

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

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**



**FILIERE : GENIE CIVIL**

**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

**OPTION : GEOTECHNIQUE**

N° .....

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

**Par :**

**SAFER TABI Aya**

**BACHIRI Aicha**

**Intitulé**

**EFFET DES CONDITIONS DE CURE SUR LA  
RESISTANCE DU SOL TRAITÉ PAR CIMENT**

**(Application au sol de Chaaba El Hamra  
- Wilaya de M'sila)**

**Soutenu devant le jury composé de :**

.....	Université de M'sila	Président
<b>Dr. MEKKI Lakhdar</b>	Université de M'sila	Rapporteur
.....	Université de M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2023 /2024**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# *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.*

*On remercie les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font enjugant ce travail.*

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

*On remercie le doctorant KHADRAOUI Seif eddine.*

*Nous tenons également à remercier chaleureusement le directeur du Laboratoire des Travaux Publics (Labo BINAYA), ainsi que l'ensemble du personnel pour leur aide à certaines étapes de cette étude.*

# إهداء

الحمد الذي خُتِمَ جُهْدٌ ولا تم سعي الا بفضلله

..الى من كلله الله بالهيبة والوقار. إلى من علمني العطاء بدون انتظار

..الى من أحمل اسمه بكل افتخار

والذي العزيز

..الى ملاكي في الحياة. الى معنى الحب والى معنى الحنان والتفاني

الى بسمه الحياة وسر الوجود الى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها

..يلسم جراحي الى أعلى الحبايب

أمي الحبيبة

الى الإخوة والاخوات .. الى من تحلو بالإخاء وتميزوا بالوفاء والعطاء

..والشكر الخالص إلى خطيبي الذي كان داعماً لي طيلة هذا المشوار

الى ينابيع الصدق الصافي الى من معهم سعدت ,وبرفقتهم في دروب الحياة سرت الى  
من كانوا معي على طريق النجاح والخير إلى من عرفت كيف أجدهم و علموني ألا أضيعهم

...صديقاتي...

سفار طبي آية-

# إهداء

الحمد الذي حُتِمَ جُهْدٌ ولا تم سعي الا بفضلله

إلى رجل الكفاح، إلى الذي غرس القيم والأخلاق والمبادئ فينا؛ إلى أبي العزيز  
إلى التي في حضنها وجدت الدفاء وفي ابتسامتها رأيت نور الحياة، إلى التي دعوتها  
تقود دربي؛ أُمِّي العزيز

إلى من كانوا لي أخلاء، إلى من في قوتهم استلهمت شجاعتي، إلى ضلعي الثابت  
الذي لا يميل؛ إلى إخوتي الأعراء (مهدي، مفتاح ومحمد)

إلى رفقاء الدرب، إلى من كانوا لي السند والحب وأمل الحياة؛ إلى سكر البيت أخواتي  
العزيزات (عائدة، أميرة ووفاء)

إلى أولئك الذين أحبوا بلا غرض، وأخلصوا بلا حدود. أنتم الأشقى في الزمان  
الصعب أنتم الأنقى برغم أنات القلب؛ إلى اصدقائي الأعراء

إلى عائلتي الكبيرة، إلى كل من ساند من قريب أو بعيد لإنجاز هذا العمل الشكر  
الخالص لكم

-بشيرى عائشة-

## ملخص

تهدف هذه الدراسة التجريبية هو تقييم تأثير ظروف المعالجة المختلفة والطريقة المستخدمة في إعداد عينات الاختبار على تطور القوة الميكانيكية للتربة في الشعبة الحمراء (بلدية المسيلة) المعالجة بنوعين من الأسمنت (الشمل والمتين) بنسب مختلفة (0% تربة ضابطة - 2% - 4% - 6% - 8% - 10%) لكل نوع من الأسمنت. بالإضافة إلى اختبارات التحديد، يتضمن البرنامج التجريبي اختبارات ضغط بسيطة. ستوفر النتائج التي تم الحصول عليها فهماً أفضل لتأثير معاملات المعالجة وتساعد على تحسين الإجراءات في الموقع لضمان استقرار التربة القائمة على الأسمنت على المدى الطويل.

**الكلمات المفتاحية:** الطمي الطيني، المعالجة، الأسمنت، الضغط البسيط.

## Abstract

The aim of this experimental study was to evaluate the effect of different curing conditions and the method of preparing the specimens on the development of the mechanical strength of the soil at Chaaba El Hamra (M'sila municipality) treated with two types of cement (Chamil and Matine) with different percentages (0% control soil - 2% - 4% - 6% - 8% - 10%) for each type of cement. In addition to the identification tests, the experimental programme includes simple compression tests. The results obtained will provide a better understanding of the influence of curing parameters and help optimise on-site procedures to ensure the long-term stabilisation of cement-based soils.

**Key words:** clayey silt, treatment, cement, simple compression.

## Résumé

Cette étude expérimentale vise à évaluer l'effet de différentes conditions de cure et la méthode de préparation des éprouvettes sur le développement de la résistance mécanique du sol de Chaaba El Hamra (commune de M'sila) traité par deux types de ciments (Chamil et Matine) avec différent pourcentage (0% sol témoin - 2% - 4% - 6% - 8% - 10%) pour chaque type de ciment. Outre les essais d'identification, le programme expérimental exécuté comporte des essais de compression simple. Les résultats obtenus permettront de mieux comprendre l'influence des paramètres de cure et d'optimiser les procédures sur chantier pour assurer une stabilisation durable des sols au ciment.

**Mots-clés :** limon-argileux, traitement, ciment, compression simple.

## LISTE DES FIGURES :

<b>Figure I.1</b> : Présentation d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique .....	4
<b>Figure I.2</b> : Présentation d'un octaèdre et d'une couche octaédrique .....	4
<b>Figure I.3</b> : Structure des argiles du groupe des smectites .....	5
<b>Figure I.4</b> : Ouverture des fissures en proximité des matériaux rigides Montes et al (Goufi et al, 2021) .....	5
<b>Figure I.5</b> : Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles, (Mitchell, 1976) .....	7
<b>Figure I.6</b> : Fissuration due au retrait et gonflement des sols .....	9
<b>Figure I.7</b> : Fissures, tassements sur la plateforme du stade à Bejaia .....	9
<b>Figure I.8</b> : Glissement de terrain sur la Route coupée à Bouzaréah .....	10
<b>Figure I.9</b> : Affaissement à Ben Aknoun (Alger) .....	11
<b>Figure I.10</b> : Techniques de pré chargement .....	13
<b>Figure I.11</b> : Éléments d'un mur de soutènement en Terre Armée .....	14
<b>Figure I.12</b> : Phases d'exécution des colonnes ballastées .....	16
<b>Figure I.13</b> Colonne de sol traité à la chaux .....	16
<b>Figure I.14</b> : Compactage de Sol par Rouleau de Route .....	17
<b>Figure I.14</b> : Compactage de Sol par Rouleau de Route .....	18
<b>Figure I- 16</b> : stabiliser des sols avec de la chaux .....	19
<b>Figure I.17</b> : Traitement des sols au Ciment .....	20
<b>Figure II.1</b> : Localisation du site Chaaba El Hamra (wilaya de M'sila) .....	28
<b>Figure II.2</b> : Le sol du Chaaba El Hamra .....	29
<b>Figure III.3</b> : Ciment MATINE .....	29
<b>Figure III.4</b> : Ciment CHAMIL ... ..	30
<b>Figure II.5</b> : Appareillage d'analyse granulométrique (tamisage) .....	31
<b>Figure II.6</b> : L'essai de sédimentométrie .....	32
<b>Figure II.7</b> : Appareillage de limites d'Atterberg .....	32
<b>Figure II.9</b> : Valeurs de bleu de quelques sols .....	33
<b>Figure II.10</b> : Appareillage de l'essai au bleu de méthylène .....	33
<b>Figure II.10</b> : Moule des éprouvettes .....	34
<b>Figure II.11</b> : Essais de compression simple .....	35
<b>Figure III.1</b> : Courbe d'analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie) de sol Chaaba El Hamra .....	39

<b>Figure III.2 :</b> La courbe de limite de liquidité du sol naturel .....	41
<b>Figure III.3 :</b> Les limites d'Atterberg en fonction des différents teneurs en ciment Chamil.....	43
<b>Figure III.4 :</b> Teneur en eau en fonction des différents teneurs en ciment Matine .....	43
<b>Figure III.5 :</b> Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment Matine....	44
<b>Figure III.6 :</b> Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment Chamile.....	45
<b>Figure III.7 :</b> courbes de compression simple de sols traité par ciment Matine (28 jours)....	50
<b>Figure III.8 :</b> courbes de compression simple de sols traité par ciment Matine (14 jours) ....	51
<b>Figure III.9 :</b> courbes de compression simple de sols traité par ciment Matine (7jours) .....	51
<b>Figure III.10 :</b> l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Chamil (M 02 ;14 jours) .....	51
<b>Figure III.11 :</b> l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Matine (M02 ;14 jours) .....	52
<b>Figure III.12 :</b> l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Chamil (M02 ;28 jours) .....	52
<b>Figure III.13 :</b> l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Matine (M02 ;28jours) .....	53
<b>Figure III.14 :</b> l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Chamil (M02 ;07jours) .....	53
<b>Figure III.15 :</b> l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Matine (M02 ;07jours) .....	54
<b>Figure III.16 :</b> l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Chamil (M 01 ;07jours) .....	54
<b>Figure III.17 :</b> l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Matine (M 01 ;07jours) .....	55
<b>Figure III.18 :</b> l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment chamil (M01 ;14jours) .....	55
<b>Figure III.19 :</b> l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Matine (M 01 ;14jours) .....	56
<b>Figure III.20 :</b> l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Matine (M01 ;28jours) .....	56
<b>Figure III.21 :</b> l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple (M01 ;28jours) ciment chamil .....	57
<b>Figure III.22 :</b> l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Chamile;7 jours) .....	57

<b>Figure III.23</b> : l'effet de la méthode de préaération des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Chamile;7 jours) .....	58
<b>Figure III.24</b> : l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Matine;7 jours) .....	58
<b>Figure III.25</b> : l'effet de la méthode de préaération des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Matine;7 jours) .....	59
<b>Figure III.26</b> : l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Chamile;14 jours) .....	59
<b>Figure III.27</b> : l'effet de la méthode de préaération des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Chamile;14 jours) .....	60
<b>Figure III.28</b> : l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Matine;14 jours) .....	60
<b>Figure III.29</b> : l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Matine;14 jours) .....	61
<b>Figure III.30</b> : l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Chamile;28 jours) .....	61
<b>Figure III.31</b> : l'effet de la méthode de préaération des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Chamile;28 jours) .....	62
<b>Figure III.32</b> : l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Matine;28 jours) .....	62
<b>Figure III.33</b> : l'effet de la méthode de préaération des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Matine;28 jours) .....	63

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1</b> : Caractéristiques de certaines familles d'argile (Morel R. 1996) .....	6
<b>Tableau I.2</b> : Définition des 5 classes de ciment courant .....	21
<b>Tableau I.3</b> : Synthèse sur les dosages en stabilisants pratiqués pour le traitement des sols selon les recommandations du Centre de Recherches Routières en Belgique (CRR, 2004) .....	25
<b>Tableau III.1</b> : Récapitulatif des résultats des essais de l'analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie) .....	39
<b>Tableau III.2</b> : Les résultats de limite de liquidité Essai N°1 .....	40
<b>Tableau III.3</b> : Les résultats de limite de plasticité .....	40
<b>Tableau III.4</b> : Récapitulatif des résultats des essais de limite d'Atterberg (Sol non traité) ....	41
<b>Tableau III 5</b> : Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg (Sol traité par ciment Chamil) .....	42
<b>Tableau III.6</b> : Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg traité par ciment Matine .....	42
<b>Tableau III.7</b> : L'essai au bleu de méthylène sol naturel .....	43
<b>Tableau III.8</b> : Récapitulatif des résultats de bleu de méthylène traité par ciment Matine.....	44
<b>Tableau III.9</b> : Récapitulatif des résultats de bleu de méthylène traité par ciment Chamil.....	44
<b>Tableau III.10</b> : L'analyse chimique par XRF .....	45
<b>Tableau III.11</b> : L'analyse chimique par DRX .....	46
<b>Tableau III.12</b> : Classification des sols selon GTR .....	48
<b>Tableau III.13</b> : Récapitulatif des résultats des essais de Proctor normal du sol de Chaaba Elhamra traité par cimente Chamil. (Mimoune & Lauofi; 2022) .....	48
<b>Tableau III.14</b> : Récapitulatif des résultats des essais de Proctor normal du sol de Chaaba Elhamra traité par cimente Matine . (Mimoune & Lauofi; 2022) .....	49

## LISTE DES NOTATIONS

- CRR** : Centre de Recherches Routières
- CEM I à V** : Classes de Ciment (selon NF EN 197-1).
- Mt** : Masse de tare (g)
- Mh** : masse d'humide (g).
- Md** : masse de sol sec (g).
- Mw**: masse d'eau (g).
- W** : Teneur en Eau (%)
- Wl** : Limite de liquidité (%).
- Wp** : Limite de plasticité (%).
- Ip** : Indice de plasticité (%).
- M** : Masse (g).
- V** : volume (cm<sup>3</sup>).
- VBS** : Valeur du bleu de méthylène (cm<sup>3</sup>/g).
- C** : Température (°)
- Pdopt** : Masse volumique sèche Optimum Proctor
- Wopt** : Teneur en eau à L'optimum Proctor (%)
- γ** : Poids volumique.
- γd** : Poids volumique sec (g/cm<sup>3</sup>)
- IPI** : Indice portant immédiat.
- RC** : Résistance de Compression de l'éprouvette (Mpa)
- F** : charge maximale supportée par l'éprouvette (kN).

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>2</b>
<b>I.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 LES SOLS.....</b>	<b>3</b>
<b>I.3 Les Argiles .....</b>	<b>3</b>
I.3.1 Définition .....	3
I.3.2 Types d'argile .....	4
I.3.3 Texture des argiles .....	5
<b>I.4 Les Marnes .....</b>	<b>7</b>
<b>I.5 Les Limons .....</b>	<b>7</b>
<b>I.6 Problèmes des sols instables.....</b>	<b>7</b>
I.6.1 Gonflement .....	8
I.6.2 Tassement : .....	8
I.6.3 Glissement : .....	9
I.6.4 Affaissement : .....	9
<b>I.7 TRAITEMENT DES SOLS .....</b>	<b>10</b>
I.7.1 Objectifs du traitement.....	10
I.7.2 Techniques de traitement des sols.....	11
<b>I.8 CONCLUSION .....</b>	<b>24</b>
<b>CHAPITREII : PROGRAMME EXPERIMENTAL ET PROCEDURES D'ESSAIS ...</b>	<b>25</b>
<b>II.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>26</b>

<b>II.2. DESCRIPTION DE LA REGION D'ETUDE.....</b>	<b>26</b>
<b>II.3 MATERIAUX.....</b>	<b>27</b>
II.2.1 Le Sol utilisé.....	27
II.2.2 Les ciments utilisés.....	27
<b>III.4 LE PROGRAMME EXPERIMENTAL.....</b>	<b>29</b>
II.4.1 Essais d'identifications .....	29
II.4.2 Essais de compression simple (NF P 94-077) : .....	32
<b>CHAPITRE III : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS .....</b>	<b>35</b>
<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>36</b>
<b>III.2 Résultats des Essais .....</b>	<b>36</b>
III.2.1 Les essais d'identification .....	36
III.2.2 Essai mécanique : .....	44
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>64</b>

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

La stabilisation des sols aux liants hydrauliques, notamment au ciment, est une technique de plus en plus utilisée dans les projets de génie civil pour valoriser les ressources locales de sols et réduire les coûts liés à l'utilisation de matériaux d'emprunt. Le traitement des sols fins au ciment permet d'améliorer leurs propriétés géotechniques telles que la résistance, la déformabilité et la durabilité, en vue de répondre aux exigences requises pour la construction d'infrastructures comme les routes, autoroutes, voies ferrées ou plateformes industrielles.

Cependant, les performances mécaniques des sols traités au ciment dépendent de nombreux facteurs comme la nature du sol, le type et dosage du liant, les conditions de malaxage et compactage, mais aussi des conditions de cure pendant la période de prise et de durcissement du liant (ACI 230 ; 2009). C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude, qui vise à évaluer l'effet de différentes conditions de cure sur le développement de la résistance mécanique du sol de Chaaba El Hamra (12 km Nord de la ville de M'Sila) traité par deux types de ciments (Chamil et Matine) avec différent pourcentage (0% sol témoin – 2% - 4% - 6% - 8% - 10%) pour chaque type de ciment. Les résultats permettront de mieux comprendre l'influence des paramètres de cure et d'optimiser les procédures sur chantier pour assurer une stabilisation durable des sols au ciment.

Ce mémoire se compose de trois chapitres :

- La premier Chapitre présente une synthèse bibliographique sur les techniques de traitement des sols
- Chapitre II : présente le contexte de l'étude avec la description du site de prélèvement (Chaaba El Hamra ; wilaya de M'sila), et regroupe l'ensemble des essais expérimentaux ainsi que les procédures suivies.
- Chapitre III : présente et analyse les résultats des essais effectués sur le sol avant et après leur traitement au ciment.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et une liste de références bibliographiques.

# **Chapitre I**

**SYNTHESE**

**BIBLIOGRAPHIQUE**

## **I.1 INTRODUCTION**

Le traitement des sols représente un ensemble des méthodes conçues pour améliorer les caractéristiques géotechniques défavorables de certains types de sols, tels que leur faible capacité portante, leur importante compressibilité ou encore leur sensibilité aux phénomènes de retrait ou de gonflement. Ces techniques consistent à modifier la composition et la structure des sols concernés. Parmi les approches les plus répandues, on retrouve l'utilisation de liants hydrauliques tels que le ciment.

Cette synthèse bibliographique décrit les différents types de sol et les diverses techniques pour améliorer le sol, actuellement en usage, notamment le cas du traitement chimique aux liants hydrauliques et particulièrement le traitement au ciment.

