en ciment sur le comportement mécanique d'un sable limoneux a 0jour de durcissement 54
IV.2.1 Effet de la teneure en ciment sur le contraint de cisaillement ……..…..... 55
IV.2.2 Effet de la teneure en ciment sur l'ongle de frottement et la cohésion … 58/
IV.3 Effet de la teneur en ciment sur le comportement mécanique d'un sable limoneux a 7jours de durcissement…… 59
IV.3.1 Effet de la teneure en ciment sur le contraint de cisaillement ……..... 59
IV.3.2 Effet de la teneure en ciment sur l'ongle de frottement et la cohési 61
IV.4 Effet de la teneur en ciment sur le comportement mécanique d'un sable limoneux à **14** jours de durcissement…… 63
IV.4.1 Effet de la teneure en ciment sur le contraint de cisaillement …… 63
IV.4.2 Effet de la teneure en ciment sur l'ongle de frottement et la cohésion 65
IV.5 Effet de la teneur en ciment sur le comportement mécanique d'un sable limoneux à **28** jours de durcissement…… 66
IV.5.1 Effet de la teneure en ciment sur le contraint de cisaillement …… 67
IV.5.2 Effet de la teneure en ciment sur l'ongle de frottement et la cohésion 68
IV.6 Effet de tempe du durcissement mécanique d'un sable limoneux …… 70
IV.6.1 Effet du temps de durcissement sur la contrainte de cisaillement 70
IV.6.2 Effet du temps de durcissement sur l'angle de frottement et la cohési 83
IV.7 conclusion général …….. 87
LES ANEXS…… 91

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur le sol

Figure (1.1) : les classes de dimensions en granulométrie ……..…04

Figure (1.2) : présentation dune particule de sol ……...….06

(a) : particules de sol très fin, (b) : particules de sol grenu humide

Figure (1.3) : schéma de caractéristique de sol……..…..07

Figure (1.4) : composition de sables (a) quartz (b) feldspaths 09

Chapitre II : Renforcement de sol

Figure (2.1) : compactage dynamique du dol ……..17

Figure (2.2) : vibro-compactage du sol ……..….18

Figure (2.3) :pré chargement ou pré compression ……...……19

Figure (2.4) :drainage……...…….19

Figure (2.5) :technique de congélation…….20

Chapitre III : Matériaux et dispositifs utilisés

Figure (3.1) : matériaux utilisés (a) sable concassée (b) limon et (c) sable de rivière…….....35

Figure (3.2) : caractéristique de ciment CEMI 42.5 NSR3 LH (SPA BISKRA CIMENT) …35

Figure (3.3) : analyse granulométrique par tamisage …….36

Figure (3.4) : l'exécution de l'essai de l'analyse granulométrique par sédimentation…….....38

Figure (3.5) : courbe granulométrique des matériaux utilisés ……39

Figure (3.6) : appareil Gasagrande et la réalisation de rainure…….…….....41

Figure (3.7) : courbe de temination de limite de liquidité de l'échantillon……..…41

Figure (3.8) : évaluation de diamètre du rouleau de sol ……...42

Figure (3.9) : classification des sols fins selon le système USCS/LCPC…….43

Figure (3.10) : matériel d'essai Proctor……...……44

Figure (3.11) : poids volumique sec en fonction de la teneure en eau du sable ……..……45

Figure (3.12) : la boite de la cisaillement utilisé……...……48

Figure (3.13) : préparation des mélange (sable limoneux / ciment) a l'état sec ..…….50

Figure (3.14) : préparation des mélanges avec une teneur en eau de 14% ……...……50

Figure (3.15) : préparation des échantillons et laisser sécher …….50

Figure (3.16) : droit coulomb de l'essai de cisaillement direct (courbe intrinsèque)……...…52

Chapitre IV : Résultat

Figure (4.1) : courbe de contrainte au cisaillement /déplacement horizontal à 0 jour de durcissement ……..……56

Figure (4.2) : Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment….……57

Figure (4.3) : PHI et c (0 jour)……..... 58

Figure (4.4) : courbe de contrainte au cisaillement /déplacement horizontal à 7 jours de durcissement……..60

Figure (4.5) : Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment……..……62

Figure (4.6) : PHI et c (7 jours)……..…62

Figure (4.7) : courbe de contrainte au cisaillement /déplacement horizontal à 14 jours de durcissement……...…63

Figure (4.8) : Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment……65

Figure (4.9) : PHI et c (14 jours)……...66

Figure (4.10) : courbe de contrainte au cisaillement /déplacement horizontal à 28 jours de durcissement……..……67

Figure (4.11) : Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment…….68

Figure (4.12) : PHI et c(28 jours)…….69

Figure (4.13) : représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 100 kpa……..74
Figure(4.14) : représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à200 kpa……...…78.
Figure (4.15) : représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 300 kpa…….83
Figure(4.16) : présenté la angle de frottement fonction du temps de durcissemen…….84
Figure (4.17) : présenté la cohésion fonction du temps de durcissemen…….85

Liste des tableaux x

Chapitre I : Généralité sur le sol

Tableau (1.1) : quelque caractéristique physique de sol……...……07

Tableau (1.2) : la taille des grains……09

Tableau (1.3) : définir diamètre d'utilisation des différents ciments …...……13

Chapitre II : Renforcement de sol

Tableau (2.1) : les types de ciment et leur composition ……...……27

Chapitre III : Matériaux et dispositifs utilisés

Tableau (3.1) : propriétés physique des matériaux utilisent ……39

Tableau (3.2) : paramètre des limites d'Atterberg de limon utilisé……...……42

Tableau (3.3) : masse volumique des grains solides ……46

Tableau (3.4) : masse volumique et indices de vides (minimaux et maximaux) de sol utilisé.47

Tableau (3.5) : programme des essais effectués……49

Chapitre IV : Résultat

Tableau (4.1) : Evaluation de la contrainte maximal en fonction de la teneur en ciment (0jour)…….. .57

Tableau (4.2) : Evaluation de la contrainte maximal en fonction de la teneur en ciment (7jours)……... ..61

Tableau (4.3) : Evaluation de la contrainte maximal en fonction de la teneur en ciment (28jours). ……..65

Tableau (4.4) : Evaluation de la contrainte maximal en fonction de la teneur en ciment (28jours). ……69

Tableau (4.5) : représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 100 kpa A 200 kPa de contrainte normale…….....74

Tableau (4.6) : représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 200 kPa ……..…..79

Tableau (4.7): (représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 joursà 300 kPa ……..….83

Tableau (4.8): les résultats de l'angle de frottement à 7,14 et 28 jours de la cure……84

Tableau (4.9) : les résultats de la cohésion et à 7,14 et 28 jours de la cure……85

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERAL

Le traitement des sols médiocres par des techniques de stabilisation est devenu indispensable et largement utilisé dans les projets de construction de génie civil (construction de routes, d'aéroports, de voies ferrées, de parkings, de barrages en terre, etc.), afin d'améliorer les propriétés géotechniques de ces sols et de permettre leur utilisation dans divers projets de construction. Ainsi que les sols sableux, qui sont considérés comme des sols de mal classé et de haute perméabilité, car ils sont utilisés comme substrats dans les couches de fondation ainsi que pour les autoroutes. Parmi ces techniques : La technique de stabilisation chimique des sols utilisant des matériaux inertes du sol comme stabilisants tels que la chaux, le ciment, les liants hydrauliques routiers....

Sur la base d'études antérieures à la bibliothèque de l'Université de Médéa, dans lesquelles ont été étudiés le comportement mécanique de sable limoneux reconstitué et traité avec des liants hydrauliques et de fibre de verre, ce sujet a été choisi pour la fin de l'étude, qui est une étude expérimentale sur le comportement mécanique de sable limoneux reconstitué avec (59,5% de sable de River + 25,5% de sable concassé et 15% de limon) et traité avec différentes teneurs en ciment Portland (0 à 3.5 %) et laissé à durcir pendant 0 jour à 28 jours, en effectuant une série d'essais de cisaillement direct sous différentes contraintes.

Notre mémoire et compose comporte quatre chapitres :

- Une présentation générale sur les sols est décrite dans le premier chapitre.
- Le second chapitre rassemble les techniques de renforcement des sols, en particulier les méthodes de renforcement chimique des sols.
- Au troisième chapitre, nous présentons la partie expérimentale et les matériaux utilisés.
- Quant au quatrième chapitre, il est consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus à partir de l'étude expérimentale réalisée au laboratoire.

Enfin, une conclusion générale est donnée, reprenant les résultats les plus importants obtenus.

Chapitre I :
Généralité sur le sol

I.1 Introduction :

Les matériaux à la surface de l'écorce terrestre sont constitués de sols ou de roches. Le sol est un matériau hétérogène et anisotrope comportant un mélange d'éléments solides, d'eau et de gaz. La fluctuation de ces deux derniers éléments dans les vides font de ce matériau triphasique un sujet variable dans le temps. Un sol est défini par la géotechnique Comme « un agrégat naturel de grains minéraux, séparables par une action mécanique légère ». [1]

I.2 Définition :

le **sol** est « la formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche-mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants »[2]

Un sol est un mélange de trois phases en proportions variables :

- La **phase solide** (notée s) ou squelette solide est constituée par les grains minéraux de l'agrégat ;
- La **phase liquide** (w), constituée par l'eau occupe les vides de l'agrégat. Si tous les vides sont remplis par l'eau, le sol est dit saturé; sinon, il est partiellement saturé ;
- La **phase gazeuse** (a) : dans un sol partiellement saturé une partie des vides de l'agrégat est remplie par du gaz, essentiellement de l'air. [2]

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.

I.3 Classification de sol

Les systèmes de classification des sols sont ont pour but de ranger les sols en familles présentant les mêmes caractéristiques géotechniques ou des caractéristiques très voisines. Ils permettent donc de grouper les très nombreux échantillons recueillis au cours d'une campagne de sondages et d'établir des coupes géotechniques du terrain.

I.3.1 Classification par la taille des grains solides d'un sol

Ils sont surtout définis granulométriquement. En considérant le diamètre moyen D des grains,on distingue grossièrement :

Argile, limon, sable fin, gravier, cailloux voir figure (1,1)

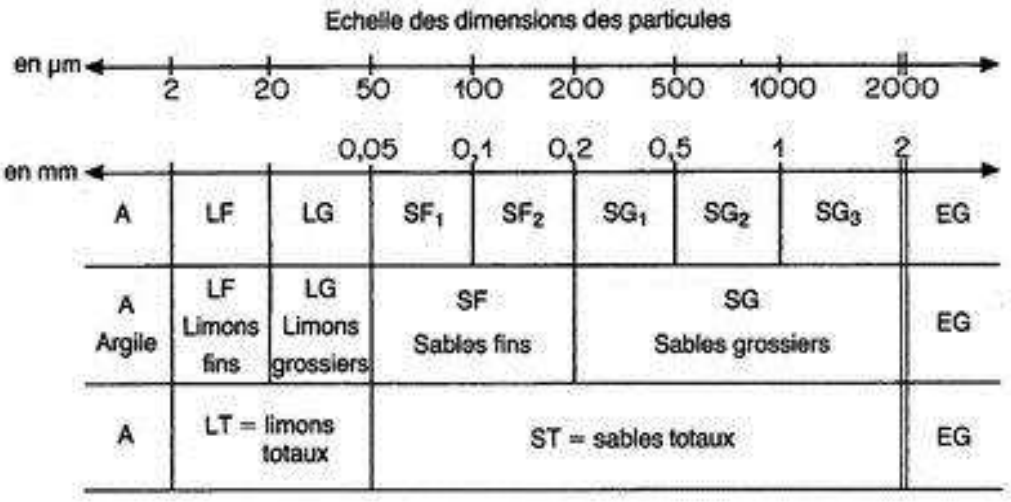


Figure (1.1) : Les classes de dimensions en granulométrie.

I.3.2 Classification par le comportement des sols

I.3.2.1 Comportement des sols pulvérulents (ou encore grenu : D > 20 µm)

Les sols pulvérulents : sable, gravier, cailloux, blocs sont constitués essentiellement de la silice (quartz), du calcaire et d'autres roches inertes. Les effets capillaires dus à l'eau sont négligeables

Les propriétés des sols grenus (pulvérulents) sont :

- Forces de frottement entre les grains sont (dépendants de la forme, l'angularité, la compacité des grains et indépendants de la teneur en eau)
- Résistance au cisaillement
- Aucune résistance à la traction
- Perméables.

I.3.2.2 Comportement des sols cohérents (ou encore sol fin : D < 20 µm 0,02 mm)

Bien que de dimension des grains du squelette ait une influence, le comportement d'un sol fin est avant tout fonction :

- De sa composition minéralogique,
- De sa teneur en eau,
- Et de sa structure, c'est-à-dire de la manière dont les particules sont disposées et orientées les unes par rapport aux autres.

En particulier la consistance d'un sol fin varie beaucoup suivant sa teneur en eau. Plus précisément, en opérant à teneur en eau décroissante, on rencontre les quatre états le comportement suivant :

a. Etat liquide :

Le sol n'a qu'une cohésion très faible. Il a l'aspect d'un fluide. Il tend à s'étale si on le pose surune surface horizontale.

b. Etat plastique :

Le sol a une cohésion plus importante. Posé sur une surface horizontale, il n'a pas tendance às'étaler mais n'offre aucune résistance à l'action de charges même très faibles.

c. Etat solide avec retrait :

La déformabilité du corps est beaucoup plus faible. Soumis à la dessiccation, il perd une partiede son eau interstitielle tout en se contractant d'une valeur appréciable.

d. Etat solide sans retrait :

La rigidité du corps augmente encore et son volume ne change pas quand sa teneur en eaudiminue. Le passage d'un état à l'autre s'effectue évidement d'une façon progressive. [2]

Les Propriétés des sols fins, sont :

- Cohésion assurée par frottements et forces d'attraction entre les grains dépendent de la forme, l'angularité, la compacité et de l'effet de surface des grains dépendent de la teneur en eau
- Résistance au cisaillement et à la traction
- Imperméables et gélifs.

I.3.2.3 Cas particulier des argiles

On définit les argiles comme des sols de diamètre moyen inférieures 2mm. Il s'agit donc d'un sous groupe des sols fin.

Les argiles proviennent de l'altération chimique des roches et plus exactement des minéraux silicates (Feldpaths, mica) .

Le comportement mécanique d'une argile est fortement influencé par de sa structure cristalline de base. Ces structures cristallines peuvent être tel qu'en Présence d'eau elle augmente de volume (3 à 4 fois). On parle alors d'argile active.

Les types d'argiles les plus fréquents sont : la kaolinite, la montmorillonite et l'illite. Ces différents types d'argiles se comportent différemment vis à vis de l'eau.

a. La kaolinite : est stable au contact de l'eau.

b. La montmorillonite : n'est pas du tout stable au contact de l'eau. Les sols à forte teneur enmontmorillonite sont susceptibles de gonflement et de retrait important.

c. L'illite : a un comportement intermédiaire **(**les latérites font partie de cette famille d'argile).

D'autres argiles peuvent être encore thixotropique. C'est le cas notamment des argiles situées sous la ville de Mexico. Ces argiles sous l'effet par exemple d'un tremblement de terre ou localement d'une machine tournante (mise en mouvement/vibration) deviennent alors liquides.



Figure (1.2) : Présentation d'une particule de sol : (a) Particules de sol très fin. (b) Particules de sol grenu humide.

I.4 Propriété et caractéristique des sols

I.4.1 Caractéristiques et propriétés physiques.

Un sol est caractérisé par des paramètres de nature et des paramètres d'état. Les paramètres de nature indiquent les caractéristiques intrinsèques du sol. Ils ne varient pas au cours du temps (poids volumique des grains solides, granularité, angulosité, limites d'Atterberg, teneur en matière organique, etc.…).

Cependant les paramètres d'état dépendent de l'état du sol et caractérisent le comportement du sol sous l'effet d'un chargement donné (teneur en eau, indice des vides, porosité, Equivalent de sable, etc.…).

Les caractéristiques physiques d'un sol dépendent des quantités d'air D'eau et de matière solide entrant dans sa composition. [1]

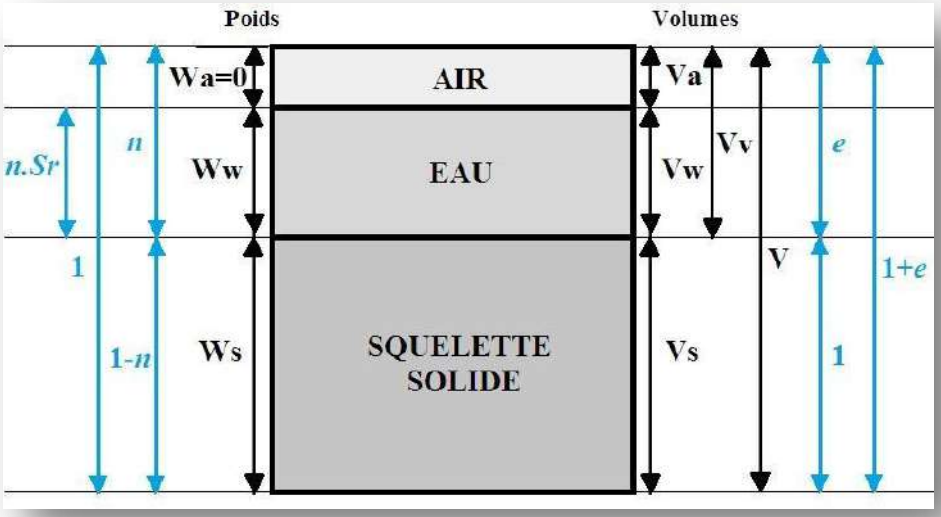


Figure (1.3) : Schéma de caractéristiques de sol.

V : Volume total de l'échantillon de sol.

V_a : volume d'air contenu dans l'échantillon de sol.

V_w : volume d'eau contenu dans l'échantillon de sol.

V_s : Volume des grains solides contenus dans l'échantillon de sol.

Les principales caractéristiques physiques sont définies dans le tableau suivant :

Tableau (1.1) : Quelque caractéristique physique des sols.

Définition	notation	Expression	Relation entre les paramètres
Porosité : Volume des vides par unité de volume de sol	n	$n = \frac{Vv}{V}$	$n = e/(1+e)$
Indice des vides : Volume des vides par unité de volumede grains solides	e	$e = Vv/Vs$	$e = n/(1-n)$
Teneur en eau : Poids de l'eau rapporté au poids de sol sec (en %)	W(%)	$w(\%) =$Ww$/wS\ 100$	$w(\%) = \frac{\gamma - \gamma d}{\gamma d}$
Poids volumique apparent (solide+air+eau) par unité de volume de sol	$\gamma\ (KN\ /m^3)$	$\gamma = \frac{W}{V}$	$\gamma s = \gamma d \times (1 + (W\%))$
Poids volumique apparent sec	$\gamma d\ (KN\ /m^3)$	$\gamma d = Ws/V$	γd=$\frac{\gamma}{1+(W\%)}$
Poids volumique des grains solides	$\gamma s\ (KN\ /m^3)$	$\gamma s = \frac{Ws}{Vs}$	$\gamma s = \frac{\gamma d}{1-n}$
Degré de saturation	Sr(%)	$Sr = Ve/Vv$	$Sr = \frac{W\ \gamma s\ \gamma d}{\gamma w(\gamma s - \gamma d)}$

I.4.2 caractéristique mécanique de sol :

Les caractéristiques mécaniques des sols peuvent être séparées en deux catégories : on parle des caractéristiques mécaniques de compressibilité des sols d'une part, et des caractéristiques mécaniques de cisaillement des sols d'autre part.

Les caractéristiques mécaniques de compressibilité vont servir dans le calcul des ouvrages à déterminer les déformations du sol, c'est-à-dire généralement les tassements, qu'ils se produisent à long terme ou à court terme.

Les caractéristiques mécaniques de cisaillement vont servir pour leur part à déterminer la résistance (au sens large du terme) du sol aux sollicitations qui lui sont appliquées. [1]

I.4.3 Propriétés fondamentales :

On observa cependant que la connaissance exhaustive des propriétés chimique et physique d'une terre n'est pas toujours nécessaire il convient on effet de bien connaitre les quatre propriétés fondamental qui sont : [3]

- **La granulométrie :** Est l'étude de la distribution statique des tailles d'une collection d'élément finis des matière naturelle ou fractionnée l'analyse granulométrique et de ensemble des opération permettant de déterminer la distribution des taille des élément composition la collection [4]

- **La plasticité :** Le comportement plastique est celui d'un corps solide qui prend des déformations permanentes sans se fissurer. On admet généralement que ces déformations permanentes se produisent au delà d'un seuil de contrainte appelé seuil de plasticité ou limite d'´elasticité.

- **La cohésion :** D'élément physique similaire de matière est résultante de l'ensemble des forces qui les unissent qui maintient ces élément ensemble .ces trois forces essentielle sont l'interaction forte, l'interaction électromagnétique et l'interaction gravitationnelle. [5]

- **Resistance au cisaillement :** Débiner une résistance relatif qu'un sol opposer au glissement quand il supporte une charge, elle diminue à mesure que la proportion de particule fins augmente, elle est la plus faible dans les sols organique à grains fins. [10]

I.5 Sable :

I.5.1 Définition :

Le sable est un matériau solide granulaire dont la taille varie entre 0,080 mm et 2 mm résultant de la désagrégation de matériaux d'origine organique ou minérale.

Sa composition se révéler jusqu'à 180 minéraux différents (Quartz, Micas, Feldspaths) ainsi que des débris de calcaires et de corail.

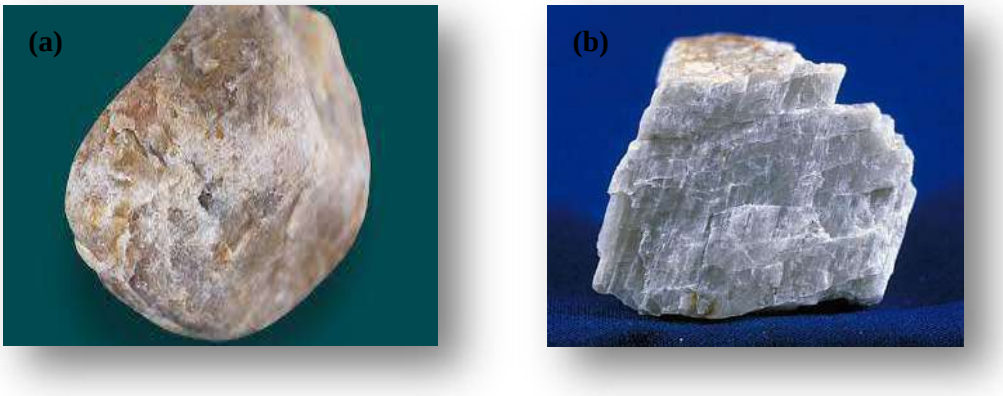


Figure (1.4) : composition de sable : (a) Quartz (b) feldspaths.

