

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

N° :.....



DOMAINE: SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : GEOTECHNIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par:**

MIMOUNE Mohamed

LAOUFI Khaled

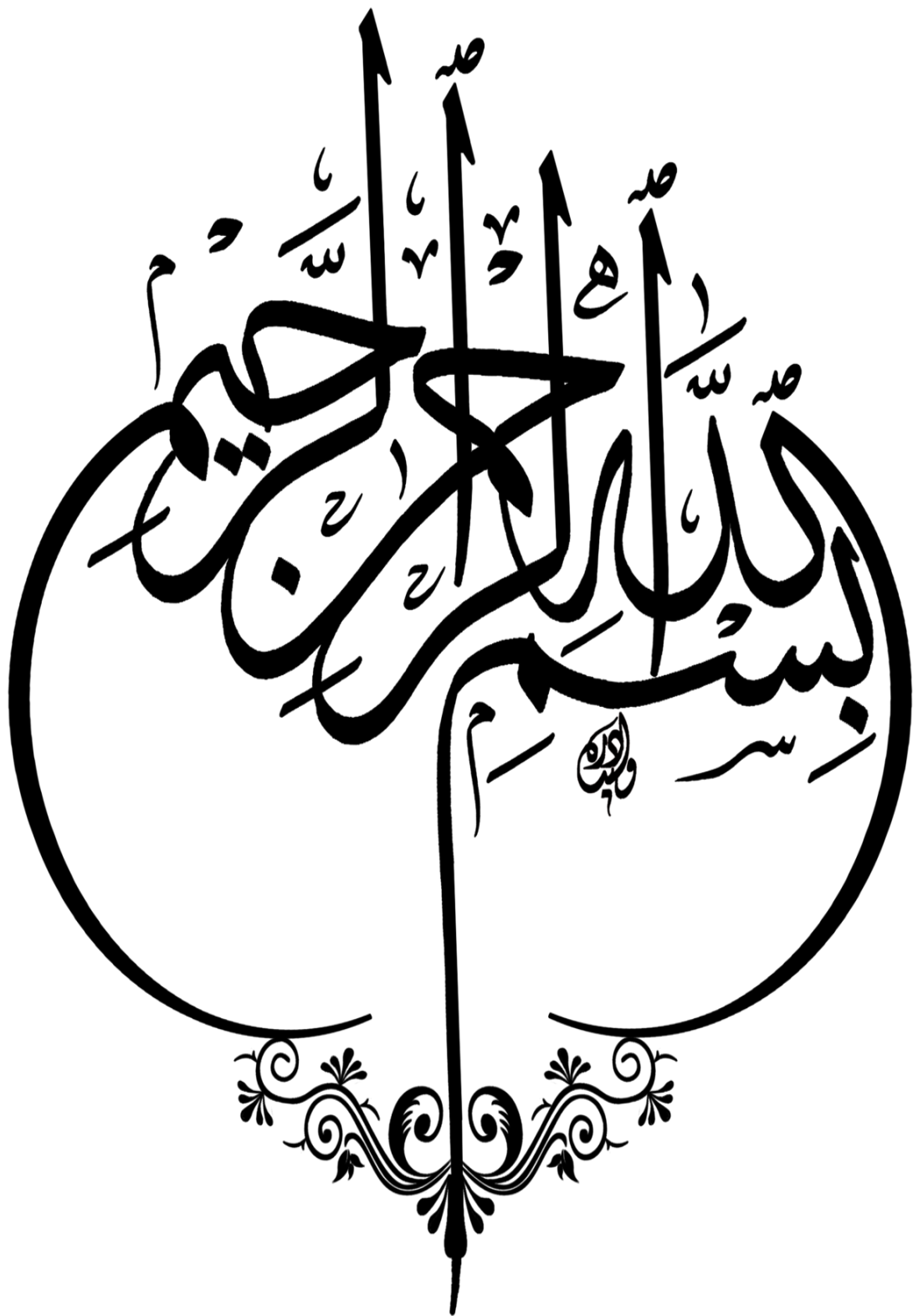
**Intitulé**

**Effet du temps de cure sur la résistance du sol  
de Chaaba El Hamra (Wilaya de M'sila) traité par  
différents types de ciment et reconstitué à faible  
énergie de compactage**

**Soutenu devant le jury composé de :**

<b>Dr. BELAGRAA Larbi</b>	<b>Prof.,</b>	<b>Université M'SILA</b>	<b>Président</b>
<b>Dr. MEKKI Lakhdar</b>	<b>MCB</b>	<b>Université M'SILA</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Dr. SEDDIKI Ahmed</b>	<b>MCA</b>	<b>Université M'SILA</b>	<b>Examineur</b>

**Année universitaire : 2021-2022**



## *Remerciements*

On remercie dieu, le tout puissant, pour nous avoir donné le courage, la patience la volonté et la force nécessaire Pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de notre chemin, durant toutes nos années d'études.

Nous tenons à remercier très vivement Dr. MEKKI Lakhdar pour leur grand aide.

On remercie également les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en jugeant ce travail.

Nous tenons également à remercier chaleureusement le directeur du Laboratoire Centrale des Travaux Publics (LCTP, Antenne de M'sila), ainsi que l'ensemble du personnel pour leur aide à certaines étapes de cette étude.

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à mes  
chers parents, mes frères,  
Et surtout je dédie profondément ce  
travail à la mémoire de ma mère et ma  
femme et mes enfants et mes proches,  
tous mes amis (es) et à tous mes  
collègues.*

*MIMOUNE .M*

*Si j'y parvenu c'est à l'aide de mes parents, de mes  
frères et mes sœurs qui ont fait de moi qui je suis.  
Alors je leur dédie ce travail et je les remercie du  
fond du cœur.  
Et surtout je dédie profondément ce travail à la  
mémoire de ma mère et ma femme et mes enfants  
et aussi, je dédie ce travail à tous mes proches et  
mes amis.*

*LAOUFI. K*

## ملخص

تعرض هذه الدراسة نتائج دراسة أجريت على طين طمي مأخوذ من موقع الشعبة الحمراء (بلدية المسيلة). تهدف الدراسة التي أجريت إلى تحديد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لهذا الطين المعالج بفنّتين من الإسمنت (صنف 32.5 وصنف 42.5)، ثم تحليل تأثيرهما على خصائصه الميكانيكية. بالإضافة إلى إعادة تحديد خصائصه الفيزيائية من جديد، فإن البرنامج التجريبي المنفذ يشمل اختبارات الرص والضغط البسيط والقص المباشر. امتثلت إجراءات الاختبار المتبعة قدر الإمكان مع طرق الاختبار المعمول بها وتعتمد طريقة تفسير النتائج بشكل كبير على المعرفة المكتسبة في جميع أنحاء العالم. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها انخفاضا كبيرا في اللدونة. كما أنها تظهر تحسناً كبيراً في مقاومة القص وقوة الضغط البسيط لهذا الطمي الطيني المعاد تكوينه عن طريق الضغط في ظروف بروتكتور العادي.

**الكلمات المفتاحية:** الطين الطمي، الرص، المعالجة، أصناف الاسمنت، الضغط البسيط، القص المباشر

## Résumé

Cette étude présente les résultats d'une étude effectuée sur un limon-argileux prélevé sur le site de Chaaba El Hamra (commune de M'sila). L'étude effectuée vise à déterminer les paramètres physiques et mécaniques de ce sol traité par deux classes de ciment (classes 32.5 et classes 42.5), puis à analyser l'influence du traitement sur ses propriétés mécaniques. Outre les essais d'identification, le programme expérimental exécuté comporte des essais de compactage, de compression simple et de cisaillement direct à la boîte de Casagrande. Les procédures d'essais suivies ont été conformes autant que possible aux méthodes d'essais en vigueur et la méthode d'interprétation des résultats s'inspire beaucoup des connaissances acquises à travers le monde. Les résultats obtenus montrent une réduction importante de sa plasticité, elles montrent également une amélioration significative de sa résistance au cisaillement et sa résistance à la compression simple de ce limon-argileux reconstitué par compactage aux conditions optimales de Proctor normal.

**Mots-clés** : limon-argileux, compactage, traitement, classes de ciment, compression simple, cisaillement direct.

## **Abstract**

This study presents the results of a study carried out on a clay-loam taken from the site of Chaaba El Hamra (municipality of M'sila). The study carried out aims to determine the physical and mechanical parameters of this clay treated with two classes of cement (classes 32.5 and classes 42.5), then to analyze the influence of the treatment on its mechanical properties. In addition to the identification tests, the experimental program carried out includes compaction, simple compression and direct shear tests at the Casagrande box. The test procedures followed complied as much as possible with the test methods in force and the method for interpreting the results draws heavily on knowledge acquired throughout the world. The results obtained show a significant reduction in its plasticity. They also show a significant improvement in its shear strength and its simple compressive strength of this clay-silt reconstituted by compaction at optimal normal Proctor conditions.

**Keywords :** Clay-loam, compaction, treatment, classes of cement, compression simple, direct shear.

# SOMMAIRE

<i>Remerciements</i> .....	
<i>Dédicace</i> .....	
<i>Sommaire</i> .....	
<i>Liste des Figures</i> .....	
<i>Liste des tableaux</i> .....	
INTRODUCTION GENERALE.....	

## CHAPITRE I

### ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE TRAITEMENT DES SOLS

I.1 : Introduction : .....	3
I.2 : Les argiles : .....	3
I.2.1 : Définition : .....	3
I.2.2 : Différents types d'argile : .....	4
I.2.3 : Texture des argiles : .....	5
I.3 : Les Limons : .....	6
I-3-1 : Particularisation spécifique des limons : .....	6
I.4. Objectifs du traitement : .....	8
I.5 Techniques de traitement possibles .....	9
I.5.1 : traitement mécanique : .....	11
I.5.2 : Traitement thermique : .....	15
I.5.3 : Traitement chimique .....	15
I.6 : Traitement des sols par le ciment : .....	24
I.6.1 : Les ciments : .....	24
I.6.2 : Types de ciment : .....	26
I.6.3 : Réactions physico-chimiques du ciment : .....	27
I.6.4 : choix du type ciment utilisé pour le traitement : .....	28
I.6.5 : Domaine d'utilisation : .....	28
Conclusion : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## CHAPITRE II

### PROGRAMME EXPERIMENTAL ET PROCEDURES D'ESSAIS

II.1 Introduction .....	30
II.2. Description de la région d'étude : .....	30

II.2.1. Analyse granulométrique par tamisage : (NF P 94-057) : .....	31
II.2.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P94-057).....	32
II.2.3. Les limites d'Atterberg (NF P 94-051) : .....	33
II.2.4. L'essai au bleu de méthylène (NF P 94-068) : .....	33
II.3. Les Essais mécanique : .....	35
II.3.1. Essai Proctor normal (NF P 94-093) : .....	35
II.3.2. Essais à la boîte de cisaillement directe (NF P 94-071-1) : .....	35
II.3.3. Essais de compression simple (NF P 94-077) : .....	37

## **CHAPITRE III**

### **PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS**

III.1. Introduction : .....	39
III.2. Résultats des Essais : .....	39
III.2.1. Les essais d'identification : .....	39
III.2.1.1 Analyse granulométrique par tamisage: .....	39
III.2.1.2 Les limites d'Atterberg : .....	43
III.2.1.3 L'essai au bleu de méthylène : .....	46
III.2.1.4 L'Analyse Chimique : .....	49
III.2.2. Essai mécanique : .....	51
III.2.2.1 Essai Proctor normal : .....	51
III.2.2.2 Essai de Cisaillement direct : .....	65
III.2.2.3 Essai de Compression simple : .....	90
CONCLUSION GENERALE .....	104
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	106
ANNEXES .....	109

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I

Figure I-1: Présentation d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique. ....	3
Figure I-2: Présentation d'un octaèdre et d'une couche octaédrique. ....	4
Figure I-3 :Structure des argiles du groupe des smectites.....	4
Figure I-4: Ouverture des fissures en proximité des matériaux rigides Montes et al, (wakim j, 2005).....	5
Figure I-5: Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell, 1986).....	6
Figure I-6: Classification des sols [LCPC-SETRA 1992] .....	7
Figure I-7: Amélioration par drainage. (Marwana et Muangongo, 201) .....	11
Figure I-8: Substitution méthode simple (enlèvement et remplacement) des travaux de terrassement routière. ....	12
Figure I-9: traitement des sols par injection.....	13
Figure I-10: Le principe de traitement des sols par le pré-chargement.....	13
Figure I-11: Phases d'exécution des colonnes ballastées.....	15
Figure I-12: Conditions d'utilisation de la stabilisation chimique (Dept. of the Army, 1983).17	
Figure I-13: Traitement des sols au Ciment .....	19
Figure I-14: Procédé d'épandage du ciment. ....	20
Figure I-15: Traitement des sols à la chaux .....	23
Figure I-16: La composition du ciment. ....	24
Figure I-17: Une cimenterie en Algérie « Lafarge » .....	25
Figure I-18: Procédé classique d'épandage du ciment. ....	29

## CHAPITRE II

Figure II-1: Localisation du site Chaaba El Hamra (wilaya de M'sila). ....	30
Figure II-2: Appareillage d'analyse granulométrique (tamisage). ....	32
Figure II-3: L'essai de sédimentométrie. ....	32
Figure II-4: Appareillage de limites d'Atterberg. ....	33
Figure II-5: Les étapes de l'essai au bleu de méthylène. ....	34
Figure II-6: Valeurs de bleu de quelques sols. ....	34
Figure II-7: Appareillage de l'essai au bleu de méthylène.....	34
Figure II-8: Appareil essai Proctor normal. ....	35

Figure II-9: Appareille de cisaillement direct .....	36
Figure II-10: Essais de compression simple.....	38

### CHAPITRE III

Figure III-1: Courbe d'analyse granulométrique par tamissage de l'essai 01.....	40
Figure III-2: Courbe d'analyse granulométrique par sédimentométrie de l'essai N°01. ....	41
Figure III-3: Courbe d'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie de l'essai 01 .....	41
Figure III-4: Courbe d'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie de sol Chaaba El Hamra. ....	42
Figure III-5: La courbe de limite de liquidité du sol naturel.....	43
Figure III-6: Les limites d'Atterberg en fonction des différents teneurs en ciment (Chamil 32.5).....	45
Figure III-7: Teneur en eau en fonction des différents teneurs en ciment (Matine) .....	46
Figure III-8: Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment.....	47
Figure III-9: Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment.....	48
Figure III-10: La classification Dakshana murphy et al. (1973) et Chen (1988).....	50
Figure III-11: courbe Proctor de sol naturel de l'essai 01 .....	51
Figure III-12: courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 2 % .....	52
Figure III-13: courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 4 % .....	53
Figure III-14: courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 6 % .....	54
Figure III-15: courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 8 % .....	55
Figure III-16: courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 10 % .....	56
Figure III-17: Récapitulatif des courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil. ....	57
Figure III-18: courbe Proctor de sol traité par ciment Matine 2 % .....	58
Figure III-19: courbe Proctor de sol traité par ciment Matine 4 % .....	59
Figure III-20: courbe Proctor de sol traité par ciment Matine 6 % .....	60
Figure III-21: courbe Proctor de sol traité par ciment Matine 8 % .....	61
Figure III-22: courbe Proctor de sol traité par ciment Matine 10 % .....	62
Figure III-23: Récapitulatif des courbe Proctor de sol traité par ciment Matine.....	63
Figure III-24: Courbe d'essai cisaillement (sol naturel) Essais 01 .....	66
Figure III-25: Courbe d'essai cisaillement (sol naturel) Essais 01 .....	66
Figure III-26: Courbe d'essai cisaillement 2% Ciment Chamil.....	67
Figure III-27: Courbe d'essai cisaillement 2% Ciment Chamil.....	67

Figure III-28: Courbe d'essai cisaillement 4% Ciment Chamil.....	68
Figure III-29: Courbe d'essai cisaillement 4% Ciment Chamil.....	68
Figure III-30: Courbe d'essai cisaillement 6% Ciment Chamil.....	69
Figure III-31: Courbe d'essai cisaillement 6% Ciment Chamil.....	69
Figure III-32: Courbe d'essai cisaillement 8% Ciment Chamil.....	70
Figure III-33: Courbe d'essai cisaillement 8% Ciment Chamil.....	70
Figure III-34: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Chamil.....	71
Figure III-35: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Chamil.....	71
Figure III-36: Courbe d'essai cisaillement 4 % Ciment Matin 7 jours.....	72
Figure III-37: Courbe d'essai cisaillement 4 % Ciment Matin 7 jours.....	72
Figure III-38: Courbe d'essai cisaillement 8 % Ciment Matin 7 jours.....	73
Figure III-39: Courbe d'essai cisaillement 8 % Ciment Matin 7 jours.....	73
Figure III-40: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Matin 7 jours.....	74
Figure III-41: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Matin 7 jours.....	74
Figure III-42: Courbe d'essai cisaillement (sol naturel).....	75
Figure III-43: Courbe d'essai cisaillement (sol naturel).....	75
Figure III-44: Courbe d'essai cisaillement 2% Ciment Chamil.....	76
Figure III-45: Courbe d'essai cisaillement 2% Ciment Chamil.....	76
Figure III-46: Courbe d'essai cisaillement 4 % Ciment Chamil.....	77
Figure III-47: Courbe d'essai cisaillement 4 % Ciment Chamil.....	77
Figure III-48: Courbe d'essai cisaillement 6 % Ciment Chamil.....	78
Figure III-49: Courbe d'essai cisaillement 6 % Ciment Chamil.....	78
Figure III-50: Courbe d'essai cisaillement 8 % Ciment Chamil.....	79
Figure III-51: Courbe d'essai cisaillement 8 % Ciment Chamil.....	79
Figure III-52 : Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Chamil.....	80
Figure III-53: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Chamil.....	80
Figure III-54: Courbe d'essai cisaillement 2 % Ciment Matine.....	81
Figure III-55: Courbe d'essai cisaillement 2 % Ciment Matine.....	81
Figure III-56: Courbe d'essai cisaillement 4 % Ciment Matine.....	82
Figure III-57: Courbe d'essai cisaillement 4 % Ciment Matine.....	82
Figure III-58: Courbe d'essai cisaillement 6 % Ciment Matine.....	83
Figure III-59: Courbe d'essai cisaillement 6 % Ciment Matine.....	83
Figure III-60: Courbe d'essai cisaillement 8 % Ciment Matine.....	84
Figure III-61: Courbe d'essai cisaillement 8 % Ciment Matine.....	84

Figure III-62: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Matine. ....	85
Figure III-63: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Matine. ....	85
Figure III-64: la courbe de résistance au cisaillement en fonction de la contrainte verticale pour sol traité par différent teneur en ciment Chamil 7 jours. ....	87
Figure III-65: la courbe de résistance au cisaillement en fonction de la contrainte verticale pour sol traité par différent teneur en ciment Matine 7 jours. ....	87
Figure III-66: la courbe de résistance au cisaillement en fonction de la contrainte verticale pour sol traité par différent teneur en ciment Chamil 14 jours. ....	88
Figure III-67: la courbe de résistance au cisaillement en fonction de la contrainte verticale pour sol traité par différent teneur en ciment Matine 14 jours. ....	88
Figure III-68: courbe de compression simple de sol naturel Essai 01. ....	90
Figure III-69: courbe de compression simple de sol traité par cimente Chamil 2 % Essai 01	90
Figure III-70: courbe de compression simple de sol traité par cimente Chamil 4 %	91
Figure III-71: courbe de compression simple de sol traité par cimente Chamil 6 %	91
Figure III-72: courbe de compression simple de sol traité par cimente Chamil 8 %	92
Figure III-73: courbe de compression simple de sol traité par cimente Chamil 10 %	92
Figure III-74: Histogramme de compression simple en fonction des différents teneurs en ciment Chamil. ....	93
Figure III-75 : la contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment 7 jours Chamil. ....	93
Figure III-76: courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 2 %	94
Figure III-77: courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 4 %	94
Figure III-78: courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 6 %	95
Figure III-79: courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 8 %	95
Figure III-80: courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 10 %	96
Figure III-81: la contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment 7 jours Matine. ....	96
Figure III-82: Histogramme de compression simple en fonction des différents teneurs en ciment Matine. ....	97
Figure III-83: la contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment 14 jours Chamil. ....	97
Figure III-84: Histogramme de compression simple en fonction des différents teneurs en ciment Chamil. ....	98

Figure III-85: la contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment 14 jours Matine.....	98
Figure III-86: Histogramme de compression simple en fonction des différents teneurs en ciment Matine.....	99
Figure III-87: la contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment Chamil à 28j. ....	99
Figure III-88: Histogramme de compression simple en fonction des différents teneurs en ciment Chamil. ....	100
Figure III-89: la contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment Matine à 28j.....	100
Figure III-90: Histogramme de compression simple en fonction des différents teneurs en ciment Matine.....	101
Figure III-91: Variation contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment Chamil. ....	101
Figure III-92: Variation contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment Matine.....	102

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE I

Tableau I-1: présente les avantages et les inconvénients des différentes techniques de Stabilisation.....	10
Tableau I-2: Synthèse sur les dosages en stabilisants pratiqués pour le traitement des sols selon les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004). ..	17
Tableau I-3: Définition des 5 classes de ciment courant.....	26

## CHAPITRE III

Tableau III-1: Analyse granulométrique par tamisage de l'essai N°01 .....	39
Tableau III-2: Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai N° 01.....	40
Tableau III-3: Récapitulatif des résultats des essais de l'analyse granulométrique (tamassage et sédimentométrie).....	42
Tableau III-4: Les résultats de limite de liquidité Essai N°1. ....	43
Tableau III-5: Les résultats de limite de plasticité. ....	44
Tableau III-6: Récapitulatif des résultats des essais de limite d'Atterberg.....	44
Tableau III-7: Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg traité par ciment (Chamil 32.5). ....	44
Tableau III-8: Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg traité par ciment (Matine). ....	45
Tableau III-9: L'essai au bleu de méthylène sol naturel. ....	46
Tableau III-10: Récapitulatif des résultats de bleu de méthylène Traité ciment.....	47
Tableau III-11: Récapitulatif des résultats de bleu de méthylène Traité ciment.....	48
Tableau III-12: Résultats de essai de compactage le sol naturel l'essai 01.....	51
Tableau III-13: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Chamil (2 %) ..	52
Tableau III-14: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Chamil (4 %) ..	53
Tableau III-15: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Chamil. ....	54
Tableau III-16: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Chamil ( 8 %) ..	55
Tableau III-17: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Chamil (10 %) .	56
Tableau III-18: Récapitulatif des résultats des essais de compactage d'un sol traité par cimente Chamil. ....	57
Tableau III-19: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine (2 %)....	58

Tableau III-20:Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine (4 %). ....	59
Tableau III-21: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine (6 %)...	60
Tableau III-22: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine (8 %)...	61
Tableau III-23: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine 10 %... ..	62
Tableau III-24: Récapitulatif des résultats des essais de compactage d'un sol traité .....	63
Tableau III-25: Essai cisaillement pour sol naturel.....	65
Tableau III-26: les Paramètre de Cissaillement .....	89
Tableau III-27: Récapitulatif des résultats de compression simple en fonction des teneurs de ciment (Chamil et Matine). .....	102

### INTRODUCTION GENERALE

La stabilisation des sols aux liants hydrauliques, et plus particulièrement aux ciments, est connue depuis plus de d'un demi siècle. Elle a été pratiquée notamment aux U.S.A. puis en Grande-Bretagne et en Allemagne sous le nom de sol ciment plusieurs années avant de faire son apparition en France. Les études de traitement effectuées sur le sol confirment, l'action de ciment sur leurs caractéristiques de plasticité. Les résultats obtenus montrent une certaine amélioration des propriétés géotechniques des échantillons de sols étudiés, mais l'efficacité des produits de traitement testés n'est pas encore clairement à l'échelle de la pratique.

La technique de traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques se développe pour trois raisons :

- L'amélioration de la qualité du traitement des sols fins obtenue par des engins plus efficaces et des procédures de mise en œuvre plus rigoureuses.
- La raréfaction des matériaux granulaires issus des carrières ainsi que la difficulté d'ouvrir des emprunts hors de l'emprise du chantier, en raison de l'hostilité croissante de l'opinion face aux nuisances. Ces raisons incitent à la réutilisation des sols, même s'il faut remédier à leur qualité médiocre par un dosage plus élevé en liants.
- Des raisons économiques. À titre d'exemple, une plate-forme commerciale ou industrielle construite en Ile-de-France avec des matériaux granulaires, coûte 40% plus cher qu'une plate-forme en sols traités.

La volonté d'aménagement du territoire conduit au développement des infrastructures telles que routes, autoroutes, voies de chemins de fer ou plates-formes industrielles dont l'implantation requiert des travaux de terrassement. Ces terrassements concernent la réalisation de remblais, de couches de forme et d'assises. Compte tenu de la nature des terrains rencontrés, ces structures sont réalisées de plus en plus souvent à partir de sols fins qui nécessitent un traitement pour répondre aux caractéristiques mécaniques demandées.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude expérimentale qui a pour objet, d'une part, de caractériser les propriétés de résistance et de déformabilité d'un sol prélevé sur

## **Introduction générale**

---

le site de Chaaba El Hamra (wilaya de M'sila), et d'autre part, de déterminer les paramètres physiques et mécaniques de ce sol compacté aux conditions de l'optimum Proctor normal avant et après leur traitement par différents types de ciment (Chamil et Matine).

Le présent travail est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente un état des connaissances sur le traitement des sols
- Le deuxième chapitre présente le programme expérimental exécuté, puis décrit les procédures expérimentales suivies et les appareillages utilisés.
- Le troisième chapitre présente et analyse les résultats d'essais obtenus.

# CHAPITRE I

## ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE TRAITEMENT DES SOLS

### I.1 : Introduction :

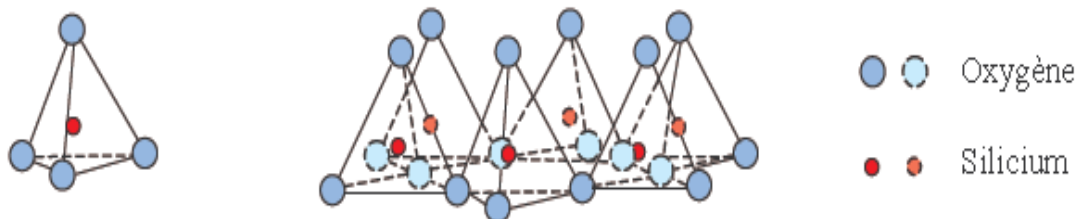
Le traitement des sols est une technique éprouvée et peut être considérée comme classique en construction routière. Les actions de traitement des matériaux avec de la chaux ou d'autres réactifs (ciments, cendres volantes, laitiers ou autres sous-produits industriels éventuellement). Avec des sols fins moyennement ou très argileux .

Après énumération des objectifs du traitement des sols, ce chapitre présente les techniques de traitement disponibles, notamment le cas du traitement chimique aux liants hydrauliques et particulièrement le traitement au ciment.

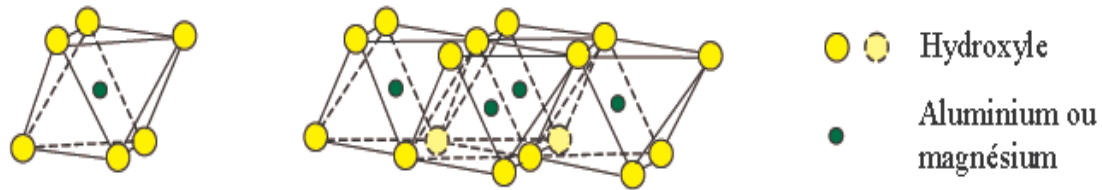
### I.2 : Les argiles :

#### I.2.1 : Définition :

Les argiles sont des phyllosilicates hydrates formés par l'association de feuillets élémentaires qui s'accrochent entre eux pour former des éléments dénommés empilements par certains auteurs (push et al, 1999), ou cristallites par d'autres (Tessier & grimldi, 1993) l'espace entre deux feuillets est appelé espace inter foliaire. Ces cristallites se rassemblent par des dispositions face-face pour former une particule argileuse. Dans le cas des smectites calciques, les empilements de cristallites laissent des espaces libres au sein des particules, espaces qui jouent un rôle très important au cours de la dessiccation et de l'humidification. Le nombre de feuillets par particule est variable suivant le type d'argile considérée et, dans le cas des smectites, variable en fonction de l'état hydrique (ben rhaïem et al, 1986) .



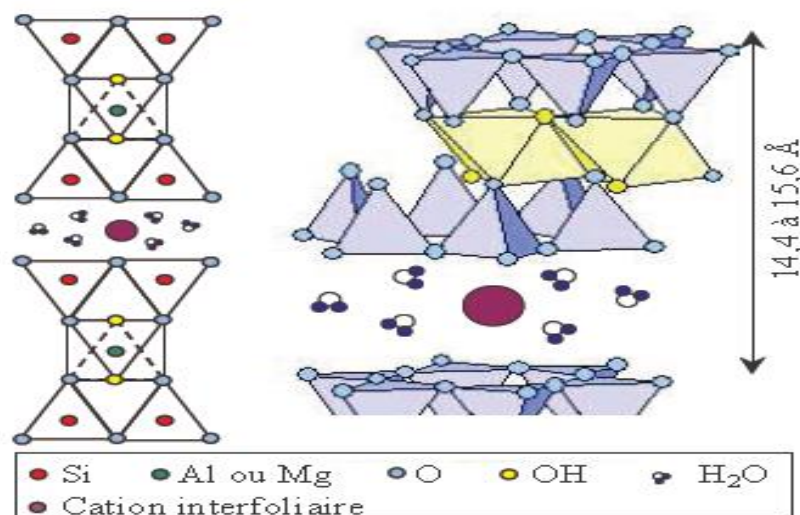
*Figure I-1: Présentation d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique.*



*Figure I-2: Présentation d'un octaèdre et d'une couche octaédrique.*

### I.2.2 : Différents types d'argile :

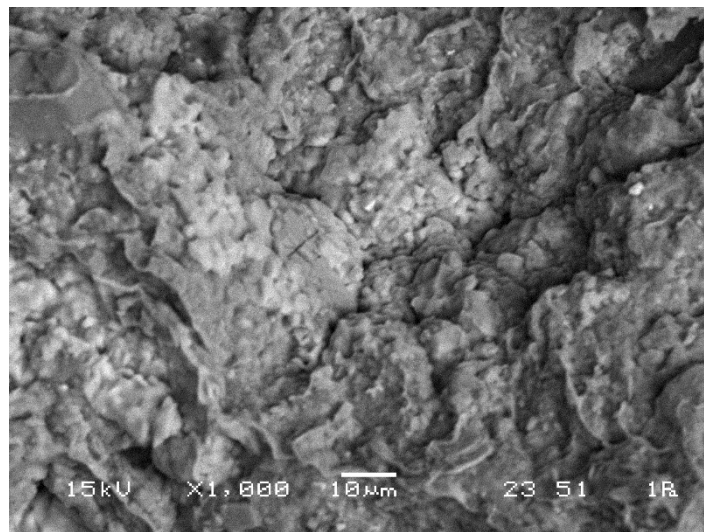
Trois grands types d'argiles peuvent être identifiés. Il y a tout d'abord le groupe de la kaolinite dont le feuillet élémentaire comporte une couche tétraédrique et une couche octaédrique. Les liaisons entre les feuillets sont de type hydrogène et peuvent être qualifiées de liaisons fortes. Les argiles de cette famille sont dites argiles T-O. Le deuxième grand groupe d'argile est celui des illites pour lequel les feuillets sont composés de trois couches : deux tétraédriques et une octaédrique. Les liaisons entre les feuillets se font par des ions potassium énergiquement fixes. Ces argiles sont appelés argiles T-O-T. Le troisième groupe est celui des smectites sont également formes de feuillets à trois couches et sont donc aussi des argiles T-O-T (fig. I.4). Il n'existe pas de liaison hydrogène entre les feuillets élémentaires ni de cation interfoliaire capable de maintenir fortement les feuillets entre eux de plus les substitutions d'aluminium par du fer ou du magnésium au sein des octaèdres et tétraèdres sont assez fréquentes. La montmorillonite est une argile de famille des smectites comme la bentonite qui est aussi une roche issue de l'altération de cendres volcaniques (Foucault & Raoult, 1995).



*Figure I-3 : Structure des argiles du groupe des smectites.*

### I.2.3 : Texture des argiles :

La texture des minéraux argileux dépend du mode de sédimentation et de l'état de consolidation. Une roche argileuse qui présente une organisation serrée et orientée des particules d'argiles n'a pas le même gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation a été rapide et récente et pour lequel la distance entre les plaquettes est maximale. Cette organisation des minéraux argileux est la principale cause du gonflement anisotrope (wakim j, 2005). Les matériaux argileux ne sont pas uniquement composés des argiles. Au sein de la fraction argileuse, plusieurs types de minéraux peuvent coexister. La texture des matériaux argileux se superpose donc aux organisations des autres minéraux non argileux. Cette hétérogénéité rend la structure et la texture extrêmement complexes, surtout lorsque les minéraux argileux sont cimentés par d'autres minéraux carbonatés. Les observations microscopiques effectuées par Montes et al, cité Par (wakim j, 2005) sur les argilites, subissant des cycles d'humidification dessiccation, confirment des fracturations le long des surfaces localisées à proximité des matériaux rigides non gonflants (Figure. 1.5).

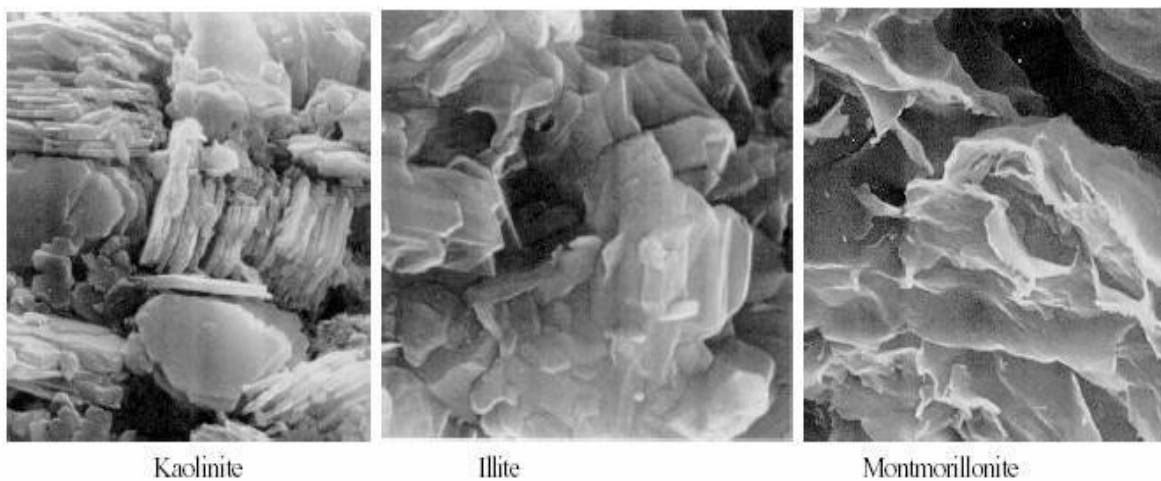


**Figure I-4: Ouverture des fissures en proximité des matériaux rigides**  
Montes et al, (Goufi et al, 2021).

L'évolution de la micro texture en fonction de l'hydratation peut être observée à l'aide du microscope électronique à balayage (M.E.B.) ou de la tomographie à rayons X (M. Gasc-Barbier, H. Freissmuth et X. Daupley) cité Par (wakim j, 2005). La figure I.6 présente des images de ces argiles prises au microscope électronique à balayage, les observations au microscope électronique à balayage permettant d'analyser l'évolution de la texture au cours du gonflement. Montrent que, pour la kaolinite, le gonflement est uniquement de type inter-

agrégats, au niveau des pores interstitiels alors que pour les smectites, le gonflement est de type intra-agrégats, c'est-à-dire entre les feuillets ( Bultel Frédéric, 2001).

Ces observations microscopiques confirment une nouvelle organisation des feuillets argileux qui se manifeste par un écartement parallèle observable dans le cas des roches argileuses ou par un effet combiné d'un écartement et d'une rotation comme c'est le cas pour les sols argileux non indurés (Wakim J, 2005). Globalement, le pourcentage en minéraux gonflants, les carbonates, les minéraux non gonflants d'une part, et la nature de la consolidation d'autre part, présentent une influence notable sur le gonflement, le retrait et le changement des propriétés mécaniques .



*Figure I-5: Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles (Mitchell, 1986).*

### **I.3 : Les Limons :**

#### **I-3-1 : Particularisation spécifique des limons :**

Les limons sont différenciés extrêmement répandues [Foucault et Raoult ; 2010]. Ils se rencontrent couramment lors des travaux de terrassement des travaux publics (construction de tours d'habitation, de barrage, de travaux routiers et autoroutiers) .

On géotechnique, le limon se distingue par une fraction granulométrique intermédiaire entre argile et sable dont la fraction granulométrique est de  $2/63\mu\text{m}$  [Holtz et Kovacs ; 1996] , [Robitaille et Tremblay ; 1997] , [ Dupain et Saint-Arreman ; 2009].

La classification d'un sol est définie par :

- Sa courbe granulométrique.

- Son argilosité (son activité argileuse ou sa capacité d'adsorption).
- Par sa valeur au bleu (VBs), son indice de plasticité (IP) et par ses limites d'Atterberg (wL et wP).

Les limons font partie de la classe des sols fins (classe A) définie par le Guide des Travaux Routier et le LCPC-SETRA (France). Cette classe, très courante en Algérie, traitée améliorée par un mélange chaux-liant hydraulique, est utilisée comme matériau de couche de forme pour la construction des route, route à grande vitesse et autoroute [Cabane ; 2004] , [Abdo ; 2008] , [ Chardard et Gandille ; 2008] .

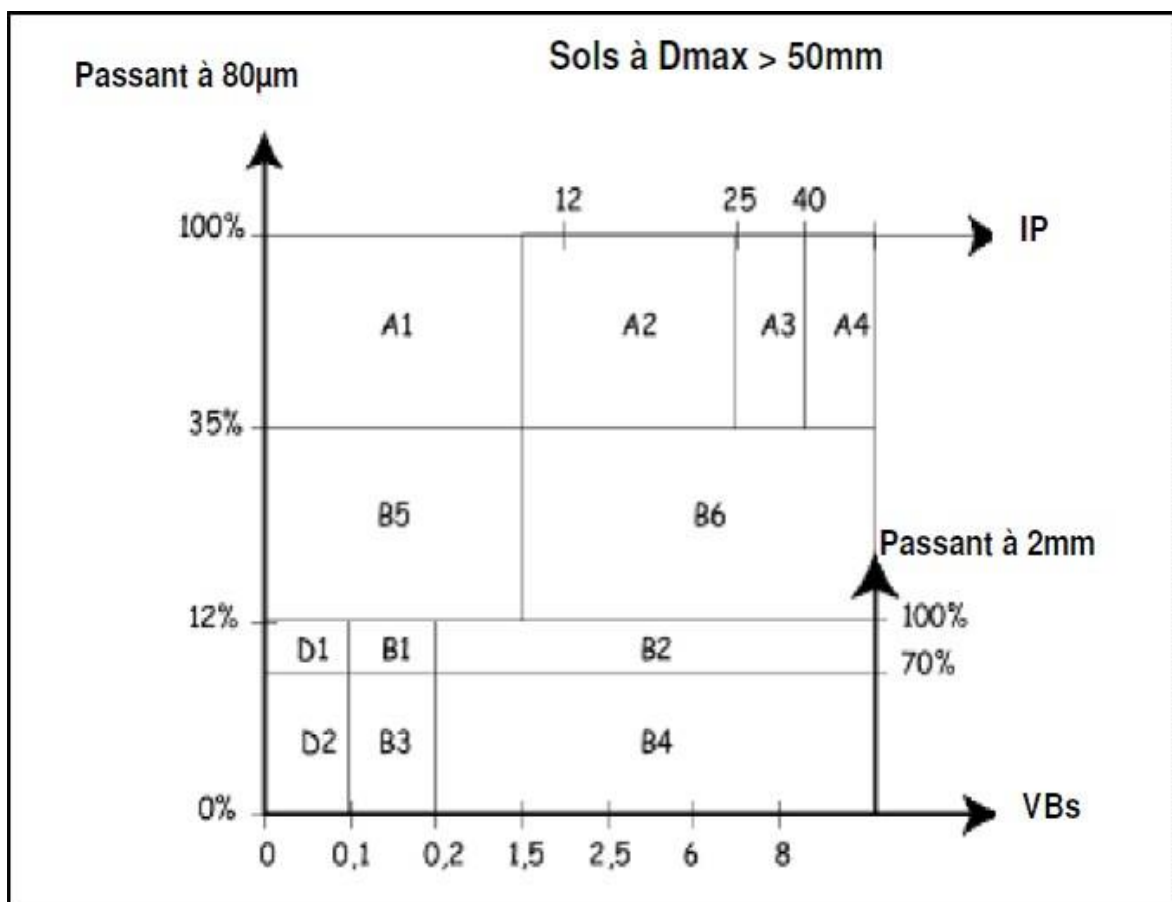


Figure I-6: Classification des sols [LCPC-SETRA 1992]

Une classification intermédiaire permet de définir l'état hydrique du sol. Elle fait intervenir :

- La teneur en eau naturelle (w<sub>nat</sub>) et de la teneur en eau optimale (w<sub>OPN</sub>)

- L'indice portant immédiat (IPI) à sa teneur en eau naturel après compactage qui définit sa résistance au poinçonnement (essai en plaque).

Le comportement mécanique d'un sol est lié à sa teneur en argile, en matières organiques et en eau :

- Le terme argile regroupe différents minéraux chimique et physique dont les particules n'excèdent pas  $2\mu\text{m}$ . La grande attraction de l'élément argileux pour l'eau influe sur les caractères physico-mécaniques du sol comme la plasticité, le retrait/gonflement, la compressibilité\* et la cohésion\* et diminue leur perméabilité ainsi que l'angle de frottement interne.
- Les matières organiques comprennent des composés à base de molécules carbonées (végétation, microorganismes, etc.) et des composés issus de leur dégradation. La réaction entre la fraction argileuse et la fraction organique qui ne doit pas excéder 1% dans le sol à traiter améliore sa plasticité, sa porosité et sa compressibilité et retarde sa prise (GTS) [LCPC-SETRA 2000].
- La teneur en eau et l'eau interstitielle influent sur la plasticité, la cohésion et la porosité d'un sol en fonction de sa composition minéralogique.
- L'étude pédologique du sol et la nature de l'eau du sol et celle entrant dans le traitement sont très importants. C'est au travers de ces deux paramètres qu'en recherche les origines de perturbations de la prise des sols traités.

#### **I.4. Objectifs du traitement :**

Le traitement des sols médiocres (sols mous, limons, marnes, tourbes, etc.) ainsi que les sols à problèmes (sols liquéfiables, sols expansifs, sols effondrables) visent à satisfaire les points énumérés ci-après :

- ❖ Rendre utilisable un sol qui ne présente initialement pas les caractéristiques requises à son utilisation.
- ❖ Optimiser les opérations de réalisation par assèchement des sols qui deviennent praticables aux engins de chantiers.
- ❖ Possibilité d'éviter le décapage des sols existants et leur substitution par des sols d'apport.
- ❖ L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable.
- ❖ Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre les particules.
- ❖ Possibilités de préserver l'écosystème et de ne plus avoir besoin de parcourir de nouveaux gisements naturels.

- ❖ Limiter la sensibilité des sols aux variations hygrométrique saisonnières.

La réalisation de ces objectifs est incontestablement dépendante de la technique de traitement adoptée et des procédures de sa mise en œuvre pour atteindre le niveau de performance recherché.

Le guide des terrassements routiers en usage en France Classification des sols [LCPC-SETRA 1992] fixe les critères de classification des matériaux utilisables en construction routière (**figure I-6**) .

### **I.5 Techniques de traitement possibles :**

Le Traitement des sols consiste à modifier leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques, il existe de nos jours trois techniques de traitement ou de stabilisation des sols en géotechnique routière :

- Le traitement mécanique (drainage, substitution, compactage dynamique, etc.)
- Le traitement thermique (augmentation de la température du sol traité) .
- Le traitement chimique (par additif).

**Tableau I-1: présente les avantages et les inconvénients des différentes techniques de Stabilisation.**

Technique	Procédés	Avantages	Inconvénient
<b>Stabilisation Mécanique</b>	Compactage	Le compactage est le plus économique  -Réduire le potentiel expansif.	-Il faut une grande quantité d'eaux (compacter au-dessus de l'optimum avec une $W_n$ élevée).
	Substitution	-	-l'épaisseur de la couche -la disponibilité du matériau
	Péhumidification	-	-le temps de l'opération. -la distribution uniforme de $W_n$ .
	Méthode de contrôle	-Minimiser l'humidification ou des séchement.	-la sensibilité à la variation de la teneur en eau.
<b>Stabilisation Thermique</b>	Augmenter la température	-Réduire la répulsion électrique entre les particules .	-Très coûteuse.
<b>Stabilisation Chimique (par ajout des matériaux)</b>	Les sels	-augmenter la concentration ionique de l'eau libre. -réduire le phénomène d'échange .	-le choix de type de dosage et de la méthode d'addition d'un produit.
	Le ciment	-augmenter la résistance -diminuer la plasticité. -réduire le potentiel de variation de volume. -augmenter la limite de retrait.	-utilisation d'un dosage important.
	La chaux	-diminuer la plasticité , la densité sèche et la pression de gonflement -augmenter la résistance et $W_{opt}$ . -utilisation d'un faible dosage .	-Carbonation de la chaux .

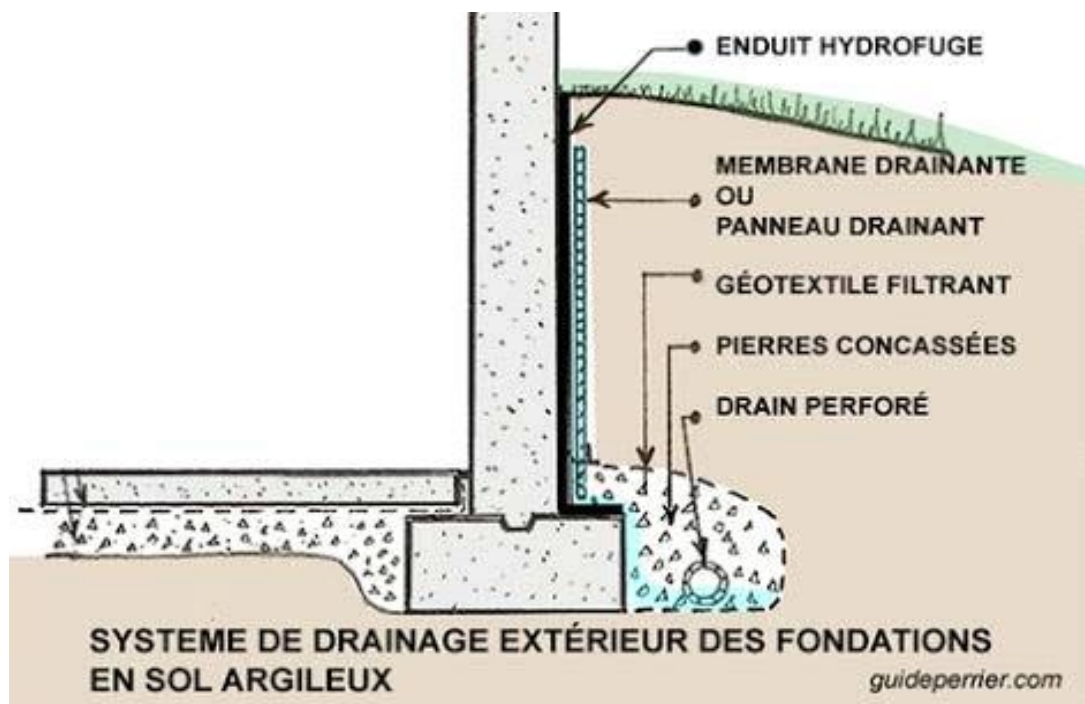
Les deux premières techniques peuvent être considérées comme coûteuses ; la dernière technique étant donc la mieux privilégiée en raison des avantages techniques,

économiques, écologiques et environnementaux qu'elle procure. Par ailleurs, seule cette dernière technique en relation avec le thème proposé dans cette étude est décrite sommairement ci-après. On peut simplement noter que le choix de l'une de ces techniques dépend de plusieurs paramètres liés aux considérations économiques, à la nature du sol à traiter, à la durée de l'opération de traitement (donc du chantier), à la disponibilité des produits de traitement à utiliser et/ou des moyens disponibles pour leur mise en œuvre et aux conditions environnementales plus ou moins favorables .

### I.5.1 : traitement mécanique :

#### A) Drainage :

C'est la technique la plus classique qui est mise en œuvre. Plusieurs procédés sont utilisés ; comme les tranchées drainant, drains de carton, drains de sables verticaux, tapis de la cote de la nappe (Livet).



*Figure I-7: Amélioration par drainage. (Marwana et Muangongo, 201)*

#### B) Substitution :

C'est la suppression de la couche du sol gonflant. C'est la solution la plus évidente. Si la couche a une grande épaisseur, la suppression totale ne peut être envisagée. Elle consiste à excaver jusqu'à une certaine profondeur puis remblayer avec des sable ou autres matériaux graveleux. C'est une solution très coûteuse .



*Figure I-8: Substitution méthode simple (enlèvement et remplacement) des travaux de terrassement routière.*

### **C) Compactage :**

Dawson recommande de compacter les argiles à des densités minimales et Seed (1961) note que les argiles compactées de la côte sèche de l'optimum ont plus tendance à gonfler que si elles sont compactées de la côte humide. Malheureusement, de la côte humide, Les argiles sont moins résistantes. Il faudrait donc retrouver un compromis.

De manière générale le compactage "faible" doit être appliqué aux matériaux humides pour éviter leur mise en saturation et le compactage intense aux matériaux secs. .

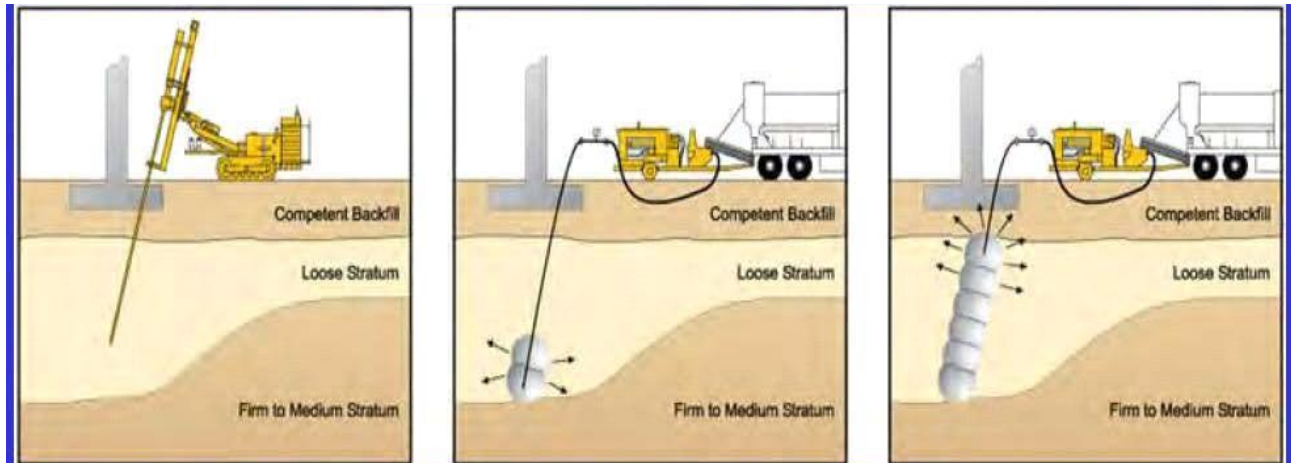
### **D) Préhumidification :**

On crée ainsi un gonflement avant construction et si une forte teneur en eau est maintenue. Le volume restera sensiblement constant par la suite. Deux techniques sont utilisées :

- Simple arrosage par jet.
- Création de bassins au-dessus du sol gonflant, et c'est beaucoup plus utilisé.

### **C) Par injection :**

L'injection est un procédé largement utilisé dans les travaux de traitement des terrains dont les caractéristiques mécaniques et/ou hydrauliques initiales sont médiocres insuffisante, en vue de l'implantation d'ouvrages de génie civil (barrages, tunnels ouvrages d'art, etc.). Le procédé consiste à injecter dans le sol, à l'aide d'une technique appropriée, en général à partir de forages, un coulis dont la composition et les caractéristiques sont bien déterminées, suffisamment fluide pour pénétrer dans le réseau poreux du sol. Son rôle va être de « faire prise » avec celui –ci, formant ainsi un matériau composite présentant des caractéristiques améliorées par rapport au sol initial. (AMOURA et MAAMERI, 2013) .



*Figure I-9: traitement des sols par injection*

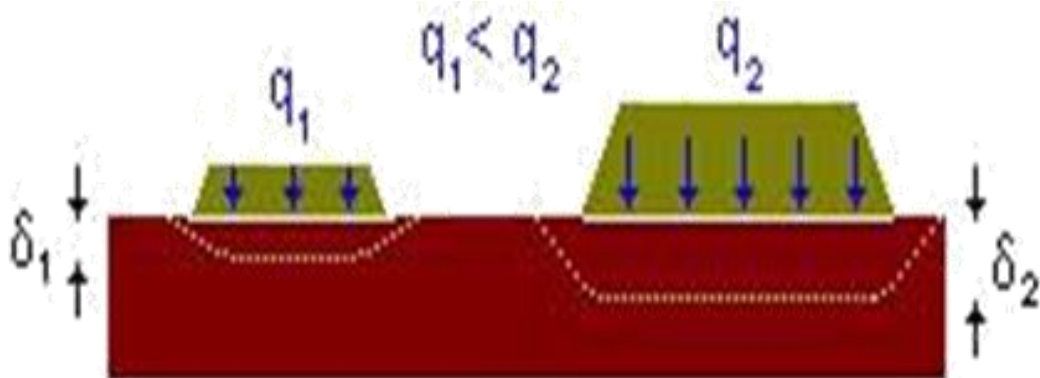
### C) Pré-chargement :

Le pré compression nécessite la compression du sol sous une pression appliquée avant l'application des charges. Cette méthode est utilisée sur des terrains dont le tassement va se prolonger durant plusieurs années. On applique généralement ces méthodes sur des mauvais terrains de composition principalement argileuse. Le principe consiste à surcharger le terrain afin qu'il se tassement naturellement.

- Le pré chargement des sols s'opère selon les mêmes principes dans le cas des sols fins ou grenus. Le mode de réalisation est le même, mais la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir l'amélioration souhaitée dans délais beaucoup brefs que les sols fins et surtout argileux .

#### C-1 : Les avantage :

- Ne nécessite que du matériel de terrassement conventionnel.
- Tout entrepreneur peut effectuer le travail (technique simple).



*Figure I-10: Le principe de traitement des sols par le pré-chargement*

**C-2 : Les Inconvénients :**

- Surface de remplissage importante ( >10 fois de la dimension horizontale de la construction).
  - Transport de grandes quantités de sols.
  - Temps de chargement important (plusieurs mois à des années)

**D) Colonnes ballastées :**

- Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mise en place par refoulement dans le sol et compactés par passes successives. Ces colonnes ne comportent en particulier aucun liant sur leur hauteur. Elles peuvent être réalisées en maillage réguliers ou variables, en lignes, en groupes ou même de manière isolée
- Leur dimensionnement tient compte du type d'ouvrage, de la nature des charges, des tassements absolus et différentiels ainsi que la nature du sol à traiter.
- Les avantages de cette méthode sont d'une part, la rapidité de réalisation, et d'autre part le prix compétitif par rapport aux autres techniques existantes. Pour réaliser des colonnes, on peut recourir à plusieurs techniques et procédés d'exécutions sur le terrain. L'amélioration de sol par colonnes ballastées permet :
  - Réduire les tassements et augmenter la stabilité des massifs de sols mous.
  - Augmente la capacité portante.
  - De diminuer le temps de consolidation
  - Contribuer à la stabilité des ouvrages et réduire les risques de liquéfaction du sol dans les zones sismiques.

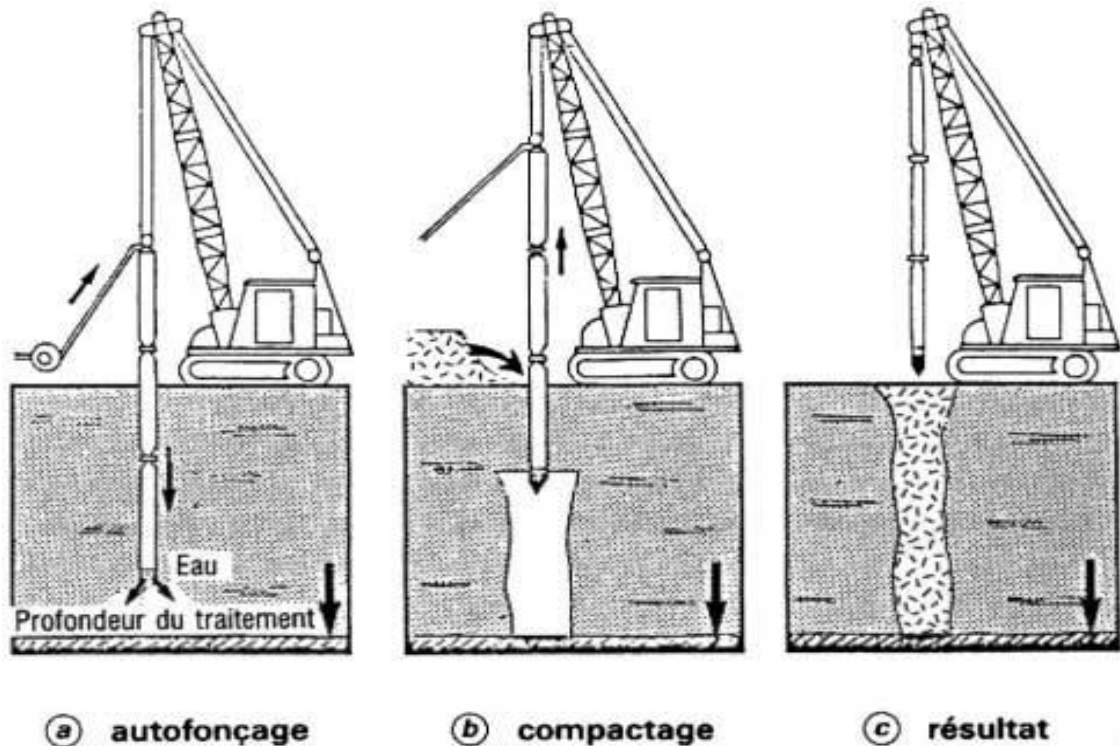


Figure I-11: Phases d'exécution des colonnes ballastées.

### I.5.2 : Traitement thermique :

- Une augmentation de la température peut améliorer la résistance d'une argile. En réduisant la répulsion électrique entre les particules sous l'effet de la chaleur, on provoque un écoulement de l'eau interstitielle due au gradient thermique appliqué.

### I.5.3 : Traitement chimique

Le traitement chimique des sols est réalisé à l'aide d'additifs, on en distingue trois types :

- ❖ **Traitement par ajout de matériaux inertes** : Le traitement par ajout de matériaux inertes comme les sables et les graviers utilisés en mélange avec le sol réduisent le pourcentage global d'éléments actifs (inférieurs à 2 microns), donc l'activité des fines argileuses. L'efficacité de ce mode de traitement sera fonction du pourcentage d'éléments inertes, de leur granulométrie et du mode de mise en place du mélange.
- ❖ **Traitement par addition de solutions salines** : Son efficacité serait très influencée par la nature du fluide hydratant ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ) et de sa concentration.

❖ **Traitement chimique par additifs** : Elle est employée surtout pour les sols contenant une certaine quantité d'argile. Ils ont pour effet de réagir avec la fraction argileuse et de modifier leur environnement chimique et sa structure minéralogique.

Cette technique a fait l'objet de nombreuses recherches à travers le monde. Les chaux aériennes principalement calciques (chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux) et les liants spéciaux routiers sont les produits de traitement les plus utilisés. L'action de ces produits de traitement sur l'état hydrique des sols fins et sur leur fraction argileuse est mise en évidence en pratique (Morel, 1984 ; Bell, 1989, 1996 ; Derriche et Lazzali, 1997 ; Mellas et al., 2004 ; Tonoz et al., 2004, 2006 ; etc.). D'autres produits de traitement (sable de dunes, solutions salines, bitume, poussière de pierres, etc.) ont été testés pour stabiliser les sols gonflants et autres sols problématiques (Brooke, 2009 ; Harichane et al., 2011 ; Khabbaz et Fatahi, 2011 ; Louafi et Bahar, 2012 ; Mohammed zein et Al-Rawas, 2011 ; Ramadas et al., 2011 ; Sharma et al., 2012 ; etc.). Les résultats obtenus montrent une amélioration des propriétés géotechniques des sols étudiés, mais l'efficacité de ces produits n'est pas encore clairement établie en pratique. Parmi les produits de traitement qui viennent d'être cités, seuls donc le liant hydraulique (ciment) présente un intérêt particulier dans la suite de cette étude. Les conditions de son utilisation sont schématisées dans (la figure I.6).

❖ On notera simplement que le guide technique en vigueur en France pour le traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques (LCPC-SETRA, 2000a) décrit de manière suffisante les produits de traitement en question, l'action de ces produits sur les sols traités et les caractéristiques requises à leur utilisation ; ces dernières étant fixées dans les normes françaises (NF P 15-301) pour les ciments et (NF P 98-101) pour la chaux. Il en va de même pour les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004) qui fixent un code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou au ciment, ainsi que pour les règles du Département des armées de l'US Air Force. Aussi, n'exposera-t-on ci-après que les propriétés significatives que procurent le traitement au ciment. Le tableau I.2 recommande le choix du liant (chaux, ciment ou leur combinaison) et le dosage convenable en fonction des caractéristiques de plasticité du sol à traiter selon les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004).

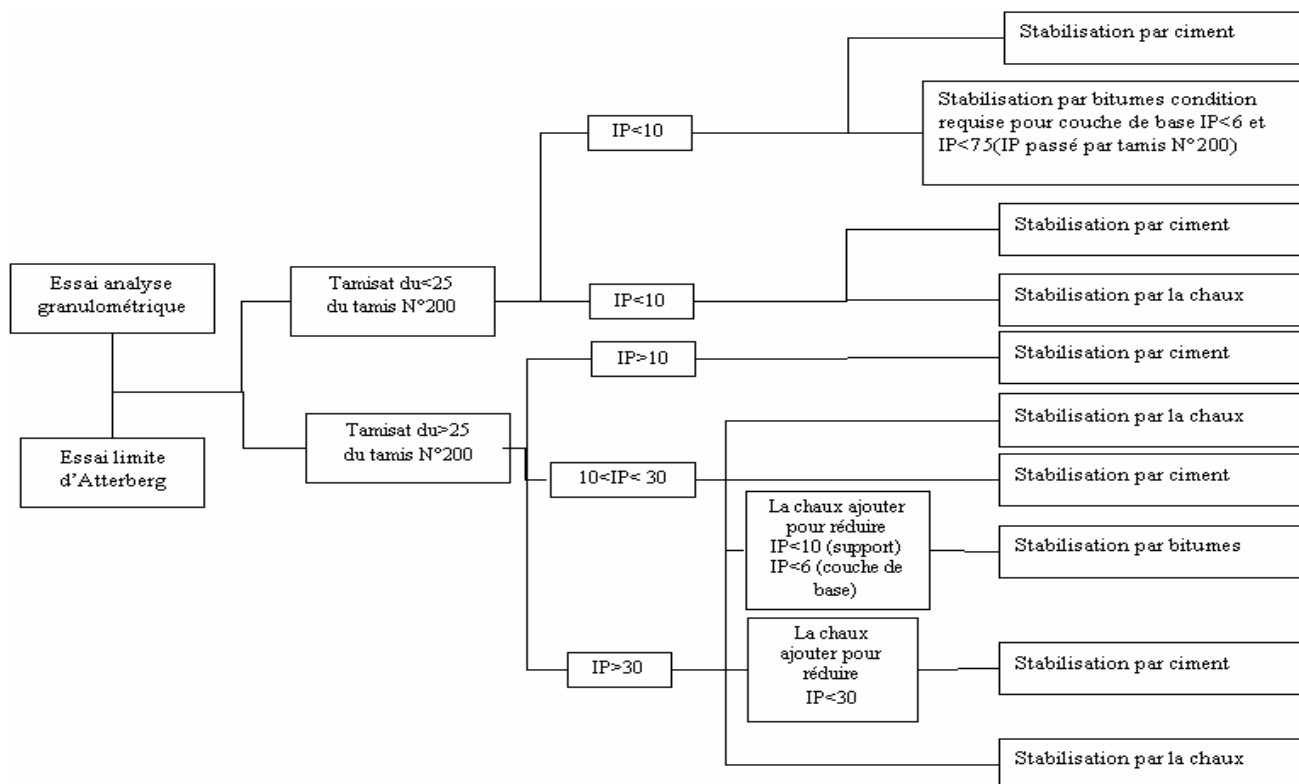


Figure I-12: Conditions d'utilisation de la stabilisation chimique (Dept. of the Army, 1983).

Tableau I-2: Synthèse sur les dosages en stabilisants pratiqués pour le traitement des sols selon les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004).

Stabilisation	Indice de plasticité							Dosage
	0	5	10	15	20	25	30 et +	
	Valeur de bleu du sol (g de bleu/kg de matériau)							
	0	10	15	22	30	40	60 et +	
Chaux								4 à 8%
Ciment								4 à 8%
Mixte (chaux puis ciment)								1 à 2% chaux 4 à 6% ciment
Composé (chaux-ciment)								5 à 8%

### I.5.3.1 Traitement chimique par ajout de ciment :

On distingue cinq types de ciment (CEM I : ciment Portland, CEM II : ciment Portland composé, CEM III : ciment de haut fourneau, CEM IV : ciment pouzzolanique et CEM V : ciment composé), dont le choix pour le traitement des sols se fera sur différents critères (CRR, 2004) :

- Temps de prise assez long pour la mise en œuvre.
- Bonne résistance à moyen et long terme.
- Compatibilité avec le sol à traiter.
- Bon rapport qualité/prix.

