

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET.



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master**

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

CHERIET Yasser.

DEROUICHE Djalal Djelloul.

*Sujet du mémoire*

**AMÉLIORATION DES PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DES  
ARGILES PAR AJOUT DE DÉCHETS D'ALUMINIUM**

M. SERBAH B.

Président

M. BEKKI H.

Rapporteur

M<sup>me</sup> DRAOUI A.

Examineur

M<sup>elle</sup> RENNAK Z.

Examineur

PROMOTION : 2022/2023

## **Remerciements**

On remercie Allah le tout puissant de nous avoir donné la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait Pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Monsieur le professeur BEKKI Hadj, on le remercie pour son encadrement. Nous avons eu le privilège de travailler parmi votre équipe et d'apprécier vos qualités et vos valeurs.

Nous voudrions également remercier et exprimer tous nos remerciements à nos familles pour leur aide.

Nous tenons à remercier les techniciens du laboratoire des travaux publics de l'unité ouest à Tiaret.

On tient également à remercier Mr le président et les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer notre mémoire Et toute Personne qui a participé de près ou de loin.

## **Dédicaces**

**Je dédie ce travail à  
Ceux qui souffrent des  
Difficultés pour arriver à mon succès  
Mon père et ma mère.**

**À tous mes frères et sœurs  
À tous les membres de ma famille**

**CHERIET**

**À mon Encadrant professeur, MR  
BEKKI Hadj**

**Y. CHERIET**

## **Dédicaces**

**Je dédie ce travail à  
Ceux qui souffrent des  
Difficultés pour arriver à mon succès  
Mon père et ma mère.  
À tous mes frères et sœurs  
À tous les membres de ma famille  
DEROUICHE  
À mon Encadrant professeur, MR  
BEKKI Hadj**

**D. Derouiche**

## Abstract

The recycling of waste is a very important operation in the strategy of sustainable development, with the aim of reducing natural resources and protecting the environment. The aim of this project is to study the effect of the addition of aluminum waste on the geotechnical properties of clays. The work consists of characterising a clay taken as a reference material, then stabilising it by pre-treatment with lime and reinforcement of its structure with aluminum waste and then determining the new geotechnical properties obtained. The tests used in this study include identification tests and mechanical tests (odometer, compression and box shear).

**Key Words:** Clay, Treatment, Stabilisation, Aluminum Waste, Lime, Geotechnical Properties.

## Résumé

Le recyclage des déchets est une opération très importante s'inscrivant dans la stratégie de développement durable, et ce dans le but de réduire l'utilisation des ressources naturelles et protéger l'environnement. On se propose, à travers ce Projet de Fin d'Etudes, d'étudier l'effet de l'ajout des déchets d'aluminium sur les propriétés géotechniques des argiles. Le travail consiste à caractériser une argile prise comme matériau de référence, ensuite la stabiliser par un prétraitement avec la chaux et un renforcement de sa structure avec des déchets d'aluminium puis déterminer les nouvelles propriétés géotechniques obtenues. Les essais utilisés dans cette étude comprennent les essais d'identification, de portance et mécaniques (œdométriques, de compression et de cisaillement à la boîte). Il a trouvé que l'ajout de déchets d'aluminium augmente la densité max du mélange et améliore sa portance. Concernant les essais mécaniques, il a été constaté que l'ajout de déchets d'aluminium de dimensions inférieures à 630 µm améliore les caractéristiques intrinsèques de l'argile.

**Mots Clés :** Argile, Traitement à la chaux, Stabilisation, Déchets d'Aluminium, Propriétés Géotechniques.

## ملخص

تعتبر إعادة تدوير النفايات عملية مهمة للغاية في استراتيجية التنمية المستدامة ، بهدف تقليل الموارد الطبيعية وحماية البيئة. الهدف من هذا المشروع هو دراسة تأثير إضافة نفايات الألمنيوم على الخصائص الجيوتقنية للطين. يتكون العمل من توصيف الطين المأخوذ كمادة مرجعية ، ثم تثبيته بالمعالجة المسبقة بالجير وتقوية هيكله بمخلفات الألومنيوم ثم تحديد الخصائص الجيوتقنية الجديدة التي تم الحصول عليها. تشمل الاختبارات المستخدمة في هذه الدراسة اختبارات تحديد الهوية والاختبارات الميكانيكية (عداد المسافات و الضغط و القص الصندوقي).