## **I.2 LES SOLS**

Un sol est un assemblage hétérogène de particules ou de cristaux aux propriétés très variables : dimensions, formes, propriétés physico-chimiques, etc. Il est composé de trois phases, phase solide (Squelette minéral), phase liquide et phase gazeuse. Chaque phase joue un rôle bien précis dans le comportement du sol. Un sol contenant de l'argile sera influencé par la teneur en eau, c'est une question centrale en géotechnique.

## **I.3 Les Argiles**

### **I.3.1 Définition**

Les argiles sont des matériaux naturels complexes composés principalement de phyllosilicates hydratés de très petite taille. Leur structure est constituée de feuillets élémentaires empilés en cristallites (Tessier & Grimaldi, 1993) ou empilements (Pufahl et al., 1999). L'espace entre deux feuillets adjacents est appelé espace interfoliaire. Les cristallites s'agencent elles-mêmes face contre face pour former les particules argileuses élémentaires.

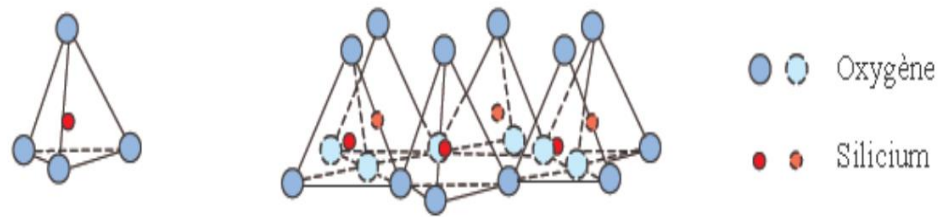


Figure I.1 Présentation d'un tétraèdre et d'une couche tétraédrique

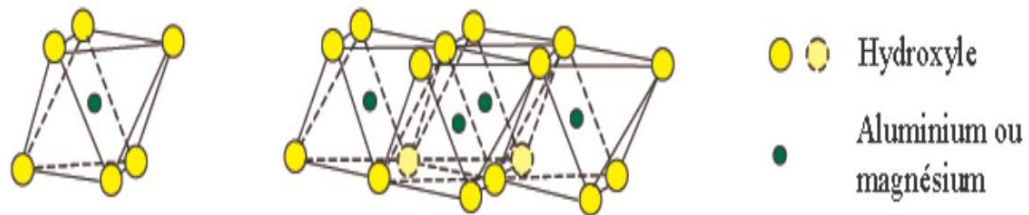


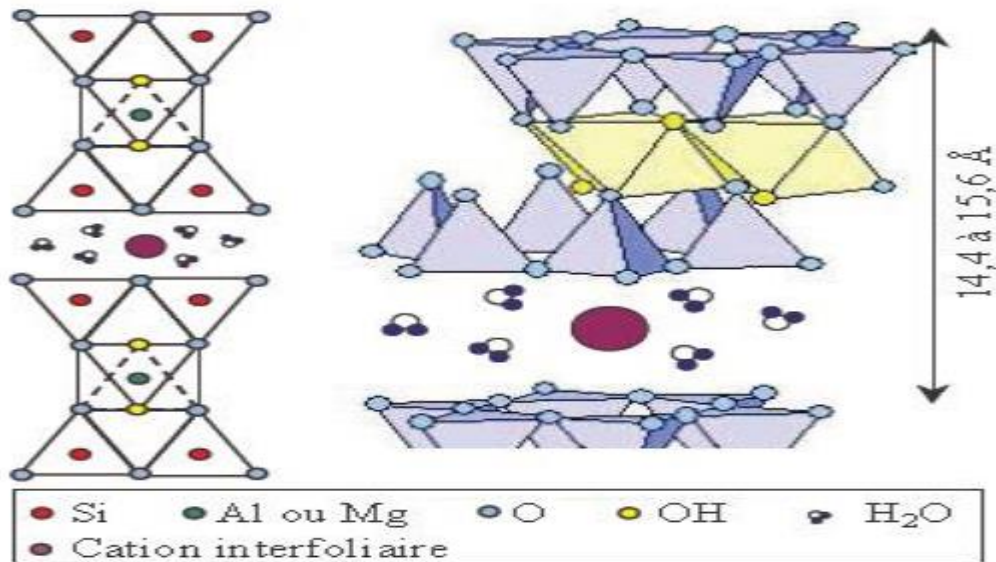
Figure I.2 Présentation d'un octaèdre et d'une couche octaédrique

### I.3.2 Types d'argile

On distingue généralement trois grands groupes d'argiles selon leur structure minéralogique en feuillets :

1. Les kaolinites (argiles T-O) feuillets constitués d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique reliées par des liaisons hydrogène fortes. Ce sont des argiles peu réactives.
2. Les illites (argiles T-O-T) feuillets à trois couches : deux tétraédriques encadrant une octaédrique. Les feuillets sont maintenus par des ions potassium énergétiques
3. Les smectites (argiles T-O-T) structure similaire aux illites avec trois couches par feuillet, mais sans véritable liaison maintenant les feuillets. Substitutions fréquentes Al/Fe/Mg dans les feuillets (Famille très réactive regroupant notamment :
  - La montmorillonite : smectite de référence, très gonflante
  - La bentonite : smectite d'origine volcanique utilisée en génie civil

Dans le cadre du traitement des sols par le ciment, ce sont surtout les smectites qui posent problème. Leur structure instable et leur fort potentiel de gonflement/retrait perturbent les réactions d'hydratation et de prise (Oti et al., 2009). L'optimisation des conditions de cure est donc cruciale.



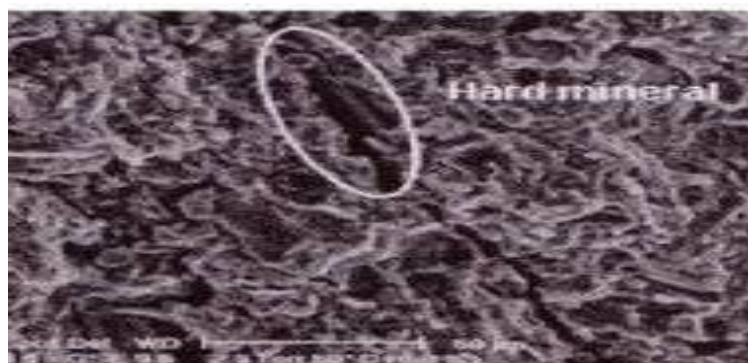
**Figure I.3 :** Structure des argiles du groupe des smectites

### I.3.3 Texture des argiles

La texture des matériaux argileux dépend principalement de leur mode de sédimentation et de leur état de consolidation (Mitchell & Soga 2005). Une roche argileuse présentant une organisation serrée et orientée des particules aura un comportement de gonflement différent d'un sol argileux issu d'une sédimentation rapide et récente où les plaquettes sont plus espacées (Wakim 2005). Cette organisation structurale des minéraux argileux est la cause principale des gonflements anisotropes observés, c'est-à-dire non uniformes selon les directions, en raison des orientations préférentielles des particules (Dorbitz 1986).

De plus, les matériaux argileux sont rarement composés uniquement d'argiles. Au sein de la fraction argileuse coexistent divers types de minéraux argileux (kaolinite, illite, smectite...) mais aussi des minéraux non argileux comme les carbonates, les sulfates, les oxydes... (Moore & Reynolds 1997). La texture résulte donc de la superposition complexe des organisations des différents minéraux argileux et non argileux. Cette hétérogénéité

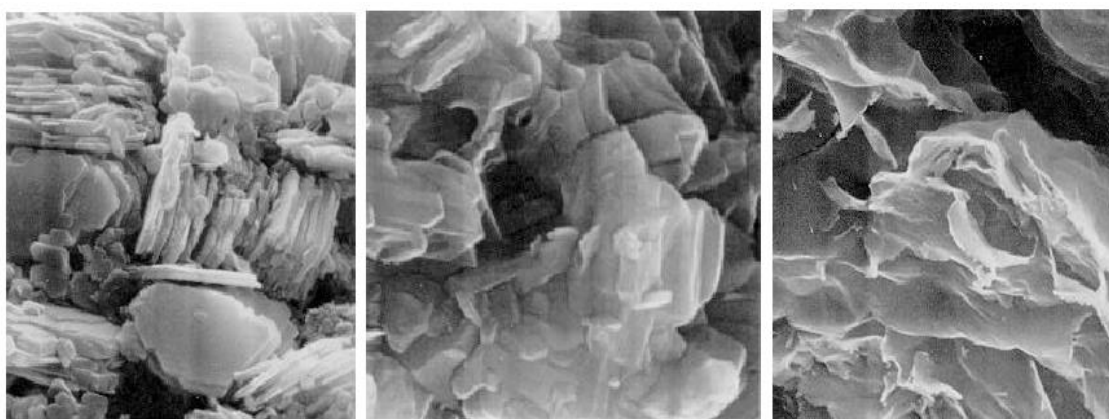
minéralogique et structurale est amplifiée lorsque les minéraux argileux sont cimentés par d'autres phases comme les carbonates (Foucault & Raoult 1995).



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

**Tableau I.1 :** Caractéristiques de certaines familles d'argile (Morel R. 1996).

Nom	Nombre de feuillets par particule	Diamètre d'une particule (µm)	Epaisseur d'une particule (µm)	Surface spécifique m <sup>2</sup> /g
Kaolinite	100-200	0,1-4	1-10	10-20
Illite	1-10	0,1-1	0,003-0,01	65-100
Montmorillonite (smectite)	1	0,1	0,001	700-840



**Kaolinite**

**Illite**

**Montmorillonite**

**Figure I.5** Photographies au Microscope Electronique à Balayage des argiles

(Mitchell, 1976).

## **I.4 Les Marnes**

Les marnes sont des roches sédimentaires tendres composées d'un mélange de fractions argileuses, calcaires et sableuses en proportions variables (Foucault & Raoult 1995). Elles se distinguent par leur teneur en carbonate de calcium :

- Marnes argileuses : 5 à 35% de CaCO<sub>3</sub>
- Marnes : 35 à 65% de CaCO<sub>3</sub>
- Calcaires marneux : 65 à 95% de CaCO<sub>3</sub>

De point de vue géotechnique, les marnes argileuses présentent un comportement similaire aux argiles avec notamment une forte sensibilité aux variations hydriques. Elles ont ainsi tendance à se fissurer en profondeur lors de la dessiccation (Al-Shayea 2001).

La qualité des marnes comme sol de fondation varie de moyenne à bonne en l'absence de gypse. Mais leur présence devient médiocre, voire dangereuse en cas de forte teneur en argile ou de gypse, avec un risque de formation de dolines.

Lors du traitement des sols par liants hydrauliques, la fraction argilo-marneuse va fortement interagir avec les réactions d'hydratation et de prise du ciment, d'où l'importance cruciale des conditions de cure (humidité, température) pour obtenir les résistances mécaniques visées (Oti et al. 2009).

## **I.5 Les Limons**

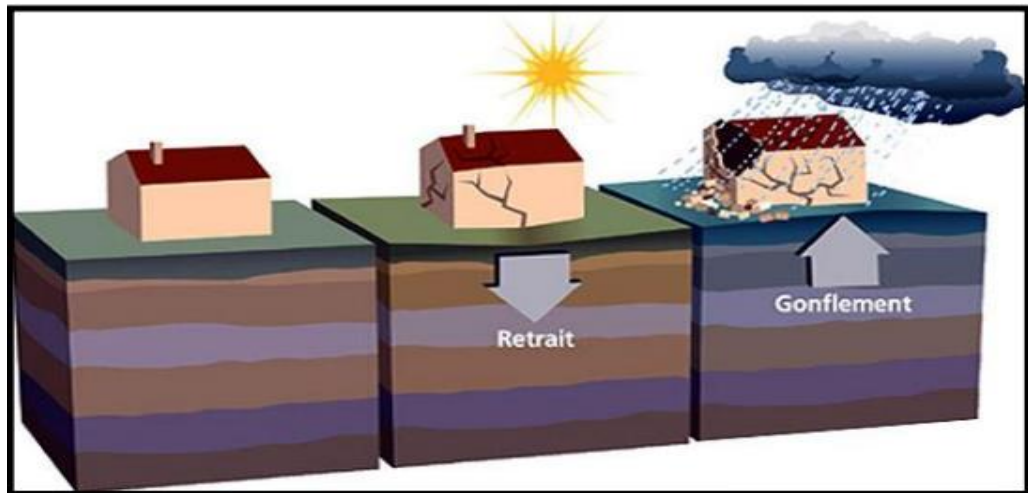
Les limons sont des sols particuliers constitués principalement de la fraction granulométrique silteuse (2 à 63 µm selon Holtz & Kovacs 1996) associée au loess, un dépôt éolien de particules limoneuses (Robitaille & Tremblay 1997). Leur squelette minéral est composé de grains fins siliceux et silico-calcaires, avec une teneur en fraction argileuse généralement variable (Dupain & Saint-Arroman 2009).

## **I.6 Problèmes des sols instables**

Dans notre pays, L'urbanisation et la voirie de certaines parties de la ville sont confrontées aux problèmes de gonflements, de tassements et de phénomènes de glissement.

### I.6.1 Gonflement

Le gonflement est la cause de l'obstruction fréquente des ouvrages légers. Ce phénomène est lié au changement d'humidité de quelques sols très argileux ou tourbeux qui sont possibles de cloquer l'eau disponible mais aussi de la perdre en se rétractant en cas de sécheresse.



**Figure I.6 :** Fissuration due au retrait et gonflement des sols.

### I.6.2 Tassement :

Il s'agit d'une baisse du volume de certains sols très compressibles (vases, tourbes et argiles) sous l'action des charges appliquées et de la diminution du niveau de l'aquifère dû à la surexploitation (Figure I.7).



**Figure I.7 :** Fissures, tassements sur la plateforme du stade à Bejaia.

### I.6.3 Glissement :

Un glissement de sol, aussi appelé mouvement de terrain, est un mouvement d'une masse de sol ou de roche le long d'une surface de rupture sous l'effet de la gravité. Ce phénomène se produit généralement sur des pentes ou des talus lorsque les forces de cisaillement déstabilisatrices dépassent la résistance au cisaillement du sol ou de la roche (Varnes, 1978).



**Figure I.8:** Glissement de terrain sur la Route coupée à Bouzaréah.

### I.6.4 Affaissement :

L'affaissement de sol, aussi appelé tassement, est un mouvement vertical descendant de la surface du sol dû à la compression et à la consolidation des couches de sol sous-jacentes. Il peut être causé par différents mécanismes :

1. Consolidation des sols mous argileux ou tourbeux sous les charges des constructions/remblais, avec expulsion de l'eau interstitielle.
2. Compaction des sols pulvérulents non saturés sous charge, avec réarrangement des grains et expulsion de l'air des pores.
3. Dissolution du sol/sous-sol rocheux par les eaux souterraines, formant des cavités souterraines ou "sinkholes"
4. Extraction de fluides (eau, pétrole, gaz) provoquant l'effondrement de la structure poreuse du sol.



**Figure I.9** : Affaissement à Ben Aknoun (Alger).

## **I.7 TRAITEMENT DES SOLS**

### **I.7.1 Objectifs du traitement**

Le but principal de la stabilisation des sols est d'améliorer les propriétés géotechniques défavorables des sols médiocres ou des sols à problèmes, afin de les rendre aptes à la construction et à supporter les charges imposées par les structures. Les objectifs spécifiques de la stabilisation des sols sont les suivants :

- 1.** Augmenter la résistance mécanique du sol en réduisant le volume des vides et en créant des liens entre les particules.
- 2.** Diminuer la sensibilité du sol à l'eau et aux variations hygrométriques saisonnières.
- 3.** Réduire la compressibilité et les tassements du sol.
- 4.** Limiter la sensibilité des argiles à l'eau et diminuer les variations de volume des sols gonflants.
- 5.** Améliorer la capacité portante et la stabilité des sols mous ou des sols à faible résistance.
- 6.** Prévenir les risques de liquéfaction, d'effondrement ou d'érosion des sols.
- 7.** Rendre utilisable un sol qui ne présente pas initialement les caractéristiques requises pour la construction.

8. Optimiser les opérations de chantier en asséchant les sols et les rendant praticables aux engins.
9. Éviter le décapage et le remplacement des sols existants par des matériaux d'apport extérieurs.
10. Préserver l'environnement en limitant l'exploitation de nouveaux gisements naturels.

### **I.7.2 Techniques de traitement des sols**

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 (pré chargement, consolidation, vibro compactage etc.)
- Le traitement thermique (augmentation de la température du sol traité).
- Le traitement chimique (par additif).

#### **I.7.2.1 Le traitement mécanique**

##### **a) Pré chargement :**

Cette technique consiste à placer sur le terrain une charge égale à la charge définitive  $p_f$  augmentée éventuellement d'une surcharge  $P_s$  qui assure tout ou partie des effets suivants :

- Produire un développement rapide des tassements de consolidation primaire et accélérer l'apparition et le développement des tassements de compression secondaire ; on peut rendre ainsi le sol traité plus rapidement constructible, sans redouter à moyen ou à long terme des tassements absolus ou différentiels importants ;
- Augmenter la résistance au cisaillement et la capacité portante du massif de sol, ce qui peut être utilisé pour une construction par étapes. Pratiquement, deux techniques sont utilisées pour appliquer au sol la contrainte de pré chargement :
- La méthode la plus courante consiste à édifier sur le site un remblai (une solution alternative est de remplir des réservoirs d'eau) ; on augmente ainsi la contrainte totale appliquée à la surface de la couche compressible ; en fin de consolidation,

quand les surpressions interstitielles créées par la charge sont dissipées, la charge apportée par le remblai est supportée par le squelette du sol, qui se déforme sur toute son épaisseur ;

- Une autre méthode consiste à utiliser la pression atmosphérique, en appliquant un vide partiel sous une membrane étanche posée à la surface du sol ; on diminue dans ce cas la distribution d'équilibre des pressions interstitielles dans le massif de sol, à contraintes totales constantes ; l'utilisation de cette technique a été limitée pendant longtemps par la mauvaise qualité des membranes disponibles ; cet obstacle est désormais levé et le recours à l'application du vide devrait se développer.