Parmi les ciments cités ci-dessus, le ciment Portland composé est le plus utilisé en Algérie sous forme de cinq classes distinctes : CHAMIL (CEM II/B 32.5 R NA 442), MOHTARIF (CEM II/B 32,5R NA 442), MALAKI (CEM II/A-L 52,5NNA 442), MATINE (CEM II/B 42,5 RNA 442) et MOKAOUEM (CEM III/B 42,5 – ES NA 442) de fabrication locale dans les cimenteries Lafarge Algérie. Les fiches techniques de ces cinq classes de ciment sont à chercher sur le site (<http://lafarge-dz.com/ciment.html>) .

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques à priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argile. L'action du ciment sur les sols traités se manifeste par (Routes 89, 2004) :

- L'amélioration des caractéristiques initiales des sols, notamment des sols fins prétraités à la chaux ou des sols peu ou pas plastiques dont les teneurs en eau ne permettent pas de réaliser des remblais ou des couches de forme dans de bonnes conditions et avec des garanties suffisantes de qualité.
- L'obtention d'un développement rapide et durable des résistances mécaniques et des stabilités à l'eau et au gel.
- Des modifications immédiates et à long terme des propriétés géotechniques et mécaniques du sol traité (hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres avec passage par la phase soluté suivie de la cristallisation des produits hydratés : prise hydraulique).
- Une diminution de la teneur en eau du mélange sol-ciment.

Ce mode convient au traitement des sols destinés à une utilisation en remblais ou en couches de forme routières. On notera simplement que les modalités de traitement des sols au ciment sont régies par les normes européenne (EN 197-1) et française (NF P 15 -108) en vigueur.

#### I.4.3.1.1 : Techniques de réalisation des travaux de traitement :

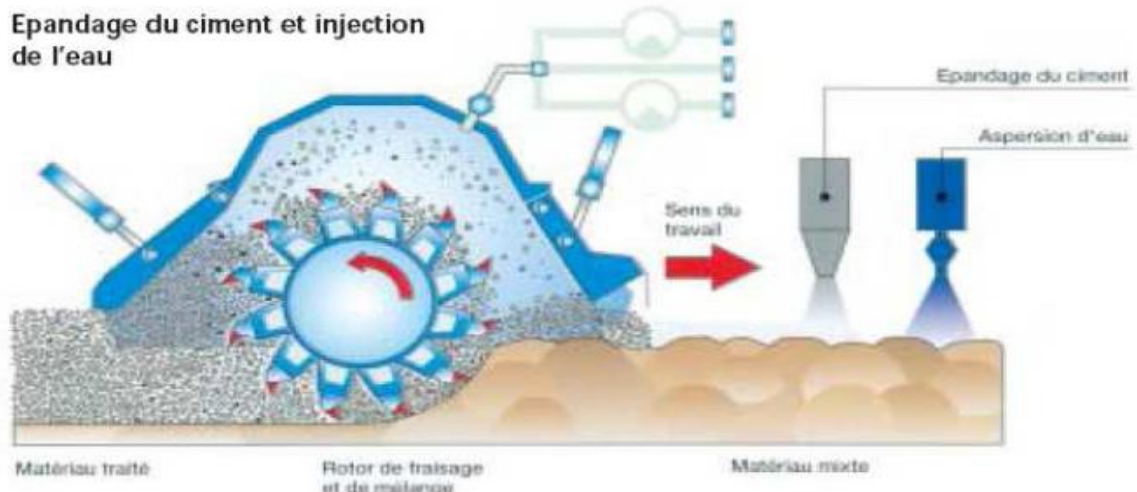
La réalisation des travaux de traitement des sols fait appel suivant les cas de chantier à un certain nombre d'opérations élémentaires exigeant un ordonnancement précis, un savoir-faire et des matériels spécifiques.

Les travaux de traitement des sols se caractérisent par la nécessité de mettre en œuvre une grande variété de matériels et de techniques d'exécution :



*Figure I-13: Traitement des sols au Ciment*

- La préparation du sol à traiter (élimination des éléments blocaille, homogénéisation, humidification éventuelle).
- L'épandage du liant de traitement.
- Le malaxage du liant avec le sol.
- L'ajustement de l'état hydrique (soit humidifier le sol par arrosage, soit l'assécher par aération).
- Le réglage du mélange.
- Le compactage.
- L'application de la protection superficielle du sol traité (cas d'une couche de forme).



*Figure I-14: Procédé d'épandage du ciment.*

### I.4.3.2 : Traitement chimique par ajout de la Chaux :

#### I.4.3.2.1: Définition :

La chaux est à la fois le liant minéral majeur de l'histoire de la construction et un des produits minéraux les plus utilisés depuis le début de l'ère industrielle. Avant la chaux, le plâtre fut la première cuite pour réaliser des briques dès l'Ancien Empire de l'époque pharaonique. Puis, les mélanges avec des matériaux carbonatés apparurent.

Dans l'ajout de 2% à 8% de chaux à sol expansif diminue visiblement le potentiel de gonflement de celui-ci.

De par l'affinité à l'eau de la chaux, une grande part d'eau existante dans le sol peut être absorbée par celle-ci, ce qui contribue largement à la réduction du potentiel de gonflement. Par ailleurs, des travaux effectués sur le compactage des sols attestent que le poids volumique à l'optimum Proctor est souvent augmenté lorsqu'une faible quantité de chaux. Dans le projet de réalisation de l'aéroport de Dallas (USA) le sol a été stabilisé par ajout de chaux. La couche traitée est épaisse de 2.5m à 5m. Le potentiel de gonflement du sol, de l'ordre de 10%, fut diminué pour des valeurs satisfaisantes. Cette même technique a été utilisée dans la réalisation d'autoroutes aux USA (Chen, 1988). Des études élaborées par Chen (1988), Nelson et al, (1992), Sivapullaiah et al, (2000) et Puppala et al, (2004) montrent que, parfois, l'ajout de chaux au sol expansif contenant des proportions notables (>3%) en gypse ou en sulfate peut occasionner un soulèvement au lieu d'une stabilisation. Puppala et al, (2001) rapportent que la chaux est l'unique matériau de stabilisation à base de calcium qui peut occasionner des réactions expansives en contact du sulfate.

Le gonflement est d'autant plus visible que la température est basse. Aussi, en présence d'eau, le sulfate ou le gypse se combine au calcium (Ca) et à l'alumine ( $Al_2O_3$ ) de l'argile. Cette combinaison forme la traumasite et l'ettringite, et provoque des expansions assez spectaculaires (Chen, 1988 ; Nelson et al, 1992).

L'ettringite ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) se forme à partir des aluminates tricalciques ( $Ca_4Al_2O_6$ ) non hydratés. Trois types d'ettringites sont possibles : primaire, secondaire et différée. Le caractère expansif de l'ettringite, du type secondaire et différée, est particulièrement dû à sa teneur en chaux. L'ettringite de formation secondaire est susceptible au gonflement pour une large gamme de température. L'ettringite de formation différée gonfle particulièrement à des températures de l'ordre de  $60^\circ C$  à  $70^\circ C$ . L'effet de l'expansion de l'ettringite peut être réduit par ajout d'un ciment résistant au sulfate (Carde, 2007).

La traumasite ( $(Ca_3Si(CO_3)(SO_4)(OH)_6 \cdot 12(H_2O))$ ) se forme par attaque du sulfate à des températures de  $0^\circ C$  à  $5^\circ C$ . Elle peut, aussi, être produite par combinaison calcium – silicate hydraté d'une part, et les ions sulfate ( $SO_4$ ) ou carbonates ( $CO_3$ ) d'une autre part. Un des exemples de gonflement occasionné par ajout de chaux est celui présenté par Hunter et Dal, (1988) ou un soulèvement de 30.5cm a été rapporté.

De ce fait, le traitement d'un sol expansif à la chaux doit faire objet d'une analyse de faisabilité et de mise en oeuvre soigneusement menée. Compte tenu de la rapidité de prise du ciment comparativement à la chaux, un mélange approprié de cette dernière par un ciment résistant aux sulfates permet d'accélérer la stabilisation du sol (Chen, 1988).

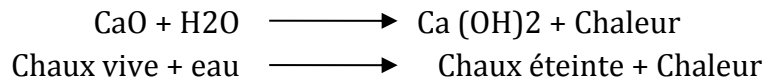
Chen (1988) rapporte que la chaux réduit visiblement l'indice de plasticité du sol et augmente la limite de retrait de la montmorillonite.

Mateos (1964) atteste que l'ajout de la chaux permet l'augmentation des résultats CBR des sols gonflants. Holm (1979) constate une augmentation du module de Young du sol de  $0.3 \text{ MN/m}^2$  à  $4.4 \text{ MN/m}^2$  lorsque celui-ci est traité à la chaux. Bell et Tyrer (1987) constatent une augmentation rapide et significative du module de Young d'une argile traitée à la chaux. Le pourcentage de chaux ajouté au sol traité est de 2% à 4%.

Selon Guney et al, (2007), la technique de traitement à la chaux ne donne pas de résultats satisfaisants dans les régions où les cycles humidification/séchage peuvent avoir lieu.

Les mêmes auteurs ajoutent que l'ajout d'un faible pourcentage de cendres volantes peut contribuer dans l'amélioration des résultats, cependant ces résultats doivent faire objet d'une analyse approfondie. En fait, le traitement superficiel du sol à la chaux réduit le potentiel de gonflement. Cependant il ne constitue pas une imperméabilisation (Mouroux et al, 1988), (Zenkhr, 2010).

Les chaux existantes dans le commerce sont de deux types : chaux vive et chaux éteinte. Dans sa forme naturelle, la chaux est vive (CaO). Celle-ci peut aussi être rencontrée sous une forme appelée dolomite de chaux (CaO+MgO). La chaux éteinte est obtenue par hydratation de la chaux vive. L'expression (1) en montre la réaction chimique. Trois types de chaux sont industriellement productibles : la chaux hydratée (Ca(OH)<sub>2</sub>), la chaux dolomitique hydratée (Ca(OH)<sub>2</sub>+MgO) et la chaux dolomitique hydratée double (Ca(OH)<sub>2</sub>+Mg(OH)<sub>2</sub>).



Lorsque la chaux est introduite à un sol, elle peut réagir non seulement avec l'eau, mais aussi avec les autres constituants du sol. Le processus de réaction de la chaux (vive ou éteinte) avec le sol dépend de la composition chimique du sol, du pourcentage de chaux ajoutée, de la température et de la durée de réaction. Selon Thompson (1968). Ce processus de réaction influera sur la fermeté du sol, la résistance de celui-ci et stabilité. Bell (1988) remarque que les montmorillonites réagissent avec la chaux de façon plus rapide que les kaolinites et les illites.

#### I.4.3.2.2: Différents types de chaux :

La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire (celui-ci représente 20% de la couche terrestre), selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux :

- \* chaux aérienne provenant d'un calcaire pur.
- \* chaux magnésienne provenant d'un mélange de calcaire et de carbonate de magnésium.
- \* chaux hydraulique provenant d'un calcaire argileux. (Zenkhrî ,2010)

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes elles se présentent sous deux formes :

- chaux vive
- chaux éteinte



*Figure I-15: Traitement des sols à la chaux*

#### **I.4.3.3 Traitement mixte à la chaux et au ciment.**

Ce mode de traitement constitue un compromis entre les traitements simples à la chaux et au ciment préconisés pour les sols trop humides et peu argileux respectivement destinés à une utilisation en couches de forme routières.

L'action de ces deux liants est complémentaire (le traitement à la chaux assèche les matériaux humides et le traitement au ciment apporte au mélange une rigidification rapide). Toutefois, un traitement préalable à la chaux à faible dose (0,5 à 2%) par son action immédiate amène le sol à son état optimal pour le traitement au ciment. L'effet du traitement mixte à la chaux (1% de CaO) et au ciment (4% de CPJ-CEM II/A 32,5) sur les courbes Proctor et CBR destinés à déterminer les caractéristiques de mise en œuvre des sols traités pour couches de forme. On notera en particulier :

- sur la courbe de compactage, une diminution de la densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale se traduisant par un décalage de la courbe de compactage vers la ligne de saturation ;
- sur la courbe de portance, une augmentation de l'indice portant immédiat correspondant à une teneur en eau de mise en œuvre égale à 90% de la teneur en eau optimale .

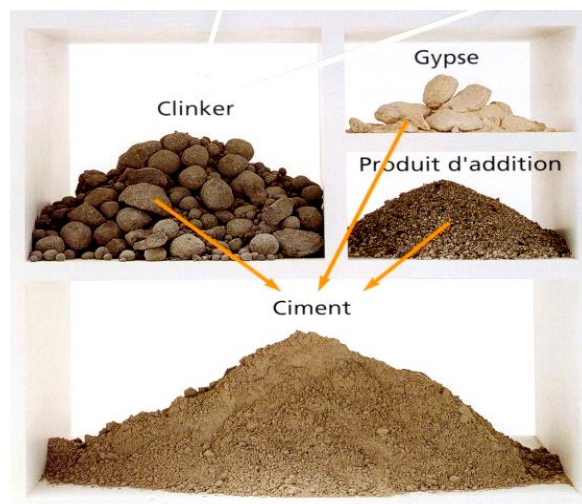
## I.6 : Traitement des sols par le ciment :

### I.6.1 : Les ciments :

#### I.6.1.1 : Définition :

Le ciment est généralement fabriqué en cuisant vers 1450 C0 des mélanges de calcaire et d'argile. On obtient alors des nodules durs, appelés clinkers ; c'est en broyant très finement ceux-ci, additionnés d'un peu de gypse, qu'on produit le ciment Portland. D'autres types peuvent être obtenus en mélangeant ce clinker broyé avec des constituants, broyés également, qui présentent des propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques : ce sont soit des laitiers de hauts fourneaux granulés, soit des cendres volantes ou encore des pouzzolanes, naturelles ou artificielles.

Il existe, en outre, des ciments spéciaux, tels les alumineux ou les sur sulfatés. La principale utilisation du ciment est le béton, dont il est le composant actif, mais il entre aussi dans la composition des mortiers pour maçonneries ou pour enduits.



**Figure I-16: La composition du ciment.**

Le ciment c'est le matériau du 20e siècle, il n'a guère plus d'une centaine d'années. L'écosais Aspdin prit un brevet d'invention en 1824, sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile qu'il appela "ciment Portland" à cause de l'aspect présenter par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de la Presqu'île de Portland. C'est le premier ciment, père d'une longue lignée .



*Figure I-17: Une cimenterie en Algérie « Lafarge »*

Ainsi, le XXe siècle a ouvert la voie aux ciments artificiels qui prendront progressivement le pas sur les chaux.

L'accélération sera plus manifeste à l'issue de la deuxième guerre mondiale lorsque le secteur du bâtiment produit essentiellement des logements neufs bâtis à partir d'éléments préfabriqués et, n'utilisant plus les chaux. C'est l'époque charnière où la chaux est en passe d'abandon, où son ancienneté est une marque d'archaïsme alors que les ciments améliorent les performances des liants.

Le développement n'a pu s'effectuer que grâce à l'apparition de matériels nouveaux : fours rotatifs et broyeurs à boulets en particulier. Les procédés de fabrication n'ont pas cessé de se perfectionner. Pour produire une tonne de clinker, constituant de base du ciment, il fallait en 1870 : 40 heures, actuellement, il faut environ 3 minutes. La production en Algérie s'accroît comme le montre les statistiques suivantes (source : Secrétariat d'état au plan Algérien) :

- 1977 : 2,2 millions de tonnes, 1982 : 8,0 millions de tonnes
- 1979 : 4,5 millions de tonnes, 1985 : 10,5 millions de tonnes

Les classes CEMI à CEMV correspondent aux classes courantes de ciment selon la norme NF EN 197-1.

Le tableau 1 donne pour chaque classe la proportion de clinker, constituant de base du liant hydraulique.

**Tableau I-3: Définition des 5 classes de ciment courant**

Classe	Dénomination	Proportion de clinker (%)	Autres constituants principaux (%)
CEMI	Ciment Portland	95-100	-
CEMII	Ciment Portland composé	65-94	6-35 Laitier de haut fourneau (S) Fumée de silice (D) Pouzzolane naturelle (P) Pouzzolane naturelle calcinée (Q) Cendre volante siliceuse (V) Cendre volante calcaïque (W) Schiste calciné (T) Calcaire (L) (LL)
CEMIII	Ciments de hauts fourneaux	5-64	36-95 Laitier de haut fourneau (S)
CEMIV	Ciments pouzzolaniques	45-89	11-55 Fumée de silice (D) Pouzzolane naturelle (P) Pouzzolane naturelle calcinée (Q)
CEMV	Ciments au laitier et aux cendres ou ciment composé	20-64	36-80 Laitier de haut fourneau (S) Pouzzolane naturelle (P) Pouzzolane naturelle calcinée (Q) Cendre volante siliceuse (V)

### I.6.2 : Types de ciment :

Les principaux ciments selon la classification NA largement inspirée d'AFNOR, en fonction de leur composition et de leur résistance, sont :

- Les ciments CPA, ciments Portland purs (composé du seul clinker) .
- Les ciments CPJ, ciments Portland composés, qui contiennent au moins 65% de clinker. Ce sont les plus utilisés en l'Algérie.
- Les ciments CHF, ciments de hauts-fourneaux, qui contiennent entre 60 et 75% de laitier de hauts-fourneaux.
- Les ciments CLK, ciment de laitier de clinker, qui contiennent 80% de laitier de hauts fourneaux.
- Les ciments CLX, ciment de laitier à la chaux.
- Les ciments prompts.

- Les ciments sont également classés en fonction de leur résistance à la compression. Les ciments produits et commercialisés en Algérie, sont essentiellement constitués de CPJ 32.5 et 42.5, types les plus demandés et CRS (Ciment résistant aux sulfates) largement utilisé dans les régions du sud. Le ciment fabriqué localement est livré en vrac, soit en sac double ou triple plis de 50Kg.

### I.6.3 : Réactions physico-chimiques du ciment :

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire un matériau qui, finement moulu et gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réaction et de processus d'hydratation et qui après durcissement conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment Portland est une des nombreuses variétés de ciment. La composition typique de son clinker est : 67% de CaO, 22% de SiO<sub>2</sub>, 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et 3% d'autres composés et il contient 4 phases majoritaires qui sont l'alite (3CaO.SiO<sub>2</sub> ou C3S), la bélite (2CaO.SiO<sub>2</sub> ou C2S), la célite qui est le mélange de l'aluminate de calcium (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C3A) et du ferroaluminate de calcium (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C4AF). Plusieurs autres phases, comme les sulfates d'alcalins ou l'oxyde de calcium s'y retrouvent en très faibles quantités.

#### I.6.3 .1: Réactions chimiques :

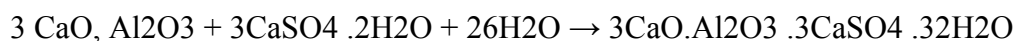
Le ciment en présence d'eau se solidifie. Les principales réactions chimiques responsables de ce phénomène sont les suivantes :

- $2(C3S) + 6 H_2O \rightarrow (3CaO. 2SiO_2. 3H_2O) + 3Ca (OH)_2$  (1)
- $2(C2S) + 4 H_2O \rightarrow (3CaO. 2SiO_2, .3H_2O) + Ca (OH)_2$  (2)
- $C3A + 6 H_2O \rightarrow (3CaO.Al_2O_3. 6 H_2O)$  (3)
- $(C3A) + Ca(OH)_2 + 12 H_2O \rightarrow (4CaO.Al_2O_3 .13H_2O)$  (4)
- $(C4AF) + 4Ca(OH)_2 + 22H_2O \rightarrow (4CaO.Al_2O_3 .13H_2O)+(4CaO. Fe_2O_3. 13H_2O)$ (5)

La réaction (1) est rapide ; elle est à l'origine de l'augmentation des résistances mécaniques à court terme. Le produit (3 CaO. 2SiO<sub>2</sub>. 3 H<sub>2</sub>O) est un silicate de calcium hydraté : c'est une tobermorite. La réaction (2), quant à elle est lente et est responsable de l'amélioration des propriétés mécaniques à long terme.

L'aluminate tricalcique s'hydrate très vite et nécessite l'addition d'un régulateur de prise de masse, le gypse (CaSO<sub>4</sub> .2 H<sub>2</sub>O) qui permet la formation de fins cristaux d'étrangéité (3CaO. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> .3 CaSO<sub>4</sub> .32H<sub>2</sub>O) retardant la prise en masse du ciment.

L'équation chimique de formation de l'étrangéité est la suivante :



Lorsque l'on mélange une argile ou une latérite à du ciment en présence d'eau, on assiste aux mêmes réactions chimiques comme pour les mélanges argile chaux. La portlandite produit lors de l'hydratation du ciment réagit avec le dioxyde de carbone de l'air et les minéraux argileux pour donner respectivement de la calcite et du silicate de calcium ou aluminat de calcium hydratés. L'échange cationique et la floculation- agglomération s'observent aussi dans les mélanges argile ciment. La réaction pouzzolanique impliquant les minéraux argileux n'est pas prépondérante compte tenu de la disponibilité de la portlandite.

### **I.6.3 .2 : Réactions physiques :**

Différentes réactions physiques se produisent pendant la prise du ciment. Il y a d'abord la formation d'une pâte de particules solides. A cet effet, les espaces interparticule sont interconnectés et remplis d'eau dite eau « capillaire ». Se développe ensuite à la surface des grains de ciment, un revêtement d'étrangéité empêchant la prise éclair. La réaction d'hydratation du ciment continue et après deux heures, il y a formation des cristaux fibreux qui sont des silicates de calcium hydratés (CSH). Ces composés connus sous le label de tobermorite lient les composantes du mélange argile (ou latérite)-ciment. Ces cristaux se développent et contribuent de façon notable à l'amélioration des propriétés mécaniques de ces mélanges.

### **I.6.4 : choix du type ciment utilisé pour le traitement :**

Dans la gamme étendue disponible, le choix du type de ciment se fera sur différents critères :

- Temps de prise assez long, pour la mise en œuvre;
- Bonne résistance à moyen et long terme;
- Compatibilité avec le sol à traiter;
- Bon rapport qualité/prix.

En principe, toutes les classes de ciments peuvent convenir pour le traitement des sols.

Les ciments les plus couramment utilisés dans ce domaine, sont les ciments de haut-fourneau (CEM III) de classe de résistance 32,5 N ou 42,5 N. Les ciments à prise rapide (CEM I) ne sont pas recommandés.

### **I.6.5 : Domaine d'utilisation :**

Les deux classes de ciment est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique

en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.



*Figure I-18: Procédé classique d'épandage du ciment.*

## CHAPITRE II

### PROGRAMME EXPERIMENTAL ET PROCEDURES D'ESSAIS

#### II.1 Introduction :

Cette étude a pour but de déterminer l'effet du temps de cure sur la résistance du sol de Chaaba El Hamra commune de M'sila traité par deux types de ciment (classes 32.5 et 42.5), puis analyser l'influence du traitement sur ses propriétés mécaniques. Outre les essais d'identification, le programme expérimental exécuté comporte des essais Proctor normale, essais de compression simple et essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande.

#### II.2. Description de la région d'étude :

Le site de Chaaba El Hamra est située au Nord de Cité Boukhmisa (Nord de la commune de M'sila), près de l'intersection de la route nationale RN45 avec l'évitement Nord–Est de M'sila (figure II.1). Le site est situé entre les lignes latitudinales ( $35^{\circ}49' 24''$ ) et longitudinales ( $4^{\circ}32' 26''$ ), à une altitude moyenne de 597 m. L'extension du site de cette zones comporte la construction des infrastructures routier comme un échangeur (ouvrage d'art) et une maison de maintenance a été construite pour la Direction des Travaux Publics Avec l'extension urbaine de la zone ainsi que les équipements (station de service, restaurants ... etc.) de l'autre côté de la route.



*Figure II-1: Localisation du site Chaaba El Hamra (wilaya de M'sila).*

Le programme expérimental a été réalisé dans laboratoire du génie civil de l'université de M'sila en parallèle avec le laboratoire de travaux publique LTPC antenne de M'sila.

Ce programme est réparti en deux parties :

**a. Essais d'identifications**

- L'analyse granulométrique (par tamisage).
- L'analyse granulométrique (par sédimentométrie).
- Les limites d'Atterberg.
- L'essai au bleu de méthylène.

**b. Essais mécaniques**

- Essais Proctor normale.
- Essais à la boîte de cisaillement directe
- Essais de compression simple.

**N.B** : Les procédures expérimentales suivies dans chaque type d'essai ont été conformes au tant que possible aux méthodes d'essais en vigueur

**II.2. Essais d'identifications :**

Ils comportent les essais d'identification physique permettant de déterminer les paramètres décrits ci-après, avec entre parenthèses la norme française correspondante.

**II.2.1. Analyse granulométrique par tamisage : (NF P 94-057) :**

Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série des tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse (Figure IV.1).



*Figure II-2: Appareillage d'analyse granulométrique (tamisage).*

### II.2.2. Analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P94-057).

Les particules inférieures à 80  $\mu\text{m}$  séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans de l'eau additionnée d'une défloculation. Les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille. Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et de la profondeur d'immersion de l'appareil. La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données (figure II.3).



*Figure II-3: L'essai de sédimentométrie.*

### II.2.3. Les limites d'Atterberg (NF P 94-051) :

Les limites de consistance, ou limites d'Atterberg (pédologue Suédois) constituent un indice important en géotechnique. Ces limites sont mesurées avec un appareillage normalisé (Figure II.4.), sur le mortier, c'est-à-dire la fraction de sol qui passe au tamis de 400  $\mu\text{m}$ . Il est défini trois limites :

- ✓ **la limite de liquidité  $w_L$**  : le passage d'un sol de l'état liquide de l'état plastique.
- ✓ **la limite de plasticité  $w_P$**  : le passage d'un sol de l'état plastique de l'état solide.

Exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute, la différence qui définit l'étendue du domaine plastique, est particulièrement importante, c'est l'indice de plasticité. L'indice de plasticité permet d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon (Figure II.4).



*Figure II-4: Appareillage de limites d'Atterberg.*

### II.2.4. L'essai au bleu de méthylène (NF P 94-068) :

L'essai est réalisé sur la fraction 0/0.08  $\text{mm}$ , il consiste à déterminer la quantité de bleu de méthylène nécessaire à la saturation des particules argileuses en suspension dans l'eau et en permanence agitation. La valeur de bleu VBs est la quantité de bleu méthylène absorbé par 30 g de matériau (figure II.5.).

Une relation entre la surface spécifique totale  $S_{st}$  et la valeur de bleu de la phase argileuse  $VBS$  ( $0/2\mu\text{m}$ ) a été mise en évidence (Tran Ngoc Lan, 1977) :  $S_{st} = 21 VB$  ( $0/2\mu\text{m}$ )

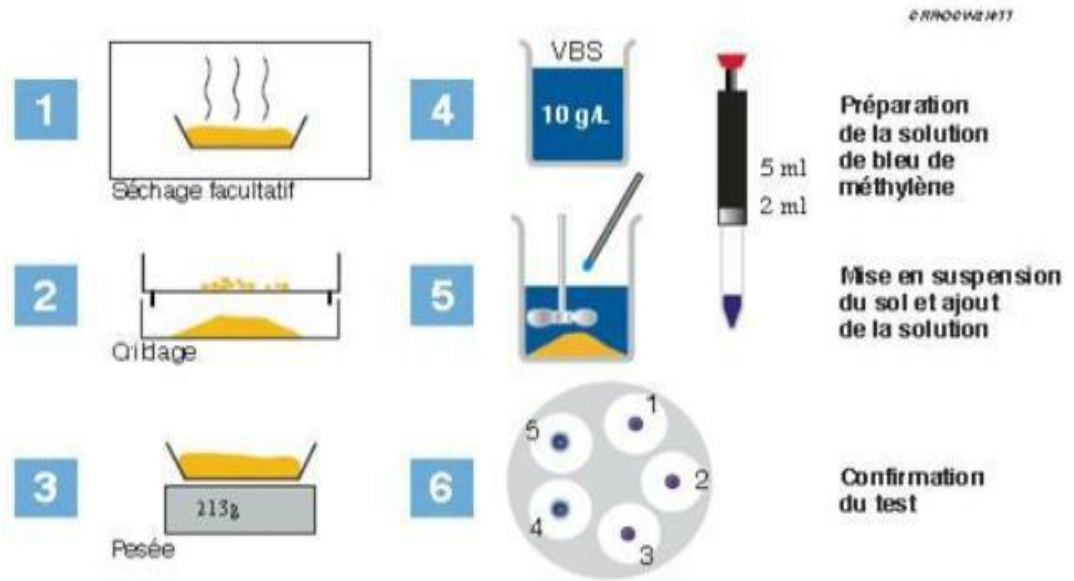


Figure II-5: Les étapes de l'essai au bleu de méthylène.

A titre d'identification le tableau représente les valeurs de bleu de quelques sols.

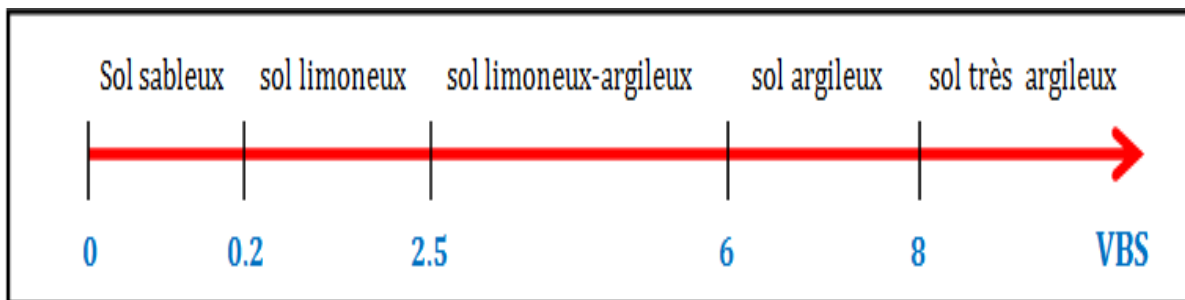
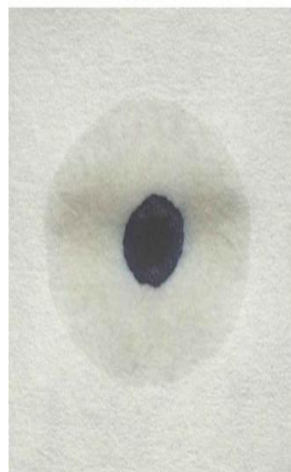


Figure II-6: Valeurs de bleu de quelques sols.



• Test négatif



• Test positif

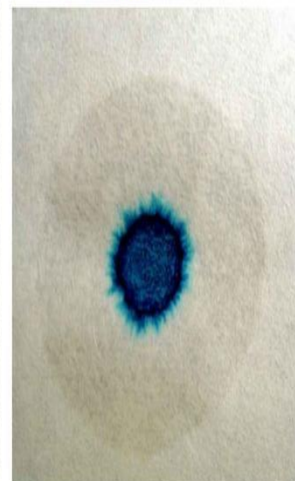


Figure II-7: Appareillage de l'essai au bleu de méthylène.

### II.3. Les Essais mécanique :

#### II.3.1. Essai Proctor normal (NF P 94-093) :

L'essai Proctor est un essai de compactage exécuté en laboratoire qui a pour but de déterminer l'influence de la teneur en eau ( $w$  exprimée en %) d'un matériau sur sa compactibilité (exprimée par la masse volumique sèche  $\gamma_d$  en  $\text{g/cm}^3$  ou en  $\text{kg/m}^3$ ).

##### ❖ Conditions d'essai :

Le principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour 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 et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

##### ❖ Résultats :

Les résultats sont traduits sous forme d'un graphique reprenant, en abscisse la teneur en eau au compactage et en ordonnée la masse volumique sèche.

$$\text{Énergie de compactage (kJ/m}^3\text{)} = \frac{\text{Hauteur de chute} \times \text{poids de la dame} \times \text{Nb de coups} \times \text{Nb de couches}}{\text{Volume total du moule}}$$



*Figure II-8: Appareil essai Proctor normal.*

#### II.3.2. Essais à la boîte de cisaillement directe (NF P 94-071-1) :

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes dans notre cas le but est de déterminer l'effort de cisaillement et l'échantillon de sol est préparé selon les caractéristiques optimums et sous l'énergie de Proctor modifier, L'essai adopté pour le cisaillement est non consolidé non

Drainé (UU), à une vitesse de 0.6 mm/min. Dans cet essai l'échantillon est constitué d'une plaquette carrée dont les dimensions usuelles sont : 6cm x 6 cm



*Figure II-9: Appareille de cisaillement direct*

L'essai comporte le cisaillement d'au moins trois éprouvettes de mêmes dimensions, préparées dans Les mêmes conditions, cisillées à la même vitesse mais soumises à des efforts verticaux différents 100 200 400 kPa (1bar, 2bar et 4bar).

L'essai comporte le cisaillement d'au moins trois éprouvettes de mêmes dimensions, préparées dans Les mêmes conditions, cisillées à la même vitesse mais soumises à des efforts verticaux différents (1bar, 2bar et 4bar).

#### II.3.2.1. Mise en place

- ✓ Placer le piston muni de sa plaque drainante sur le sommet de L'éprouvette.
- ✓ Noter, après fixation du système de mesure de l'effort de cisaillement horizontal (T), et avant application de tout effort, la valeur d'origine du capteur de l'effort (T).
- ✓ Régler la position du capteur de mesure du déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boties et noter la valeur d'origine.
- ✓ Positionner le capteur de mesure du déplacement vertical du piston par rapport à un repère fixe et noter la valeur d'origine.
- ✓ Appliquer l'effort (N) sur la partie supérieure du piston.
- ✓ Mesurer le déplacement vertical du piston  $Sh$  en fonction du temps.

**II.3.3. Essais de compression simple (NF P 94-077) :**

Le test de résistance à la compression uniaxial est l'un des tests couramment utilisés pour étudier les caractéristiques de résistance du sol et du sol stabilisé. Pour obtenir une résistance immédiate, les tests sur les sols et les échantillons de sol stabilisés à la chaux sont compactés à leurs densités sèches maximales avec une teneur en humidité obtenue à partir des tests de compactage Proctor normal. Les tests à la compression simple uniaxial ont été effectués pour les sols plastiques ainsi que pour les sols stabilisés. Pour cet essai, des éprouvettes cylindriques ont été préparées par compactage à leur densité sèche maximale à une teneur en humidité optimale dans le moule métallique fendu de dimension 50 mm (diamètre)  $\times$  100 mm (hauteur). Ces spécimens ont été testés dans une machine d'essai de compression avec un taux de déformation de 0,7 % par minute jusqu'à la rupture de l'échantillon. [9].

Le principe de l'essai consiste à appliquer un effort de compression à un échantillon reposant sur une surface indéformable. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'éprouvette. On mesure simultanément les contraintes et déformations au cours de l'essai. La norme définit entre autres

- La contrainte de rupture
- La contrainte au seuil d'écoulement
- La déformation à la rupture
- La déformation au seuil d'écoulement

Pour obtenir des résultats comparatifs en compression il est nécessaire d'employer des éprouvettes de forme, de dimensions et de mode d'obtention identiques, et de les soumettre à des essais dans des conditions bien définies de traitement préalable, de température, d'humidité et de vitesse de mise en charge.



*Figure II-10: Essais de compression simple.*

## CHAPITRE III

### PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS

#### III.1. Introduction :

Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats de l'essai réalisé sur le sol étudié et leur interprétation, il comporte :

- les essais d'identification (analyse granulométrie par tamisage et par sédimentaire, les limites d'Atterberg et l'essai au Bleu de Méthylène ;
- les essais mécaniques (Proctor normal, Cisaillement direct et Compression simple).

Pour le sol non traité, et le sol traité a différant classe et teneur en ciment.

#### III.2. Résultats des Essais :

##### III.2.1. Les essais d'identification :

##### III.2.1.1. Analyse granulométrique :

##### a. Analyse granulométrique par tamisage :

##### ➤ Essai N° 01

**Tableau III-1: Analyse granulométrique par tamisage de l'essai N°01**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
5	7.02	7.02	1.17	98.83
2.5	5.77	12.79	2.13	97.87
1.25	8.70	21.48	3.58	96.42
0.63	15.44	36.92	6.15	93.85
0.315	19.63	56.55	9.43	90.57
0.16	32.07	88.62	14.77	85.23
0.008	56.30	144.92	24.15	75.85

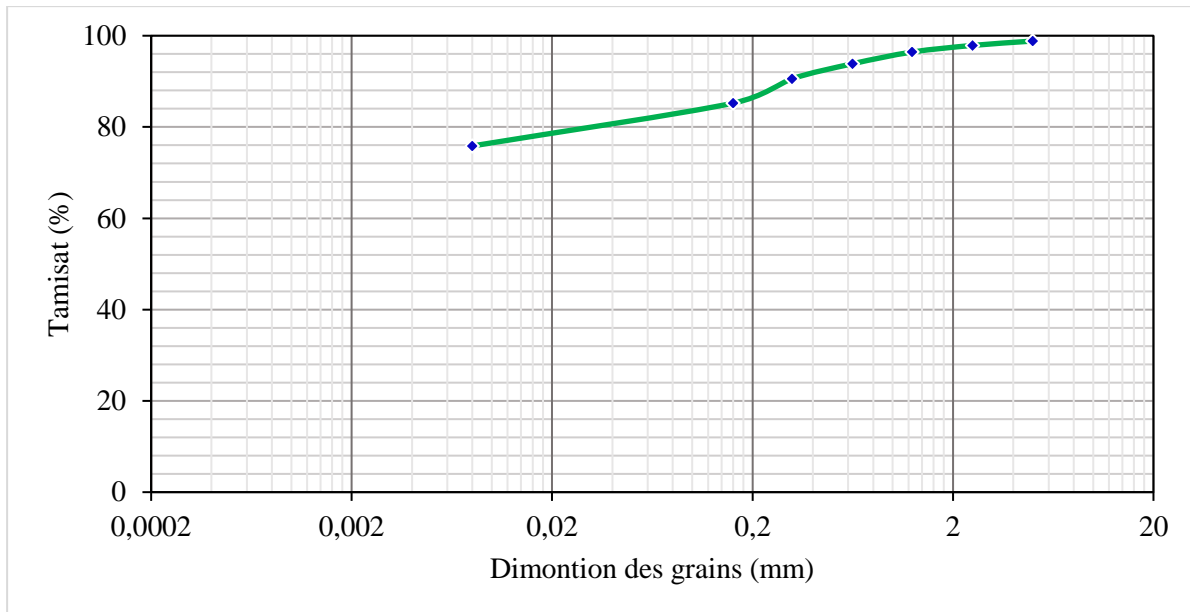


Figure III-1: Courbe d'analyse granulométrique par tamisage de l'essai 01.

**b. Analyse granulométrique par sédimentométrie :**

Tableau III-2: Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai N° 01

Les Passant à 80 $\mu\text{m}$ = 75.85 %						
Temps de lecture (minutes)	Lecture densimètre sommet du ménisque R	Température C°	Correction temps	Lecture corrigé	Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	Tamisât par rapport à l'échantillon total P.p.
0.5	20	16	-0.640	19.36	80	75.85
1	19	16	-0.640	18.36	75	71.93
2	18	16	-0.640	17.36	55	68.01
5	17	17	-0.500	16.5	38	64.18
10	15	17	-0.500	14.5	25	56.4
20	14	17	-0.500	13.5	17	52.51
40	13	17	-0.500	12.5	12	48.62
80	05	17	-0.500	4.5	8	17.5
240	01	17	-0.500	0.5	5	01.94
1440	0,5	17	-0.500	0	2	00.0

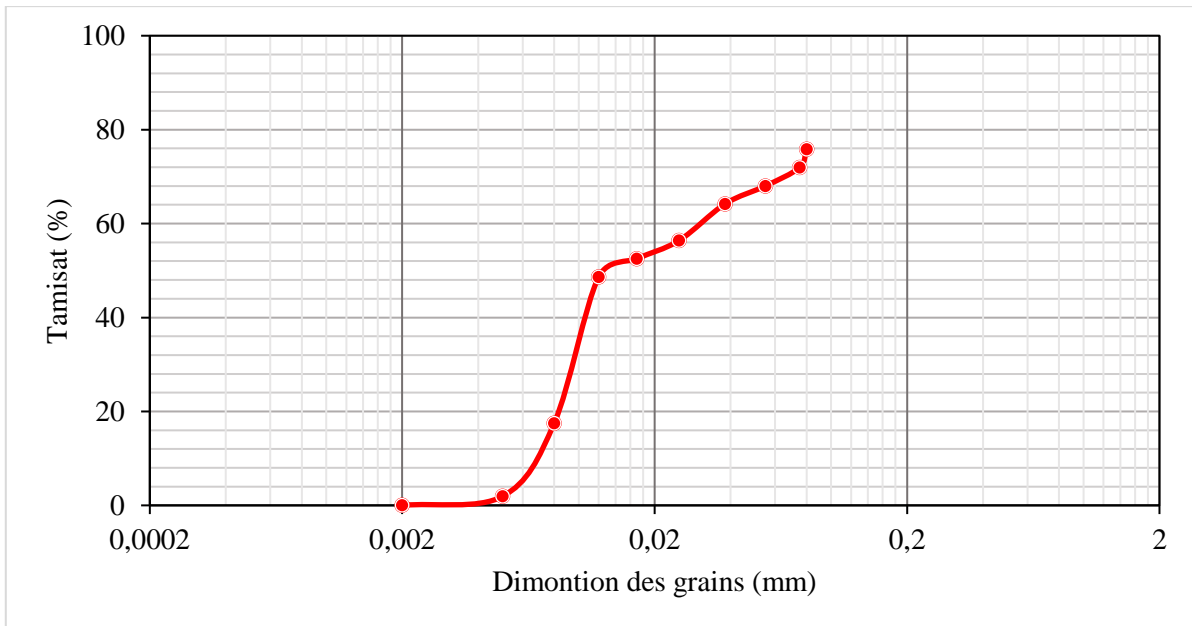


Figure III-2: Courbe d'analyse granulométrique par sédimentométrie de l'essai N°01.

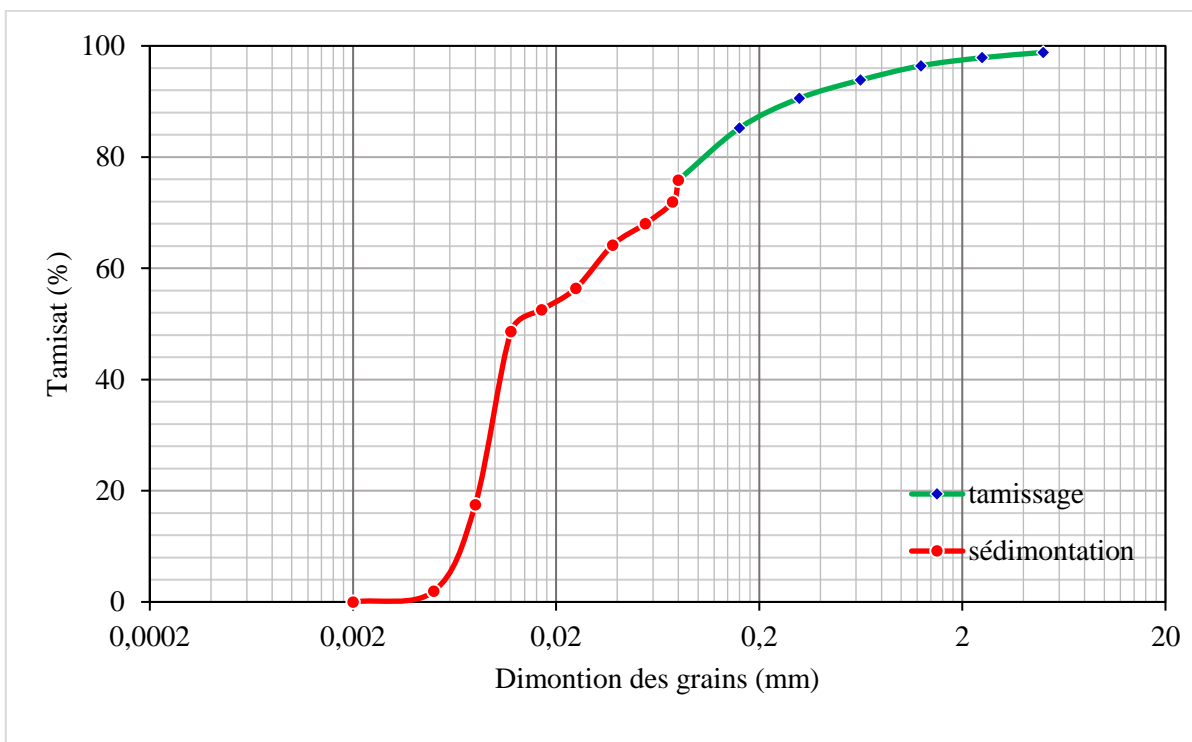
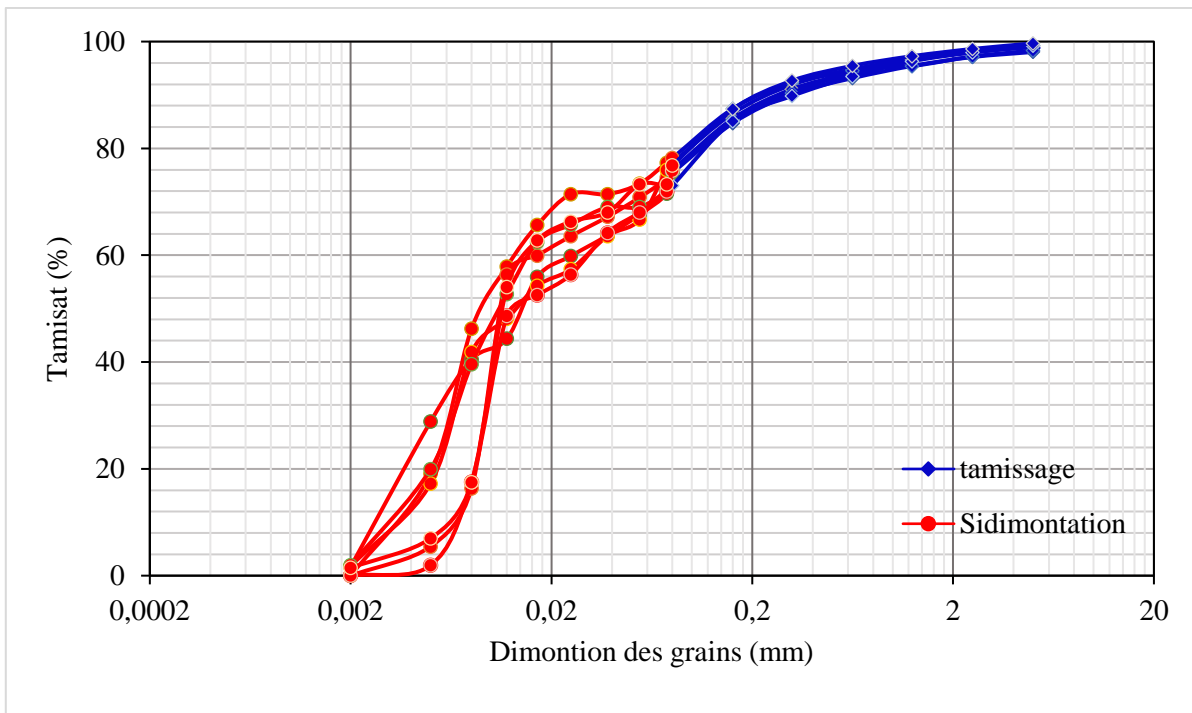


Figure III-3: Courbe d'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie de l'essai 01

**Tableau III-3: Récapitulatif des résultats des essais de l'analyse granulométrique (tamissage et sédimentométrie)**

Tamis (mm)	Tamisât (%)								Moyenne
	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04	Essai 05	Essai 06	Essai 07	Essai 08	
5	98,83	99,21	98,06	99,25	99,17	98,33	99,22	99,66	98,97
2,5	97,87	98,27	97,11	98,24	98,20	97,21	97,98	98,62	97,94
1,25	96,42	96,76	95,44	96,75	96,56	95,42	96,31	97,27	96,37
0,63	93,85	94,72	93,15	94,76	94,10	94,56	93,50	95,45	94,26
0,315	90,57	91,92	90,17	92,32	91,08	90,35	89,82	92,67	91,11
0,16	85,23	86,55	84,74	87,44	85,56	85,28	85,11	87,35	85,91
0,08	75,85	77,28	75,42	78,17	75,98	75,6	73,06	76,81	76,02
0,075	71,93	77,28	71,51	74,51	75,98	72,3	70,06	73,29	73,36
0,055	68,01	73,38	67,6	70,85	66,68	69,00	61,06	73,29	68,73
0,038	64,18	71,43	63,69	67,19	63,58	69,00	55,06	68,01	65,27
0,025	56,4	71,43	59,84	63,58	57,37	65,74	52,07	66,29	61,59
0,017	52,51	65,64	55,94	59,93	54,27	62,45	49,07	62,79	57,83
0,012	48,62	57,87	44,37	56,36	48,07	52,69	43,07	54,02	50,63
0,008	17,5	46,23	40,49	16,36	41,87	39,59	40,07	17,46	32,45
0,005	1,94	19,06	28,84	5,45	17,24	19,95	16,08	6,98	14,44
0,002	0	0	1,67	0	1,78	1,95	1,29	1,44	1,02



**Figure III-4: Courbe d'analyse granulométrique par tamissage et sédimentométrie de sol Chaaba El Hamra.**

III.2.1.2. Les limites d'Atterberg :

Les limites de liquidité et de plasticité, dites limites d'Atterberg ou limite de constance, sont des paramètres géotechniques destinés à identifier les sols.

➤ Essai N°1

a. Limite de liquidité

Tableau III-4: Les résultats de limite de liquidité Essai N°1.

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
<b>Nombre de coups</b>	17		24		29		35	
<b>Tare N</b>	99	59	23	42	8	11	26	17
<b>Masse de tare ; Mt (g)</b>	4.06	3.22	3.83	3.73	4.13	3.99	3.97	4.01
<b>Masse (sol humid + tare) (Mh +Mt)</b>	12.44	11.67	10.53	11.70	12.55	11.82	9.95	10.17
<b>Masse (sol sec + tare ) (Md +Mt)</b>	10.01	9.22	8.66	9.49	10.24	9.64	8.33	8.50
<b>Masse d'eau ; Mw (g)</b>	2.43	2.45	1.87	2.21	2.31	2.18	1.62	1.67
<b>Masse du sol sec ; Md (g)</b>	5.95	6.00	4.83	5.76	6.11	5.65	4.36	4.49
<b>Teneur en eau ; W (%); Mw/Md</b>	40.84	40.83	38.72	38.37	37.81	38.58	37.16	37.19
<b>M moyenne (%)</b>	40.84		38.54		38.20		37.17	
<b>WL</b>	<b>38.64</b>							

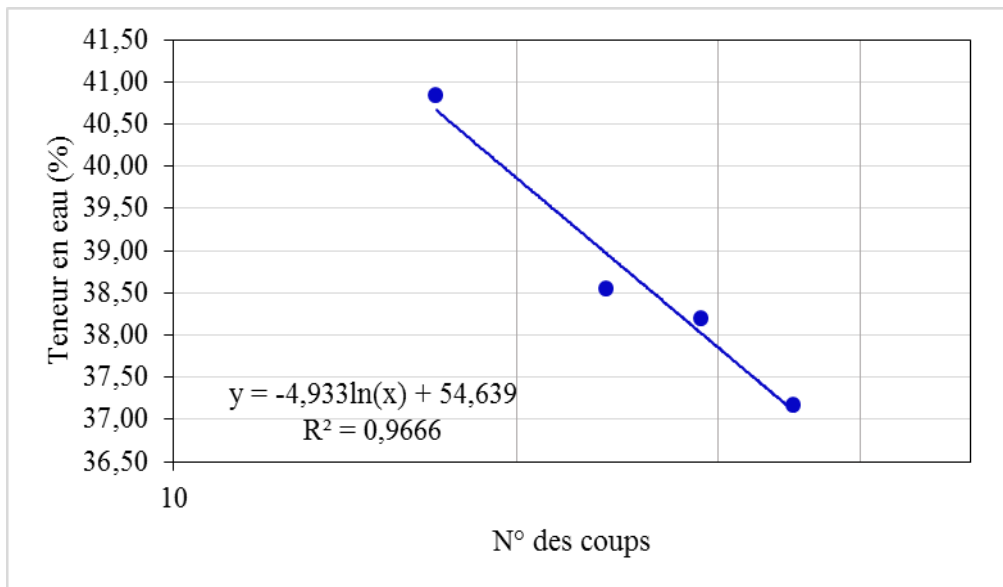


Figure III-5: La courbe de limite de liquidité du sol naturel.

## b. Limite de plasticité

Tableau III-5: Les résultats de limite de plasticité.

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
<b>Tare N</b>	E	06	09	A	T10	35	M	74
<b>Masse de tare ; Mt (g)</b>	4.83	4.1	3.75	3.63	3.79	3.49	4.02	3.61
<b>Masse (sol humid + tare) (Mh +Mt)</b>	6.47	5.9	5.11	5.07	5.70	5.04	5.68	5.41
<b>Masse (sol sec + tare ) (Md +Mt)</b>	6.20	5.60	4.87	4.83	5.38	4.79	5.40	5.11
<b>Masse d'eau ; Mw (g)</b>	0.27	0.30	0.24	0.24	0.32	0.25	0.28	0.30
<b>Masse du sol sec ; Md (g)</b>	1.37	1.50	1.12	1.20	1.59	1.30	1.38	1.50
<b>Teneur en eau ; W (%); Mw/Md</b>	19.71	20.00	21.43	20.00	20.13	19.23	20.29	20.00
<b>M moyenne (%)</b>	<b>19.85</b>		<b>20.71</b>		<b>19.68</b>		<b>20.00</b>	
<b>WP</b>	<b>20.10</b>							

$$W_L = 38.64 \quad ; \quad W_P = 20.10 \quad ; \quad \text{L'Indice de plasticité : } IP = W_L - W_P = 19,76$$

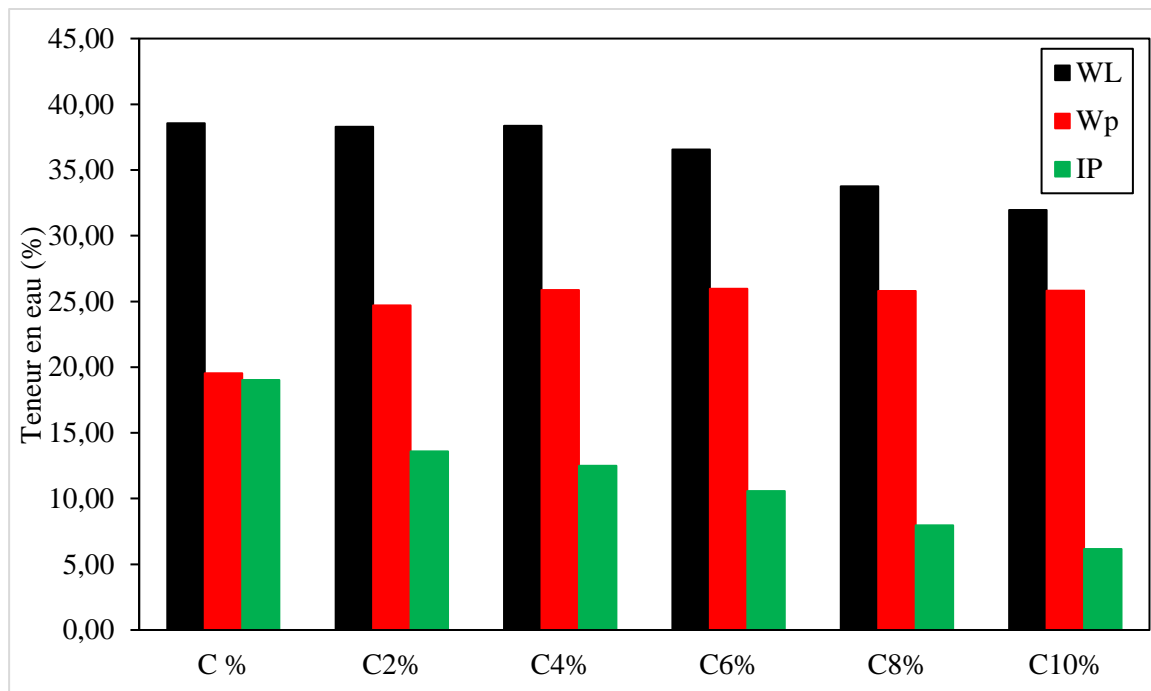
Tableau III-6: Récapitulatif des résultats des essais de limite d'Atterberg.

Essai N°	WL (%)	Wp (%)	Ip (%)
<b>1</b>	38.64	20.10	<b>19.76</b>
<b>2</b>	37.24	18.95	<b>18.29</b>
<b>3</b>	38.65	19.05	<b>19.6</b>
<b>La Moyenne</b>	<b>38.55</b>	<b>19.52</b>	<b>19.03</b>

## a-1-Ciment Chamil :

Tableau III-7: Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg traité par ciment (Chamil 32.5).

Ciment Chamil	0%	2%	4%	6%	8%	10%
<b>Limite de liquidités (Wl) %</b>	38.55	38.28	38.35	36.55	33.77	31.97
<b>Limite de plasticité (Wp) %</b>	19.52	24.69	25.87	25.97	25.80	25.81
<b>Indice de plasticité IP</b>	<b>19.02</b>	<b>13.59</b>	<b>12.84</b>	<b>10.58</b>	<b>7.97</b>	<b>6.15</b>



*Figure III-6: Les limites d'Atterberg en fonction des différents teneurs en ciment (Chamil 32.5).*

a-2-Ciment Matine :

**Tableau III-8: Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg traité par ciment (Matine).**

ciment Matine	0%	2%	4%	6%	8%	10%
<b>Limite de liquidités (WI) %</b>	38.55	38.44	38.15	37.62	32.71	32.11
<b>Limite de plasticité (Wp) %</b>	19.52	23.37	23.74	23.59	23.61	24.61
<b>Indice de plasticité IP</b>	<b>19.02</b>	<b>15.07</b>	<b>14.4</b>	<b>14.03</b>	<b>8.50</b>	<b>8.10</b>

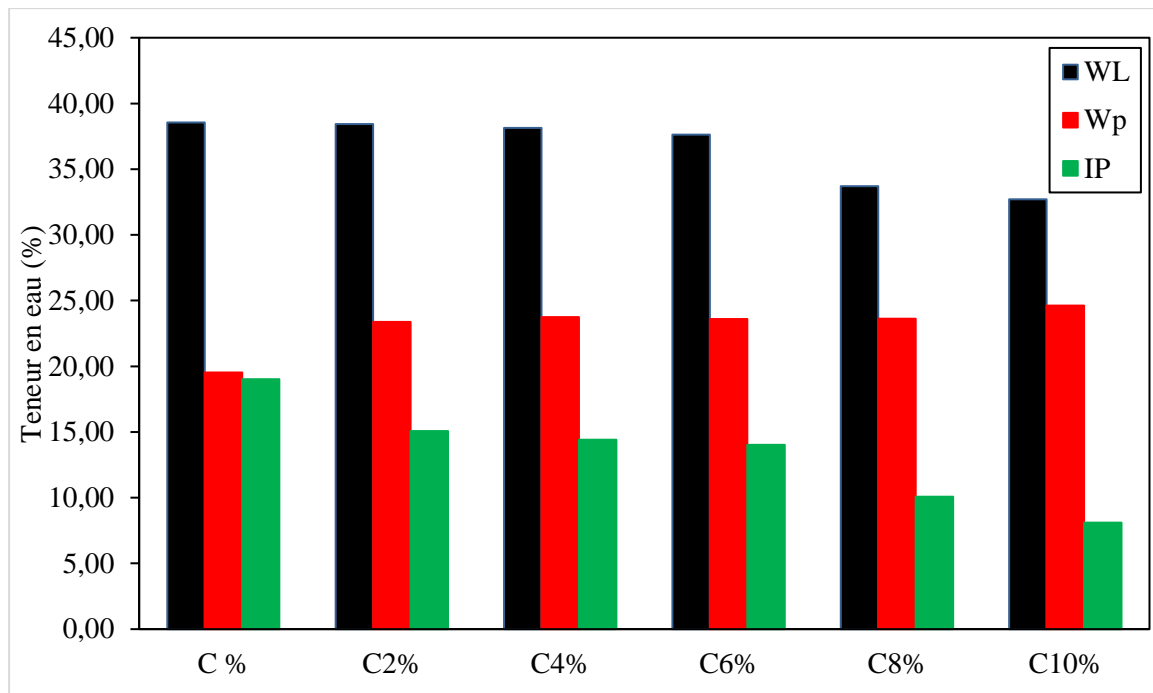


Figure III-7: Teneur en eau en fonction des différents teneurs en ciment (Matine)

III.2.1.3 : L’essai au bleu de méthylène :

Tableau III-9: L’essai au bleu de méthylène sol naturel.

Essai	mass de matériaux ( g )	volume de la solution (cm <sup>3</sup> )	VBS (g/cm <sup>3</sup> )	la surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)
01	30	115	3,83	80,43
02	30	110	3,66	76,86
03	30	114	3,80	79,80
04	30	105	3,00	63
05	30	115	3,83	80,43
06	30	90	3,50	73,50
07	30	115	3,83	80,43
08	30	85	2,83	59,43
<b>Moy</b>		<b>106,125</b>	<b>3,535</b>	<b>74,235</b>

Tableau III-10: Récapitulatif des résultats de bleu de méthylène Traité ciment

Colonne 1	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moy VBS
0%	3,83	3,66	3,80	3,54
2%	2	2.16	2	2,08
4%	1,83	2	1,83	1,92
6%	1,66	1,66	1,66	1,66
8%	1,16	1,16	1, 16	1,16
10%	1	1	1	1

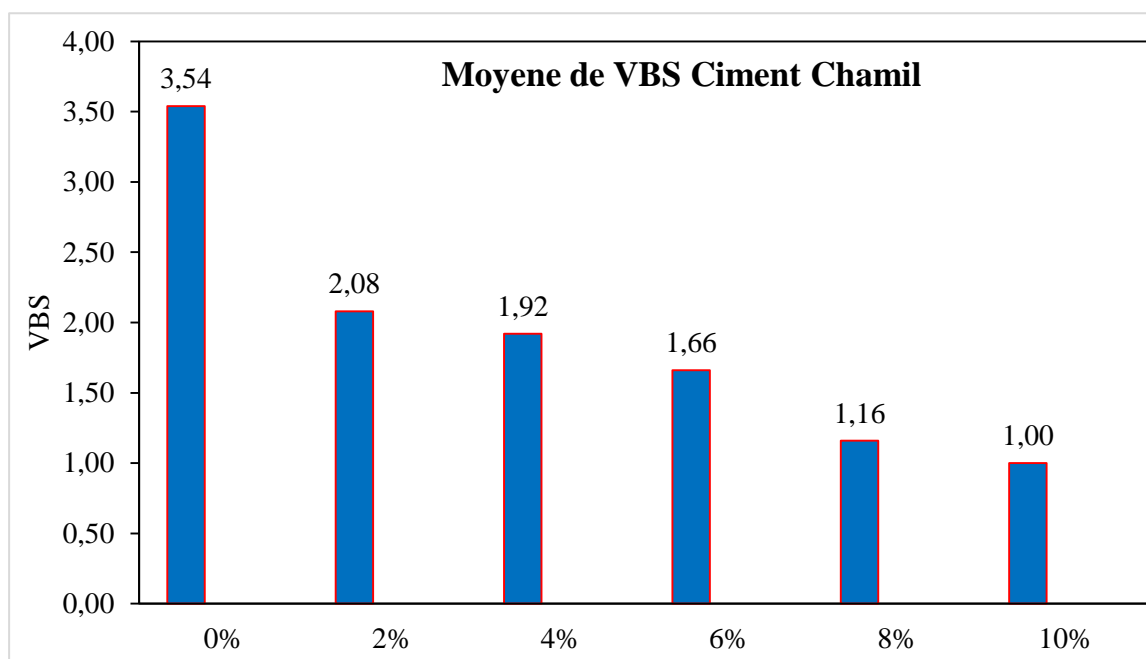


Figure III-8: Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment

Tableau III-11: Récapitulatif des résultats de bleu de méthylène Traité ciment

Colonne 1	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moy VBS
0%	3.83	3.66	3.80	3.54
2%	2.66	2.16	2.66	2.41
4%	2	2	2	2
6%	1.66	1.66	1.66	1.66
8%	1.16	1.16	1.16	1.16
10%	0.66	0.83	0.66	0.75

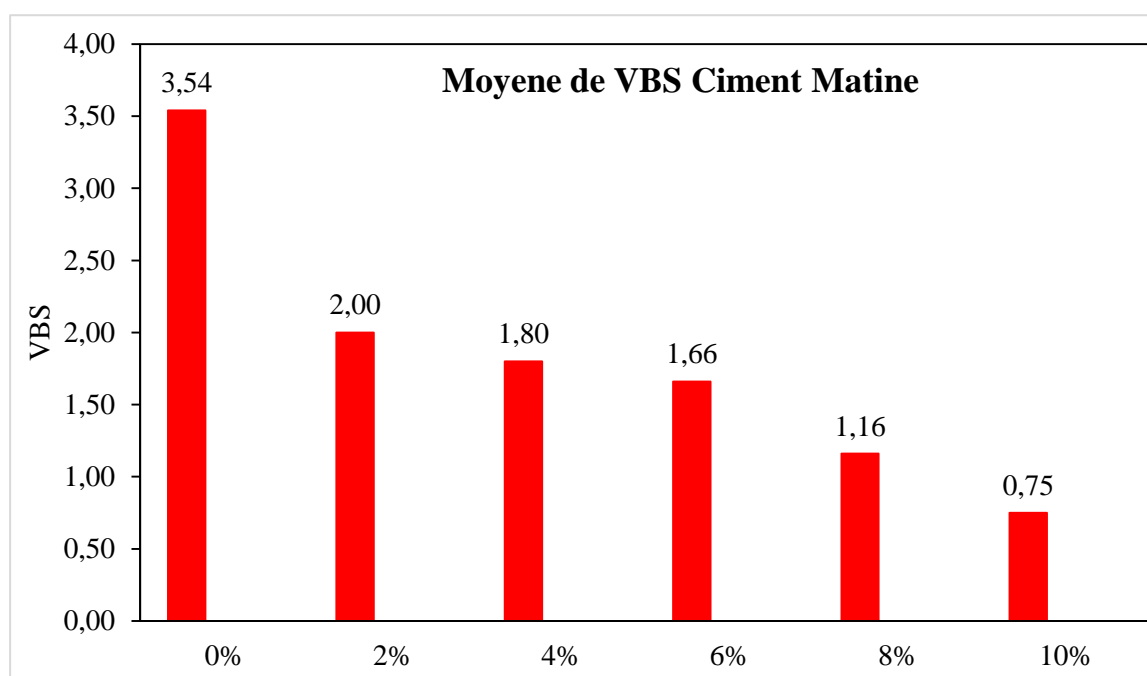


Figure III-9: Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment

#### III.2.1.4. Analyse Chimique (XRF et DRX) :

##### a- L'analyse chimique par XRF :

Tableau III-12: L'analyse chimique par XRF .