Le tableau montrer les limites inferieur et supérieur de diamètre des grains et les numéraux des tamis A.S.T.M correspondant par trois plage de taille des grains de sable : [7]

Tableau (1.2) : la taille des grains

Nom	Diamètre des grains	Numéro des tamis (A.S.T.M)
Sable grossier	>2.00mm à<4.75mm	Tamis 10-tamis 4
Sable moyen	>0.465mmà<2.00mm	Tamis 4
Sable fin	>0.0625mmà<0.465mm	tamis

I.5.2 Caractéristique physicochimique :

Une particule individuelle est appelée grain de sable. 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.

On peut également différencier un sable qui a été 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 de plus, le sable éolien présent une diaphanéité plus mate que le sable [6]

I.5.3 Les différent type de sable :

On distingue deux types de sable selon leur origine :

I.5.3.1 Sable naturelles :

- **Les sables alluvionnaire :**

Ce sont des matériaux qui exister, dans certaines régions, en abondance dans la nature. Ils sont le résultat d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation. Leur formation s'effectue en trois étapes successives : la décomposition sur place des différentes roches suivie d'un transport qui les amène à un dépôt ou ils demeurent sous différentes formes.

Le sable alluvionnaires les plus rencontrés et les plus connus sont :

- Les sables de rivière
- Sable graveleux
- Gros sable
- Les sables marins
- Les sables marins littoraux
- Les sables fluviatiles
- Les sables éoliens.

- **Sable de carrière :**

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.

- **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.

- **Sable feuilles :**

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.

I.5.3.2 Les sables de concassage :

Les sables concassages de carrière (concassage) sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires.une phase de pré criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. [8]

I.6 Les limons :

I.6.1 Définition :

Il est formé de grains de diamètre moyen plus gros que les argiles et plus petits c'est-à-dire entre 2 et 63 micromètres (les limites précises peuvent varier quelque peu suivant les

laboratoires) que le sable, on utilise souvent l'anglicisme silt pour désigner les limons.

I.6.2 Composition du limon :

Le limon est l'ultime produit de l'érosion fluviale des roches du bassin versant des rivières. Les particules limoneuses sont ainsi constituées de débris très fins de quartz, de mica et de feldspath. [9]

I.6.3 Source :

Formation homogène, constituent dans le détail un ensemble stratigraphique complexe. Ils ont été mis en place à l'époque quaternaire suivant des cycles de dépôts successifs comprenant :

- A la base, des limons argileux de solifluxion (glissement en masse, sur un versant de la partie superficielle gorgée d'eau) de couleur brun rouge dont la nature est souvent influencée par celle du substratum,
- Des **limons** éoliens beiges non remaniés déposés en période froide et sèche. Plus récents, ils ont une structure litée, finement sableuse,
- **Des** limons bruns correspondant à une période de réchauffement. [6]

I.7 Le ciment :

I.7.1 Définition

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire : il est capable de faire prise, de durcir et de développer des résistances à l'air comme dans l'eau.

I.7.2 Fabrication du ciment

Le ciment est fabriqué à partir de calcaire et d'argile : 80 % + 20 % respectivement. Le ciment est fabriqué (par voie sèche) selon le processus suivant :

- Extraction de matière première de la carrière
- Concassage primaire de la matière première
- Concassage secondaire de la matière première en taille plus petite
- Broyage de la matière concassée
- Dosage et homogénéisation de la farine crue (matière broyée)
- Phase de préchauffage de la farine crue (et précalcination) à **850° C**, puis la cuisson dans un four rotatif incliné à une température généralement de **1450° C**. le produit sortant du four s'appelle le **clinker**;
- Broyage du mélange : clinker + gypse (≈ 5%) + ajouts éventuels.
- Le produit finie (ciment) est prêt alors pour être expédier on sacs en vrac.

I.7.3 Propriétés physico-mécaniques du ciment.

I.7.3.1 La prise

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il fait prise.

I.7.3.2 Le durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours des quels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

I.7.3.3 La finesse de mouture (surface spécifique de Blaine)

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm^2/g).

Dans les cas courants, elle est de l'ordre de 3000 à 3500 cm^2/g.

Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation sont élevée et plus ces résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible et plus le retrait est important.

I.7.3.4 La résistance à la compression

Les résistances mécaniques des ciments sont déterminées par les essais sur mortier dit "normal", à 28 jours d'âges en traction et en compression des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm. La résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du ciment. Elle dépend de la classe de ciment et est exprimée en MPa.

Le mortier utilisé est réalisé conformément à la norme **EN 196-1**. Le sable utilisé est un sable appelé: "sable normalisé".

Pour chaque type de ciment, il existe effectivement plusieurs classes de résistances pour les quelles les fabricants garantissent des valeurs minimales et maximales

I.7.4 Les différents types de ciments

Les ciments peuvent être classés en cinq grandes familles : (voir la norme EN-197-1-2000) :

- **Ciment Portland** (noté CEM I)

- **Ciment Portland composé** (noté CEM II)
- **Ciments de hauts fourneaux** (noté CEM III)
- **Ciments pouzzolaniques** (noté CEM IV)
- **Ciments au laitier et aux cendres** ou **ciment composé** (noté CEM V)
- **Ciment blanc** (différent des précédents par sa composition chimique et la méthode de fabrication).

I.7.5 Domaine d'utilisation des différents ciments :

Le tableau suivant présente les déférents domaines d'utilisation du ciment selon son type :

Tableau (1.3) : Définir domaine d'utilisation des différente ciments

Type de Ciment	Désignation	Utilisation	Contre indication
Ciment portland **Ciment composé**	CEM I CEM II	• Tous travaux de béton armé • Bonne résistance • Décoffrage Rapide (préfabrication) • Bétonnage par temps froide.	• Présence d'eaux agressives • Travaux souterrains • Bétonnage en grande masse.
Ciment au laitier et Pouzzolanique Ou au laitier et cendre	CEM III CEM IV CEM V	• Béton de masse (barrage) • Béton de fondation (sol agressif) • Bétonnage en temps chaud • Eau usée • Travaux souterrains • Réservoir d'eau	• Bétonnage par temps froid • Béton préfabriqué • Résistance à jeune âge élevée.

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons définie la structure du sol en général ainsi que les caractéristique physique et mécanique essentiels, ensuite nous avons détaillée les différentes propriétés de sol utilisé dans ce travail (sable, limon ciment)

Chapitre II :
Renforcement de sol

II.1 Introduction

Le traitement et le renforcement des sols sont des techniques qui permettent de remettre des sols modestes et inconstructibles à l'état naturel, pour les rendre utilisables, par une amélioration de leurs performances mécaniques (portance), une réduction de leur sensibilité à l'eau et au gel (protection), une homogénéisation et une valorisation des matériaux.

Il existe plusieurs techniques qui permettent d'améliorer le comportement des sols.

A cet effet, dans ce chapitre, nous évoquerons les différentes techniques utilisées pour améliorer les propriétés des sols, notamment la technique de stabilisation chimique des sols par ajout d'un additif inerte. Dans le cadre de cette étude, l'attention se porte sur le ciment.

II.2. Techniques de renforcement des sols:

II.2.1. Méthode de renforcement mécanique :

Il est a deux méthodes de stabilisation mécanique ; le compactage dynamique et vibro-compactage.

II.2.1.1 Compactage dynamique :

La méthode de compactage dynamique est un procédé d'amélioration du sol est utilisée pour augmenter la densité du sol, diminuer les tassements et le potentiel de liquéfaction...etc.

Ce procédé se caractérise par l'utilisation d'un masse pesant entre 8 et 36 tonnes, dans certains cas même plus grand si le projet l'exige, avec la hauteur exacte requise et le degré de compactage requis.la masse tomber plusieurs fois, dans un groupes régulièrement espacé.

Ce processus se traduit par des vagues qui aident à la condensation du sol, qui à son tour comprime le sol à une profondeur maximale de 10 mètres dans le sol meuble.

En ce qui concerne les sols cohésifs, après l'application du procédé, il en résulte une liquéfaction localisée avec compactage du sol, qui à son tour contribue à augmenter lapressionde l'eau entre les particules de sol et les roches.



Figure (2.1) : Compactage dynamique du sol.

II.2.1.2 Vibro-compactage :

Le compactage vibratoire est une technique d'amélioration des sols par épaississement des sols de type sableux et graveleux à grain lâche afin d'équilibrer les particules dans une couche plus dense. La technologie de pression vibratoire est représentée par l'émission de vibrations dans le sol à une profondeur de 50 mètres. Cette technologie repose sur un traitement collectif sans ajout de pierres ni de béton, ce qui donne un sol homogène amélioré

Des vibrations horizontales sont créées à l'aide d'une aiguille vibrante en projetant de l'eau et de l'air lors de la pénétration et lors de la pression de vibration, le sol est amélioré en élevant le vibreur à des niveaux successifs de 50 à 100 cm selon le terrain et la qualité du sol à améliorer.



Figure (2.2) : Vibro-compactage du sol.

II.2.2 Méthode de renforcement physique :

II.2.2.1 Pré chargement ou Pré compression :

La pré-pression dépend de la pression du sol sous la pression appliquée avant le chargement des charges. Cette méthode est utilisée sur des terrains qui continueront à être installés pendant des années.

Ces méthodes sont appliquées aux sols pauvres à composition argileuse. Le principe est de surcharger le sol pour qu'il se tasse naturellement. Le pré charge du sol fonctionne selon les mêmes principes dans le cas des sols fins, mais la forte perméabilité des sols granuleux permet d'obtenir l'amélioration souhaitée en un temps plus court que pour les sols minces.

L'un des effets bénéfiques de ce procédé est d'augmenter la capacité portante en réduisant les pores et de réduire le compactage des sols mous en accélérant l'uniformité

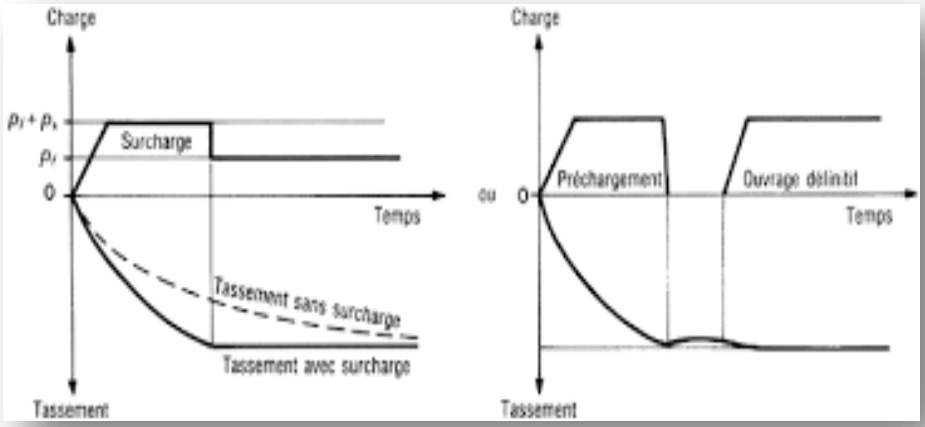


Figure (2.3) : Pré chargement ou Pré compression

II.2.2.2 Drainage :

C'est une technologie qui permet une consolidation plus rapide des sols à l'aide de drains verticaux pour améliorer les micro-sols saturés en eau.

L'application des charges est perpendiculaire au sol dans un réseau régulier pouvant atteindre jusqu'à 90 mètres selon la couche et la composition du terrain.

Les charges sont des drains préfabriqués ou sous forme de colonnes de sable et de gravats. Lorsque le terrain est chargé, l'eau interstitielle est évacuée vers la surface, permettant une consolidation rapide du sol traité

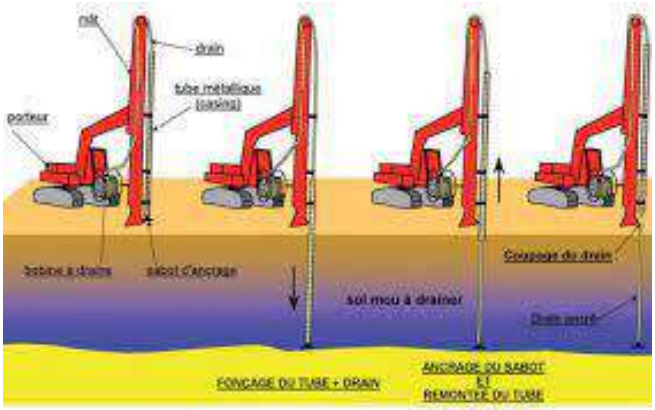


Figure (2.4) : technique de Drainage

II.2.3 Méthodes de renforcement thermiques :

II.2.3.1 Déshydratation :

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

II.2.3.2 Congélation :

La congélation des sols est une méthode de consolidation des sols utilisée en génie civil, notamment lors du creusement de petits tunnels et des sorties de sécurité dans les grands tunnels, ainsi que pour le creusement de colonnes. Cette technique permet l'excavation du sol dans un sol saturé d'eau dans l'aquifère.La congélation des couches instables d'eau souterraine avec de l'azote liquide ou de la saumure (un procédé ancien) est considérée comme temporaire et permet l'unification de la terre.

L'utilisation de cette technique nécessite une bonne connaissance des transferts thermiques liés à la congélation et une bonne maîtrise de la technique de mise en œuvre.Ce processus dépend de la création du corps de givre à l'aide de la congélation par l'azote liquide en un temps court.Le corps de givre est préservé de la congélation à l'aide de saumure, qui est moins coûteuse. Le sol gelé peut ressembler à du béton

La congélation du sol peut également être utilisée dans les cas suivants :

- En traversant les tunnels ferroviaires
- Lors de la construction de tunnels au milieu de l'aquifère
- Recueillir des échantillons de sol non perturbés pour le givrage artificiel dans les mines.



Figure (2.5) : technique de Congélation

II.2.4 Méthode de renforcement chimique.

La stabilisation chimique est l'une des techniques utilisées pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols. Différents additifs sont utilisés dans le monde entier, certains d'entre eux sont des natures hydrocarbures et d'autres sont es natures cimentaires, les plus populaires étant la chaux, le ciment et les liants hydrauliques spécialement conçus pour les routes. Ces additifs sont caractérisés par leur capacité à réagir chimiquement en présence d'eau, ce qui améliore les liaisons hydrauliques dans le sol traité, qui sont affectées en plus de ses interactions avec le gel et l'eau seront fortement modifiées (CRR, 2009b).

Cette section présente ces trois différents liants : la chaux, les liants hydrauliques routiers et le ciment.

II.2.4.1 Utilisation de la chaux.

L'utilisation de la chaux est l'une des plus anciennes formes de traitement utilisées historiquement dans la construction des routes, en particulier sous l'Empire romain et pendant plusieurs décennies par la suite, lorsque l'utilisation de la chaux pour stabiliser les sols argileux était très réussie.

Cet adhésif est le choix préférable pour les sols à forte teneur en humidité, car la réaction pouzzolanique des hydrates assèche efficacement le matériau.

L'utilisation de la chaux se fait par l'ajout de monoxyde de calcium (chaux vive, CaO) ou d'hydroxyde de calcium (chaux éteinte, Ca (OH)), la chaux vive est particulièrement efficace pour floculer les sols plastiques, leur donner une capacité portante et augmenter la teneur en eau optimale pour le compactage (Joseph Abdo et Servas, 2009). En revanche, la chaux éteinte, qui est composée d'une base argileuse, présente une réaction chimique plus lente. Notons ici que la chaux vive est plus efficace que la chaux éteinte pour l'amélioration des sols [11].

II.2.4.2 Utilisation des liants hydrauliques routiers.

Les applications des liants hydrauliques routiers (LHR) sont exclusivement réservées aux sols et aux fondations des chaussées. Le bitume est un sous-produit des hydrocarbures lourds, qui est un résidu noir du pétrole brut obtenu soit par distillation naturelle, soit par distillation en raffinerie. Le bitume de distillation directe est utilisé pour la confection d'enrobés à chaud

Le bitume est un matériau léger, ductile et élastique avec de bonnes propriétés d'adhésion, car il est caractérisé par sa plasticité et son élasticité. Il est très peu réactif, insoluble dans

l'eau et inerte à de nombreux agents chimiques, car il est soluble dans de nombreux solvants organiques. [12]

II.2.4.3 Utilisation du ciment.

Un autre produit possible pour stabiliser certaines classes de sol est le ciment, bien qu'il existe de nombreuses similitudes entre la chaux et le ciment en tant que stabilisateurs. Le fait que le ciment Portland soit couramment utilisé pour conférer de meilleures capacités mécaniques en compression que la chaux, provient des réactions physico-chimiques associées au processus d'hydratation (Joseph Abdo, 2008).

La poudre de ciment est composée de clinker, de sulfates de calcium et de gypse pour retarder la prise, ainsi que de diverses additions provenant de sous-industries (laitier de haut fourneau, cendres volantes, pouzzolanes, etc.).

Le processus de traitement du sol avec du ciment est basé sur la réaction de ce dernier avec l'eau, car au contact des molécules d'eau commence la phase active, reconnue sous le terme de processus d'hydratation. Ce processus est caractérisé par quatre étapes :

Tout d'abord, une fois que le ciment est directement en contact avec l'humidité du sol, le phénomène d'adsorption des particules de ciment va se produire par fixation à la surface des molécules d'eau. Ensuite, le phénomène d'hydrolyse va entrer dans la phase de transformation du solide et décomposer les molécules d'eau.

Au cours de cette décomposition, il y a dissolution et solvatation. Cela signifie la rupture des liaisons ioniques dans les cristaux de ciment et la dispersion des ions dans la phase aqueuse, ce qui conduit à la formation rapide d'hydrates. Enfin, l'étape de cristallisation, où la formation de ces hydrates se poursuit par le cycle de germination ou de floculation (Assemblage d'hydrates entre eux), puis par la croissance des germes au fur et à mesure que l'hydratation se poursuit.

II.2.4.3.1 Domaines d'application.

Les principaux domaines d'utilisation des additifs chimiques pour redonner ou ajouter une valeur structurelle significative aux sols traités, sont les sols d'infrastructure, les fondations de chaussée et d'autres variantes.

a) **Sols d'infrastructure**

Les sols d'infrastructure sont susceptibles de subir des déformations intermittentes, en particulier pendant la mise en œuvre du projet, en raison de la rotation de machines lourdes, et lorsque des argiles à haute plasticité sont présentes dans le sol de base. En effet, la floculation

des particules fines qui en résulte augmentera la capacité portante du sol en réduisant le risque de gonflement (PCA, 1992).

Dans l'application routière, les changements de conditions du projet provoquent de nombreuses dégradations précoces représentées par des variations de volume, la même chose est valable pour le contrôle de l'eau dans le sol, donc le choix du liant (chaux, ciment, etc.) peut être modifié pour obtenir une légère amélioration de ses propriétés générales ou pour obtenir la stabilité qui donne au matériau un comportement semi-rigide (Joseph Abdo et Servas, 2009).

b) **Fondations de chaussée**

Une infrastructure de fondation de bonne qualité et bien traitée, qui bénéficie globalement de la sécurité de la structure. Les matériaux plus grossiers de la sous-fondation et de la fondation ont la possibilité d'améliorer leurs capacités mécaniques puisqu'ils peuvent être traités. Pour cela, l'avantage de cette méthode est se trouve au niveau du dimensionnement. Il est possible de réduire l'épaisseur des couches de matériaux grossiers les plus coûteux, grâce à une capacité de charge améliorée.

Le contrôle est plus simple pour les sols dont l'homogénéité est connue que pour les sols aléatoires, ce qui facilite l'application du liant. En effet, les matériaux grossiers traités augmenteront leur capacité portante et il sera possible de leur donner un comportement semi-rigide, cependant, il faut noter que les variations d'humidité et le gel provoqueront la désagrégation d'une matrice stable avec le temps, tout comme une fondation conventionnelle non traitée. Malgré ce changement, le granulat résultant aura de meilleures capacités structurelles que les matériaux non traités (PCA, 1992). De plus, en raison de la proximité de la couche superficielle, le comportement de durcissement difficile du ciment entraînera un retrait primaire et thermique (Cimbéton, 2001). Ce phénomène se traduit par des fissures transversales à intervalles réguliers, en fonction de la liaison entre l'interface du chemin de roulement et son support.

c) **Autres applications**

Bien que les applications les plus courantes soient dans les couches structurelles de la chaussée, une multiplication des options d'utilisation est possible. Par exemple, la couche de surface peut être déplacée vers une couche de base concassée mécaniquement, puis le nouveau granulat peut être traité. De plus, en ajustant les dosages de particules fines, la teneur en eau et le liant cimentaire, il est possible de faciliter la réalisation de pentes plus importantes ou d'utiliser la technologie comme élément d'irrigation de surface (PCA, 1992). Il s'agit

d'applications pour les chaussées, mais le ciment est également utilisé dans les sols comme agent stabilisateur des matériaux contaminés (Rukhsana, 2014).

II.2.4.3.2 Renforcement du sol par ciment :

En raison des différentes interactions moléculaires, le ciment hydraté aura la propriété de continuer à évoluer tout au long de sa vie par effet pouzzolanique. Cette évolution se fait en trois étapes, en commençant par la phase dormante où la matrice forme une pâte aux propriétés inchangées du mélange sol-ciment. Malgré la réaction immédiate d'hydratation, le gypse présent dans le ciment est le précurseur de ce ralentissement pendant la première heure d'incorporation. A partir de ce moment et jusqu'à l'état rigide intervient la phase de la prise. La matrice va subir une modification de sa viscosité et un dégagement de chaleur jusqu'à atteindre l'état semi-rigide à rigide. Enfin, le durcissement se poursuit grâce à la continuité de l'hydratation et à la croissance continue du gain de résistance.

La norme NF EN 197-1 portant sur la composition et les spécifications et critères de conformité des ciments courants (AFNOR 2001) classent les différents ciments suivant leur teneur en clinker et constituants secondaires (Tableau 2.1).

a. Constituants principaux :

- Clinker Portland (K) : Le clinker Portland est obtenu par calcination d'un mélange précis de matières premières (calcaire, marne, argile) à la température de 1450°C environ.

- Laitier de haut fourneau (S) : Le laitier de haut fourneau est obtenu par refroidissement rapide d'un laitier fondu de composition appropriée, provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Une activation convenable donne à ce laitier des propriétés hydrauliques (également désignées sous le nom d'hydraulicité latente).

- Fumée de silice (D) La fumée de silice provient de la réduction d'un quartz de grande pureté par du charbon dans les fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium. Elle est formée de particules sphériques extrêmement fines contenant au moins 85% en masse de silice amorphe. La fumée de silice a des propriétés pouzzolaniques.

- Matériaux pouzzolaniques(P, Q) Les matériaux pouzzolaniques sont des substances naturelles siliceuses ou silico-alumineuses, ou une combinaison de celles-ci.

- Pouzzolanes naturelles(P) Les pouzzolanes naturelles sont en général des matériaux d'origine volcanique ou des roches sédimentaires dotées d'une composition chimique et

minéralogique appropriée.

- Pouzzolanes naturelles calcinées (Q) Les pouzzolanes naturelles calcinées sont des matériaux d'origine volcanique, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires activés thermiquement.