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

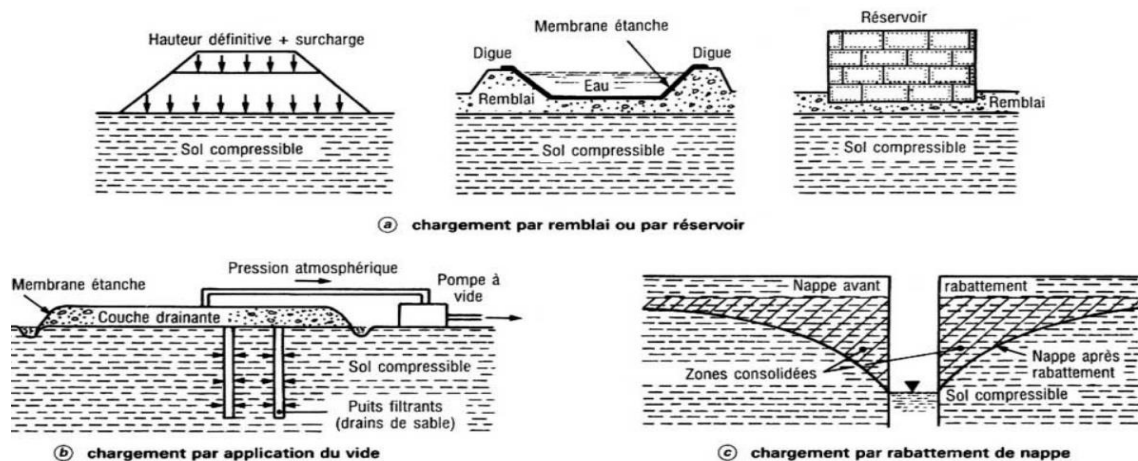
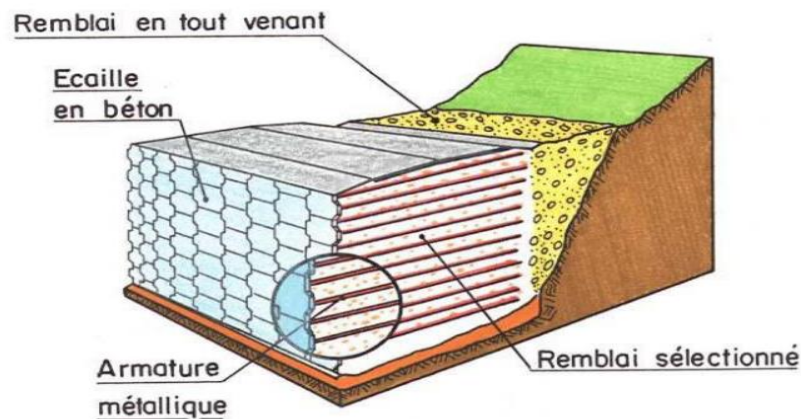


Figure I.10 Techniques de pré chargement.

#### b) La Terre Armée :

La Terre Armée est une méthode de construction qui consiste à associer un remblai compacté avec des armatures (métalliques ou synthétiques) reliées à un parement extérieur. La structure est réalisée en alternant des couches de remblai pulvérulent et des nappes d'armatures horizontales réparties régulièrement. Cette configuration conduit au développement d'efforts d'interaction entre le sol et les armatures, formant ainsi un matériau composite résistant.

Ce matériau composite est capable de supporter son propre poids ainsi que les charges appliquées pendant toute la durée de vie de l'ouvrage. Les principales applications de la Terre Armée sont la construction de murs de soutènement, de rampes d'accès aux ouvrages d'art (ponts, viaducs, etc.) et de culées de ponts. La technique de Terre Armée permet de réaliser des ouvrages renforcés stables et durables grâce à l'effet composite obtenu entre le sol et les armatures.



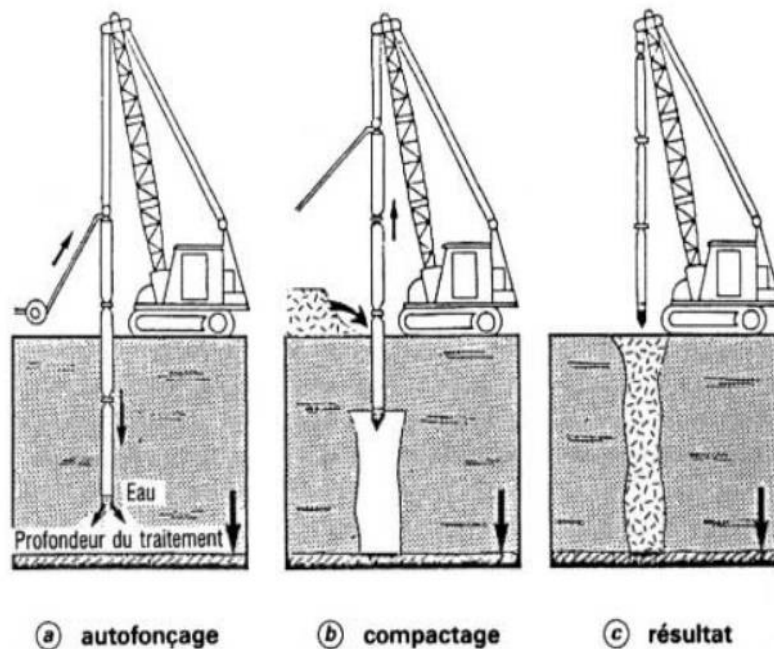
**Figure I.11** Éléments d'un mur de soutènement en Terre Armée.

### c) Colonnes ballastées

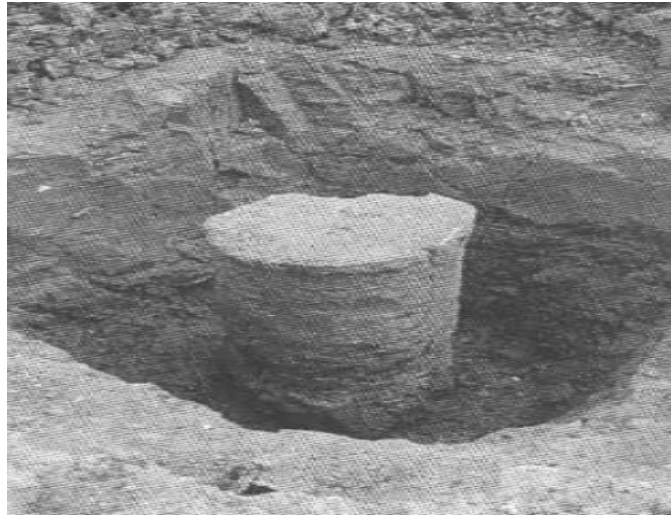
Leur exécution s'effectue en deux phases :

- On réalise d'abord un forage jusqu'à la profondeur désirée (10 ou 20 m au maximum) au moyen d'une aiguille vibrante, corps cylindrique de 30 à 40 cm de diamètre et de quelques mètres de longueur comportant un vibreur ; cette aiguille vibrante pénètre dans le sol sous l'action de son propre poids, conjuguée à un lançage en pointe ; le lançage peut être réalisé à l'eau ou à l'air ;
- Le forage est ensuite rempli de matériaux grenus à fort angle de frottement interne et la colonne ainsi constituée est compactée grâce au vibreur ; le diamètre de la colonne obtenue dépend de la consistance du terrain qui l'entoure. Il atteint couramment 0,6 à 1 m. La densité des colonnes est adaptée à l'amélioration souhaitée du sol. On dispose en général les colonnes ballastées à raison d'une tous les 1 à 5 m<sup>2</sup>.

En raison de leur coût assez élevé, les colonnes ballastées sont destinées à des traitements localisés : fondations d'ouvrage d'art ou de bâtiment, remblais d'accès à des ouvrages d'art, sols supports de réservoirs, etc. Une autre méthode de réalisation de colonnes de matériaux frottants dans des sols mous, tout en compactant le sol à l'entour, consiste à poinçonner le sol avec un pilon de masse élevée et de géométrie adaptée, à remplir l'empreinte de ballast, puis à recommencer le pilonnage, jusqu'à ce que l'on obtienne la colonne désirée (puits ballasté). Dans la pratique, cette technique permet de réaliser des colonnes de 5 à 7 m de profondeur, mais de diamètre plus grand que les colonnes ballastées classiques (de l'ordre de 2,5 m).



**Figure I.12** Phases d'exécution des colonnes ballastées.



**Figure I.13** Colonne de sol traité à la chaux.

**d) Compactage :**

Le compactage est une technique essentielle en génie géotechnique pour améliorer les propriétés mécaniques des sols en réduisant leur porosité et augmentant leur densité. Différentes méthodes de compactage existent selon la profondeur visée et le type de sol.

Pour les couches superficielles jusqu'à 3 mètres, on utilise le compactage de surface qui consiste à appliquer une énergie mécanique pour diminuer les vides du sol. Au-delà de 3 mètres de profondeur, le compactage dynamique profond par impacts d'une masse lourde en chute libre est employé.

Pour les sols grenus pulvérulents, le vibrocompactage permet un compactage en masse jusqu'à plus de 50 mètres de profondeur grâce à des vibrations qui réarrangent les grains de manière optimale.



**Figure I.14 :** Compactage de Sol par Rouleau de Route.

**d) 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).

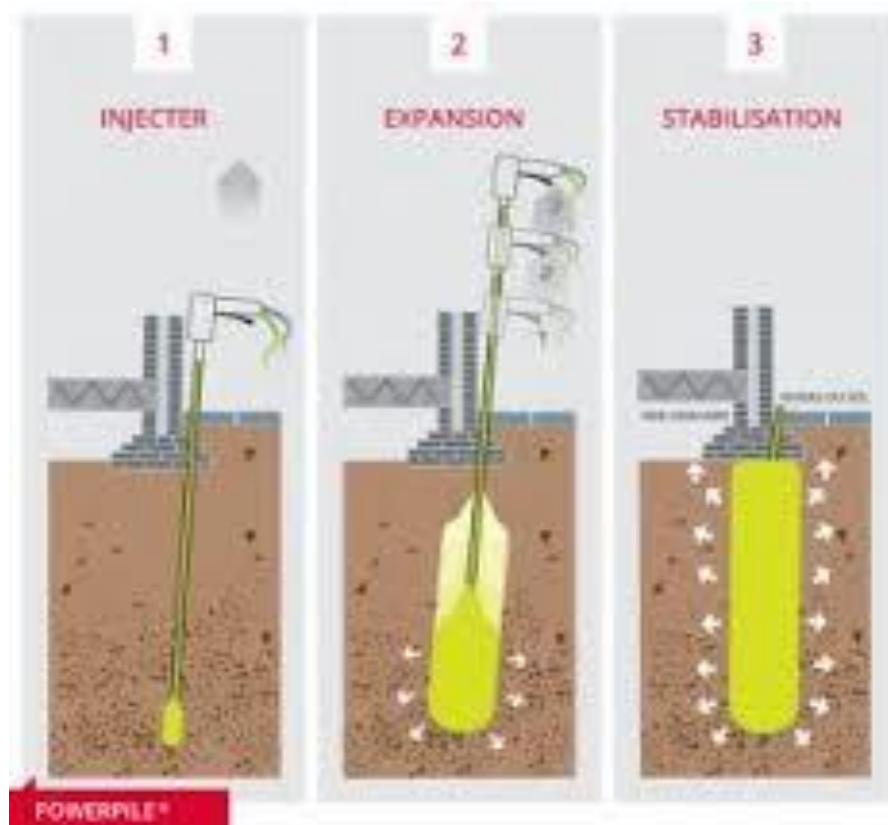


Figure I.15 : traitement des sols par injection

### I.7.2.2 Le traitement

#### a) L'utilisation de la chaux

Depuis plusieurs décennies, l'utilisation de la chaux pour stabiliser les argiles a connu beaucoup de succès. En effet, plusieurs études ont démontré que les propriétés mécaniques d'un sol traité à la chaux peuvent être modifiées de façon permanente. Dans certains cas par exemple, un sol stabilisé à la chaux fournit une performance structurelle équivalente à celle d'une fondation en gravier naturel ou en concassé (Bell, 1978).

L'utilisation de la chaux se fait par l'addition des produits calcaires calcinés de monoxyde de calcium (chaux vive,  $\text{CaO}$ ) ou d'hydroxyde de calcium (chaux hydratée,  $\text{Ca(OH)}_2$ ). Généralement, la chaux vive est plus efficace que la chaux hydratée pour l'amélioration des sols. La chaux est plus efficace aux sols argileux que les sols granulaires. Par conséquent, les sols présentant des indices de plasticité au-delà de 10 sont les plus ciblés par ce procédé. La figure 3.8 ci-dessous montre un chantier de traitement d'un sol à la chaux [France, 2009].

De plus, la réussite de stabilisation à la chaux d'un sol nécessite d'une part une source de silice et/ou d'alumine et d'autre part des particules de petites dimensions susceptibles à l'échange cationique ainsi que la durée de cure



**Figure I- 16 :** stabiliser des sols avec de la chaux.

### **b) Le ciment :**

- **L'utilisation du ciment**

Le ciment Portland est un autre produit envisageable pour la stabilisation de certaines catégories de sols utilisés pour les routes et les revêtements de pistes d'aéroports. Alors qu'il existe plusieurs similarités entre la chaux et le ciment Portland comme stabilisants, le ciment Portland fournit en plus la chaux et la source de silice. Lorsque le ciment Portland est mélangé à l'eau, l'initiation de l'hydratation occasionne une augmentation rapide de la concentration de calcium dans le sol. A mesure que les ions de calcium sont libérés, ils deviennent disponibles pour stabiliser l'argile. La figure 3.9 ci-dessous montre un chantier de traitement du sol au ciment.



Figure I.17 : Traitement des sols au Ciment.

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 calcaire (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)

- **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 triples plis de 50Kg.

- **Réactions chimiques**

Les réactions chimiques décrites sont responsables de l'hydratation du ciment en présence d'eau, ce qui entraîne sa solidification. Voici une explication de ces réactions :

- $2(C3S) + 6 H_2O \rightarrow (3CaO.2SiO_2.3H_2O) + 3Ca(OH)_2$  (1) Cette réaction implique l'alite (C3S) et l'eau, produisant du silicate de calcium hydraté ( $3CaO.2SiO_2.3H_2O$ ) et de l'hydroxyde de calcium ( $Ca(OH)_2$ ). Cette réaction est rapide et contribue à l'augmentation des résistances mécaniques à court terme.
- $2(C2S) + 4 H_2O \rightarrow (3CaO.2SiO_2.3H_2O) + Ca(OH)_2$  (2) Dans cette réaction, le belite (C2S) réagit avec l'eau pour former du silicate de calcium hydraté ( $3CaO.2SiO_2.3H_2O$ ) et de l'hydroxyde de calcium ( $Ca(OH)_2$ ). Cette réaction est plus lente que la réaction (1) et contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques à long terme.

- $C_3A + 6 H_2O \rightarrow (3CaO.Al_2O_3.6H_2O)$  (3) L'aluminate tricalcique ( $C_3A$ ) réagit avec l'eau pour produire de l'hydrate de calcium alumineux ( $3CaO.Al_2O_3.6H_2O$ ).
- $(C_3A) + Ca(OH)_2 + 12 H_2O \rightarrow (4CaO.Al_2O_3.13H_2O)$  (4) Cette réaction implique l'aluminate tricalcique ( $C_3A$ ), l'hydroxyde de calcium ( $Ca(OH)_2$ ) et l'eau, formant de l'hydrate de calcium alumineux ( $4CaO.Al_2O_3.13H_2O$ ).
- $(C_4AF) + 4Ca(OH)_2 + 22H_2O \rightarrow (4CaO.Al_2O_3.13H_2O) + (4CaO.Fe_2O_3.13H_2O)$  (5) La réaction (5) concerne le ferroaluminate de calcium ( $C_4AF$ ), l'hydroxyde de calcium ( $Ca(OH)_2$ ) et l'eau, produisant de l'hydrate de calcium alumineux ( $4CaO.Al_2O_3.13H_2O$ ) et de l'hydrate de calcium ferrique ( $4CaO.Fe_2O_3.13H_2O$ ). Pour retarder la prise en masse du ciment, on ajoute du gypse ( $CaSO_4.2H_2O$ ), qui réagit avec l'aluminate tricalcique pour former des cristaux d'étrangéité ( $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$ ).

Lorsque le ciment est mélangé avec de l'argile ou de la latérite en présence d'eau, les mêmes réactions chimiques se produisent que dans les mélanges d'argile et de chaux. La portlandite produite lors de l'hydratation du ciment réagit avec le dioxyde de carbone de l'air et les minéraux argileux pour former respectivement de la calcite et du silicate de calcium ou de l'hydrate de calcium alumineux. Il est également mentionné que l'échange cationique et la floculation-agglomération se produisent dans les mélanges d'argile et de ciment. Cependant, la réaction pouzzolanique impliquant les minéraux argileux n'est pas prédominante en raison de la présence abondante de portlandite dans le ciment.

#### • Réactions physiques

Pendant la prise du ciment, différentes réactions physiques se produisent. Voici une explication de ces réactions :

- Formation d'une pâte de particules solides : Lorsque le ciment est mélangé avec de l'eau, une réaction chimique d'hydratation se produit, formant une pâte composée de particules solides. Les espaces entre les particules sont interconnectés et remplis d'eau capillaire.
- Formation d'un revêtement d'étrangéité : À la surface des grains de ciment, se forme un revêtement d'étrangéité. Ce revêtement empêche une prise trop rapide

du ciment et permet un développement plus contrôlé des réactions d'hydratation.

- Formation de cristaux fibreux (CSH) : Environ deux heures après le début de la prise, des cristaux fibreux appelés silicates de calcium hydratés (CSH) se forment. Ces cristaux sont souvent désignés sous le nom de tobermorite. Ils se développent dans la pâte de ciment et jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des propriétés mécaniques des mélanges argile-ciment ou latérite ciment.
- Les cristaux de tobermorite lient les composants du mélange argile-ciment, renforçant ainsi la structure globale et contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau durci. Il est important de noter que ces réactions physiques et chimiques se produisent progressivement et peuvent varier en fonction des types de ciment, des conditions environnementales et des proportions des mélanges utilisés.