وجد أن إضافة خرده الألمنيوم تزيد من الكثافة القصوى للخليط وتحسن من رفعه. فيما يتعلق بالاختبارات الميكانيكية ، فقد وجد أن إضافة خرده الألومنيوم ذات الأبعاد الأقل من 630 ميكرومتر يحسن الخصائص الجوهرية للطين.

الكلمات المفتاحية : الطين ، معالجة الجير ، التثبيت ، نفايات الألمنيوم ، الخصائص الجيوتقنية

## Sommaire

### Introduction Générale

Introduction Générale .....	2
-----------------------------	---

### *CHAPITRE I COMPORTEMENT DES ARGILES ET LES TECHNIQUES DE STABILISATION*

I.1. Introduction:.....	4
I.2. Les Argiles : .....	4
I.2.1. Définition : .....	5
I.2.2. Historique des argiles : .....	5
I.2.3. Les minéraux argileux : .....	5
I.2.4. Classification des minéraux d'argiles : .....	6
I.2.5. Les différents types d'argiles : .....	7
I.3. Gonflement des sols argileux : .....	9
I.3.1. Le Gonflement au sens mécanique : .....	10
I.3.2. Facteurs principaux à l'origine du gonflement : .....	10
I.3.3. Mécanisme de gonflement : .....	11
I.3.4. Le Gonflement au sens physico-chimique : .....	11
I.4. Stabilisation des sols argileux : .....	12
I.4.1. But de la stabilisation : .....	13
I.4.2. Techniques de stabilisations utilisées : .....	13
I.4.3. Stabilisation chimique (par additifs) : .....	14
I.4.4. Stabilisation par ajout de chaux : .....	14
I.5. La chaux : .....	14

<b>I.5.1. Définition :</b> .....	<b>14</b>
<b>I.5.2. Historique de la chaux :</b> .....	<b>14</b>
<b>I.5.3.Origine de la chaux :</b> .....	<b>15</b>
<b>I.5.4.Types de chaux :</b> .....	<b>15</b>
<b>I.5.5.Actions de la chaux :</b> .....	<b>15</b>
<b>I.5.6.Action de la chaux sur les argiles :</b> .....	<b>15</b>
<b>I.5.7.Traitement des sols à la chaux :</b> .....	<b>15</b>
<b>I.6.Conclusion :</b> .....	<b>16</b>

## *CHAPITRE II : LES DÉCHETS D'ALUMINIUM*

<b>II.1 Historique de l'aluminium</b> .....	<b>18</b>
<b>II.2 Obtention de l'aluminium</b> .....	<b>18</b>
<b>II.4. Propriétés mécaniques de l'aluminium</b> .....	<b>19</b>
<b>II.5 Influence des éléments d'addition :</b> .....	<b>20</b>
<b>II.6 Le recyclage de l'aluminium</b> .....	<b>21</b>
<b>II.6.1 Le processus de recyclage de l'aluminium (Figure II.1)</b> .....	<b>21</b>
<b>II.6.2 Les avantages de recyclage de l'aluminium</b> .....	<b>22</b>
<b>II.7 L'utilisation des déchets d'aluminium dans la construction</b> .....	<b>23</b>
<b>Conclusion :</b> .....	<b>23</b>

## *Chapitre III : Présentation des essais réalisés*

<b>III.1. Introduction :</b> .....	<b>25</b>
<b>III.2.. Argile non traitée :</b> .....	<b>25</b>