- Cendres volantes (V, W) Les cendres volantes sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique de particules pulvérulentes contenues dans les fumées des chaudières alimentées au charbon pulvérisé.

- Cendre volante siliceuse (V) La cendre volante siliceuse est une poudre fine constituée de particules principalement sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques.

- Cendre volante calcique (W) La cendre volante calcique est une poudre fine ayant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques.

- Schiste calciné (T) Le schiste calciné, et en particulier le schiste bitumineux calciné, est produit dans un four spécial à une température d'environ 800°C. Finement broyé, il présente des propriétés fortement hydrauliques aussi bien que pouzzolaniques.

- Calcaire (L, LL) Le calcaire est un ajout inerte. Il est classé en deux catégories, selon sa teneur en carbone organique total (TOC):

  • calcaire normal (L): TOC ≤ 0,5% en masse

  • calcaire de haute qualité (LL): TOC ≤ 0,2% en masse.

b. Constituants secondaires

Les constituants secondaires sont des matériaux minéraux dérivés du processus de fabrication du clinker et spécialement sélectionnés. Il peut aussi s'agir de constituants principaux en faibles quantités (0–5% en masse) dans la mesure où ils ne sont pas déjà incorporés en tant que tels dans le ciment.

c. Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium est ajouté aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication, pour réguler la prise. Le sulfate de calcium peut être incorporé sous forme de gypse, d'hémihydrate, d'anhydrite ou de tout mélange de ceux-ci.

d. Les phases d'hydratation du ciment :

L'hydratation de ciment est caractérisée par quatre phases où les molécules formeront un ensemble durcissant.

Immédiatement au contact du ciment avec l'humidité en présence dans le sol, un **phénomène d'adsorption** des molécules de ciment se produira par fixation en surface sur les molécules d'eau. Par la suite, **l'action de l'hydrolyse** entrera en phase de transformation du solide et par conséquent, de la décomposition des particules d'eau. De cette décomposition s'en suit une dissolution et une solvatation. En d'autres termes, il s'agit de la rupture des liaisons ioniques dans les cristaux cimentaires et la dispersion des ions à l'intérieur de la phase aqueuse, occasionnant la formation rapide d'hydrates.

Finalement, la création de ces hydrates se poursuit dans un cycle de germination ou floculation (assemblage des hydrates entre eux), puis par une croissance des germes au fur et à mesure que l'hydratation se poursuit. Il s'agit de la dernière phase : **la cristallisation**.

La nature des différents composants du ciment est directement liée aux actions de l'hydratation. Ainsi, quatre composants principaux sont retrouvés dans le ciment : le C3S (silicate tricalcique), le C2S (silicatebicalcique), le C3A (aluminate tricalcique) et le C4AF (alumino-ferrite tétracalcique).

L'hydratation des molécules de C3S et C2S va permettre la création de CSH et de CH, cette dernière est également appelée « portlandite ». C'est de cette réaction que provient la prise initiale et le gain de résistance dans le temps.

Pour ce qui a trait aux molécules de C3A, ils formeront également les hydrates de (CH) portlandites, mais également des aluminates monocalciques hydratés (CAH), cette réaction est la cause du gain de résistance en bas âge, mais également de la formation importante de chaleur au sein de la matière.

Types principaux de ciment	Désignation	Notation	Sorte de ciment Holcim	Constituants principaux[1]								Constituants secondaires[1,4]
				Clinker de ciment Portland	Laitier de haut fourneau	Fumée de silice	Pouzzolane naturelle	Pouzzolane naturelle calcinée	Cendre volante silicieuse	Cendre volante calcique	Schiste calciné	Calcaire		
				K	S	D[2]	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	Ciment Portland	CEM I	Normo, Protego, Superblanc	95–100										0–5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S		80–94	6–20									0–5
		CEM II/B-S		65–79	21–35									0–5
	Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	Fortico	90–94		6–10								0–5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P		80–94			6–20							0–5
		CEM II/B-P		65–79			21–35							0–5
		CEM II/A-Q		80–94				6–20						0–5
		CEM II/B-Q		65–79				21–35						0–5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V		80–94					6–20					0–5
		CEM II/B-V		65–79					21–35					0–5
		CEM II/A-W		80–94						6–20				0–5
		CEM II/B-W		65–79						21–35				0–5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T		80–94							6–20			0–5
		CEM II/B-T		65–79							21–35			0–5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L		80–94								6–20		0–5
		CEM II/B-L		65–79								21–35		0–5
		CEM II/A-LL	Fluvio, Superblanc	80–94									6–20	0–5
		CEM II/B-LL	Batimo, Superblanc	65–79									21–35	0–5
	Ciment Portland composé[3]	CEM II/A-M		80–88					12–20					0–5
		CEM II/B-M	Optimo, Robusto	65–79					21–35					0–5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A		35–64	36–65									0–5
		CEM III/B	Modero 3B	20–34	66–80									0–5
		CEM III/C		5–19	81–95									0–5
CEM IV	Ciment pouzzolanique[3]	CEM IV/A	Holcim 401, Holcim 402	65–89				11–35						0–5
		CEM IV/B		45–64				36–55						0–5
CEM V	Ciment composé[3]	CEM V/A		40–64	18–30			18–30						0–5
		CEM V/B		20–38	31–49			31–49						0–5

1) Les valeurs indiquées (en % massiques) du tableau se réfèrent à la somme des constituants principaux et secondaires, c.-à.-d. sans le sulfate de calcium ni les adjuvants au ciment.
2) La proportion de fumée de silice est limitée à 10 % en masse.
3) Dans le cas des ciments Portland composés CEM II/A-M et CEM II/B-M, des ciments pouzzolaniques CEM IV/A et CEM IV/B et des ciments composés CEM V/A et CEM V/B, les constituants principaux, autres que le clinker, doivent être déclarés dans la désignation du ciment.
4) Les matériaux incorporés en tant que constituants secondaires du ciment, ne peuvent être déjà inclus dans les constituants principaux.

.

Lorsqu'une présence en sulfates est retrouvée dans les particules de sols environnants, une partie de l'hydratation sera portée à réagir avec ceux-ci, résultant un amalgame de C3AS (sulfoaluminate tricalcique). C'est cette résultante qui est appelée « aiguilles d'ettringite » ou « gonflement d'ettringite » puisque ces cristaux prennent drastiquement de l'expansion. Par conséquent, plus la présence en sulfates dans le sol est importante, plus le gonflement provoquera une microfissuration initiale (Joseph Abdo, 2008; Cabane, 2004; Nagasreenivasu, 2013).

La molécule de C4AF, quant à elle, n'a aucun effet sur le durcissement lors de son hydratation.

II.2.4.3.3 Influence du ciment et d'autre paramètre sur le comportement mécanique de sol :

L'effet du traitement du ciment sur les propriétés géotechniques de certains sols a été étudié par un grand nombre de chercheurs. Mais les conclusions de différents chercheurs sur le rôle de l'agent stabilisant sur les paramètres de résistance au cisaillement n'ont pas été complètement cohérentes.

L'effet principal recherché par l'ajout du ciment est l'amélioration des performances mécaniques des sols. Les résultats issus de nombreuses études ont montré l'amélioration globale des paramètres de résistance au cisaillement, du module d'élasticité ou de la résistance à la traction des sols traités aux ciments (Felt, 1955 ; Felt & Melvin, 1957 ; Balmer, 1958 ; Croft, 1968 ; PCA, 1969 ; Noble & Plaster, 1970 ; Consoli et al., 1998 ; Bahar et al., 2004 ; Kamruzzaman et al., 2009 ; Sariosseiri & Muhunthan, 2009). Le gain de performance est directement lié à la formation de composés cimentaires, et à leur nature.

Il a été largement rapporté qu'un agent stabilisant augmente la cohésion effective (Mitchell 1976). Alors que certains chercheurs comme Reddy et Saxena pensent que la stabilisation par le ciment a un effet insignifiant sur l'angle de friction interne, d'autres comme Lambe, Balasubramaniam et al(……) pensent que la stabilisation par le ciment conduit à une augmentation significative de l'angle de friction interne (Lo et Wardani 2002). Balmer (1958) a rapporté que les valeurs moyennes de l'angle de friction interne variaient de 36,1° à 43,8° pour les sols stabilisés à grains fins et grossiers, respectivement.

Selon les observations de Wissa (Wissa et al. 1965), la cohésion augmente avec le temps de durcissement, l'angle de friction interne reste presque constant. D'autre part, Gay and

Schad (2000) ont montré que les propriétés de cisaillement des sols instables traités avec différentes teneurs en ciment étaient significativement améliorées pour différentes périodes de cure. Ils ont constaté que pour une teneur en ciment de 8 % et une période de cure de 28 jours, l'angle de frottement interne est presque 5 fois supérieur à celui d'un sol instable non traité. Cela reflète la stabilité requise après l'amélioration du ciment pour les sols instables. Le même comportement a été observé pour la cohésion qui est de 7,5 fois celle de la cohésion dans un sol non traité.

Al-Aghbari et al. (2009) ont étudié l'effet de la stabilisation des sols sablonneux par le ciment sur les paramètres de résistance au cisaillement et ont conclu que les paramètres de résistance au cisaillement augmentent avec la teneur en stabilisant et le temps de durcissement. Même remarque signalé par Bello (2011) et Das (1999), que l'utilisation de la stabilisation au ciment augmente la résistance à la compression et améliore la résistance au cisaillement du sable [12,15].

A le biais d'essais de compression triaxiale, Haeri et al (2006) ont étudié le comportement d'un sable graveleux cimenté par différentes teneurs en ciment de 1,5%, 3,0% et 4,5% ; Ils sont arrivés à la conclusion que le ciment Portland est un agent cimentaire ductile et que le comportement du sol cimenté avec du ciment Portland dépend de la quantité de ciment contenue et de la pression de confinement appliquée. Lorsque la teneur en ciment est faible dans le sol, la rigidité du sol diminue avec l'augmentation de la pression de confinement. Cependant, lorsque la teneur en ciment dans le sol augmente, le sol conserve sa rigidité et sa résistance jusqu'à des pressions de confinement élevées [18].

Geoffrey and Herman (2000), Ils se trouvent que ne pas y avoir d'augmentation de l'angle de cisaillement avec l'âge malgré la dispersion des valeurs. Par contre, il y a une forte augmentation de la cohésion par rapport à celle des sols naturels non traités, en particulier avec une teneur en ciment plus élevée, il y a une augmentation rapide de la cohésion avec l'âge. En plus, le taux d'augmentation après 28 jours semble être encore constant, de sorte que l'on peut s'attendre à d'autres augmentations avec l'âge. [19]

Dans une étude présentée par Al-Naimi (2010), il a étudié les propriétés mécaniques du sol de gypse et son effet sur l'ajout de clinker (la matière première du ciment), où le clinker a été ajouté dans trois proportions différentes (2, 4, 6%), il a été constaté que les résultats de résistance au cisaillement et de cohésion obtenus augmentent significativement avec l'augmentation de la teneur en clinker mais l'angle de frottement diminue. L'étude a conclu que la teneur maximale en clinker est de 4%.

Un programme expérimental a été réalisé par **Shooshpasha et Shirvani (2015),** afin d'étudier les effets de la stabilisation au ciment sur les caractéristiques géotechniques des sols sableux. L'agent stabilisateur comprenait du ciment Portland à base de chaux, et a été ajouté dans des pourcentages de 2,5, 5 et 7,5% par rapport au poids sec des sols. Les paramètres de résistance au cisaillement, à savoir la cohésion et l'angle de frottement interne, augmentent avec la teneur en ciment portland. L'augmentation substantielle de la cohésion est plus évidente que celle de l'angle de friction interne. Il y a une augmentation considérable de la cohésion et de l'angle de friction interne dans les échantillons contenant du ciment portland avec l'augmentation du temps de durcissement, mais l'effet du temps de durcissement est plus modéré que la teneur en ciment. De plus, après le pic de contrainte de cisaillement, la contrainte de cisaillement maximale a chuté vers approximativement la même valeur trouvée pour l'essai de cisaillement direct effectué sur le sol naturel.

Les résultats de l'étude de Bouaricha et al (2017) ont montré que la substitution du clinker dans le sable cimenté par différents ratios de fibres affecte positivement la résistance au cisaillement et augmente significativement l'angle de frottement et la cohésion avec l'augmentation de la teneur en résidus de clinker, de plus, le rapport de la résistance au cisaillement du sable renforcé et traité est significativement réduit avec l'augmentation de la pression normale de 100 à 200 kPa, puis une légère augmentation a été enregistrée avec la progression de la pression normale à 300 kPa. L'étude a conclu que la teneur maximale en résidus de clinker est de 3 %.

Avci et Mollalahmutoglu (2018) ont mené des essais à triaxial sur des échantillons traités par des additifs (du clinker et du ciment Portland) où les pourcentages sélectionnés étaient de 10, 12 et 14 % pour la stabilisation de l'argile, les résultats ont montré que la résistance au cisaillement était augmentée avec la substitution du clinker et du ciment Portland.

Il est difficile d'expliquer cette amélioration des propriétés sans se plonger dans l'analyse microscopique de la structure, afin de comprendre et d'expliquer l'amélioration de la résistance des échantillons de ciment.

Dans une étude réalisée par JianxiaoGu et al (2020) [20], sur l'effet de la durée de durcissement et de la teneur en ciment Portland sur la résistance à la compression non confinée du sable de ciment et de chaux, il a effectué différentes séries de tests avec des teneurs en ciment Portland (5%, 7,5%, 10%) et des durées de durcissement (1d, 3d, 7d). Il a effectué différentes séries d'essais avec des teneurs en ciment Portland (5%, 7,5%, 10%) et des périodes de durcissement de (1, 3, 7, 14 et 28 jours). Les mécanismes microscopiques ont été mis en évidence par des tests NMR pour expliquer les résultats de cette étude, où le test

NMR a permis de surveiller la distribution du diamètre des pores dans le processus d'hydratation. Il a été conclu qu'avec l'augmentation de la période de durcissement, les grands pores sont remplis ou fragmentés pour former des petits pores, et avec l'augmentation de la teneur en ciment, une diminution des grands pores est généralement observée dans les petits pores.

II.3 Les avantages et Les inconvénients de traitements chimiques

II.3.1 Les avantage

Le traitement des sols en place à la cha" et/ou au ciment ou au lïant hydraulique routier (Llm) est une technique qui offre trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux.

II.3.1.1 Avantages techniques

Le traitement des sols en place à la cha" et/ou au liant hydraulique permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, durable et stable, présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. En outre, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure. Cette technique assure un bon comportement par temps chaud sans déformation, ni omiérage et un bon comporte- ment vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à la rigidité du matériau et à l'effet de dalle induit. Enfin, le traitement des sols en place est une technique possédant une facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation.

II.3.1.2 Avantages économiques

Le traitement des sols en place à la chaux evou au liant hydraulique est une technique de traitement à fioid, donc utihsant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit au mirimum les débLais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leu transport. L'absence de transpoii de granulats ou des déblais en décharge contnbue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier. Enfin, le traitement des sols en place est une technique très économique, notamment du fait de la durée plus courte des travaux par rapport à une solution avec décaissement.

II.3.1.3 Avantages écologiques et environnementaux

Le travail à froid réduit sensiblement la pollution et le rejet de vapeurs nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet une importante économie d'énergïe globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts ïndirects, des gênes à l'usager et aux riverains et une réduction de la

fatigue du réseau routier adjacent au chantier. La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des dsements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue à préserverl 'environnement.

II.3.2 Les inconvénients

- Utilisation d'un dosage important.
- Carbonatation de la chaux. [16]

II.4 Conclusion :

La stabilisation des sols à l'aide de ciment est une technique intéressante, pour des raisons économiques et environnementales, car elle permet d'éviter l'utilisation de matériaux d'emprunt provenant d'ailleurs. L'utilisation du ciment comme agent stabilisant dans diverses applications en ingénierie des sols est assez courante.

L'ajout du ciment permet essentiellement d'optimiser les performances mécaniques du sol. L'ampleur de ces optimisations dépend du dosage, de la nature du sol et du temps de cure.

L'ajout de petites quantités de ciment, c'est-à-dire jusqu'à 2%, modifie les propriétés du sol, tandis que de grandes quantités provoquent des changements substantiels de ces propriétés (Bell 2005).

Tout type de sol peut être stabilisé avec du ciment, à l'exception des sols contenant des matières organiques et des argiles à haute plasticité. Selon le comité ACI en (1997), les sols contenant plus de 2% de matériaux organiques ne sont pas appropriés pour la stabilisation avec le ciment, parce que les matériaux organiques peuvent prolonger ou entraver l'hydratation du ciment et finalement réduire la résistance.

Les conclusions des différents chercheurs déjà évoqués dans ce chapitre sur le rôle du ciment dans les propriétés de résistance au cisaillement ne sont pas tout à fait cohérentes ; Ainsi, dans les prochains chapitres, nous étudierons l'effet du Ciment Portland en termes de quantité et de durée de durcissement sur les propriétés mécaniques du sable limoneux.

Chapitre III :
Matériaux et dispositifs utilisés

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les matériaux utilisés et les procédures des essais effectués dans cette étude ; pour déterminer leurs paramètres physico-mécaniques.

On a commencé de réaliser des essais de reconnaissance les paramètres physiques des matériaux utilisés (sables et limon) ; En suite, on a déterminé les paramètres de compactage par l'Essai de Proctor Normal, quelque soit la masse volumique maximale et la teneur en eau optimal (W_{opt}), pour prendre-les en confédération dans la partie de préparation des échantillons.

Enfin, nous discutons la méthode du la préparation des mélanges adoptée, pour faire des essais mécaniques par l'essai de cisaillement directe, qui présentes des paramètres de résistance au cisaillement du sol, ainsi, l'angle de frottement interne(φ) et la cohésion (C).

III.2 Matériaux utilisés

Le sable limoneux utilisé dans cette recherche ont choisi à la lumière de deux études de master (Promo 2019 et 2020), la première intitulé sous le thème **d'Etude expérimentale sur les comportements mécaniques de sable limoneux renforcé par les fibres de verre**, et la deuxième intitulé sous le thème **d'Etude expérimentale sur les comportements mécaniques de sable limoneux traité par l'émulsion de bitume** ; c'est un mélange de deux sables (caractériser par différent morphologie (Roulé et anguleux))et un limon par des proportions qui ont donné des meilleurs résultats selon les recherches antérieurs .

III.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



Figure (3.1): Matériaux utilisés (a) Sable concassé, (b) Limon et (c) Sable de rivière.

III.2.2 Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est de type 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 :

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 (3.2) : Caractéristique de ciment CEM I 42.5 N SR3 LH (SPA BISKRA CIMENT).

III.3 Les essais au laboratoire

III.3.1 Analyse granulométrique

III.3.1.1 Analyse granulométrique par tamisage (NF P94-056)

III.3.1.1.1 Principe de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution relative des diamètres des grains d'un sol. ils sont testés selon la norme NF-P94-057, elle se fait par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments supérieur à 80 µm

L'essai consiste à fractionner des granulats au moyen d'une colonne de tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas, pour déterminer les dimensions des grains et les proportions de grains de même dimension (% pondéral).



Figure (3.3) : Analyse granulométrique par tamisage

III.3.1.1.2 Appareillage

Pou réaliser cette opération, nous avons utilisé les équipement suivant :

- Série de tamis de dimension des mailles entre 2 mm et 0,08 mm.
- Machine à tamiser (Vibro-tamis) et ca couvercle et réceptacle de fond pour dernier tamisât
- Balance
- Étuve

III.3.1.1.3 Mode opératoire :

- sécher le matériau à l'étuve à 105°C pendant 24 heures
- peser une masse de 2kg.
- Monter et Emboîter la colonne de tamis dans l'ordre décroissant de l'ouverture des mailles, puis ajouter le couvercle et le fond étanche qui permettra de récupérer des particules fines.

- Les résultats de l'analyse sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique ou l'on porte :
    - Les diamètres des particules en abscisse (graduation logarithmique).
    - Les pourcentages en poids des tamisages cumulés en ordonnée.

III.3.1.2 Analyse granulométrique par sédimentrometrie (NF P94-057)

III.3.1.2.1 Principe de l'essai

Lorsque les dimensions des particules sont inférieures à 80µm, le tamisage n'est plus possible alors on procède à l'analyse granulométrique par sédimentométrie. Le but de cette dernière est de déterminer les proportions relatives en poids des divers éléments d'un sol et de compléter l'analyse granulométrique par tamisage.

Cette opération consiste à disperser une suspension constituée par des particules de sol et à analyser leur décantation en fonction du temps. On ajoute en général un défloculant pour éviter la floculation des particules.

L'opération consiste à mesurer la densité de la suspension à l'aide d'un appareil, dit densimètre, en fonction du temps.

III.3.1.2.2 Appareillage

- Agitateur Mécanique : doit pouvoir réglée jusqu'à 10000 tr/min
- Agitateur Manuel : pour homogénéiser la suspension avant l'essai
- Eau distillée ou déminéralisée et défloculant : 440 cm3 d'eau + 60 cm3 défloculant
- Deux éprouvettes d'essai de 2000 cm3
- Densimètre
- Thermomètre
- Chronomètre



Figure (3.4) : L'exécution de l'essai de l'analyse granulométrique par sédimentation.

III.3.1.2.3 Mode opératoire

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

- **Exécution de l'essai**
  - Verser la suspension dans une éprouvette d'essai (N°1)
  - Rincez le récipient, l'axe et les palettes de l'agitateur par la solution (Eau+ défloculant)
  - Compléter jusqu'à 2000 cm3 par la solution (Eau+ défloculant)
  - Versé 2000 cm3 de la solution (Eau+ défloculant) dans l'éprouvette N°02
  - Plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propres dans l'éprouvette (N°2)
  - Introduire aussitôt le densimètre (t=0) et réaliser 4 lectures successives (à 15s, 30s, 1mn et 2mn) sans retirer le densimètre.
  - Retirer le densimètre et l'introduire dans l'éprouvette témoin pour nettoyer.
  - Réaliser ensuite les lectures aux temps indiqués en introduisant le densimètre dans la suspension 30s avant chaque lecture. Ce temps est suffisant pour stabiliser le densimètre.
  - Les lectures sont normalement réalisées à 30s, 1mn, 2mn, 5mn, 10mn, 20mn, 40mn, 80mn, 240mn et éventuellement à 24h. Après chaque lecture dans la suspension il faut réaliser une lecture de température dans l'éprouvette témoin.

- **Les résultats obtenus:**

Les propriétés des matériaux utilisés (sables et limon) sont montrées dans le tableau (3.1), même les courbes granulométriques des échantillons sont présentées sur la Figure (3.1).