- **Réactions physico-chimiques du ciment**

Effectivement, le ciment est un liant hydraulique qui, lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par le processus d'hydratation. Une fois durci, le ciment conserve sa résistance et sa stabilité, même en présence d'eau. Le ciment Portland est l'une des variétés de ciment les plus couramment utilisées. Sa composition typique est principalement constituée de clinker, qui est un matériau produit par la cuisson d'un mélange spécifique de calcaire et d'argile. La composition typique du clinker de ciment Portland est la suivante : 67% de CaO (oxyde de calcium) 22% de SiO<sub>2</sub> (dioxyde de silicium) 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (oxyde d'aluminium) 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (oxyde de fer) 3% d'autres composés. Le clinker de ciment Portland contient quatre phases principales : L'alite (3CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>3</sub>S) : C'est la phase principale responsable de la résistance mécanique initiale du ciment durci. La bélite (2CaO.SiO<sub>2</sub> ou C<sub>2</sub>S) : Elle contribue également à la résistance mécanique du ciment, mais sa réactivité est plus lente que celle de l'alite. La célite : C'est un mélange d'aluminate de calcium (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C<sub>3</sub>A) et de ferroaluminate de calcium (4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou C<sub>4</sub>AF). Ces phases contribuent à la réactivité du ciment et peuvent influencer certaines propriétés spécifiques. D'autres phases, telles que les sulfates d'alcalins ou l'oxyde de calcium, peuvent également être présentes en très faibles quantités dans le clinker de ciment Portland. Il est important de noter que les proportions exactes des composants peuvent varier en fonction du type spécifique de ciment Portland et de sa classe de résistance.

**Tableau I.4 :** 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.7.2.2 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.

- 1. Cuisson :** Destinée aux ouvrages importants, d'après le guide technique LCPC/SETR (2000), cette méthode de traitement a été procurée pour la première fois par Ostasheven (1934). Consiste à soumettre le sol à un réchauffement contrôlé, on injecte dans le sol pendant plusieurs jours de l'air ou du gaz chauffé entre 200 et 800°C°, ce qui fait fondre le squelette du sol et les contacts entre les particules sont soudés.
- 2. Congélation :** La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau

dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

### **I.7.2.3 Traitement mixte (chaux-ciment) :**

Le traitement mixte consiste à améliorer la qualité d'un sol par combinaison de deux ou plusieurs stabilisants en vue d'atteindre les performances mécaniques souhaitées. Le traitement préalable à la chaux par son action d'assèchement immédiat du sol amène celui-ci à un état optimal pour la stabilisation au ciment. (Génie Hippique, 2004) Pour les différents types de traitement on a pu étudier l'évolution de la résistance en immersion et, en outre, l'influence d'une période de gel sur l'évolution successive de la résistance. Le pouvoir discriminant de la richesse en chaux des mélanges mixtes a été également observé pour ce qui est du retard entre l'addition de la chaux et le compactage des mélanges qui suit immédiatement l'addition du ciment.

## **I.8 CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous avons défini les divers types de sols instables, tout en mentionnant les principaux problèmes associés à ces sols.

Ensuite, nous avons examiné les différentes techniques de traitement des sols et leurs objectifs. La gestion des sols problématiques nécessite une expertise approfondie afin de réduire les dommages potentiels sur les ouvrages construits sur des formations argileuses ou sableuses. Ainsi, l'ingénieur doit disposer de toutes les informations nécessaires pour identifier un sol ainsi que les différentes solutions et techniques d'amélioration applicables à ces types de sols, selon diverses méthodes.

**CHAPITRE II**

**PROGRAMME**

**EXPERIMENTAL ET**

**PROCEDURES D'ESSAIS**

## **II.1 INTRODUCTION**

Cette étude a pour but de déterminer l'effet de différentes conditions de cure sur le développement de la résistance mécanique du sol de Chaaba El Hamra traité par deux types de ciments (Chamil et Matine) avec différent pourcentage (0% sol témoin – 2% - 4% - 6% - 8% - 10%) pour chaque type de ciment. Outre les essais d'identification, le programme expérimental exécuté comporte des essais de compression simple.

## **II.2. DESCRIPTION DE LA REGION D'ETUDE**

Le site de Chaaba El Hamra est situé 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-Este de M'sila. 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 zone 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)

## II.3 MATERIAUX

### II.2.1 Le Sol utilisé

Le sol de la région est un limon-argileux rouge.



**Figure II.2 :** Le sol du Chaaba El Hamra.

### II.2.2 Les ciments utilisés

#### a) Le Ciment Matine

Destiné pour bétons de haute-performance, la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments.

Avantage :

- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitants un décoffrage rapide.
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie.
- Une classe vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité de béton.



Figure II.3 : Ciment MATINE

#### b) Le Ciment Chamil

Destiné pour bétons courants tel que les travaux de maçonnerie.

Avantage :

- Un ciment « tout en un » pour construire votre maison : permet de réaliser toutes les étapes de construction
- Un bon comportement pour les travaux de maçonnerie : dressage et talochage
- Un temps de prise étudié pour un usage confortable.
- Un ingrédient idéal pour la composition des mortiers de finition.



Figure II.4 : Ciment CHAMIL.

### **III.4 LE PROGRAMME EXPERIMENTAL**

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 routes et matériaux de construction « **BINAYA LAB** » commune de M'sila.

Outre les essais d'identification, le programme expérimental exécuté est basé essentiellement sur des essais de compression simple

#### **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 de compression simple.**

#### **II.4.1 Essais d'identifications**

Ils comportent les essais d'identification physique permettant de déterminer les

##### **II.4.1.1 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.

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.

La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.



**Figure II.5:** Appareillage d'analyse granulométrique (tamisage).

#### II.4.1.2 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.6:** L'essai de sédimentométrie.

#### II.4.1.3 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 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.

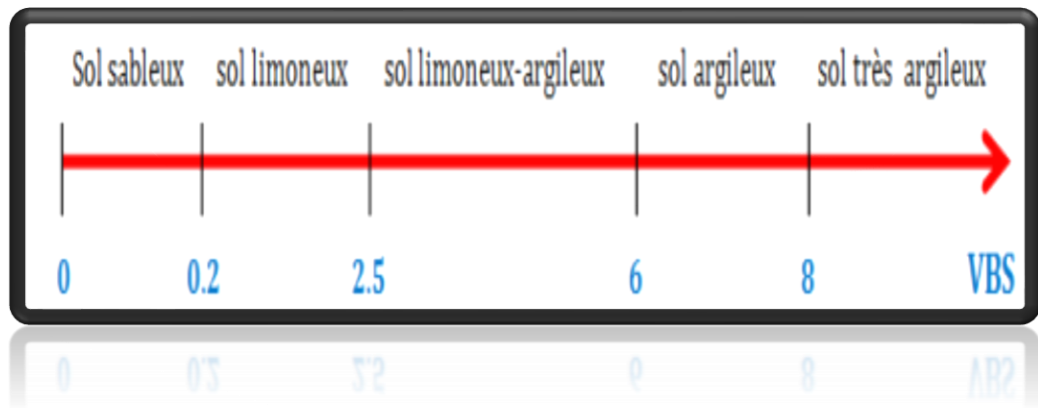


**Figure II.7** Appareillage de limites d'Atterberg.

#### II.4.1.4 L'essai au bleu de méthylène (NF P 94-068) :

L'essai est réalisé sur la fraction 0/0.08 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.

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) :  $S_{st} = 21 \text{ VB (0/2 A)}$ . A titre d'identification le tableau représente les valeurs de bleu de quelques sols.



**Figure II.9** Valeurs de bleu de quelques sols.



**Figure II.10** Appareillage de l'essai au bleu de méthylène.

#### II.4.2 Essais de compression simple (NF P 94-077) :

L'essai de résistance à la compression uniaxial est l'un des essais couramment utilisés pour étudier les caractéristiques de résistance du sol et du sol stabilisé. Pour obtenir une résistance immédiate, les essais sur les sols et les échantillons de sol stabilisés aux ciments sont compactés à leurs densités sèches maximales avec une teneur en eau obtenue à partir des essais de compactage Proctor normal.

Les éprouvettes cylindriques ont été préparées par compactage à leur densité sèche maximale à une teneur en eau optimale dans un moule métallique fendu de dimension 50 mm

(diamètre)  $\times$  100 mm (hauteur). Ces échantillons ont été testés dans une machine d'essai de CBR avec un taux de déformation de 0,7 % par minute jusqu'à la rupture de l'échantillon.

Le principe de l'essai consiste à appliquer un effort de compression a 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.

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 essais dans des conditions bien définies de traitement préalable, de température, d'humidité et de vitesse de mise en charge.

Nous avons utilisé deux méthodes pour la préparation des éprouvettes, la première consiste à humidifier le sol préalablement par leur teneur en eau optimale, laisser pendant 24 h dans un sachet bien fermé, puis on ajoute le pourcentage de ciment et prépare les éprouvettes. La deuxième consiste à bien mélangé le ciment avec le sol sec puis en l'humidifié par leur teneur en eau optimale et on prépare les éprouvettes.



**Figure II.10** : Moule des éprouvettes

Nous avons aussi utilisé deux types de conservation des éprouvettes, la première consiste à conserver les éprouvettes dans un sachet bien fermé, et la deuxième consiste à conserver les éprouvettes à l'air libre.



Figure II.11 : Essais de compression simple

# **CHAPITRE III**

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

### III.1 Introduction

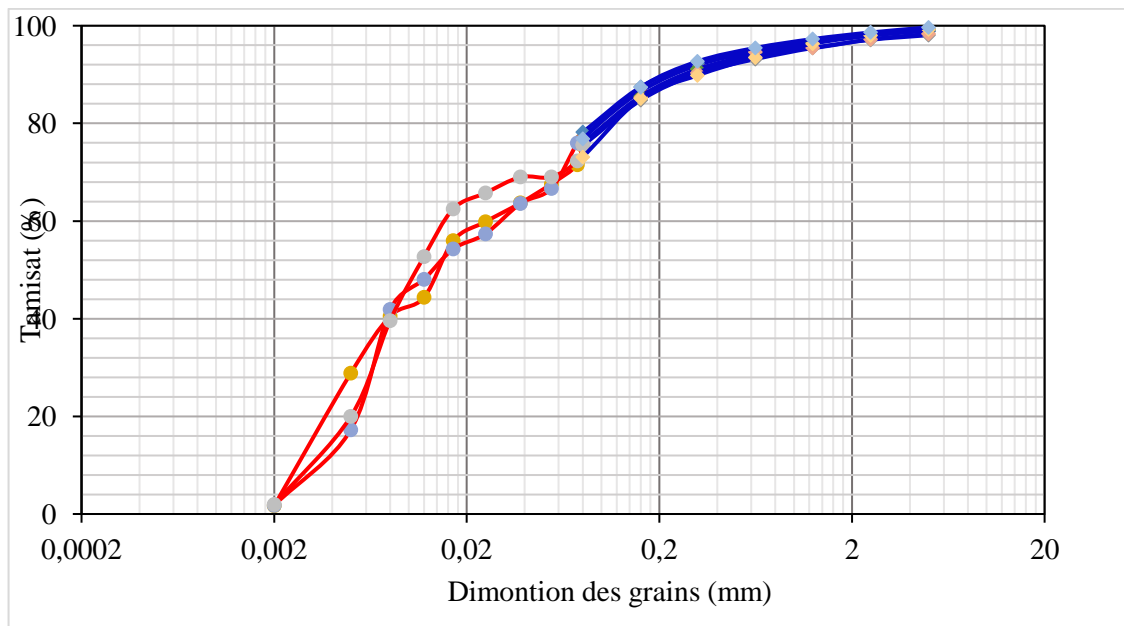
Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats de l'essai réalisé sur le sol étudié et leur interprétation, il comporte :

- Les essais d'identification (analyse granulométrique par tamisage et par sédimentaire, les limites d'Atterberg et l'essai au Bleu de Méthylène)
- Les essais de compression simple, pour deux méthodes de préparation des éprouvettes, et deux types de conservation des éprouvettes.

### III.2 Résultats des Essais

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

##### III.2.1.1 Analyse granulométrique par tamisage et par sédimentométrie



**Figure III.1 :** Courbe d'analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie) de sol Chaaba El Hamra.

**Tableau III.1:** Récapitulatif des résultats des essais de l'analyse granulométrique (tamisage et sédimentométrie)

<b>Tamis</b>	<b>Tamisât (%)</b>			<b>Moyenne</b>
<b>5</b>	98,06	98,33	99,66	98,68
<b>2,5</b>	97,11	97,21	98,62	97,65
<b>1,25</b>	95,44	95,42	97,27	96,04
<b>0,63</b>	93,15	94,56	95,45	94,39
<b>0,315</b>	90,17	90,35	92,67	91,06
<b>0,16</b>	84,74	85,28	87,35	85,79
<b>0,008</b>	75,42	75,6	76,81	75,94
<b>0,075</b>	71,51	72,3	73,29	72,37
<b>0,055</b>	67,6	69	73,29	69,96
<b>0,038</b>	63,69	69	68,01	66,9
<b>0,025</b>	59,84	65,74	66,29	63,96
<b>0,017</b>	55,94	62,45	62,79	60,39
<b>0,012</b>	44,37	52,69	54,02	50,36
<b>0,008</b>	40,49	39,59	17,46	32,51
<b>0,005</b>	28,84	19,95	6,98	18,59
<b>0,002</b>	1,67	1,95	1,44	1,69

**III.2.1.2 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.

**Limite liquidité :**

**Essai N°1 (Sol non traité) :**

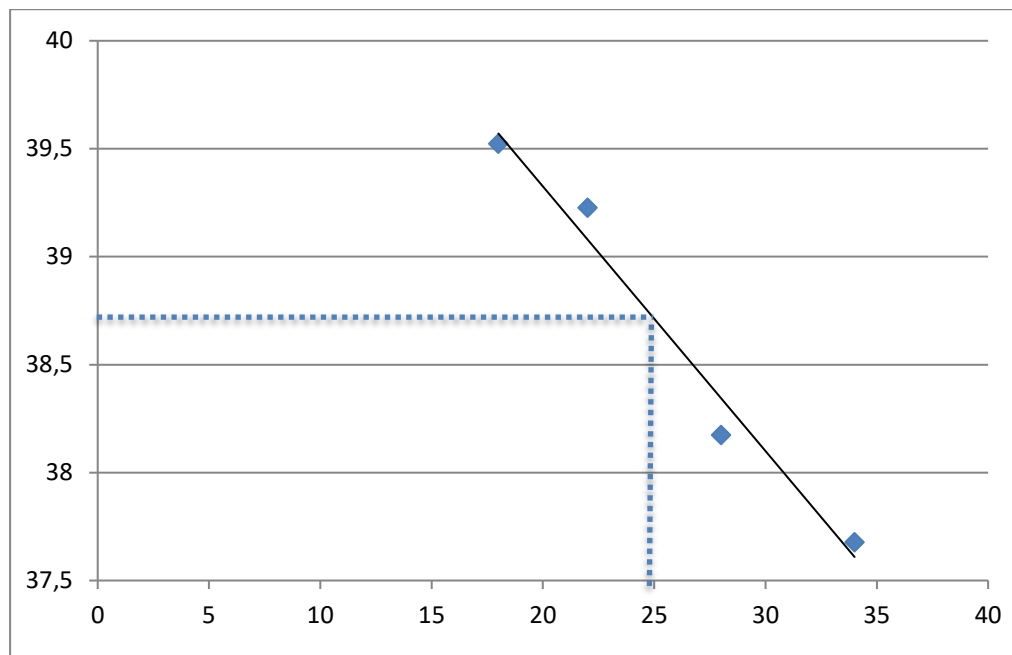


Figure III.2 : La courbe de limite de liquidité du sol naturel.

**Limite de plasticité :**

**Tableau III.3 :** Les résultats de limite de plasticité.

	Essai 1		Essai 2		Essai 3		Essai 4	
Tare N	28	590	35	B	A	42	542	B4
Masse de tare ; Mt(g)	3,489	3,901	3,546	3,833	3,592	3,92	3,76	3,93
Masse (du sol humide+tare ) (Mh +Mt)	5,43	5,47	5,06	5,83	4,99	5	5,67	4,96
Masse (du sol sec +tare ) (Md +Mt)	5	5,12	4,74	5,39	4,68	4,76	5,24	4,73
Masse deau; Mw (g)	0,43	0,35	0,32	0,44	0,31	0,24	0,43	0,23
Masse du sol sec ; Md (g)	1,511	1,219	1,194	1,557	1,088	0,84	1,48	0,8
Teneur en eau ; W(%); Mw/Md	28,46	28,71	26,80	28,26	28,49	28,57	29,05	28,75
W moy(%)	<b>19,25</b>		<b>19,32</b>		<b>18,85</b>		<b>18,39</b>	
<b>WP</b>	<b>18,95</b>							

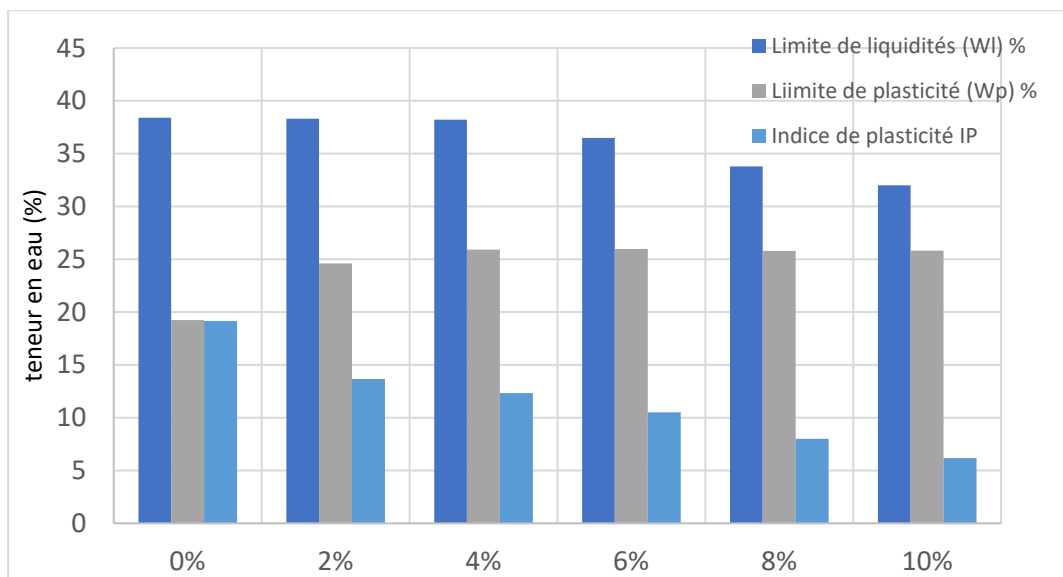
L'Indice de plasticité :  $I_P = W_L - W_P = 19.42$