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
26,58	6,24	2,31	32,38	2,60	4,04	1,27	0,03

## b- L'analyse par DRX :

Tableau III-13: L'analyse chimique par DRX.

Constituants	%
Calcite	57,43
Dolomite	1,87
Quartz	15,91
Illite	7,33
Kaolinite	3,51
Chlorite	1,82
Pyrophyllite	5,99
Albite	0,08
Microcline	4,94
Diaspore	0,24
Topaz	0,37
Fluorite	0,5

## III.2.1.4 : Interprétation des résultats :

## a- Sol naturel :

- On remarque que les passants de 80µm entre 73,06 % et 78,17% avec une moyenne de 76,02%.
- L'indice de plasticité de cette sol étudiée de Trois (03) essais entre 19,76 et 18,29 avec un Moyenne de 19,03% :
- Les résultats de l'essai au bleu de méthylène de cette sol sont regroupés dans le tableau III.9 : D'après les résultats obtenus la Moyenne de valeur de bleu de méthylène est à 3,53 il s'agit d'un **sol Limoneux- argileux**, la surface spécifique total 74.235(m<sup>2</sup>/g).

Selon la classification LPC en vigueur en France (Magnan, 1980) compatible au système unifié de classification des sols (USCS), il s'agit comme un **limon argileux peu plastique**, La valeur de bleu VBS est en moyenne égale à 3,53. D'après la norme française NF P11-300, il s'agit d'un **sol Limoneux- argileux**.

## b- Sol traité :

On remarque que **la limite de liquidité** diminue avec l'augmentation des teneurs en ciment, par contre la limite de plasticité augmente avec l'augmentation des teneurs en ciment et ça s'appliquera dans les deux différentes classes de ciment (Chamil, Mâtine) :

Ciment Chamil :

**Ciment 2% :**  $W_L = 38.27$  ;  $W_P = 24.69$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = W_L - W_P = 13,59$ .

**Ciment 4% :**  $W_L = 38.35$  ;  $W_P = 25.87$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = W_L - W_P = 12,48$ .

**Ciment 6% :**  $W_L = 36.54$  ;  $W_P = 25.97$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = W_L - W_P = 10,58$ .

**Ciment 8% :**  $W_L = 33.76$  ;  $W_P = 26.05$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = W_L - W_P = 7,76$ .

**Ciment 10% :**  $W_L = 31.96$  ;  $W_P = 26.10$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = W_L - W_P = 6,14$ .

Ciment Matine :

**Ciment 2% :**  $W_L = 38.44$  ;  $W_P = 23.37$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = W_L - W_P = 15,03$ .

**Ciment 4% :**  $W_L = 38.15$  ;  $W_P = 23.74$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = W_L - W_P = 14,40$ .

**Ciment 6% :**  $W_L = 37.62$  ;  $W_P = 23.59$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = W_L - W_P = 14,03$ .

**Ciment 8% :**  $W_L = 32.11$  ;  $W_P = 23.61$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = W_L - W_P = 8,50$ .

**Ciment 10% :**  $W_L = 32.71$  ;  $W_P = 24.61$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = W_L - W_P = 8,10$ .

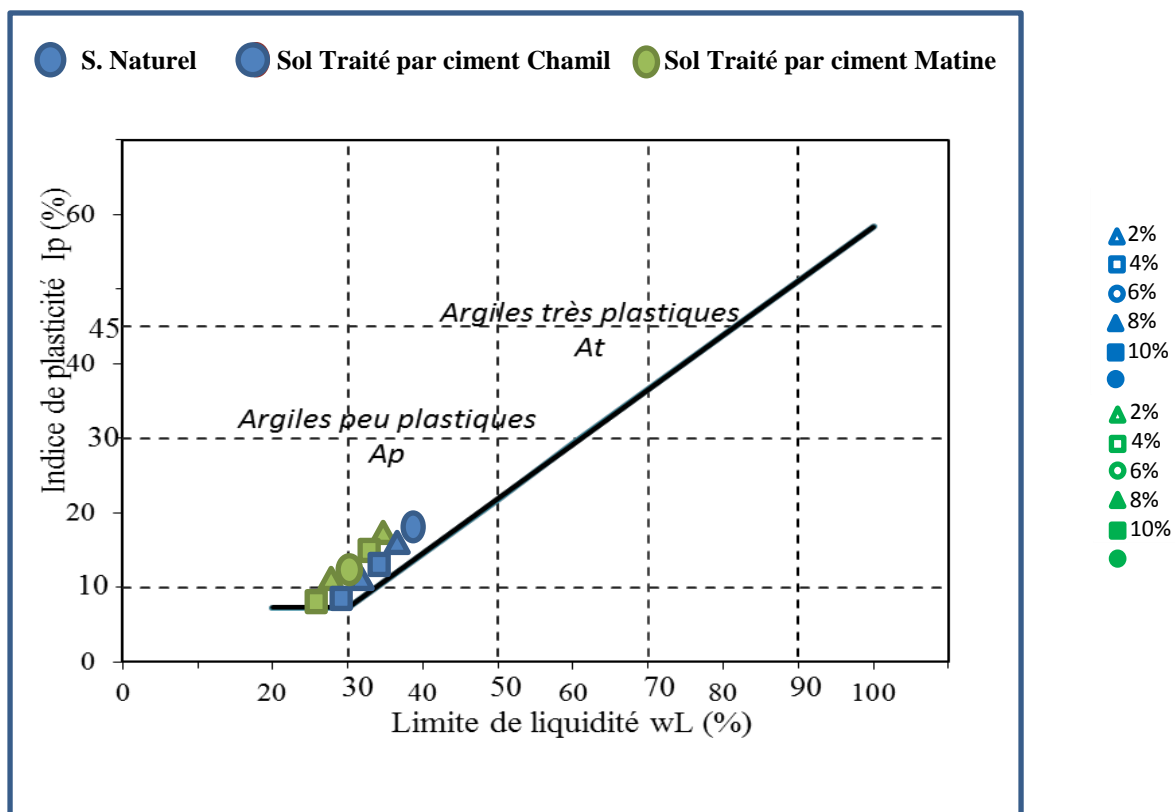


Figure III-10: La classification de Casagrande

- On observe que la valeur de bleu de méthylène diminue avec l'augmentation des teneurs en ciment, dans les deux différentes classes de ciment (Chamil, Matine).

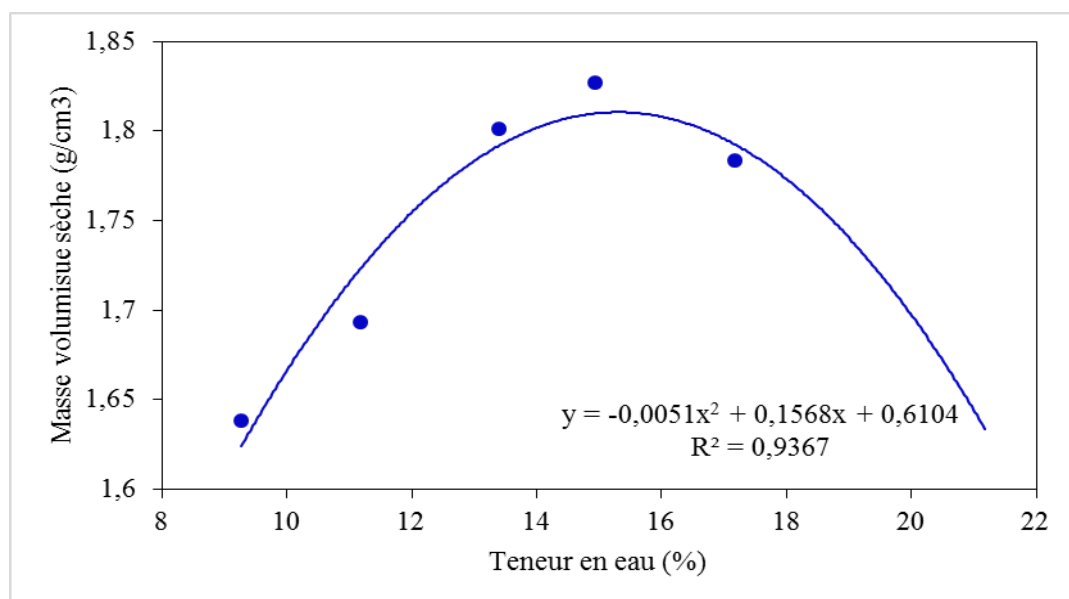
### III.2.2 Essai mécanique :

#### III.2.2.1 Essai Proctor normal :

En fait trois essais de compactage sur le sol naturel dans le tableau suivant :

**Tableau III-14: Résultats de essai de compactage le sol naturel l'essai 01**

Sol naturel de L'essai 01					
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3395,30	3482,30	3633,10	3687,40	3677,20
Masse du sol humide (g)	1685,40	1772,40	1923,20	1977,50	1967,30
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,79	1,88	2,04	2,09	2,08
Masse de la tare (g)	145,70	147,40	143,80	147,10	148,10
Masse sol humide + tare (g)	389,70	464,40	526,80	288,38	653,40
Masse sol sec + tare (g)	369,00	432,50	481,50	270,00	579,30
Masse d'eau (g)	20,70	31,90	45,30	18,38	74,10
Masse du sol sec (g)	223,30	285,10	337,70	122,90	431,20
Teneur en eau W (%)	9,27	11,19	13,41	14,95	17,18
Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ) ; $\rho_d = \rho_h / (1 + W)$	1,62	1,68	1,79	1,8	1,76



**Figure III-11: courbe Proctor de sol naturel de l'essai 01**

III.2.2.1.1. Sol traité :

A. par ciment Chamil :

Tableau III-15: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Chamil (2 %).

Sol traité à 2 % Ciment Chamil					
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3478,10	3500,70	3650,60	3679,60	3653,7
Masse du sol humide (g)	1769,01	1791,61	1941,51	1970,51	1944,61
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,88	1,90	2,06	2,09	2,06
Masse de la tare (g)	149,10	148,40	144,6	145,00	155,10
Masse sol humide + tare (g)	366,1	298,70	368,5	344,10	269,70
Masse sol sec + tare (g)	345,80	283,50	341,5	312,90	248,5
Masse d'eau (g)	20,30	15,20	27,00	31,20	21,2
Masse du sol sec (g)	196,70	135,10	196,9	167,90	93,4
Teneur en eau W (%)	10,32	11,25	13,71	18,58	22,69
Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ) ; pd=ph/(1+W)	1,7	1,70	1,81	1,8	1,74

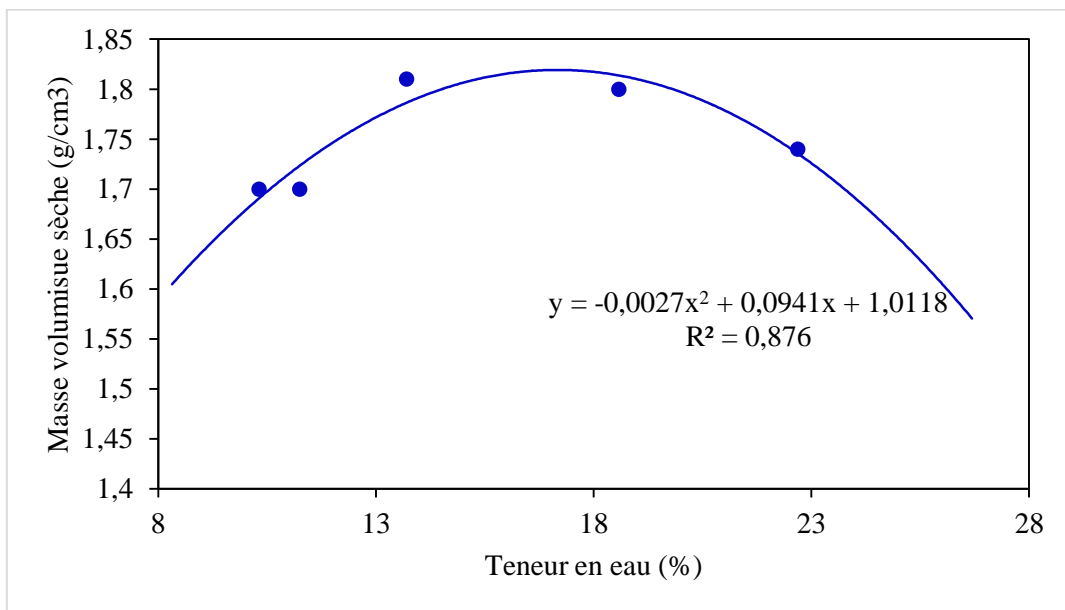


Figure III-12: courbe Proctor de sol traité par cimente Chamil 2 %

Tableau III-16: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Chamil (4 %).

Sol Traité à 4 % ciment Chamil					
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3407,3	3670,8	3673,6	3645,5	3623,9
Masse du sol humide (g)	1698,21	1961,71	1964,51	1936,41	1914,81
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	2,08	2,08	2,05	2,04
Masse de la tare (g)	12,8	12,7	12,9	12,8	12,9
Masse sol humide + tare (g)	90,2	69,0	65,0	71,7	65,8
Masse sol sec + tare (g)	82,1	62,3	57,2	61,7	56,6
Masse d'eau (g)	8,1	6,7	7,8	10	9,2
Masse du sol sec (g)	69,3	49,60	44,3	48,9	43,7
Teneur en eau W (%)	11,68	13,50	17,6	20,44	21,05
Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ) ; pd=ph/(1+W)	1,64	1,85	1,82	1,77	1,73

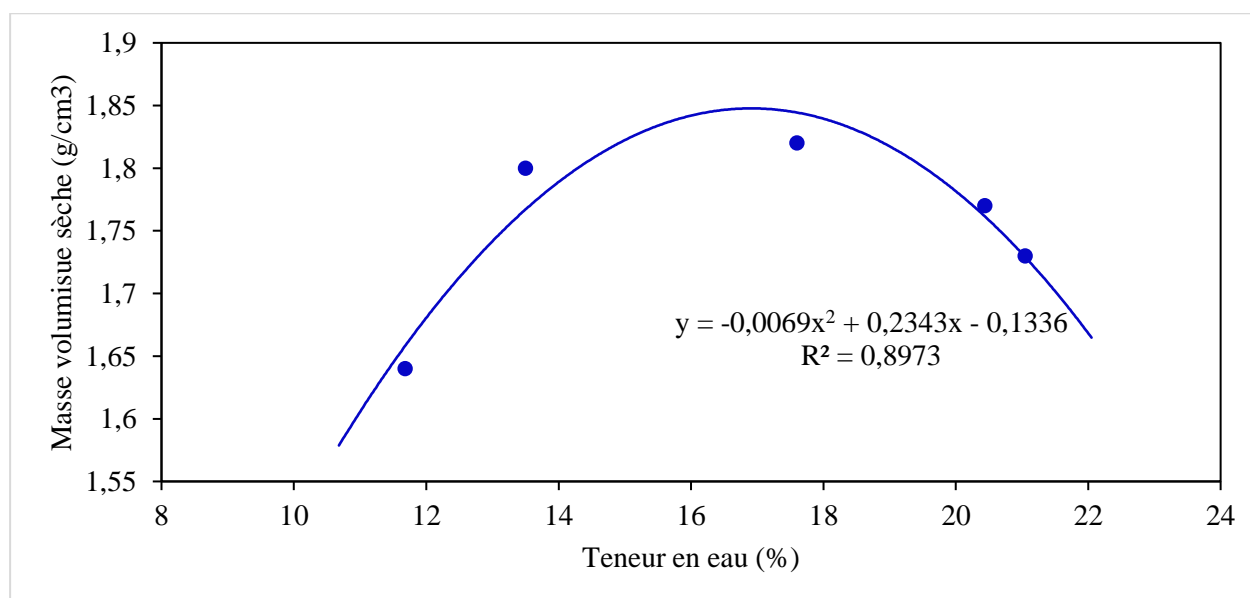


Figure III-13: courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 4 %

Tableau III-17: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Chamil 6 %

Sol Traité à 6 % ciment Chamil					
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3405,7	3588,3	3674,5	3666,1	3656,2
Masse du sol humide (g)	1696,61	1879,21	1965,41	1957,01	1947,11
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	1,99	2,08	2,07	2,06
Masse de la tare (g)	13,1	12,8	12,8	12,7	12,9
Masse sol humide + tare (g)	80,5	68,6	81,4	83,7	75,1
Masse sol sec + tare (g)	73,7	62	71,4	72,40	64,6
Masse d'eau (g)	6,8	6,6	10	11,3	10,5
Masse du sol sec (g)	60,6	49,2	58,6	59,7	51,7
Teneur en eau W (%)	11,22	13,41	17,06	18,92	20,30
Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ) ; $\rho_d = \rho_h / (1+W)$	1,64	1,77	1,82	1,78	1,75

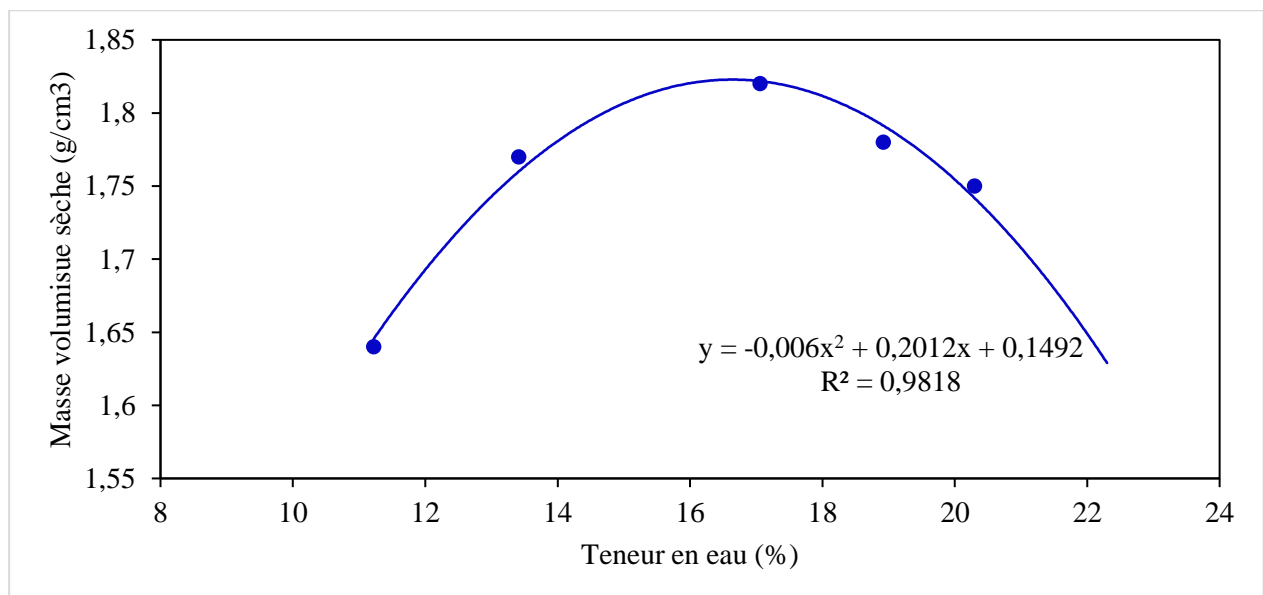


Figure III-14: courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 6 %

Tableau III-18: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Chamil ( 8 %)

Sol Traité à 8 % ciment Chamil					
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3463,2	3587,9	3709	3679,7	3654,1
Masse du sol humide (g)	1754,11	1878,81	1999,91	1970,61	1945,01
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,86	1,99	2,12	2,09	2,06
Masse de la tare (g)	13,2	12,7	149,6	149,3	144,7
Masse sol humide + tare (g)	106,7	117,9	255,3	327,5	281,6
Masse sol sec + tare (g)	98	106,1	241,80	302	260,1
Masse d'eau (g)	8,7	11,8	13,5	25,5	21,5
Masse du sol sec (g)	84,8	93,4	92,2	152,7	115,4
Teneur en eau W (%)	10,26	12,63	14,64	16,70	18,63
Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ) ; pd=ph/(1+W)	1,69	1,78	1,84	1,8	1,75

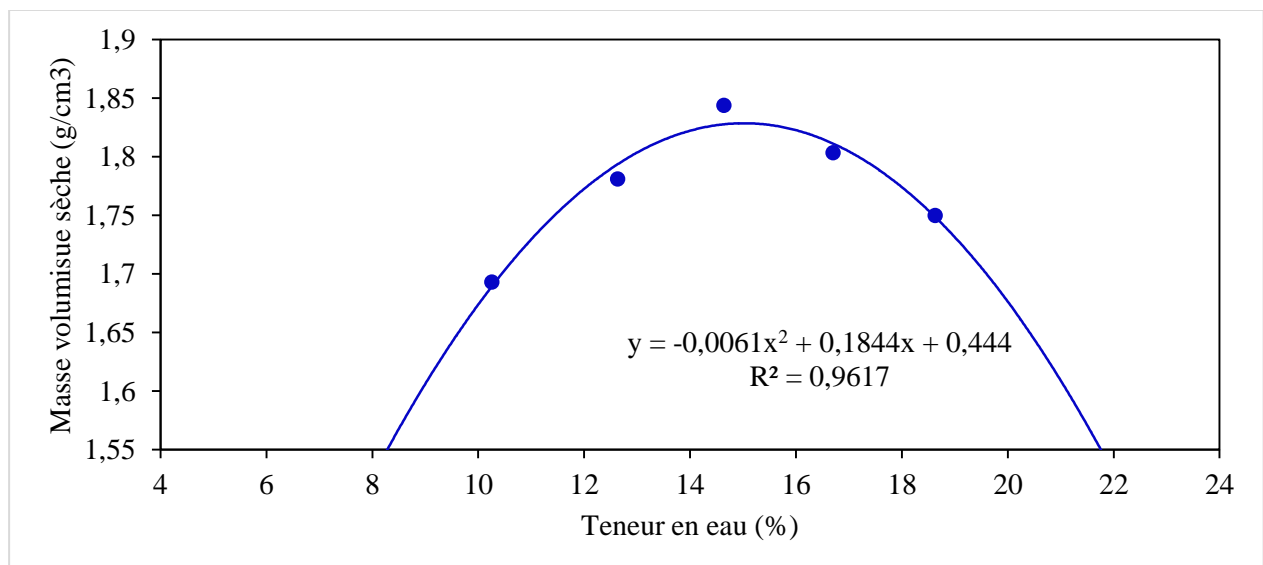


Figure III-15: courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 8 %

Tableau III-19: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Chamil (10 %)

Sol Traité à 10 % ciment Chamil					
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3468,8	3548,9	3636	3640,5	3645,3
Masse du sol humide (g)	1759,71	1839,81	1926,91	1931,41	1936,21
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,87	1,95	2,05	2,05	2,06
Masse de la tare (g)	12,8	12,8	12,8	12,9	12,8
Masse sol humide + tare (g)	72,3	77,6	78,7	71	79,6
Masse sol sec + tare (g)	66,9	70,9	71	63,2	69,5
Masse d'eau (g)	5,4	6,7	7,7	7,8	10,1
Masse du sol sec (g)	54,1	58,1	58,2	50,3	56,7
Teneur en eau W (%)	9,98	11,53	13,23	15,51	17,81
Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ) ; pd=ph/(1+W)	1,70	1,74	1,79	1,77	1,74

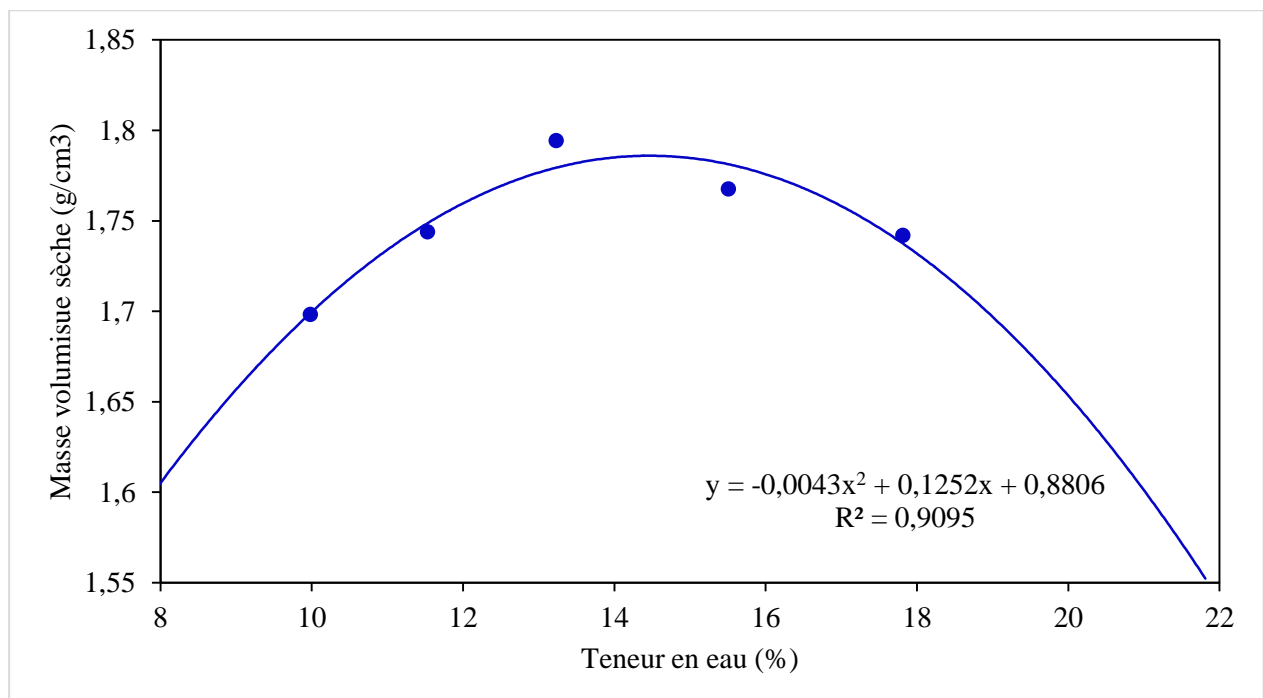


Figure III-16: courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 10 %

Tableau III-20: Récapitulatif des résultats des essais de compactage d'un sol traité par ciment Chamil.

essais		Essais 01	Essais 02	Essais 03	Moyene
sol naturel	$W_{opt}$	15.37	14.47	15.59	15.50
	$\gamma_{dmax}$	1.82	1.80	1.80	1,80
2%	$W_{opt}$	16.03	15.37	16.15	16,07
	$\gamma_{dmax}$	1.79	1.82	1.80	1,80
4%	$W_{opt}$	16.30	16.98	16.01	16,67
	$\gamma_{dmax}$	1.83	1.86	1.84	1,84
6%	$W_{opt}$	16.77	17.43	15.27	16,71
	$\gamma_{dmax}$	1.84	1.83	1.76	1,83
8%	$W_{opt}$	16.29	16.11	17.03	16,78
	$\gamma_{dmax}$	1.83	1.84	1.78	1,82
10%	$W_{opt}$	15.00	18.33	16.56	16,92
	$\gamma_{dmax}$	1.80	1.83	1.79	1,81

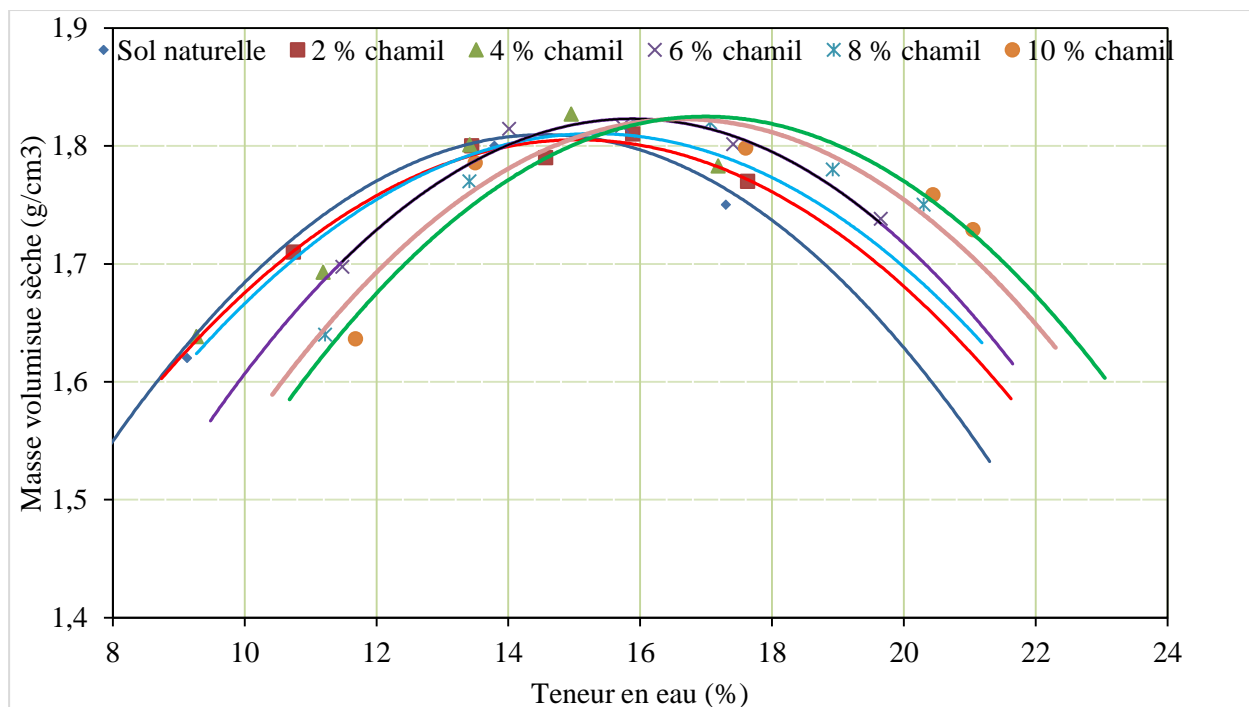


Figure III-17: Récapitulatif des courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil.

Tableau III-21: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine (2 %).

Sol Traité au à 2 % cimente Matine					
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3429,6	3566,5	3675,3	3695,3	3678,3
Masse du sol humide (g)	1720,51	1857,41	1966,21	1986,21	1969,21
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,83	1,97	2,08	2,10	2,09
Masse de la tare (g)	12,9	13	12,8	12,9	12,9
Masse sol humide + tare (g)	89,3	87,8	92,5	81,3	79,6
Masse sol sec + tare (g)	82,56	80,02	83,06	71,78	69,54
Masse d'eau (g)	6,74	7,78	9,44	9,52	10,06
Masse du sol sec (g)	69,66	67,02	70,26	58,88	56,64
Teneur en eau W (%)	9,67	11,61	13,43	16,17	17,76
Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ) ; pd=ph/(1+W)	1,66	1,75	1,82	1,81	1,77

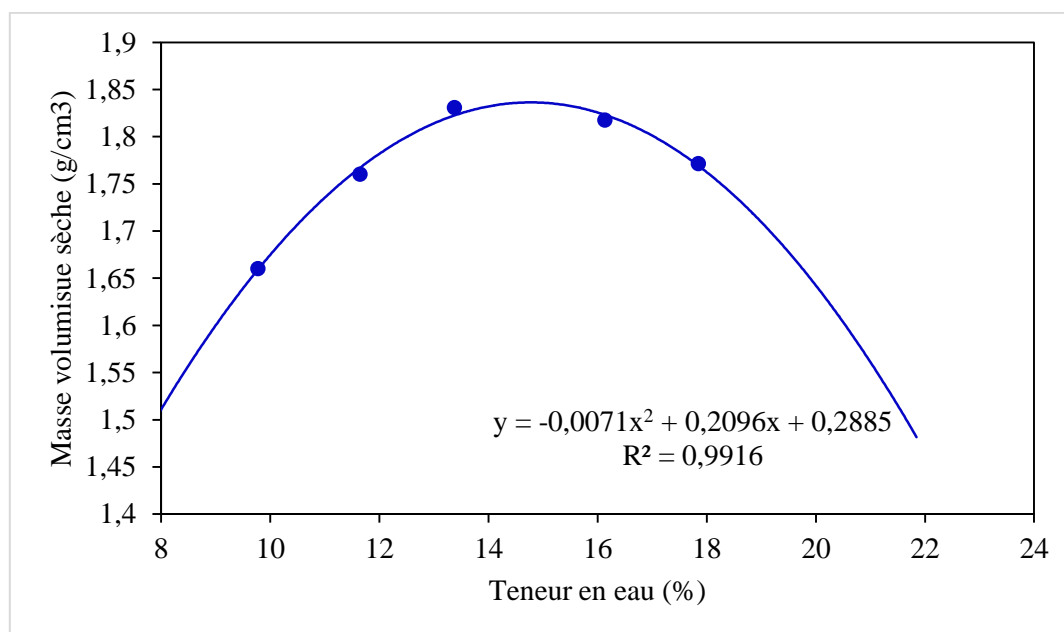


Figure III-18: courbe Proctor de sol traité par cimente Matine 2 %

Tableau III-22: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine (4 %).

Sol Traité à 4 % cimente Matine					
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3560,3	3505,7	3655,7	3678,2	3664,9
Masse du sol humide (g)	1851,21	1796,61	1946,61	1969,11	1955,81
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,96	1,91	2,07	2,09	2,08
Masse de la tare (g)	13	12,9	12,8	12,8	12,9
Masse sol humide + tare (g)	72,2	72,7	67,5	81,5	75
Masse sol sec + tare (g)	66,42	65,9	60,1	71,5	64,5
Masse d'eau (g)	7,78	6,8	7,4	10	10,5
Masse du sol sec (g)	53,52	53	47,3	58,7	51,6
Teneur en eau W (%)	10,81	12,83	15,64	17,04	20,35
Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ) ; $\rho_d = \rho_h / (1 + W)$	1,78	1,70	1,81	1,80	1,76

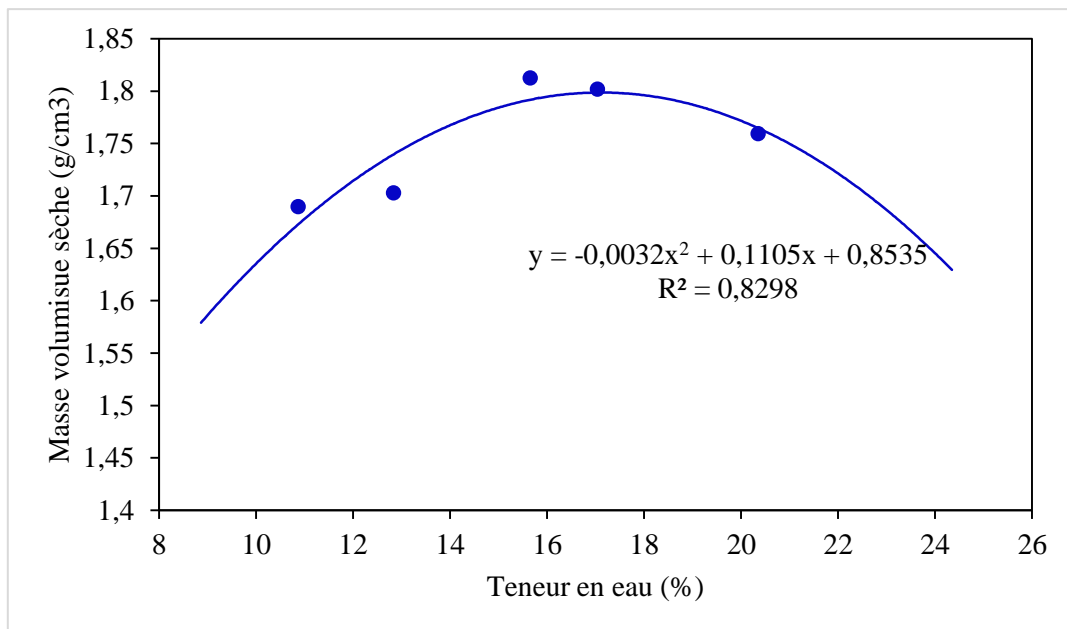


Figure III-19: courbe Proctor de sol traité par cimente Matine 4 %

Tableau III-23: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine (6 %).

Sol Traité à 6 % cimente Matine					
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3366,1	3577,5	3678,7	3670,6	3621,7
Masse du sol humide (g)	1657,01	1868,41	1969,61	1961,51	1912,61
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,75	1,98	2,09	2,08	2,03
Masse de la tare (g)	143,2	143,9	149,2	147,5	147,7
Masse sol humide + tare (g)	258,2	326,4	278,2	337,7	255,4
Masse sol sec + tare (g)	246,2	303,6	259,3	307,7	237,3
Masse d'eau (g)	12	22,8	18,9	30	18,1
Masse du sol sec (g)	103	159,7	110,1	160,2	89,6
Teneur en eau W (%)	11,65	14,28	17,17	18,73	20,20
Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ) ; pd=ph/(1+W)	1,6	1,77	1,83	1,80	1,72

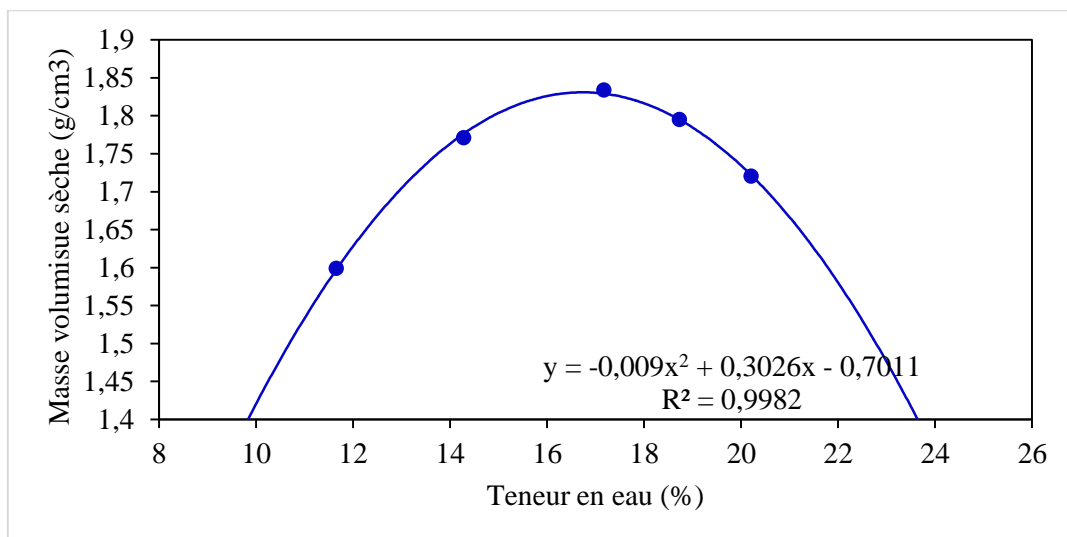


Figure III-20: courbe Proctor de sol traité par cimente Matine 6 %

Tableau III-24: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine (8 %).

Sol Traité à 8 % cimente Matine					
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3400,5	3565,5	3595,6	3656,3	3650
Masse du sol humide (g)	1691,41	1856,41	1886,51	1947,21	1940,91
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,80	1,97	2,00	2,07	2,06
Masse de la tare (g)	85,2	148,7	22,9	12,9	12,8
Masse sol humide + tare (g)	257,6	358,2	118,5	94,4	82,7
Masse sol sec + tare (g)	241,5	335,3	106,1	82,1	71
Masse d'eau (g)	16,1	22,9	12,4	12,3	11,7
Masse du sol sec (g)	156,3	186,6	83,2	69,2	58,2
Teneur en eau W (%)	10,30	12,27	14,90	17,77	20,10
Masse volumique sèche (g/cm <sup>3</sup> ) ; pd=ph/(1+W)	1,63	1,76	1,76	1,78	1,75

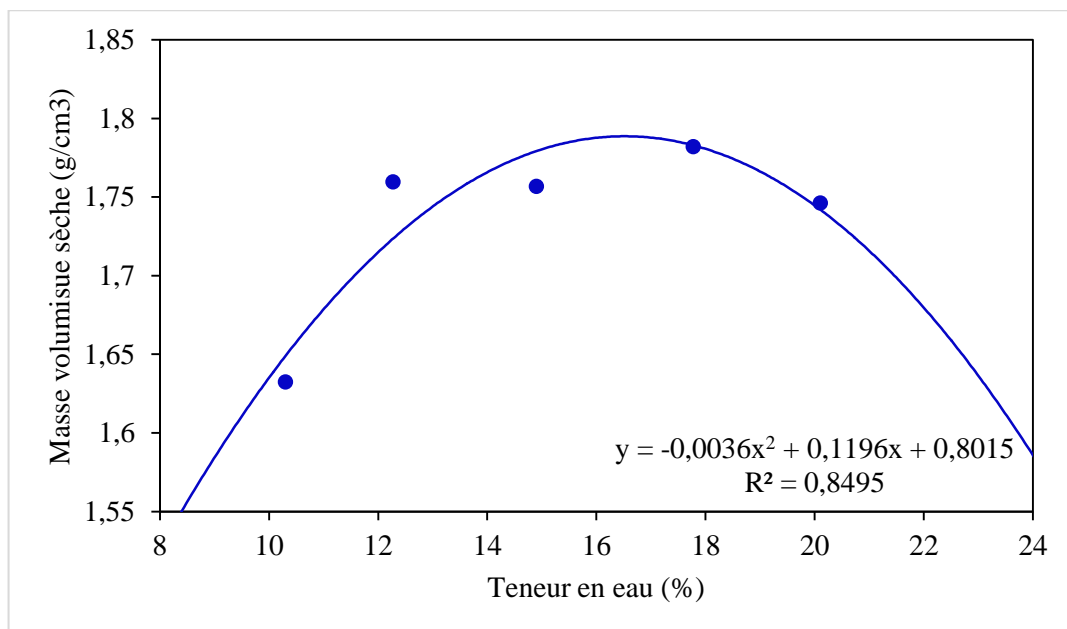


Figure III-21: courbe Proctor de sol traité par cimente Matine 8 %

Tableau III-25: Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine 10 %.

Sol Traité à 10 % cimente Matine					
Teneur en eau approximative (%)	10%	12%	14%	16%	18%
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm3)	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3435,9	3558,37	3645	3670,8	3663,3
Masse du sol humide (g)	1726,81	1849,28	1935,91	1961,71	1954,21
Masse volumique humide (g/cm3)	1,83	1,96	2,06	2,08	2,07
Masse de la tare (g)	12,9	12,9	13	12,7	12,8
Masse sol humide + tare (g)	66,5	81,2	57,8	68,5	56
Masse sol sec + tare (g)	61,1	73,1	52,0	60,6	49
Masse d'eau (g)	5,4	8,1	5,8	7,9	7
Masse du sol sec (g)	48,2	60,2	39	47,9	36,2
Teneur en eau W (%)	11,20	13,46	14,87	16,49	19,34
Masse volumique sèche (g/cm3) ; pd=ph/(1+W)	1,67	1,75	1,80	1,80	1,76

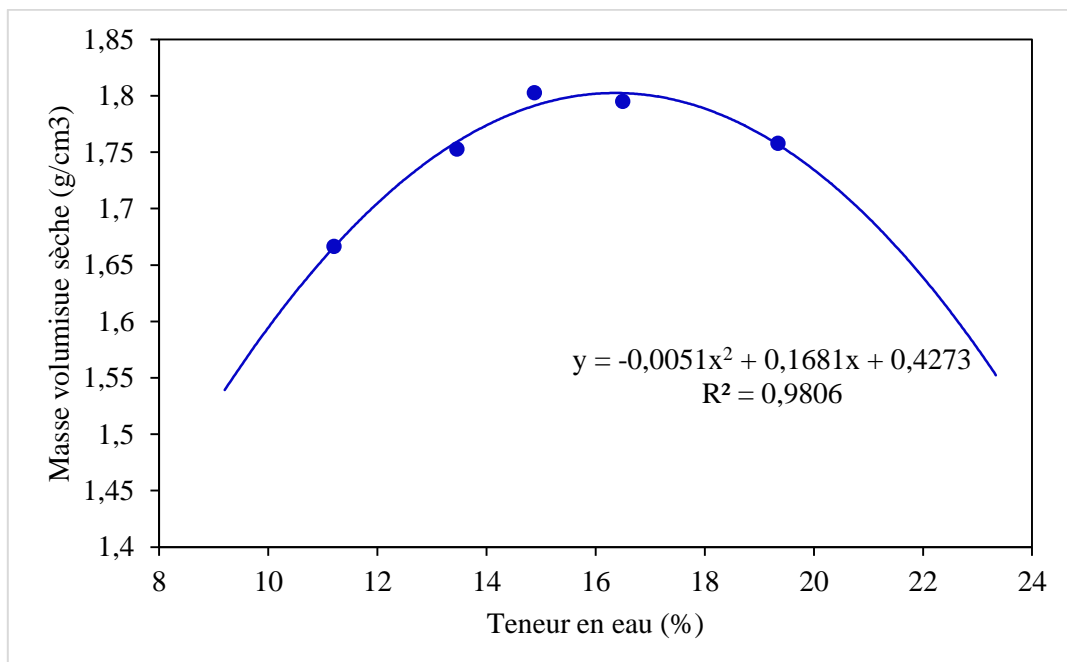


Figure III-22: courbe Proctor de sol traité par cimente Matine 10 %

Tableau III-26: Récapitulatif des résultats des essais de compactage d'un sol traité

essai		Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moy
sol naturel	$W_{opt}$	15.37	14.47	15.59	15,50
	$\gamma_{dmax}$	1.82	1.80	1.80	1,80
2%	$W_{opt}$	14.76	15.66	14.32	15,66
	$\gamma_{dmax}$	1.84	1.68	1.79	1,79
4%	$W_{opt}$	16.27	13.50	15.91	15,91
	$\gamma_{dmax}$	1.81	1.67	1.81	1,76
6%	$W_{opt}$	16.81	16.23	14.50	16,81
	$\gamma_{dmax}$	1.84	1.74	1.81	1,80
8%	$W_{opt}$	16.84	17.07	16.72	17,07
	$\gamma_{dmax}$	1.79	1.77	1.82	1,79
10%	$W_{opt}$	16.61	17.70	18.80	17,70
	$\gamma_{dmax}$	1.81	1.75	1.81	1,79

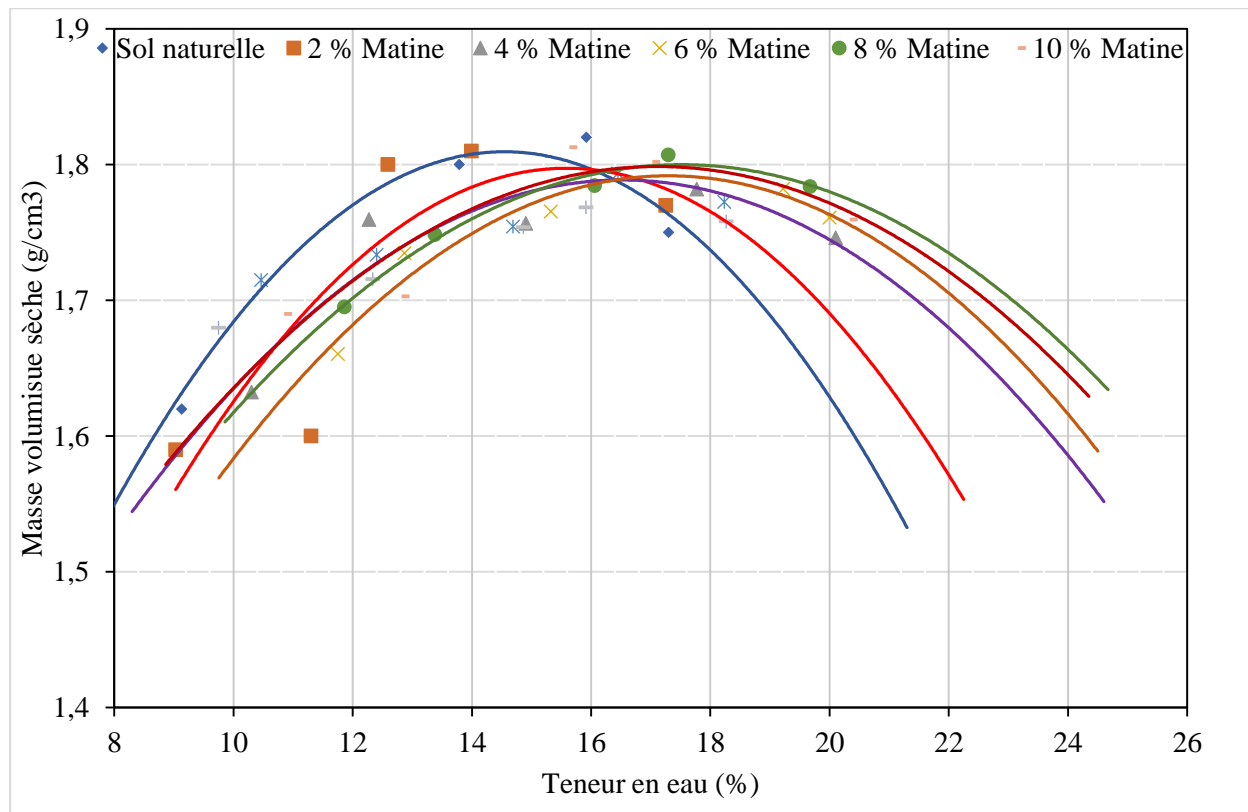


Figure III-23: Récapitulatif des courbe Proctor de sol traité par ciment Matine.

**III.2.2.1.2 : Interprétation des résultats :**

D'après les tableaux (III. 18, III. 24) les résultats des essais de compactage Proctor Normal à sol naturelle et de deux différentes teneurs en ciment et de deux différentes classes de ciment (Chamil et Matine). Pour le traitement avec le ciment Chamil on remarque l'augmentation de la densité sèche et la teneur en eau optimale, par contre pour le ciment Matine la densité sèche est diminuée et la teneur en eau optimale Augment, à titre d'exemple : sol naturel ( $W_{opt}= 15,05$ ) et ( $\gamma_{d_{max}} = 1,80$ ) après traitement avec ciment Chamil au dosage (10%) ( $W_{opt}= 16,67$ ) et ( $\gamma_{d_{max}} = 1,84$ ), mais après le traitement avec ciment Matine au dosage (10%) ( $W_{opt}= 17,07$ ) et ( $\gamma_{d_{max}} = 1,75$ ).

## III.2.2.2. Essai de Cisaillement direct :

## ➤ Essai cisaillement 7 jours Ciment Chamil :

Tableau III-27: Essai cisaillement pour sol naturel

SOL NATUREL								
100			200			400		
F(N)	$\tau$ (KPa)	$\Delta L$ (mm)	F(N)	$\tau$ (Kpa)	$\Delta L$ (mm)	F(N)	$\tau$ (Kpa)	$\Delta L$ (mm)
0	0	0	0	0,56	0	0	0	0
7	1,95	0,093	2	4,48	0,191	165	0,129	45,93209
18	5,03	0,323	16	5,06	0,427	280	0,3	78,16862
21	5,89	0,558	18	4,23	0,659	355	0,476	99,39968
19	5,35	0,798	15	12,44	0,906	407	0,64	114,2745
38	10,74	1,018	44	17,03	1,067	453	0,818	127,5726
53	15,03	1,225	60	20,80	1,289	523	0,998	147,7351
63	17,93	1,454	73	24,00	1,506	587	1,206	166,4002
72	20,57	1,665	84	27,81	1,673	656	1,411	186,6107
82	23,50	1,853	97	31,93	1,863	701	1,623	200,1359
91	26,18	2,06	111	36,96	2,068	733	1,845	210,0708
109	31,48	2,287	128	42,01	2,274	762	2,072	219,2377
127	36,83	2,524	145	48,55	2,477	781	2,305	225,6117
148	43,08	2,736	167	56,31	2,67	797	2,544	231,1914
163	47,62	2,946	193	63,56	2,878	814	2,778	237,0883
182	53,37	3,167	217	70,02	3,099	821	3,012	240,109
199	58,61	3,409	238	76,22	3,346	833	3,245	244,6187
214	63,30	3,658	258	81,29	3,586	840	3,485	247,7218
227	67,46	3,914	274	85,51	3,825	847	3,737	250,905
239	71,30	4,131	287	89,77	4,059	852	3,98	253,4809
253	75,80	4,37	300	93,16	4,304	860	4,223	256,9757
264	79,44	4,614	310	96,58	4,54	798	4,334	238,925
275	83,11	4,853	320	99,74	4,777	778	4,345	232,983
283	85,90	5,089	329	102,93	5,021	770	4,35	230,608
288	87,81	5,334	338	0,56	5,272	763	4,354	228,528

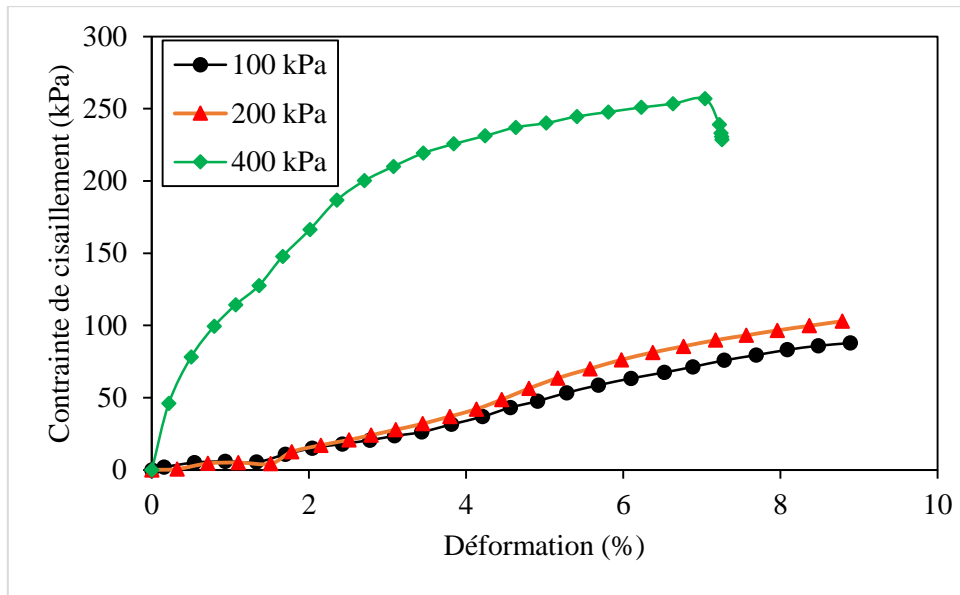


Figure III-24: Courbe d'essai cisaillement (sol naturel) Essais 01

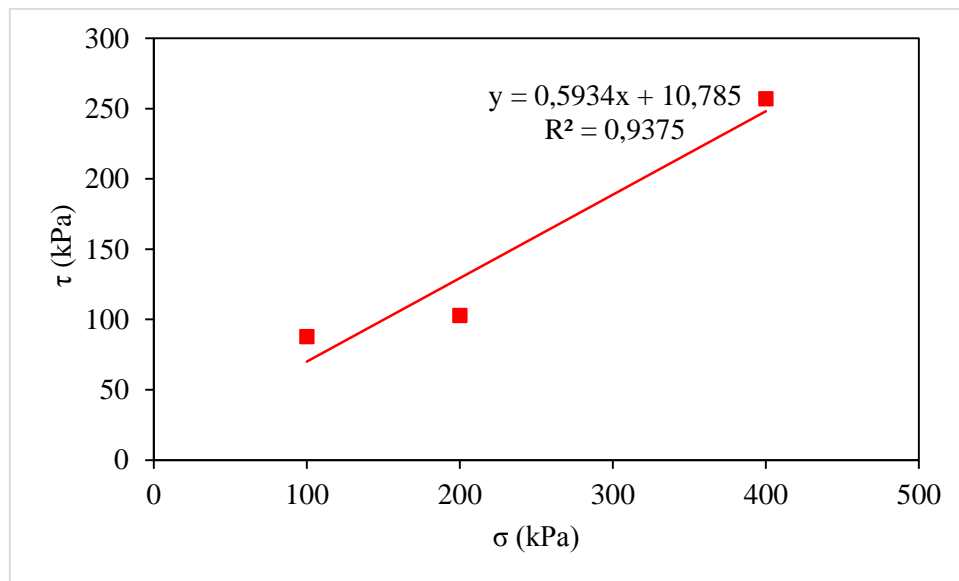


Figure III-25: Courbe d'essai cisaillement (sol naturel) Essais 01

➤ Essai de Cisaillement 7 jours ciment Chamil :

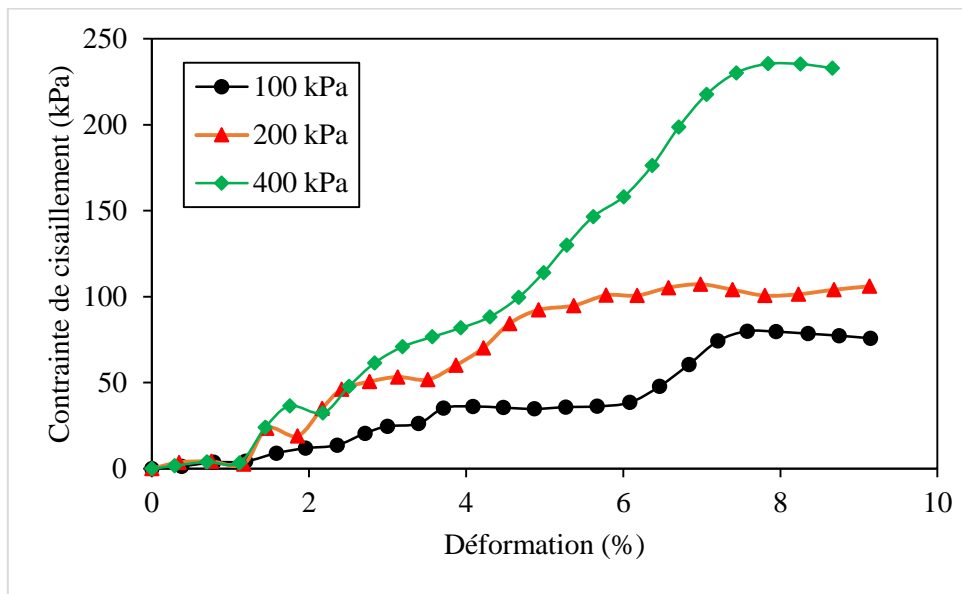


Figure III-26: Courbe d'essai cisaillement 2% Ciment Chamil.

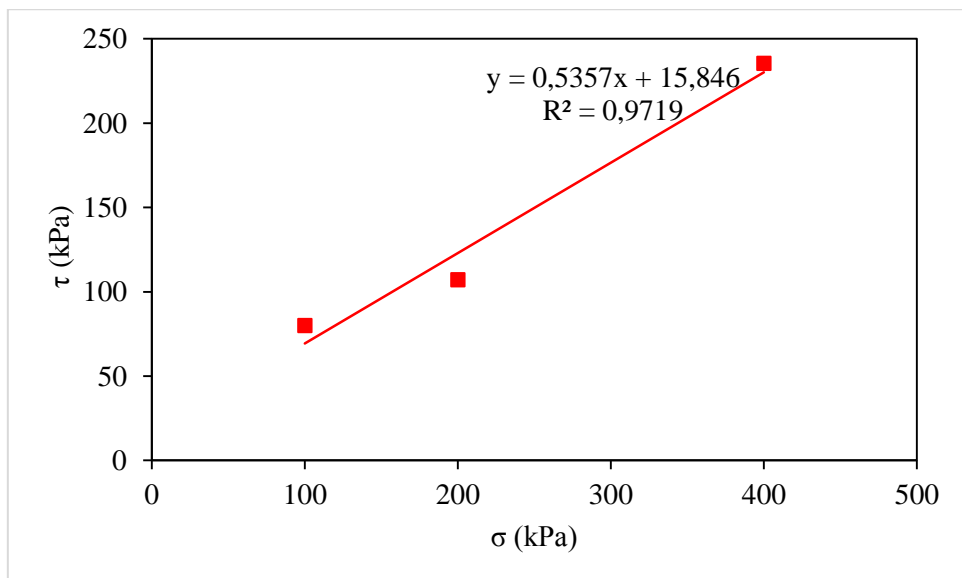


Figure III-27: Courbe d'essai cisaillement 2% Ciment Chamil.

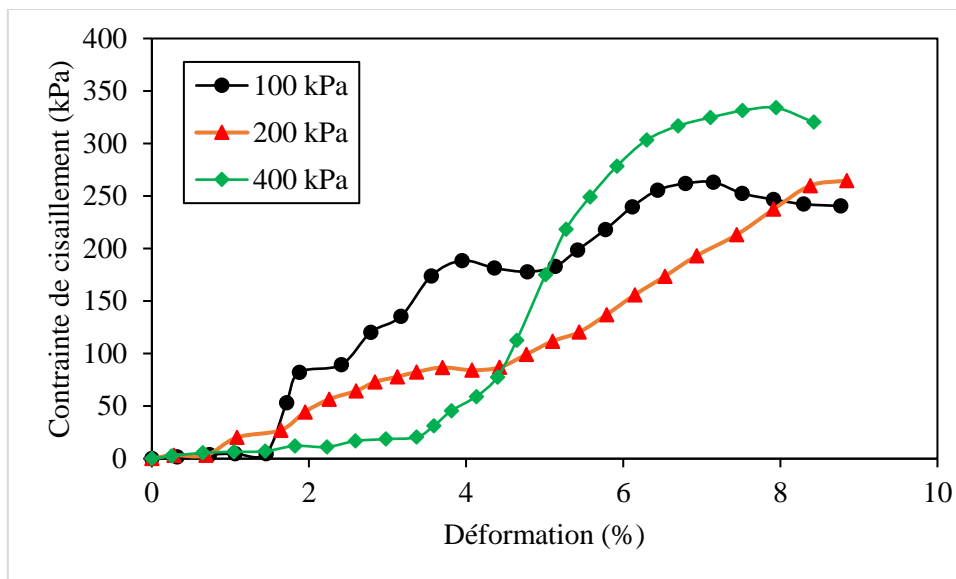


Figure III-28: Courbe d'essai cisaillement 4% Ciment Chamil.

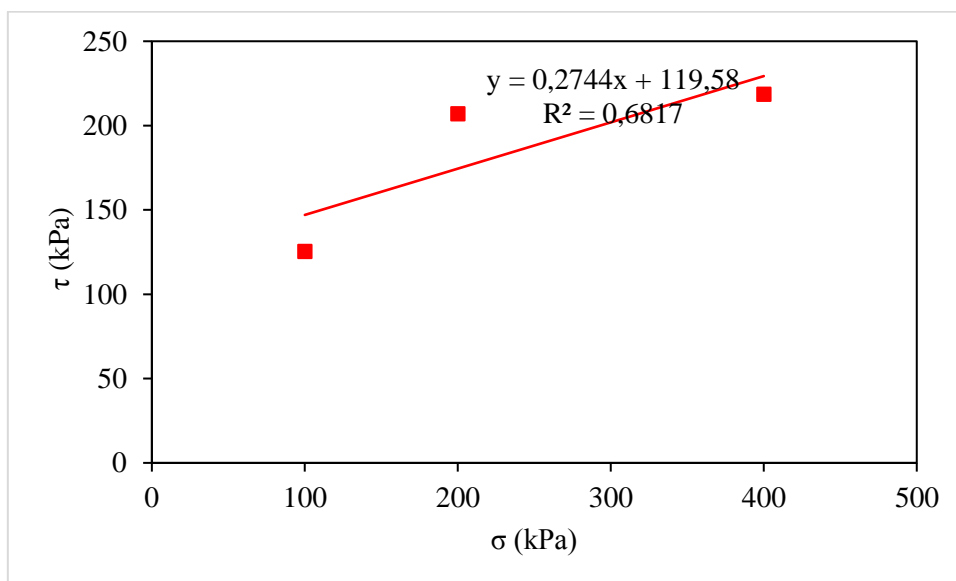


Figure III-29: Courbe d'essai cisaillement 4% Ciment Chamil.