Tableau (3.1) : Propriétés physique des matériaux utilisés

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

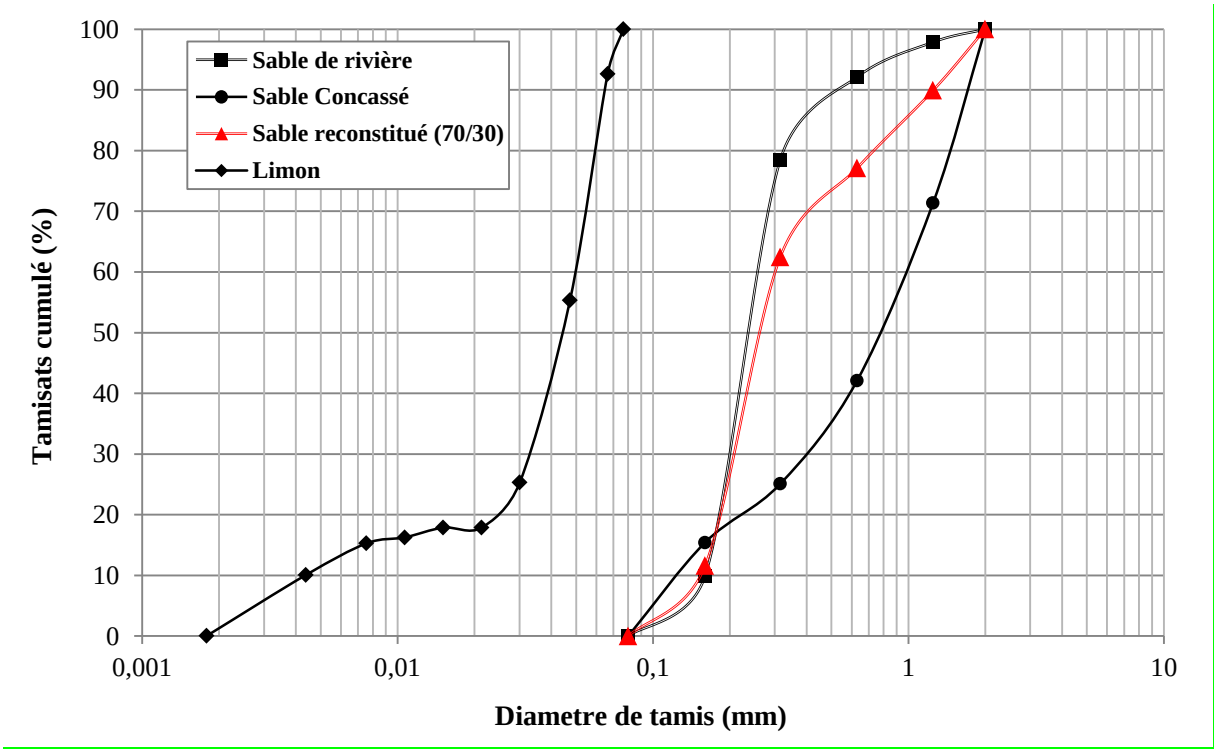


Figure (3.5): Courbes granulométrique des matériaux utilisés.

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

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

III.3.2.1 Principe

L'essai s'effectue en deux phases, la première est de rechercher la teneur en eau pour laquelle une rainure pratique dans sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés ; Puis, rechercher de

la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée est confectionné manuellement se fissure.

La limite de retrait est utilisée dans certaines régions ou le sol subit de fortes variations volumiques quand la teneur en eau change. Les essais de détermination de la limite de liquidité et de plasticité sont aussi utilisés pour la détermination du potentiel de variation volumique des sols. La limite de liquidité est parfois utilisée pour estimer les tassements dans des problèmes de consolidation.

III.3.2.2 Appareillage

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

III.3.2.3 Mode opératoire :

- **Limite de liquidité (WL) :**

Cet essai est effectué à l'aide de l'appareil de CASAGRANDE. On réalise l'essai plusieurs fois sur des échantillons du même sol (50gr) mais à des teneurs en eau différentes.

On étale l'échantillon sur la coupelle et on utilise l'outil à rainurer pour provoquer une ouverture franche en forme de V.



Figure (3.6) : Appareil de Gasagrande et la réalisation de rainure

On compte à Chaque fois le nombre de chocs nécessaire pour fermer la rainure sur 1 cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte et portera sur un graphe les points correspondants aux différents essais et on déterminera la teneur en eau correspondant à 25 coupes.

WL est définit par la teneur en eau qui correspond à la fermeture après 25 chocs de l'échantillon rainuré sur une hauteur déterminée, de 1cm.

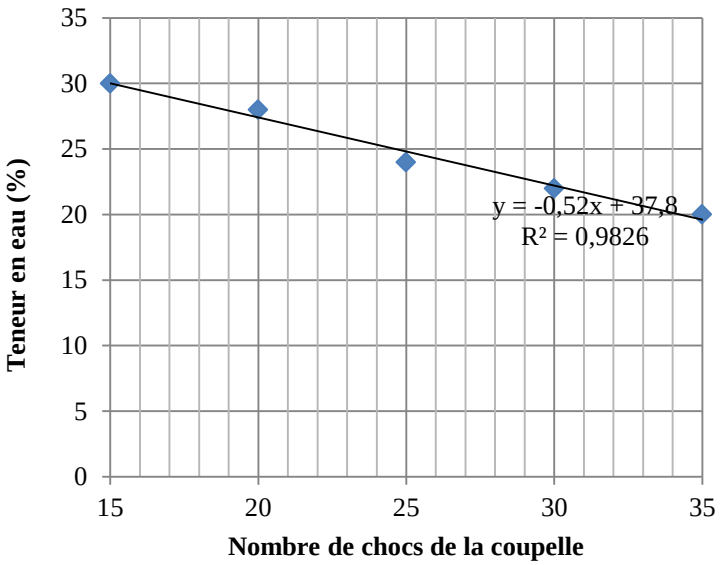


Figure (3.7) : Courbe de détermination de la limite de liquidité de l'échantillon.

- **Limite de plasticité (WP) :**

Pour détermine la limite de plasticité on roule l'échantillon en forme d'un cylindre qu'on amincit progressivement. Il est définit par la teneur en eau du sol à partir de laquelle, des petits rouleaux de 15cm de long formés avec une pâte de sol, se cassent en morceaux quand leurs diamètres atteignent 3mm. [8]

Il faut réaliser des rouleaux de 3 mm de diamètre sans pouvoir faire de rouleaux plus fins, et on exécute en générale deux essais pour détermine cette limite.



Figure (3.8) : Evaluation de diamètre du rouleau de sol

- **Indice de plasticité Ip:**

L'indice de plasticité noté **Ip**, est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser des sols fins.

C'est la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité : $I_p = W_l - W_p$

Le tableau III.2 présente les résultats obtenus suite à des essais répétitifs ; les résultats montrent que les échantillons ont une valeur d'indice de plasticité de 5.61, ceci permet de classer le limon utilisé dans notre étude, d'après la classification LCPC comme un sol peu plastiques.

Tableau (3.2) **:** Paramètres des limites d'Atterberg de limon utilisé.

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

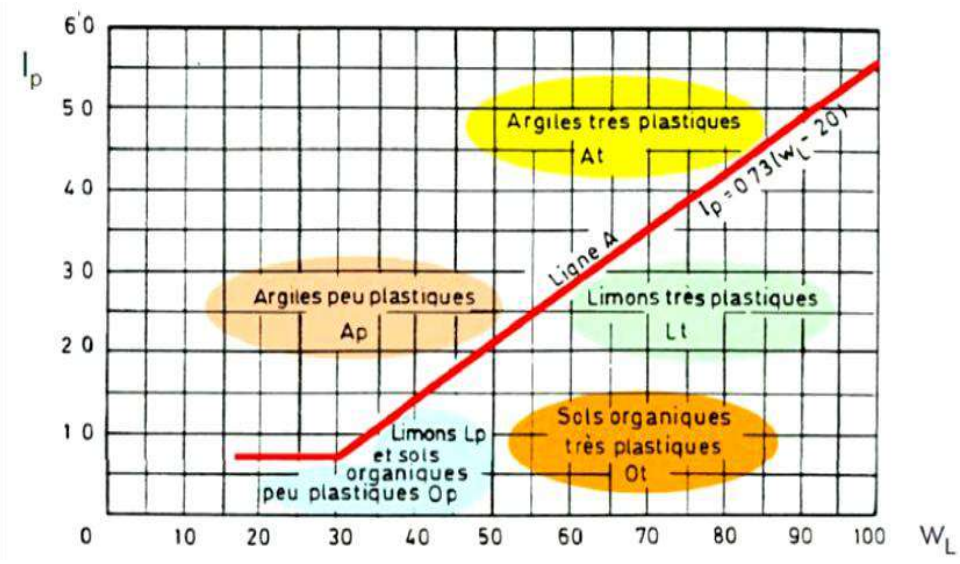


Figure (3.9) : Classification des sols fins selon le système USCS/LCPC.

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

III.3.3.1 Principe de l'essai

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

Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau. Les résultats sont consignés sur un diagramme qui note en ordonnée la masse volumique sèche, exprimée en kg/m3 et en abscisse la teneur en eau, exprimée en % pondéral. A partir de cet essai sont déterminées les caractéristiques PROCTOR (densité sèche maximale pour une teneur en eau optimale) du sol étudié.

III.3.3.2 Appareillage

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



Figure (3.10) : Matériel d'essai Proctor

III.3.3.3 Mode opératoire :

L'essai Proctor est réalisé en principe sur la fraction de terre qui passe au travers du tamis 5mm. Le compactage se fait en trois couches d'épaisseur égale sur toute la surface des couches avec un poids normalisé (dame Proctor) tombant d'une hauteur déterminé vingt-cinq fois.

Donc on prépare plusieurs kilos de sol sec après l'étuvage qui passe au travers du tamis 5mm, dans la première essais on humidifier 2,5 Kg de sol sec avec un certain pourcentage d'eau et malaxer le tout afin que tous les grains soit mouillées, ensuit, on met la première couche de sol dans le moule, en utilisant la dame on compacte le sol par 25 coups, puis la deuxième et la troisième couches de même façon ; après le compactage de la dernière couche, enlever la hausse, raser l'échantillon jusqu'au bord du moule.

Chaque opération terminée, on pèse le moule et l'échantillon puis on calcule le poids spécifique sec et la teneur en eau correspondant. et l'on porte les résultats sur un diagramme Proctor et on trace la courbe passant par les points expérimentaux.

- **Résultats**

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 l'Optimum Proctor.

La figure III. 3 représente les séries d'essais de Proctor normalisé, on a constaté que la densité sèche maximale est 20.68 KN/m3 et la teneur en eau optimale est de 14%.

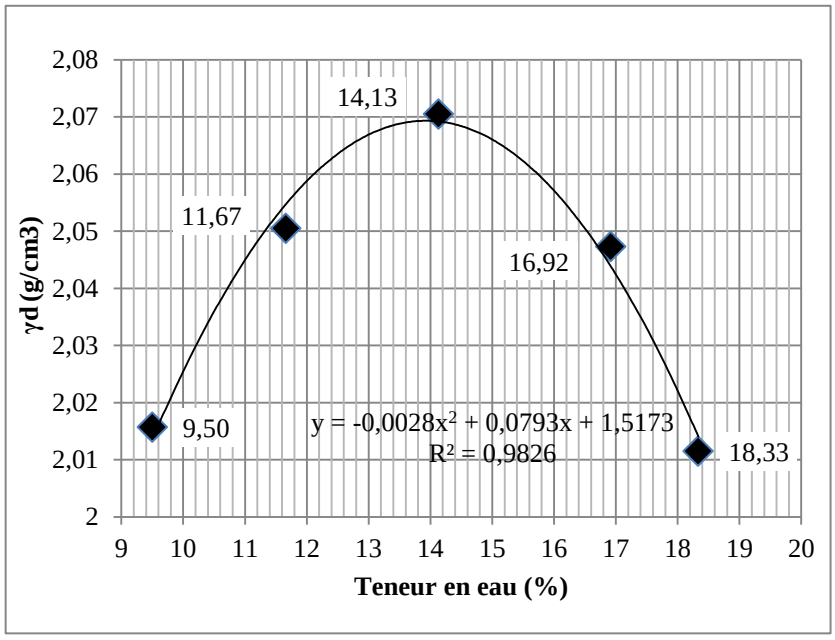


Figure (3.11): Poids volumique sec en fonction de la teneur en eau du sable.

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

III.3.4.1 Principe

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.

III.3.4.2 Appareillage

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

III.3.4.3 Mode opératoire:

- Peser le pycnomètre vide avec son tube capillaire soit m1
- Peser l'échantillon dans le pycnomètre soit m2
- Peser le pycnomètre contenant l'échantillon et l'eau soit m3
- Peser le pycnomètre plein d'eau soit m4. Afin qu'aucune bulle d'air ne reste accrochée aux particules on porte le pycnomètre+échantillon+eau à ébullition pendant au moins 1hr.

Les masses volumiques des grains solides des matériaux utilisées sont présentées dans le tableau (3.3)

Tableau (3.3) : Masses volumiques des grains solides

-	**Sable deRivière**	**Sable concassé**	**Limon**	**Sable Reconstituée**
G_s(g/cm^3)	2,646	2.741	2,741	2.396

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

III.3.5.1 Principe

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.

III.3.5.2 Appareillage

- Etuve à température réglable à 105°C et à 50°C.
- Balance

- Moule cylindrique métallique à un volume connu avec une dame de compactage (dans notre cas on a utilisé un moule Proctor normalisé).
- Entonnoir
- Règle à raser rigide en acier.

III.3.5.3 Mode opération

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

- **Détermination de la masse volumique minimale :**
  - Le matériau est en mise en place dans un moule à l'aide d'un entonnoir remplier par une quantité de matériau suffisante pour remplier le moule.
  - Relever verticalement l'entonnoir en assurant que l'hauteur de chute libre du matériau est presque nulle.
  - Enlever le sol surmontant le niveau supérieur du moule au moyen d'une règle à raser.
  - Eliminer les particules de sol pouvant subsister sur la surface extérieur du moule.
- **Détermination de la masse volumique maximale**
  - Le matériau est en mise en place dans un moule en trois couches puis après avoir versé chaque couche on compacte l'aide de la dame Proctor normal en 25 coups en respectant la hauteur de chute et en assurant une répartition équitable des coups sur la surface à compacter.
  - Enlever le sol surmontant le niveau supérieur du moule au moyen d'une règle à raser.
  - Eliminer les particules de sol pouvant subsister sur la surface extérieur du moule.
- **Mesure :**
  - Elles consistent à peser le moule et son contenu puis calculer les masses volumiques (minimale et maximal) et les indices de vides (e_{min} et e_{max}).
  - Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau (3.4) : Masses volumiques et indices de vides (minimaux et maximaux) de sol Utilisé.

-	**Sable Reconstituée**
$\mathbf{e_{max}}$**(-)**	0.852
$\mathbf{e_{min}}$**(-)**	0.547
ρ_{dmax} **(g/cm3)**	1.899
ρ_{dmin} **(g/cm3)**	1.461

III.3.6 Essai de cisaillement direct

III.3.6.1 Principe

Dans l'essai de cisaillement à la boîte, on cherche à provoquer la rupture de l'échantillon suivant un plan imposé. L'échantillon est placé dans constituée de deux parties qui peuvent glisser horizontalement l'une su l'autre.

On applique à l'échantillon un effort normal de compression N, verticalement par l'intermédiaire d'un piston et un effort tranchant T, horizontalement, en déplaçant la demi-boîte inférieure.

Plusieurs essais sont effectués en faisant varier (Ϭ) et en trace la courbe intrinsèque ; qui permet d'identifier les paramètres mécanique (φ : l'ongle de frottement et c : La cohésion) du sol.

III.3.6.2 Appareillage :

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



Figure (3.12) : La boite de cisaillement utilisé

III.3.6.3 Mode opératoire

- **Préparation de l'échantillon :**

L'essai est réalisé 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 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 :

Tableau (3.5) : Programme des essais effectués

		Contrainte Normal ((kPa)	Teneur en Ciment Portland (%)	Temps de la cure (Jrs)
Essai 1	3 Echantillons	100 ; 200 ; 300	0	0
Essai 2	3 Echantillons		0.5	
Essai 3	3 Echantillons		1.5	
Essai 4	3 Echantillons		2.5	
Essai 5	3 Echantillons		3.5	
Essai 6	3 Echantillons	100 ; 200 ; 300	0	7
Essai 7	3 Echantillons		0.5	
Essai 8	3 Echantillons		1.5	
Essai 9	3 Echantillons		2.5	
Essai 10	3 Echantillons		3.5	

Essai 11	3 Echantillons	100 ; 200 ; 300	0	14
Essai 12	3 Echantillons		0.5	
Essai 13	3 Echantillons		1.5	
Essai 14	3 Echantillons		2.5	
Essai 15	3 Echantillons		3.5	
Essai 16	3 Echantillons	100 ; 200 ; 300	0	28
Essai 17	3 Echantillons		0.5	
Essai 18	3 Echantillons		1.5	
Essai 19	3 Echantillons		2.5	
Essai 20	3 Echantillons		3.5	

La procédure de préparation a exécuté comme ce de suite : Le sable reconstitué a été préparé premièrement avec un mélange de trois matériaux essentiels avec leurs pourcentages optimal de 70% du sable de rivière, 30% du sable concassé et substitution de teneur en limon du sable concassé de 15%, ensuite, on a ajouté le ciment avec un teneur varient de 0 à 3.5% et le mélange a été malaxé manuellement de manière à ce que il ait un caractère homogène. Figure(3.13).

Deuxièmement, on a ajouté l'eau au mélange avec un teneur optimale de 14%. Le mélange bien a été malaxé manuellement de manière à ce que le mélange ait un caractère homogène. Enfin, tous les échantillons ont été compactés dans le moule de l'essai de cisaillement direct ayant les dimensions suivantes (60 x 60 x 25) mm. (Figure 3.14)

Enfin, pour étudier l'effet du temps de durcissement sur le comportement mécanique des mélanges préparés avec différentes teneur en ciment, tous les échantillons ont été laissés à durcir à la température ambiante (22°+2°) pendant 0, 7, 14 et 28 Jrs avant d'être testés. (Figure3.15)



Figure (3.13) : Préparation des mélanges (sable limoneux/ciment) à l'état sec.



Figure (3.14) : Préparation des mélanges avec une teneur en eau de 14%.

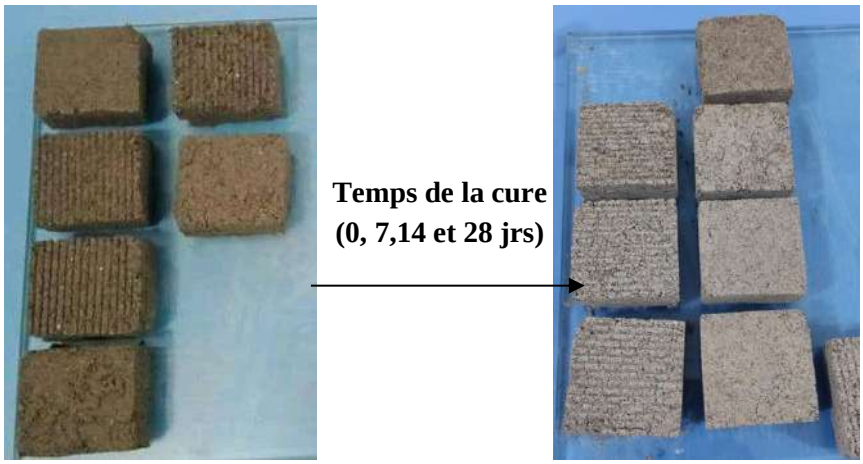


Figure (3.15) : Préparation des échantillons et laisser sécher

- **Mise en place de l'échantillon:**

Avant de poser l'échantillon dans la boite de Casagrande, nous mettons les deux boîtes correctement l'une sur l'autre et on a fixé-les avec des épingles en aluminium. Ensuite, nous avons vissé les deux vis en métal dans la moitié supérieure de la boîte à partir du ce moment qu'entre en contact avec la boîte inférieure et serrer les vis un quart de tour supplémentaire pour minimiser le frottement entre les deux plaques.

Après la préparation des échantillons, on reverse la boîte de Casagnarde et on fixe la boîte de cisaillement remplie du mélange sur le chariot mobile du bâti, puis en serrant les vis papillons et maintenir avec une main l'étrier de chargement en contact avec le piston de la boîte, régler en même temps l'horizontalité du bras de levier.

Le plateau est chargé des masses préalablement calculées afin d'appliquer la contrainte normale désirée (100, 200 et 300 kPa), puis positionner et bloquer l'anneau dynamométrique.

En placer un comparateur numérique verticalement sur la partie supérieure de l'étrier, pour mesurer le déplacement vertical et on régler les comparateurs numériques en zéro.

Puis, on dévisse de quelques tours les deux vis métalliques de la demi-boîte supérieure pour minimiser le frottement entre les deux plaques ; la demi-boîte supérieure reste bloquée verticalement par frottement avec le mélange et il n'y a plus aucun contact physique parasite (pas même par l'intermédiaire des vis) risquant de fausser les mesures de cisaillement.

- **Lancement de l'essai :**

Apres la mise en place de l'échantillon, l'essai pourra alors être considéré comme étant terminé et nous pouvons commencer l'essai de cisaillement.

Tout d'abord on régler la vitesse de cisaillement de (1 mm/min) dans l'essai, et on commence l'essai en parallèle avec le fichier Excel qui a relier avec les comparateur numériques par une boite d'acquisition réaliser par une carte d'arduino.

L'essai est s'arrêté automatiquement lorsque la durée du temps est terminée (10 min pour un déplacement de 10mm), donc on enlève la tension de l'anneau dynamométrique et on libère-le, puis, on dégage le comparateur de mesure de déplacement du piston, et en fin on démonte la boite de Casagrande qui contient l'échantillon cisaillé.

- **Expression des résultats**

Enfin, on obtient un fichier Excel contenant toutes les données sous forme de tableaux et de courbes, ce qui nous permet de déterminer les paramètres mécaniques de l'échantillon, que nous avons obtenu en traçant la droite de la courbe intrinsèque dans un repère orthonormé qui présente, en abscisses les contraintes verticales (σ_i) et en ordonnées les contraintes de cisaillements maximales (τ_{max}), sachant que :

$$\sigma = N/A \quad \text{et} \quad \tau = T/A$$

Avec :

N : effort de compression normale (vertical)

T : effort horizontal de cisaillement.

A : surface de l'échantillon.

D'une part, les pentes de ces droites représentent les tangentes des angles de frottements internes φ, et d'autre part, les cohésions C'obtiennent par l'intersection de ces droites avec l'axe des ordonnées (Figure III.12). La courbe de résistance au cisaillement est ainsi décrite par deux paramètres ; l'angle de frottement φ et la cohésion C.

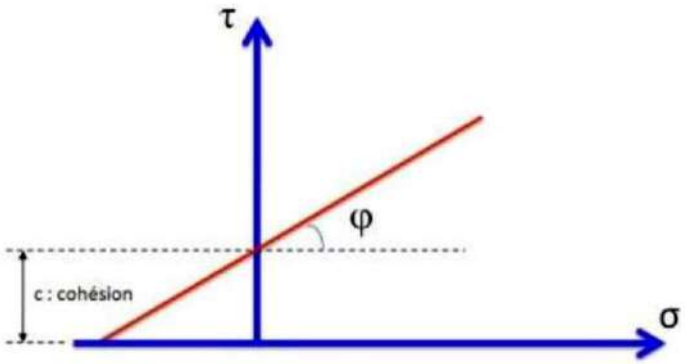


Figure (3.16): Droite Coulomb de l'essai de cisaillement direct (courbe intrinsèque).