**Tableau III.4 :** Récapitulatif des résultats des essais de limite d'Atterberg (Sol non traité).

	Essai 01	Essai 02	Essai 03	La moyenne
Wl	38,37	38,50	38,30	38,39
wp	18,95	19,53	19,25	19,24
IP	19,42	18,97	19,05	19,15

**Tableau III.5** Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg (Sol traité par ciment Chamil).

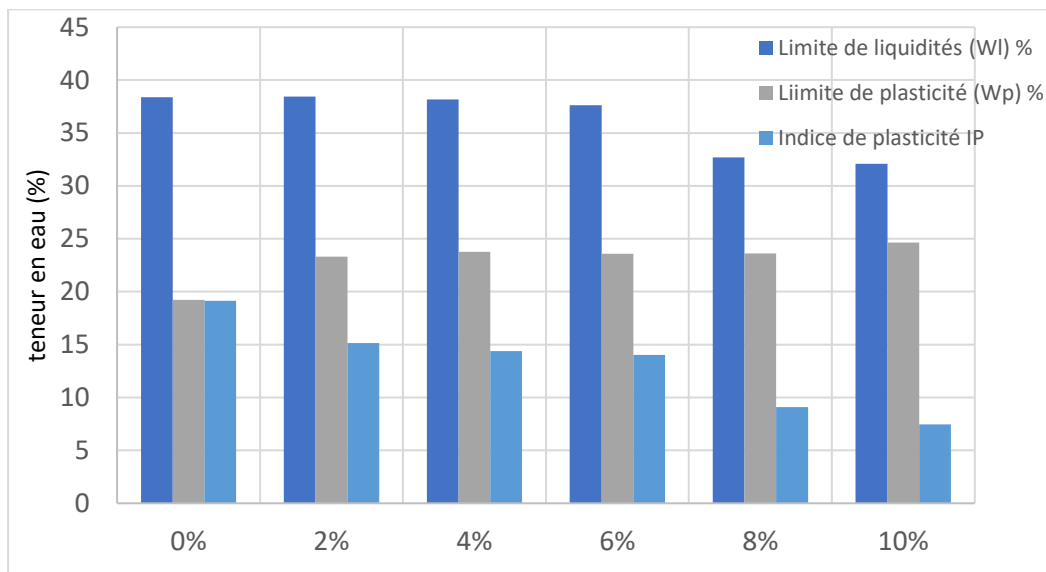
<b>Ciment Chamil</b>	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Limite de liquidités (Wl) %	38,39	38,30	38,22	36,50	33,80	31,99
Limite de plasticité (Wp) %	19,24	24,62	25,90	25,98	25,80	25,81
Indice de plasticité IP	19,15	13,68	12,32	10,52	8,00	6,18



**Figure III.3 :** Les limites d'Atterberg en fonction des différents teneurs en ciment Chamil.

**Tableau III.6:** Récapitulatif des résultats des essais des limites d'Atterberg traité par ciment Matine.

<b>Ciment Matine</b>	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Limite de liquidités (Wl) %	38,39	38,43	38,16	37,62	32,70	32,09
Liimite de plasticité (Wp) %	19,24	23,30	23,76	23,59	23,61	24,63
Indice de plasticité IP	19,15	15,13	14,40	14,03	9,09	7,46



**Figure III.4:** Teneur en eau en fonction des différents teneurs en ciment Matine

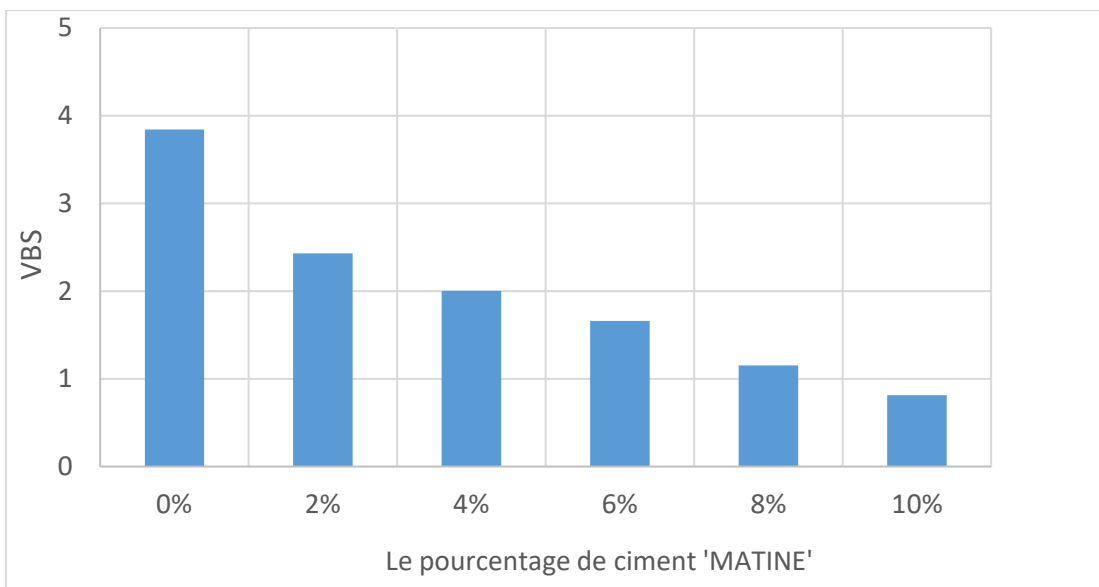
**III.2.1.3 L'essai au bleu de méthylène :**

**Tableau III.7 :** L'essai au bleu de méthylène sol naturel.

Essai	mass de matériaux ( g )	volume de la solution (cm3 )	volume de VBS (cm3/g )
1	40,00	155	3.88
2	40,00	151	3.78
3	40,00	154	3.87
MOY		153,33	3.84

**Tableau III.8 :** Récapitulatif des résultats de bleu de méthylène traité par ciment Matine

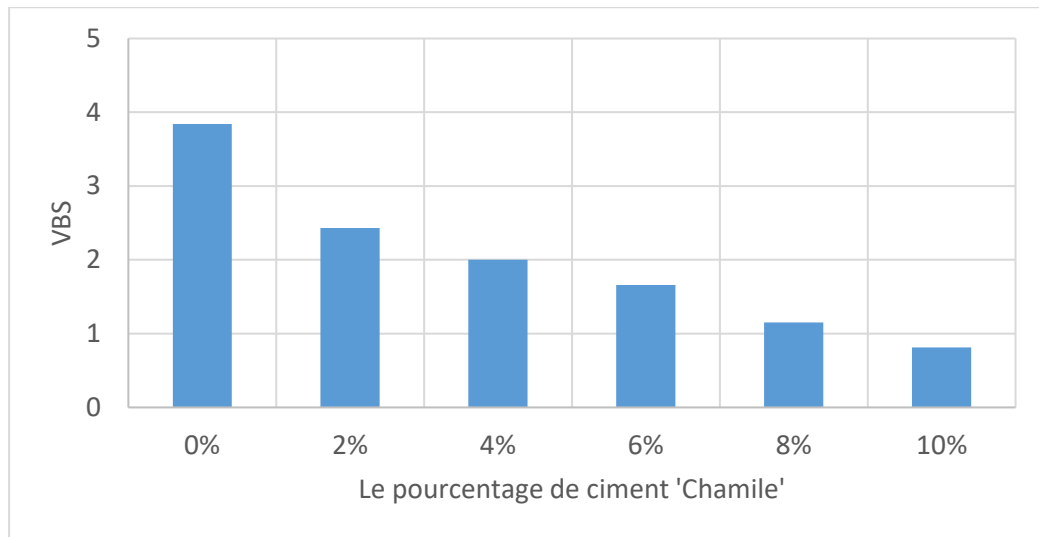
MATINE	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne
0%	3,88	3,78	3,87	3,84
2%	2,10	2,59	2,60	2,43
4%	2,00	2,01	2,00	2,00
6%	1,66	1,66	1,66	1,66
8%	1,15	1,16	1,15	1,15
10%	0,75	0,83	0,86	0,81



**Figure III.5 :** Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment Matine.

**Tableau III.9 :** Récapitulatif des résultats de bleu de méthylène traité par ciment Chamil

Chamil	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne
0%	3,88	3,78	3,87	3,84
2%	2,01	2,14	2,02	2,06
4%	1,92	2,00	1,96	1,96
6%	1,60	1,60	1,60	1,60
8%	1,18	1,18	1,16	1,17
10%	1,00	0,98	0,99	0,99



**Figure III.6** Histogramme de VBS en fonction des différents teneurs en ciment Chamile

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

**Tableau III.10** 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	2,6	4,04	1,27	0,03

**Tableau III.11** 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.2.1.5 Interprétation des résultats :****Classification des sols :**

D'après ces résultats des essais on remarque que :

- $D_{max} = 20\text{mm} \leq 50\text{ mm}$
- Les passant à  $80\ \mu\text{m} = 73.06\% > 35\%$ .
- L'indice de plasticité  $I_p = 19.42 \Rightarrow 12 < I_p < 25$
- La valeur de bleu méthylène est égale à  $3.84 \Rightarrow 2.5 < VBS \leq 6$

Donc :

Selon la classification GTR, Notre sol appartient à la classe A2, il s'agit d'un limon argileux peu plastique.

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 classes de ciment (Chamil et Mâtine) ;

**Ciment Chamil :**

Ciment 2% :  $WL = 38.3$  ;  $WP = 24.62$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = WL - WP = 13.68$

Ciment 4% :  $WL = 38.22$  ;  $WP = 24.9$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = WL - WP = 13.32$

Ciment 6% :  $WL = 36.5$  ;  $WP = 25.98$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = WL - WP = 10.52$

Ciment 8% :  $WL = 33.80$  ;  $WP = 25.8$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = WL - WP = 8.0$

Ciment 10% :  $WL = 31.99$  ;  $WP = 25.81$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = WL - WP = 6.18$

**Ciment Matine :**

Ciment 2% :  $WL = 38.43$  ;  $WP = 23.30$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = WL - WP = 15.13$

Ciment 4% :  $WL = 38.16$  ;  $WP = 23.76$  ; L'Indice de plasticité :  $IP = WL - WP = 14,40.$

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

Ciment 8% : WL = 32.7 ; WP = 23.61 ; L'Indice de plasticité : IP = WL-WP = 9.09

Ciment 10% : WL = 32.09 ; WP = 24.63 ; L'Indice de plasticité : IP = WL-WP = 7.46

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

**Tableau III.12** : Classification des sols selon GTR.

Classe <b>A</b>		Tableau 1 - <i>Classification des sols fins</i>			
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état
D <sub>max</sub> ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm > 35%	<b>A</b>  Sols fins	VBS ≤ 2,5 <sup>(1)</sup> ou I <sub>p</sub> ≤ 12	<b>A<sub>1</sub></b> Limos peu plastiques, loess, silt alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	IPI <sup>(1)</sup> ≤ 3 ou W <sub>n</sub> ≥ 1,25 W <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> th
				3 < IPI <sup>(1)</sup> ≤ 8 ou 1,10 ≤ W <sub>n</sub> < 1,25 W <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> h
				8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>n</sub> < 1,1 W <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> m
				0,7 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>n</sub> < 0,9 W <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> s
				W <sub>n</sub> < 0,7 W <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> ts
		12 < I <sub>p</sub> ≤ 25 <sup>(1)</sup> ou 2,5 < VBS ≤ 6	<b>A<sub>2</sub></b> Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	IPI <sup>(1)</sup> ≤ 2 ou I <sub>c</sub> <sup>(1)</sup> ≤ 0,9 ou W <sub>n</sub> ≥ 1,3 W <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> th
				2 < IPI <sup>(1)</sup> ≤ 5 ou 0,9 ≤ I <sub>c</sub> <sup>(1)</sup> < 1,05 ou 1,1 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>n</sub> < 1,3 W <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> h
				5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < I <sub>c</sub> ≤ 1,2 ou 0,9 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>n</sub> < 1,1 W <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> m
				1,2 < I <sub>c</sub> ≤ 1,4 ou 0,7 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>n</sub> < 0,9 W <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> s
				I <sub>c</sub> > 1,3 ou W <sub>n</sub> < 0,7 W <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> ts
		25 < I <sub>p</sub> ≤ 40 <sup>(1)</sup> ou 6 < VBS ≤ 8	<b>A<sub>3</sub></b> Argiles et argiles marnées, limons très plastiques...	IPI <sup>(1)</sup> ≤ 1 ou I <sub>c</sub> <sup>(1)</sup> ≤ 0,8 ou W <sub>n</sub> ≥ 1,4 W <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> th
				1 < IPI <sup>(1)</sup> ≤ 3 ou 0,8 ≤ I <sub>c</sub> <sup>(1)</sup> < 1 ou 1,2 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>n</sub> < 1,4 W <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> h
				3 < IPI ≤ 10 ou 1 < I <sub>c</sub> ≤ 1,15 ou 0,9 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>n</sub> < 1,2 W <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> m
				1,15 < I <sub>c</sub> ≤ 1,3 ou 0,7 W <sub>OPN</sub> ≤ W <sub>n</sub> < 0,9 W <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> s
				I <sub>c</sub> > 1,3 ou W <sub>n</sub> < 0,7 W <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> ts
		I <sub>p</sub> > 40 <sup>(1)</sup> ou VBS > 8	<b>A<sub>4</sub></b> Argiles et argiles marnées, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	
				A <sub>4</sub> h	
				A <sub>4</sub> m	
				A <sub>4</sub> s	

### III.2.2 Essai mécanique :

#### III.2.2.1 Proctor normal :

On a utilisé les résultats des essais de Proctor normal du mémoire de Mimoune et Lauofi (2022) dirigé par Dr Mekki pour confectionner les éprouvettes de compression simple.

**Tableau III.13 :** Récapitulatif des résultats des essais de Proctor normal du sol de Chaaba Elhamra traité par ciment Chamil. (Mimoune & Lauofi ; 2022).

Essais		Essai 1	Essai 2	Essai 3	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

**Tableau III.14 :** Récapitulatif des résultats des essais de Proctor normal du sol de Chaaba Elhamra traité par ciment Matine . (Mimoune & Lauofi; 2022).

Essais		Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyene
sol naturel	$W_{opt}$	15,37	14,47	15,59	15,50
	$\gamma_{dmax}$	1,82	1,80	1,80	1,80
2%	$W_{opt}$	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

III.2.2.2 Compressions simple :

Des exemples (Méthode N° 01 ;)

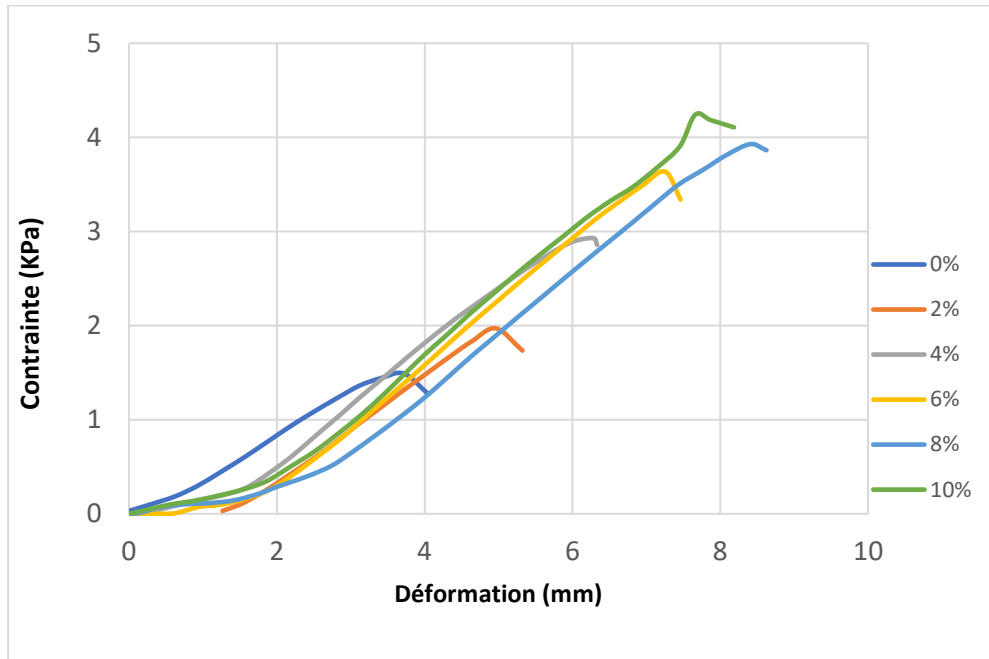


Figure III.7 courbes de compression simple de sols traité par ciment Matine (28 jours)

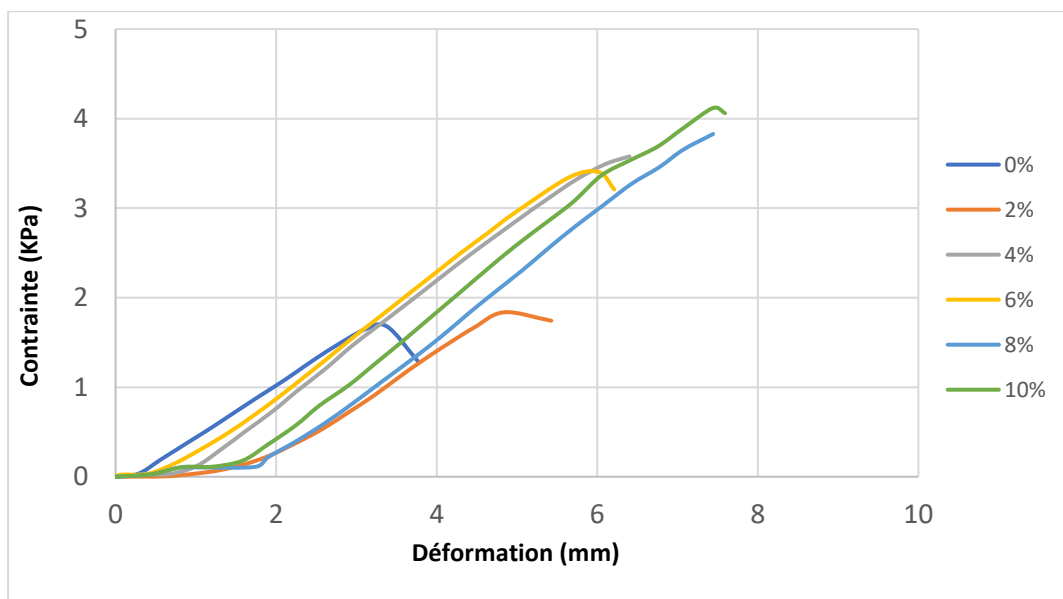


Figure III.8 courbes de compression simple de sols traité par ciment Matine (14 jours)