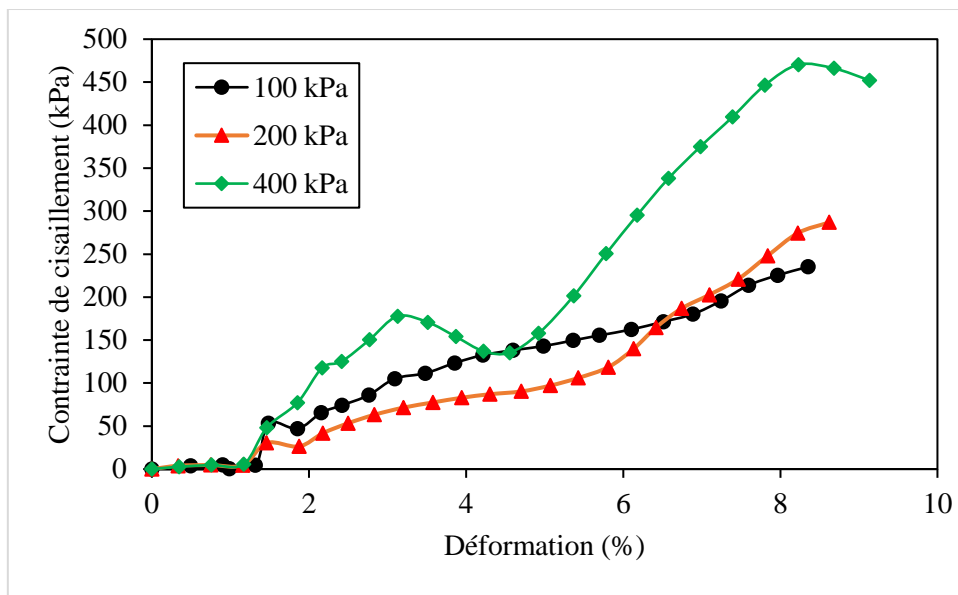


Figure III-30: Courbe d'essai cisaillement 6% Ciment Chamil.

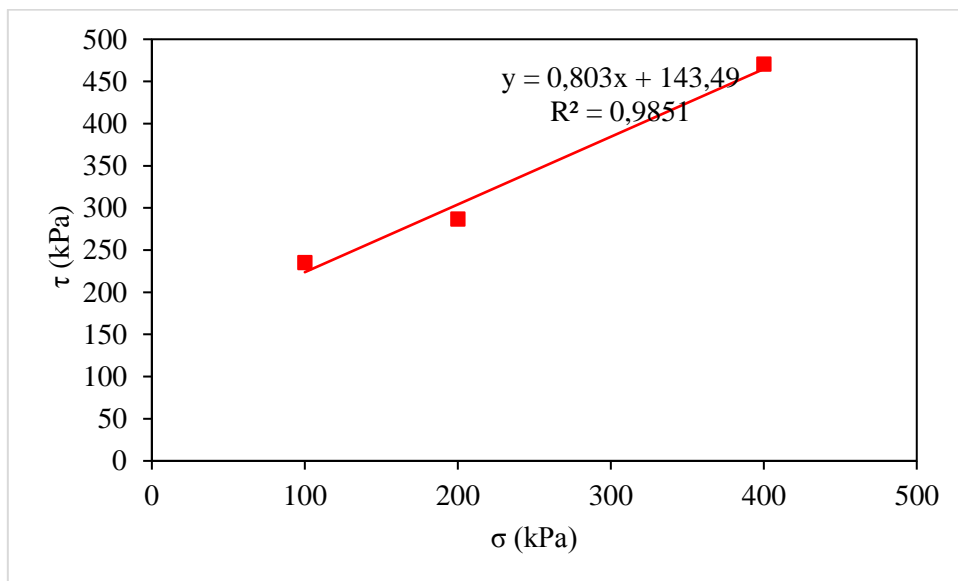


Figure III-31: Courbe d'essai cisaillement 6% Ciment Chamil.

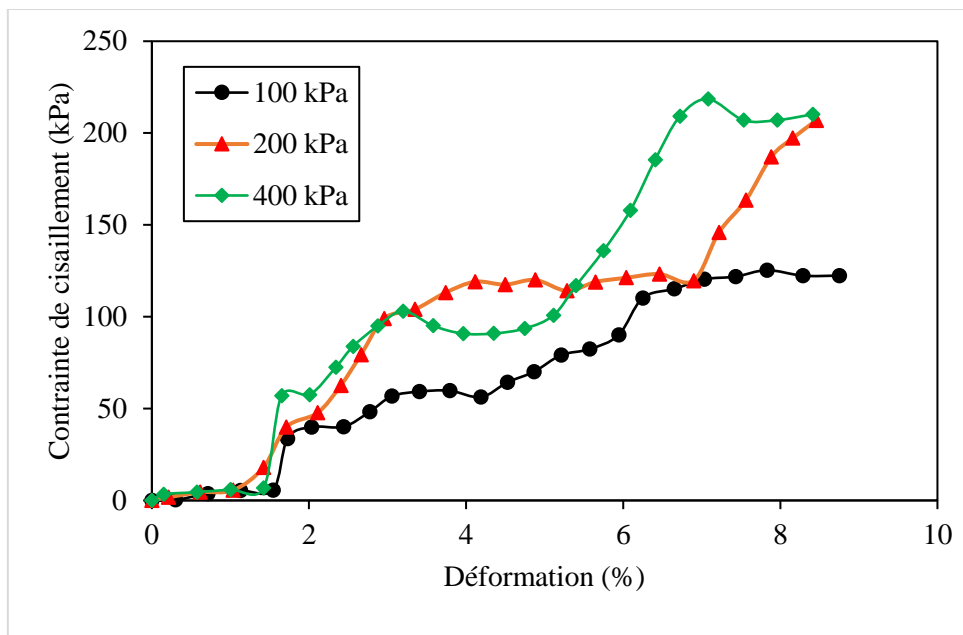


Figure III-32: Courbe d'essai cisaillement 8% Ciment Chamil.

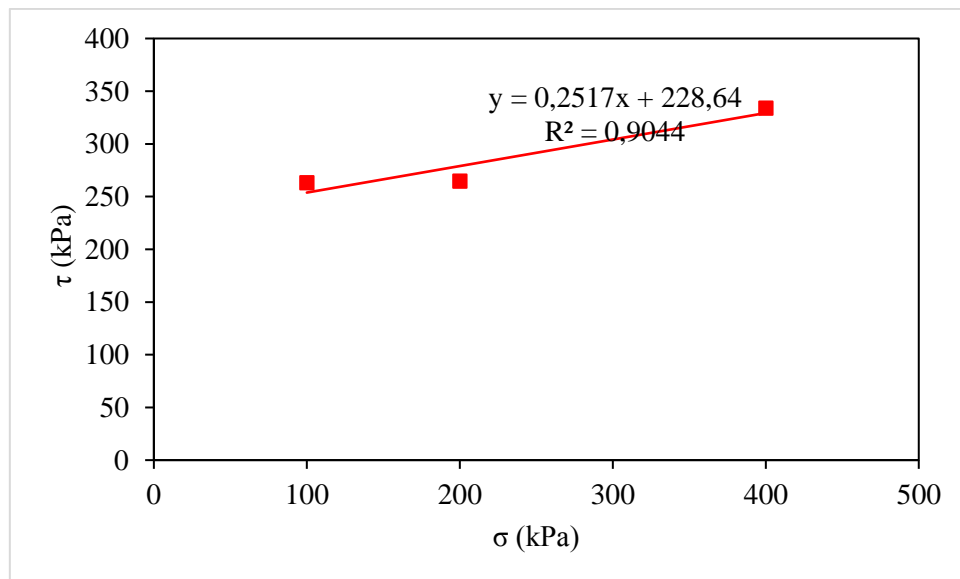


Figure III-33: Courbe d'essai cisaillement 8% Ciment Chamil.

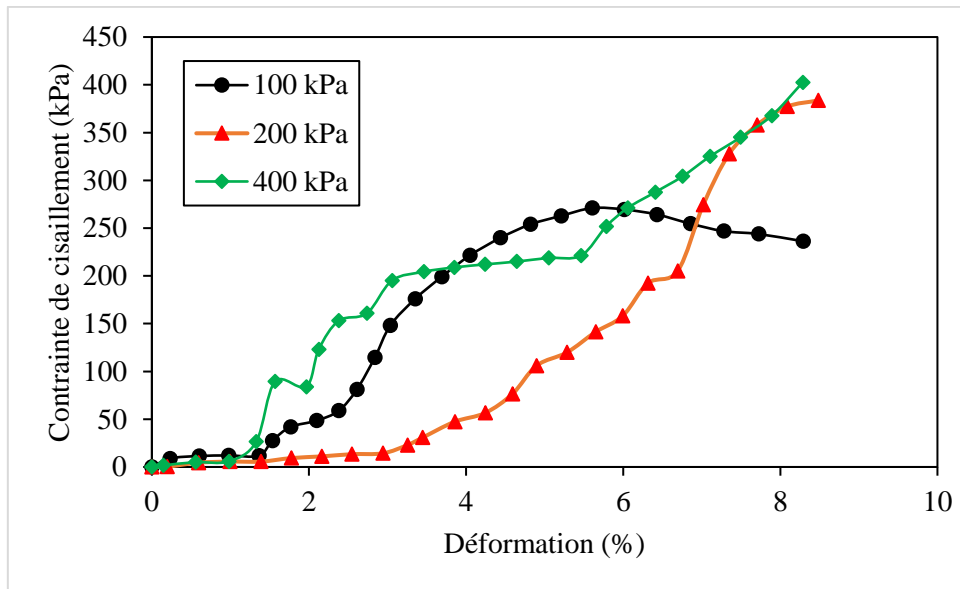


Figure III-34: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Chamil.

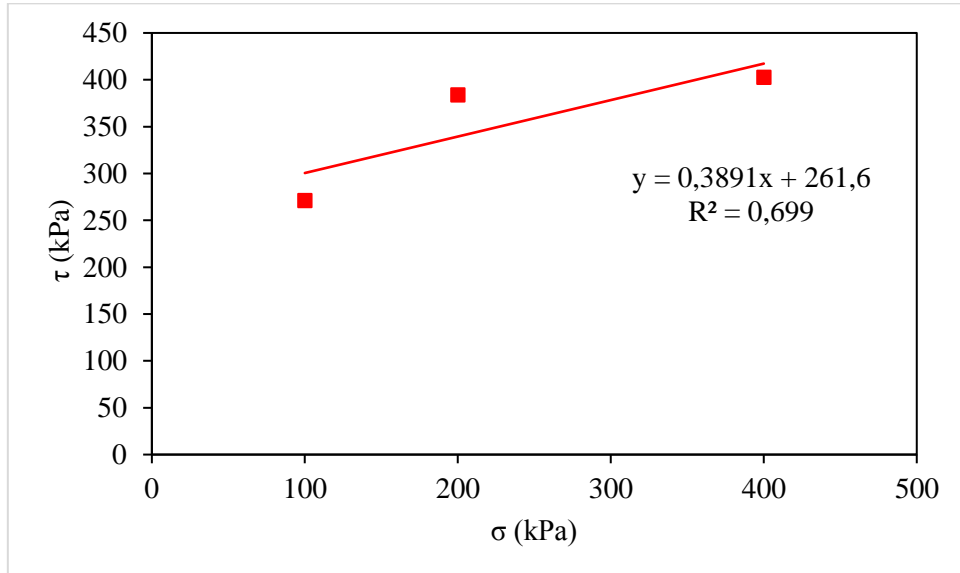


Figure III-35: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Chamil.

➤ Essai de Cisaillement 7 jours ciment Matin :

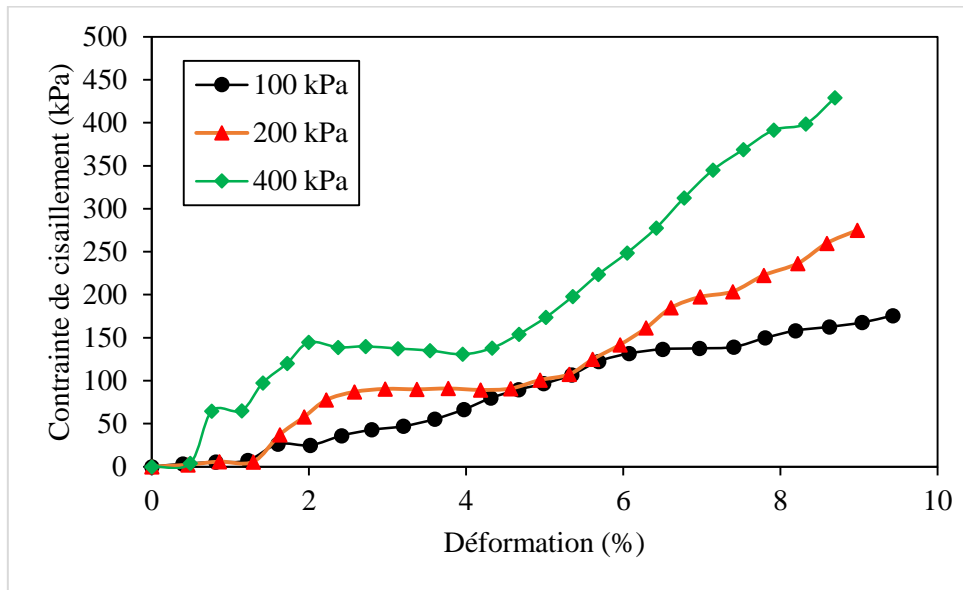


Figure III-36: Courbe d'essai cisaillement 4 % Ciment Matin 7 jours.

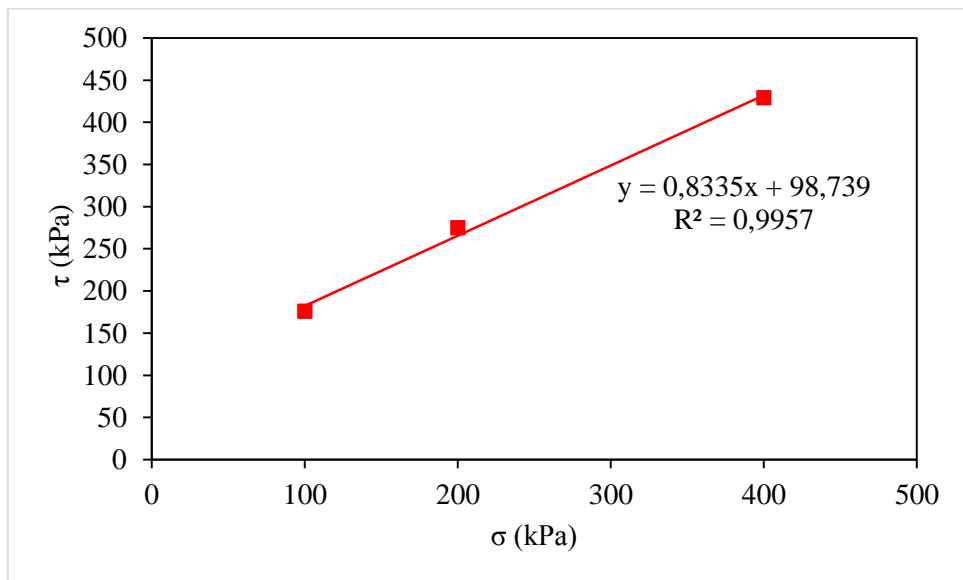


Figure III-37: Courbe d'essai cisaillement 4 % Ciment Matin 7 jours.

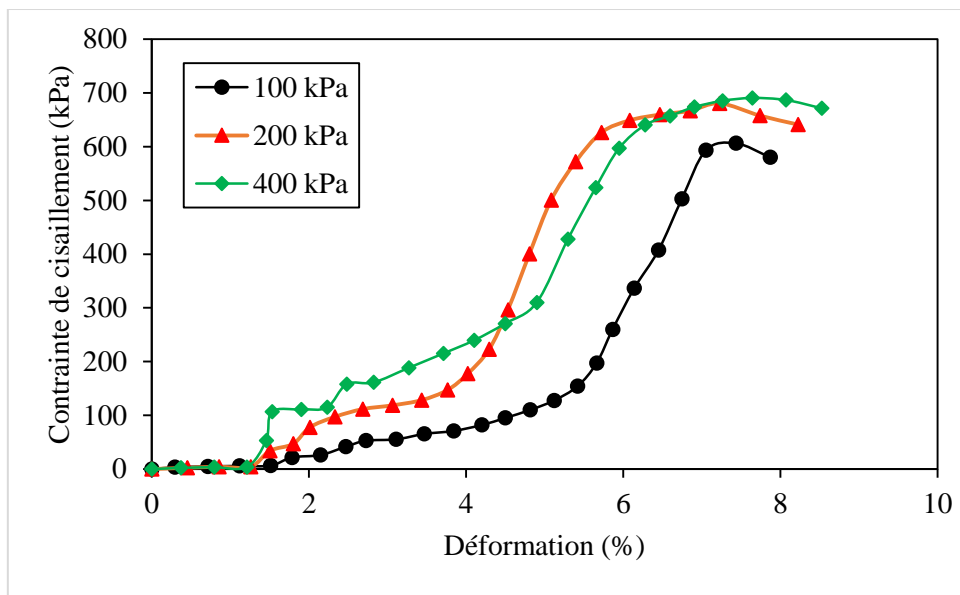


Figure III-38: Courbe d'essai cisaillement 8 % Ciment Matin 7 jours.

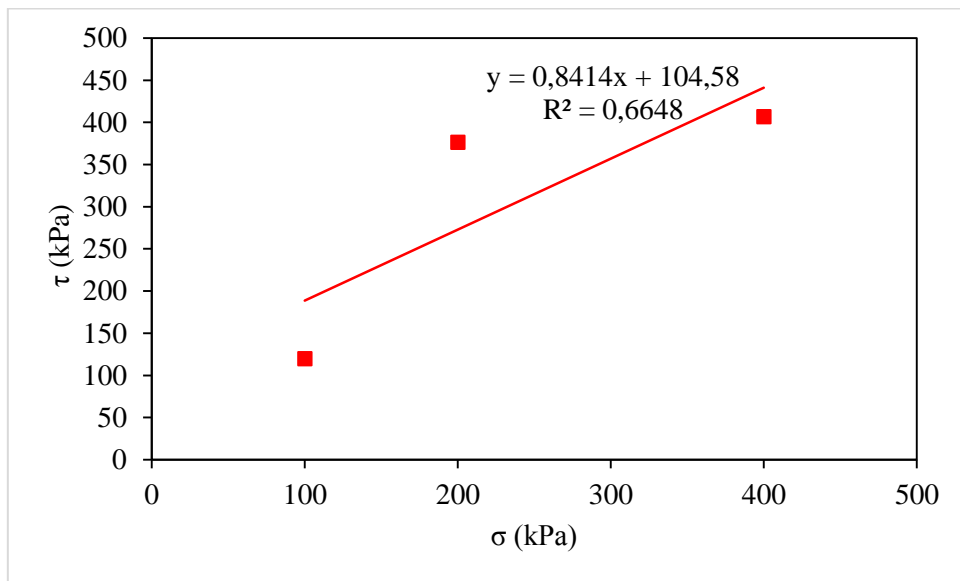


Figure III-39: Courbe d'essai cisaillement 8 % Ciment Matin 7 jours.

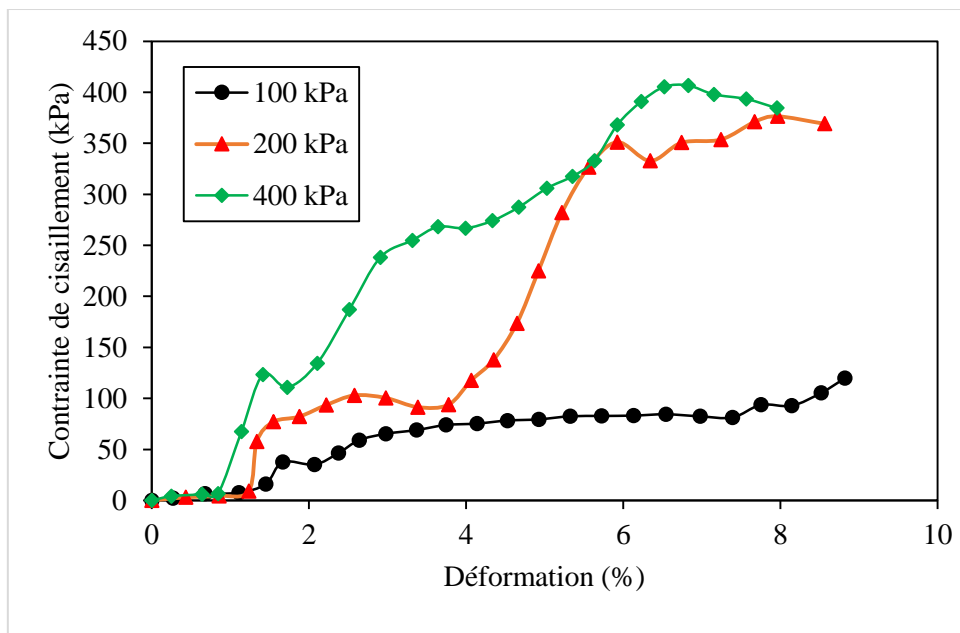


Figure III-40: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Matin 7 jours.

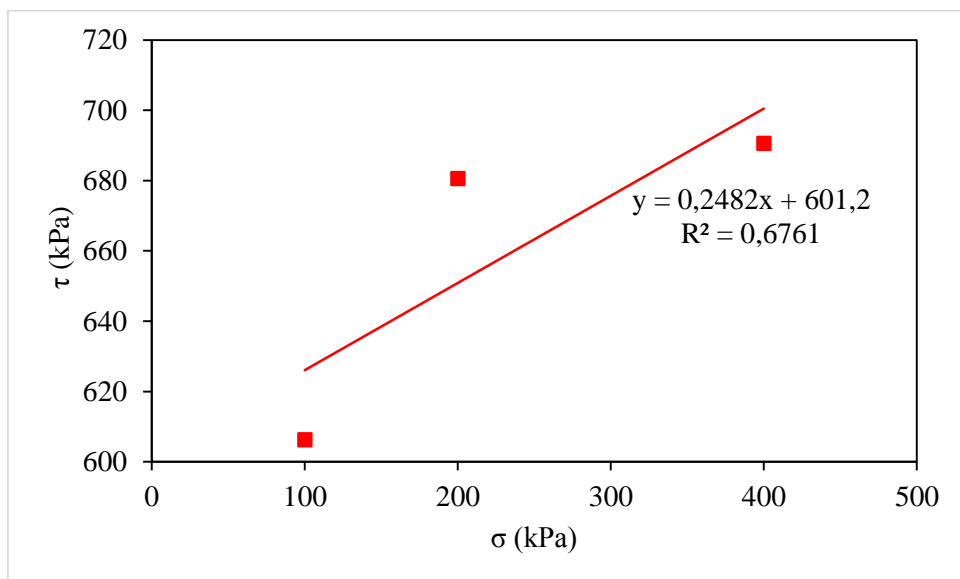


Figure III-41: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Matin 7 jours.

➤ Essai de Cisaillement 14 jours Ciment Chamil :

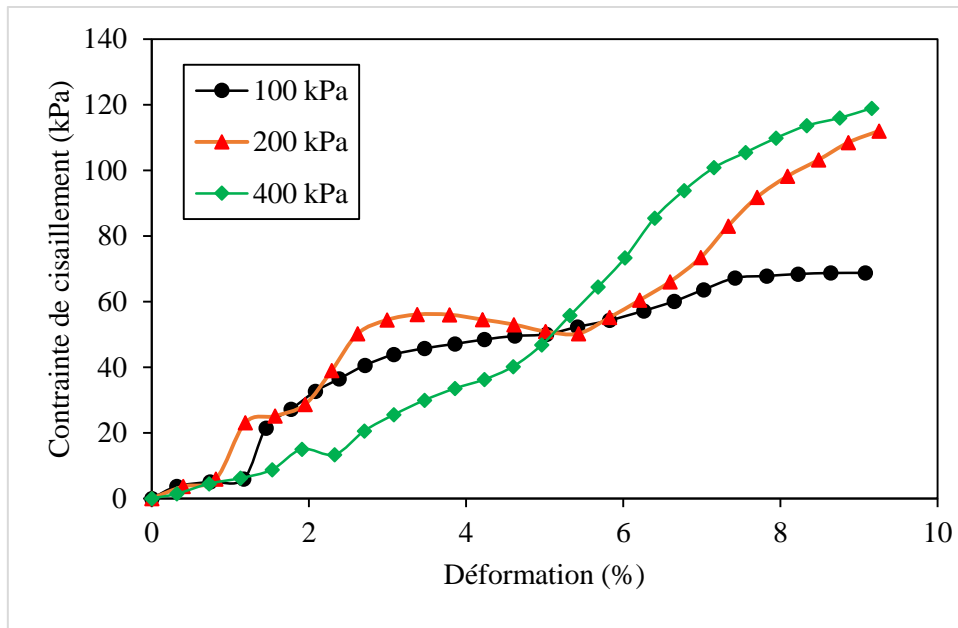


Figure III-42: Courbe d'essai cisaillement (sol naturel)

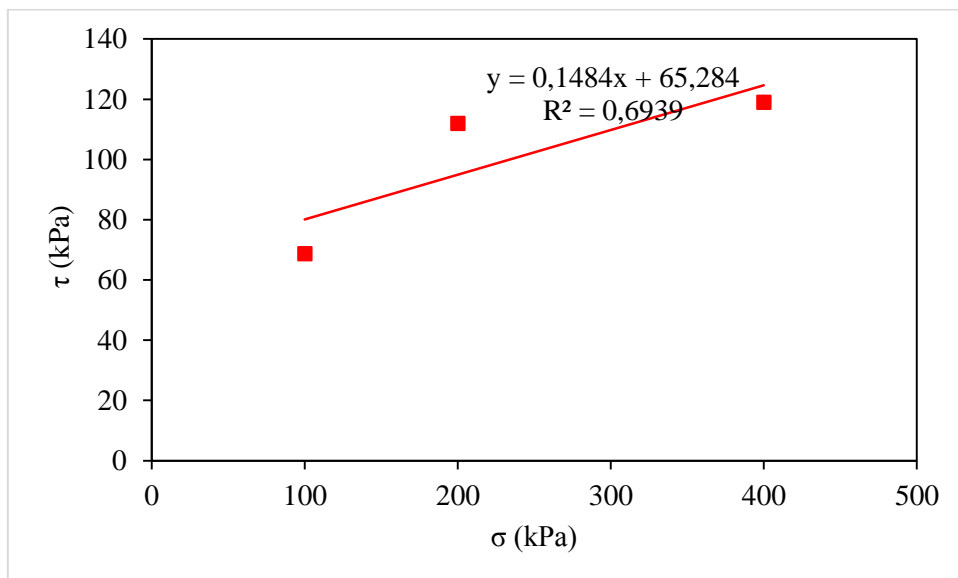


Figure III-43: Courbe d'essai cisaillement (sol naturel)

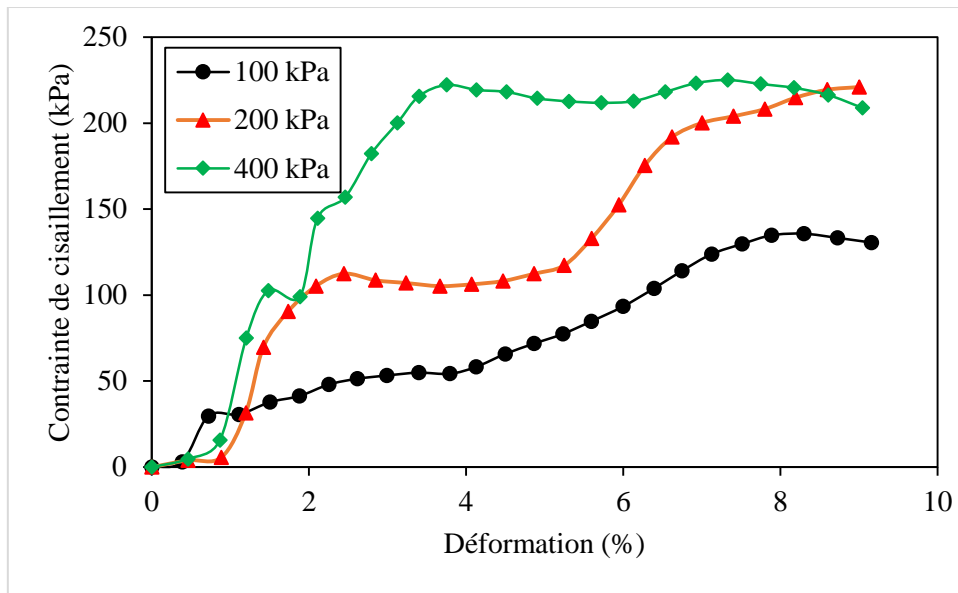


Figure III-44: Courbe d'essai cisaillement 2% Ciment Chamil.

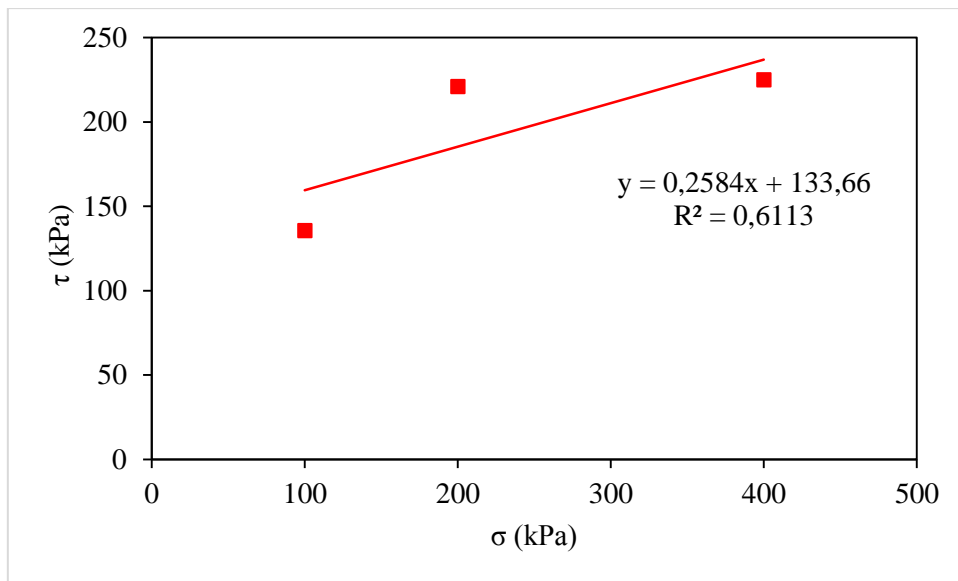


Figure III-45: Courbe d'essai cisaillement 2% Ciment Chamil.

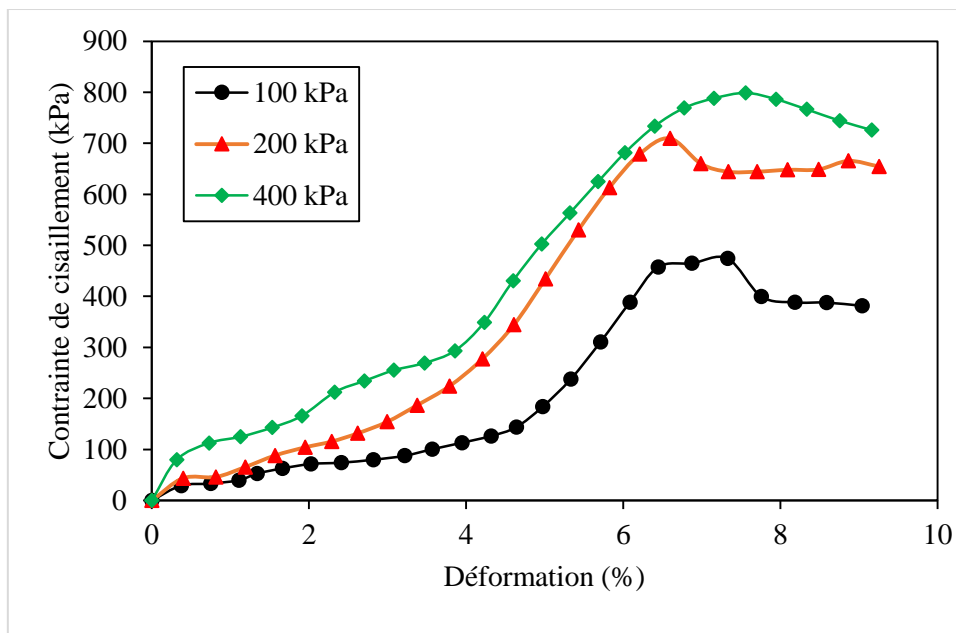


Figure III-46: Courbe d'essai cisaillement 4 % Ciment Chamill.

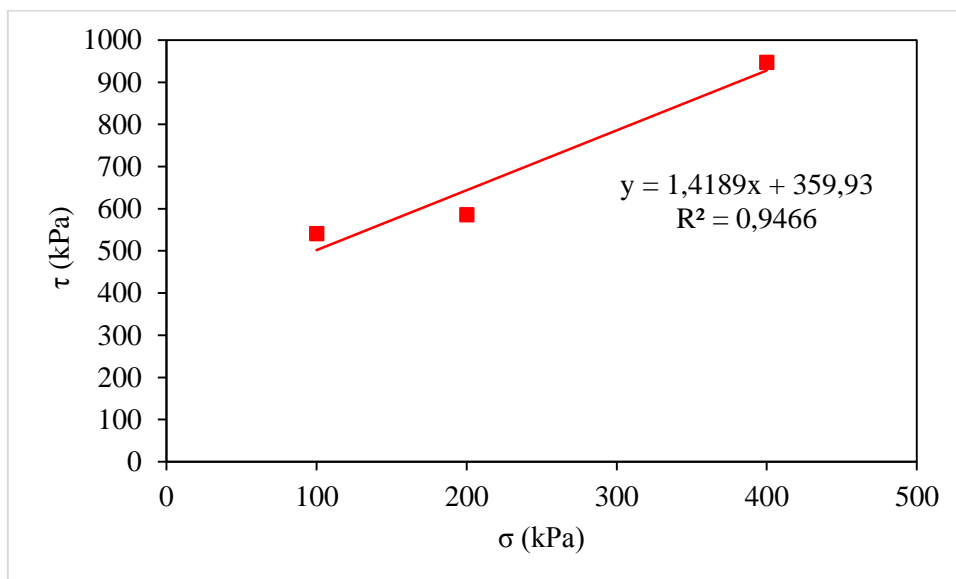


Figure III-47: Courbe d'essai cisaillement 4 % Ciment Chamill.

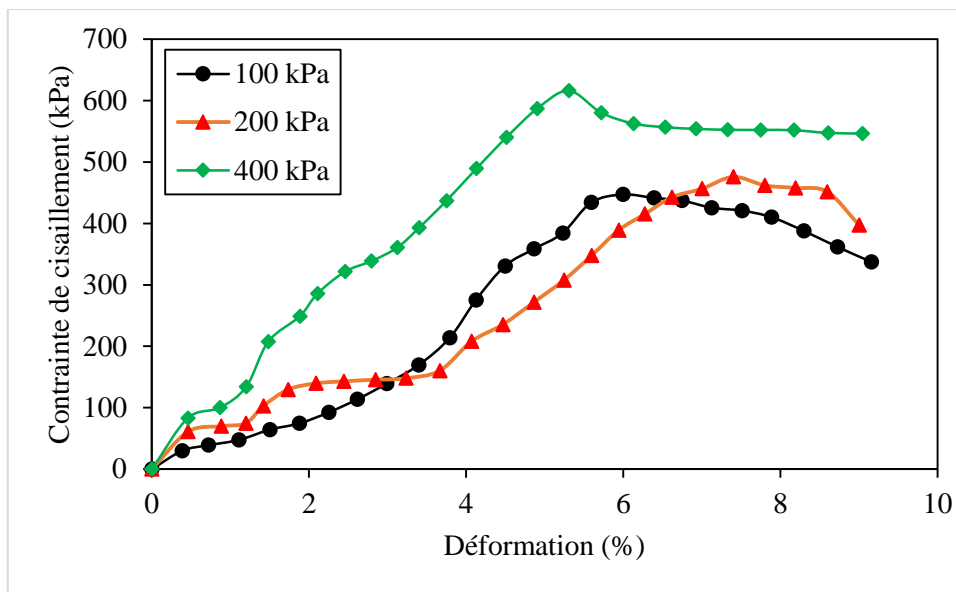


Figure III-48: Courbe d'essai cisaillement 6 % Ciment Chamil.

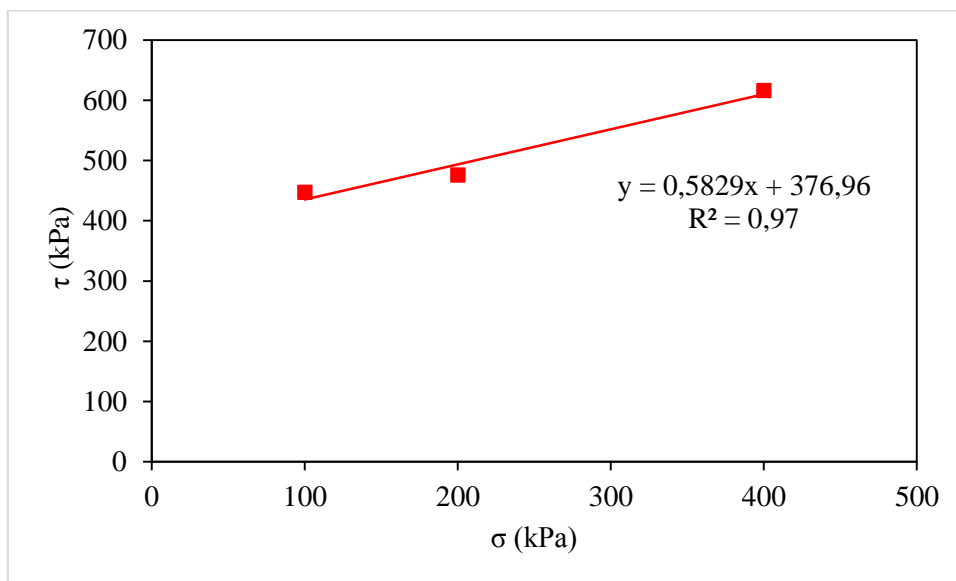


Figure III-49: Courbe d'essai cisaillement 6 % Ciment Chamil.

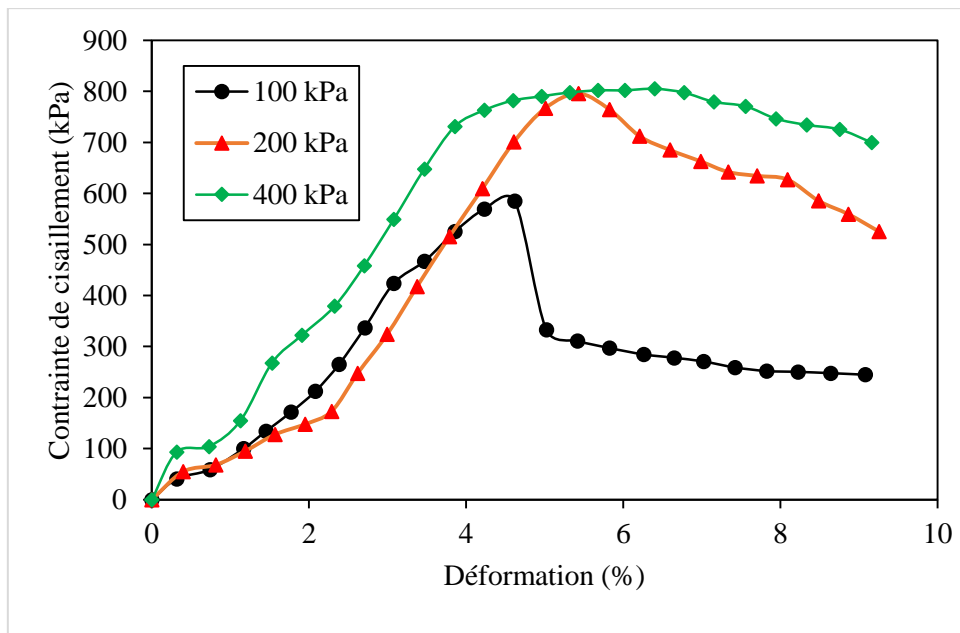


Figure III-50: Courbe d'essai cisaillement 8 % Ciment Chamil.

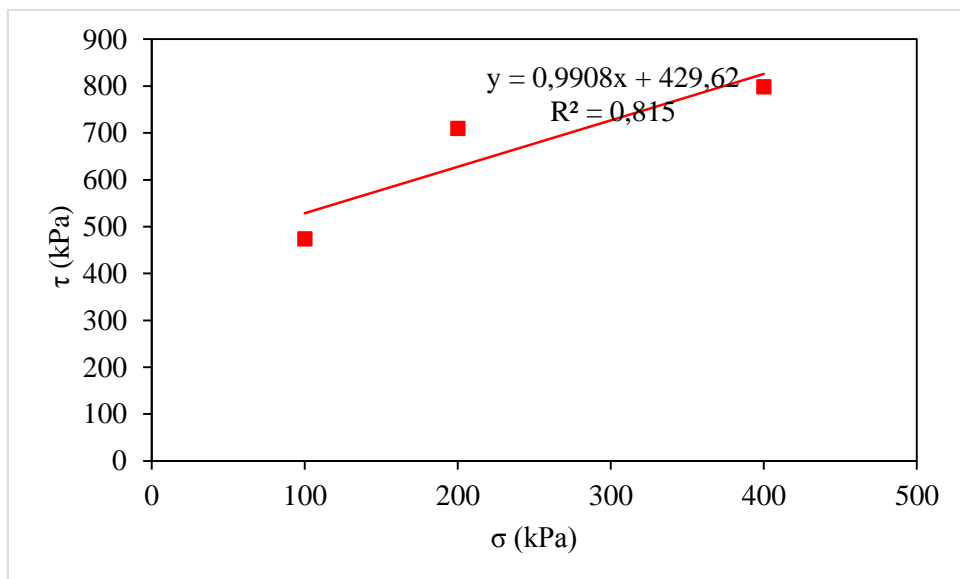


Figure III-51: Courbe d'essai cisaillement 8 % Ciment Chamil.

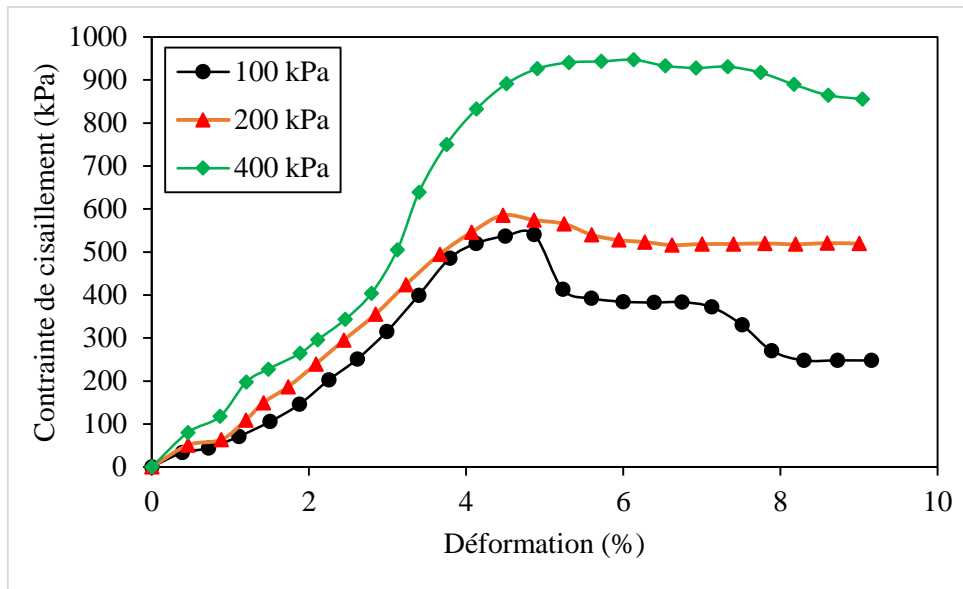


Figure III-52 : Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Chamil.

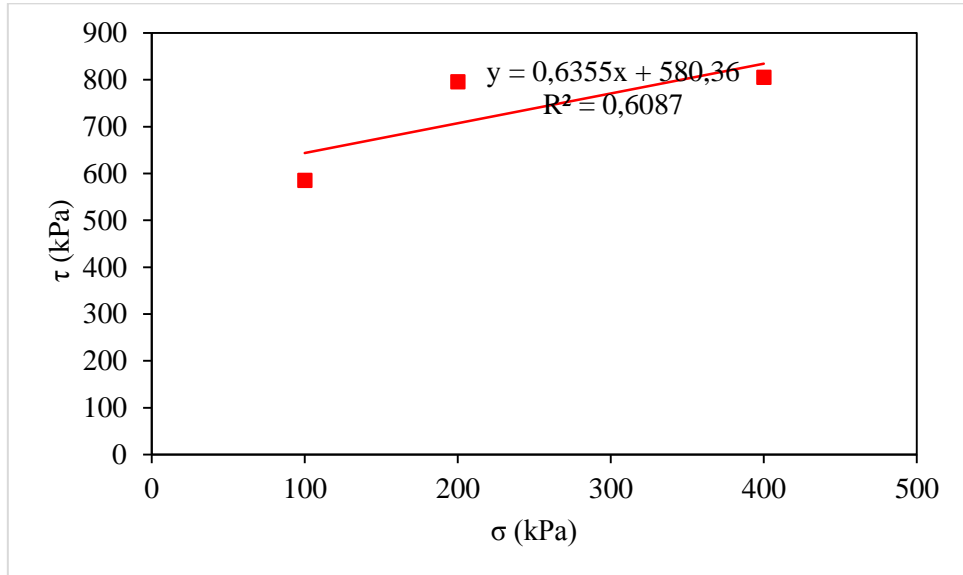


Figure III-53: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Chamil.

➤ Essai de Cisaillement 14 jours Matin :

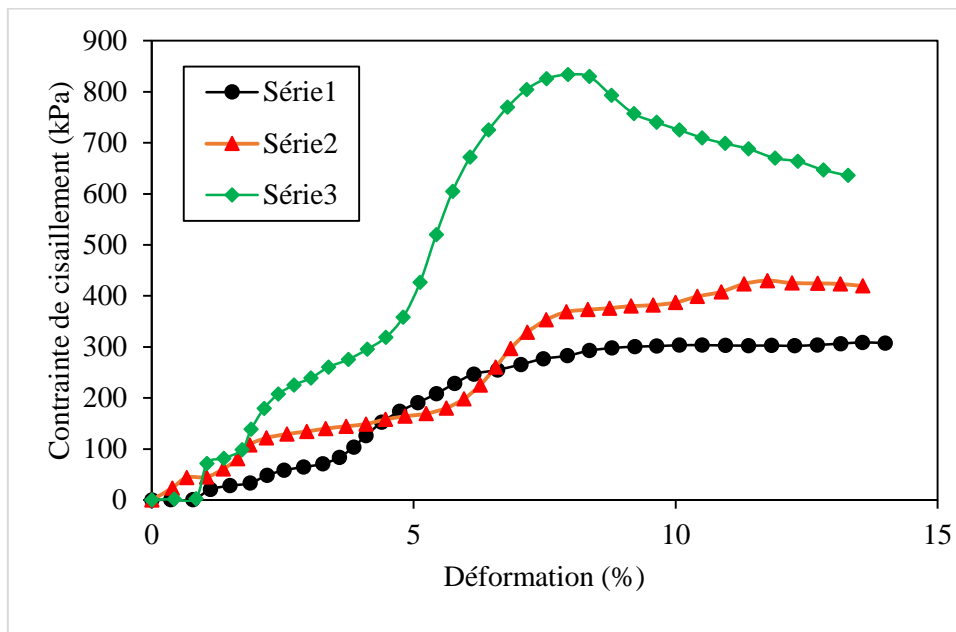


Figure III-54: Courbe d'essai cisaillement 2 % Ciment Matine.

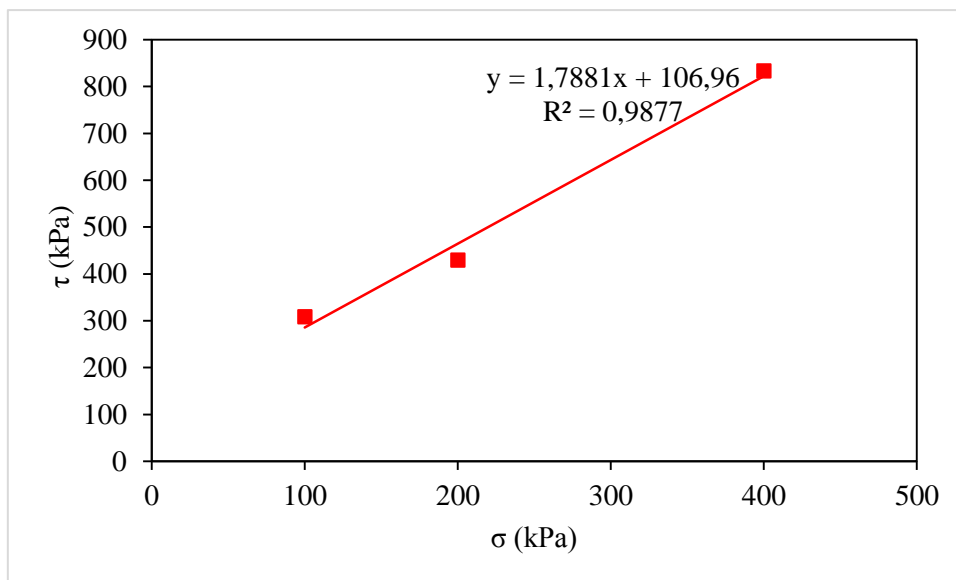


Figure III-55: Courbe d'essai cisaillement 2 % Ciment Matine.

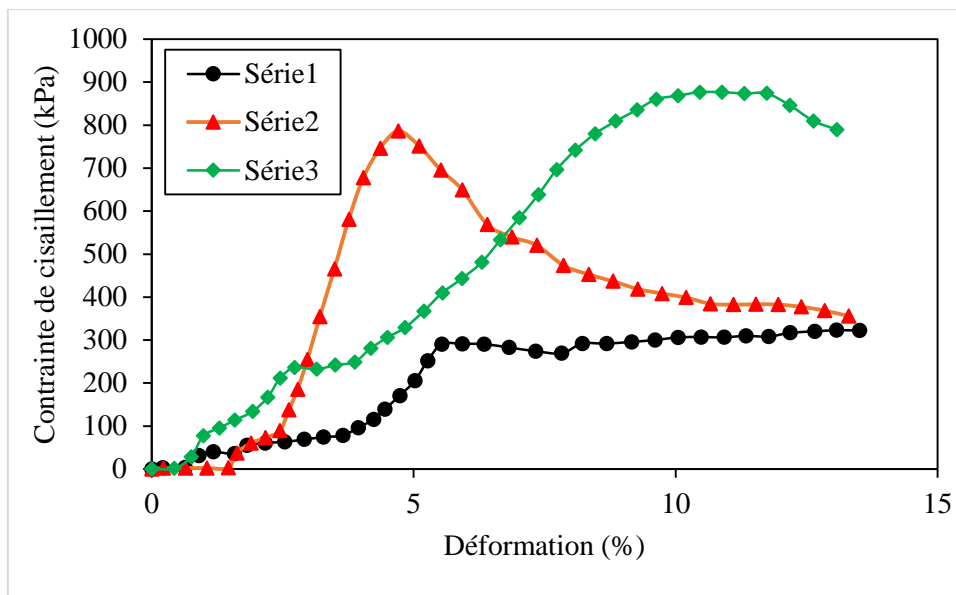


Figure III-56: Courbe d'essai cisaillement 4 % Ciment Matine.

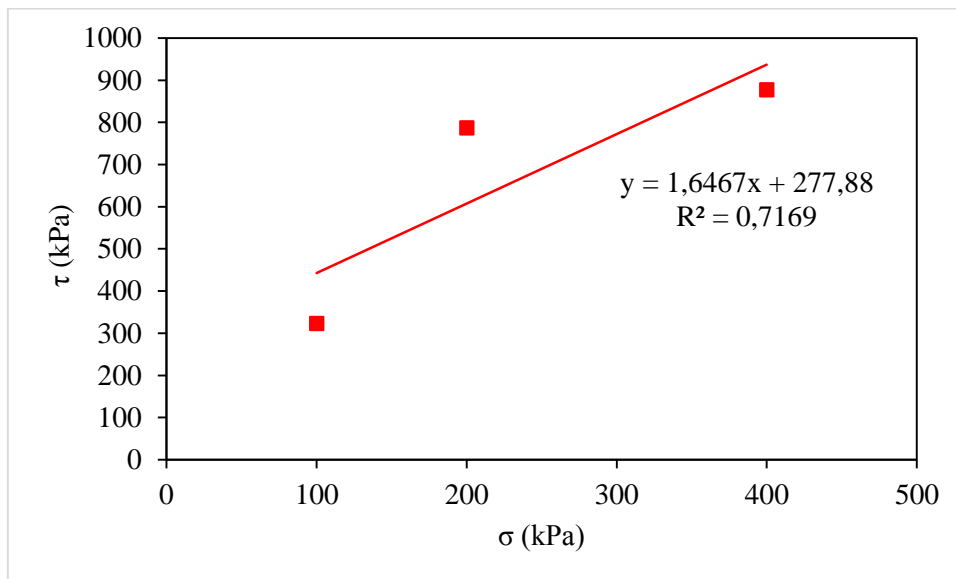


Figure III-57: Courbe d'essai cisaillement 4 % Ciment Matine.

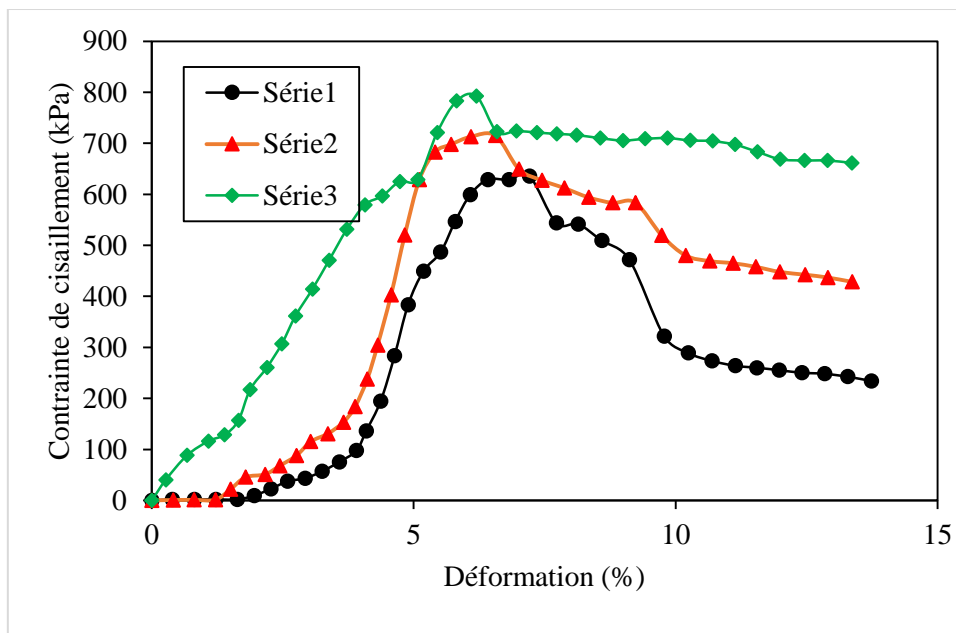


Figure III-58: Courbe d'essai cisaillement 6 % Ciment Matine.

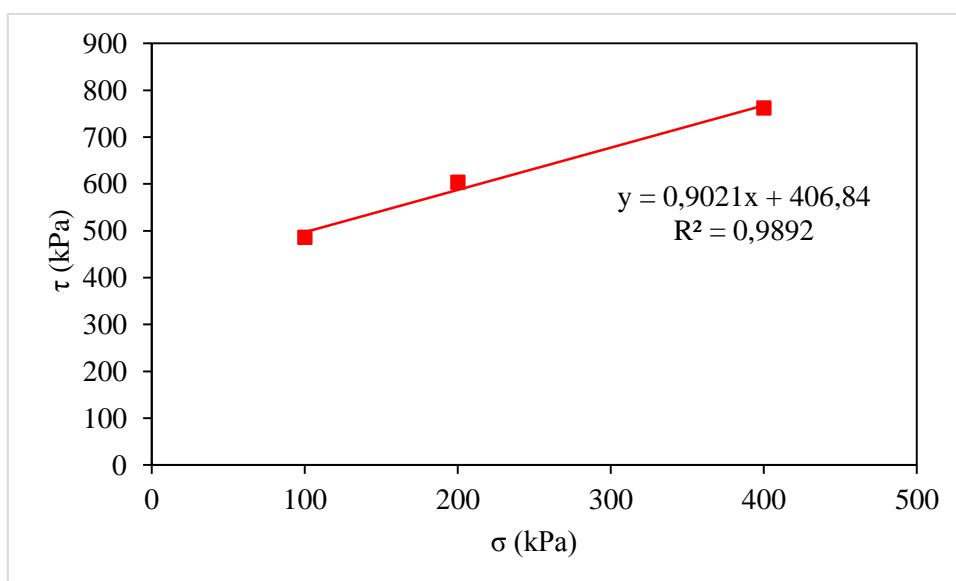


Figure III-59: Courbe d'essai cisaillement 6 % Ciment Matine.

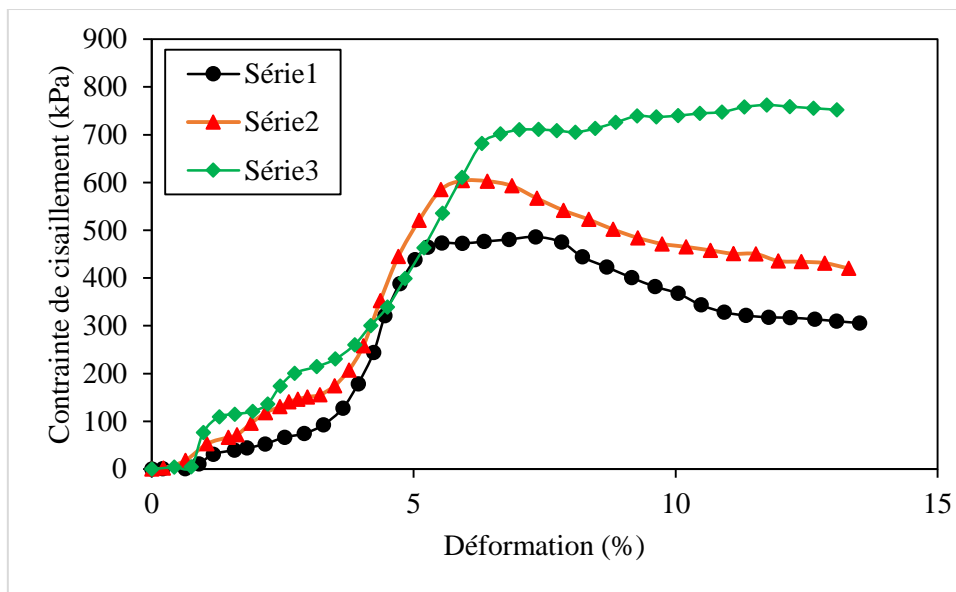


Figure III-60: Courbe d'essai cisaillement 8 % Ciment Matine.

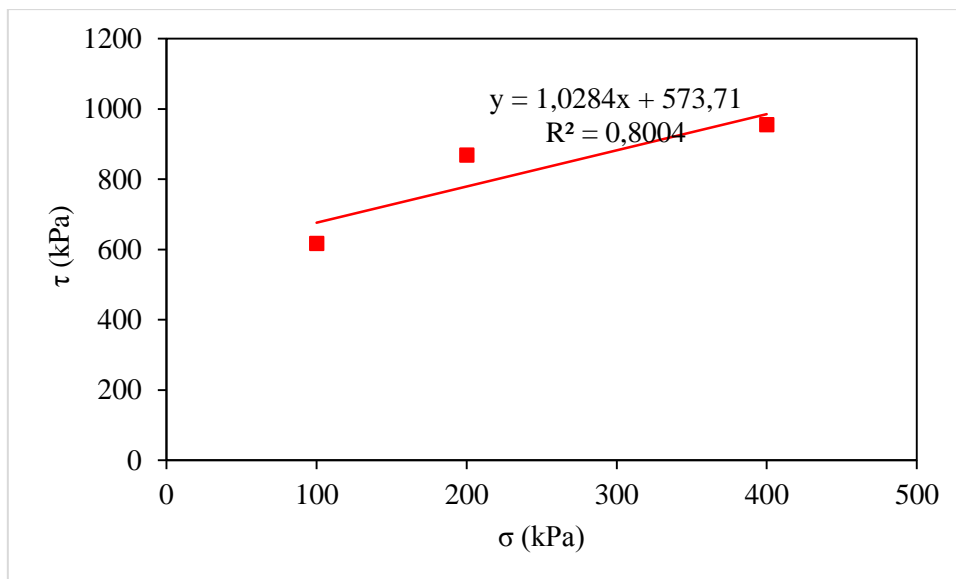


Figure III-61: Courbe d'essai cisaillement 8 % Ciment Matine.

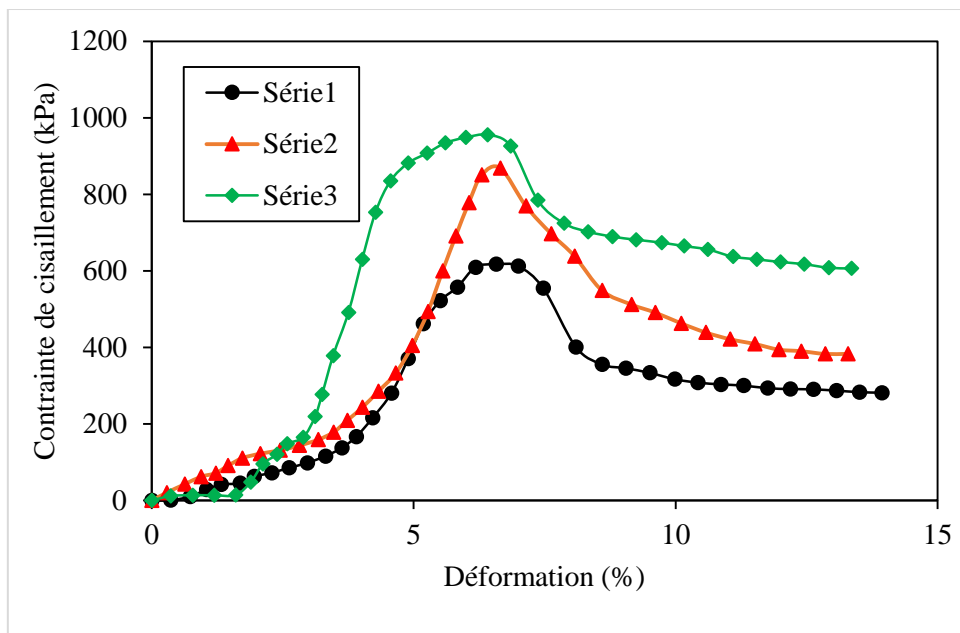


Figure III-62: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Matine.

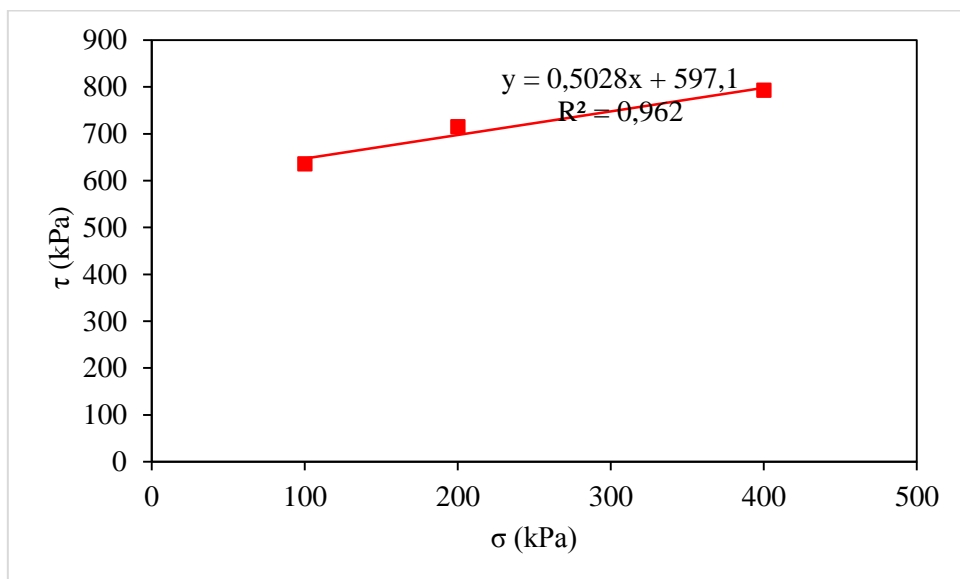


Figure III-63: Courbe d'essai cisaillement 10 % Ciment Matine.

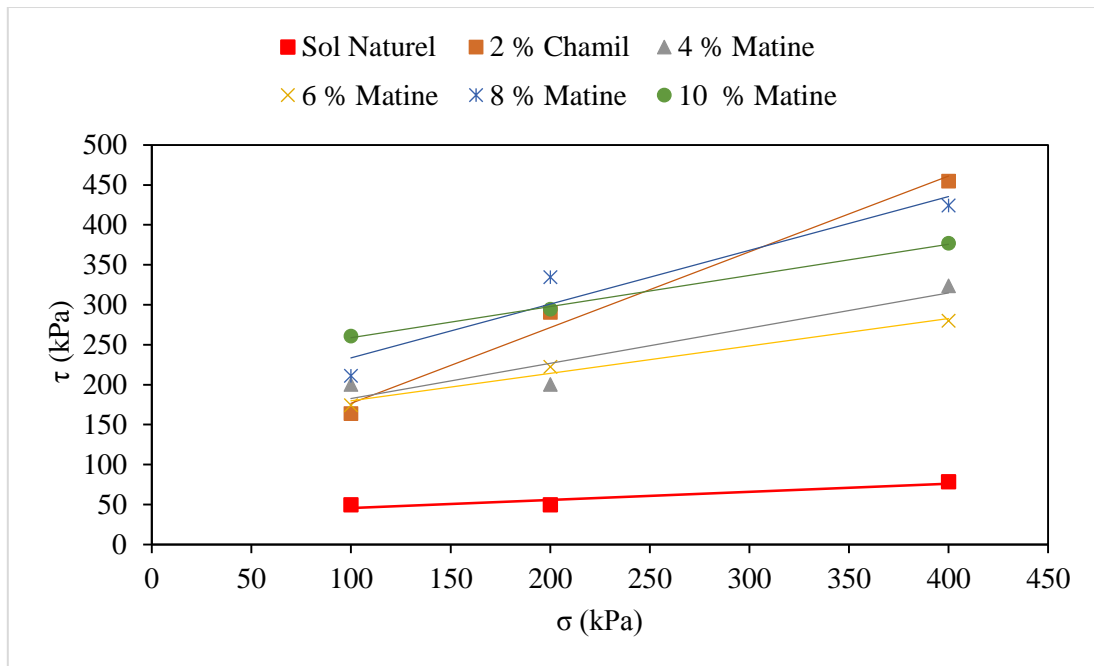


Figure III-64: la courbe de résistance au cisaillement en fonction de la contrainte verticale pour sol traité par différent teneur en ciment Chamil 0 jours.