L'interprétation des résultats de cet essai sont présentés dans le chapitre suivant sous forme des courbes et des tableaux de :

- Contraintes de cisaillement en fonction du déplacement horizontal ;
- Contraintes de cisaillement en fonction de contrainte normale (courbe intrinsèques).
- La résistance maximale, l'angle de frottement et la cohésion en fonction de la teneur en ciment et le temps de durcissement.

III.4 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'identification du matériau étudié, afin de mieux présenter leurs aspects physiques. Puis on a présenté les démarches de l'essai (préparation de l'échantillon ; la mise en place de l'échantillon et lancement de l'essais et à la fin l'expression des résultats) ; on a préparé et cisaillé 60 échantillons, avec une condition consolidé non drainé (CU) et estimer le comportement mécanique de sable limoneux traité par le ciment en différentes teneur de(0, 0.5, 1.5 , 2.5 et 3.5%), chaque échantillons a été soumis aux trois contraintes normales (100, 200 et 300 kPa) à une densité relative moyenne de 50%, pour étudier les effets de : la teneur en ciment et le temps de durcissement.

Cette étude examine trois paramètres principaux du comportement du sable limoneux traité par ciment :

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

Chapitre IV :
Résultats et interprétations

IV.1 Introduction :

Cette partie consiste à présenter les résultats de les essais concernant l'effet de la teneur en ciment et le temps du durcissement sur un sable limoneux reconstitué ; après l'identification des matériaux utilisés et détermination leurs paramètres physiques, on a préparé 60échantillons pour faire des testes de cisaillement direct avec une condition (CU) consolidé non drainé à l'aide d'un appareil de cisaillement direct, à une vitesse de cisaillement de 1 mm /min ; chaque échantillons a été soumis aux trois contraintes normales (100,200 et 300 kPa) et une densité relative moyenne de Dr=50%.

Quinze(15) spécimens ont préparés pour étudier l'effet de teneur en ciment sur le comportement mécanique de sable limoneux reconstitué à l'instant de l'ajout de l'eau et le ciment ; Quarante cinq (45) échantillons ont préparées avec une variété de teneur en ciment (0, 0.5 ,1.5, 2.5 et 3.5%), avec un teneur en eau optimale de 14%, pour estimer le comportement mécanique de sable limoneux traité avec le temps de durcissement ; les échantillons ont été laissés à durcir pendant 7, 14 et 28 jours à température ambiante du laboratoire (22°$\pm$2).

Les résultats de ces essais sont donnés sous forme de courbes de :

- Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement horizontal ;
- Contrainte de cisaillement en fonction de teneur en ciment ;
- l'angle de frottement et la cohésion en fonction de teneur en ciment ;
- Contrainte de cisaillement, l'angle de frottement et la cohésion en fonction de temps de durcissement.

IV.2 Effet de la teneur en ciment sur le comportement mécanique d'un sable limoneux à 0 jour de durcissement :

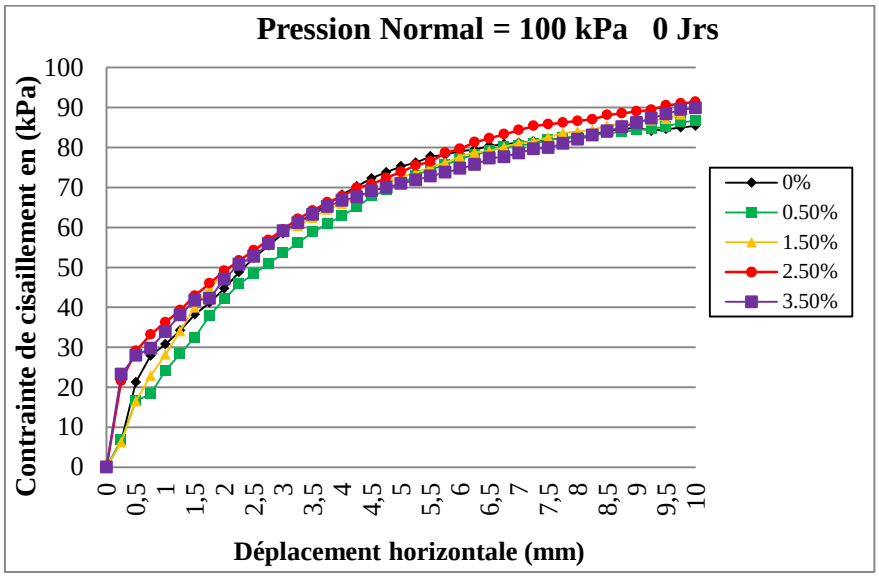
L'influence de la substitution de ciment sur le comportement mécanique de sable limoneux a été réalisée en termes de résistance au cisaillement sous différentes contraintes normales de 100, 200 et 300 kPa ; et ce immédiatement cisaillée après le processus de mélange du sable limoneux, du ciment et de la teneur en eau optimale, c'est-à-dire un temps de cure de 0 jour.

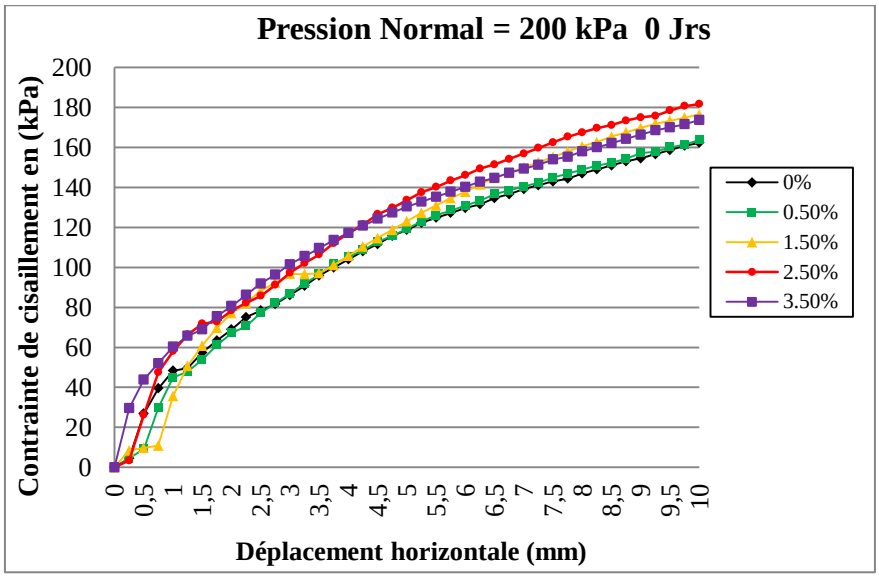
On extrait enfin les valeurs de chacune des valeurs de la contrainte au cisaillement maximale ainsi que de l'angle de friction et de la cohésion pour tous les échantillons étudiés.

IV.2.1 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. D'après les figures (IV.1 (a) et (b)), 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, on voit que la courbe de l'éprouvette avec une teneur en ciment de 2,5% est élevée par rapport aux autres courbes après un déplacement horizontal de 6 mm et 4,5 mm pour des contraintes de 100 et 200, respectivement.

D'autre part, la courbe (contraintes de cisaillement/déplacement horizontal) sous une pression de charge de 300 (figure IV.1 (c)), montre un palier de repos dans toutes les éprouvettes entre 1 et 2 mm de déplacement horizontal, et on observe également que l'éprouvette qui contenant 3,5% de ciment dépasse toutes les courbes jusqu'à 8 mm de déplacement, mais la valeur maximale de cisaillement la plus élevée est enregistrée pour l'éprouvette de 2,5% de teneur en ciment.


Pression Normal = 100 kPa 0 Jrs
Contrainte de cisaillement en (kPa)
Déplacement horizontale (mm)
0%
0.50%
1.50%
2.50%
3.50%


Pression Normal = 200 kPa 0 Jrs
Contrainte de cisaillement en (kPa)
Déplacement horizontale (mm)
0%
0.50%
1.50%
2.50%
3.50%

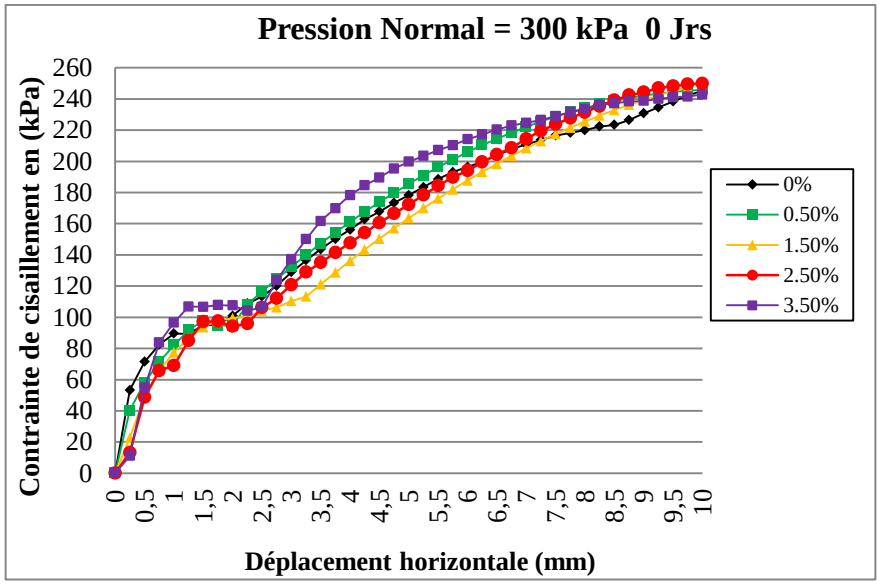

Pression Normal = 300 kPa 0 Jrs
Contrainte de cisaillement en (kPa)
Déplacement horizontale (mm)
0%
0.50%
1.50%
2.50%
3.50%

Figure (4.1) : courbes de contrainte au cisaillement/déplacement horizontal à 0 jour de durcissement.

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

À travers les courbes et le tableau qui sont fournis ci-dessous, on peut voir que 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.

Tableau (4. 1) : Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment.

0 Jrs	**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	176.38	181.57	173.69
300	245.34	245.89	249.75	249.94	242.79

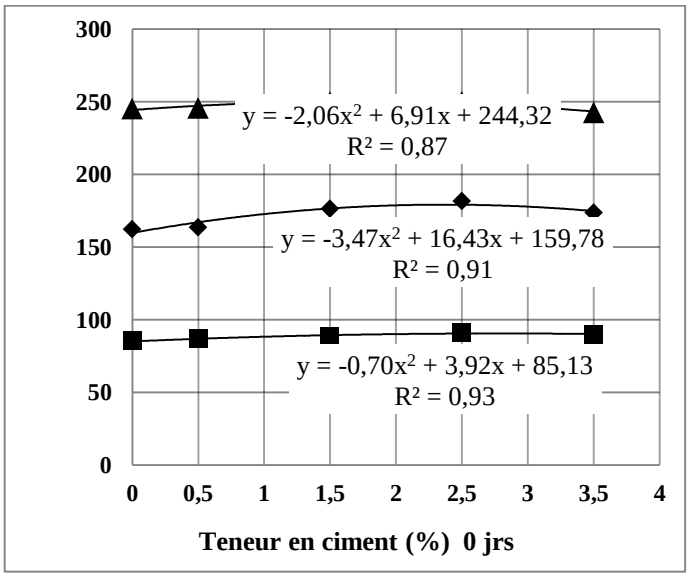


Figure (4.2) : Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment.

IV.2.2 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.

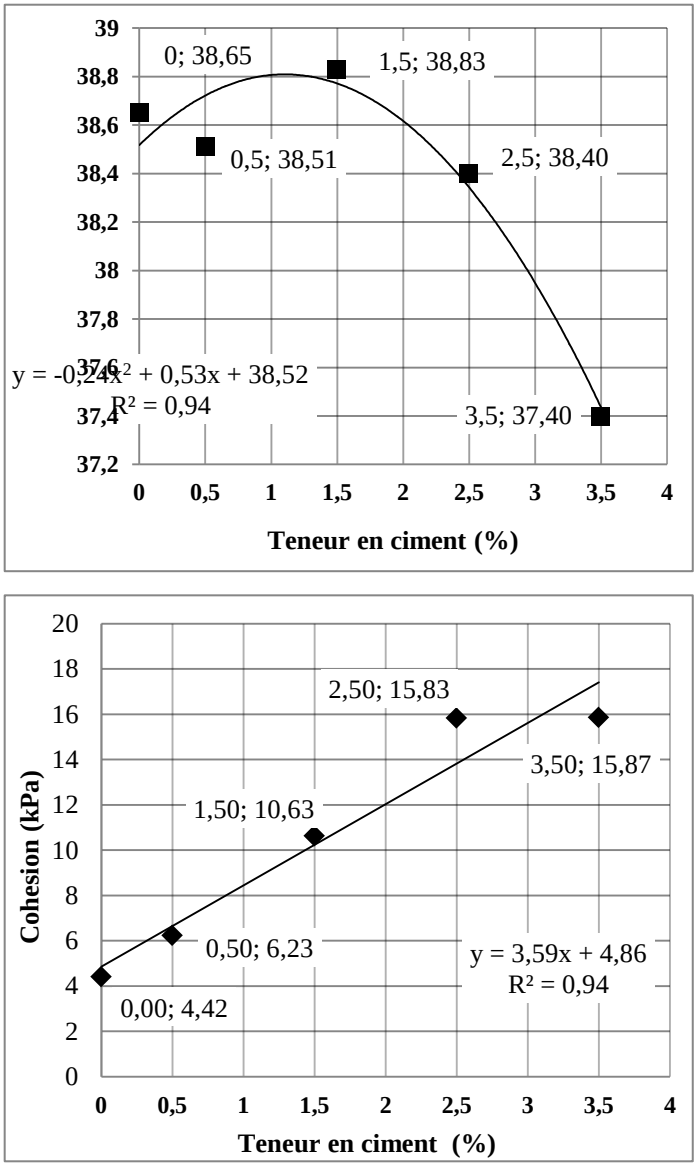


Figure (4.3) : PHI et C (0 jour)

Concernant la valeur de l'angle de frottement, il a été 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, 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.

IV.3 Effet de la teneur en ciment sur le comportement mécanique d'un sable limoneux à 7 jours de durcissement :

L'effet de la teneur en ciment substitué dans un sable limoneux sur le comportement mécanique a été étudié sous différentes contrainte normales de 100, 200 et 300 kPa ; Après un temps de durcissement de 7 jours, nos comparer les valeurs de la contrainte au cisaillement maximale, de l'angle d'abrasion et de la cohésion des échantillons traités au ciment avec celle du sable non traité.

.

IV.3.1 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.

Pour la première figure de la contrainte de 100 kPa, nous constatons que le sable non traité et traité avec la teneur en ciment de 2,5 et 3,5%, montre un seuil maximum après un déplacement horizontal spécifié, puis il diminue progressivement après cela, montre une certaine stabilité dans la valeur, contrairement aux échantillons avec la teneur en ciment de 0,5 et 1,5%, qui a enregistré une courbe ascendante jusqu'à la fin de l'expérience ; Identique à ce qui a été obtenu dans les expériences de cisaillement direct pour un temps de durcissement de 0 jours.

Concernant les courbes de cisaillement sous une contrainte de 200 kPa, nous constatons des courbes formellement identiques, où nous remarquons une augmentation de la valeur de la résistance au cisaillement jusqu'à ce que la valeur la plus élevée soit enregistrée, par la suite, elle diminue progressivement et présente une stabilité de la valeur jusqu'à la fin de l'expérience.

En ce qui concerne les courbes de résistance au cisaillement sous une contrainte de 300 kPa, la même observation est enregistrée avec les courbes de 200 kPa, de plus on enregistre un palier de repos pour les échantillons traités avec du ciment par rapport au sable totalement non traité.

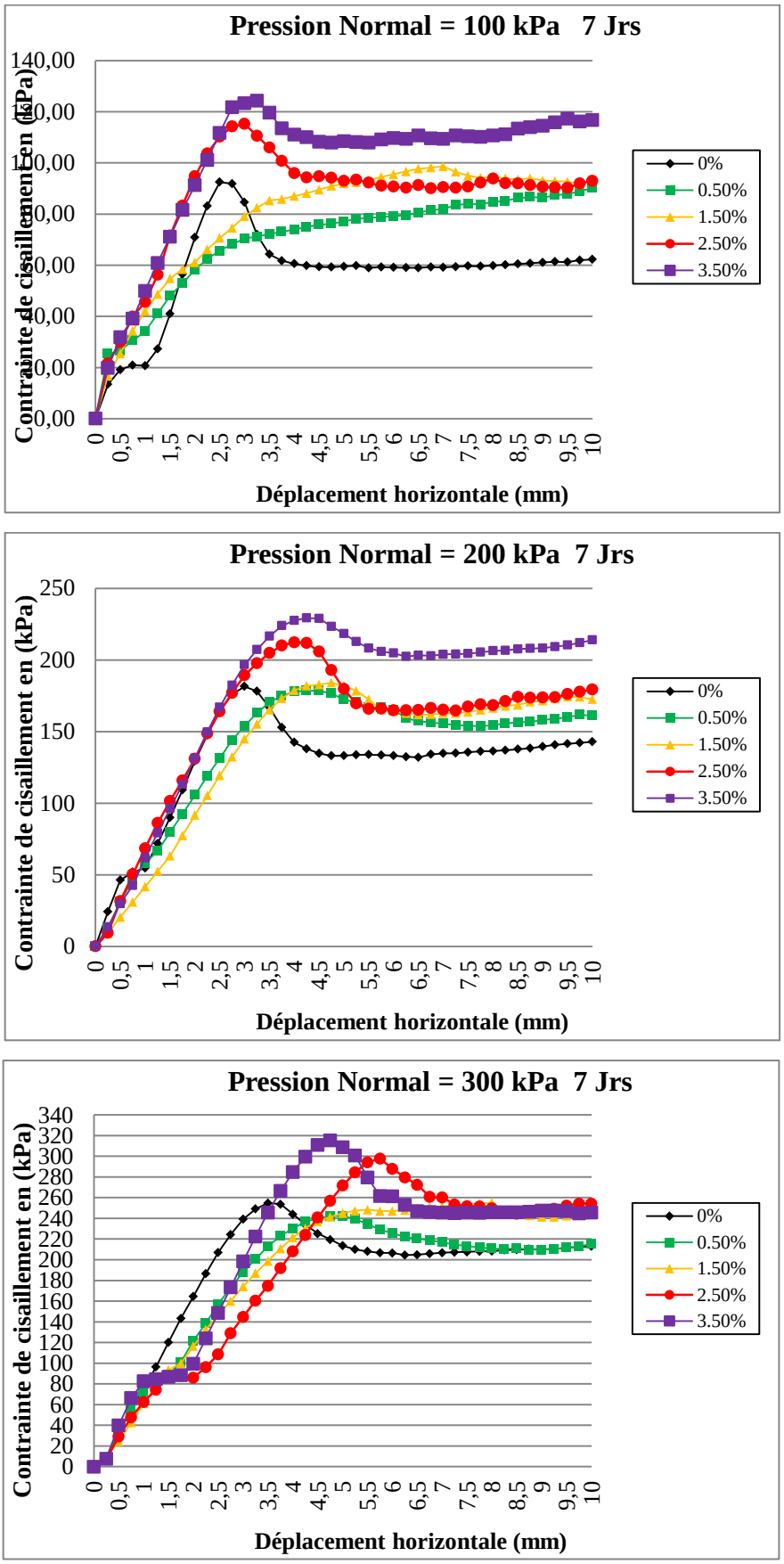
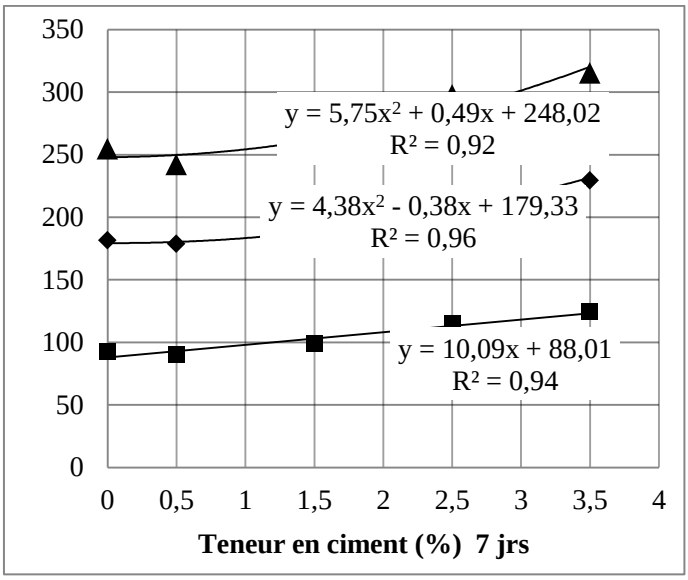


Figure (4.4) : courbes de contrainte au cisaillement/déplacement horizontal à 7 jour de durcissement

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, il est 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 ;

Tableau (4. 2) : Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment.

7 Jrs	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 (4.2) : Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment

IV.3.2 Effet de la teneur en ciment sur l'angle de frottement et la cohésion :

A travers la figure n°1, on remarque 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, estimée à 43,68°, ce qui représente une amélioration de 4.63° par rapport au sable non traité.

Concernant la cohésion, une augmentation linéaire de sa valeur avec l'ajout de ciment remarquée dans la figure n°2, 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.

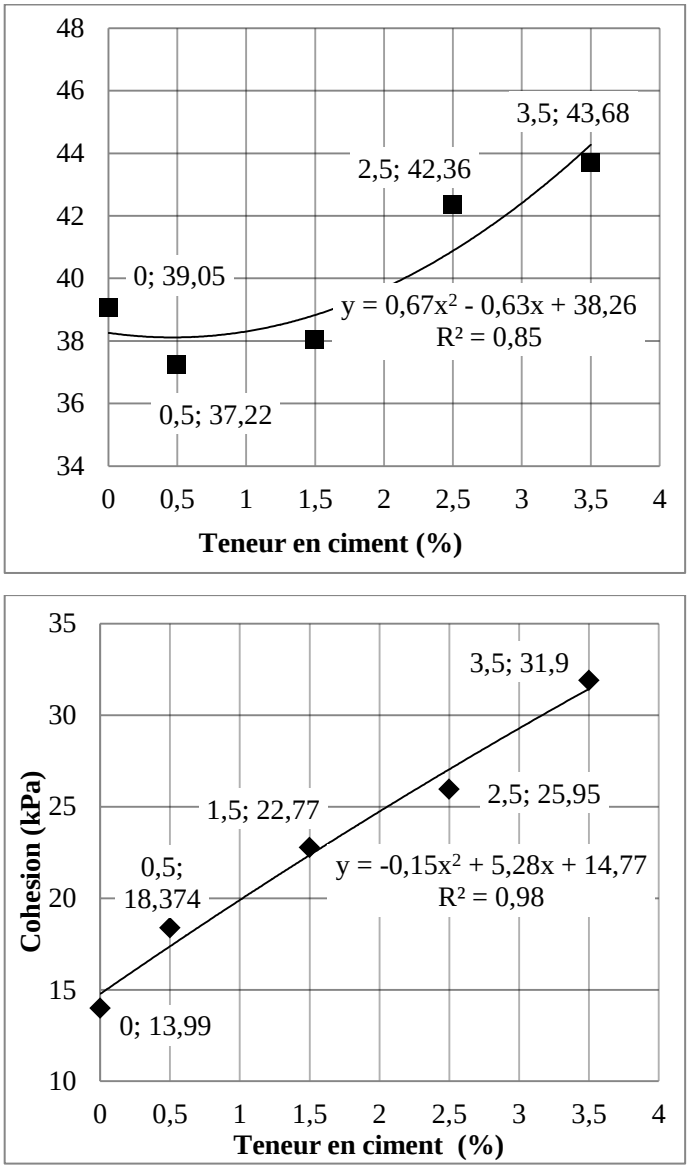


Figure (4.6) :PHI et C (7 jours)

IV.4 Effet de la teneur en ciment sur le comportement mécanique d'un sable limoneux à 14 jours de durcissement :

L'effet de la teneur en ciment substitué dans un sable limoneux sur le comportement mécanique a été étudié sous différentes contrainte normales de 100, 200 et 300 kPa ; Après un temps de durcissement de 14 jours, nos comparer les valeurs de la contrainte au cisaillement

maximale, de l'angle d'abrasion et de la cohésion des échantillons traités au ciment avec celle du sable non traité.