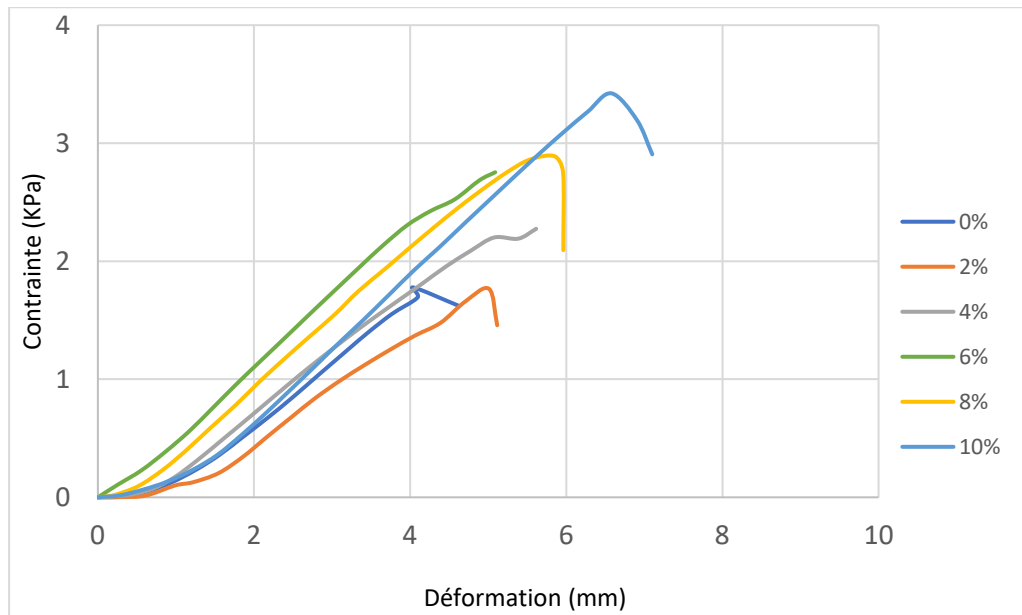


Figure III.9 courbes de compression simple de sols traité par ciment Matine (7jours)

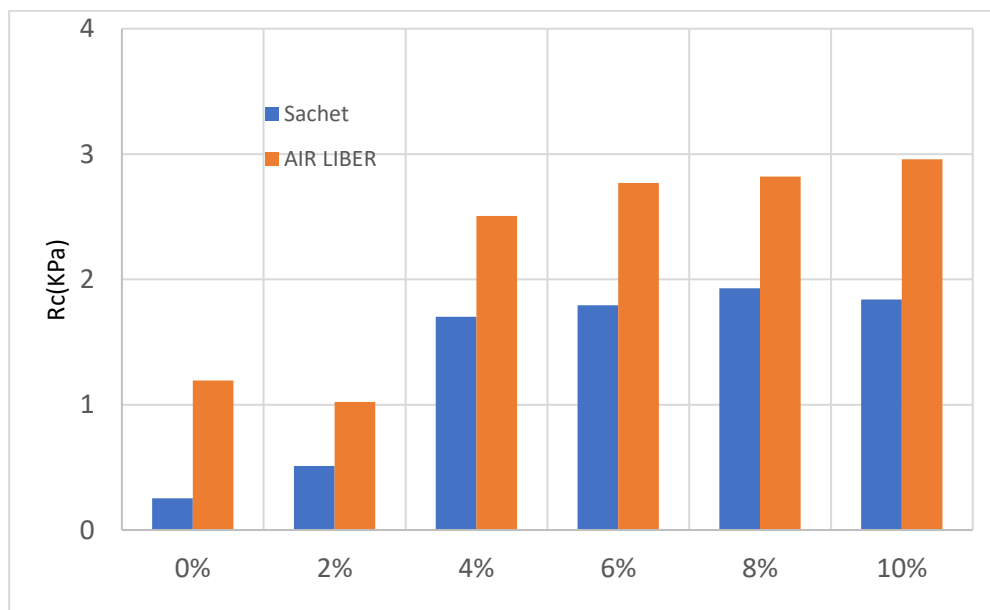
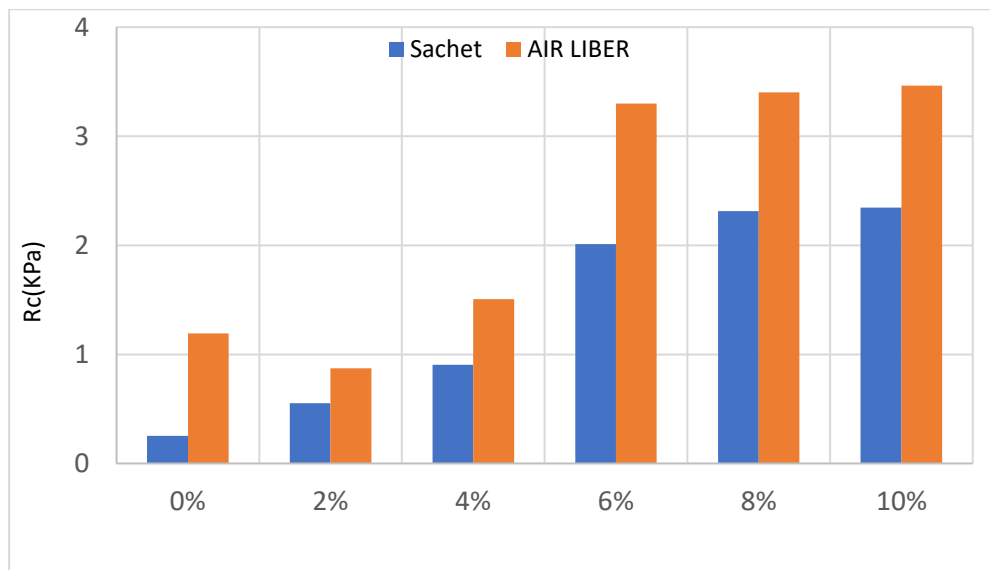
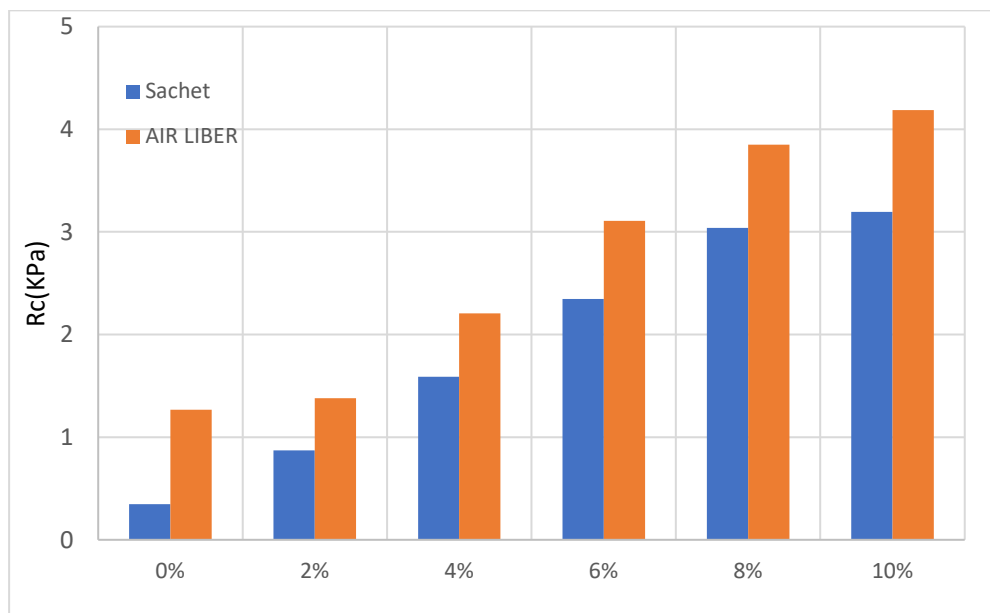


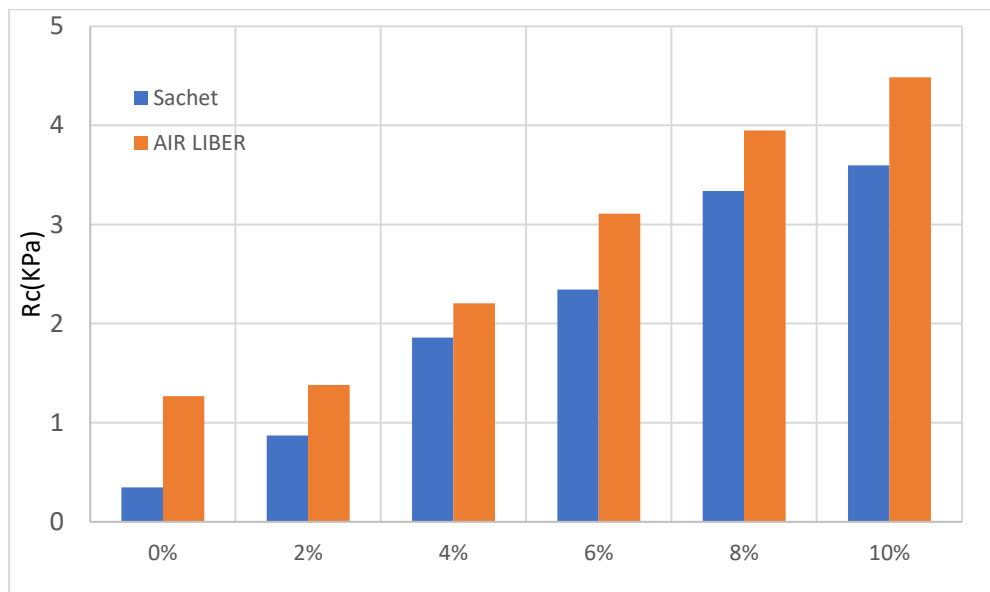
Figure III.10 l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Chamil (M 02 ;14 jours)



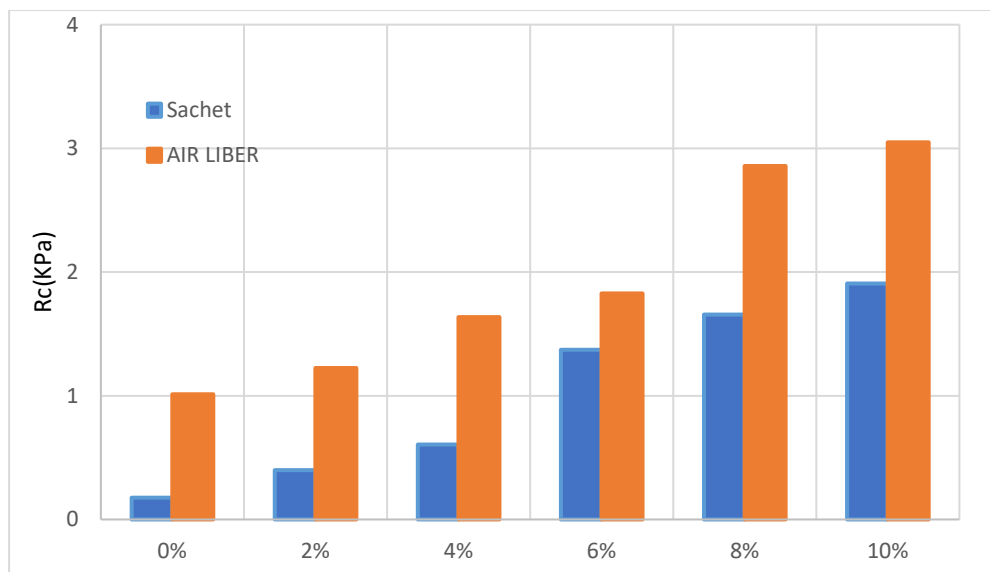
**Figure III.11** l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Matine (M02 ;14 jours)



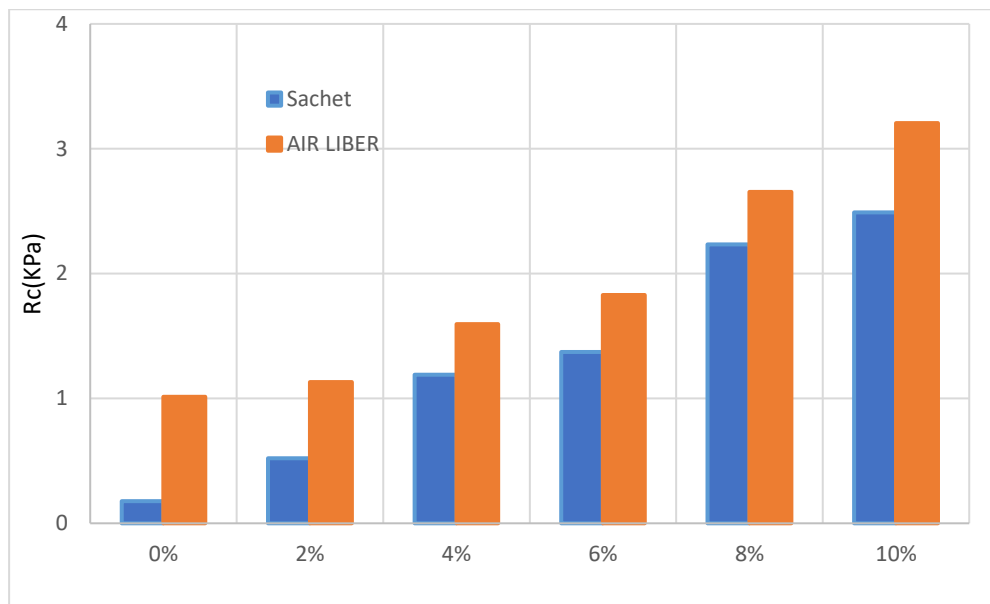
**Figure III.12** l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Chamil (M02 ;28 jours)



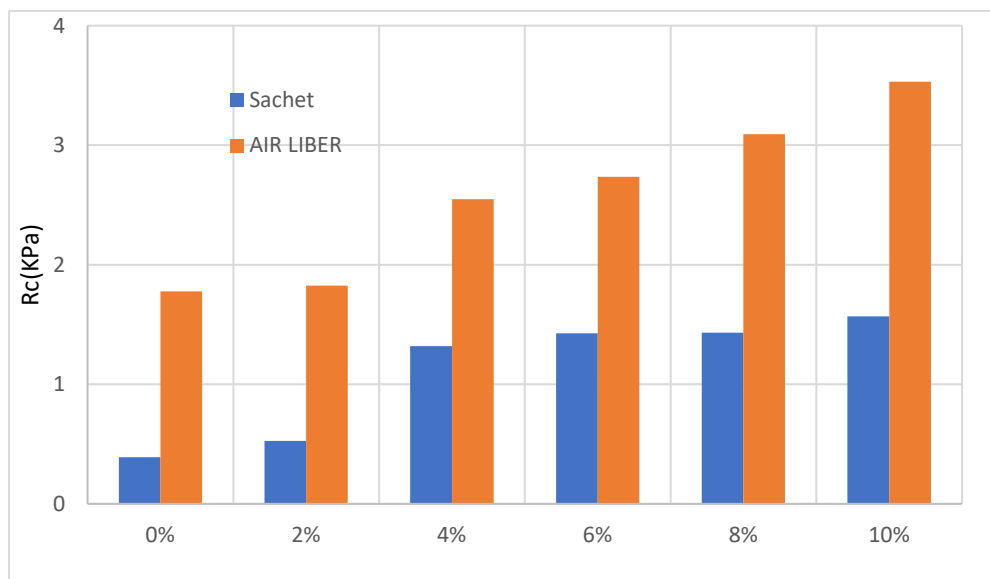
**Figure III.13** l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Matine (M02 ;28jours)



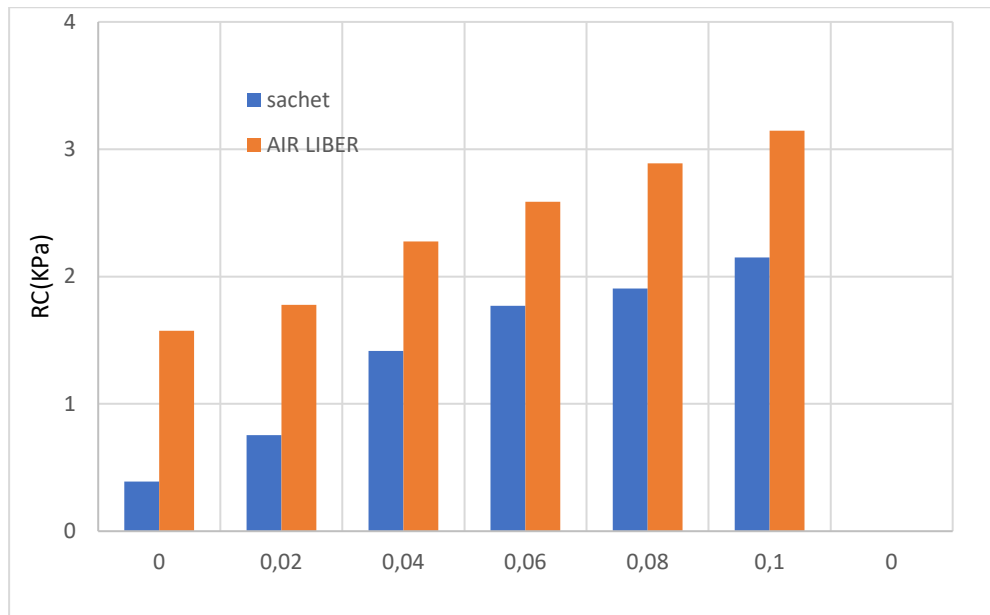
**Figure III.14** l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Chamil (M02 ;07jours)