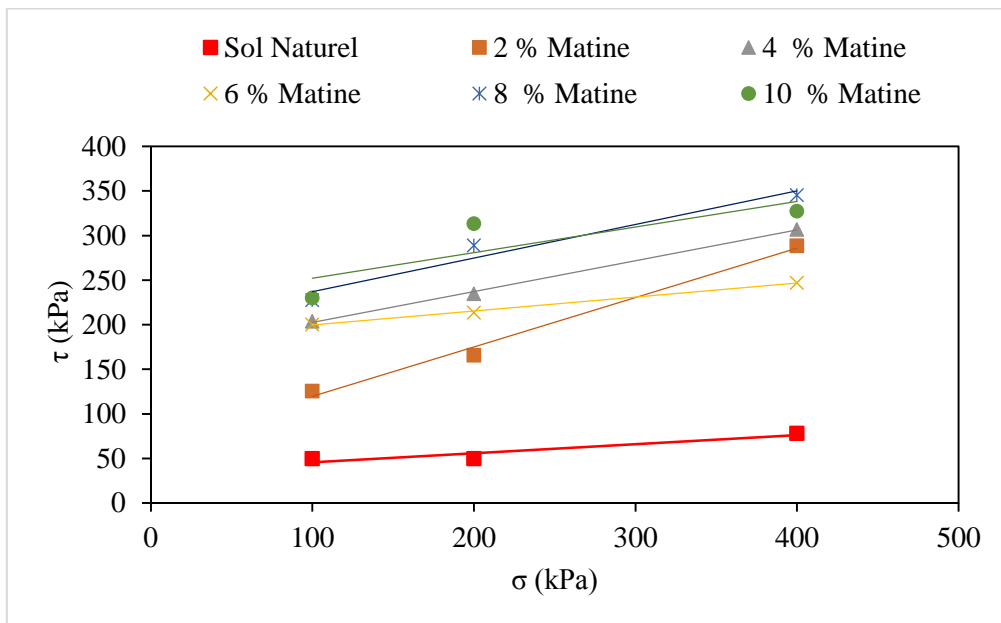


Figure III-65: la courbe de résistance au cisaillement en fonction de la contrainte verticale pour sol traité par différent teneur en ciment Matine 0 jours.

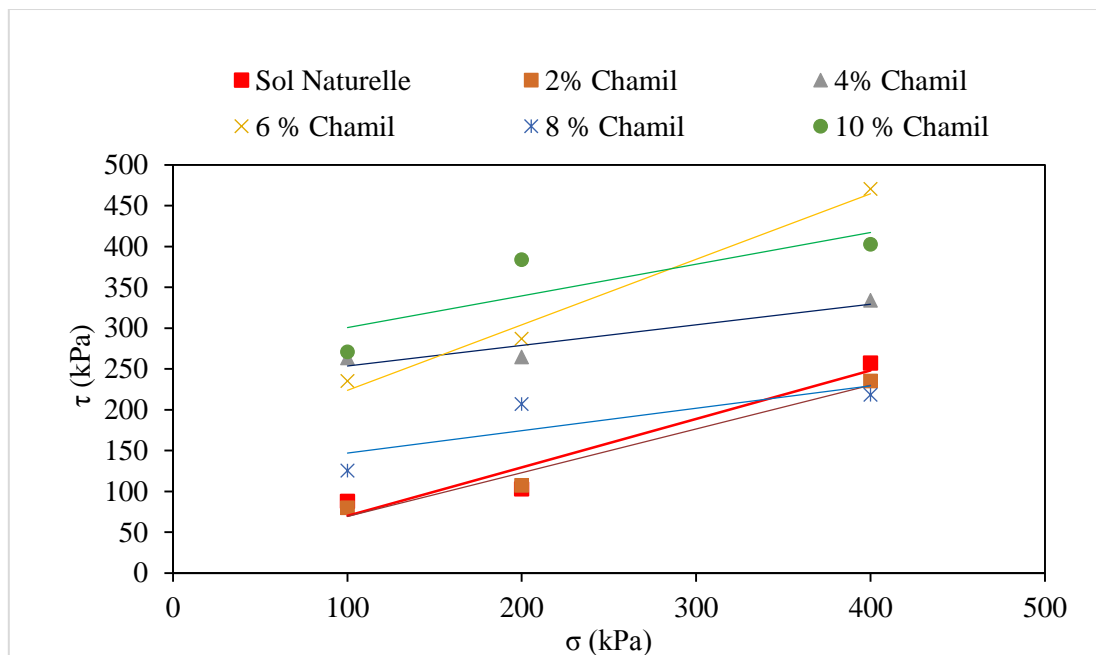


Figure III-65: la courbe de résistance au cisaillement en fonction de la contrainte verticale pour sol traité par différent teneur en ciment Chamil 7 jours.

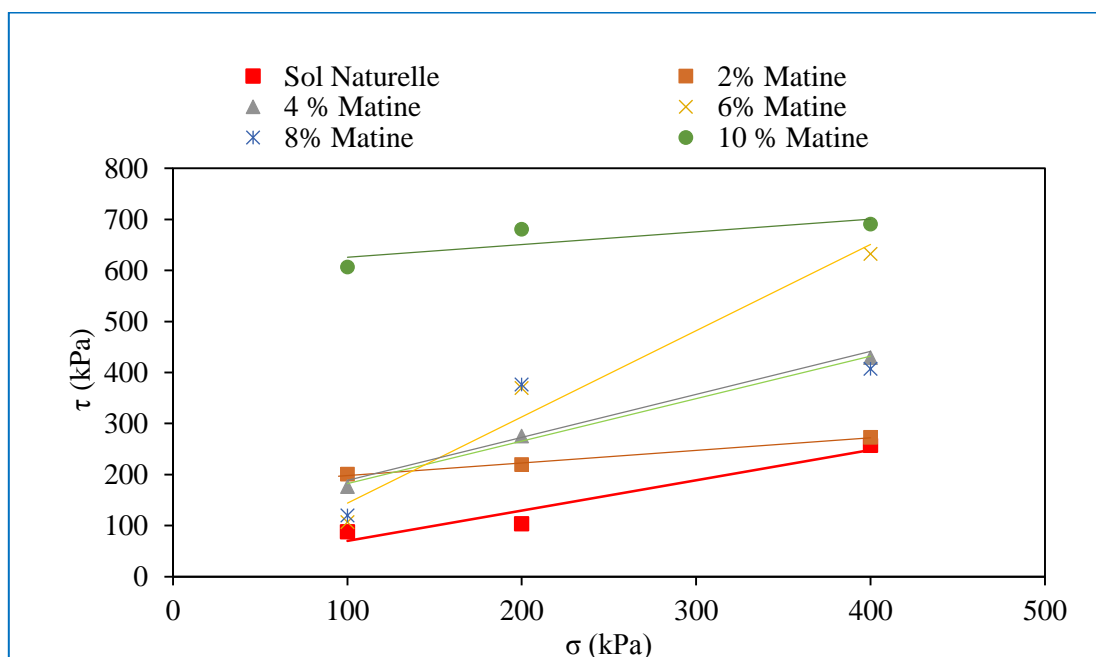


Figure III-66: la courbe de résistance au cisaillement en fonction de la contrainte verticale pour sol traité par différent teneur en ciment Matine 7 jours.

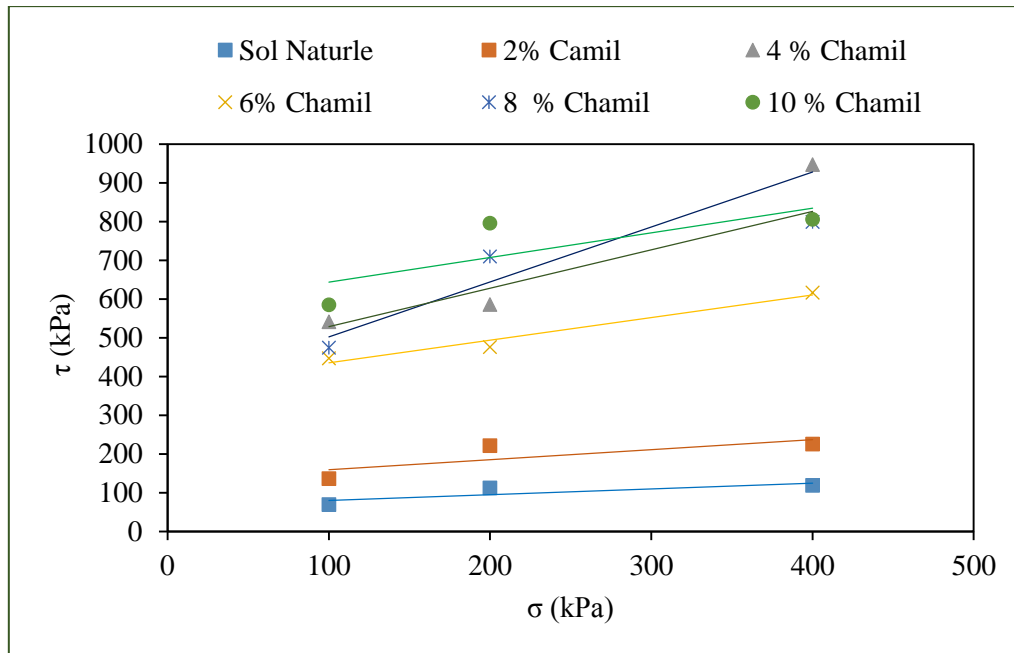


Figure III-67: la courbe de résistance au cisaillement en fonction de la contrainte verticale pour sol traité par différent teneur en ciment Chamil 14 jours.

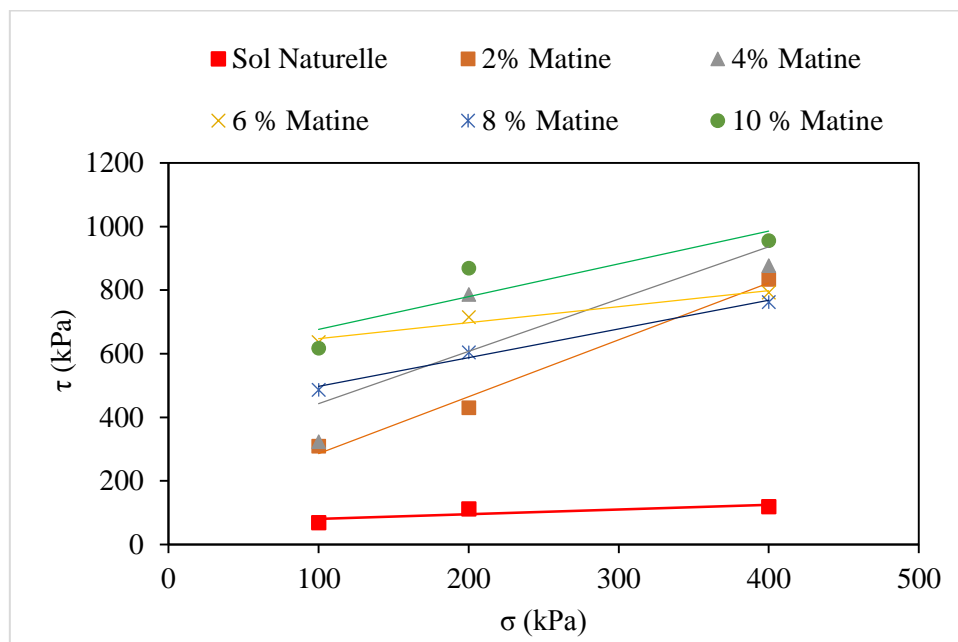


Figure III-68: la courbe de résistance au cisaillement en fonction de la contrainte verticale pour sol traité par différent teneur en ciment Matine 14 jours.

Tableau III-28: les Paramètre de Cissaillement.

<b>Cissaillement à 0 jour</b>				
<b>Ciment %</b>	<b>Chamil 32,5</b>		<b>Matine 42,5</b>	
<b>Parameter</b>	<b>C( kpa )</b>	<b><math>\varphi</math> ( deg )</b>	<b>C( kpa )</b>	<b><math>\varphi</math> ( deg )</b>
<b>0%</b>	35,60	5,80	35,60	5,80
<b>2%</b>	80,73	43,47	64,39	28,96
<b>4%</b>	138,39	23,83	168,01	19,065
<b>6%</b>	145,51	18,94	183,86	8,92
<b>8%</b>	166,01	33,96	199,49	20,65
<b>10%</b>	219,71	21,30	223,22	16,056
<b>Cissaillement à 7 jour</b>				
<b>0%</b>	10,79	30,68	10,79	30,68
<b>2%</b>	15,85	28,18	106,04	28,09
<b>4%</b>	119,58	15,34	98,74	39,81
<b>6%</b>	143,49	38,76	106,79	52,71
<b>8%</b>	288,64	14,13	104,58	40,07
<b>10%</b>	261,60	21,26	601,20	13,93
<b>Cissaillement à 14 jour</b>				
<b>0%</b>	65,28	8,44	65,28	8,44
<b>2%</b>	133,66	14,48	106,96	60,78
<b>4%</b>	359,93	54,82	277,88	58,73
<b>6%</b>	396,76	30,23	406,48	44,69
<b>8%</b>	429,62	44,73	573,71	45,80
<b>10%</b>	580,36	32,43	597,10	26,69

### III.2.2.2.1 : Interprétation des résultats :

D'après les résultats de résistance au cisaillement pour sol naturelle et le sol traité par différent teneur en ciment et de deux déférentes classes de ciment, on observe une différence qu'en traitement en ciment (Chamil au Matine), la cohésion augment avec le temps et avec la classe de ciment.

### III .2 .2.3. Essai de compression simple :

- Les Courbe de compression simple après 7, 14 jours et 28 jours sol naturel et avec deux classes de Ciment Chamil et Matine.

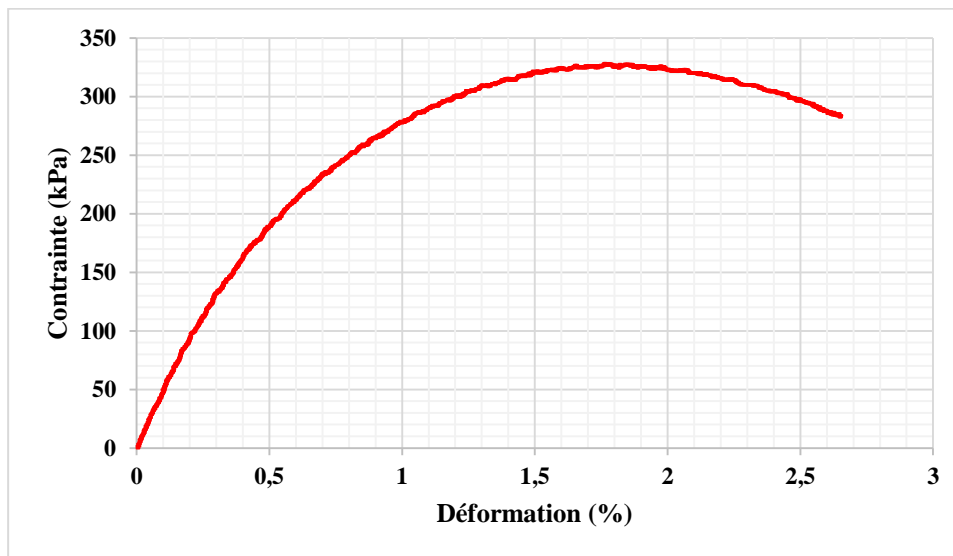


Figure III-69: courbe de compression simple de sol naturel Essai 01.

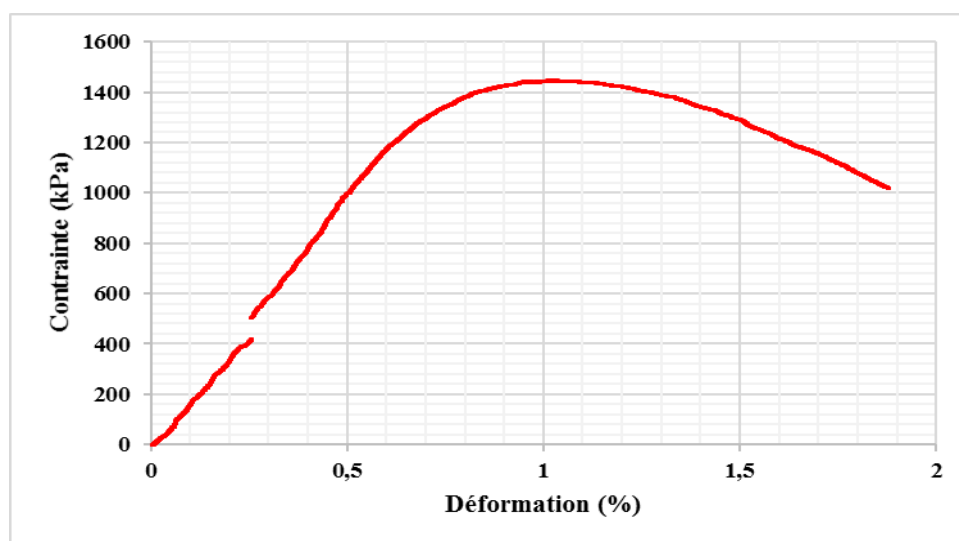


Figure III-70: courbe de compression simple de sol traité par cimente Chamil 2 % Essai 01

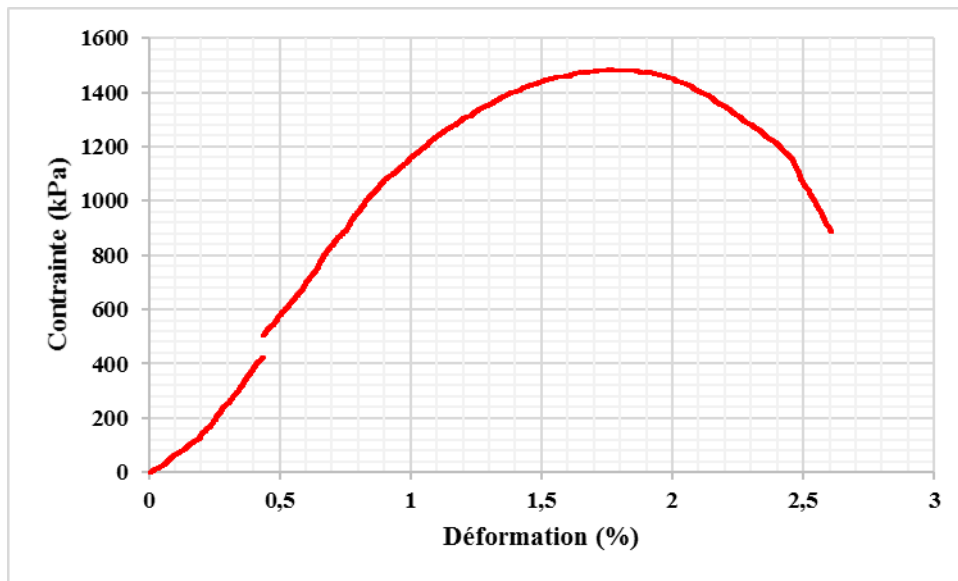


Figure III-71: courbe de compression simple de sol traité par cimente Chamil 4 %

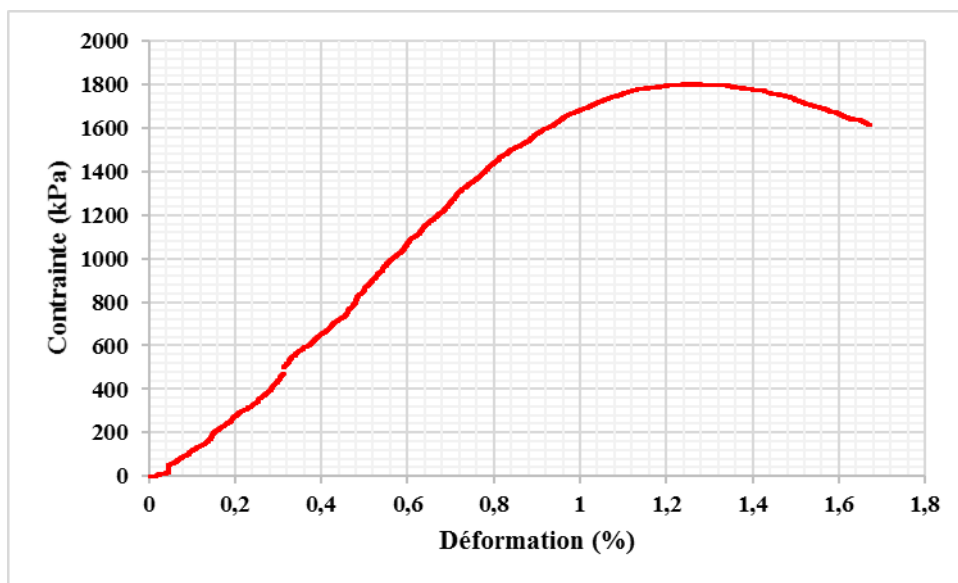


Figure III-72: courbe de compression simple de sol traité par cimente Chamil 6 %

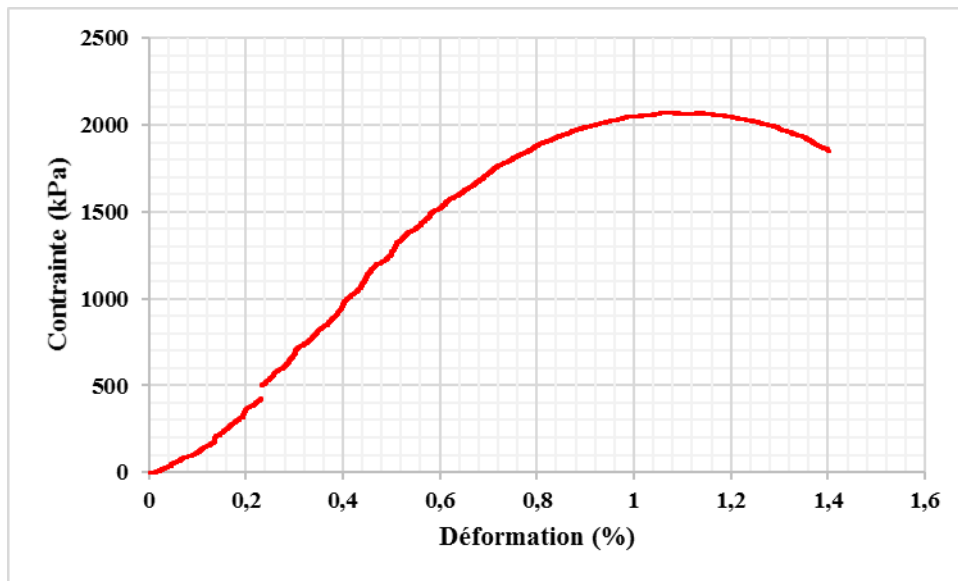


Figure III-73: courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 8 %

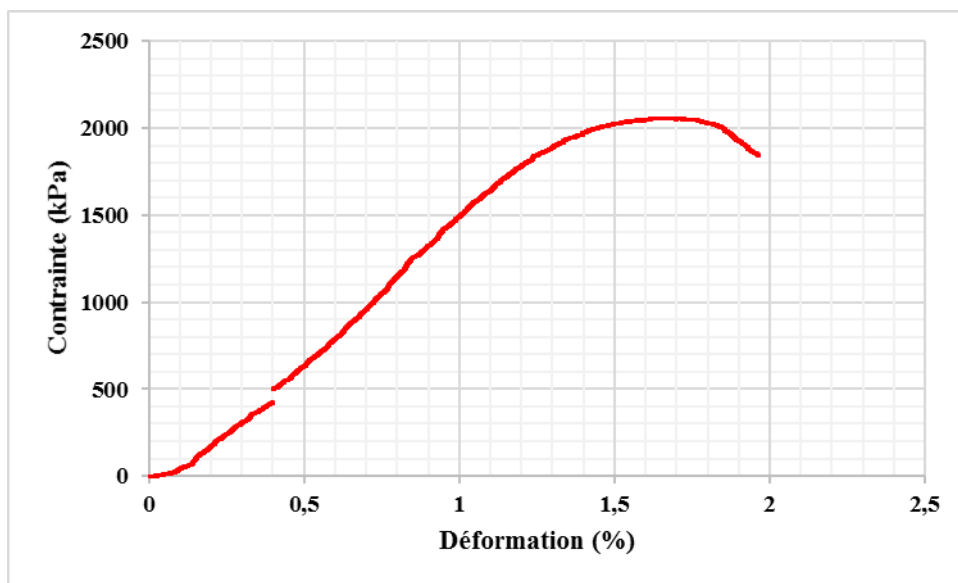


Figure III-74: courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 10 %

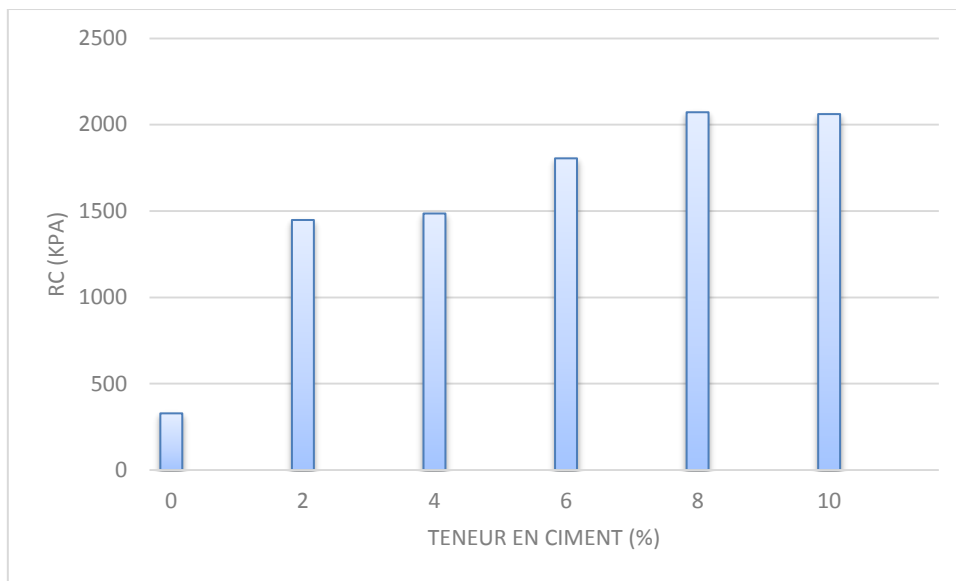


Figure III-75: Histogramme de compression simple en fonction des différents teneurs en ciment Chamil.

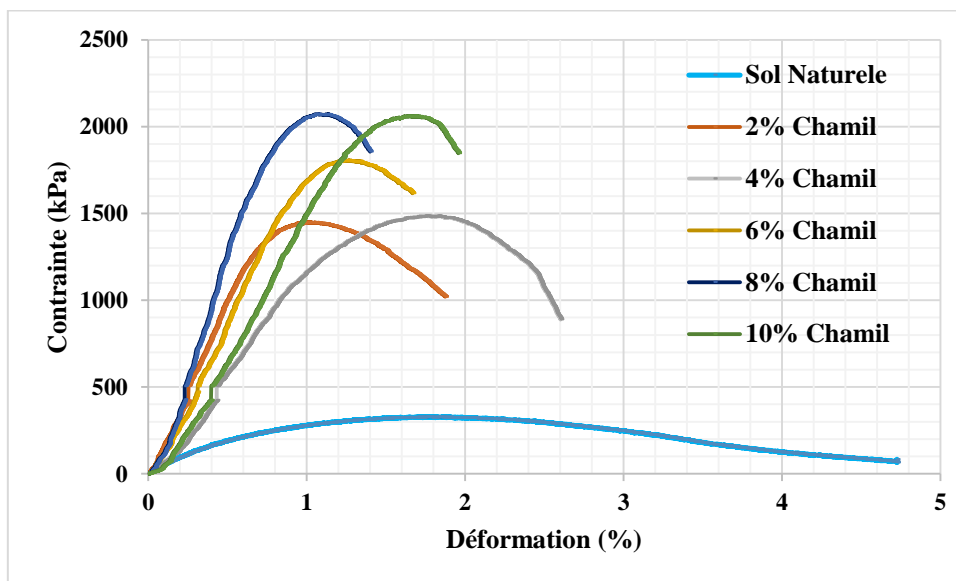


Figure III-76 : la contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment 7 jours Chamil.

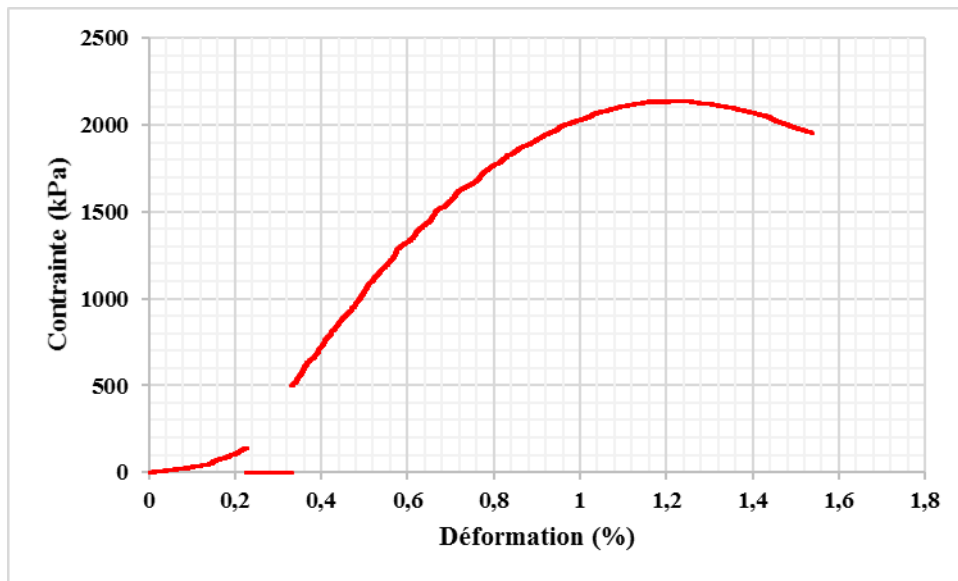


Figure III-77: courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 2 %

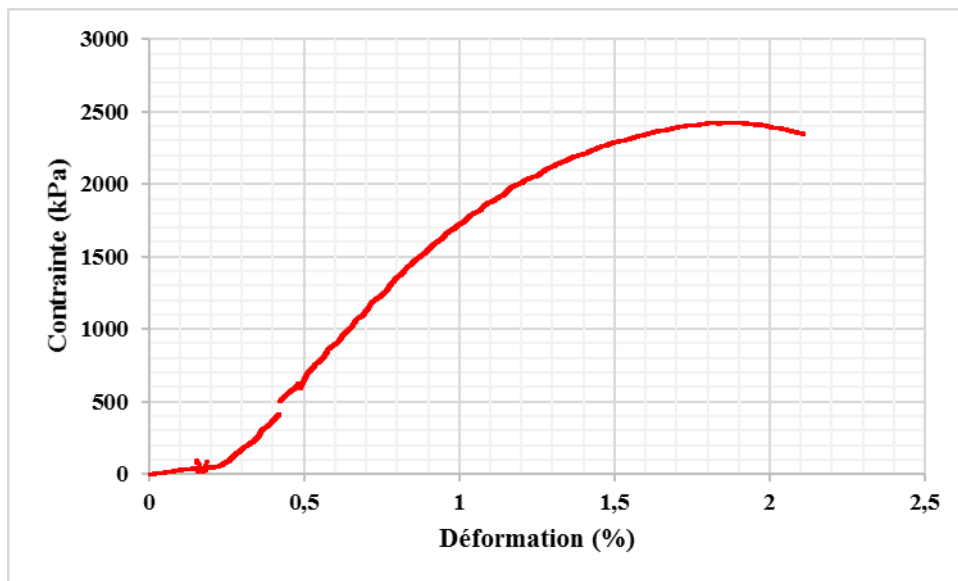


Figure III-78: courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 4 %

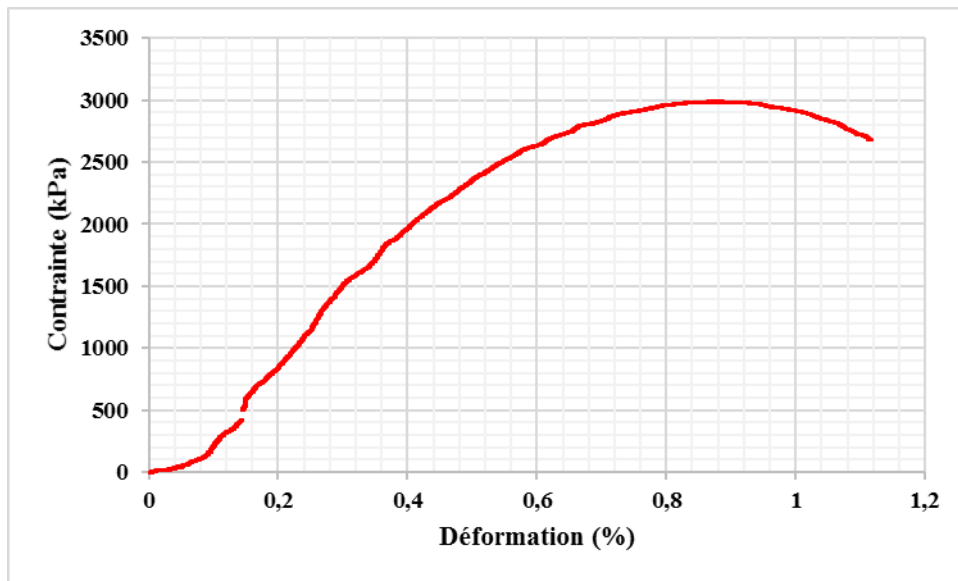


Figure III-79: courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 6 %

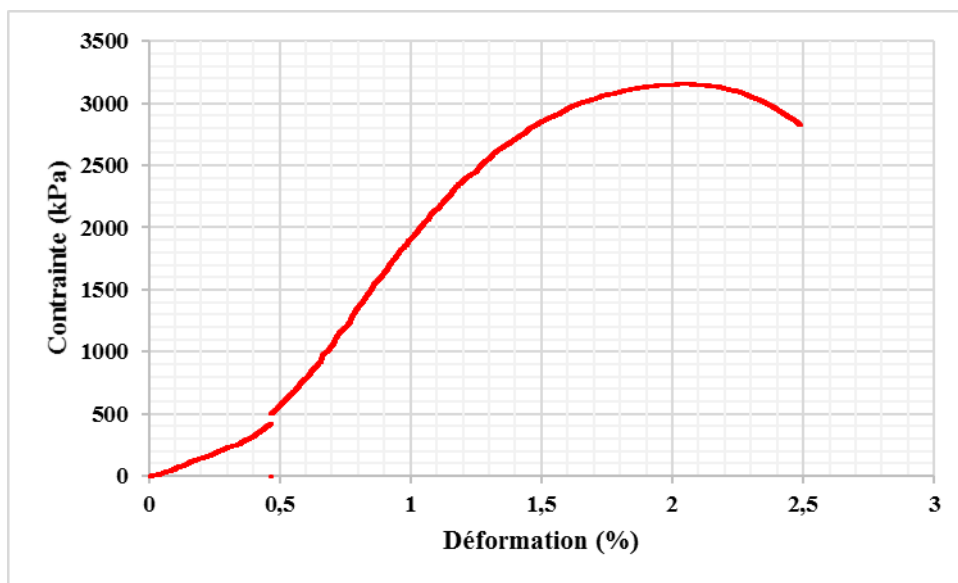


Figure III-80: courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 8 %

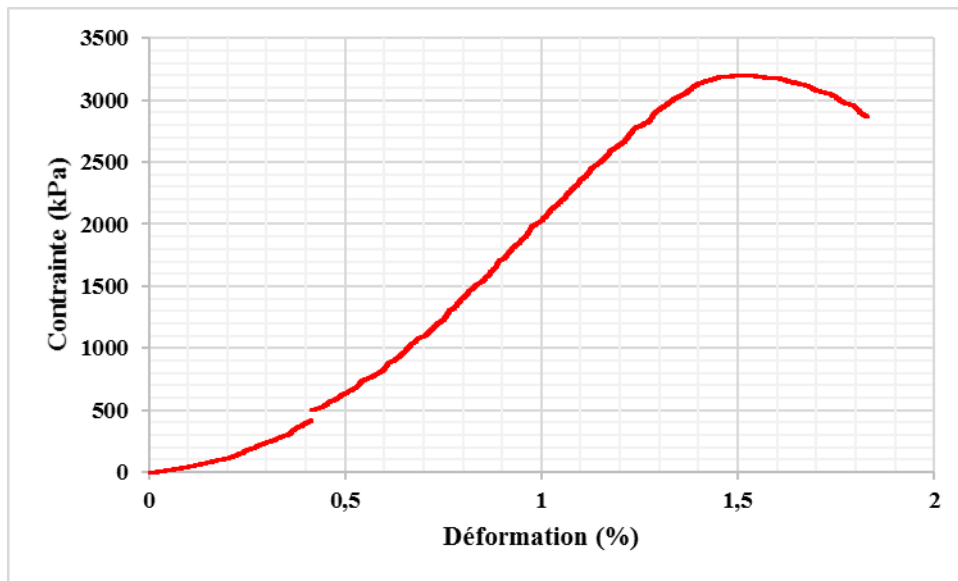


Figure III-81: courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 10 %

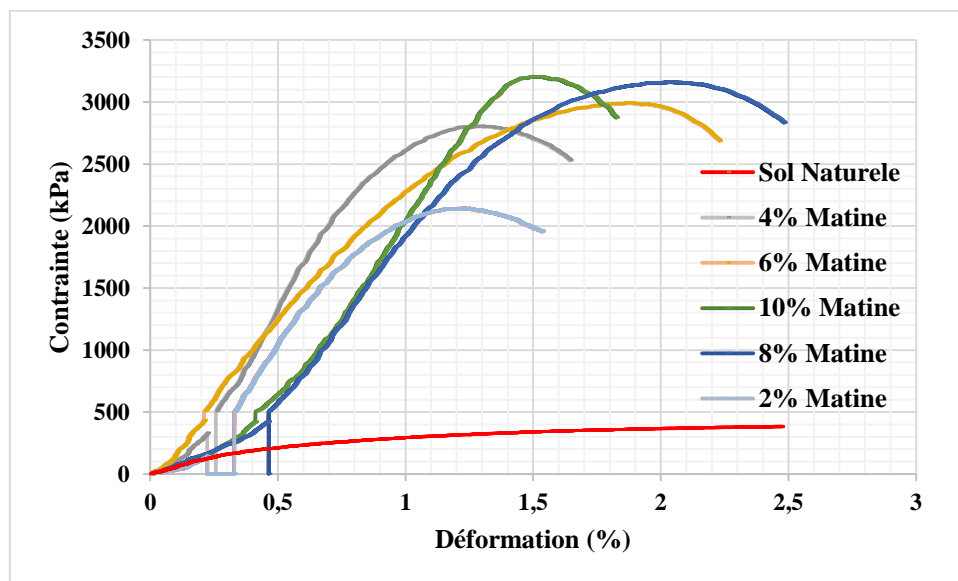


Figure III-82: la contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment 7 jours Matine.

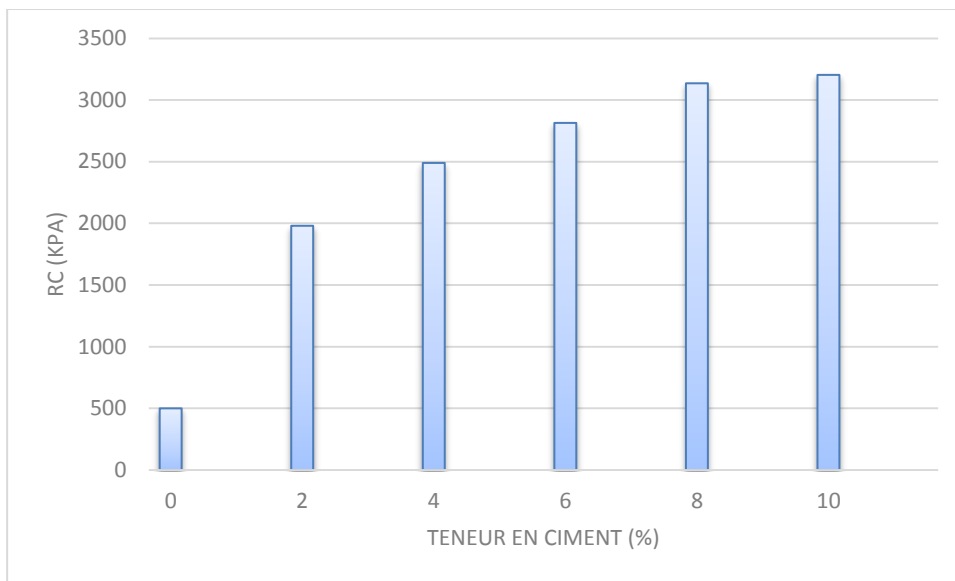


Figure III-83: Histogramme de compression simple en fonction des différents teneurs en ciment Matine 7 jours.

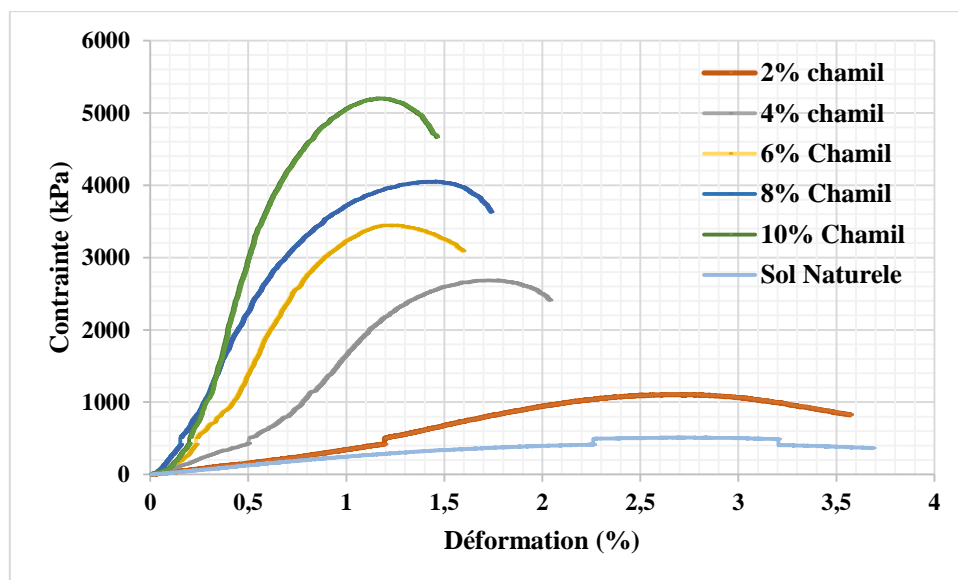


Figure III-84: la contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment 14 jours Chamil.

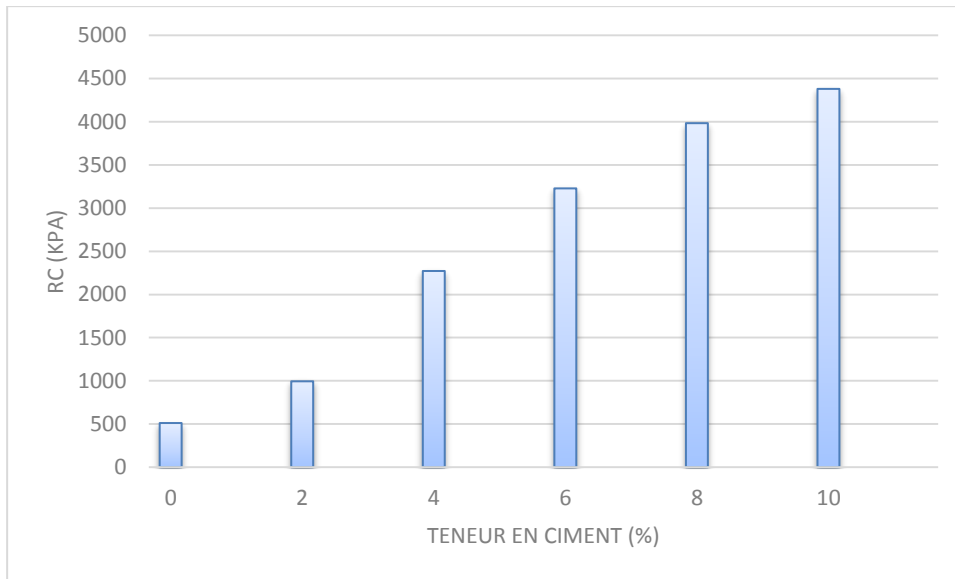


Figure III-85: Histogramme de compression simple en fonction des différents teneurs en ciment Chamil 14 jours.

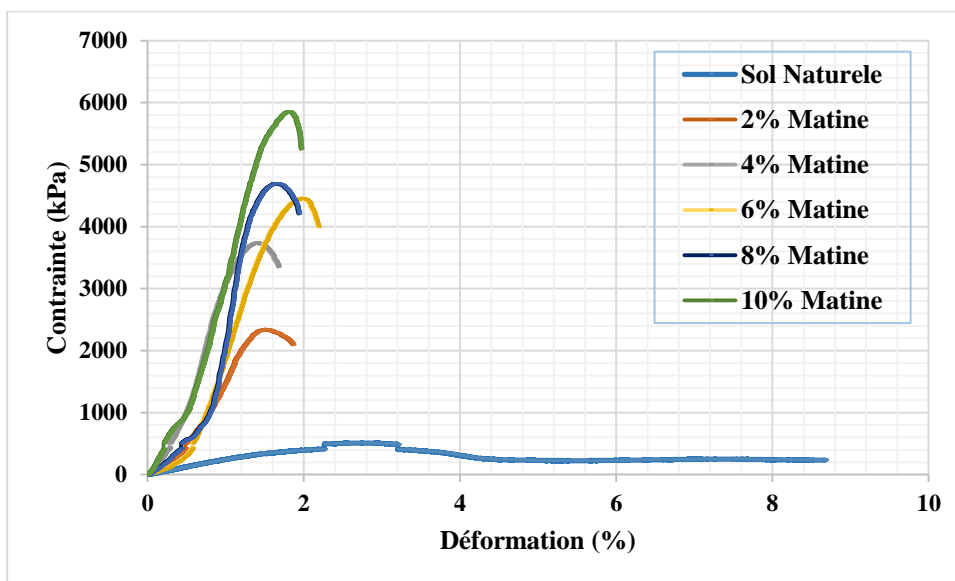


Figure III-86: la contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment 14 jours Matine 14 jours.

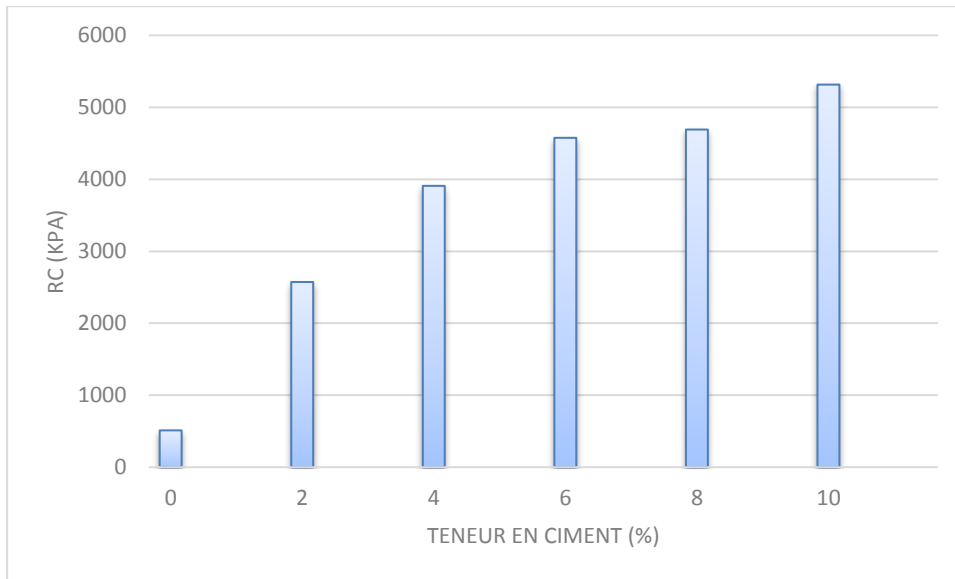


Figure III-87: Histogramme de compression simple en fonction des différents teneurs en ciment Matine 14 jours.

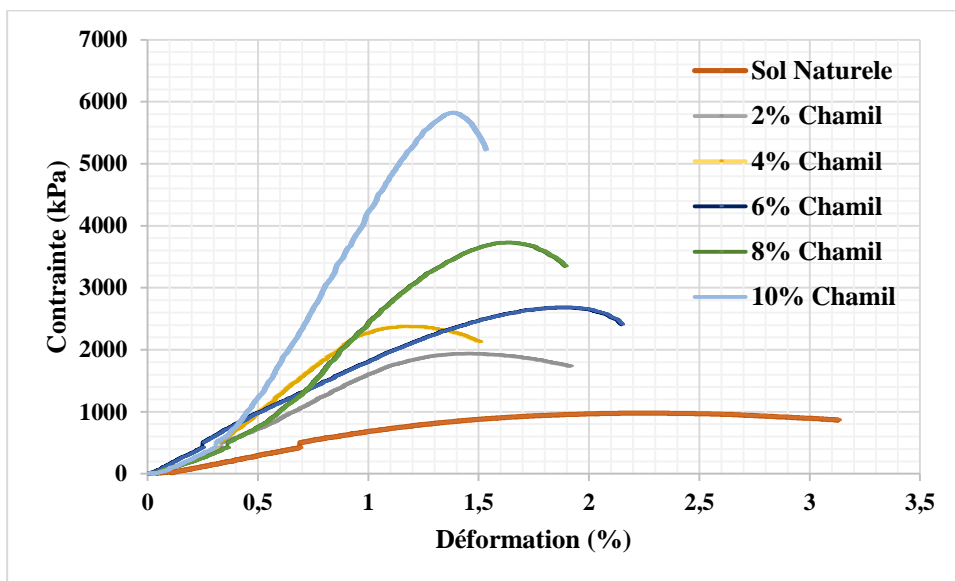


Figure III-88: la contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment Chamil à 28j.

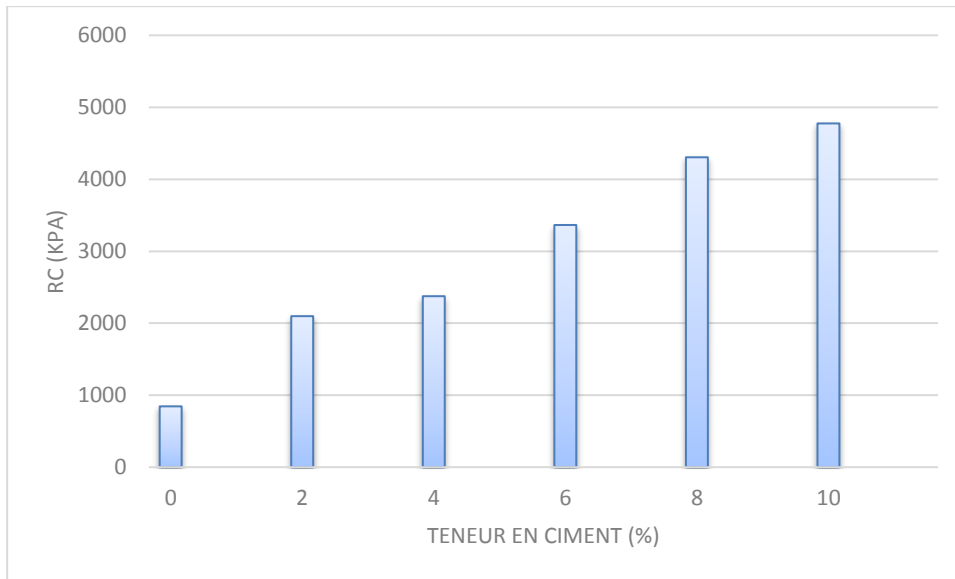


Figure III-89: Histogramme de compression simple en fonction des différents teneurs en ciment Chamil 28 jours.

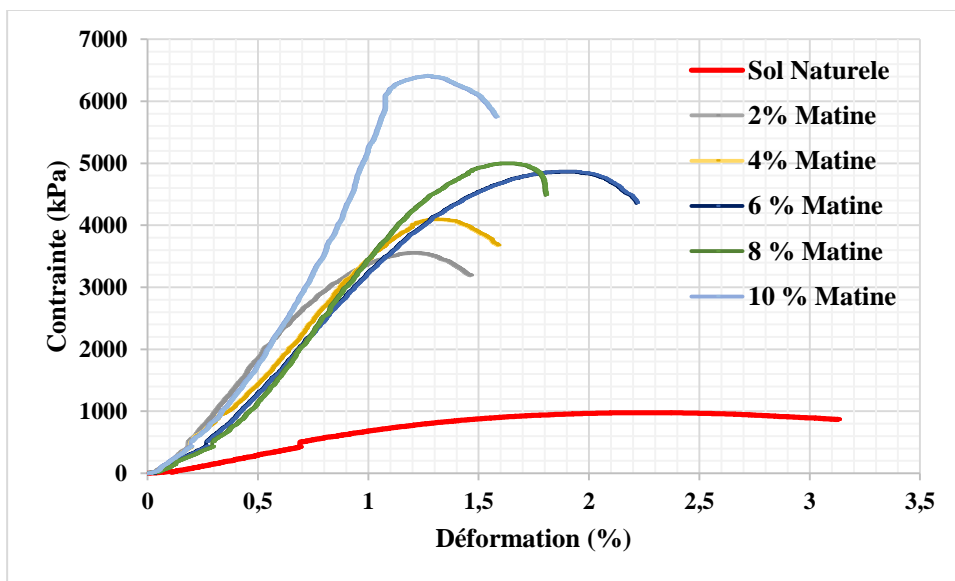


Figure III-90: la contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment Matine à 28j.

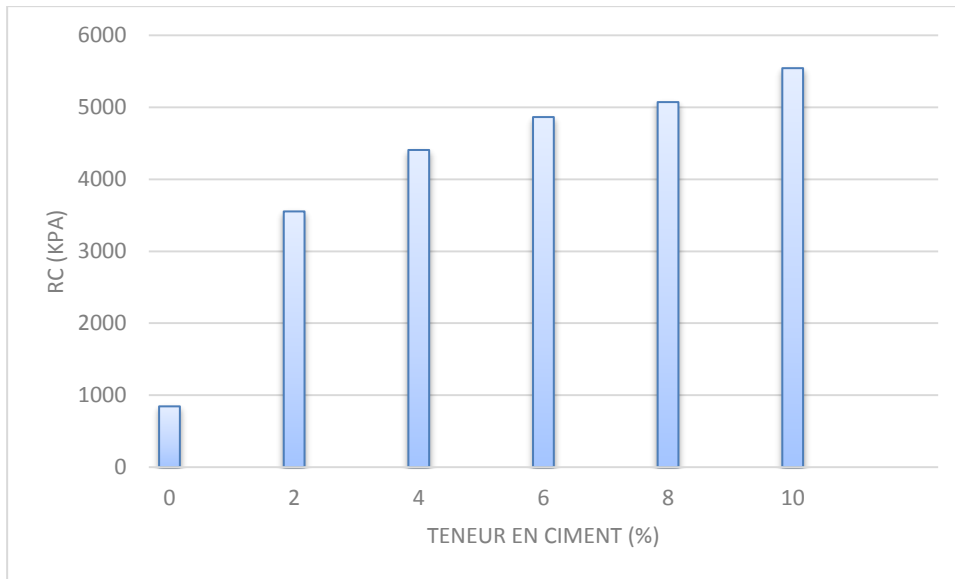


Figure III-91: Histogramme de compression simple en fonction des différents teneurs en ciment Matine 28 jours.

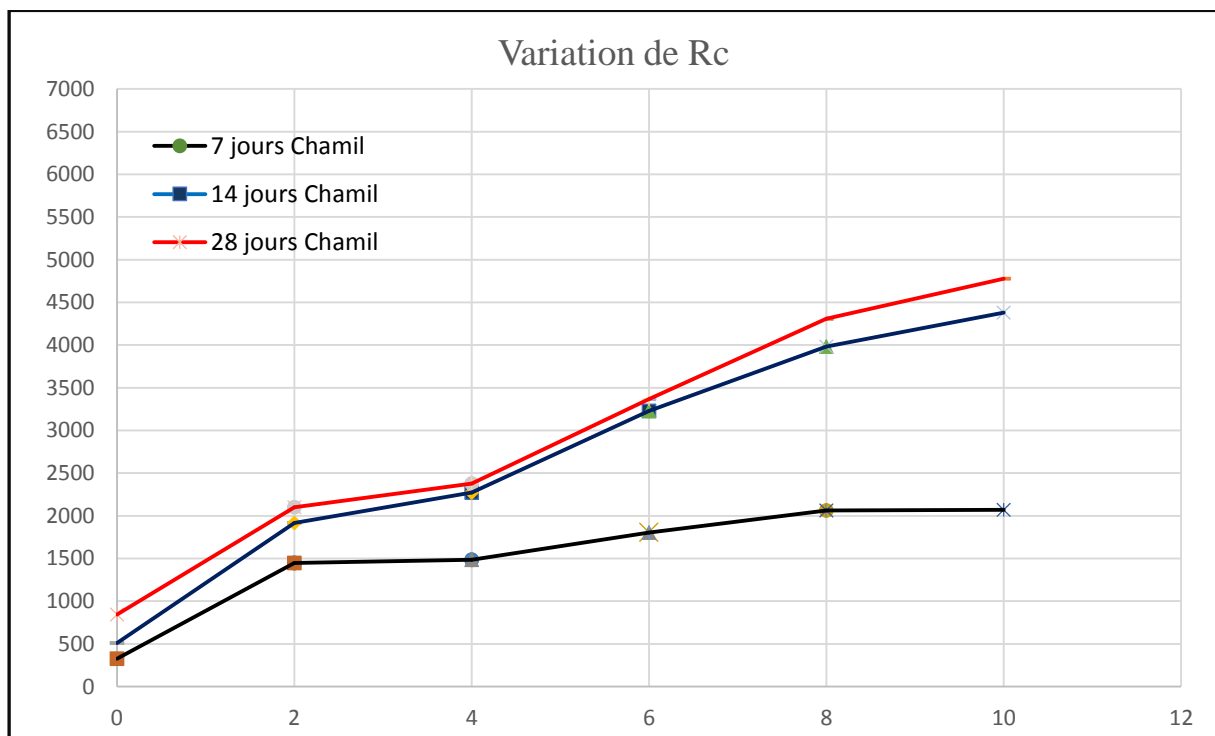


Figure III-92: Variation contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment Chamil.

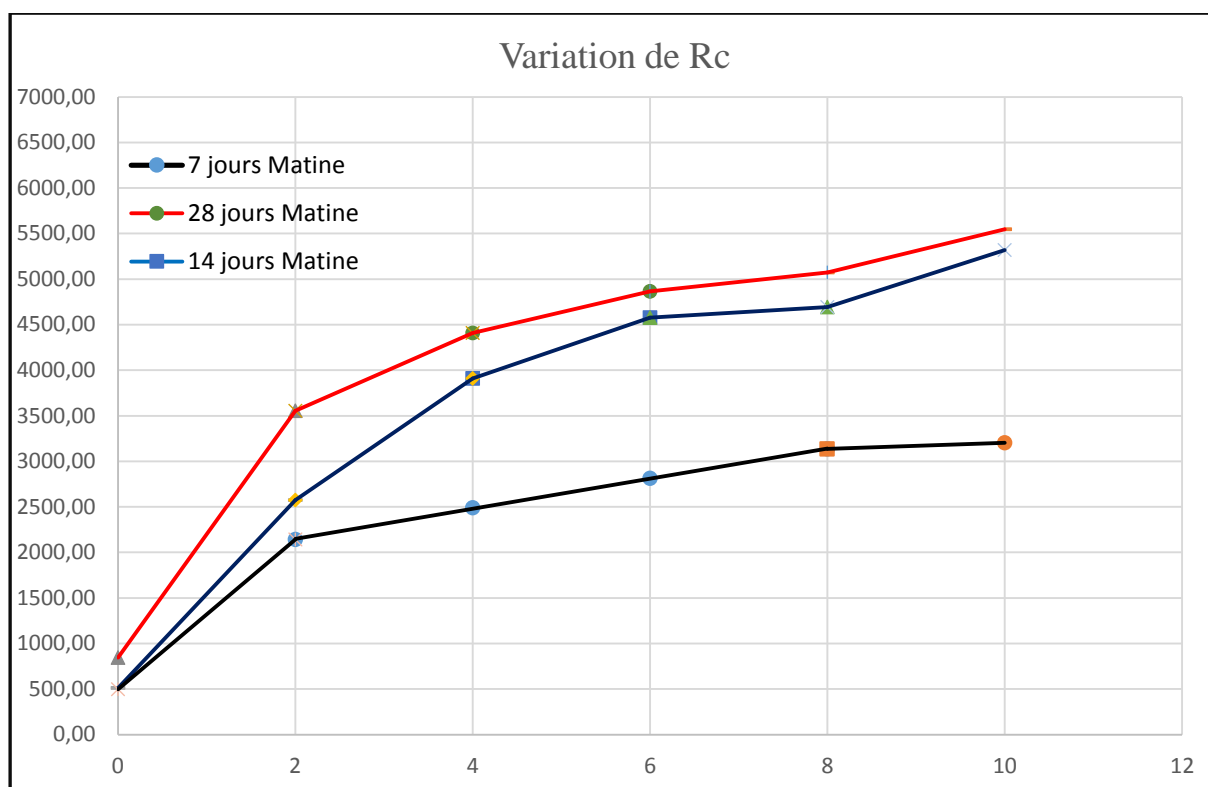


Figure III-93: Variation contrainte de compression en fonction du temps pour différent teneur en ciment Matine.

Tableau III-29: Récapitulatif des résultats de compression simple en fonction des teneurs de ciment (Chamil et Matine).

Les jours	CIMENT %	Moy de Résistance Chamil (Kpa)	Moy de Résistance Matine (kpa)
	<b>7 jours</b>	0%	496,34
	2%	1448,10	1980,39
	4%	1485,70	2490,07
	6%	1805,18	2814,48
	8%	2061,49	3135,67
	10%	2072,17	3203,70
<b>14 jours</b>	0%	511,25	511,25
	2%	1918,02	2573,82
	4%	2272,30	3910,05
	6%	1805,18	2814,48
	8%	3984,35	4692,74
	10%	4381,53	5317,08
<b>28 jours</b>	0%	845,26	845,26
	2%	2098,87	3554,66
	4%	2376,32	4408,68
	6%	3365,92	4866,26
	8%	4307,16	5074,21
	10%	4777,78	5545,96

**III.2.3.1. Interprétation des résultats :**

La variation de la résistance à la compression uniaxiale pour le sol à différents pourcentages de ciment pour 7, 14 et 28 jours et différents classa de ciment, a une augmentation de la résistance à la compression pour les deux types de ciment (Chamil et Matine) avec avantage de ciment Matine, On observe également que la valeur de la résistance à la compression augmente avec l'augmentation des jours pour les sols traités au ciment. Ainsi, il peut être accompli que le ciment traité à 8 % en présente de meilleures performances que les autres combinaisons et la résistance peut être maximisée en trempant les échantillons. La raison de cette amélioration est due aux réactions pouzzolaniques du ciment avec le sol.

# CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, Il est déraisonnable de dire que nous maîtrisons parfaitement tous les aspects du comportement de ce sol prélevé sur le site de Chaaba El Hamra (wilaya de M'sila).

La synthèse bibliographique effectuée à partir de nombreuses références nationales et internationales a permis de souligner quelques affirmations concluantes dont les plus importantes sont les suivantes :

Les techniques de traitement des sols au (ciment, chaux ...) est un procédé pratiqué par les entreprises en technique routière. Il présente comme avantages majeurs d'améliorer les propriétés géotechniques et mécaniques des sols de permettre la réutilisation de sols en place plutôt que leur évacuation en décharge.

L'étude expérimentale vise à déterminer les paramètres physiques et mécaniques d'une argile-marneuse, prélevée sur le site de Chaaba El Hamra (wilaya de M'sila), traitée par deux classes de ciment (classes 32.5 et classes 42.5), puis à analyser l'influence du traitement sur ses propriétés mécaniques.

Les résultats obtenus ont permis de dégager les conclusions suivantes :

- Les passants de 80  $\mu\text{m}$  entre 73,06 % et 78,17% avec une moyenne de 76,02%.
- L'indice de plasticité entre 19,76 et 18,29 avec une moyenne de 19,03%.
- La moyenne des valeurs de bleu de méthylène (VBS) est 3,53, il s'agit d'un sol limoneux- argileux de surface spécifique totale 74.235 ( $\text{m}^2/\text{g}$ ).
- Selon GTR Les échantillons prélevés sur le site de Chaaba El Hamra ont été identifiés comme un limon-argileux peu plastique.
- La limite de liquidité diminue avec l'augmentation des teneurs en ciment, par contre la limite de plasticité augmente avec l'augmentation des teneurs en ciment pour les deux classes de ciment (Chamil, Matine).

## Conclusion générale

---

- La valeur de bleu de méthylène diminue avec l'augmentation des teneurs en ciment, dans les deux classes de ciment (Chamil, Mâtine).
- Pour le traitement avec le ciment Chamil on remarque l'augmentation de la densité sèche ( $\gamma_{d-max}$ ) et la teneur en eau optimale ( $w_{opt}$ ), par contre pour le ciment Matine la densité sèche est diminué et la teneur en eau optimale Augment.
- Pour la résistance au cisaillement, la cohésion augment avec le temps et avec la classe de ciment.
- La résistance à la compression uniaxiale de l'argile augmente proportionnellement avec l'augmentation du temps de séchage et avec le pourcentage en ciment pour les deux types de ciment (Chamil et Matine) avec avantage de ciment Matine.