IV.4.1 Effet de la teneur en ciment sur la contrainte de cisaillement :

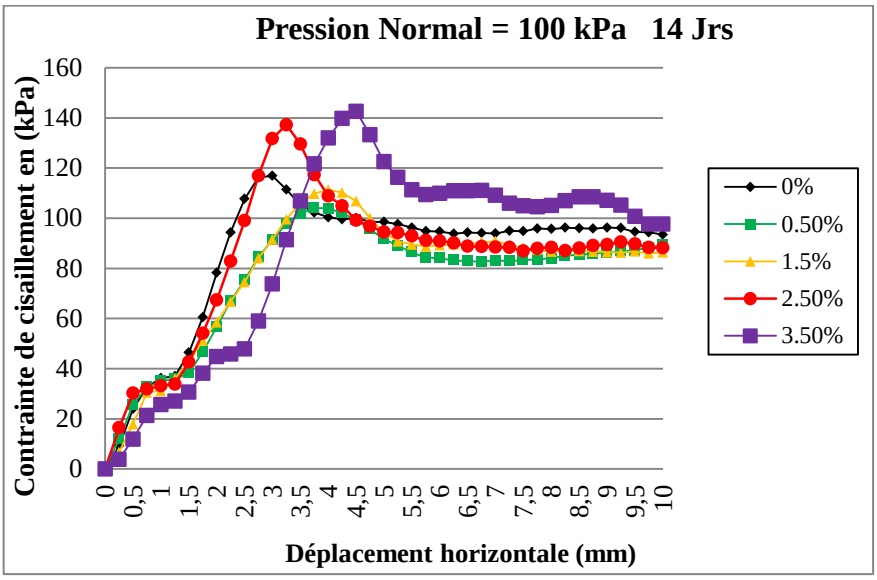
Au bout de 14 jours de durcissement, nous avons extrait ces résultats des éprouvettes cisaillées sous des contraintes de 100, 200 et 300 kPa, qui sont présentés dans la figure suivante.

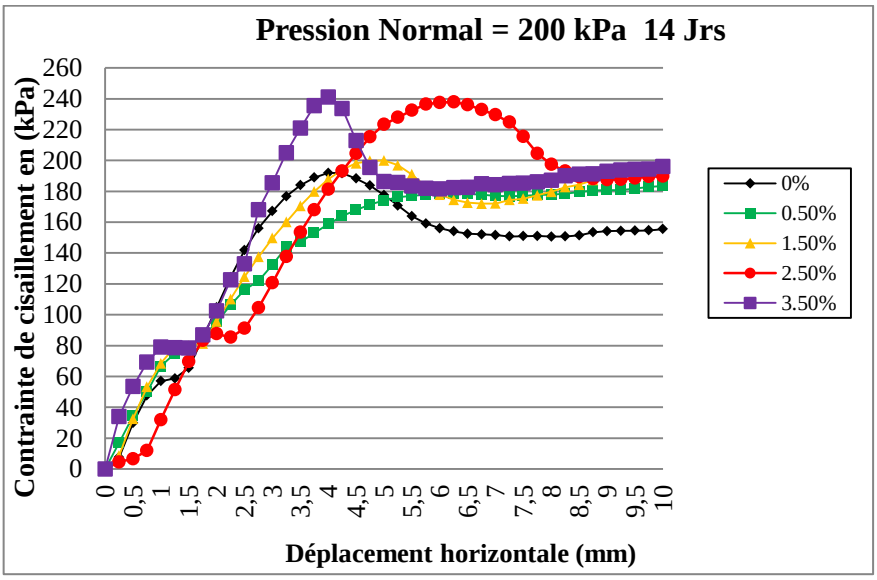
Nous avons remarqué sur la courbe de contrainte à 100 kPa de contrainte normale, qu'immédiatement après l'ajout de ciment à faible teneur de 0,5%, les valeurs de la contrainte de cisaillement diminuent, ensuite elle augmente légèrement après l'ajout de la teneur en ciment égale à 1,5%, malgré cela, les valeurs restent faibles au regard de ce qui est donné par les échantillons de sable non traité, une fois ajoutée la teneur en ciment égale à 2,5% nous enregistrons une augmentation des valeurs de résistance entre 2,75 et 4,5 mm de déplacement horizontal par rapport au sable non traité. Contrairement à la courbe de l'échantillon avec une teneur en ciment de 3,5%, qui augmente après une distance de déplacement horizontal égale à 3,75 mm jusqu'à la fin de l'expérience.

En ce qui concerne les courbes de contrainte de cisaillement sous une contrainte de 200 kPa, les mêmes observations sont faites en général, en plus de cela nous enregistrons une valeur résiduelle très proche de tous les échantillons traités et supérieure à la valeur du sable non traité.

Concernant les courbes de contrainte de cisaillement sous une contrainte de 300 kPa, nous notons des courbes cohérentes et de forme similaire, et nous enregistrons un palier de repos pour tous les échantillons, suivi d'une augmentation des valeurs jusqu'à atteindre le maximum de leurs contraintes, puis une réduction pour ensuite se stabiliser jusqu'à la fin de l'expérience.

Nous pouvons conclure que la courbe des échantillons avec une teneur en ciment de 2,5 et 3,5% sont très similaires et proches en valeur.


Pression Normal = 100 kPa 14 Jrs
Contrainte de cisaillement en (kPa)
Déplacement horizontale (mm)
0%
0.50%
1.5%
2.50%
3.50%


Pression Normal = 200 kPa 14 Jrs
Contrainte de cisaillement en (kPa)
Déplacement horizontale (mm)
0%
0.50%
1.50%
2.50%
3.50%

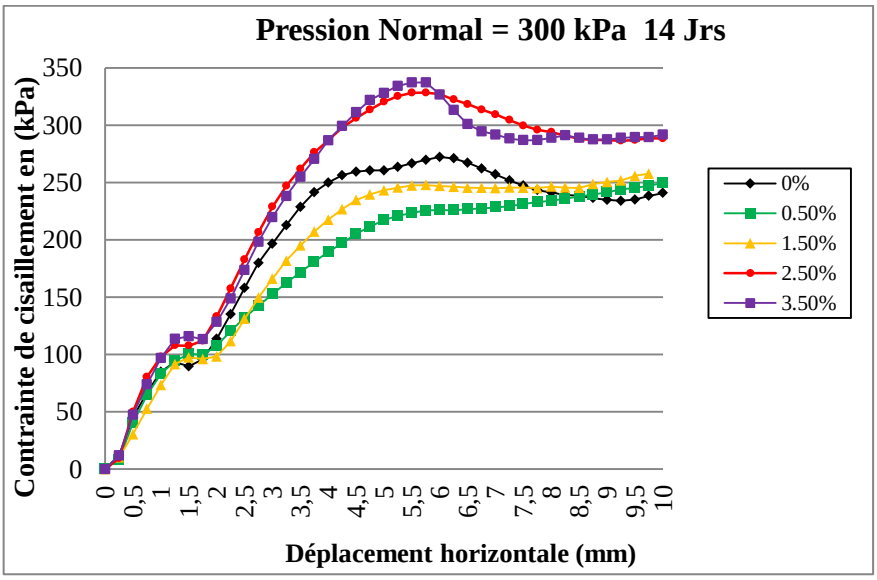

Pression Normal = 300 kPa 14 Jrs
Contrainte de cisaillement en (kPa)
Déplacement horizontale (mm)
0%
0.50%
1.50%
2.50%
3.50%

Figure (4.7) : courbes de contrainte au cisaillement/déplacement horizontal à 14 jour de durcissement

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, il a été 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.

Tableau (4. 3) : Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment.

14 Jrs	**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

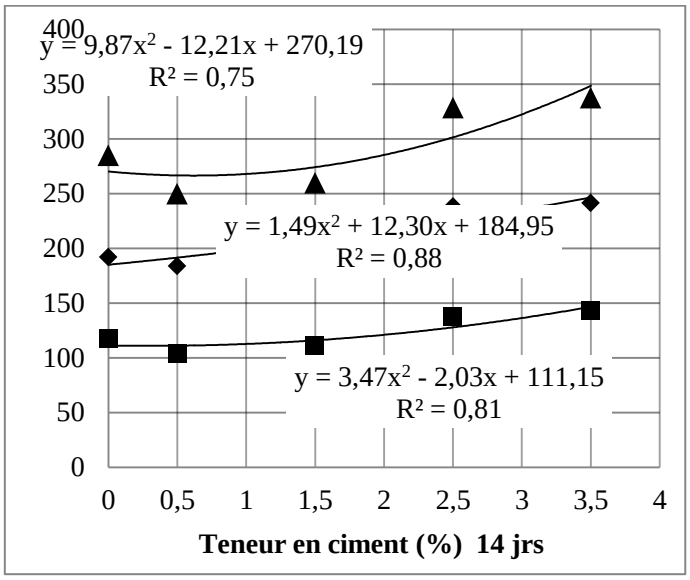


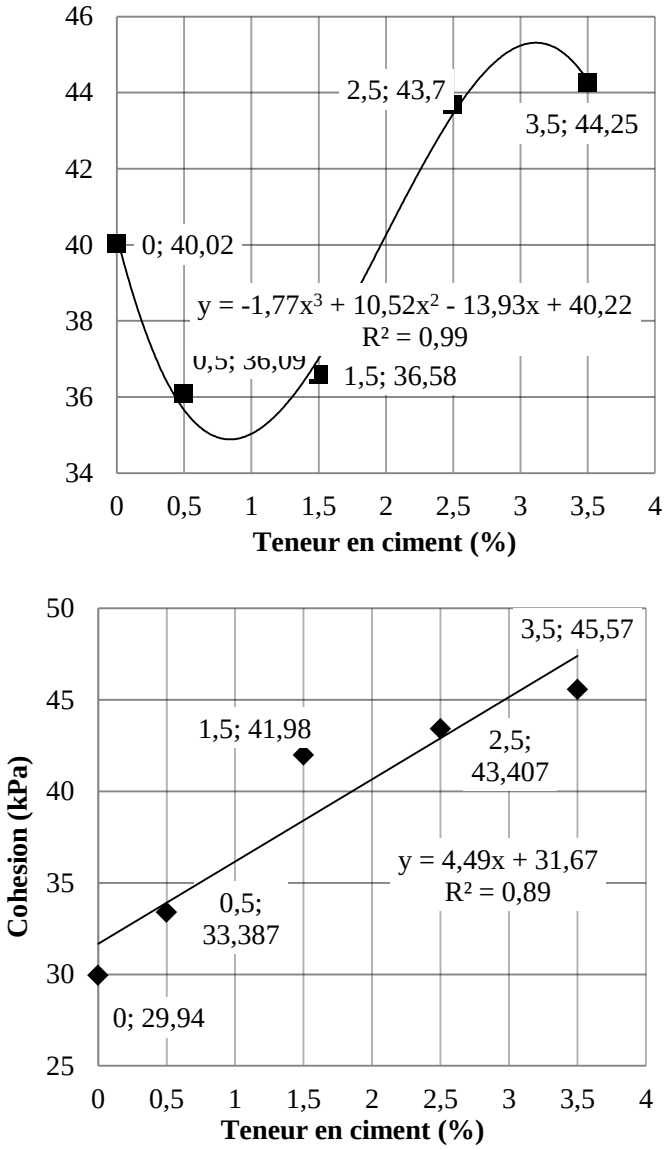
Tableau (4. 4) : Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment.

IV.4.2 Effet de la teneur en ciment sur l'angle de frottement et la cohésion :

A travers la figure n°1, on remarque 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.

Concernant la cohésion qui a présentée dans la figure n°2, 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.



Figure(4.9) : PHI et C (14 jours)

IV.5 Effet de la teneur en ciment sur le comportement mécanique d'un sable limoneux à 28 jours de durcissement :

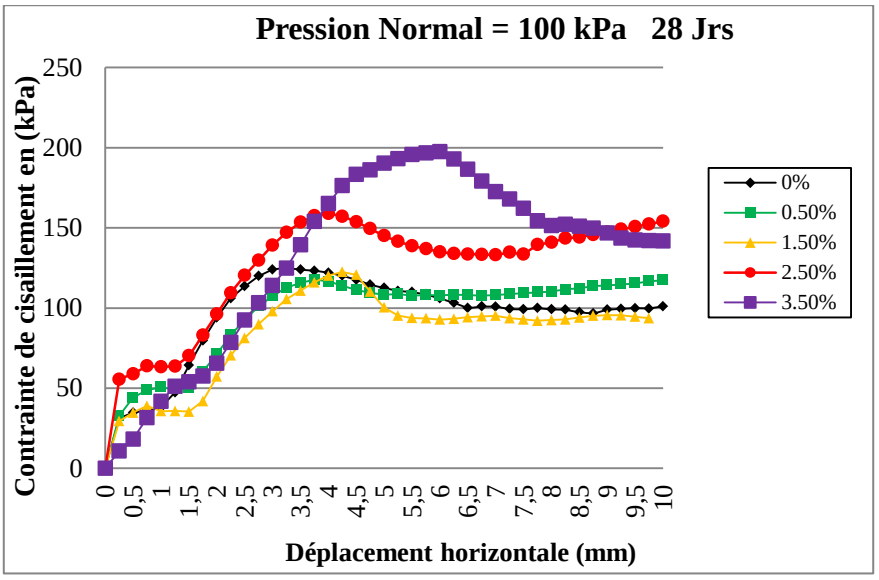
L'effet de la teneur en ciment substitué dans un sable limoneux sur le comportement mécanique a été étudié sous différentes contrainte normales de 100, 200 et 300 kPa ; Après un temps de durcissement de 28 jours, nos comparer les valeurs de la contrainte au cisaillement

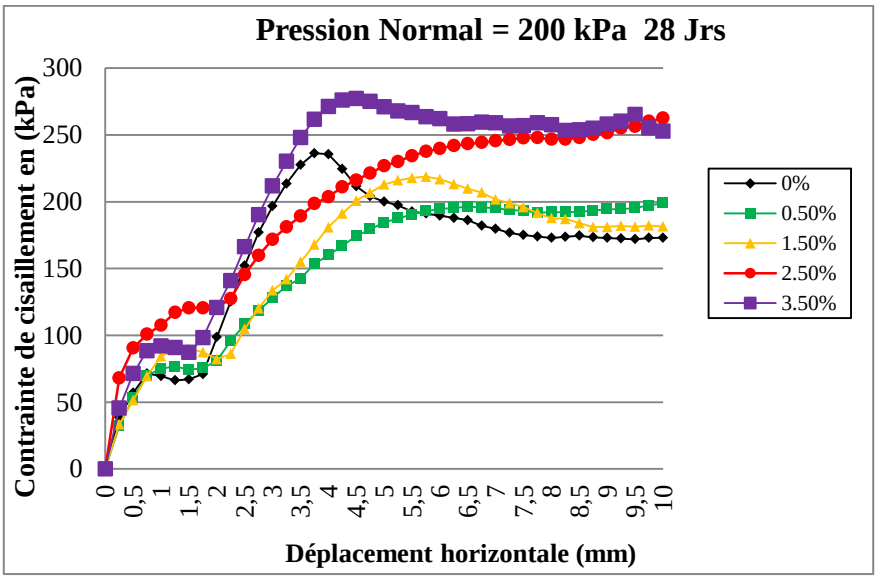
maximale, de l'angle d'abrasion et de la cohésion des échantillons traités au ciment avec celle du sable non traité.

IV.5.1 Effet de la teneur en ciment sur la contrainte de cisaillement :

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

En général, les courbes sont identiques sous toutes les pressions 100, 200 et 300 kPa, où une diminution est enregistrée dans les courbes de contrainte de cisaillement des échantillons traités avec 0 et 1% de teneur en ciment par rapport au sable non traité, et une augmentation significative pour les courbes des échantillons traités avec 2 et 3% de teneur en ciment, où les valeurs les plus élevées sont enregistrées pour la courbe de 3% de teneur en ciment.





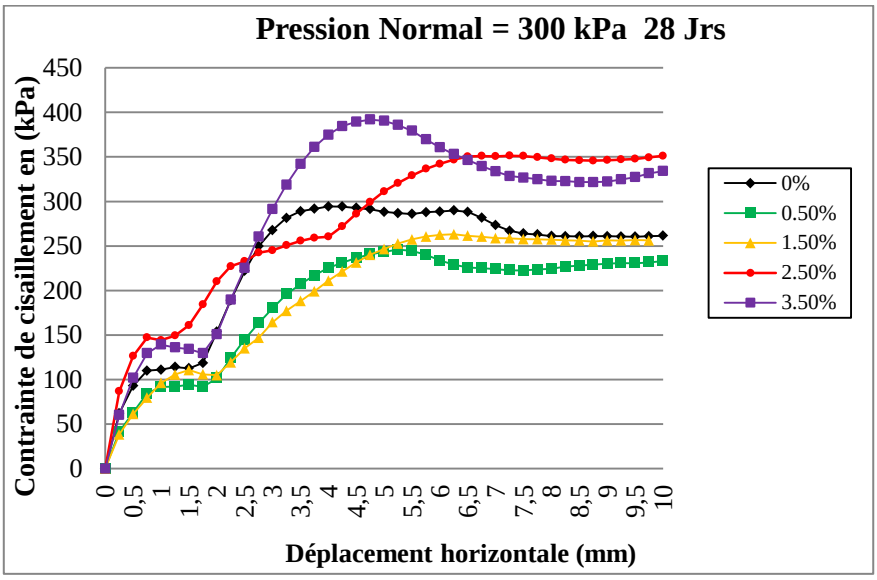


Figure (4.10) : courbes de contrainte au cisaillement/déplacement horizontal à 28 jours de durcissement

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, il a été 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.

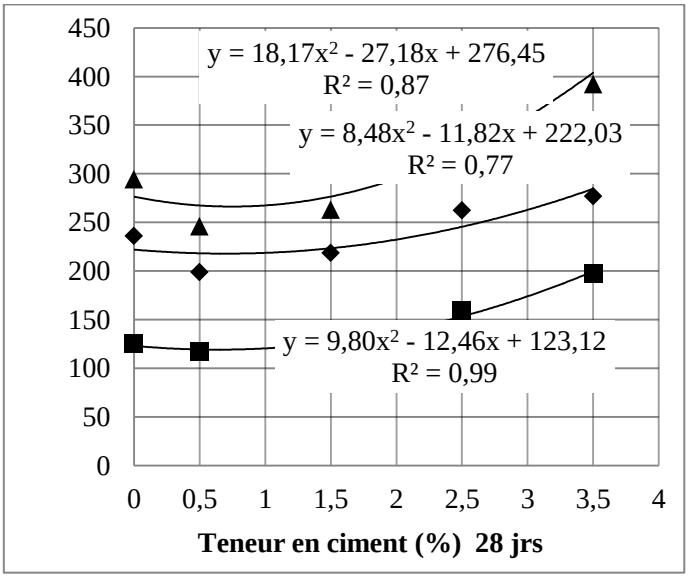


Tableau (4. 4) : Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment.

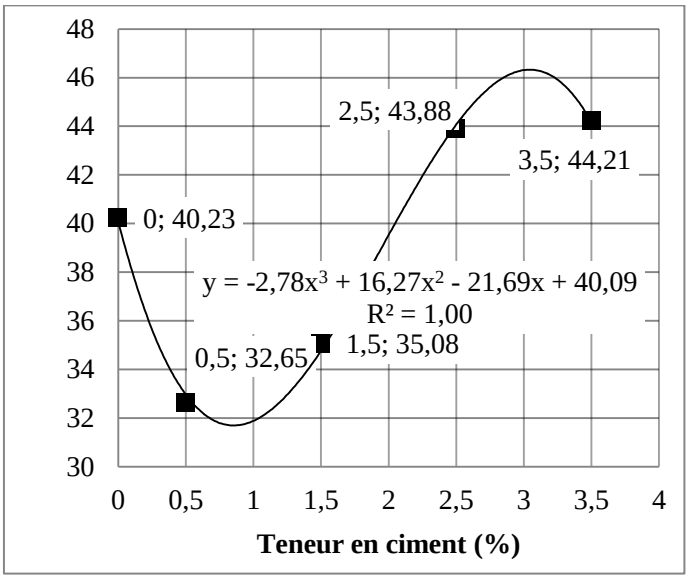
Tableau (4. 4) : Evaluation de la contrainte maximale en fonction de la teneur en ciment.

14 Jrs	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

IV.5.2 Effet de la teneur en ciment sur l'angle de frottement et la cohésion :

A travers la figure n°1, on remarque 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.

Concernant la cohésion qui a présentée dans la figure n°2, 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.



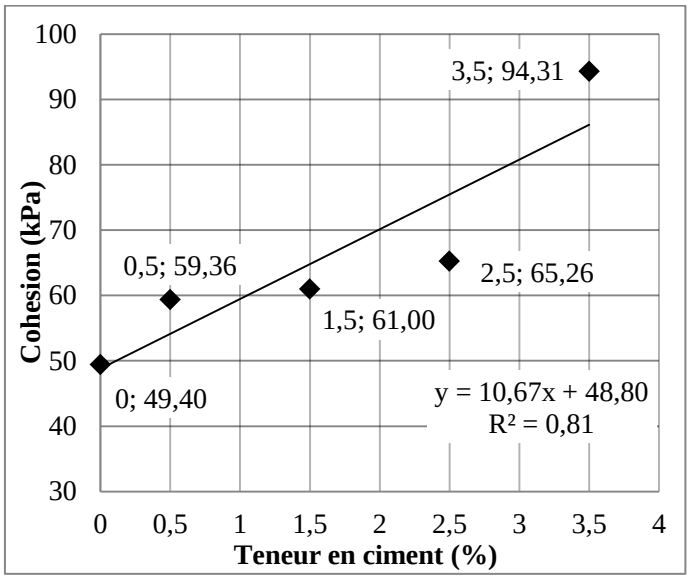


Figure (4.12) :PHI et C (28jours)

IV.6 Effet du temps de durcissement sur le comportement mécanique d'un sable limoneux:

Suite à l'obtention des résultats précédents pour tous les échantillons non traités et traités avec différentes teneurs en ciment de 0 à 3% et étudiés sous des contraintes normales de 100, 200 et 300 kPa, et afin d'analyser l'effet du temps de durcissement sur la contrainte de cisaillement du sable limoneux traité, qui a été testé après 0, 7, 14 et 28 jours de durcissement.