**Figure III.15** l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Matine (M02 ;07jours)

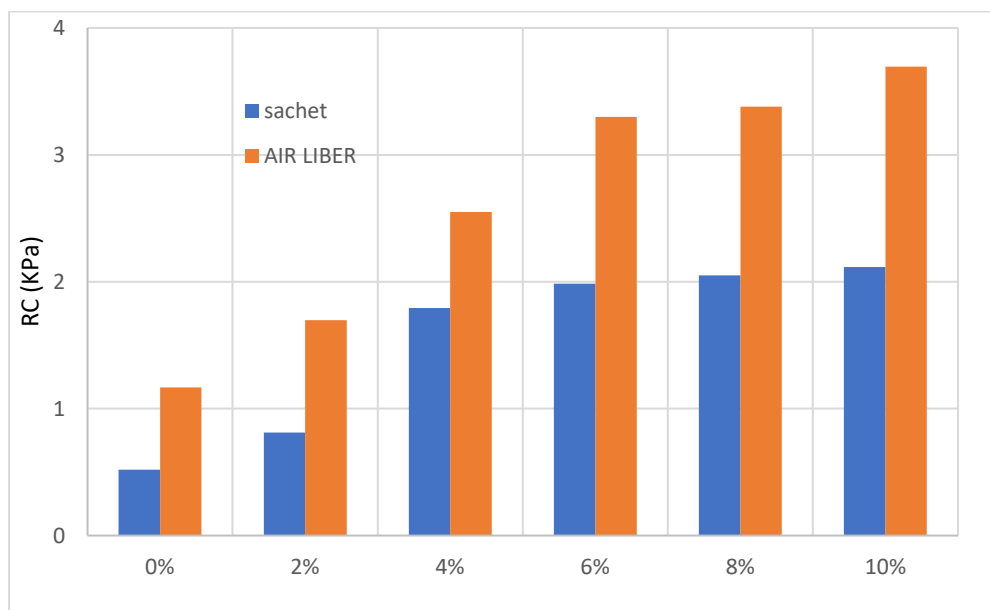


**Figure III.16** l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Chamil (M 01 ;07jours)

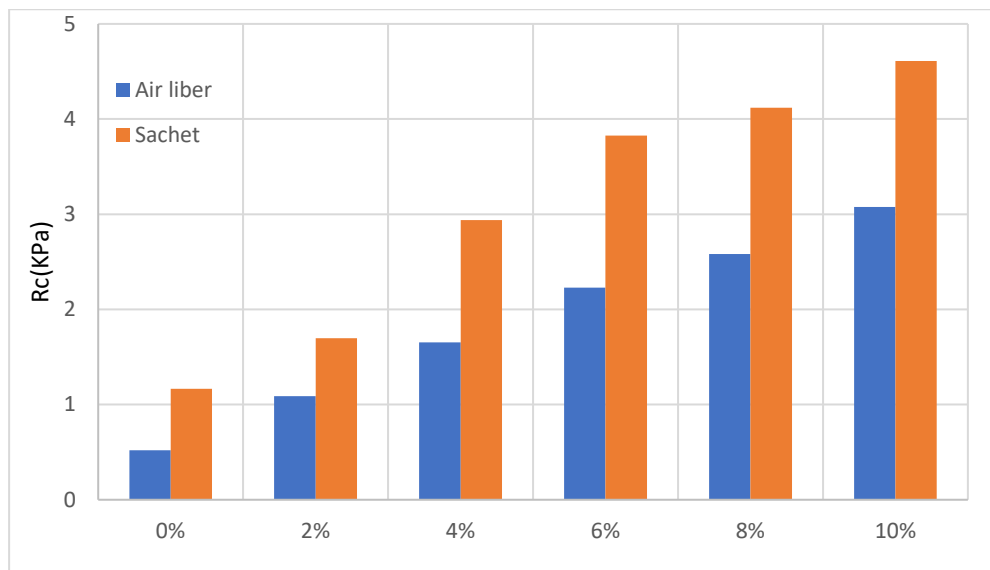


**Figure III.17** l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple

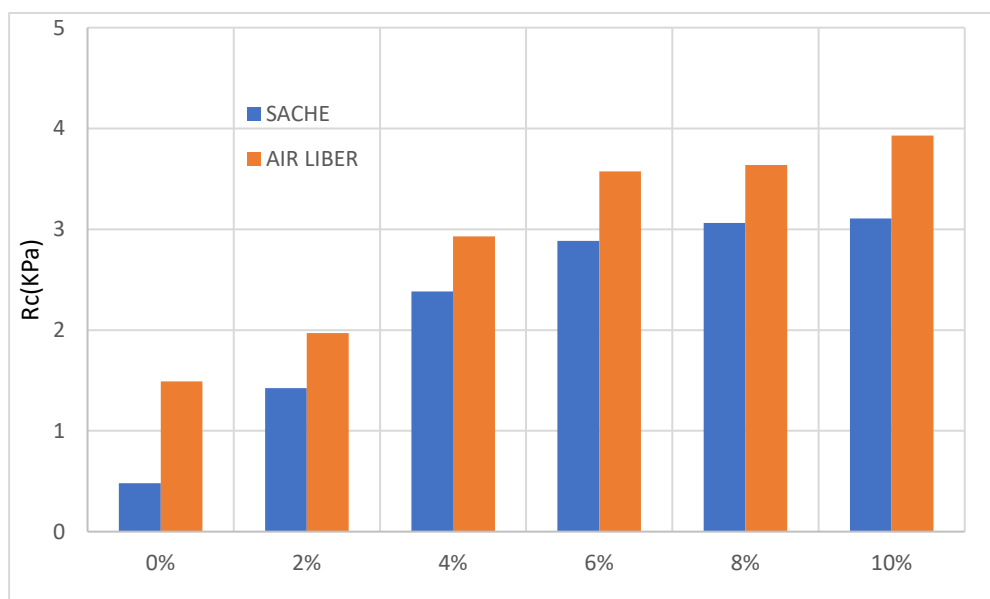
Ciment Matine (M 01 ; 07 jours)



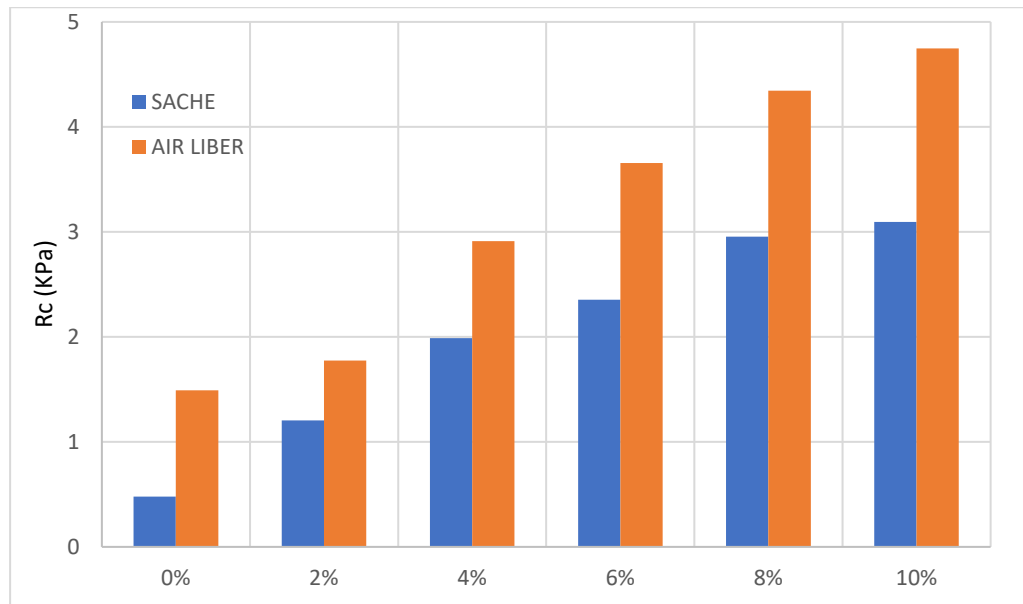
**Figure III.18** l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple  
ciment chamil (M01 ; 14 jours)



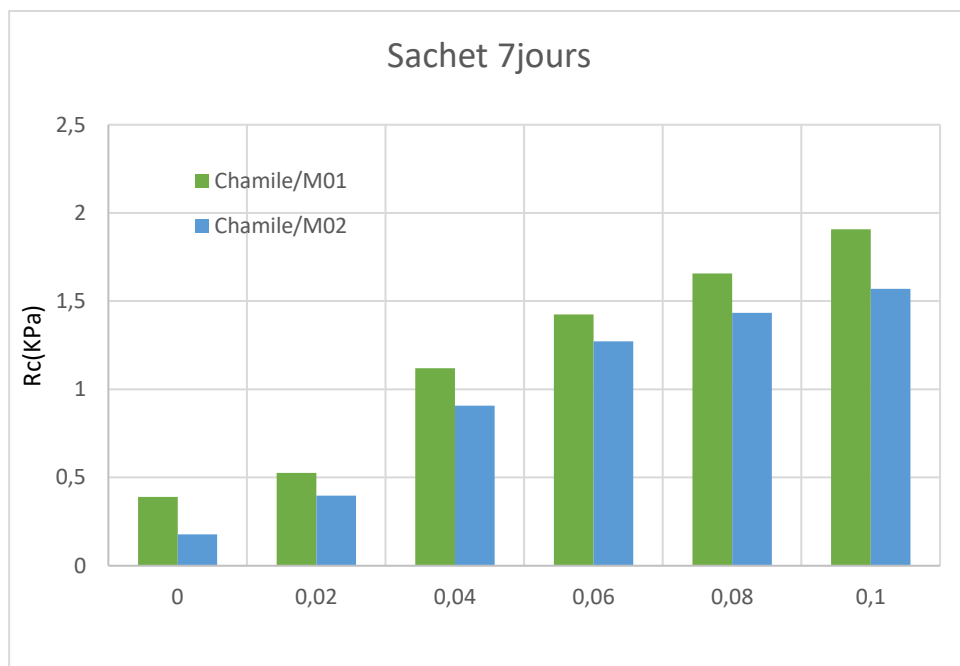
**Figure III.19** l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Matine (M 01 ;14jours)



**Figure III.20** l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple ciment Matine (M01 ;28jours)



**Figure III.21** l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression simple (M01 ;28jours) ciment chamil



**Figure III.22** l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Chamile;7 jours)

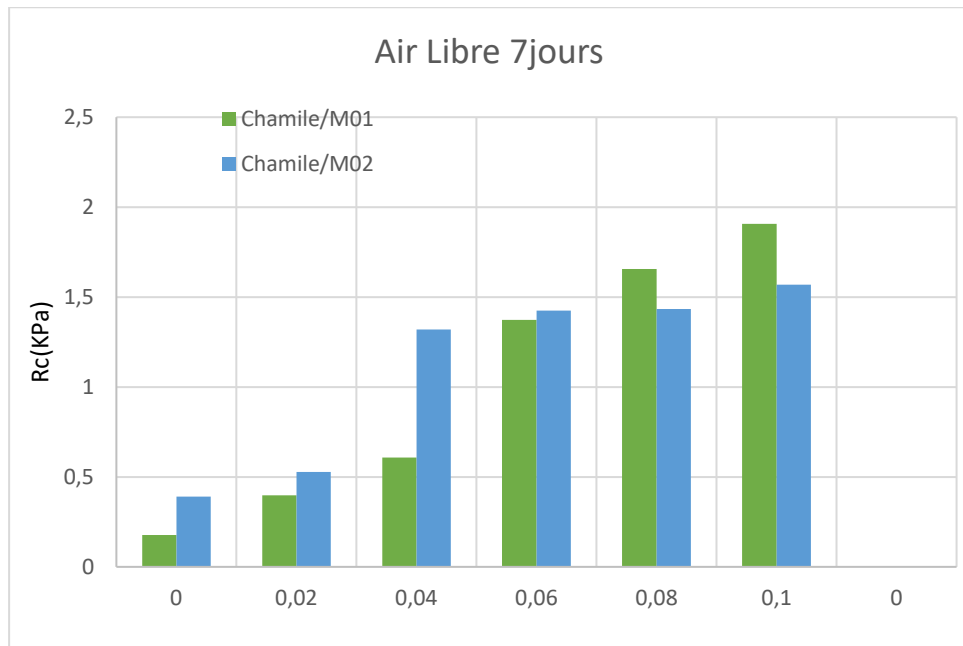


Figure III.23 l'effet de la méthode de préaération des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Chamile;7 jours)

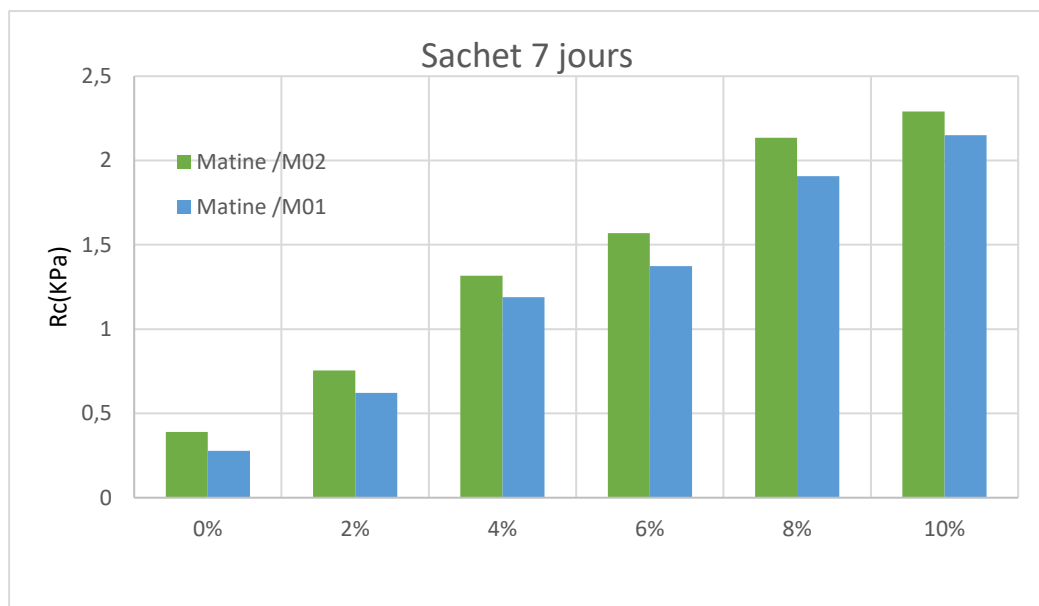


Figure III.24 l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Matine;7 jours)

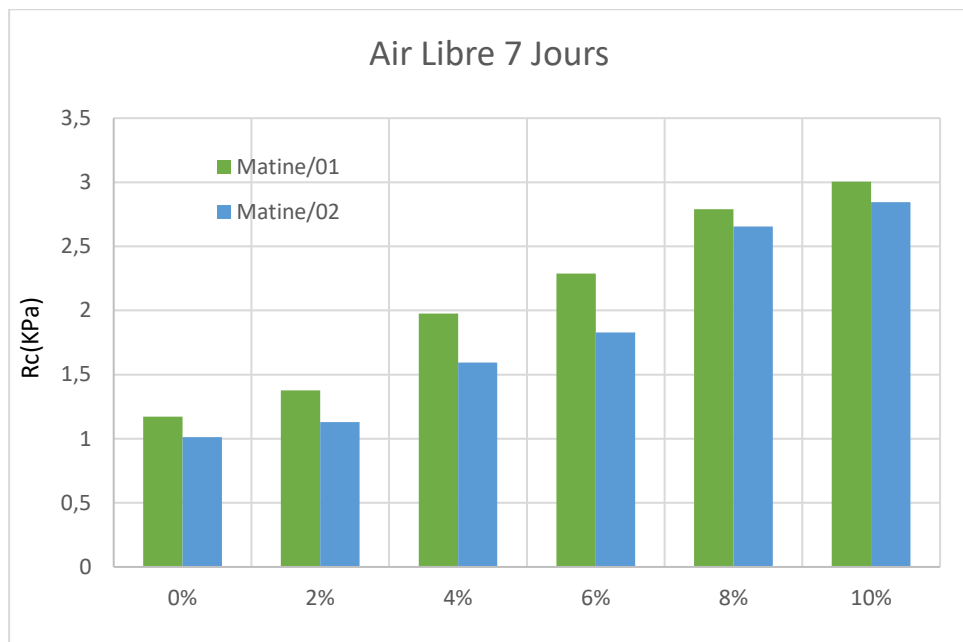


Figure III.25 l'effet de la méthode de préaération des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Matine;7 jours)

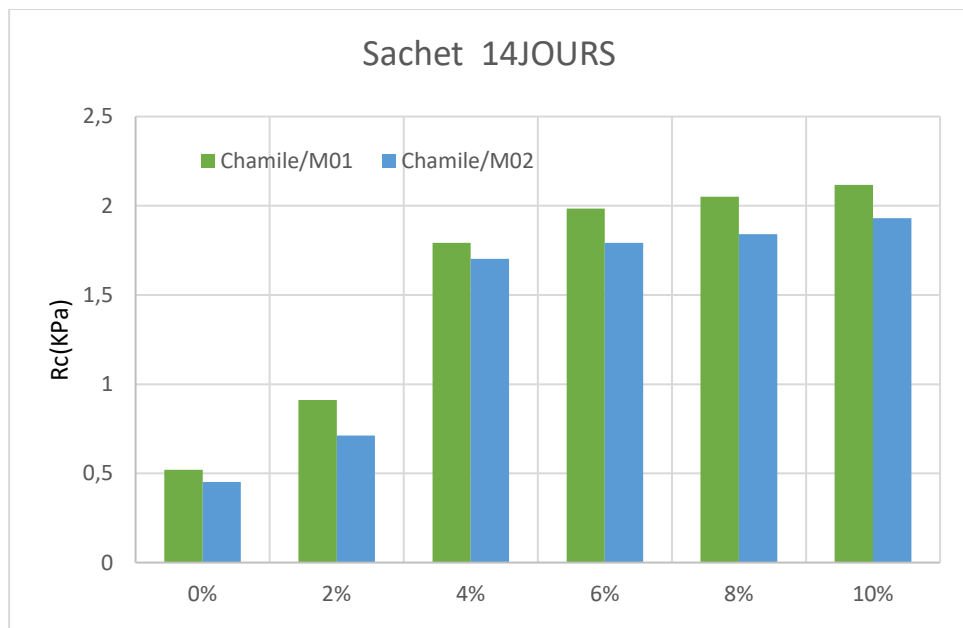


Figure III.26 l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Chamile;14 jours)