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**AFNOR** (1996) Norme Française : NF P 94-041 : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique, méthode de tamisage par voie humide.

**AFNOR** (1992) Norme Française : NF P 94-057 : Sols : Reconnaissance et Essais – Analyse granulométrique des sols par sédimentométrie.

**AFNOR** (1991) Norme Française : NF P 94-050 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des sols – Méthode par étuvage.

**AFNOR** (1991) Norme Française : NF P 94-053 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la masse volumique des sols fins en laboratoire – Méthode du moule.

**AFNOR** (1993) Norme Française : NF P 94-051 : Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau.

**AFNOR** (1993) Norme Française : NF P 94-068 Sols : Reconnaissance et Essais – Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche.

**AFNOR** (1999) Norme Française : NF P 94-093 Sols : Détermination des références de compactage d'un matériau Essai Proctor normal — Essai Proctor modifié.

**AFNOR** (1994) Norme Française : NF P 94-071-1 Sols : Reconnaissance et Essais – Essai de cisaillement rectiligne à la boîte – partie 1 cisaillement direct.

**AFNOR** (1997) Norme Française : NF P 94-077 Sols : Reconnaissance et Essais – Essais de compression simple.

**A. MOUCHTACHI, R. EL GUERJOURA, J.C. BABOUX ET Y. JAYET** (Modélisation de la propagation ultrasonore en milieu dispersif ; mesure de vitesse et application à la caractérisation des graphites)

**BULTEL. F(2001)** :Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels. Thèse docteur ENPC, 298 p.

## Références bibliographiques

---

**GRYTAN SARKAR, MD. RAFIQU L ISLAM, MUHAMMED ALAMGIR, MD ROKONUZZAMAN** (2012) Study on the Geotechnical Properties of Cement based Composite Fine-grained Soil; Department of Civil Engineering, Khulna University of Engineering & Technology, Khulna-9203, Bangladesh .

**Grim R.E.** (1962) Clay mineralogy in relation to the Engineering properties of clay materials. Mc Craw Hill, pp.204-277.

**Harichane K., Ghrici G., Kenai S., Grine K.** Use of Natural Pozzolana and Lime for Stabilization of Cohesive Soils. *Geot. Geol. Eng., Springer* 2011 ; 29:759-769.

**Harry Saroglou :** (2009) Compressive Strength of Soil Improved with Cement : Conference Paper ; National Technical University of Athens.

**Journal of Civil & Environmental Engineering** ( 2020 ) Cement Soil Stabilization as an Improvement Technique for Rail Track Subgrade, and Highway Subbase and Base Courses.

**Jean-Pierre MAGNAN et Georges PILOT (1987). Mécanique des Sols 1 :** Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

**Khemissa M., Mahamedi A., Mekki L.** Mécanique des sols problématiques (enjeu national pour un développement durable). Communication au colloque Algéro-Canadien sur l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, Université de Tlemcen, 24-26 février 2014.

**Khemissa M., Mekki L., Bakir N.** Comportement oedométrique des argiles expansives de M'sila (Algérie). In: Magnan JP, Cojean R., Cui Y.J., editors. *SEC 2008: Symposium international sécheresse et constructions*. Presses du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées France; 2008, p. 229-234.

**Khabbaz H., Fatahi B.** Chemical stabilization of closed land fill sites using chemical agents. In: Anagnostopoulos A et al, editors. *Proc. 15th Eur. Conf. Soil Mech. Geot. Eng.* IOS Press; 2011, p. 1777-1782.

**LCPC-SETRA.** *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques: Application à la réalisation des remblais et des couches de forme.* Guide technique, France; 2000a.

**Louafi B., Bahar R.** Sand: an additive for stabilization of swelling clay soils. *Int. J. Geosciences* 2012 ; 3:719-725.

**LCPC-SETRA.** (2000) Guide des terrassements routiers: Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Bagneux, France .

## Références bibliographiques

---

**MAHAMED A,** (2014) : Caractérisation et traitement des sols gonflants compactés en vue de leur utilisation en construction routière (application aux argiles expansives de M'sila). Thèse de DOCTORAT Université de Mohamed Boudiaf de M'sila.

**MEKKI Lakhdar (2008)** methodologie d'etude et techniques d'identification des parametres de comportement des sols fins soumis à des cycles de secheresse prolongee (application aux argiles expansives de m'sila).Mémoire de magister, université de M'sila . p 12.

**MEKKI Lakhdar :** (2018) Comportement d'une argile expansive fortement surconsolidée : Thèse de DOCTORAT Université de Mohamed Boudiaf de M'sila , p 27.

**MAHAMEDIA.,KHEMISSA M. (2012).**Cement Stabilisation of Compacted Expansive clay. Communication to the International Science and Technology Conference, ISTEC' 2012,Dubai,UAE,December 13-15, 2012.

**Magnan J.P.** Classification géotechnique des sols : A propos de la classification LPC. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées France* 1980 ; 105 :49-52.

**MELLOUK NAOUAL :** (2014) Approche bibliographique de la stabilisation des limons par la chaux et les liants hydraulique pour les travaux routier ; Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme MASTER en génie civil l'Université de Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie p. 11-26.

**Olivier C.** (2002): Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés» .Présentée en vue de l'obtention du grade de :docteur de l'I.N.P.L.

**Routes 89.** Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de forme. *Documentation technique*, Routes n°89, 2004, p. 7-14.

**Dr. A. Meddah :** (2021) : Cours Amélioration des sols 2<sup>eme</sup> Année MASTER, p. 2-11.

**SUBHASHREE SAMANTASINGHAR** (2014) Géo-Engineering Properties of Lime Treated Plastics Soils : DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ROURKELA ROURKELA-769008, ORISSA, INDIA p. 38-42.

**TOUMIAT .S (2011)** : Etude de la portance d'une argile expansive stabilisée à forte teneur en ciment.

## ANNEXES

Tableau III. 3 : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 03

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
5	11.64	11.64	1.94	98.06
2.5	5.72	17.36	2.89	97.11
1.25	9.99	27.35	4.56	95.44
0.63	13.72	41.07	6.85	93.15
0.315	17.93	59.01	9.83	90.17
0.16	32.57	91.57	15.26	84.74
0.008	55.93	147.50	24.58	75.42

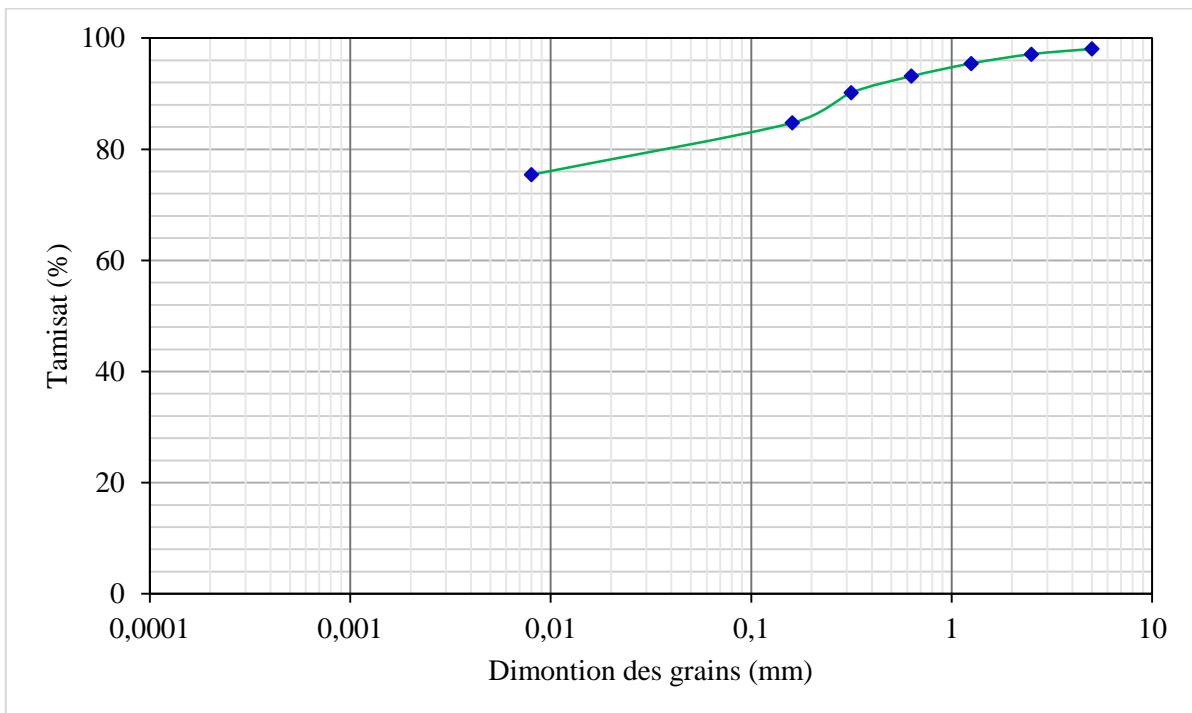
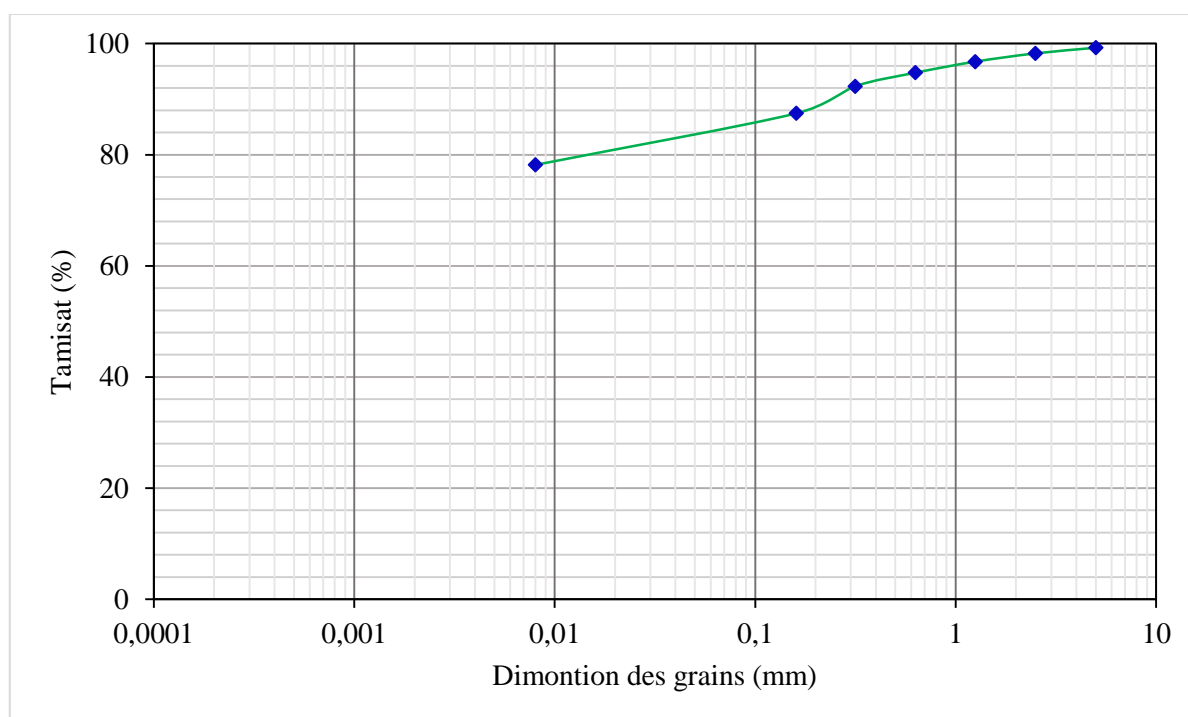


Figure III.3 : Courbe d'analyse granulométrique par tamisage de l'essai 03

## ANNEXES

**Tableau III. 4 : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 04**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
<b>5</b>	4.52	4.52	0.75	99.25
<b>2.5</b>	6.08	10.60	1.76	98.24
<b>1.25</b>	8.92	19.52	3.25	96.75
<b>0.63</b>	11.90	31.42	5.24	94.76
<b>0.315</b>	14.67	46.09	7.68	92.32
<b>0.16</b>	29.30	75.39	12.56	87.44
<b>0.008</b>	55.61	131.00	21.83	78.17

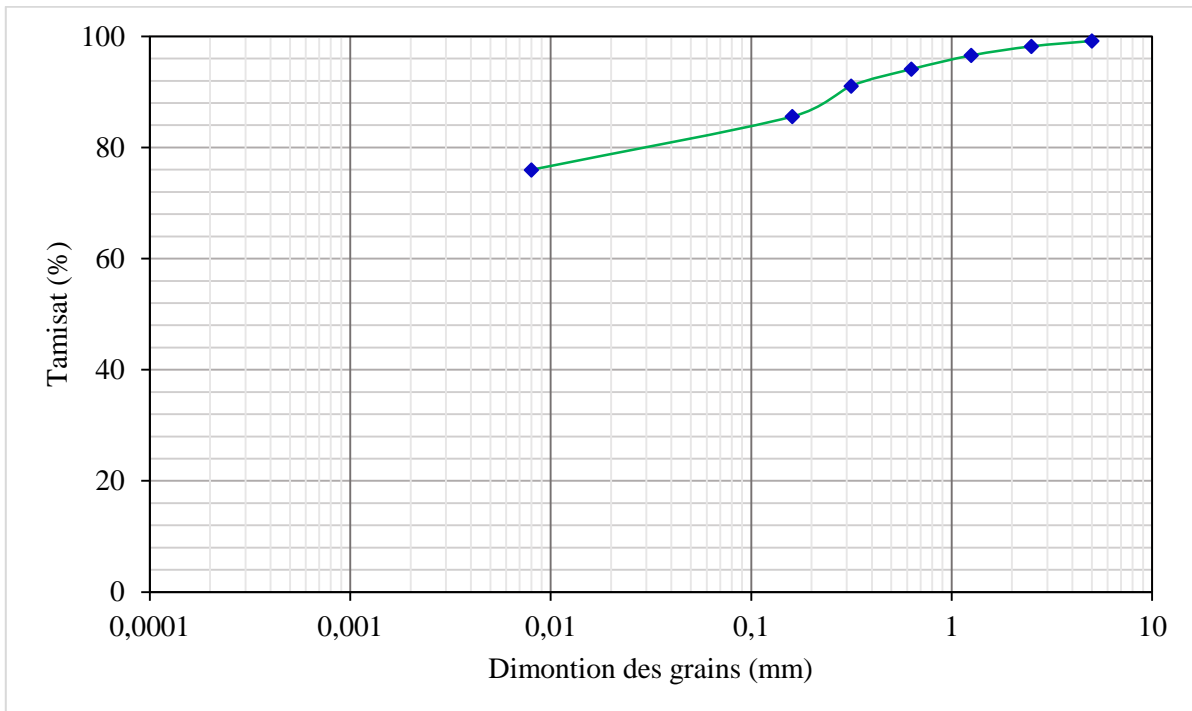


**Figure III.4 : Courbe d'analyse granulométrique par tamisage de l'essai 04**

## ANNEXES

**Tableau III. 5 : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 05**

<b>Tamis (mm)</b>	<b>Refus partiel (g)</b>	<b>Refus cumulés (g)</b>	<b>Refus cumulés (%)</b>	<b>Tamisât en (%)</b>
<b>5</b>	4.97	4.97	0.83	99.17
<b>2.5</b>	5.85	10.82	1.80	98.20
<b>1.25</b>	9.83	20.65	3.44	96.56
<b>0.63</b>	14.73	35.38	5.90	94.10
<b>0.315</b>	18.11	53.49	8.92	91.08
<b>0.16</b>	33.15	86.64	14.44	85.56
<b>0.008</b>	57.45	144.09	24.02	75.98

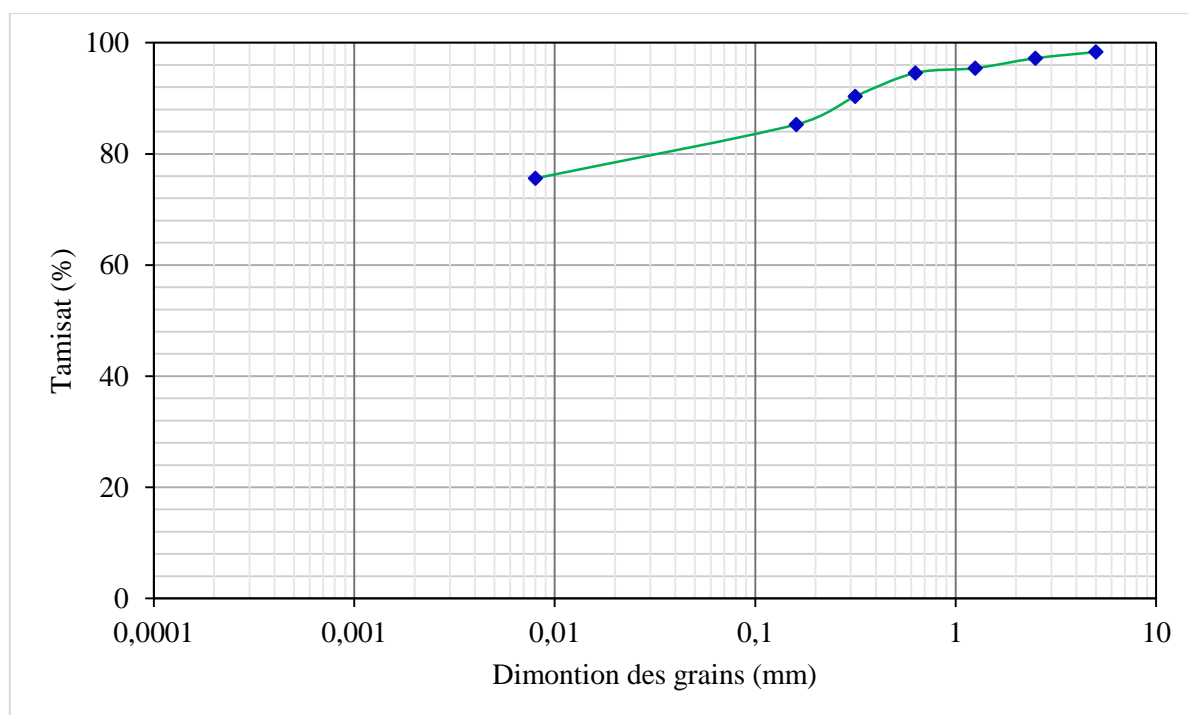


**Figure III.5 : Courbe d'analyse granulométrique par tamisage de l'essai 05**

## ANNEXES

**Tableau III. 6 : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 06**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
5	10.03	10.03	1.67	98.33
2.5	6.71	16.74	2.79	97.21
1.25	10.79	27.53	4.58	95.42
0.63	12.14	32.67	5.44	94.56
0.315	18.26	57.93	9.65	90.35
0.16	30.40	88.33	14.72	85.28
0.008	58.80	146.41	24.40	75.60

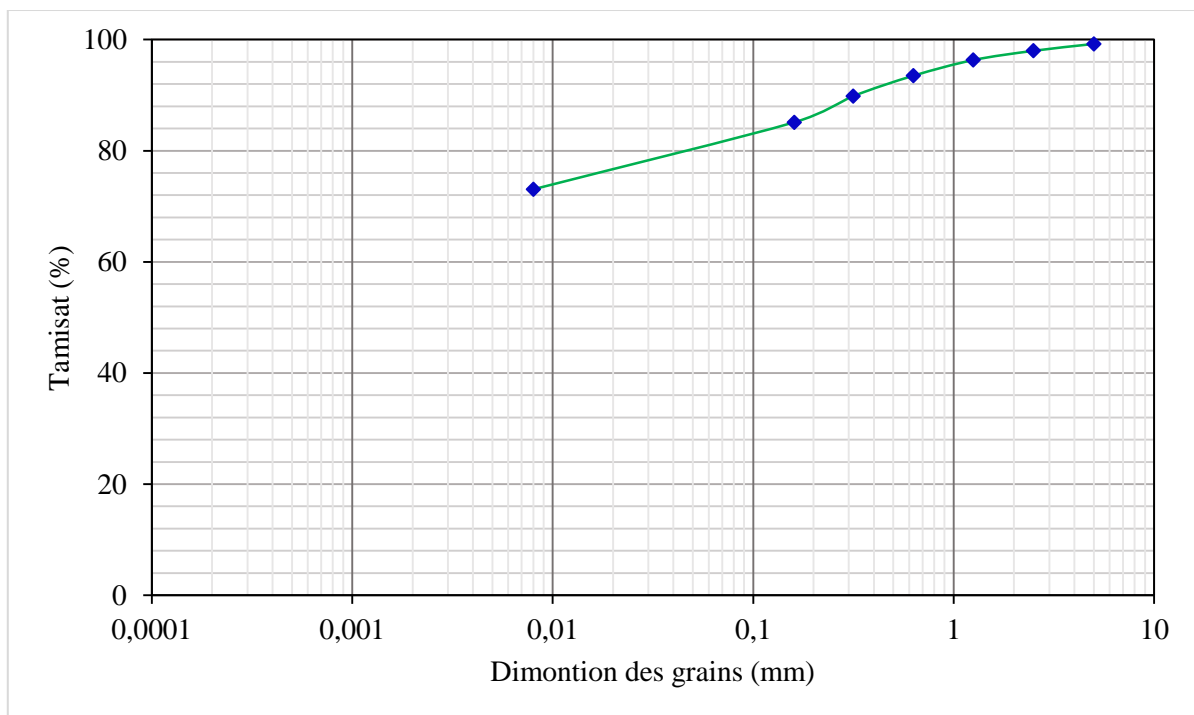


**Figure III.6 : Courbe d'analyse granulométrique par tamisage de l'essai 06**

## ANNEXES

**Tableau III. 7 : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 07**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
5	4.68	4.68	0.78	99.22
2.5	7.47	12.15	2.02	97.98
1.25	10.02	22.17	3.69	96.31
0.63	16.83	39.00	6.50	93.50
0.315	22.13	61.13	10.18	89.82
0.16	28.21	89.35	14.89	85.11
0.008	72.34	161.69	26.94	73.06

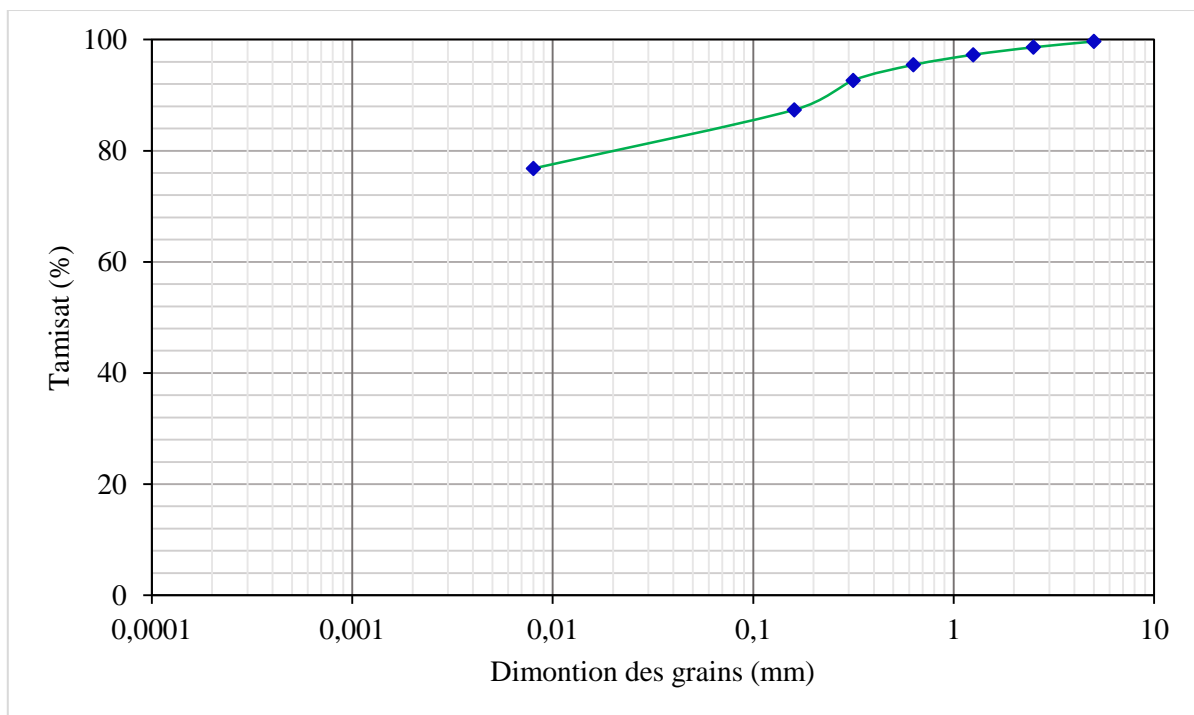


**Figure III.7 : Courbe d'analyse granulométrique par tamisage de l'essai 07**

## ANNEXES

**Tableau III. 8 : Analyse granulométrique par tamisage de l'essai 08**

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
<b>5</b>	2.04	2.04	0.34	99.66
<b>2.5</b>	6.27	8.31	1.38	98.62
<b>1.25</b>	8.06	16.37	2.73	97.27
<b>0.63</b>	10.97	27.34	4.55	95.45
<b>0.315</b>	16.63	43.97	7.33	92.67
<b>0.16</b>	31.91	75.88	12.65	87.35
<b>0.008</b>	63.25	139.13	23.19	76.81

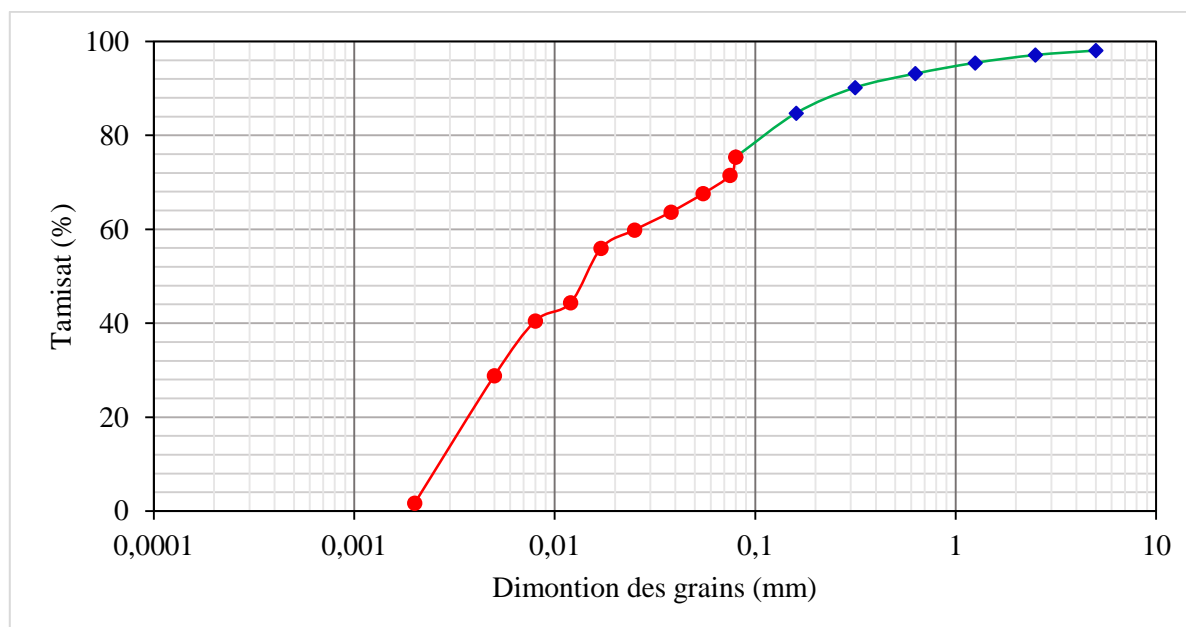


**Figure III.8 : Courbe d'analyse granulométrique par tamisage de l'essai 08**

## ANNEXES

**Tableau III. 9 : Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 03**

Passant a 80u=75.42						
Temps de lecture (minutes)	Lecture densimètre sommet du ménisque R	Température C°	Correction temps	Lecture corrigé	Diamètre(u)	Tamisât par rapport à l'échantillon total P.p.
0.5	20	15.5	-0.710	19.29	80	75.42
1	19	15.5	-0.710	18.29	75	71.51
2	18	15.5	-0.710	17.29	55	67.6
5	17	15.5	-0.710	16.29	38	63.69
10	16	16	-0.640	15.36	25	59.84
20	15	16	-0.640	14.36	17	55.94
40	12	16.5	-0.570	11.43	12	44.37
80	11	16.5	-0.570	10.43	8	40.49
240	8	16.5	-0.570	7.43	5	28.84
1440	1	16.5	-0.570	0.43	2	01.67

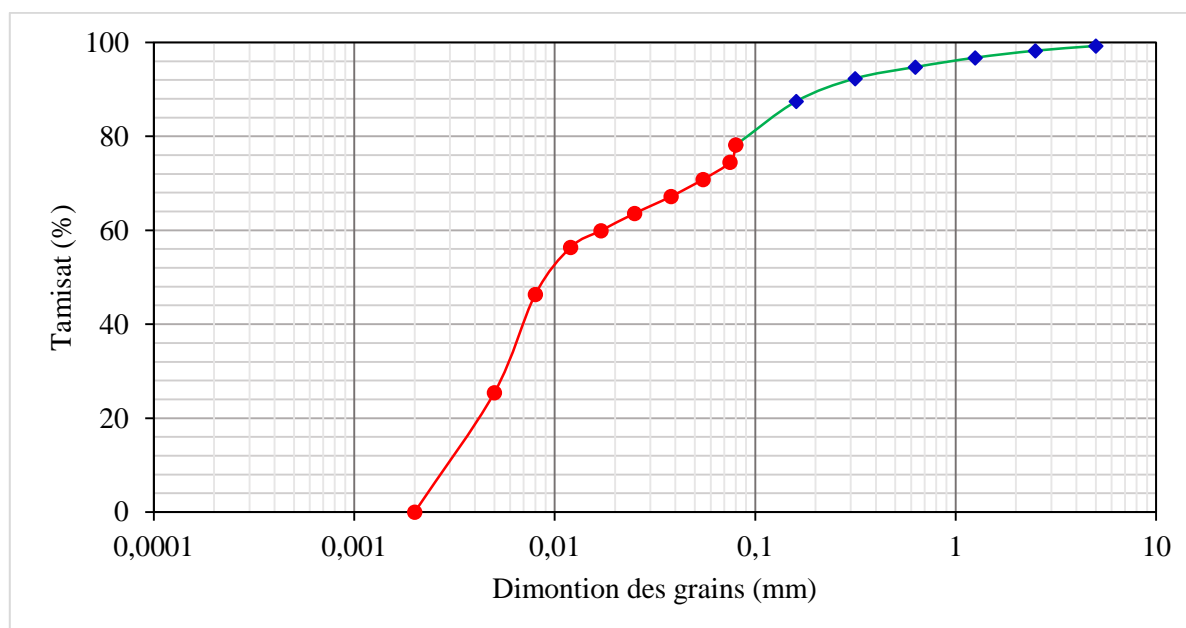


**Figure III.9 : courbe granulométrique par sédimentométrie l'essai 03**

## ANNEXES

**Tableau. III. 10 : Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 04**

Passant a 80u=78.17						
Temps de lecture (minutes)	Lecture densimètre sommet du ménisque R	Température C°	Correction temps	Lecture corrigé	Diamètre(u)	Tamisât par rapport à l'échantillon total P.p.
0.5	22	16	-0.640	21.36	80	78.17
1	21	16	-0.640	20.36	75	74.51
2	20	16	-0.640	19.36	55	70.85
5	19	16	-0.640	18.36	38	67.19
10	18	16.5	-0.570	17.43	25	63.58
20	17	16.5	-0.570	16.43	17	59.93
40	16	17	-0.500	15.5	12	56.36
80	5	17	-0.500	4.5	8	16.36
240	2	17	-0.500	1.5	5	05.45
1440	0.5	17	-0.500	0	2	00.0

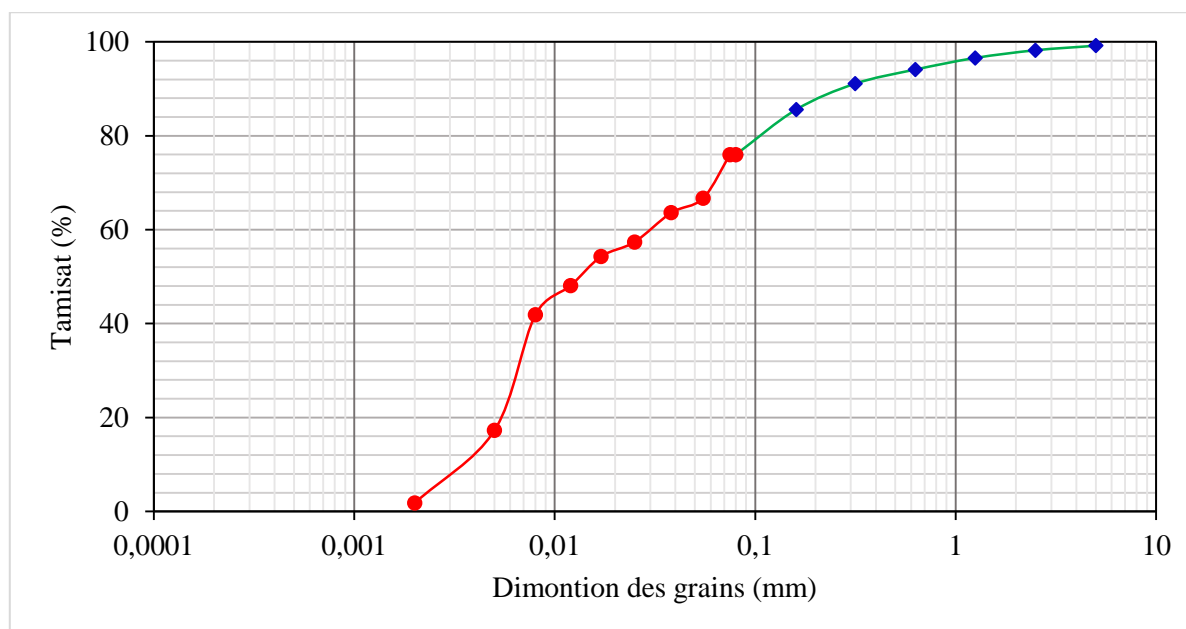


**Figure III.10 : courbe granulométrique par sédimentométrie l'essai 04**

## ANNEXES

**Tableau III. 11 : Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 05**

Passant a 80u=75.98						
Temps de lecture (minutes)	Lecture densimètre sommet du ménisque R	Température C°	Correction temps	Lecture corrigé	Diamètre(u)	Tamisât par rapport à l'échantillon total P.p.
0.5	25	17	-0.500	24.5	80	75.98
1	25	17	-0.500	24.5	75	75.98
2	22	17	-0.500	21.5	55	66.68
5	21	17	-0.500	20.5	38	63.58
10	19	17	-0.500	18.5	25	57.37
20	18	17	-0.500	17.5	17	54.27
40	16	17	-0.500	15.5	12	48.07
80	14	17	-0.500	13.5	8	41.87
240	6	17.5	-0.425	5.575	5	17.24
1440	1	17.5	-0.425	0.575	2	01.78

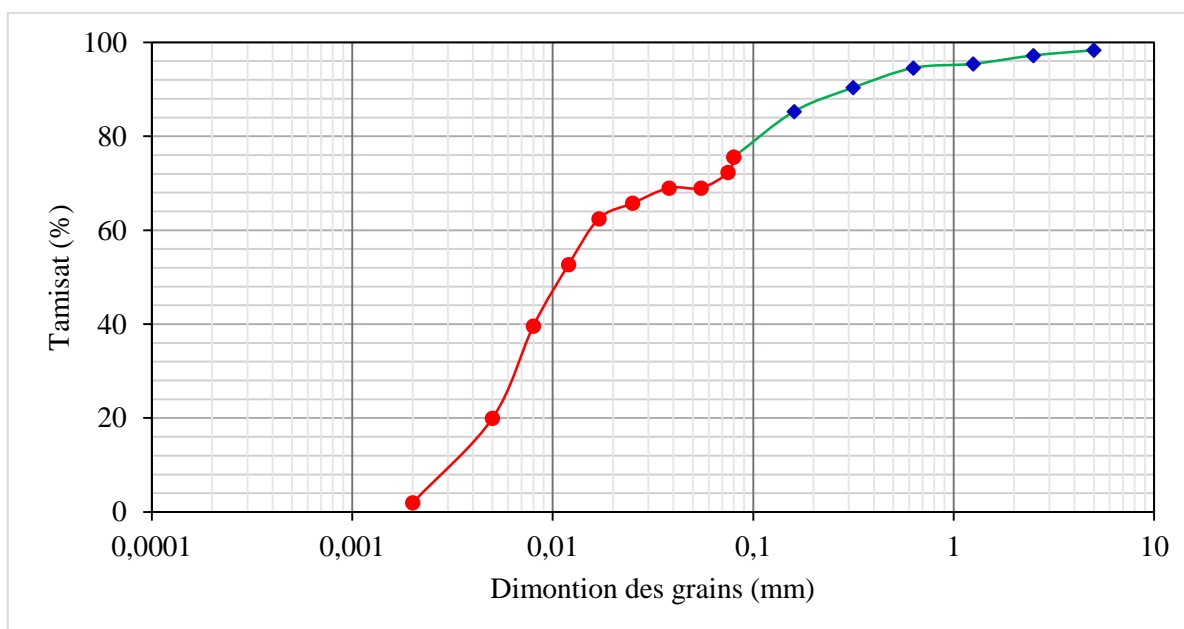


**Figure III.11 : courbe granulométrique par sédimentométrie l'essai 05**

## ANNEXES

**Tableau III. 12 : Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 06**

Passant a 80u=75.6						
Temps de lecture (minutes)	Lecture densimètre sommet du ménisque R	Température C°	Correction temps	Lecture corrigé	Diamètre(u)	Tamisât par rapport à l'échantillon total P.p.
0.5	23	19.5	-0.090	22.91	80	75.6
1	22	19.5	-0.090	21.91	75	72.3
2	21	19.5	-0.090	20.91	55	69.0
5	21	19.5	-0.090	20.91	38	69.0
10	20	20	-0.000	20	25	65.74
20	19	20	-0.000	19	17	62.45
40	16	20.5	-0.095	16.095	12	52.69
80	12	20.5	-0.095	12.095	8	39.59
240	6	20.5	-0.095	6.095	5	19.95
1440	0.5	20.5	-0.095	0.595	2	01.95

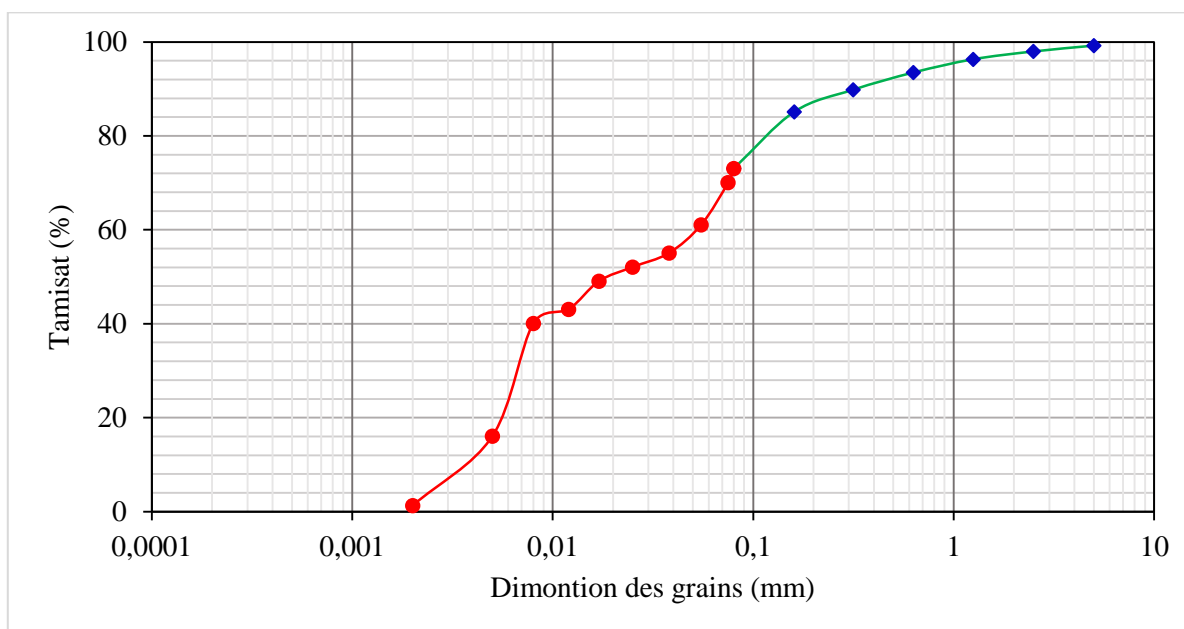


**Figure III.12 : courbe granulométrique par sédimentométrie l'essai 06**

## ANNEXES

**Tableau III. 13 : Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 07**

Passant a 80u=73.06						
Temps de lecture (minutes)	Lecture densimètre sommet du ménisque R	Température C°	Correction temps	Lecture corrigé	Diamètre(u)	Tamisât par rapport à l'échantillon total P.p.
0.5	25	16	-0.640	24.36	80	73.06
1	24	16	-0.640	23.36	75	70.06
2	21	16	-0.640	20.36	55	61.06
5	19	16	-0.640	18.36	38	55.06
10	18	16	-0.640	17.36	25	52.07
20	17	16	-0.640	16.36	17	49.07
40	15	16	-0.640	14.36	12	43.07
80	14	16	-0.640	13.36	8	40.07
240	6	16	-0.640	5.36	5	16.08
1440	1	16.5	-0.570	0.43	2	01.29

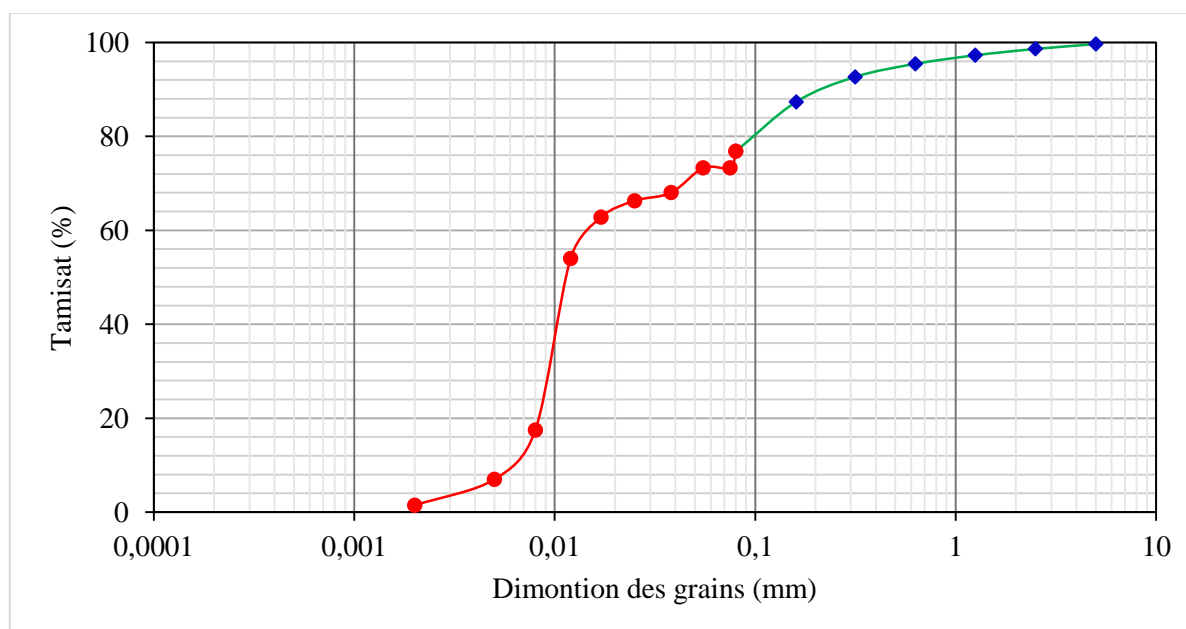


**Figure III.13 : courbe granulométrique par sédimentométrie l'essai 07**

## ANNEXES

**Tableau III. 14 : Analyse granulométrique par sédimentométrie l'essai 08**

Passant a 80u=76.81						
Temps de lecture (minutes)	Lecture densimètre sommet du ménisque R	Température C°	Correction temps	Lecture corrigé	Diamètre(u)	Tamisât par rapport à l'échantillon total P.p.
0.5	22	19	-0.180	21.82	80	76.81
1	21	19	-0.180	20.82	75	73.29
2	21	19	-0.180	20.82	55	73.29
5	19.5	19	-0.180	19.32	38	68.01
10	19	19.5	-0.090	18.91	25	66.29
20	18	19.5	-0.090	17.91	17	62.79
40	15.5	19.5	-0.090	15.41	12	54.02
80	5	20	-0.000	5	8	17.46
240	2	20	-0.000	2	5	06.98
1440	0.5	19.5	-0.090	0.41	2	01.44

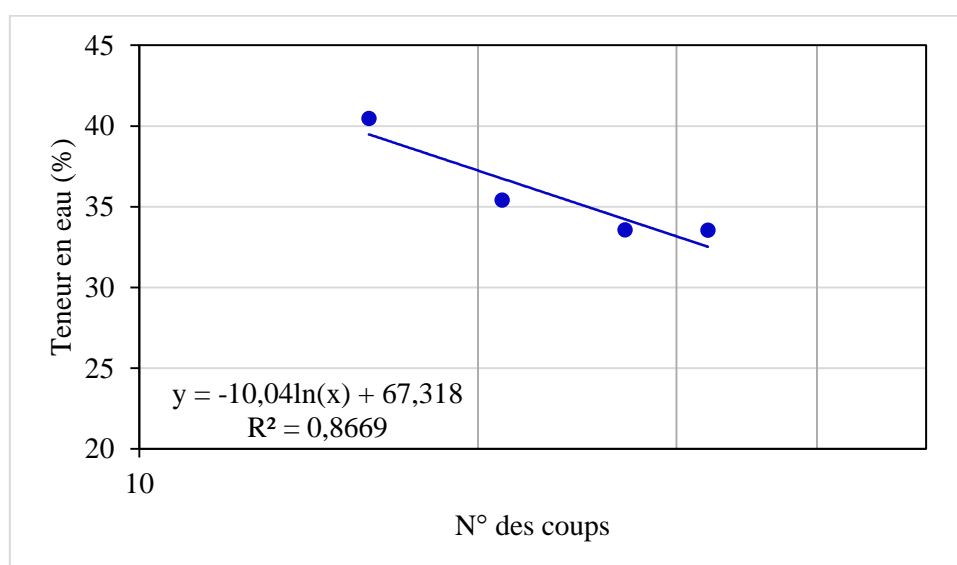


**Figure III.14 : courbe granulométrique par sédimentométrie l'essai 08**

## ANNEXES

**Tableau III.15 : Les résultats de limite de liquidité Essai N°2.**

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
<b>Nombre de coups</b>	16		21		27		32	
<b>Tare N</b>	99	59	23	42	8	11	26	17
<b>Masse de tare ; Mt (g)</b>	4.06	3.22	3.83	3.73	4.13	3.99	3.97	4.01
<b>Masse (sol humid + tare) (Mh +Mt)</b>	12.44	11.67	10.53	11.70	12.55	11.82	9.95	10.17
<b>Masse (sol sec + tare ) (Md +Mt)</b>	10.01	9.22	8.66	9.49	10.24	9.64	8.33	8.50
<b>Masse d'eau ; Mw (g)</b>	2.43	2.45	1.87	2.21	2.31	2.18	1.62	1.67
<b>Masse du sol sec ; Md (g)</b>	5.95	6.00	4.83	5.76	6.11	5.65	4.36	4.49
<b>Teneur en eau ; W (%); Mw/Md</b>	40.84	40.83	38.72	38.37	37.81	38.58	37.16	37.19
<b>M moyenne (%)</b>	40.46		35.41		33.57		33.55	
<b>WL</b>	<b>39.86</b>							

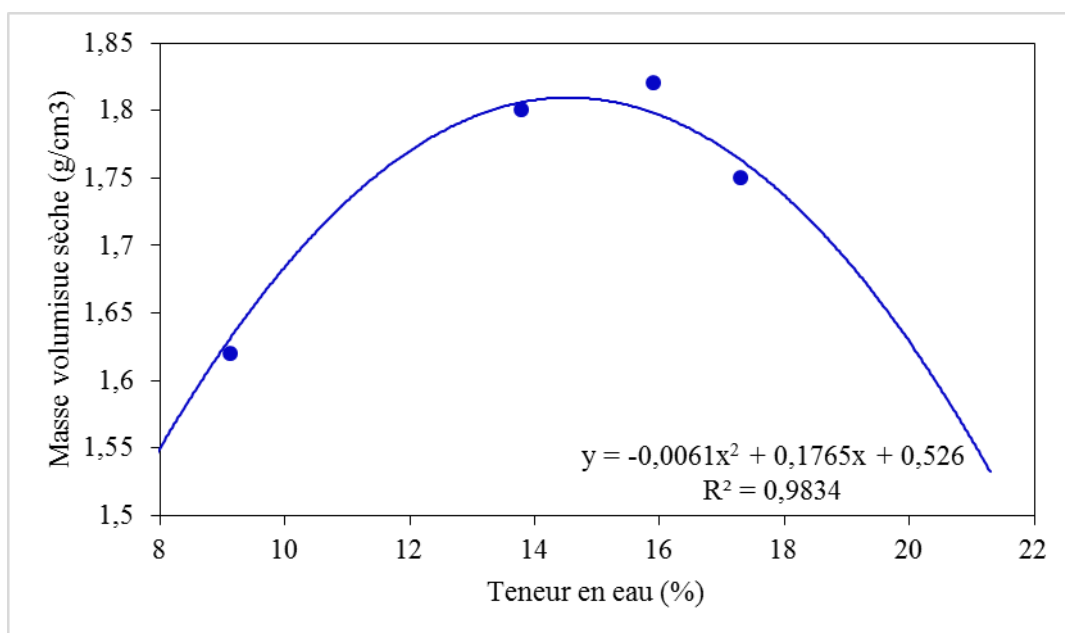


**Figure III.15 : La courbe de limite de liquidité du sol naturel essai 02**

## ANNEXES

**Tableau III.16 : Résultats de essai de compactage le sol naturel l'essai 02**

<b>Sol naturel</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3351,80	3397,50	3640,30	3696,90	3660,50
Masse du sol humide (g)	1642,71	1688,41	1931,21	1987,81	1951,41
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,74	1,79	2,05	2,11	2,07
Masse de la tare (g)	143,70	147,20	145,30	144,60	140,60
Masse sol humide + tare (g)	238,00	315,80	411,00	325,20	403,60
Masse sol sec + tare (g)	231,10	301,70	378,80	300,40	364,80
Masse d'eau (g)	6,9	14,10	32,20	24,80	38,80
Masse du sol sec (g)	87,40	154,50	233,50	155,80	224,20
<b>Teneur en eau W (%)</b>	7,89	9,13	13,79	15,92	17,30
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,55	1,62	1,80	1,82	1,75

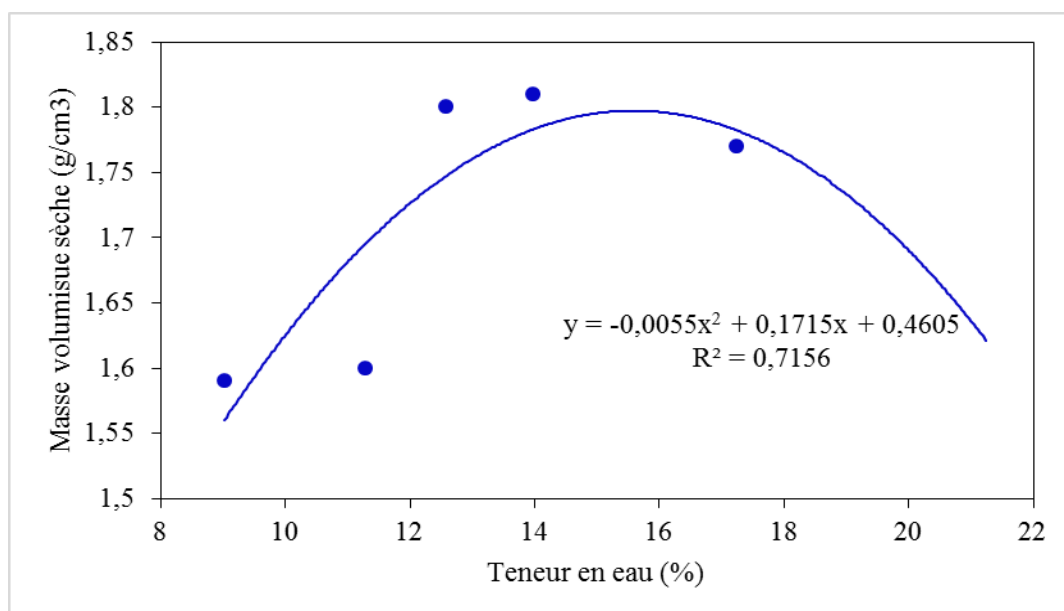


**Figure III.16 : courbe Proctor de sol naturel de l'essai 02**

## ANNEXES

**Tableau III.17 : Résultats de essai de compactage le sol naturel l'essai 03**

<b>Sol naturel</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3362,60	3396,40	3642,10	3682,30	3672,10
Masse du sol humide (g)	1653,51	1687,31	1933,01	1973,21	1963,01
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,75	1,79	2,05	2,09	2,08
Masse de la tare (g)	147,40	145,30	144,60	147,10	144,10
Masse sol humide + tare (g)	392,40	392,60	536,40	290,50	563,30
Masse sol sec + tare (g)	372,10	367,50	492,60	272,90	501,60
Masse d'eau (g)	20,30	25,10	43,80	22,60	61,70
Masse du sol sec (g)	224,70	222,20	348,00	125,80	357,50
<b>Teneur en eau W (%)</b>	9,03	11,30	12,59	13,99	17,25
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,59	1,60	1,8	1,81	1,77

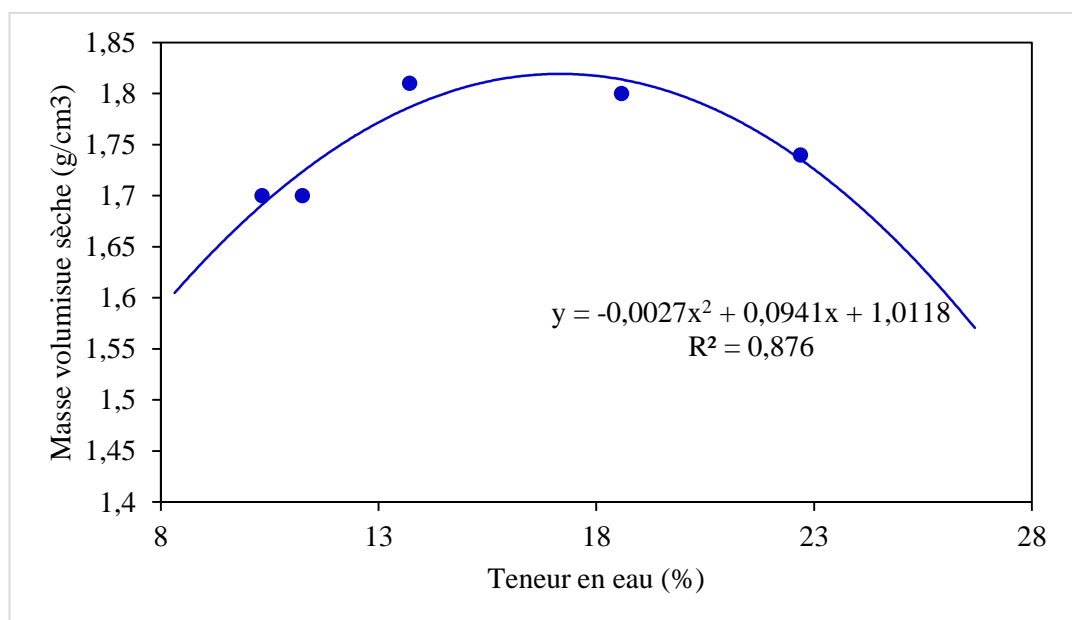


**Figure III.17 : courbe Proctor de sol naturel de l'essai 03**

## ANNEXES

**Tableau III.18 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Chamil.**

<b>Sol traité à 2 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3478,10	3500,70	3650,60	3679,60	3653,7
Masse du sol humide (g)	1769,01	1791,61	1941,51	1970,51	1944,61
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,88	1,90	2,06	2,09	2,06
Masse de la tare (g)	149,10	148,40	144,6	145,00	155,10
Masse sol humide + tare (g)	366,1	298,70	368,5	344,10	269,70
Masse sol sec + tare (g)	345,80	283,50	341,5	312,90	248,5
Masse d'eau (g)	20,30	15,20	27,00	31,20	21,2
Masse du sol sec (g)	196,70	135,10	196,9	167,90	93,4
<b>Teneur en eau W (%)</b>	10,32	11,25	13,71	18,58	22,69
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,7	1,70	1,81	1,8	1,74

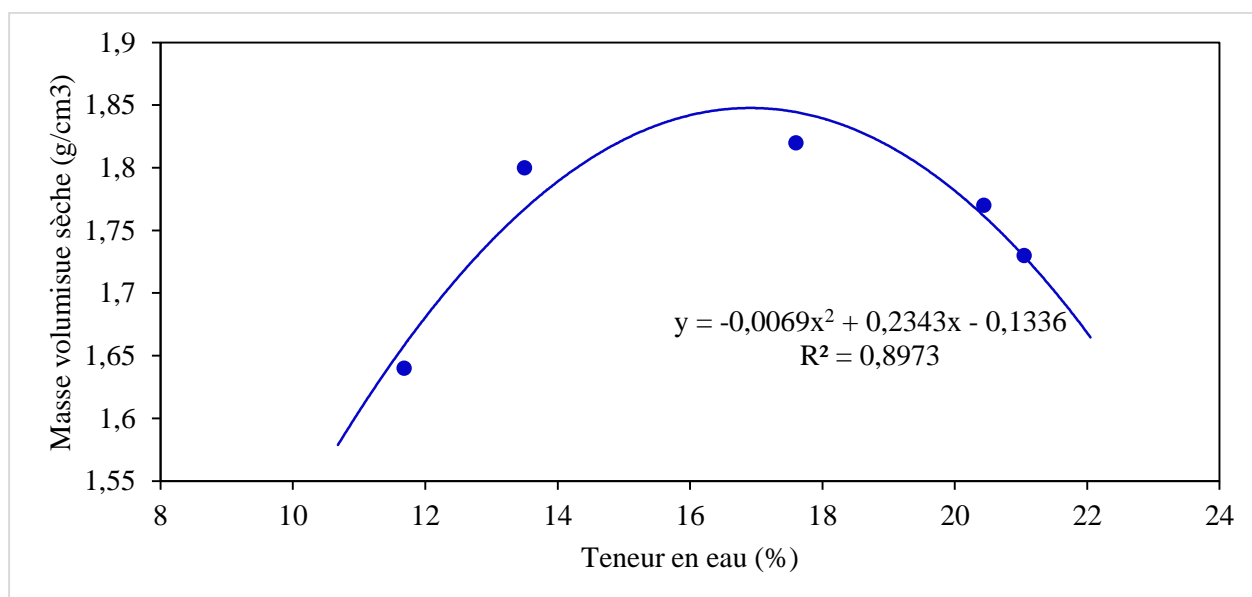


**Figure III.18 : courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 2 %**

## ANNEXES

**Tableau III.19 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Chamil.**

<b>Sol Traité à 4 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3407,3	3670,8	3673,6	3645,5	3623,9
Masse du sol humide (g)	1698,21	1961,71	1964,51	1936,41	1914,81
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	2,08	2,08	2,05	2,04
Masse de la tare (g)	12,8	12,7	12,9	12,8	12,9
Masse sol humide + tare (g)	90,2	69,0	65,0	71,7	65,8
Masse sol sec + tare (g)	82,1	62,3	57,2	61,7	56,6
Masse d'eau (g)	8,1	6,7	7,8	10	9,2
Masse du sol sec (g)	69,3	49,60	44,3	48,9	43,7
<b>Teneur en eau W (%)</b>	11,68	13,50	17,6	20,44	21,05
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,64	1,85	1,82	1,77	1,73

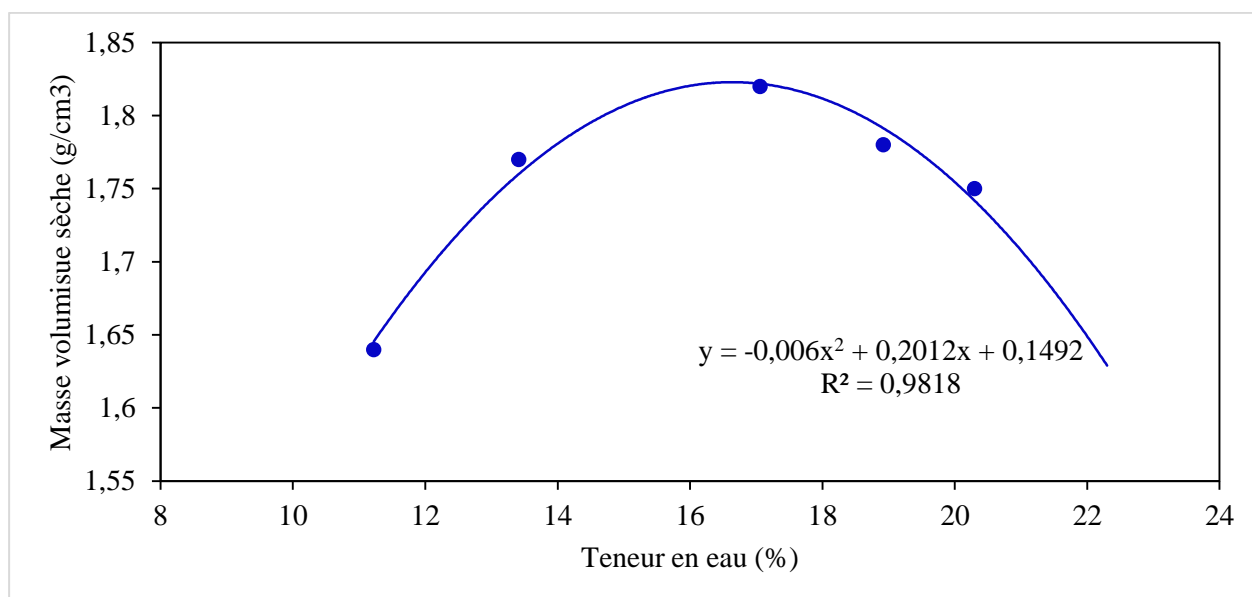


**Figure III.19 : courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 4 %**

## ANNEXES

**Tableau III.20 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Chamil.**

<b>Sol Traité à 6 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3405,7	3588,3	3674,5	3666,1	3656,2
Masse du sol humide (g)	1696,61	1879,21	1965,41	1957,01	1947,11
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	1,99	2,08	2,07	2,06
Masse de la tare (g)	13,1	12,8	12,8	12,7	12,9
Masse sol humide + tare (g)	80,5	68,6	81,4	83,7	75,1
Masse sol sec + tare (g)	73,7	62	71,4	72,40	64,6
Masse d'eau (g)	6,8	6,6	10	11,3	10,5
Masse du sol sec (g)	60,6	49,2	58,6	59,7	51,7
<b>Teneur en eau W (%)</b>	11,22	13,41	17,06	18,92	20,30
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,64	1,77	1,82	1,78	1,75

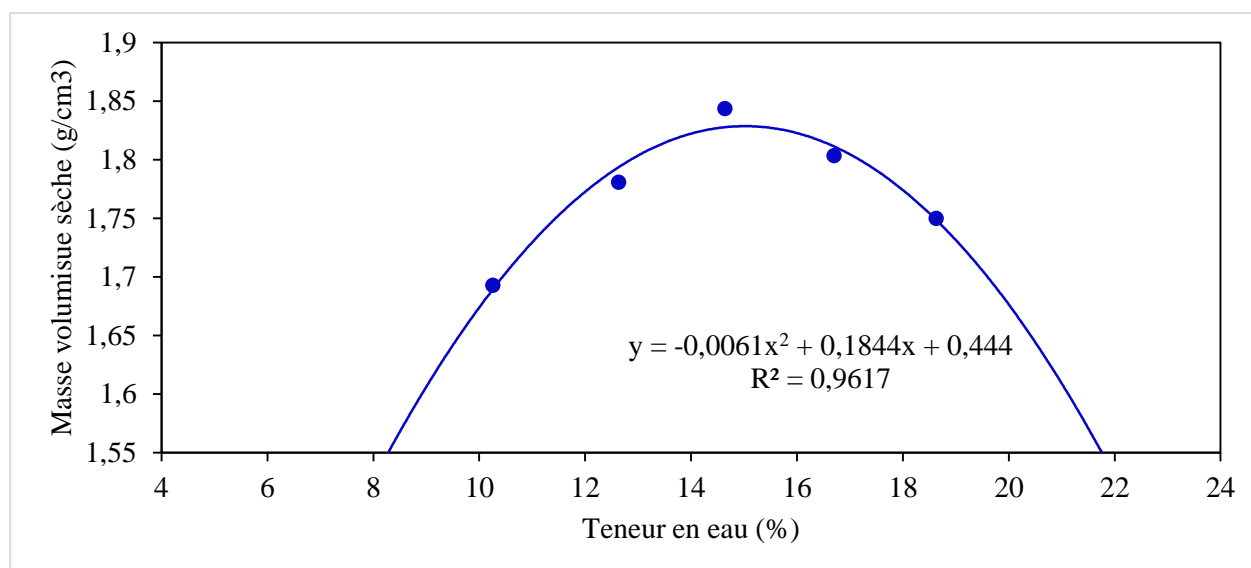


**Figure III.20 : courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 6 %**

## ANNEXES

**Tableau : III.21 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Chamil.**

<b>Sol Traité à 8 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3463,2	3587,9	3709	3679,7	3654,1
Masse du sol humide (g)	1754,11	1878,81	1999,91	1970,61	1945,01
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,86	1,99	2,12	2,09	2,06
Masse de la tare (g)	13,2	12,7	149,6	149,3	144,7
Masse sol humide + tare (g)	106,7	117,9	255,3	327,5	281,6
Masse sol sec + tare (g)	98	106,1	241,80	302	260,1
Masse d'eau (g)	8,7	11,8	13,5	25,5	21,5
Masse du sol sec (g)	84,8	93,4	92,2	152,7	115,4
<b>Teneur en eau W (%)</b>	10,26	12,63	14,64	16,70	18,63
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,69	1,78	1,84	1,8	1,75