IV.6.1 Effet du temps de durcissement sur la contrainte de cisaillement

Nous avons 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.

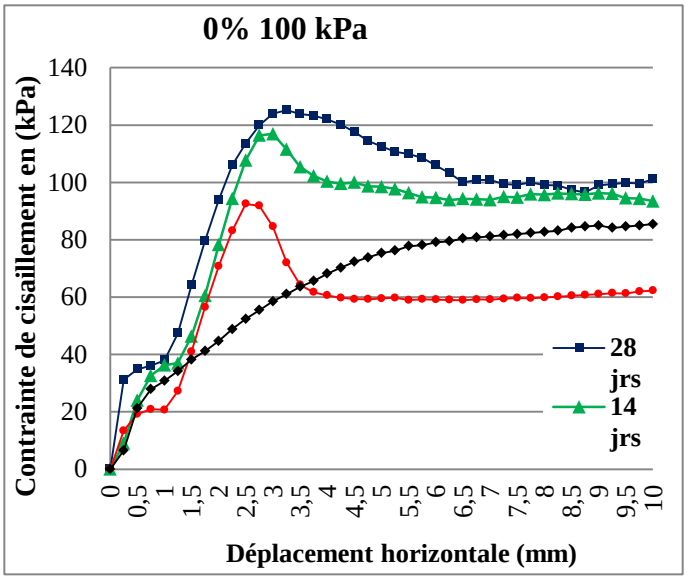
- **A 100 kPa de contrainte normale:**

Les figures suivantes montrent les 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. Nous allons donc examiner chaque courbe séparément.

Pour le sable limoneux non traité (0% de ciment) ;

À 0 jour de cure, on a enregistré une augmentation graduelle de la courbe jusqu'à la fin. Contrairement aux courbes de 7, 14 et 28 où une augmentation graduelle a été observée au début du déplacement, puis une stabilisation et la formation d'un palier de repos, suivie d'une augmentation rapide de la résistance au cisaillement jusqu'au pic qui est enregistré entre 2 et 3.5 mm de déplacement horizontal, puis une diminution graduelle et une stabilité des valeurs

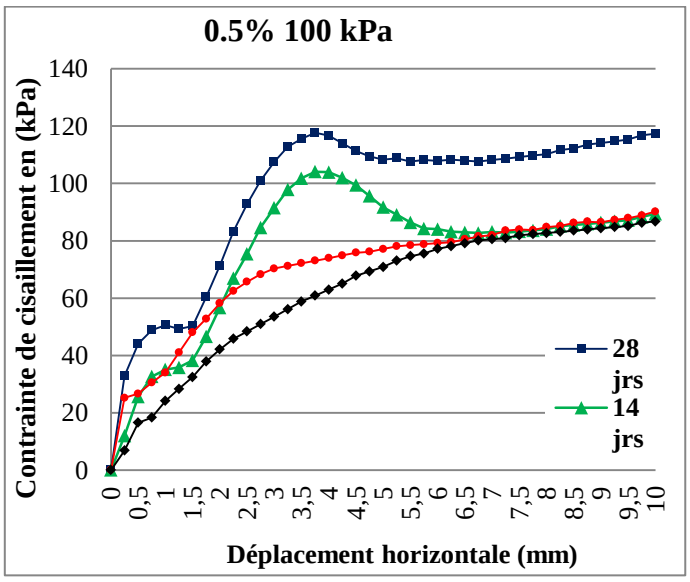
jusqu'au final cisaillement, en revanche on notera que la courbe de 7 jours est inférieure à 0 jours du début de la diminution jusqu'à la fin.



Pour le sable limoneux traité à 0,5 % ;

À 0 jour de durcissement, la courbe a augmenté progressivement jusqu'à la fin. Et à 7 jours de durcissement, on a observé une augmentation progressive de la résistance au début par rapport à 0 jour, mais avec une fin presque identique à celle de la première courbe.

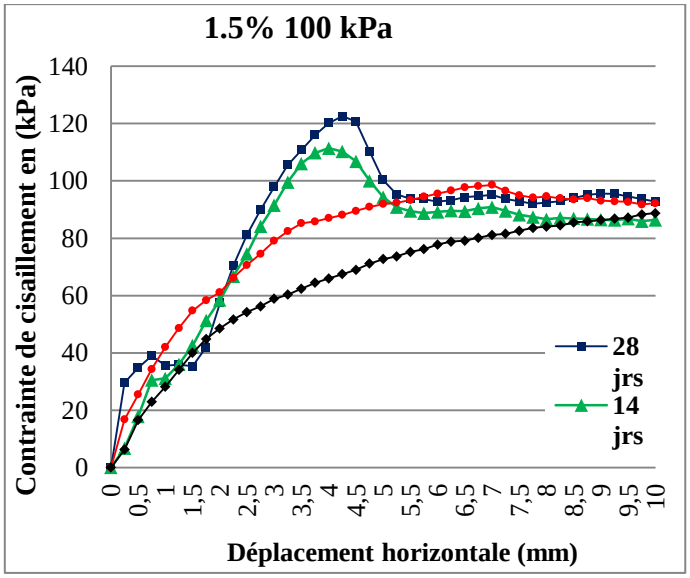
La tendance est similaire pour les courbes à 14 et 28 jours, il y a une augmentation puis un pic à chaque période et enfin une diminution, la courbe de 14 jours ayant presque la même tendance finale que les courbes de 0 et 7 jours, sauf que la courbe à 28 jours est significativement plus élevée dans les valeurs résiduelles.



Pour le sable limoneux traité à 1,5 % ;

Aux jours 0 et 7 nous avons obtenu la même forme que la trajectoire de la courbe progressivement croissante, ainsi la courbe à 7 jours était plus haute que la courbe à 0 jours.

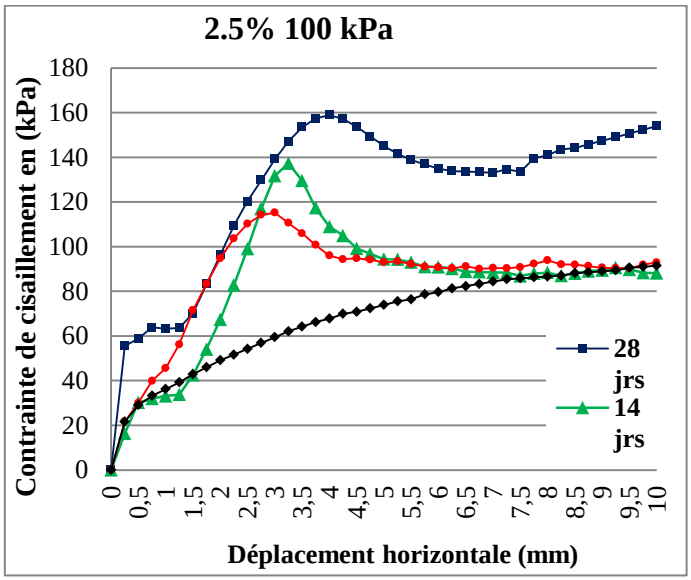
Quand à 14 et 28 jours on constate une augmentation de la résistance car ils ont la même tendance et le même pic dans chaque cas, de plus la courbe à 28 jours était plus grande que la courbe à 14 jours et sa fin était identique à la fin de la courbe de 7 jours.



Pour le sable limoneux traité à 2,5 % ;

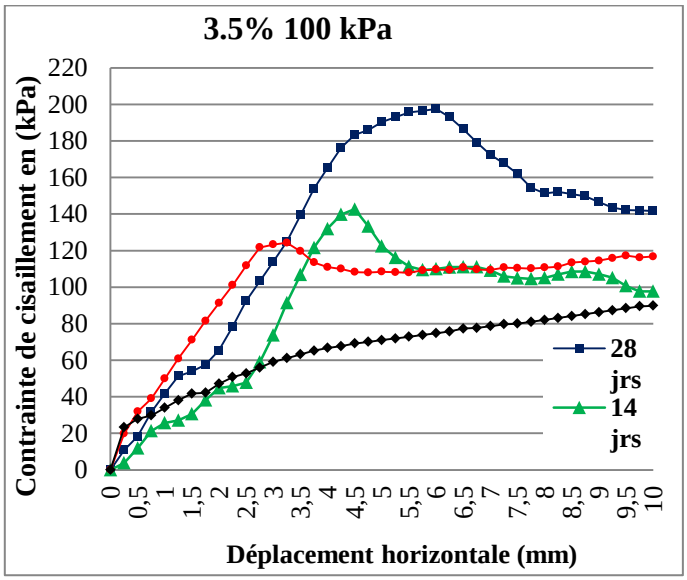
Dans les échantillons à 0 jours de durcissement, il y a toujours une augmentation de la contrainte de cisaillement jusqu'à la fin de l'expérience ; Ensuite, après 7 jours de durcissement, l'échantillon se dirige vers le seuil et ensuite diminue progressivement jusqu'à la stabilité à la fin de l'expérience, mais pour les échantillons testés après 14 jours de durcissement, une diminution de la valeur de la contrainte au début du déplacement horizontal par rapport à l'échantillon testé en 7 jours, jusqu'à ce qu'un seuil plus élevé soit enregistré et ensuite immédiatement diminué pour être similaire aux valeurs de la courbe de 7 jours .

Quant aux échantillons durcis après 28 jours de durcissement, on remarque une courbe supérieure aux autres courbes, même après avoir enregistré une valeur maximale, la courbe diminue légèrement et se relève jusqu'à la fin de l'expérience.



Pour le sable limoneux traité à 3,5 % ;

A partir de la courbe, à 0 jours, on obtient une croissance lente et semi-linéaire de la courbe jusqu'à la fin de celle-ci. De même, les échantillons cisaillés à 7 jours présentent des valeurs de contrainte de cisaillement plus élevées que les autres courbes au début du processus de cisaillement jusqu'à 3 mm du déplacement horizontal, suivies d'une légère diminution, puis fixes jusqu'à la fin de l'expérience. Cependant, après 28 jours de durcissement, on observe que les échantillons présentent une résistance au cisaillement plus importante jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur maximale, et un seuil est enregistré après 6 mm de déplacement horizontal, pour ensuite diminuer immédiatement après.



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.

Nous avons 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.

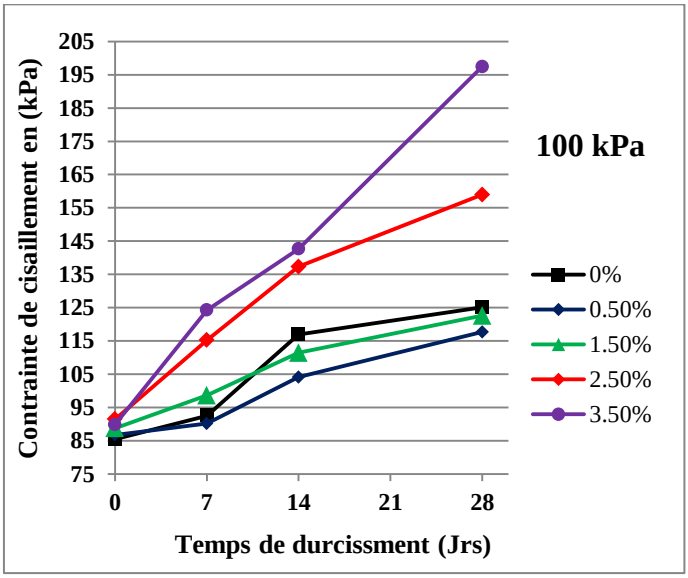


Figure (4.13) : représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 100 kpa

100 kPa	**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

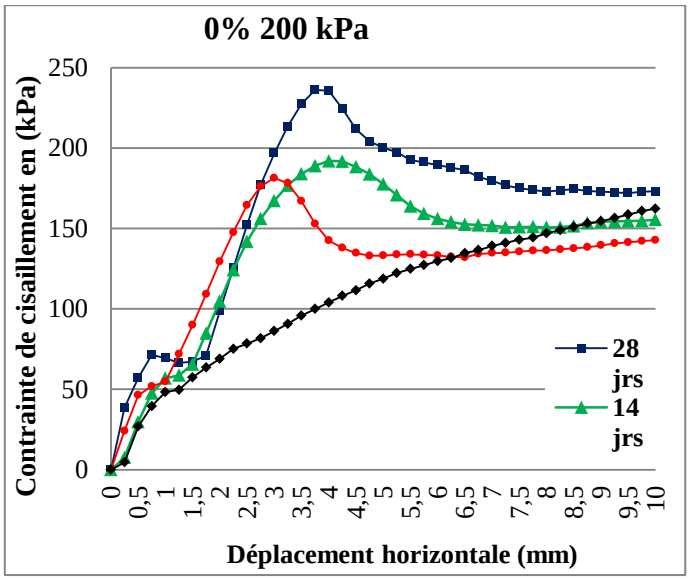
Tableau (4.5) : représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 100 kpa

A 200 kPa de contrainte normale:

Les figures suivantes montrent les 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. Nous allons donc examiner chaque courbe séparément.

Pour le sable limoneux non traité (0% de ciment) ;

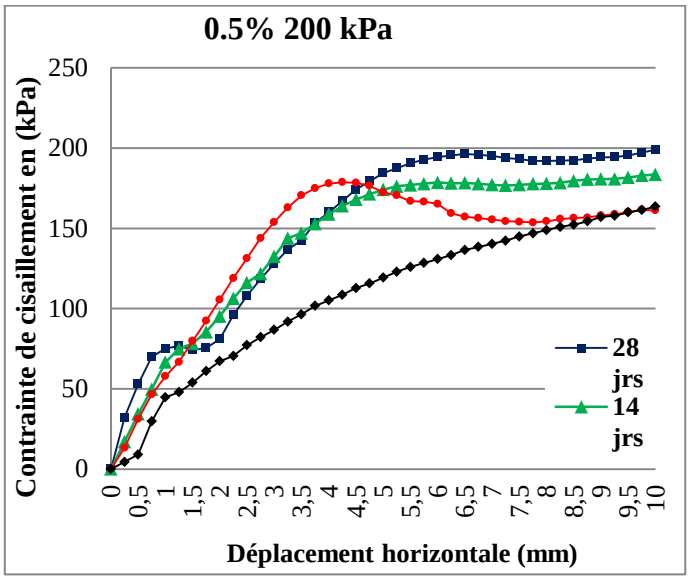
La courbe a enregistré une augmentation progressive au jour 0 du traitement jusqu'à la fin. Contrairement aux courbes 7, 14 et 28 où l'on observe une augmentation progressive au début du déplacement, puis une stabilisation et réalisation d'un palier sukoon, suivi d'une augmentation rapide de la résistance au cisaillement jusqu'à enregistrer un pic entre 2 et 4 mm de déplacement horizontal, puis une diminution progressive et une stabilité des valeurs jusqu'au cisaillement final, en revanche on constate que la fin de la courbe 0 est légèrement supérieure aux courbes de 7 et 14 jours.



Pour le sable limoneux non traité (0.5% de ciment) ;

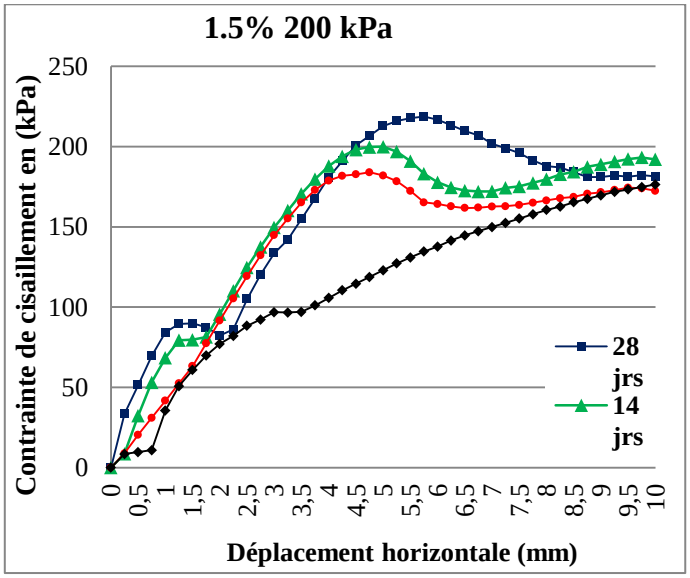
À 0 jour de durcissement, la courbe a augmenté progressivement jusqu'à la fin.

Tandis que la courbe de 7 jours de solidification augmentait jusqu'à ce qu'un pic apparaisse après quoi elle décroît jusqu'au bout ; Alors que les échantillons pour 14 et 28 jours étaient presque identiques, jusqu'à ce que la courbe à 28 jours soit légèrement supérieure à 14 jours, 4 mm après le déplacement horizontal



Pour le sable limoneux non traité (1.5% de ciment) ;

Pour les échantillons à 0 jour de durcissement, la contrainte de cisaillement augmente constamment jusqu'à la fin de l'expérience ; Pour les échantillons traités avec des durées de durcissement (7, 14 et 28 jrs), les courbes ont pris la même direction et forme, où nous avons enregistré l'apparition d'un pic dans chacune d'entre elles, sachant que plus le temps de traitement est long, plus la valeur de la contrainte maximale est élevée.

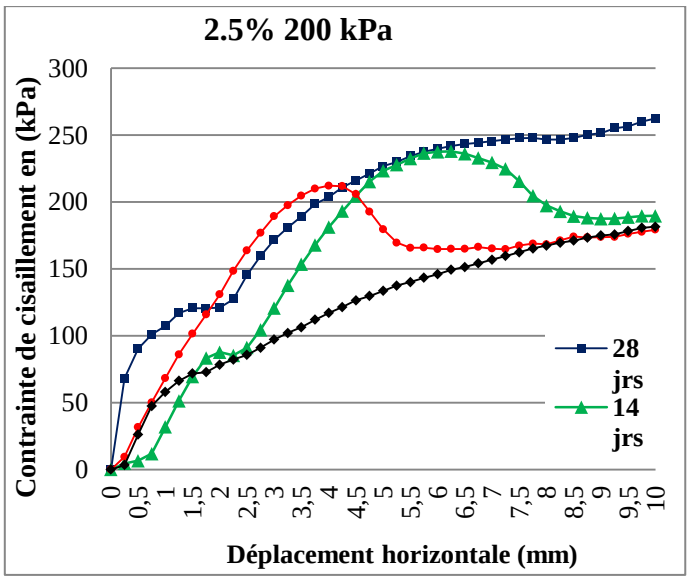


Pour le sable limoneux non traité (2.5% de ciment) ;

Dans les échantillons à 0 jours de durcissement, il y a toujours une augmentation de la contrainte de cisaillement jusqu'à la fin de l'expérience ; Ensuite, après 7 jours de durcissement, l'échantillon se dirige vers le seuil et ensuite diminue progressivement jusqu'à

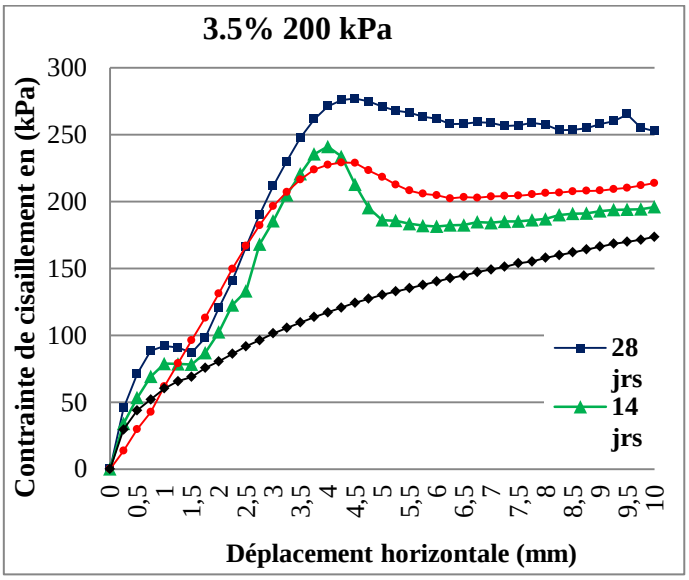
la stabilité à la fin de l'expérience, mais pour les échantillons testés après 14 jours de durcissement, une diminution de la valeur de la contrainte au début du déplacement horizontal par rapport à l'échantillon testé en 7 jours, jusqu'à ce qu'un seuil plus élevé soit enregistré et ensuite immédiatement diminué pour être similaire aux valeurs de la courbe de 7 jours .

Pour les échantillons qui ont été durcis après 28 jours, nous observons une courbe progressivement croissante qui enregistre un moment de stabilité rapide suivi d'un incrément jusqu'à la fin de l'expérience.



Pour le sable limoneux non traité (3.5% de ciment) ;

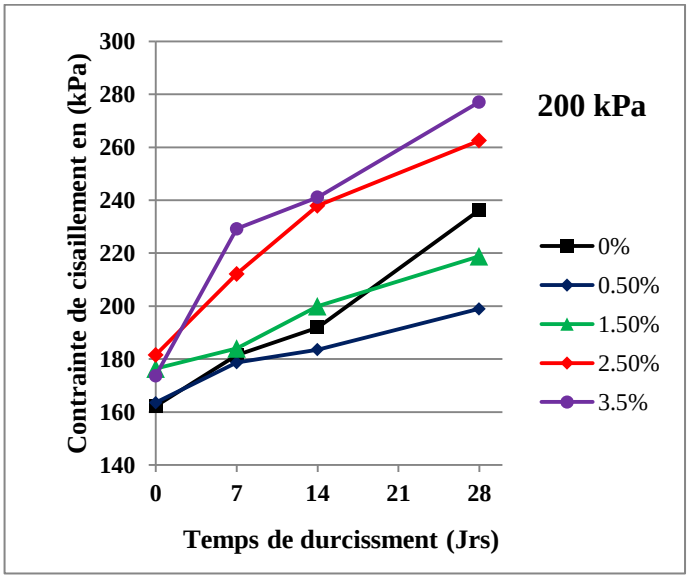
A partir de la courbe, à 0 jours, on obtient une croissance lente et semi-linéaire de la courbe jusqu'à la fin de celle-ci. Il a été constaté qu'aucune palier de repos n'était formée dans la courbe d'un échantillon de 7 jours de durcissement, contrairement aux courbes des échantillons de 14 et 28 jours, où il a été montré qu'une palier de repos était formée, suivie d'une augmentation de la contrainte et de l'apparition du pic dans chaque cas, mais la courbe de 7 jours était plus élevée que celle de 14 jours, tandis que la courbe de 28 jours enregistrait les valeurs les plus élevées.