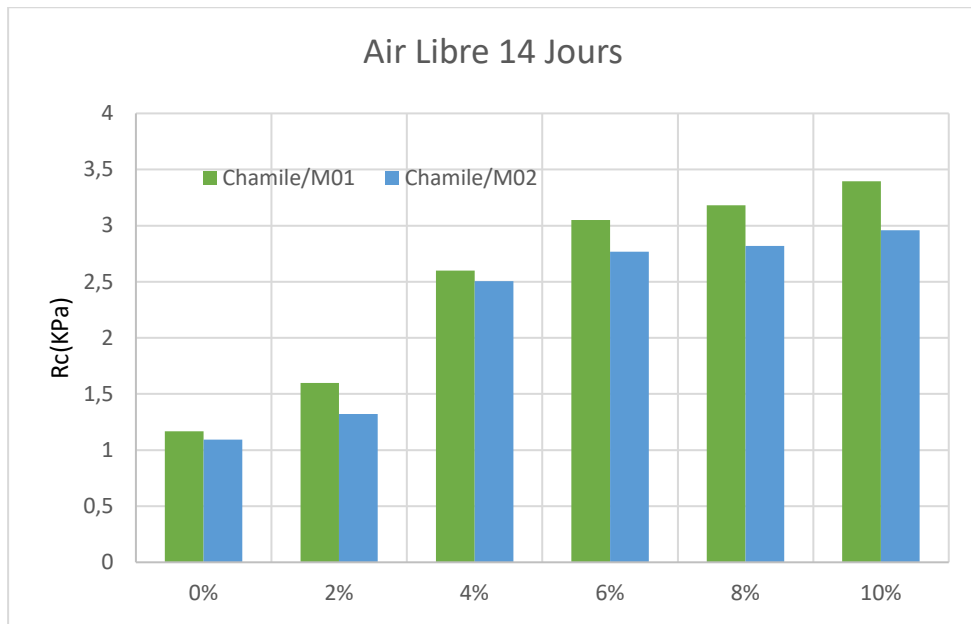


Figure III.27 l'effet de la méthode de préaération des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Chamile;14 jours)

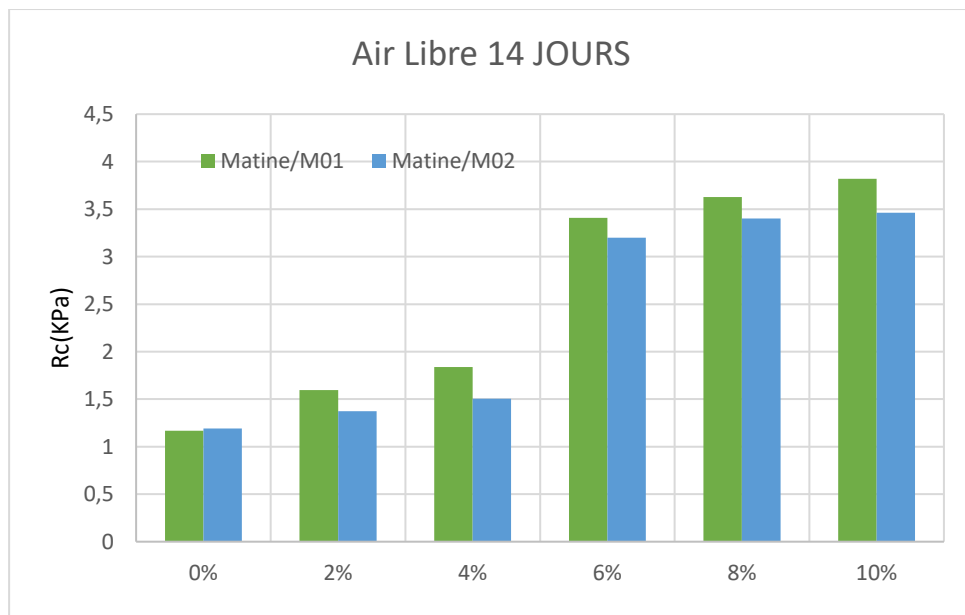
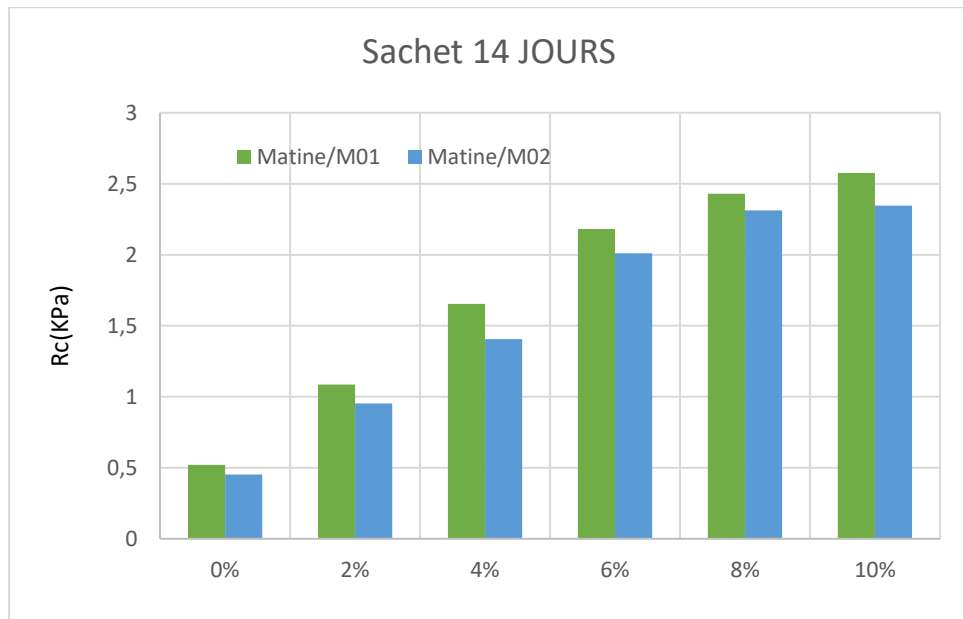
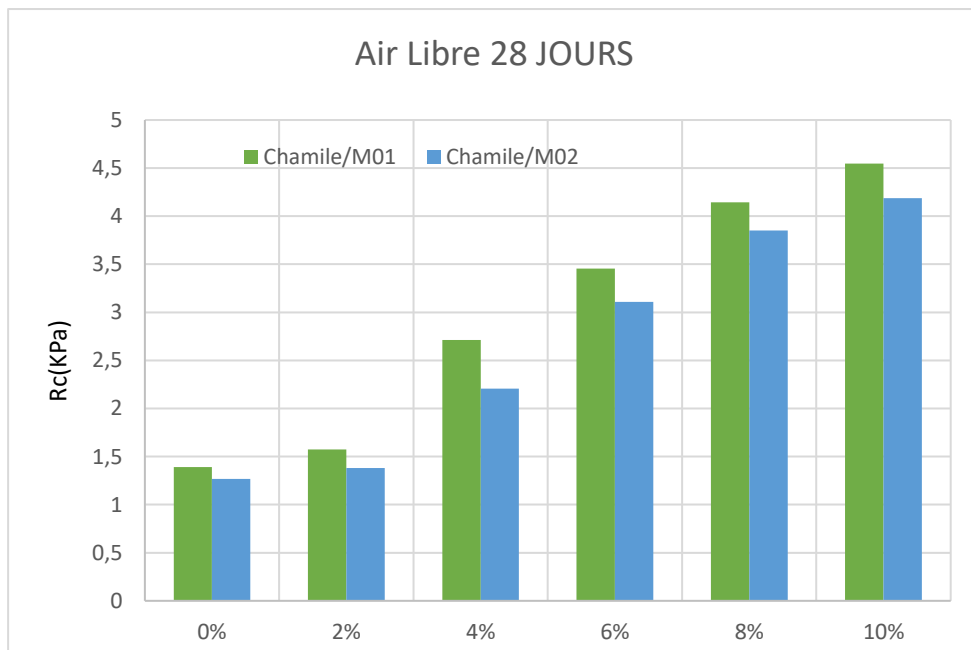


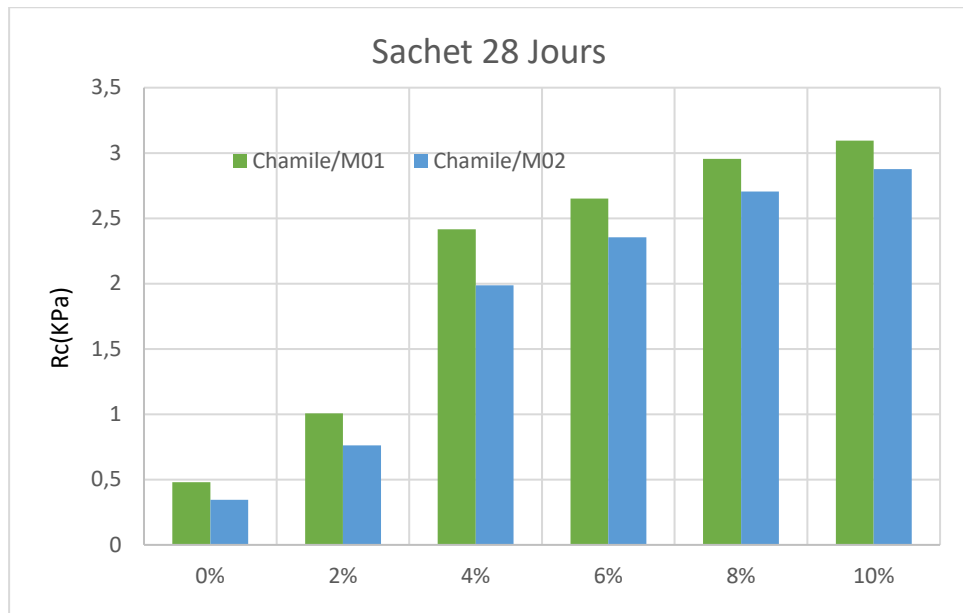
Figure III.28 l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Matine;14 jours)



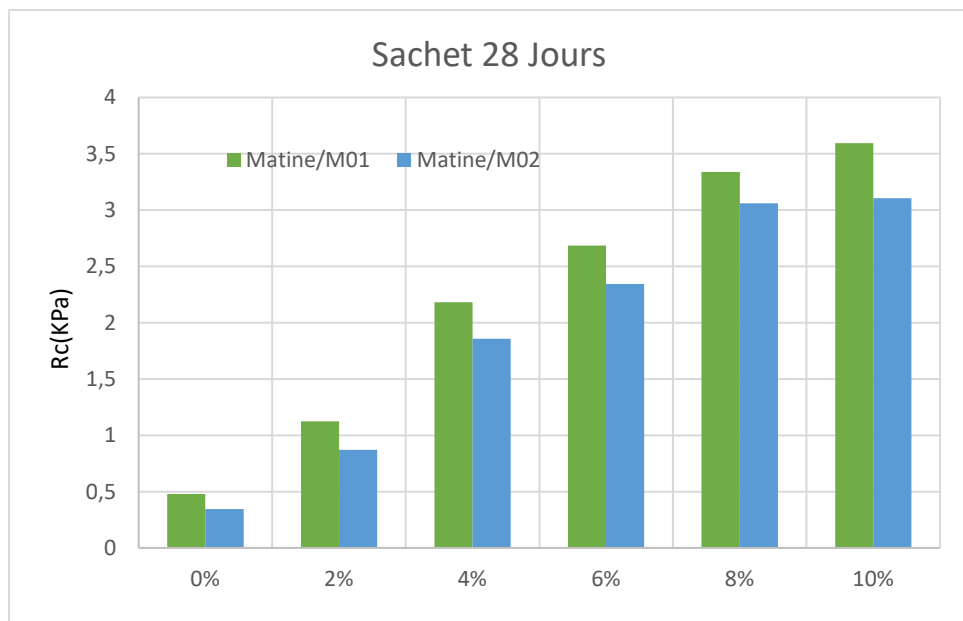
**Figure III.29** l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Matine;14 jours)



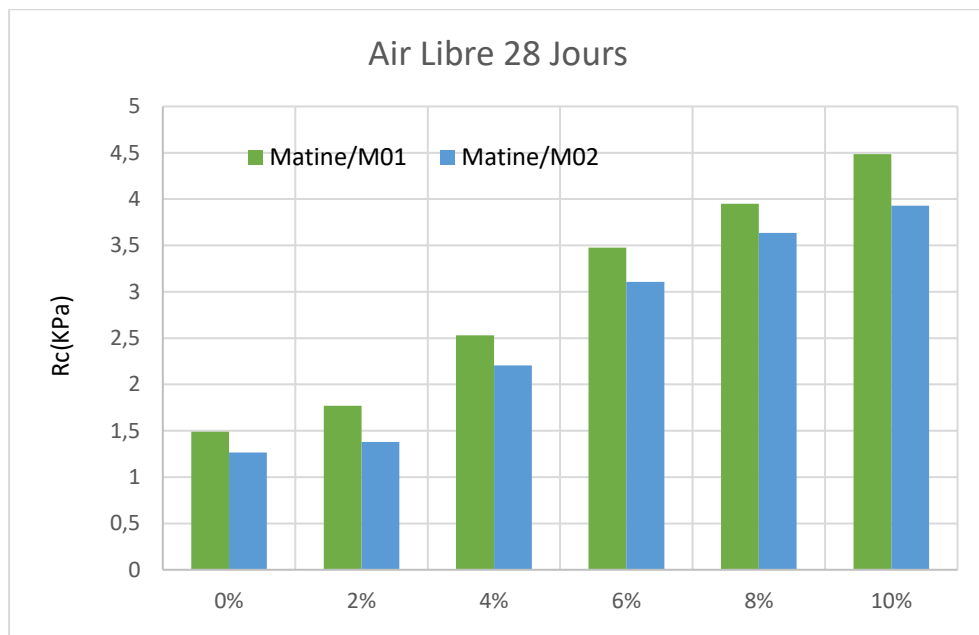
**Figure III.30** l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Chamile;28 jours)



**Figure III.31** l'effet de la méthode de préaération des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Chamile;28 jours)



**Figure III.32** l'effet de la méthode de préparation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Matine;28 jours)



**Figure III.33** l'effet de la méthode de préaération des éprouvettes sur la résistance à la compression simple (Matine;28 jours)

### III.2.2.3 Interprétation des résultats :

On remarque :

- L'augmentation de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en ciment
- Plus le temps de durcissement est long, plus la résistance du sol est grande.
- Les éprouvettes conservées à l'air libre affichent de meilleures performances que celles stockées dans des sachets en plastique bien fermé.
- La première méthode (humidification du sol préalablement par la teneur en eau optimale et laisser pendant 24 h dans un sachet bien fermé puis on ajoute le pourcentage de ciment) donne des résultats meilleurs que la deuxième méthode (mélange le ciment avec le sol sec puis en l'humidifié de mélange avec la teneur en eau optimale)

**CONCLUSION**  
**GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance cruciale des conditions de cure sur le développement des performances mécaniques des sols traités au liant hydraulique (chamil et Matine).

Les résultats expérimentaux obtenus sur le sol argileux de la région de sol de Chaaba el Hamra traité à différents teneurs en ciment (0% sol témoin – 2% - 4% - 6% - 8% - 10%) confirment que le respect de conditions hydriques et thermiques adéquates pendant une durée minimale est indispensable pour assurer une bonne hydratation du liant et la formation d'une matrice cimentaire continue.

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 19,42 et 18,97 avec une moyenne de 19,15%.
- La moyenne des valeurs de bleu de méthylène (VBS) est 3,84, il s'agit d'un sol limoneux- argileux.
- 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).
- La valeur de bleu de méthylène diminue avec l'augmentation des teneurs en ciment, dans les deux classes de ciment (Chamil, Mâtine).
- Les éprouvettes à l'air libre présente de meilleurs performance que la deuxième mode conservation les éprouvettes dans un sachet bien fermé.
- La première méthode (humidification du sol puis l'ajoute de traitement après 24 heures) donne des résultats meilleurs que la deuxième méthode (humidification de mélange sol + traitement préparer à sec).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**AFNOR (1991)** Norme Française : **NF P 94-050** : Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.

**AFNOR (1992)** Norme Française : **NF P 94-057** : Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation.

**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 - Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux - Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tâche.

**AFNOR (1996)** Norme Française : **NF P 94-041** : Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide.

**AFNOR (1997)** Norme Française : **NF P 94-077** Sols : reconnaissance et essais - Essai de compression uniaxiale.

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

**Azzouz.Z (2006)** : Contribution à l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen ». Thèse de magister Université de Tlemcen

**Foucault & Raoult 1995** - Dictionnaire de Géologie

**Kraimia Chahinez et Bouzghaia Rahma.** (Étude de caractérisation des sols gonflants traité au pouzzolane) Université Larbi tébessi, Tébessa 2018

**MEKKI Lakhdar (2008)** méthodologie d'étude et techniques d'identification des paramètres de comportement des sols fins soumis à des cycles de sécheresse prolongée (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.

**Mitchell & Soga 2005** - Fundamentals of Soil Behavior Mitchell, James Kenneth, and Kenichi Soga. *Fundamentals of soil behavior*. Vol. 3. New York: John Wiley & Sons, 2005.

**Nicolas CABANE 2005** - Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation.

**Oti et al. 2009** - Compacted soil treated with cement/waste Oti, J., Kinuthia, J., & Kırgız, M. S. (2024). Ecology-based green clay–hemp brick material made with ground granulated blast-furnace slag. In *Advance Upcycling of By-Products in Binder and Binder-based Materials* (pp. 357-372). Woodhead Publishing.

**Moore & Reynolds (1997)** - Texture and Swelling Characteristics of Argillaceous Rocks.

**Varnes, D. J. (1978)** - Slope movement types and processes. *Special report, 176*, 11-33.

**Foucault & Raoult 1995** - X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals - Dictionnaire de Géologie.