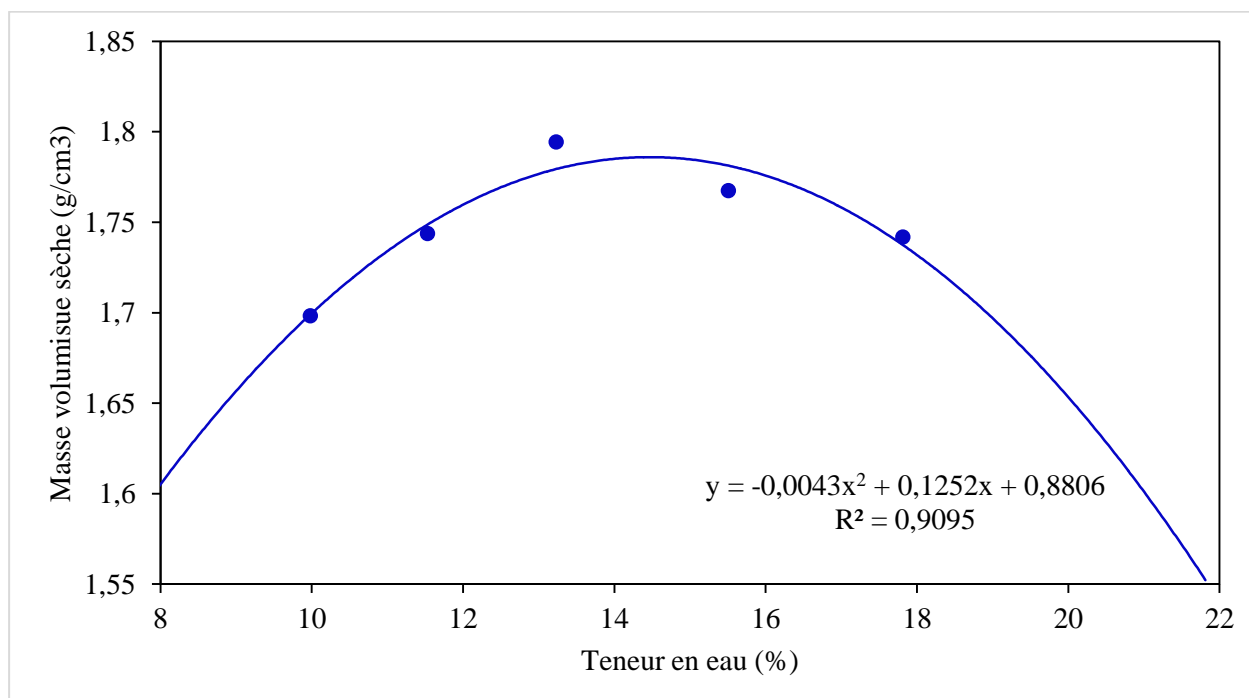


**Figure III.21 : courbe Proctor de sol traité par cimente Chamil 8 %**

## ANNEXES

**Tableau III.22 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Chamil.**

<b>Sol Traité à 10 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3468,8	3548,9	3636	3640,5	3645,3
Masse du sol humide (g)	1759,71	1839,81	1926,91	1931,41	1936,21
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,87	1,95	2,05	2,05	2,06
Masse de la tare (g)	12,8	12,8	12,8	12,9	12,8
Masse sol humide + tare (g)	72,3	77,6	78,7	71	79,6
Masse sol sec + tare (g)	66,9	70,9	71	63,2	69,5
Masse d'eau (g)	5,4	6,7	7,7	7,8	10,1
Masse du sol sec (g)	54,1	58,1	58,2	50,3	56,7
<b>Teneur en eau W (%)</b>	9,98	11,53	13,23	15,51	17,81
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1 + W)</math></b>	1,70	1,74	1,79	1,77	1,74

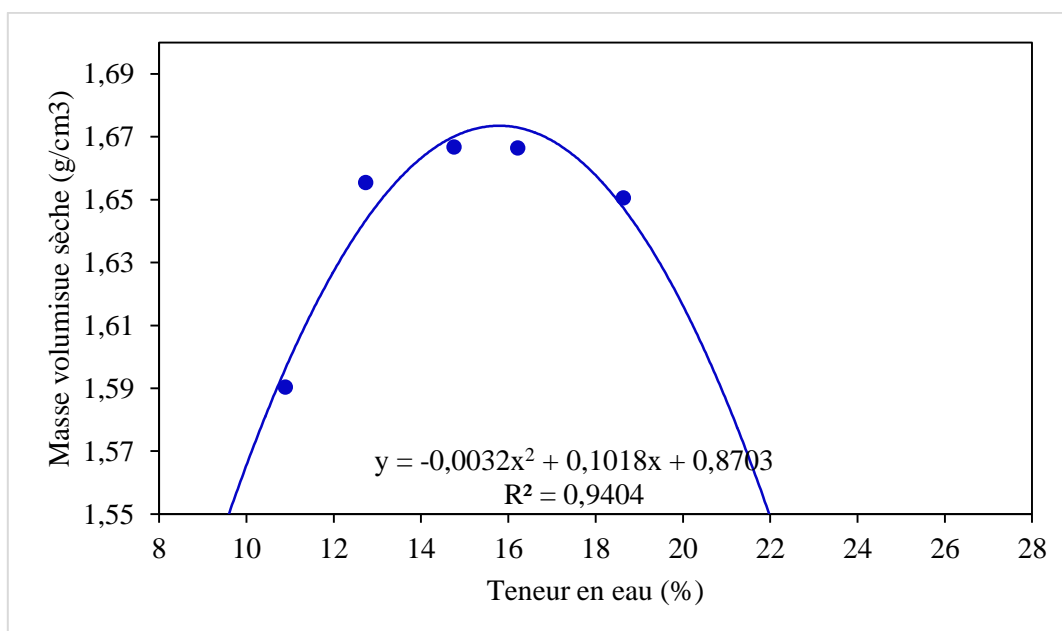


**Figure III.22 : courbe Proctor de sol traité par ciment Chamil 10 %**

## ANNEXES

**Tableau III.28 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Matine.**

<b>Sol Traité au ciment Matine à 2 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3357,1	3455,7	3499	3530,1	3543,8
Masse du sol humide (g)	1648,01	1746,61	1789,91	1821,01	1834,71
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,75	1,85	1,90	1,93	1,95
Masse de la tare (g)	12,9	12,8	12,8	12,9	12,8
Masse sol humide + tare (g)	61,8	81	72,7	76,7	70,1
Masse sol sec + tare (g)	57	73,3	65	67,8	61,1
Masse d'eau (g)	4,8	7,7	7,7	8,9	9
Masse du sol sec (g)	44,1	60,5	52,2	54,9	48,3
<b>Teneur en eau W (%)</b>	10,88	12,73	14,75	16,21	18,63
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,59	1,66	1,67	1,67	1,65

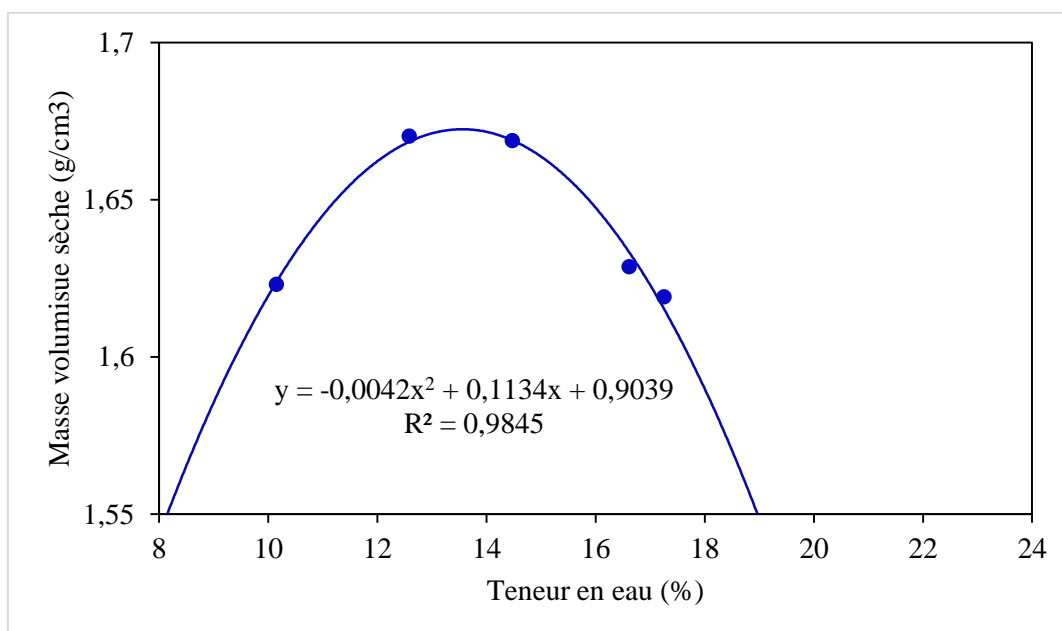


**Figure III.28 : courbe Proctor de sol traité par ciment Matine 2 %**

## ANNEXES

**Tableau : III.29 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine.**

<b>Sol Traité à 4 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3390,9	3471,2	3501,2	3488,8	3508,8
Masse du sol humide (g)	1681,81	1762,11	1792,11	1779,71	1799,71
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,79	1,87	1,90	1,89	1,91
Masse de la tare (g)	12,9	12,9	12,8	12,8	12,8
Masse sol humide + tare (g)	72,6	84,5	74,5	81,6	59,7
Masse sol sec + tare (g)	67,1	76,5	66,7	71,8	52,8
Masse d'eau (g)	5,5	8	7,8	9,8	6,9
Masse du sol sec (g)	54,2	63,6	53,9	59	40
<b>Teneur en eau W (%)</b>	10,15	12,58	14,47	16,61	17,25
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,62	1,67	1,67	1,63	1,62

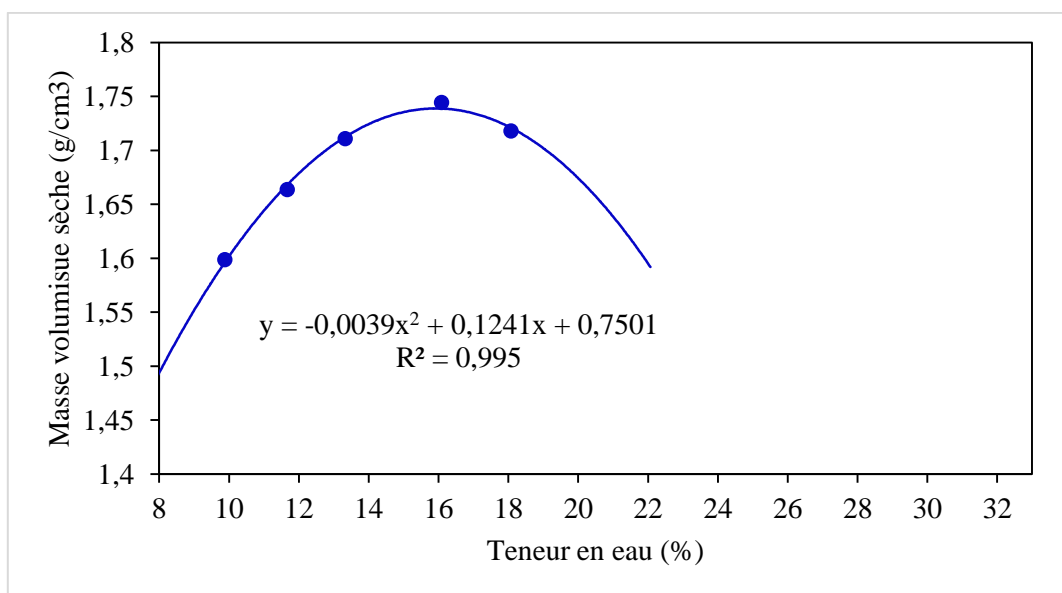


**Figure III.29 : courbe Proctor de sol traité par cimente Matine 4 %**

## ANNEXES

**Tableau III.30 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine.**

<b>Sol Traité à 6 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3365,8	3464,5	3546,3	3615,3	3618,9
Masse du sol humide (g)	1656,71	1755,41	1837,21	1906,21	1909,81
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,76	1,86	1,95	2,02	2,03
Masse de la tare (g)	12,8	12,8	12,9	12,9	12,9
Masse sol humide + tare (g)	58,4	76	92	69,2	88,7
Masse sol sec + tare (g)	54,3	69,4	82,7	61,4	77,1
Masse d'eau (g)	4,1	6,6	9,3	7,8	11,6
Masse du sol sec (g)	41,5	56,6	69,8	48,5	64,2
<b>Teneur en eau W (%)</b>	9,88	11,66	13,32	16,08	18,07
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,60	1,66	1,71	1,74	1,72

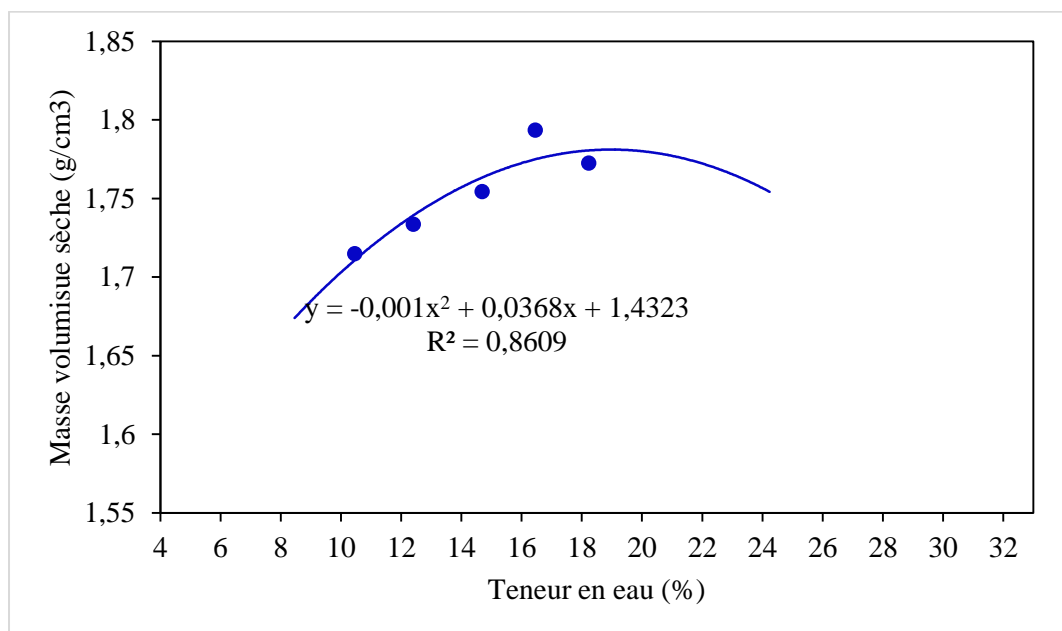


**Figure III.30 : courbe Proctor de sol traité par cimente Matine 6 %**

## ANNEXES

**Tableau III.31 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine.**

<b>Sol Traité à 8 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3486,1	3538,1	3593,1	3668,8	3679,4
Masse du sol humide (g)	1777,01	1829,01	1884,01	1959,71	1970,31
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,89	1,94	2,00	2,08	2,09
Masse de la tare (g)	12,8	12,8	12,7	12,7	12,9
Masse sol humide + tare (g)	75,1	70,8	77,5	75,7	74,5
Masse sol sec + tare (g)	69,2	64,4	69,2	66,8	65
Masse d'eau (g)	5,9	6,4	8,3	8,9	9,5
Masse du sol sec (g)	56,4	51,6	56,5	54,1	52,1
<b>Teneur en eau W (%)</b>	10,46	12,40	14,69	16,45	18,23
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1 + W)</math></b>	1,71	1,73	1,75	1,79	1,77

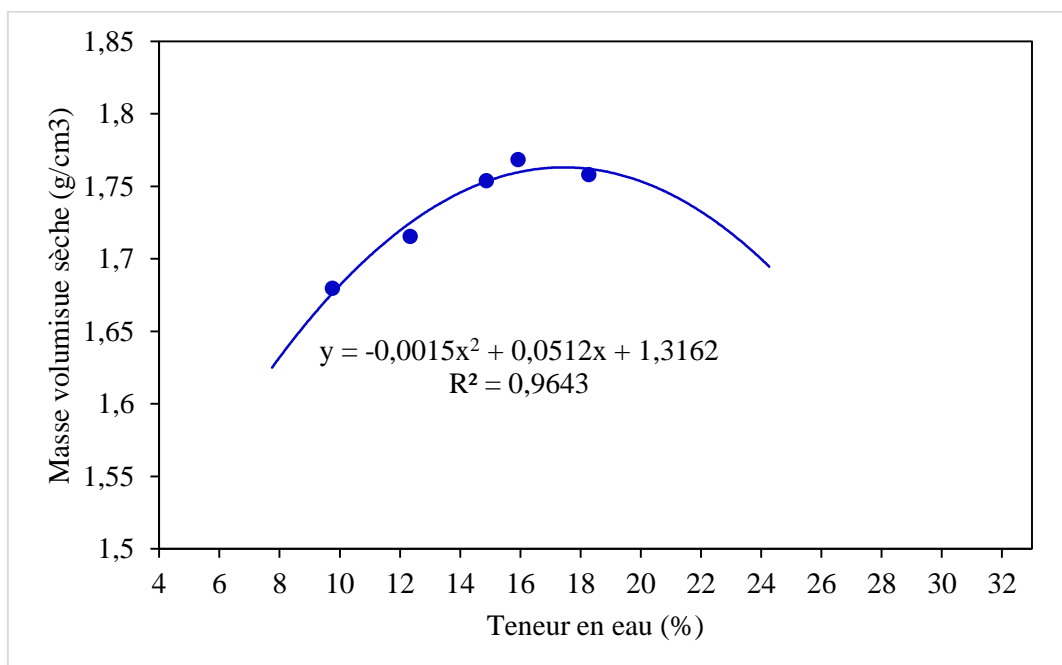


**Figure III.31 : courbe Proctor de sol traité par cimente Matine 8 %**

## ANNEXES

**Tableau . III.31 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine.**

<b>Sol Traité à 10 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3449,7	3519,1	3592,6	3641,6	3663,2
Masse du sol humide (g)	1740,61	1810,01	1883,51	1932,51	1954,11
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,85	1,92	2,00	2,05	2,07
Masse de la tare (g)	12,8	12,8	12,9	12,8	12,8
Masse sol humide + tare (g)	61,2	64,7	75,5	66,7	75,6
Masse sol sec + tare (g)	56,9	59	67,4	59,3	65,9
Masse d'eau (g)	4,3	5,7	8,1	7,4	9,7
Masse du sol sec (g)	44,1	46,2	54,5	46,5	53,1
<b>Teneur en eau W (%)</b>	9,75	12,34	14,86	15,91	18,27
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1 + W)</math></b>	1,68	1,72	1,75	1,77	1,76

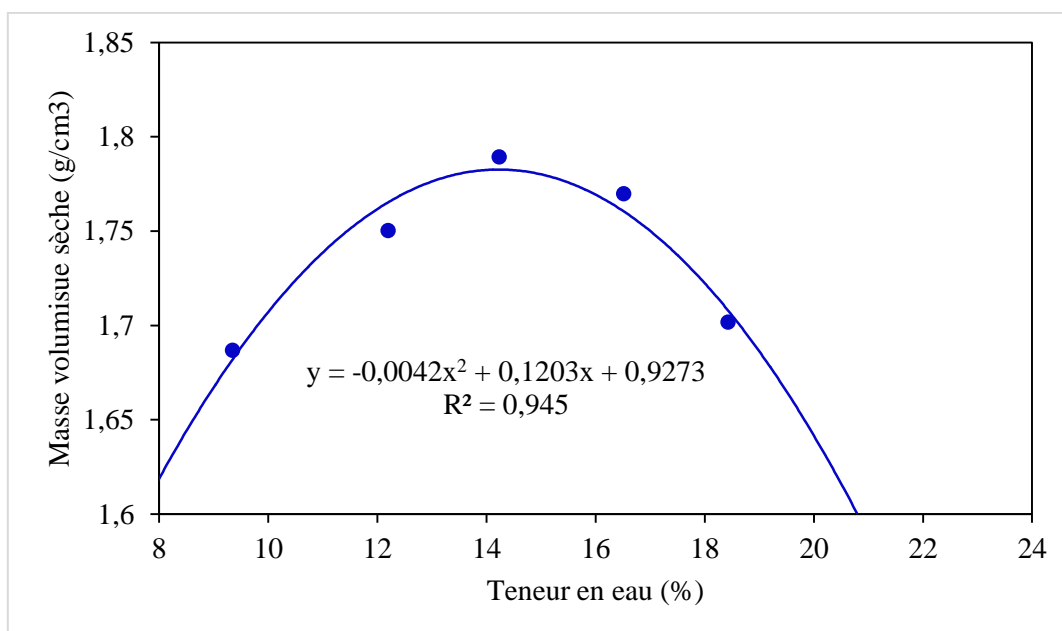


**Figure III.31 : courbe Proctor de sol traité par cimente Matine 10 %**

## ANNEXES

**Tableau. III.32 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Matine.**

<b>Sol Traité au ciment Matine à 2 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3457,1	3555,7	3630,6	3643,1	3600,8
Masse du sol humide (g)	1748,01	1846,61	1921,51	1934,01	1891,71
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,86	1,96	2,04	2,05	2,01
Masse de la tare (g)	12,8	12,8	12,8	12,9	12,9
Masse sol humide + tare (g)	60,8	91	72,2	75,7	71,4
Masse sol sec + tare (g)	56,7	82,5	64,8	66,8	62,3
Masse d'eau (g)	4,1	8,5	7,4	8,9	9,1
Masse du sol sec (g)	43,9	69,7	52	53,9	49,4
<b>Teneur en eau W (%)</b>	9,34	12,20	14,23	16,51	18,42
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,69	1,75	1,79	1,77	1,70

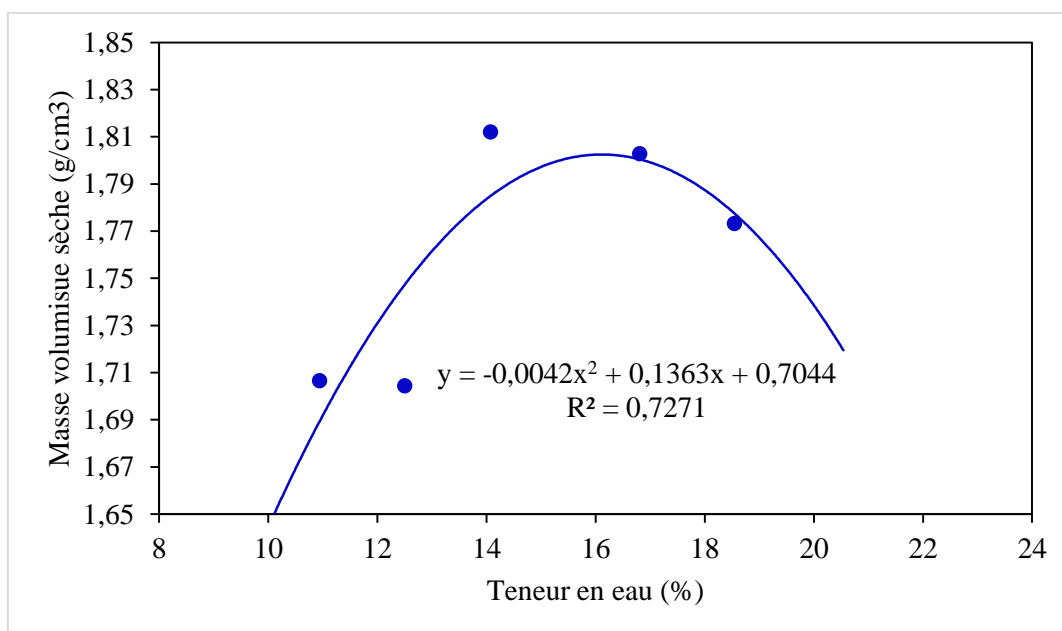


**Figure. III.32 : courbe Proctor de sol traité par ciment Matine 2 %**

## ANNEXES

**Tableau . III.33 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine.**

<b>Sol Traité à 4 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3477,5	3507,3	3655	3679,1	3680,2
Masse du sol humide (g)	1768,41	1798,21	1945,91	1970,01	1971,11
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,88	1,91	2,07	2,09	2,09
Masse de la tare (g)	12,9	13	12,8	12,8	12,8
Masse sol humide + tare (g)	75,8	73,3	73,6	83	69,7
Masse sol sec + tare (g)	69,6	66,6	66,1	72,9	60,8
Masse d'eau (g)	6,2	6,7	7,5	10,1	8,9
Masse du sol sec (g)	56,7	53,6	53,3	60,1	48
<b>Teneur en eau W (%)</b>	10,93	12,50	14,07	16,81	18,54
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,71	1,70	1,81	1,80	1,77

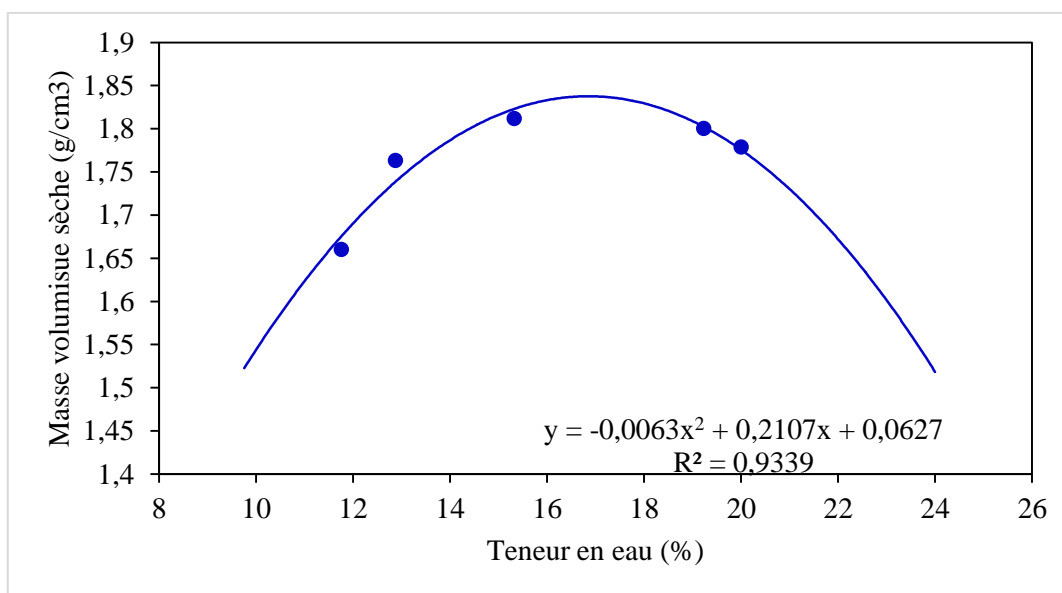


**Figure. III.33 : courbe Proctor de sol traité par cimente Matine 4 %**

## ANNEXES

**Tableau. III.34 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par ciment Matine.**

<b>Sol Traité à 6 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3429,6	3569,4	3654,9	3676,6	3686,5
Masse du sol humide (g)	1720,51	1860,31	1945,81	1967,51	1977,41
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,83	1,97	2,07	2,09	2,10
Masse de la tare (g)	12,8	12,8	13	12,8	12,8
Masse sol humide + tare (g)	74,6	69,8	68,7	64,9	70,4
Masse sol sec + tare (g)	68,1	63,3	61,3	56,5	60,8
Masse d'eau (g)	6,5	6,5	7,4	8,4	9,6
Masse du sol sec (g)	55,3	50,5	48,3	43,7	48
<b>Teneur en eau W (%)</b>	11,75	12,87	15,32	19,22	20,00
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,66	1,76	1,81	1,80	1,78

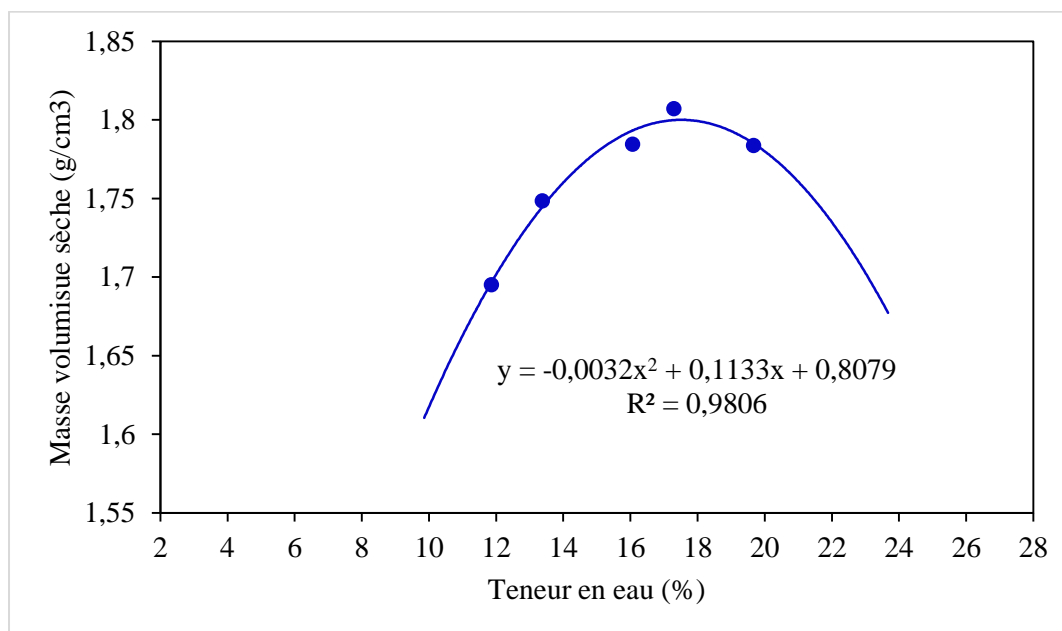


**Figure III.35 : courbe Proctor de sol traité par ciment Matine 6 %**

## ANNEXES

**Tableau : III.36 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine.**

<b>Sol Traité à 8 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3465,7	3553,8	3625,4	3683,9	3691,8
Masse du sol humide (g)	1756,61	1844,71	1916,31	1974,81	1982,71
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,86	1,96	2,03	2,10	2,10
Masse de la tare (g)	12,9	12,8	12,9	12,8	12,8
Masse sol humide + tare (g)	69,5	82,3	73,6	84,7	63,9
Masse sol sec + tare (g)	63,5	74,1	65,2	74,1	55,5
Masse d'eau (g)	6	8,2	8,4	10,6	8,4
Masse du sol sec (g)	50,6	61,3	52,3	61,3	42,7
<b>Teneur en eau W (%)</b>	11,86	13,38	16,06	17,29	19,67
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1+W)</math></b>	1,70	1,75	1,78	1,81	1,78

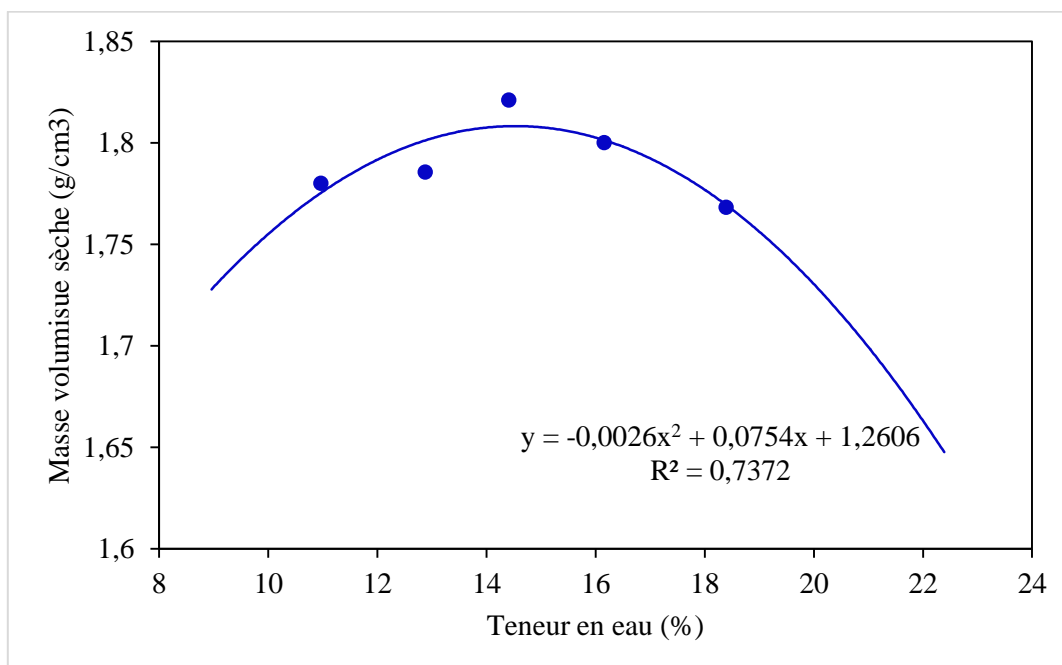


**Figure III.36 : courbe Proctor de sol traité par cimente Matine 8 %**

## ANNEXES

**Tableau : III.37 : Résultats d'essai de compactage d'un sol traité par cimente Matine.**

<b>Sol Traité à 10 %</b>					
<b>Teneur en eau approximative (%)</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>14%</b>	<b>16%</b>	<b>18%</b>
Masse du moule (g)	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09	1709,09
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	942	942	942	942	942
Masse du sol humide avec moule (g)	3553,7	3593	3664,7	3676,2	3674,6
Masse du sol humide (g)	1844,61	1883,91	1955,61	1967,11	1965,51
Masse volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,96	2,00	2,08	2,09	2,09
Masse de la tare (g)	140,5	85,8	149,5	147,1	143,9
Masse sol humide + tare (g)	205,3	187,5	297,2	237,7	289,4
Masse sol sec + tare (g)	198,9	175,9	278,6	225,1	266,8
Masse d'eau (g)	6,4	11,6	18,6	12,6	22,6
Masse du sol sec (g)	58,4	90,1	129,1	78	122,9
<b>Teneur en eau W (%)</b>	10,96	12,87	14,41	16,15	18,39
<b>Masse volumique sèche (g/cm<sup>3</sup>) ; <math>\rho_d = \rho_h / (1 + W)</math></b>	1,78	1,79	1,82	1,80	1,77



**Figure III.37 : courbe Proctor de sol traité par cimente Matine 10 %**

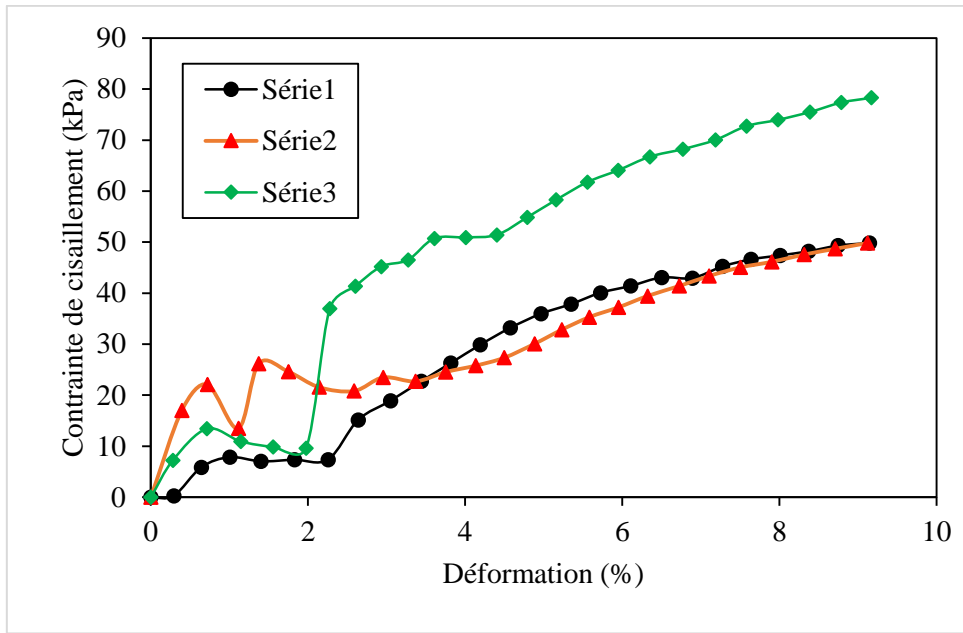


Figure III-38: Courbe d'essai cisaillement (sol naturel) 0 jours

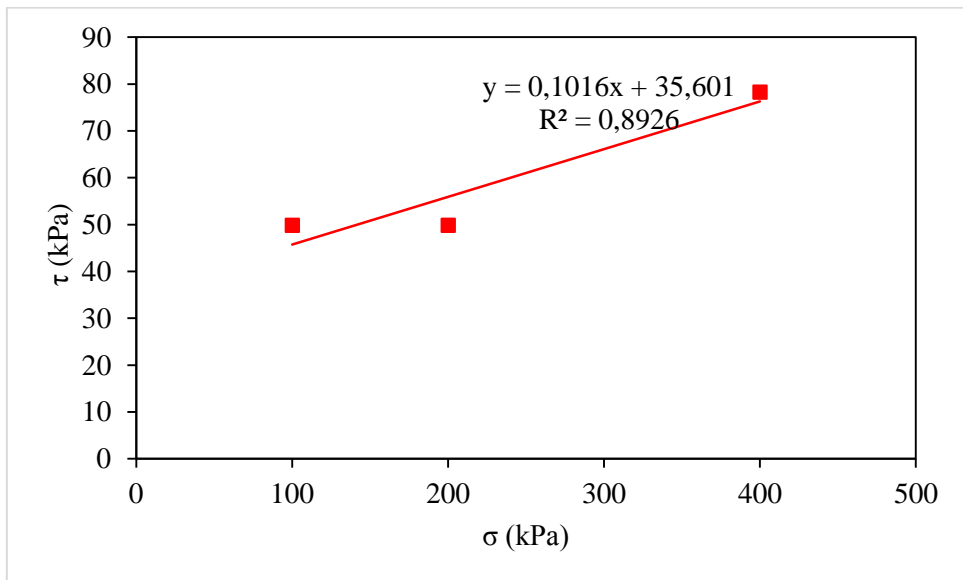


Figure III-38: Courbe d'essai cisaillement (sol naturel) 0 jours

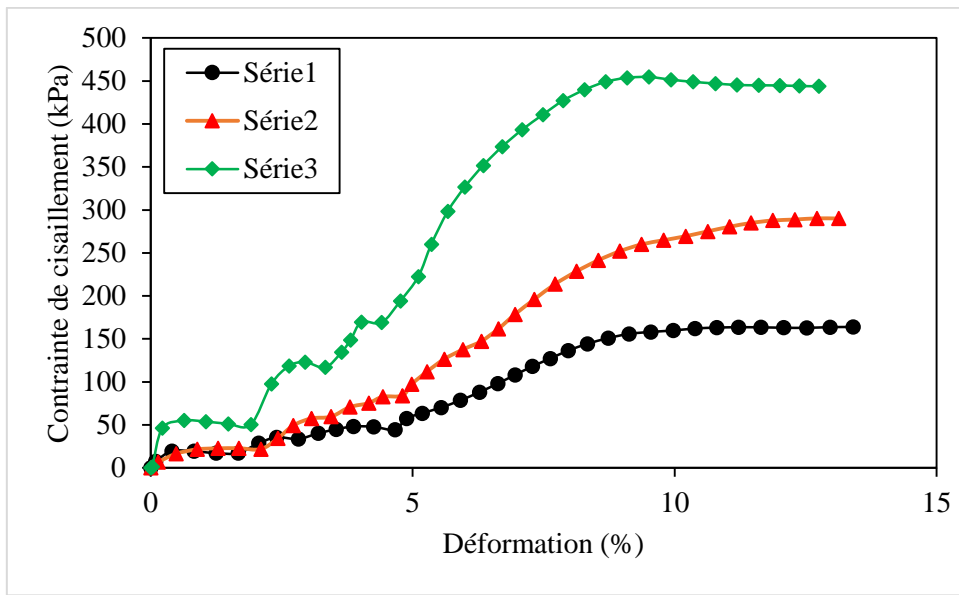


Figure III-39: Courbe d'essai cisaillement (2% Chamil ) 0 jours

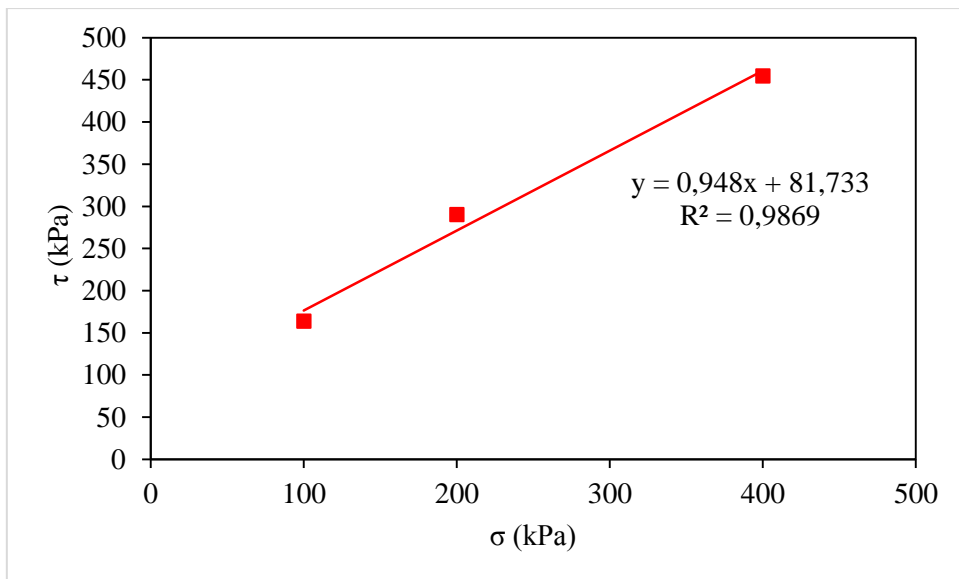


Figure III-39: Courbe d'essai cisaillement (2% Chamil ) 0 jours

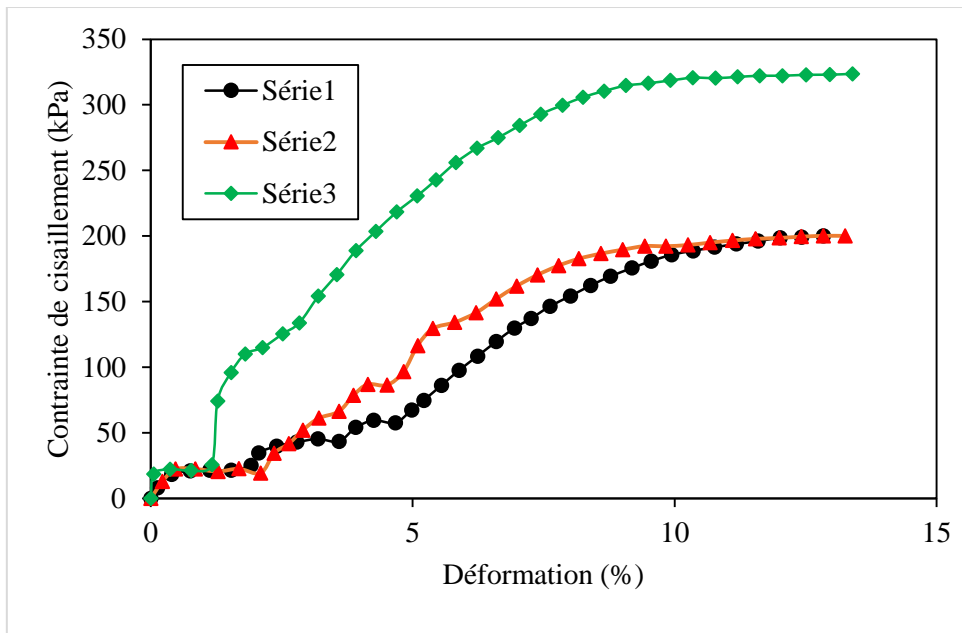


Figure III-40: Courbe d'essai cisaillement (4 % Chamfil ) 0 jours

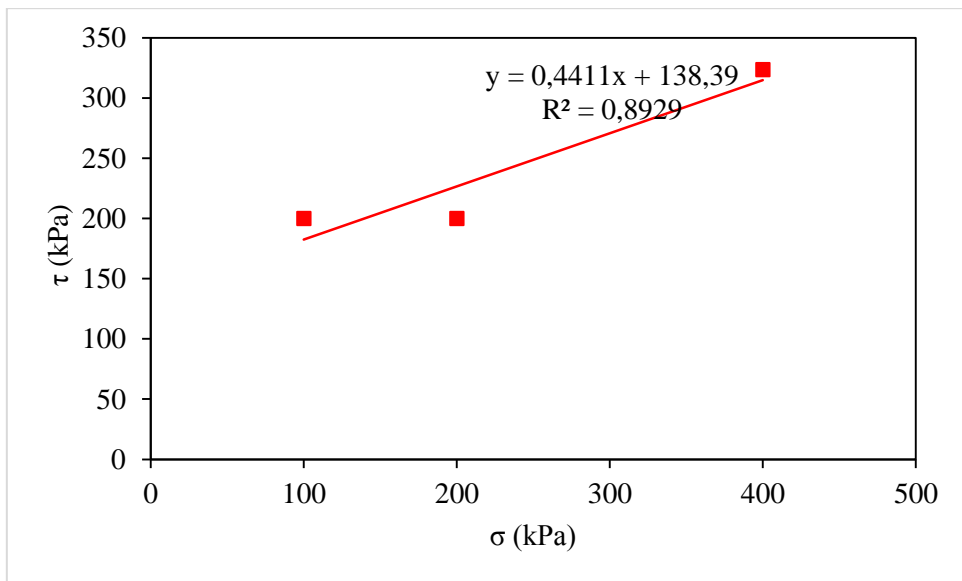


Figure III-40: Courbe d'essai cisaillement (4 % Chamfil ) 0 jours

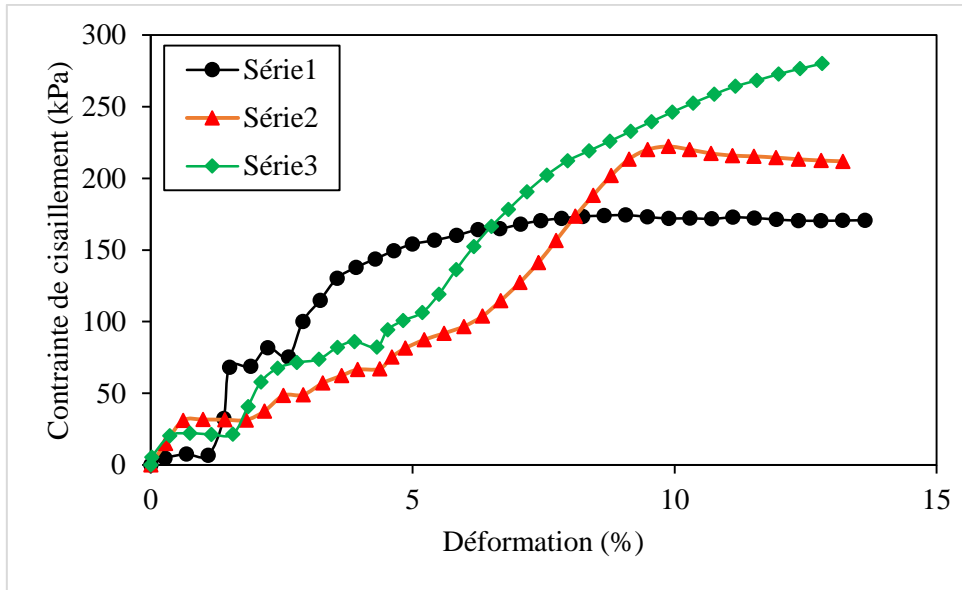


Figure III-41: Courbe d'essai cisaillement ( 6 % Chamil ) 0 jours

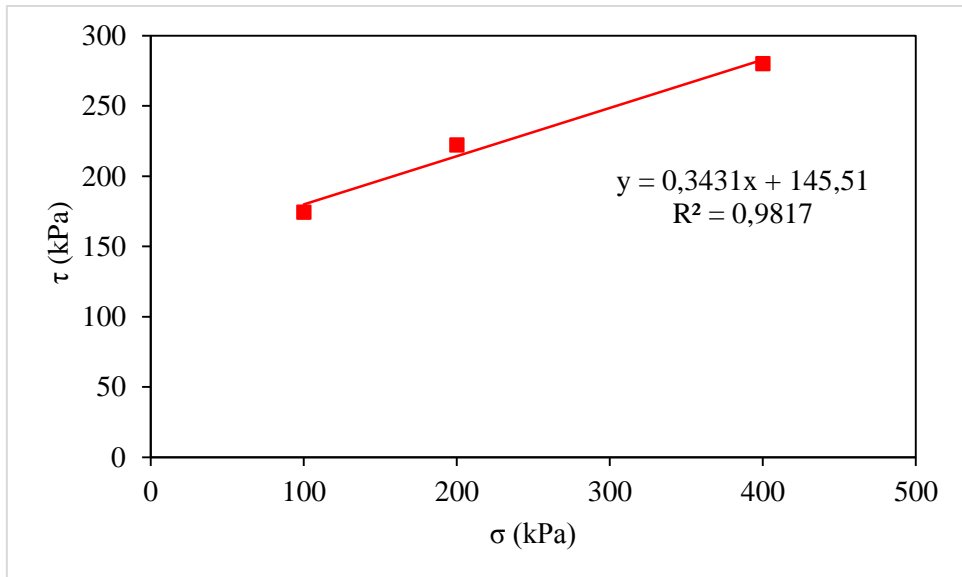


Figure III-41: Courbe d'essai cisaillement ( 6 % Chamil ) 0 jours

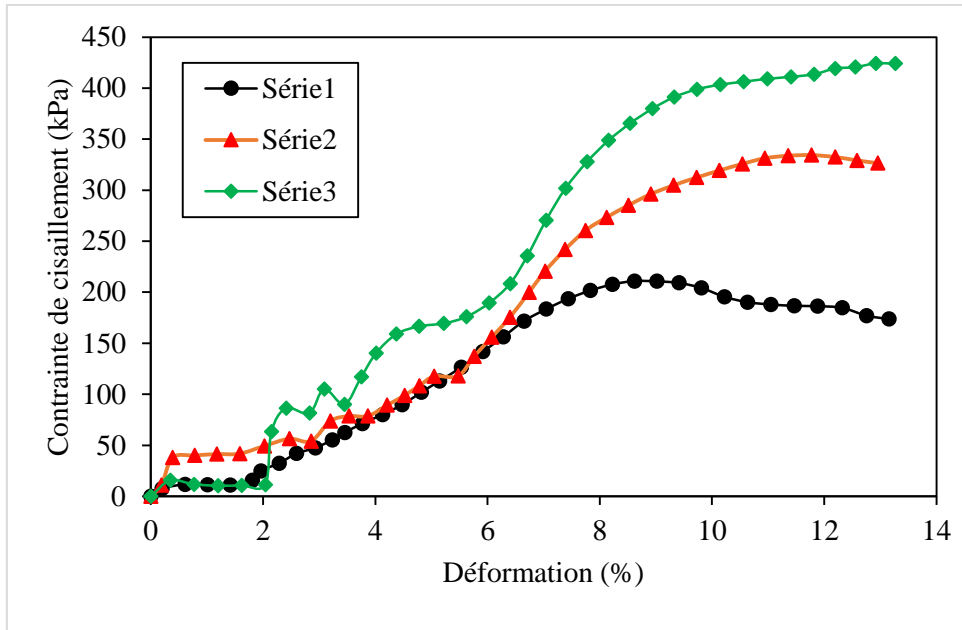


Figure III-42: Courbe d'essai cisaillement ( 8 % Chamil ) 0 jours

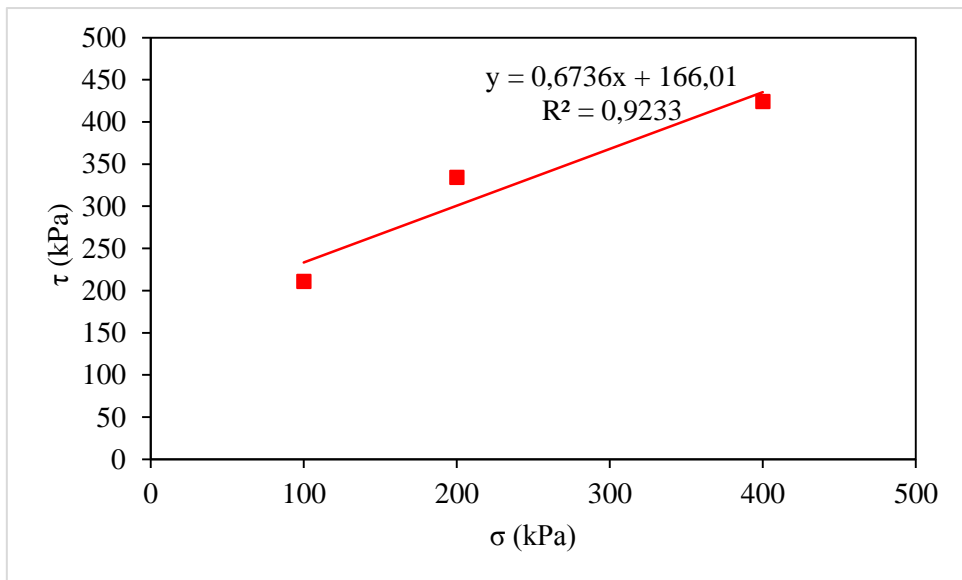


Figure III-42: Courbe d'essai cisaillement ( 8 % Chamil ) 0 jours

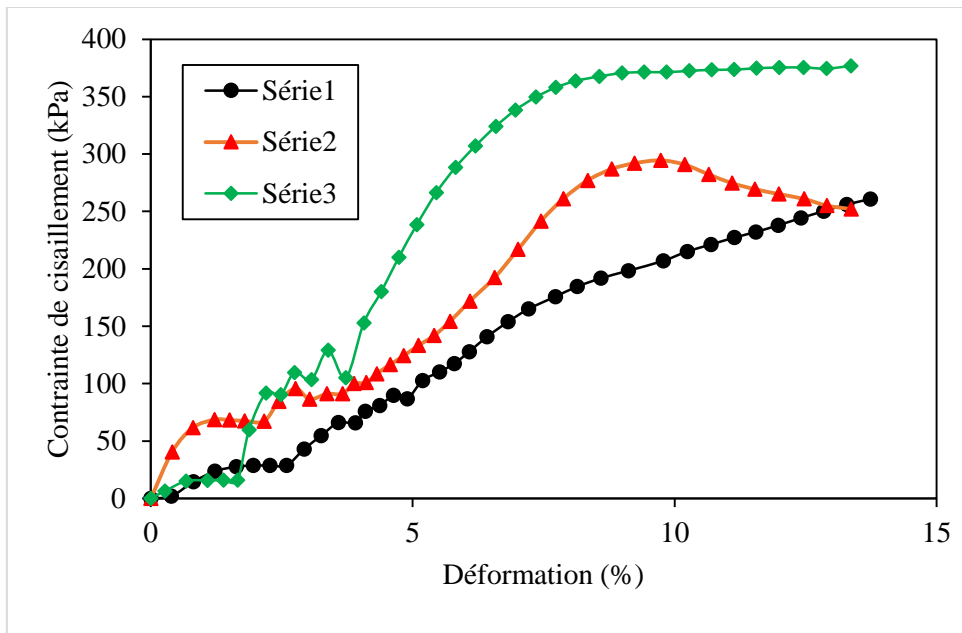


Figure III-43: Courbe d'essai cisaillement (10 % Chamil ) 0 jours

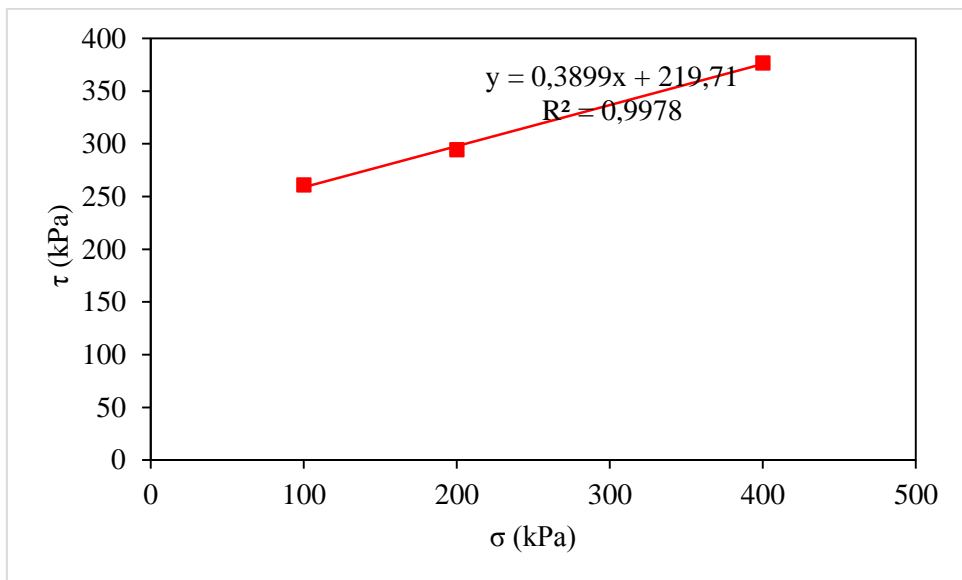


Figure III-43: Courbe d'essai cisaillement (10 % Chamil ) 0 jours

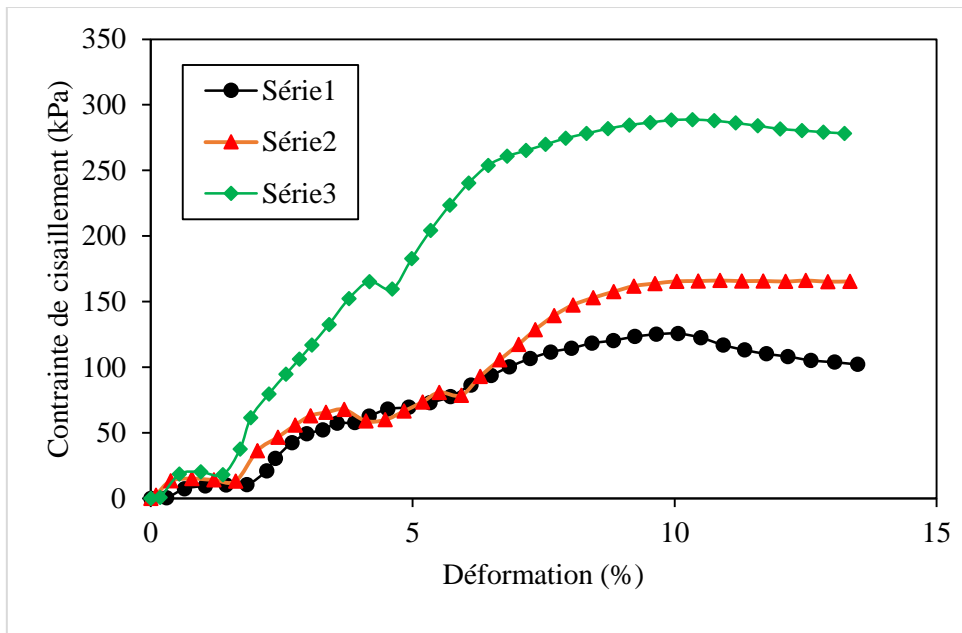


Figure III-44: Courbe d'essai cisaillement (2 % Matine ) 0 jours

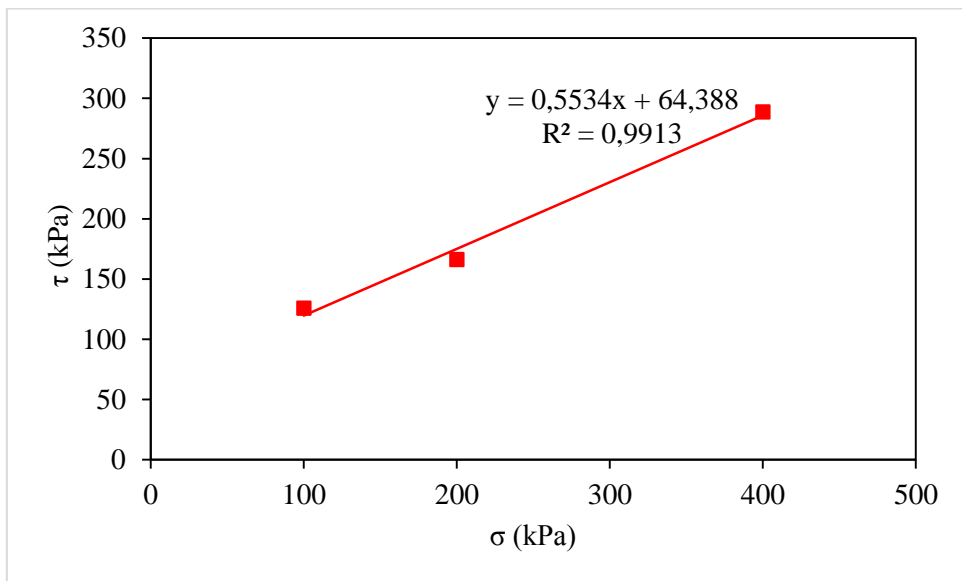
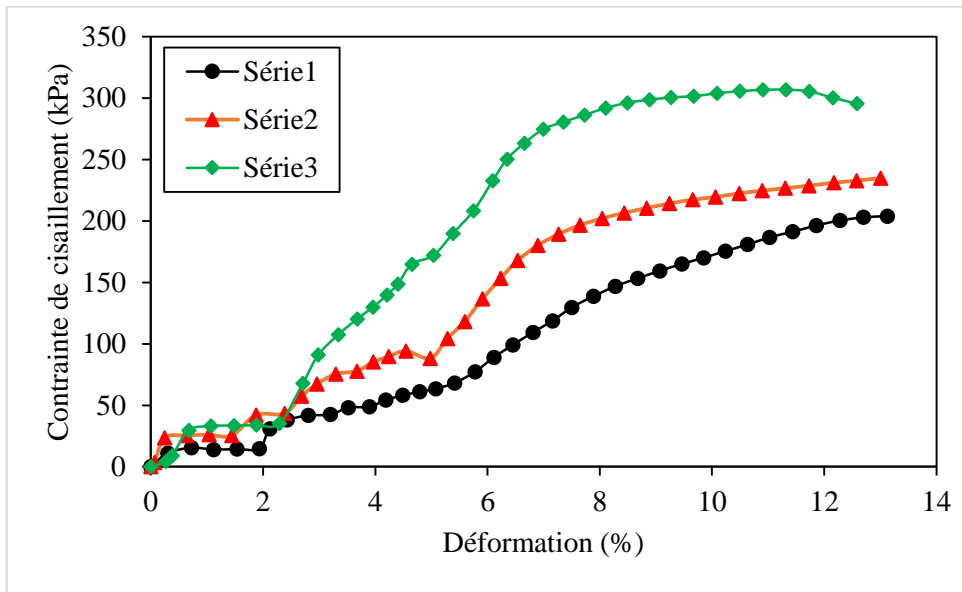
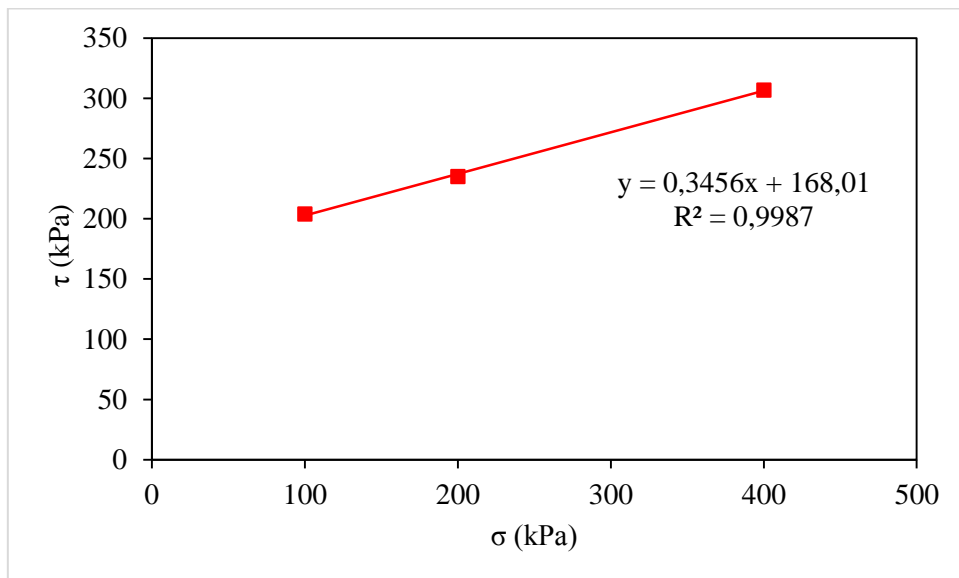