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.

Pour les échantillons à 0,5 % et 1,5 % de teneur en ciment, nous avons 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, nous avons 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.



Figure(4.14) : représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à200 kpa

200 kPa	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

Tableau (4.6) : représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 200 kPa

A 300 kPa de contrainte normale:

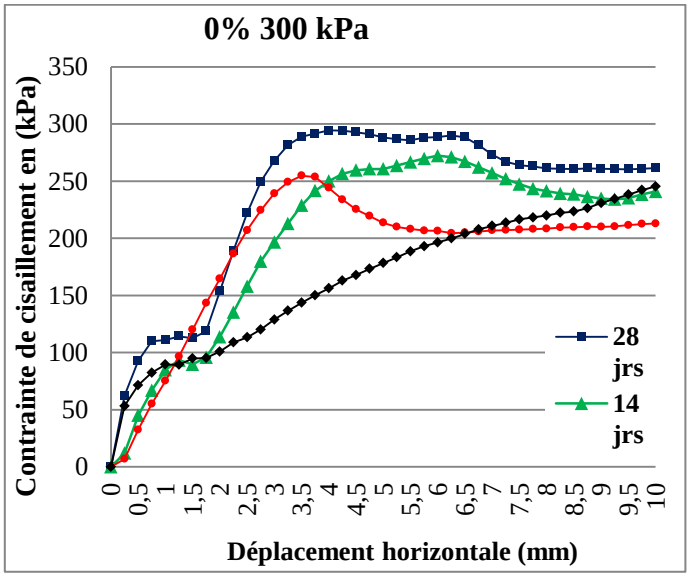
Les figures suivantes montrent les contraintes de cisaillement des teneurs en ciment (0, 0,5, 1,5, 2,5 et 3,5%) en fonction du temps de durcissement et cisaillées sous une pression de charge de 200 kPa. Nous allons donc examiner chaque courbe séparément.

Pour le sable limoneux non traité (0% de ciment) ;

Au jour 0, la courbe a augmenté progressivement jusqu'à la fin de l'expérience.

A 7 jours, on a enregistré une augmentation rapide de la courbe jusqu'à l'apparition du pic, puis elle a commencé à diminuer et s'est stabilisée à la fin.

À 14 et 28 jours on a remarqué que les courbes étaient presque les mêmes, la valeur de la contrainte a augmenté au début du processus de cisaillement, puis on a enregistré des valeurs fixes représentant un palier de repos, à revenir vers l'augmentation et l'apparition du sommet dans chaque courbe au bon on enregistre une légère diminution oscillante jusqu'à la fin.

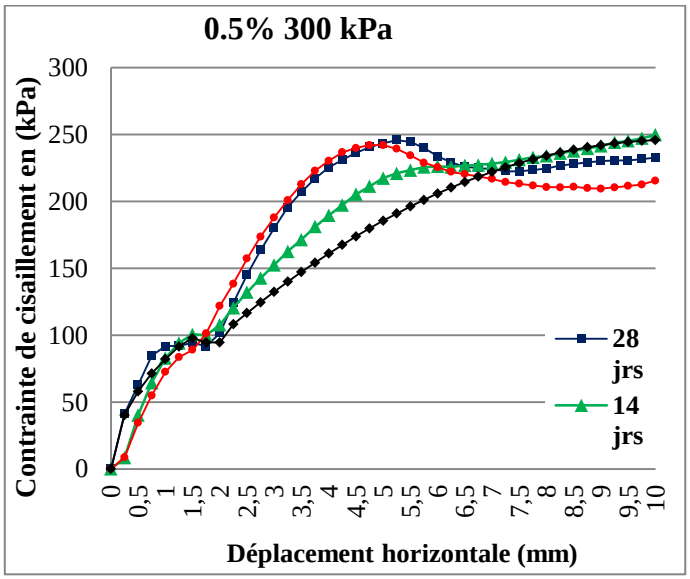


Pour le sable limoneux non traité (0.5% de ciment) ;

Nous avons enregistré la convergence des valeurs pour les quatre courbes depuis le début du processus de cisaillement jusqu'à 2 mm du déplacement horizontal, de sorte que les valeurs sont stables et que le palier de repos apparaît pour toutes.

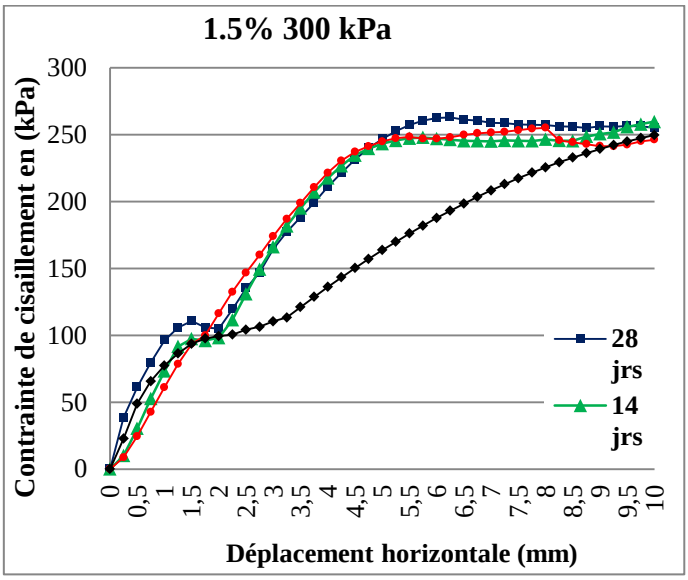
Ensuite, nous voyons que les courbes de 0 et 14 jours montrent une augmentation de la courbe jusqu'à la fin.

Et pour les courbes de 7 et 28 jours, qui sont similaires et presque identiques, où elles ont augmenté jusqu'à atteindre le pic et ensuite diminué quelque peu.



Pour le sable limoneux non traité (1.5% de ciment) ;

L'échantillon cisaillé au 0 jour de durcissement présente une augmentation progressive de la courbe jusqu'à la fin ; Les courbes des jours 7, 14 et 28, ont montré quant à elles une correspondance presque exacte des valeurs, où les courbes coïncident entre elles, où les courbes augmentent pour s'avérer légèrement et former un palier de repos, puis continuent à augmenter pour atteindre la valeur la plus élevée et se stabilisent ensuite quelque peu jusqu'à la fin de l'expérience.

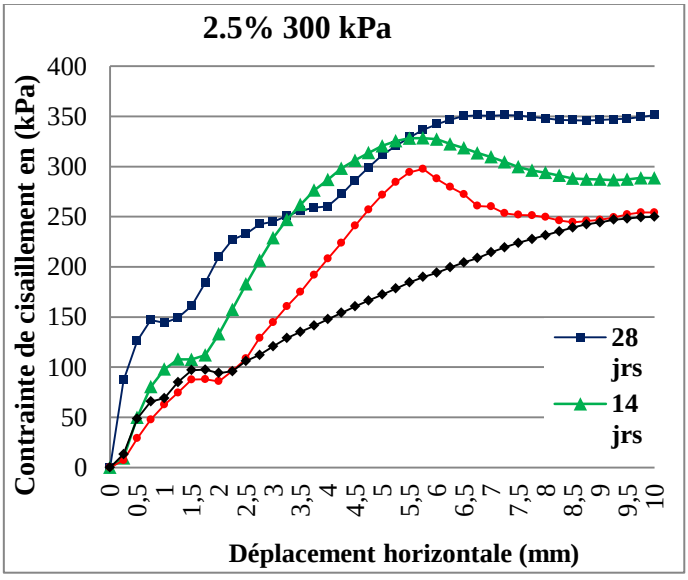


Pour le sable limoneux non traité (2.5% de ciment) ;

Nous avons enregistré tout au long de la courbe de 0 jour une augmentation jusqu'à la fin.

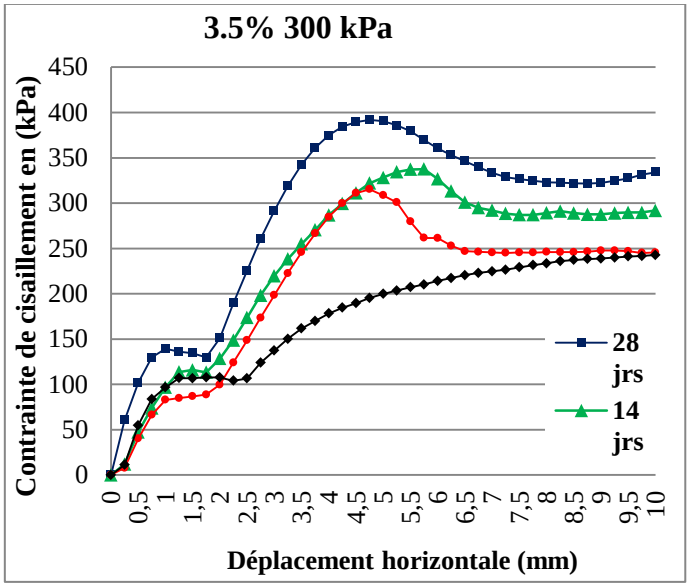
Dans chacune des courbes de 7 et 14 jours, nous avons enregistré la même tendance, une augmentation, puis une légère stabilisation pour former un palier de repos, puis une augmentation continue jusqu'à un pic dans chaque courbe et enfin une diminution et une stabilisation.

En ce qui concerne la courbe de 28 jours, nous avons remarqué une augmentation graduelle et fluctuante jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur la plus élevée et s'y maintient quelque peu jusqu'à la fin.



Pour le sable limoneux non traité (3.5% de ciment) ;

Dans les échantillons à 0 jours de durcissement, il y a toujours une augmentation de la contrainte de cisaillement jusqu'à la fin de l'expérience ; Les résultats pour les périodes de 7, 14 et 28 jours ont été presque similaires dans leur tendance tout au long de l'expérience, avec un pic apparaissant dans chaque courbe suivi d'une diminution et d'une valeur constante jusqu'à la fin de l'expérience.



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.

On constate 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.

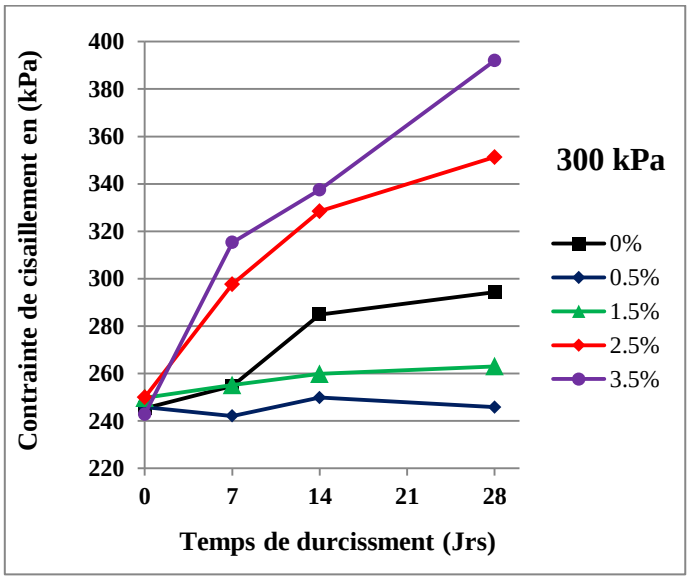


Figure (4.15) : représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 jours) à 300 kpa

Tableau (4.7): (représentes l'effet du temps de cure (0, 7, 14, 28 joursà 300 kPa

300 kPa	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

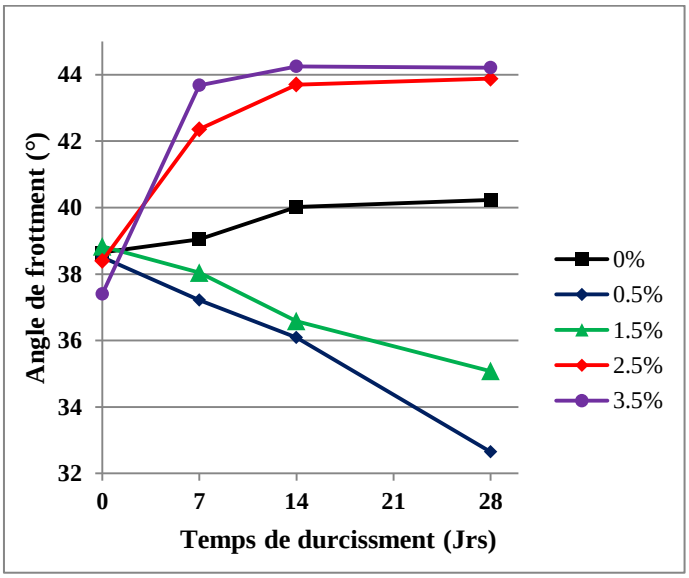
IV.6.2 Effet du temps de durcissement sur l'angle de frottement et la cohésion

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%).

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.



Figure(4.16) : présenté la angle de frottement fonction du temps de durcissemen

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

Tableau (4.8): les résultats de l'angle de frottement à 7,14 et 28 jours de la cure

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%).

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.

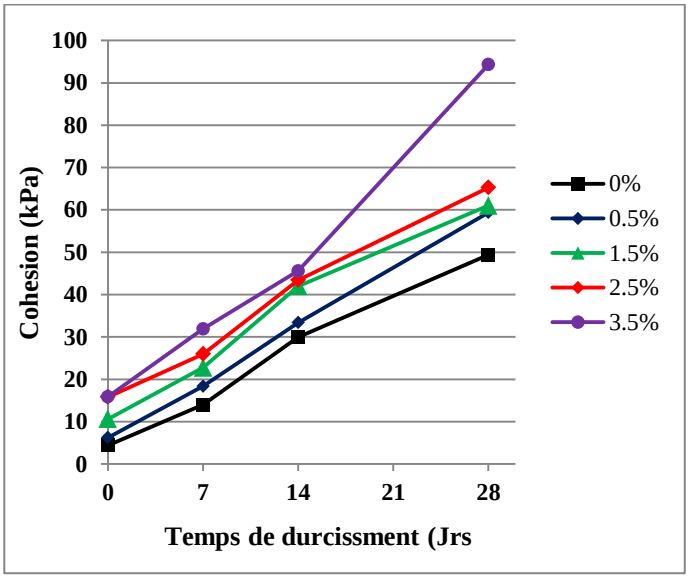


Figure (4.17) : présenté la cohésion fonction du temps de durcissemen

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	18.37	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

Tableau (4.9) : les résultats de la cohésion et à 7,14 et 28 jours de la cure

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERAL

A travers les chapitres précédents pour étudier l'effet de la teneur en ciment ainsi que l'effet du temps de durcissement sur le comportement mécanique du sable limoneux, et sur la base des résultats expérimentaux obtenus, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

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.

Ainsi, nous pouvons conclure que la valeur de 3,5% est celle qui nous donne les valeurs les plus élevées dans la contrainte maximale, l'angle de friction et la cohésion, mais d'un point de vue économique, étant donné la faible différence entre les valeurs des échantillons avec un rapport de 2,5 et 3,5%, il est probable que la teneur en ciment de 2,5% soit la teneur optimale dans le traitement.

Enfin, nous espérons que notre travail sera une porte d'entrée pour d'autres recherches qui pourront être comparées numériquement en utilisant des programmes de traitement de sol comme le programme Plaxis ou en le mélangeant avec d'autres composés de renforcement.

Référence

[1] Hadji R, 2019, Cours Introduction à la Mécanique des sols, 3eme Année/S6, licence Géologie Appliquée, Spécialité Géotechnique, Université Ferhat Abbes. Setif1, Algérie.

[2]Mansouri tarek, 2020, Cours mécanique de sol 1, Université Mustapha benboulaid. Batna 2, Algérie.

[3] Douirem abdeldjabar. Caractérisations physico-mécaniques d'un béton de terre stabilisé avec ciment à base des fibres (Verre-Palmier dattier). 2016. Thèse de doctorat.

[4] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/granulométrie , publiée le 31 août 2003 (Mise à jour le 16 mai 2022).

[5] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/coh%c3%a9sion_(physique), publiée le 5 octobre 2021.

[6] https://fr.wikipedia.org/wiki/Sable (Mise à jour le 16 mai 2022).

[7] Pierre Bédard 2014, Clef d'identification visuelle des grains de sable , l'École Polytechnique de Montréal, CANADA.

[8] khadar Sabrin, khadai yousra « influence couplée du sable de concassage et du type de ciment sur la qualité du béton vibré »mémoire de master, université de Yahia Fares – Medea « 2016 »

[9] https://wiki.tripleperformance.fr/wiki/Limoneux, consulté le 07/06/2022.

[10]Définition RESISTANCE AU CISAILLEMENT publiée le 28/04/2010 (mise à jour le 20/07/2020).

11[2] Messaoudimeriem « effet du traitement des sols limoneux par le ciment sur les caractéristique de compactage »master en génie civil .université larbi ben m'hidi Oum el bouaghi(2017/2018)

12[3]Doudou souad, ToumiChania « etude comparative des méthodes de traitemet des sols affaissables »master académique .université Mohamed boudiaf Msila (2018/2019)

13[4]BoutiaraHocine ,Ferrah Yousef « étude du comportement mécanique des propriété de cisaillement de un sable limon eux stabilisé par une émulsion de bitume » master géotechnique .université de Médea (2021)

14[7]TAALLAH Bachir « ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE DU BLOC DE TERRE COMPRIMÉE AVEC FIBRES »Doctorat en Génie Civil :UNIVERSITE MOHAMED KHIDER - BISKRA (2014)

*Mitchell, J.K. (1976), Fundamental of Soil Behavior, John Wiley and Sons, New York, NY, USA.Park, S.S. (2011), "Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand",Constr. Build. Mater.,25(2), 1134-1138
*Al-Aghbari, M.Y., Mohamedzein, Y.E.A. and Taha, R. (2009), "Stabilization of desert sands using cementand cement dust", Proceedings of the Institution of Civil Engineering, Ground Improvement, 162(3),145-151.

*Lo, S.R. and Wardani, S.P.R. (2002), “Strength and dilatancy of a silt stabilized by a cement and fly ashmixture”, Can. Geotech. J., 39(1), 77-89.
*Balmer, G.G. (1958), “Shear strength and elastic properties of soil-cement mixture under triaxial loading”,
Portland Cement Association R&D Laboratories.
*Wissa, A.E.Z., Ladd, C.C. and Lambe, T.W. (1965), “Effective stress-strength parameters of stabilizedsoils”, Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,Montreal, Canada.
*
*Shooshpasha, I., &Shirvani, R. A. (2015). Effect of cement stabilization on geotechnical properties of sandy soils. Geomech Eng, 8(1), 17-31.
12* Bello A. A., Influence of Compaction Delay on CBR and UCS of Cement Stabilized Lateritic Soil, Pac. J. Sci. Technol., 2011, 12,87-96.
15* Das B. M., Principles of foundation engineering, Fourth Edition,PWS Publishing, 1999.
17*Oyediran I. A., Adeyemi G. O., Oguntuase E. O., Influence of termite activities on the geotechnical properties of some lateritic soils in parts of Akungba-Akoko south-western Nigeria, Mineral Wealth, 2008, 148, 17-24.
18* Haeri, S. M., Hamidi, A., Hosseini, S. M., Asghari, E., &Toll, D. G. (2006). Effect of cement type on the mechanical behavior of a gravely sand. Geotechnical & Geological Engineering, 24(2), 335-360.
19*DER EINFLUSS, V. Z. U. W., DIE, A., AUSGEPRÄGT, D., TON, P., SUR, I. D. C. E. C., & LA RESISTANCE, A. U. (2000). Influence of cement and lime additives on the compaction properties and shear parameters of fine grained soils. Otto-Graf-Journal, 11, 19.
20* JianxiaoGu , Chao Zeng , HaiboLyu&Junyan Yang (2020): Effects ofcement content and curing period on strength enhancement of cemented calcareous sand, MarineGeoresources&Geotechnology,

Dans les analyses de stabilité, la résistance maximale au cisaillement est généralement de première importance. Pour cette raison, seuls les paramètres de cisaillement utilisant les contraintes maximales de cisaillement ont été calculés.
Angle de frottement avec l’âge :Dans ce diagramme, il ne semble pas y avoir d'augmentation de l'angle de cisaillement avec l'âge. Cette tendance peut être observée dans les autres diagrammes malgré la dispersion.
PROCTOR : L'ajout de ciment a modifié la teneur en humidité optimale et le poids unitaire sec maximal des sols, mais le taux de changement n'est pas prévisible (ACI 1997). (L'ajout de ciment a augmenté la teneur en humidité optimale et a diminué le poids unitaire sec maximal des sols (Sarriosseiri et Muhunthan 2009).
[16] H.Bouakba , A.Rezzek«l’étude de stabilisation de sol par l’ajout de ciment et des fibres naturel» master géotechnique université de Jijel (2016).

LES ANEXS

SPA BISKRIA CIMENT

FICHE TECHNIQUE

CEM I 42.5R
CIMENT PORTLAND

Ciment portland, pour les bétons hautes performances et à une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts. Il est recommandé particulièrement pour le bétonnage par temps froid.

CEM I 42.5R:
Conforme à la norme Algérienne **NA442-2013**.



DOMAINES D'APPLICATION

Un ciment pour tous vos travaux de constructions de haute résistance à jeune âge. Il est aussi recommandé pour les utilisations suivantes:

- Produits en bétons qui demandent un durcissement rapide.
- Le bétonnage dans des coffrages coulissant, surtout en période hivernale.
- Béton résistant au gel en présence de sels de déverglaçage.
- Tabliers de ponts.
- Béton pompé.
- Béton projeté.

APPLICATIONS RECOMMANDEES

- Béton armé à haute résistance.
- Béton autoplaçant.



Un produit conforme aux normes et spécifications de l'Union européenne. **Le marquage CE** est une exigence légale pour certains produits sur le marché de l'UE.

Produit conçu et fabriqué sous un Système de Management de la Qualité certifié ISO 9001 par **BVQI-AFNOR**.

FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment	Sable	Gravillons (sec)	Eau
Dosage pour béton	50kg X1	X7	X5	X4 = 35 L
	Ciment	Sable	Gravillons (sec)	Eau
Mortier de briquetage	50kg X1	X5	X3	= 35 L
Mortier de finition	50kg X1	X9	X8	= 35 L

Remarque: un bidon = 10 litres

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Analyses chimiques (%)	Valeur
Perte au feu	2.6 – 3.7
Teneur en sulfates (SO3)	2.2 – 2.9
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 – 2.0
Teneur en Chlorures (Cl-)	0.03 – 0.07

Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	Valeur
C3S	58 – 68
C2S	9.1 – 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 – 160
Fin de prise	220-250

Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	20 – 29
28 jours (MPa)	42.5 – 52.5



CONSIGNES DE SÉCURITÉ

PROTÉGEZ VOTRE PEAU:
Portez les équipements adapté dans vos chantiers:



Djer Belaïnache, Bouira, Ekhira, Algérie
Tel: (+213) 0560 753 464
Fax: (+213) 000 00 00 00
www.batiracciment-dz.com
contact@batiracciment-dz.com

© Batira Ciment