Figure III-44: Courbe d'essai cisaillement (2 % Matine ) 0 jours

## ANNEXES



*Figure III-45: Courbe d'essai cisaillement (4 % Matine ) 0 jours*



*Figure III-45: Courbe d'essai cisaillement (4 % Matine ) 0 jours*

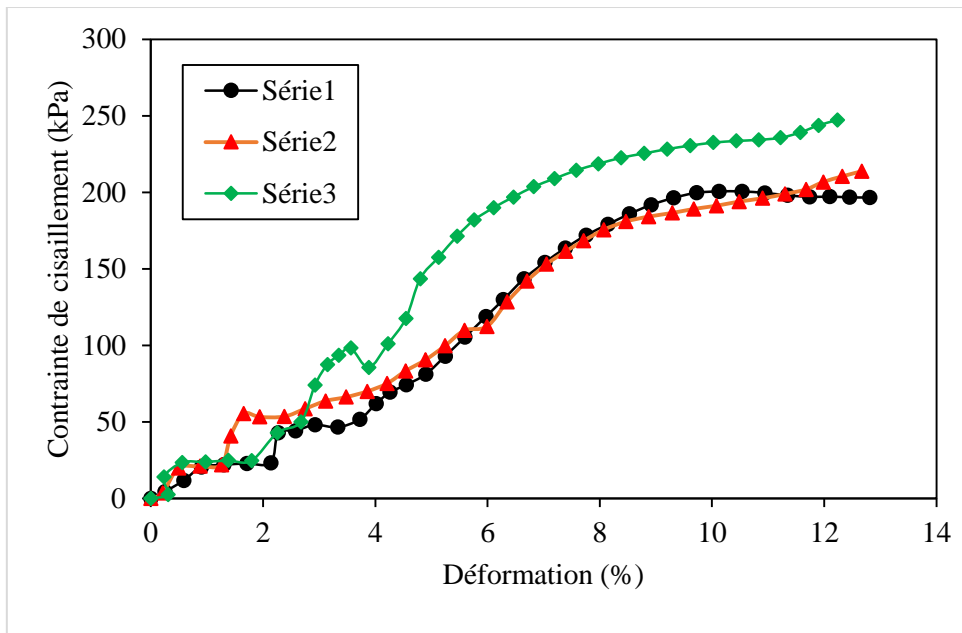


Figure III-45: Courbe d'essai cisaillement ( 6 % Matine ) 0 jours

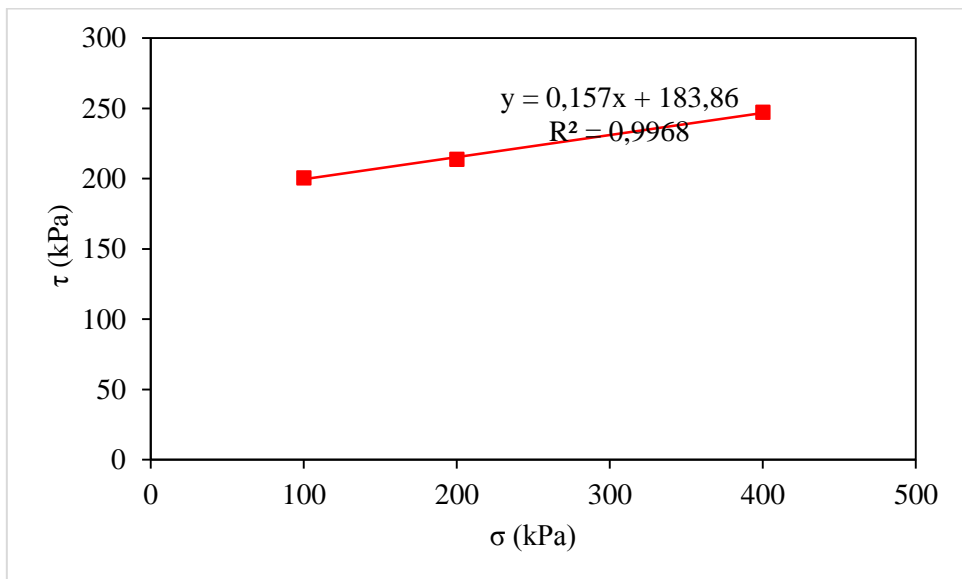


Figure III-45: Courbe d'essai cisaillement ( 6 % Matine ) 0 jours

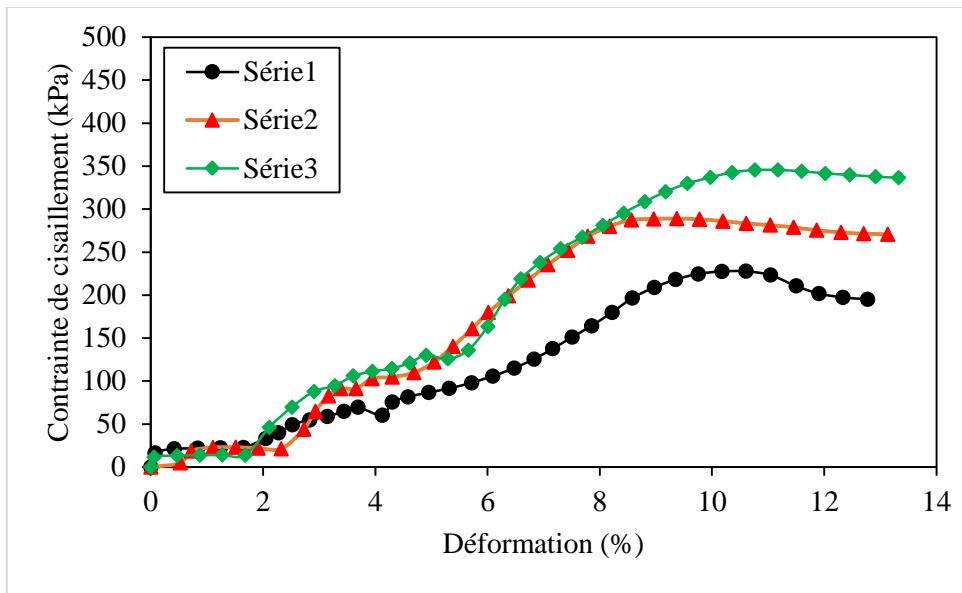


Figure III-46: Courbe d'essai cisaillement ( 8 % Matine ) 0 jours

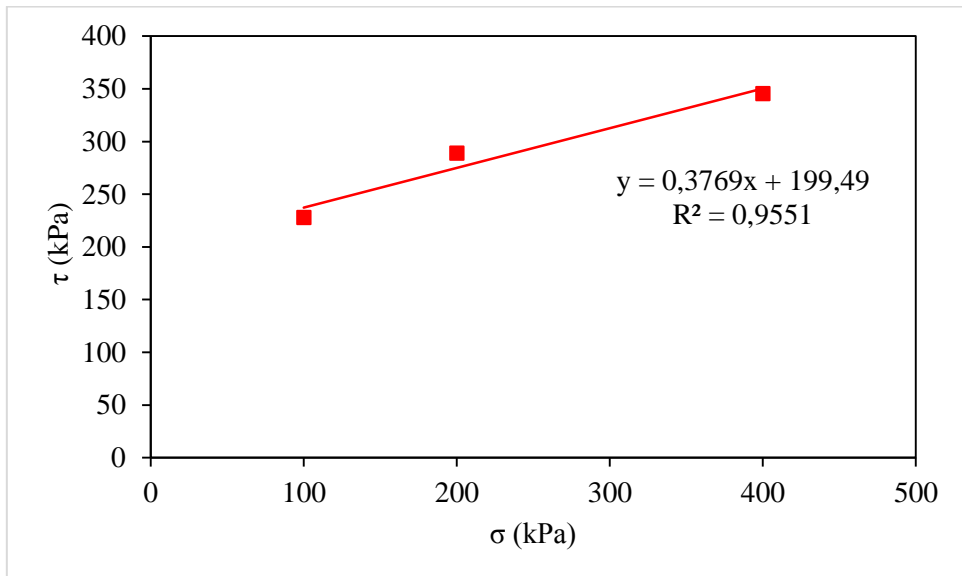


Figure III-46: Courbe d'essai cisaillement ( 8 % Matine ) 0 jours

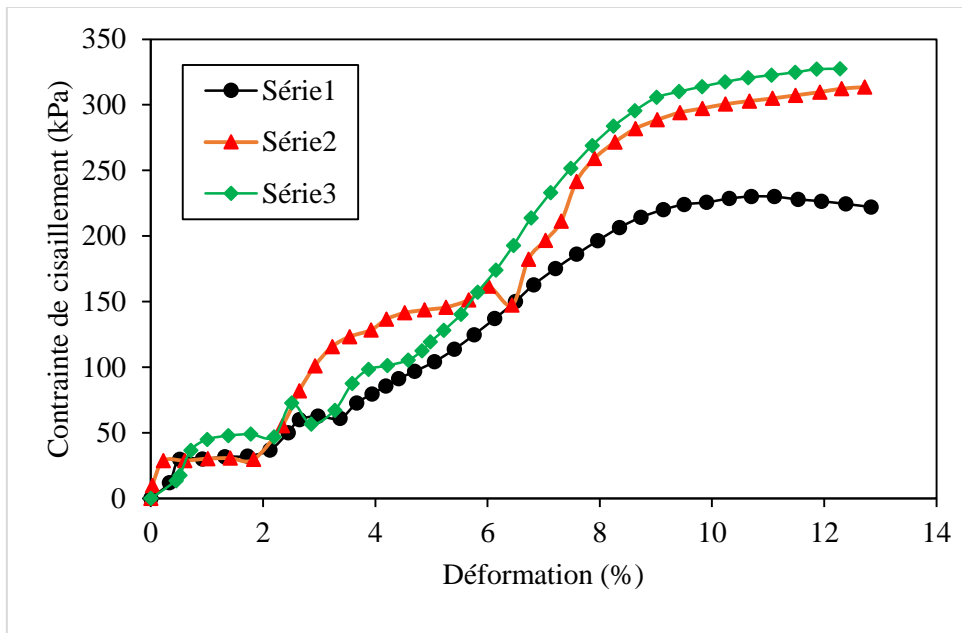


Figure III-47: Courbe d'essai cisaillement ( 10 % Matine ) 0 jours

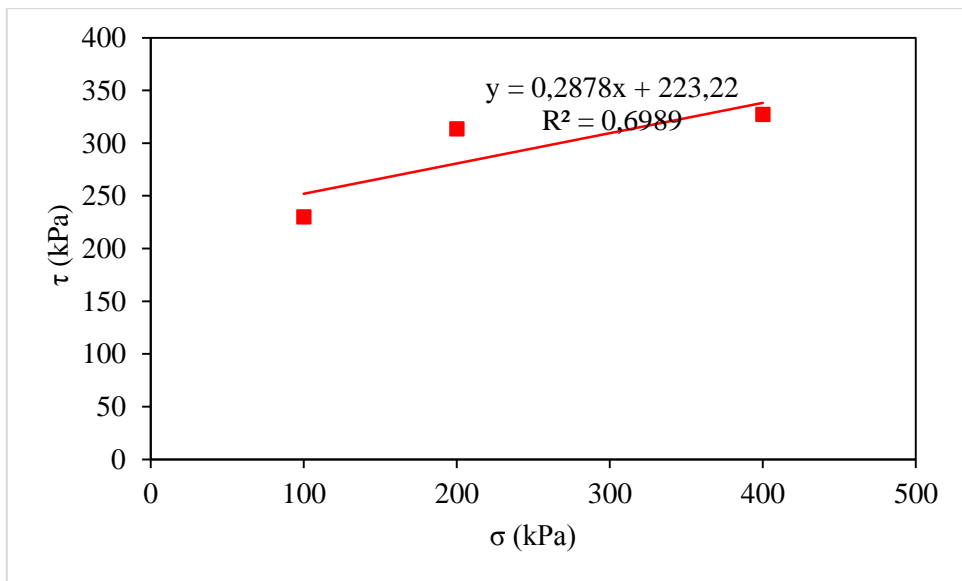


Figure III-48: Courbe d'essai cisaillement ( 10 % Matine ) 0 jours

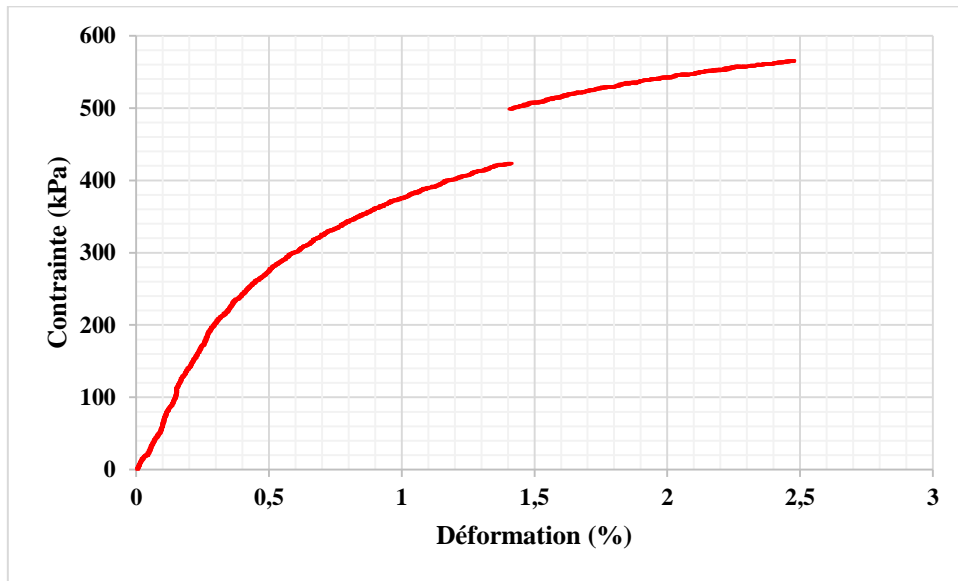


Figure III.49 : courbe de compression simple de sol naturel.

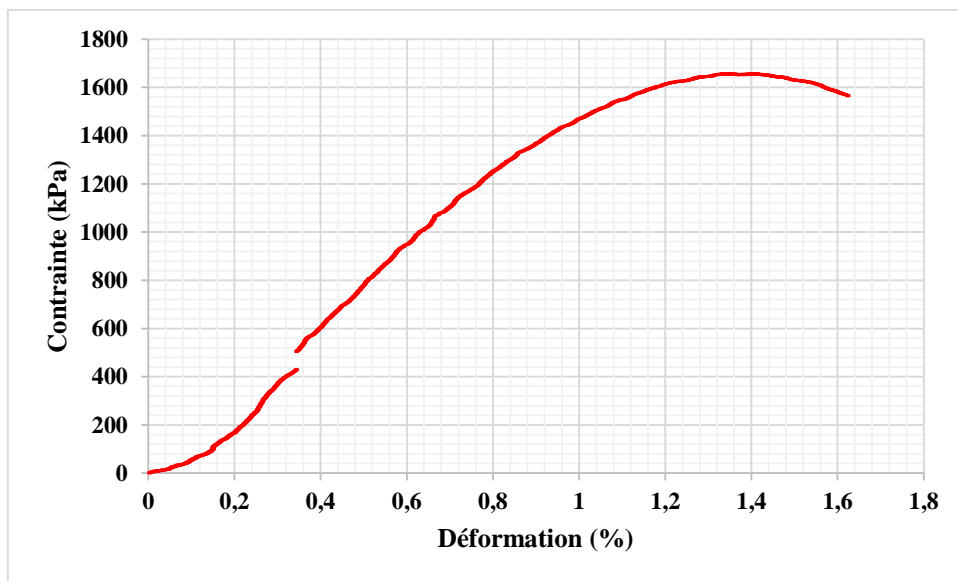


Figure III.50 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 2 %

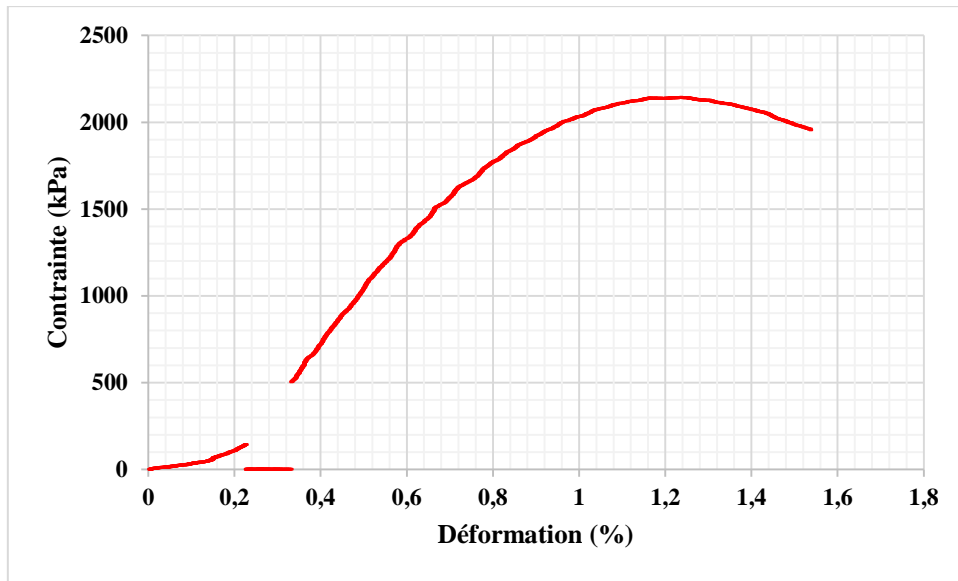


Figure III.51 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 2 %

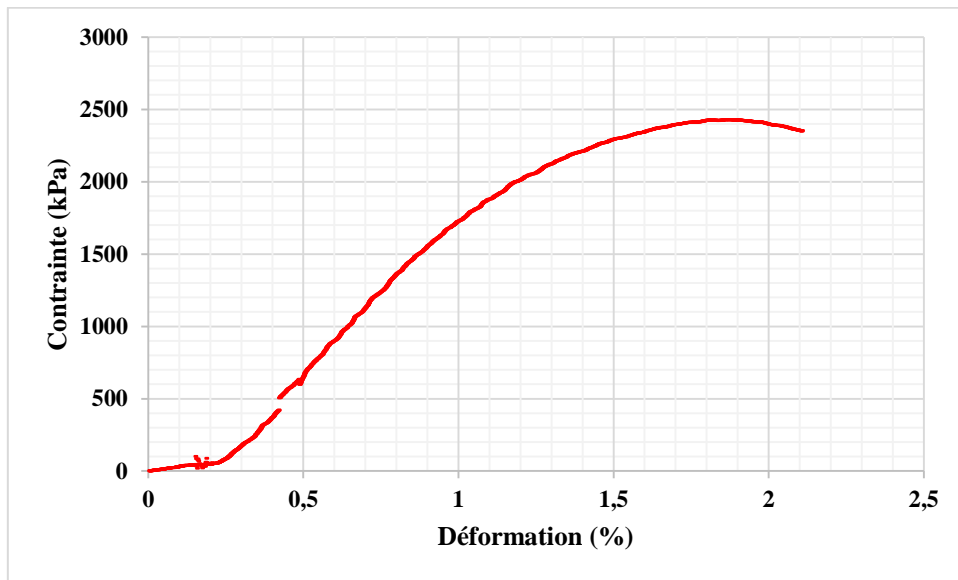


Figure III.52 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 4 %

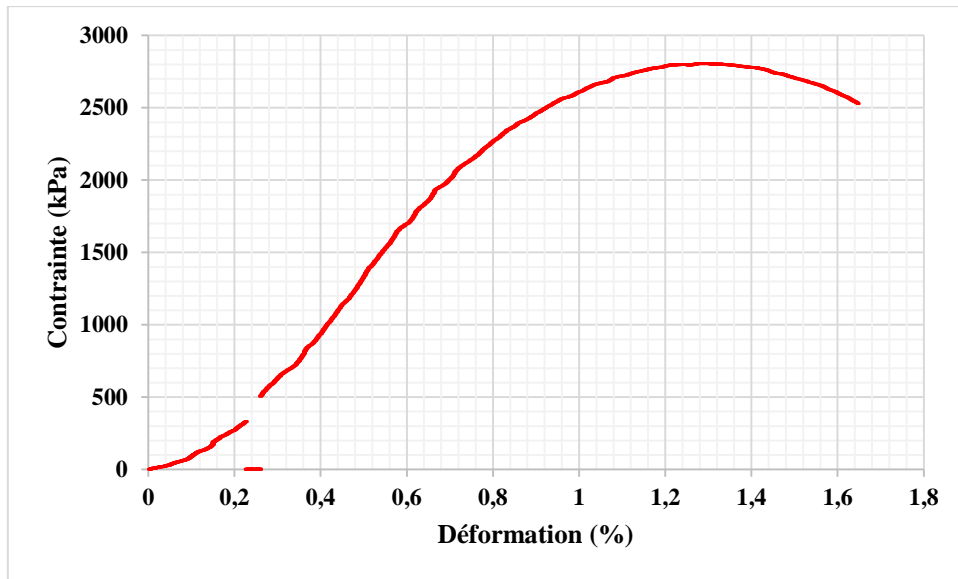


Figure III.53 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 4 %

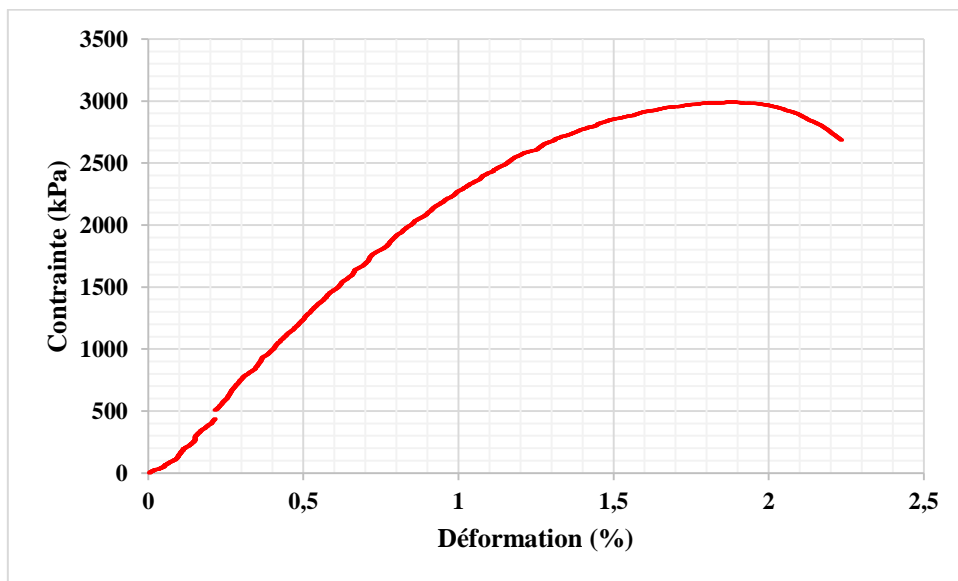


Figure III.54 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 6 %

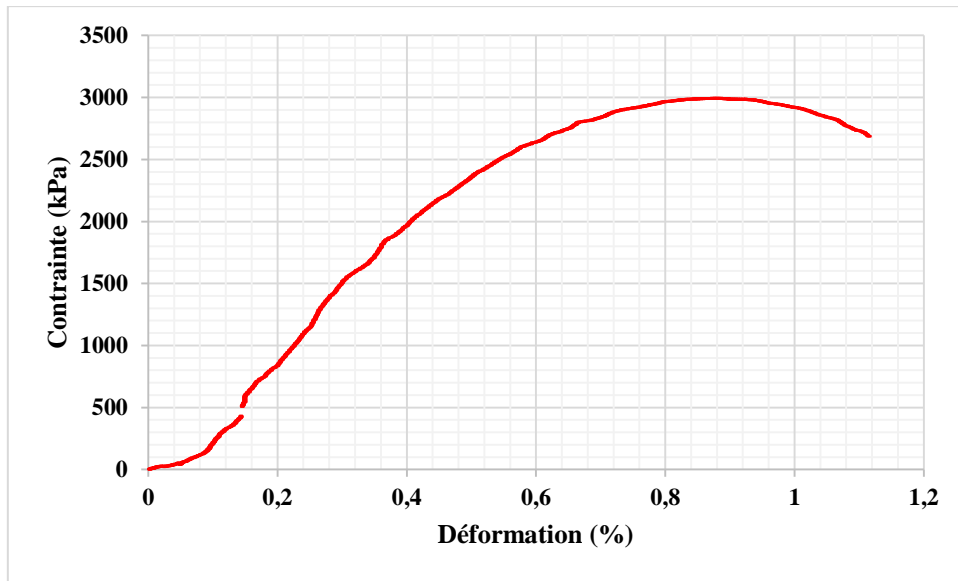


Figure III.55 : courbe de compression simple de sol traité par cimente Chamil 6 %

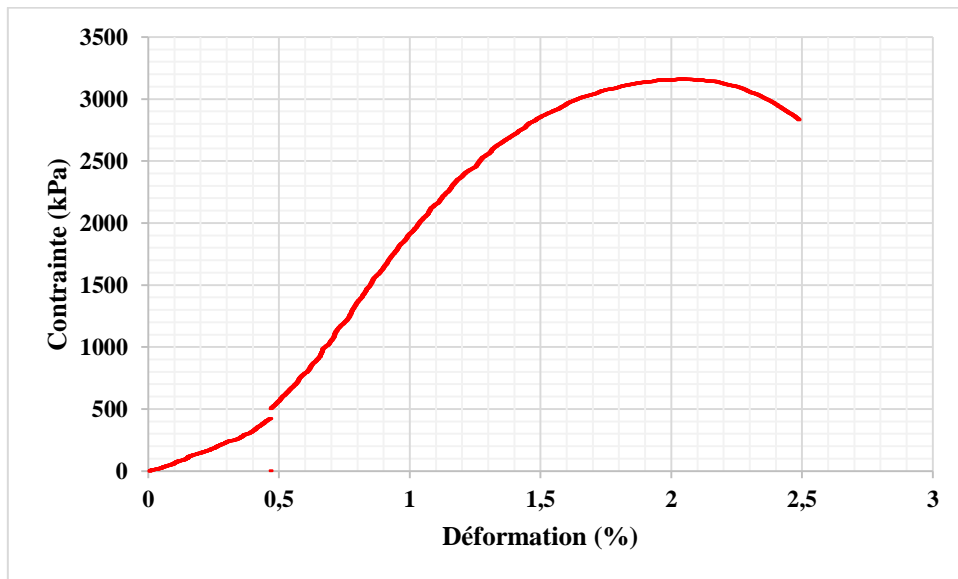


Figure III.56 : courbe de compression simple de sol traité par cimente Chamil 8 %

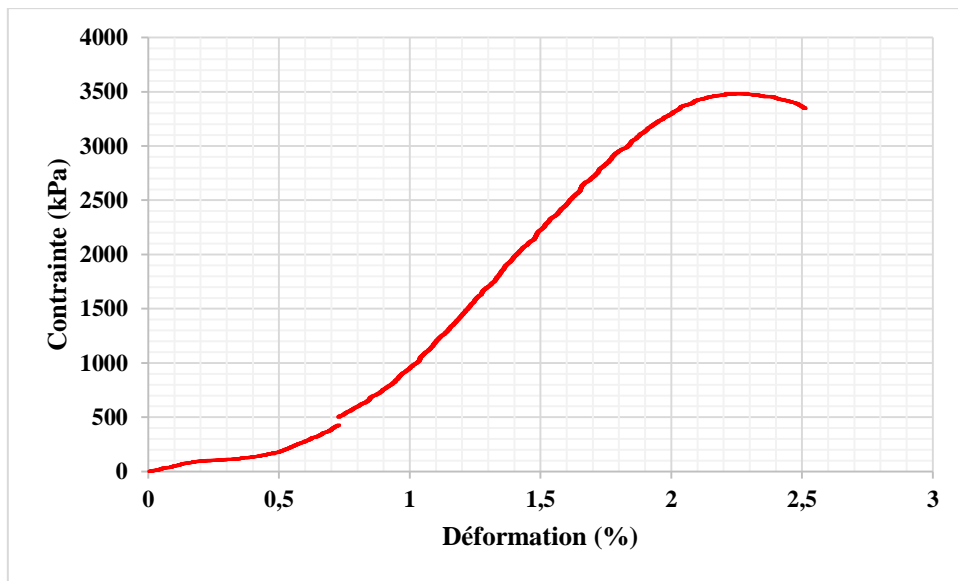


Figure III.57 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 8 %

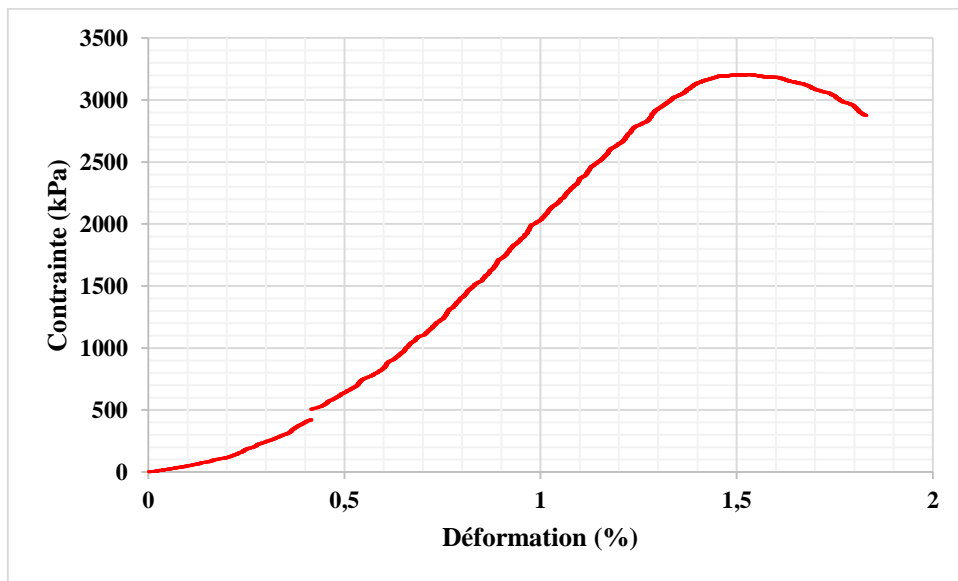


Figure III.58 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 10 %  
➤ Ciment Chamil 14 jours :

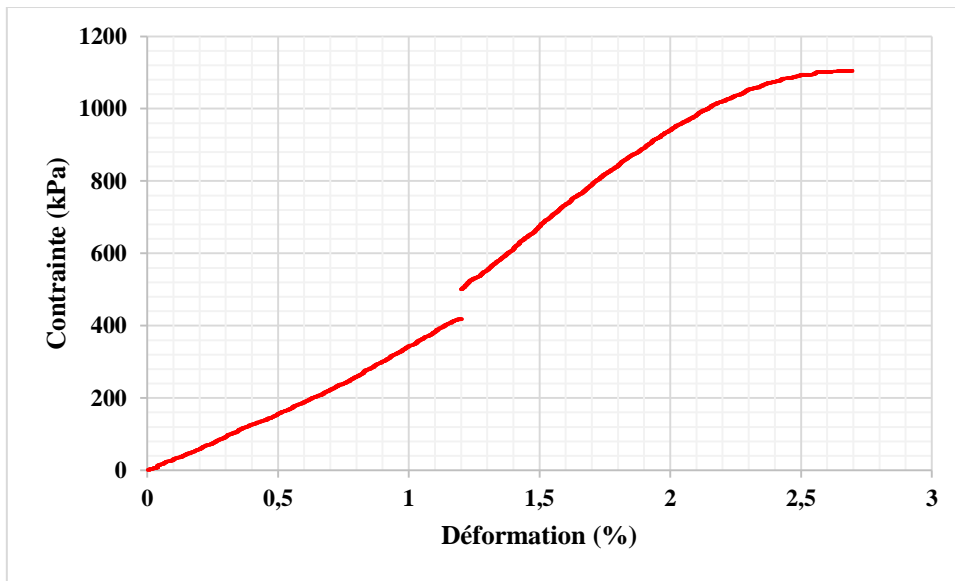


Figure III.59 : courbe de compression simple de sol traité par cimente Chamil 2 %

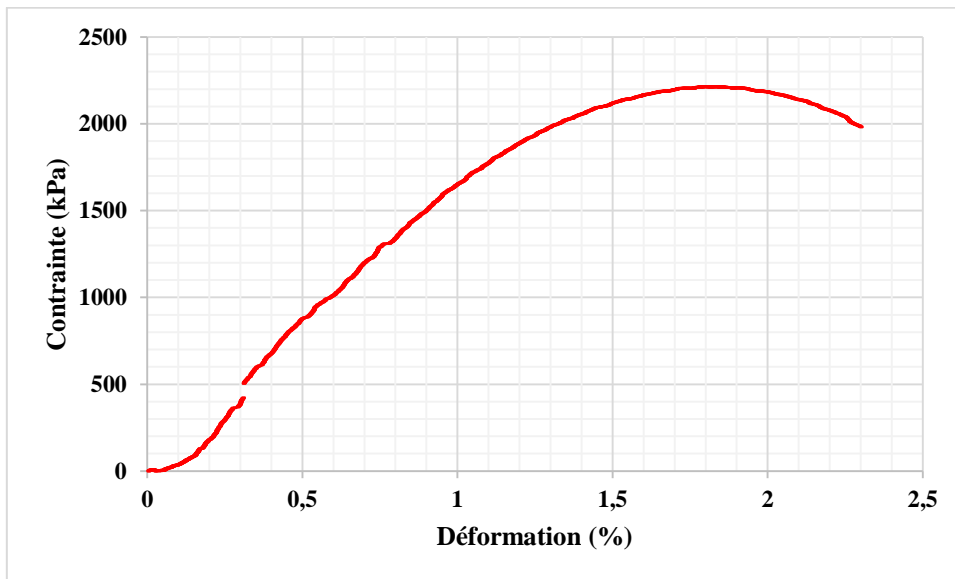


Figure III.60 : courbe de compression simple de sol traité par cimente Chamil 4 %

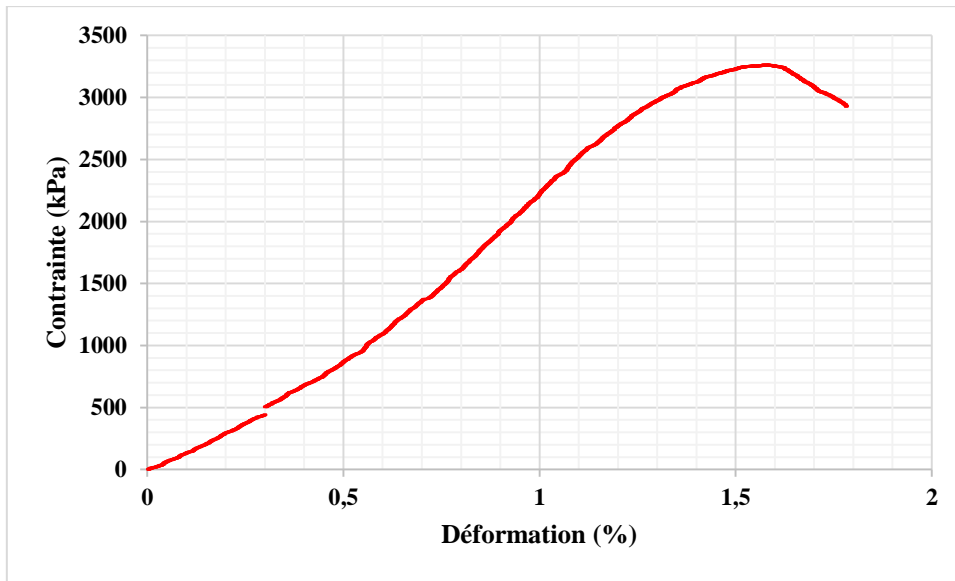


Figure III.61 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 6 %

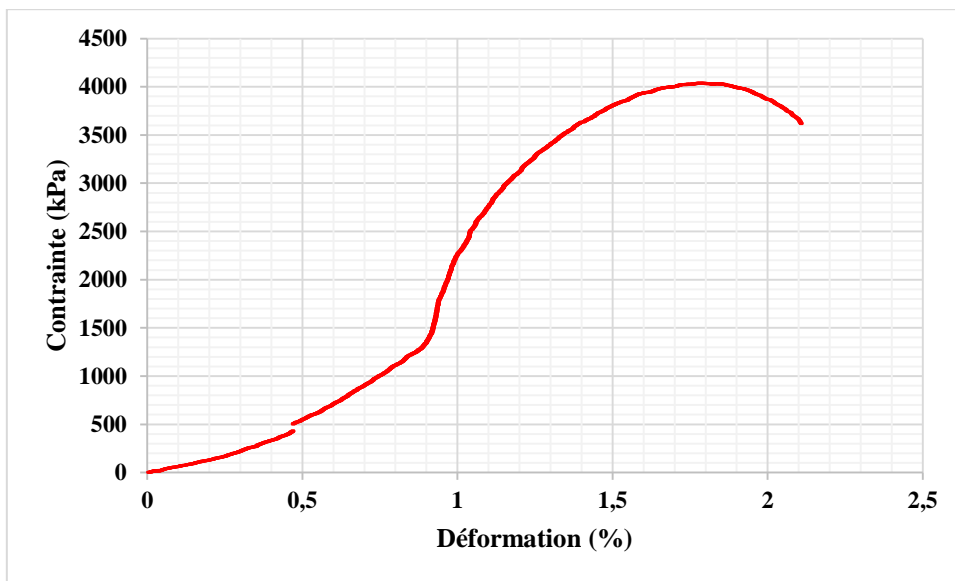


Figure III.62 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 8 %

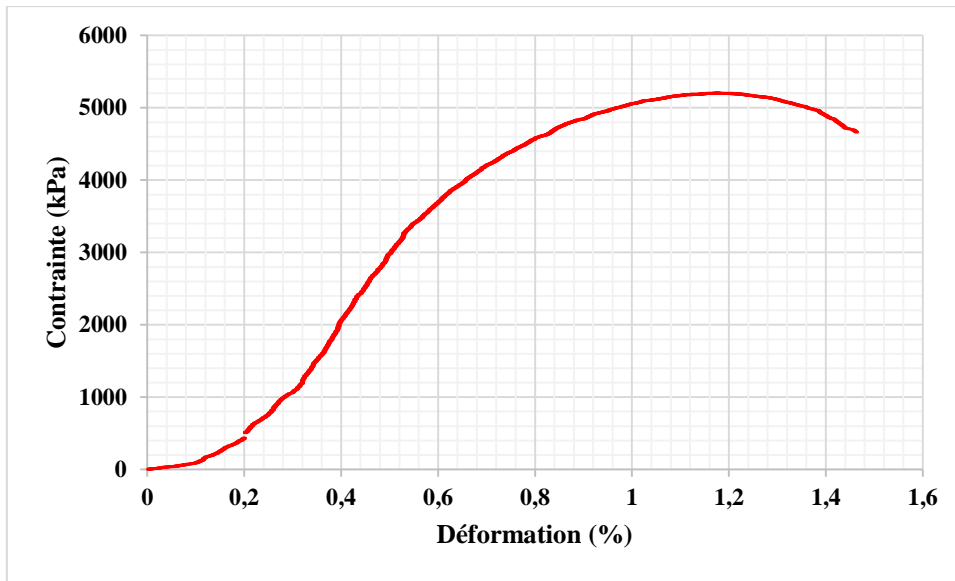


Figure III.63 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 10 %

➤ Ciment Matine 14 jours :

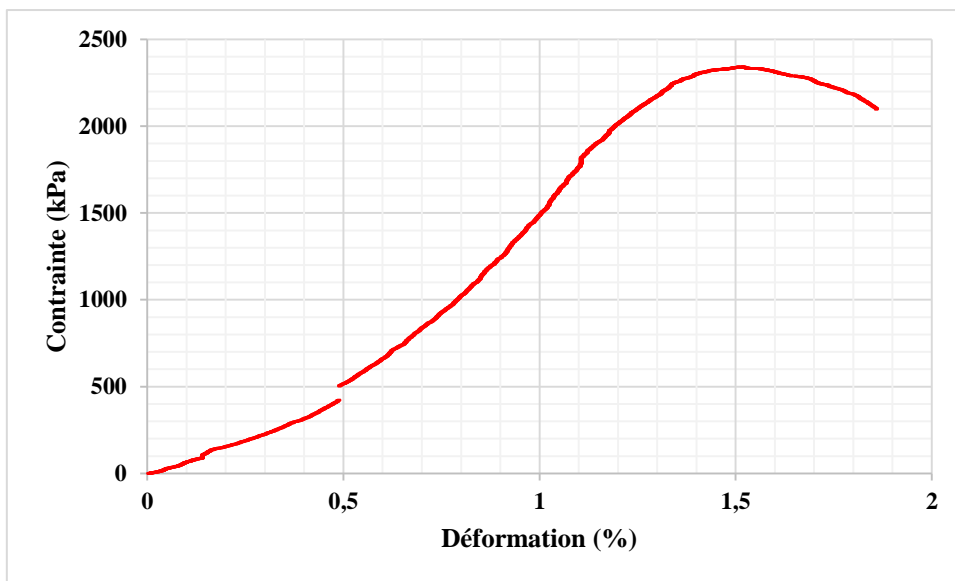


Figure III.64 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Matine 2 %

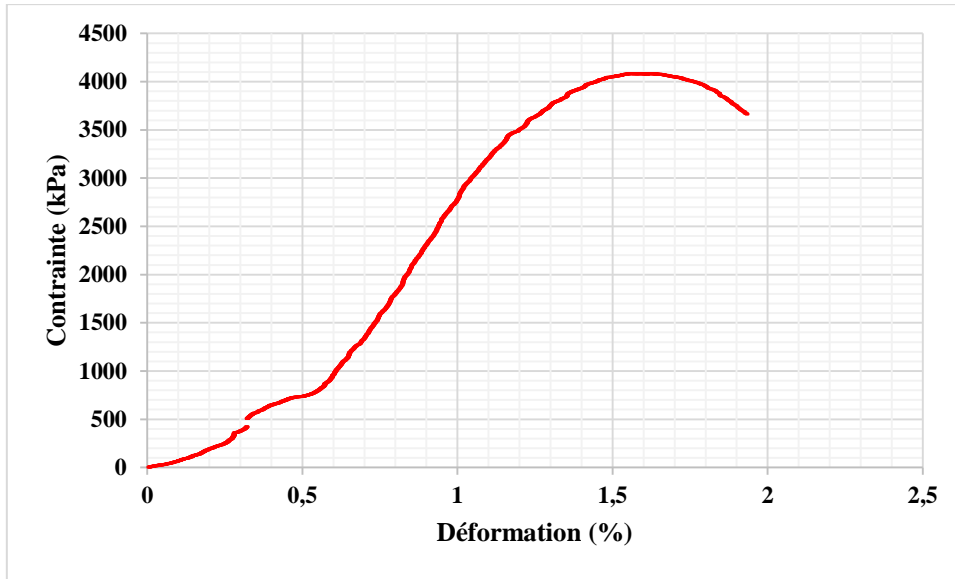


Figure III.65 : courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 4 %

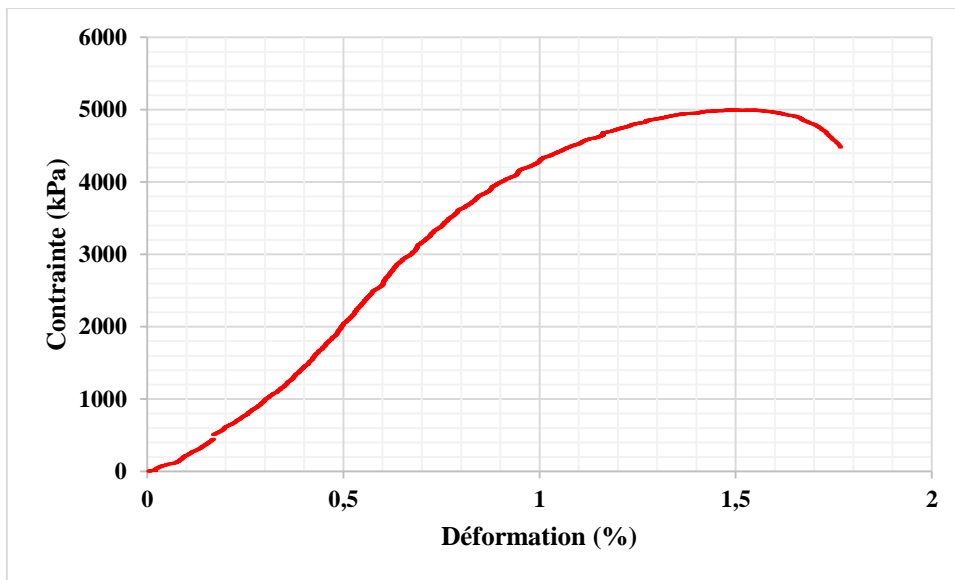


Figure III.66 : courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 6 %

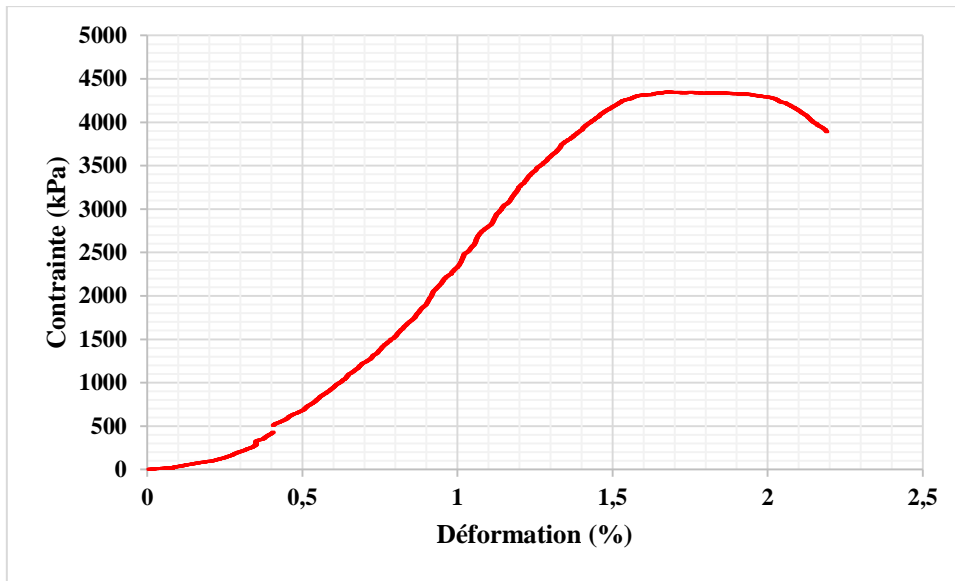


Figure III.67 : courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 8 %

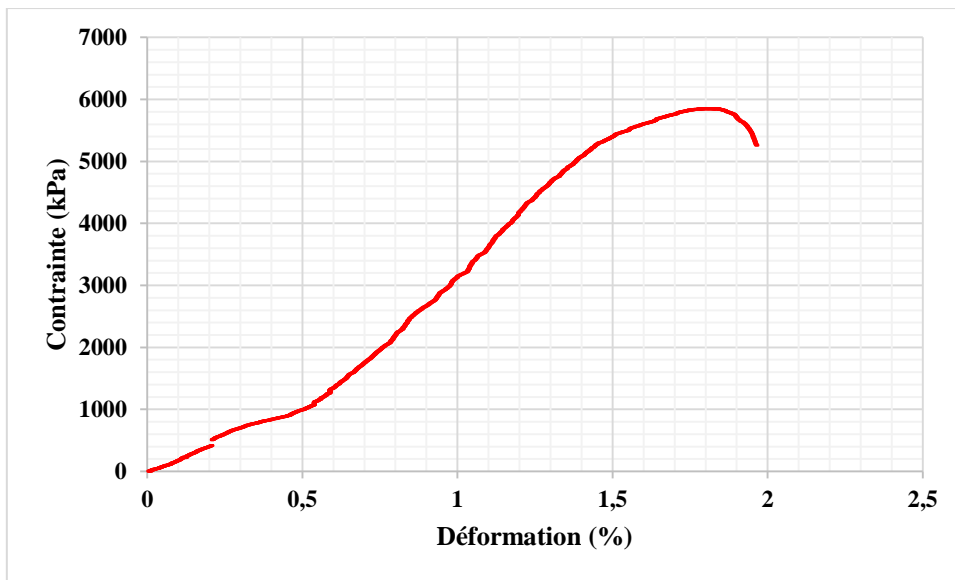


Figure III.68 : courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 10 %

➤ Ciment Chamil 28 jours :

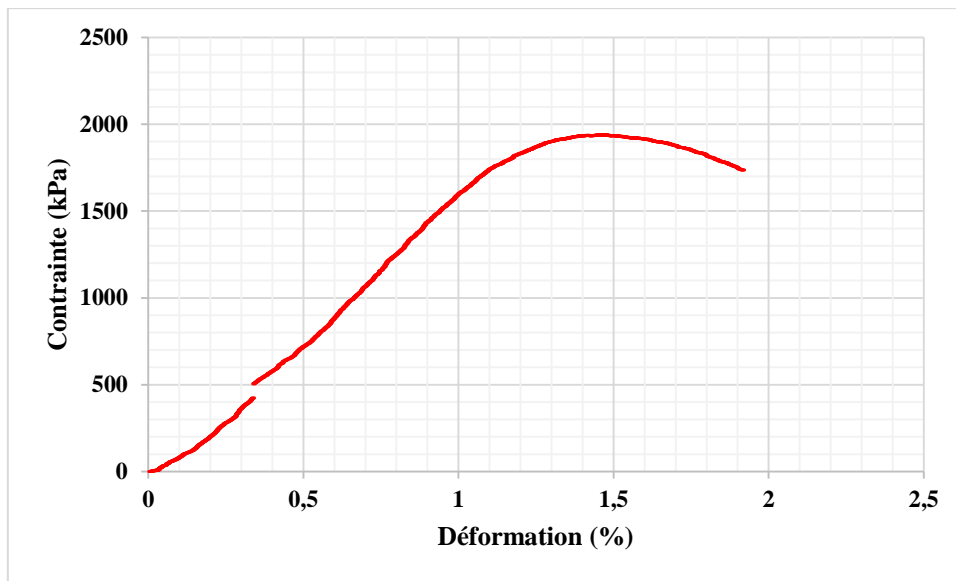


Figure III.69 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 2 %

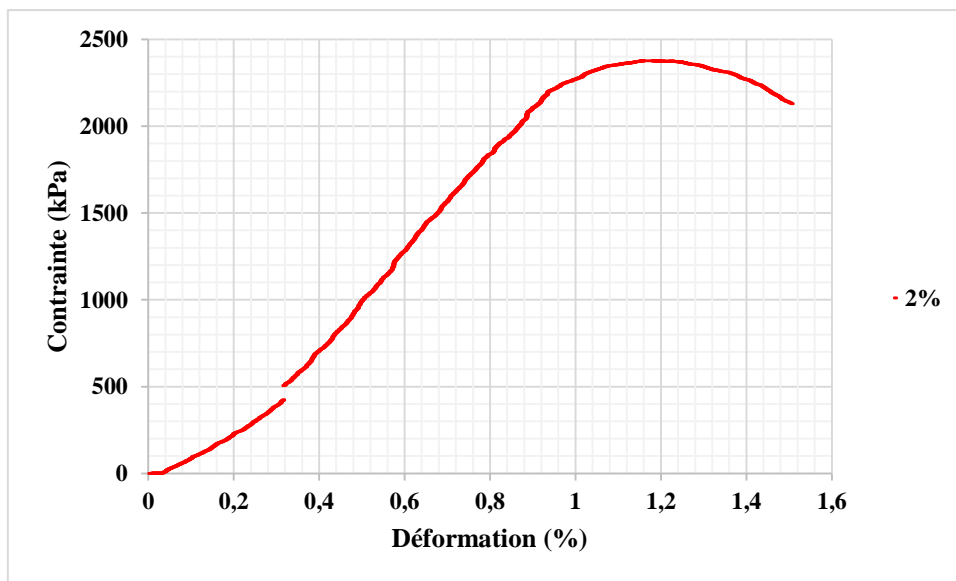


Figure III.70 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 4 %

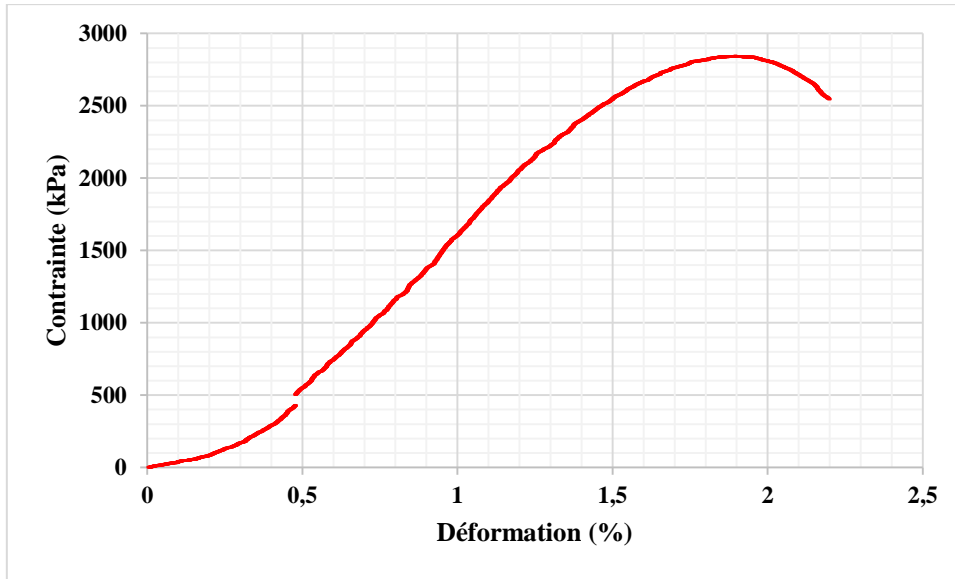


Figure III.71 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 6 %

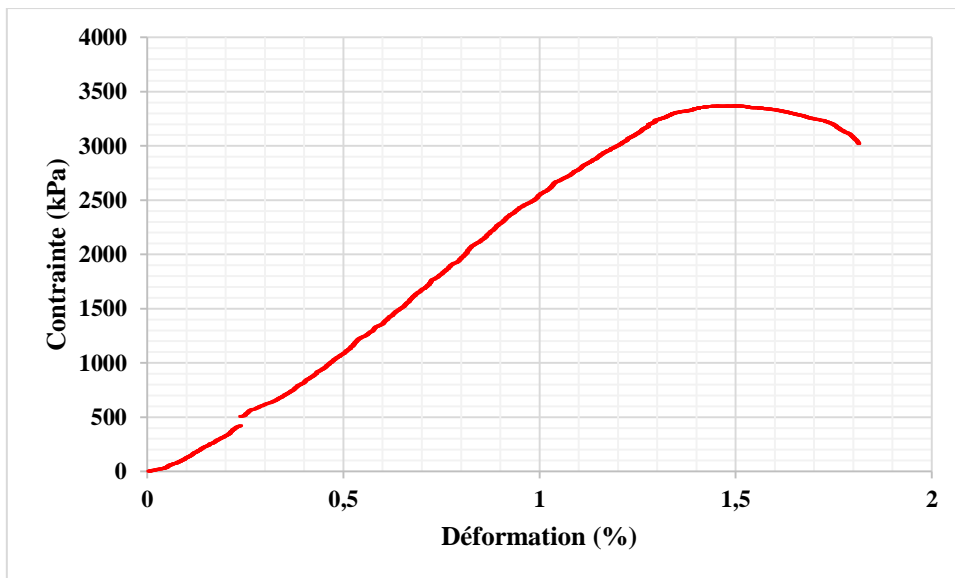


Figure III.72 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 8 %

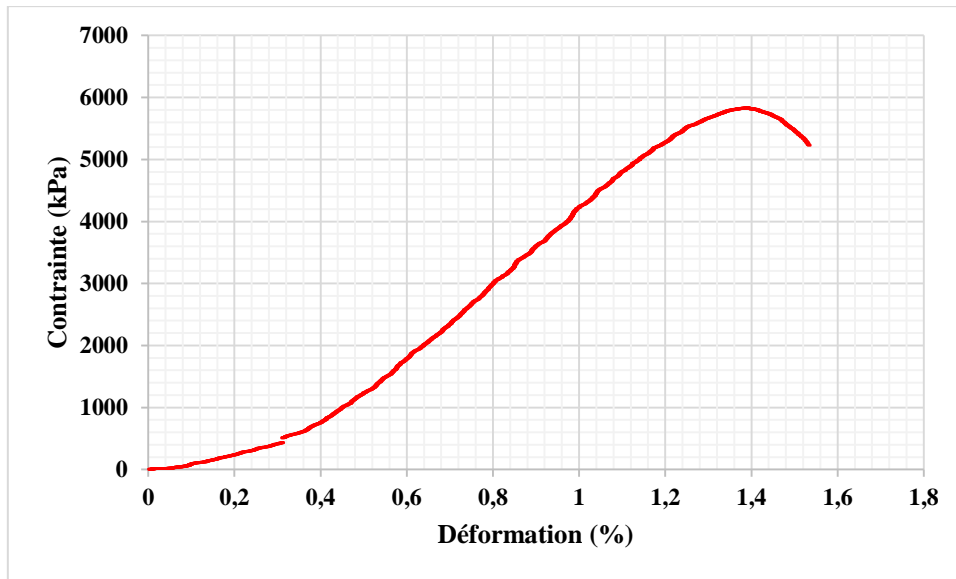


Figure III.73 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Chamil 10 %

➤ Ciment Matine 28 jours :

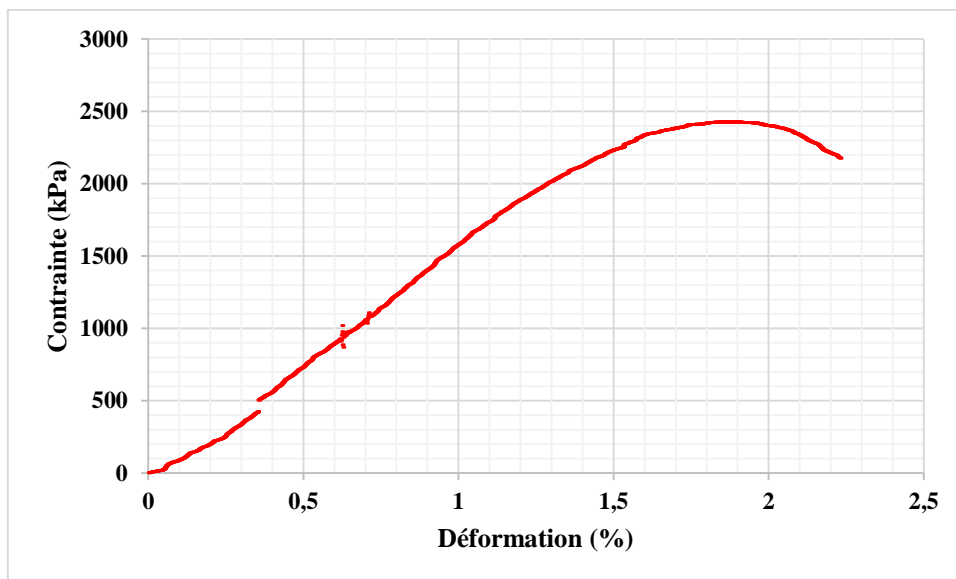


Figure III.74 : courbe de compression simple de sol traité par ciment Matine 2%

## ANNEXES

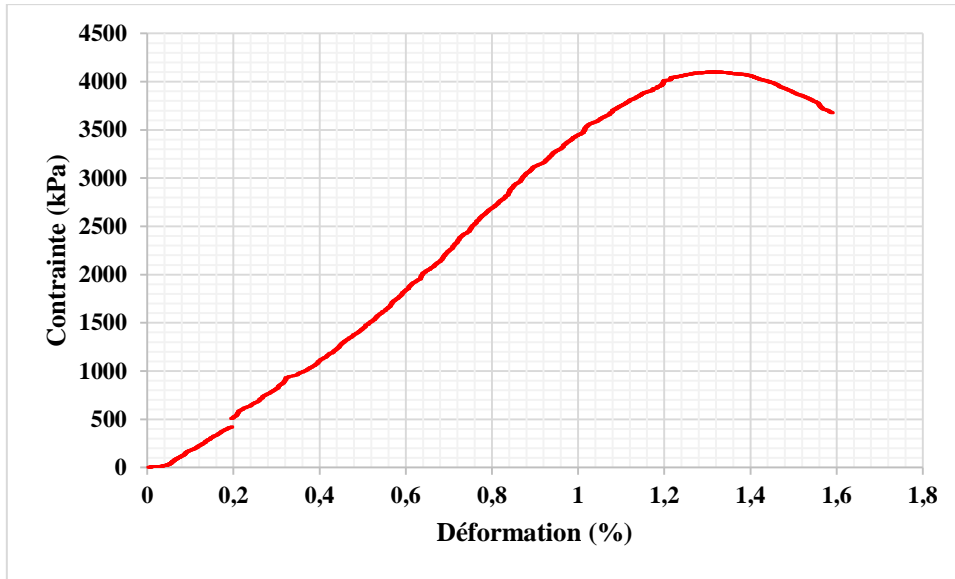


Figure III.75 : courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 4%

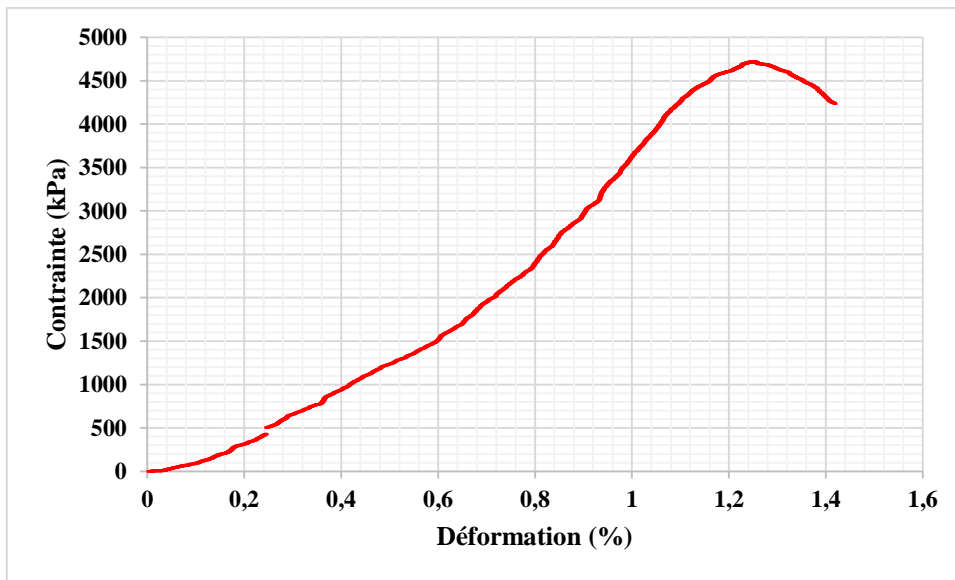


Figure III.76 : courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 6%

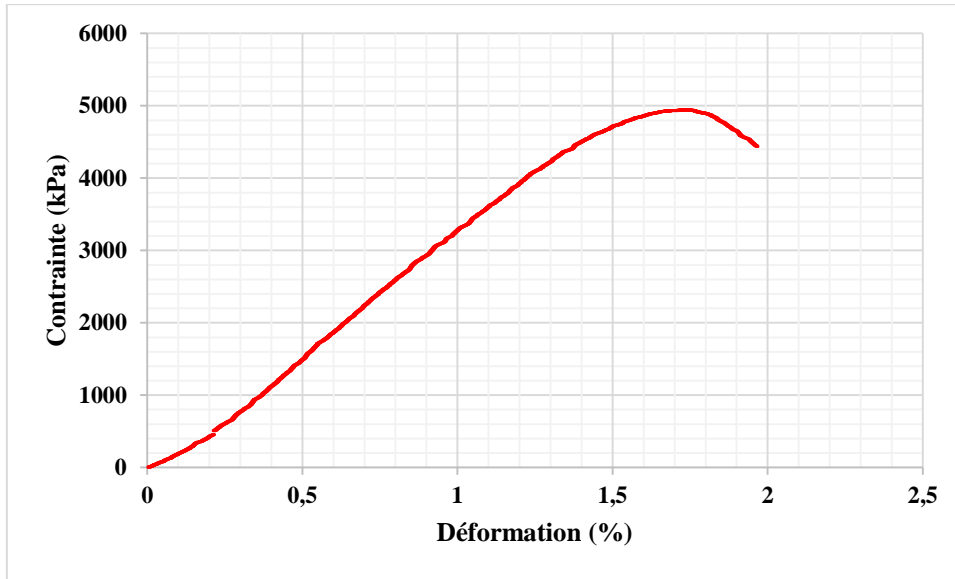


Figure III.77 : courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 8%

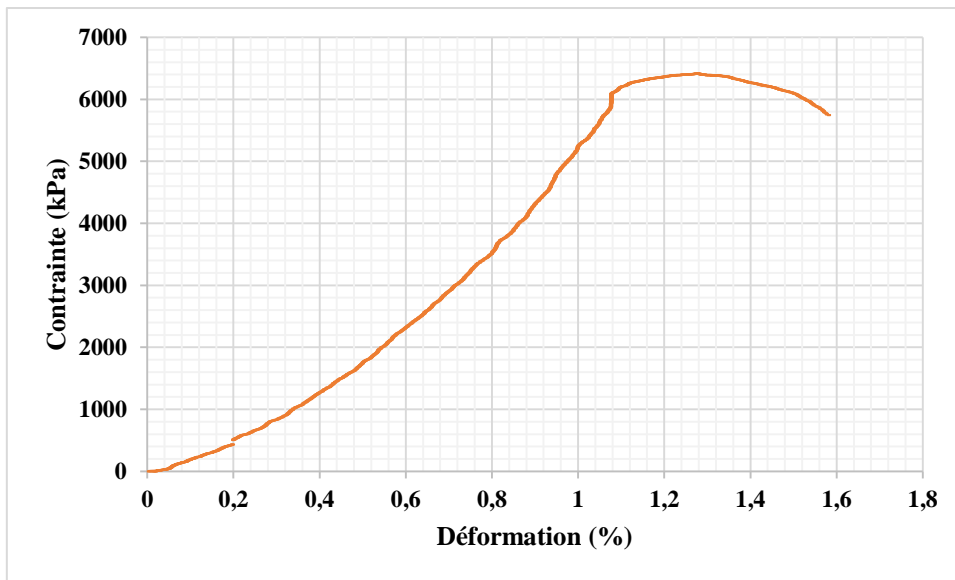


Figure III.78 : courbe de compression simple de sol traité par cimente Matine 10 %