<b>III.3. argile traitée :</b> .....	<b>25</b>
<b>III.4. Analyse de l'argile non traitée:</b> .....	<b>26</b>
<b>III.4.1. Essais d'identification :</b> .....	<b>26</b>
<b>III.4.1.1 Analyses chimiques :</b> .....	<b>26</b>
<b>Essai d'évaluation de carbonates (NA-2789) CaCO<sub>3</sub>:</b> .....	<b>26</b>
<b>Essai de bleu de méthylène :</b> .....	<b>27</b>
<b>III.4.1.2. Analyse granulométrique :</b> .....	<b>28</b>
<b>a) par tamisage (NF P 94-056).....</b>	<b>28</b>
<b>b) Par sédimentométrie (NA 5251, NF P 94-057) :</b> .....	<b>29</b>
<b>III.4.1.3. Limites d'Atterberg (NA 16213, NF P 94-051):</b> .....	<b>30</b>
<b>III.5. Essais de portance :</b> .....	<b>33</b>
<b>III.5.1.Essai Proctor normal (NA 5262, NF P94-093):</b> .....	<b>33</b>
<b>III.5.2. Essai de portance C.B.R (NA 5252, NF P 94-078):</b> .....	<b>37</b>
<b>Essai C.B.R après immersion:</b> .....	<b>38</b>
<b>III.5.3.Essai de Cisaillement à la boîte (NF94-071-1):</b> .....	<b>41</b>
<b>Les essais de cisaillement réalisés sont de type non consolidé-non drainé(UU).....</b>	<b>42</b>
<b>III.5.4. Essai de compressibilité et consolidation à l'oedomètre (NF P 94-090-1).....</b>	<b>43</b>
<b>Au cours de l'essai, on mesure :</b> .....	<b>43</b>
<b>III.6. Conclusion :</b> .....	<b>44</b>

## **Chapitre IV : Analyse et Interprétation des résultats**

<b>IV.1. Introduction :</b> .....	<b>46</b>
<b>VI.2 Classification de l'argile étudiée :</b> .....	<b>46</b>



<b>IV.3. Essais de Portance :</b> .....	<b>46</b>
<b>IV.3.1. Essais Proctor</b> .....	<b>46</b>
<b>IV.3.2. Essais CBR</b> .....	<b>48</b>
<b>IV.4. Essais Mécaniques</b> .....	<b>50</b>
<b>IV.4.1. Essais de Cisaillement à la boîte</b> .....	<b>50</b>
<b>IV.4.2. Essais Oedométriques</b> .....	<b>52</b>
<b>IV.5 Conclusion :</b> .....	<b>52</b>

*Conclusion Générale*

<b>Conclusion Générale</b> .....	<b>54</b>
----------------------------------	-----------

**Références bibliographiques**

<b>Liste de référence :</b> .....	<b>56</b>
<i>Les Annexes</i> .....	<b>58</b>

## Liste de tableaux

- Tableau II.1: Propriétés mécaniques de l'aluminium . ----- 20
- Tableau II.2 : Propriétés physiques de l'aluminium (Tho. 1997)----- 21
- Tableau III.1: Résultats de l'essai de VBS pour l'argile----- 28
- Tableau III.2 : Résultats de l'essai de limite de liquidité de l'argile naturelle. ---- 31
- Tableau III.3: Résultats de l'essai de détermination de la limite de plasticité de  
L'argile naturelle----- 32
- Tableau III.4: Les résultats finaux des limites d'Atterberg.----- 33
- Tableau III.5: Limites d'Atterberg pour l'argile naturelle. ----- 33
- Tableau III.6: Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile Naturelle ----- 34
- Tableau III.7: Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile + 3% La chaux. ----- 35
- Tableau III.8: Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile +3% La chaux +1%  
Aluminium. ----- 35
- Tableau III.9: Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile +3% La chaux +1%  
Aluminium. ----- 36
- Tableau III.10: Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile +3% La chaux +1%  
Aluminium. ----- 36
- Tableau III.11: Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile +3% La chaux +1%  
Aluminium. ----- 37
- Tableau III.12: Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile +3% La chaux +3%  
Aluminium----- 37
- Tableau III.13: Les Résultats de l'essai CBR sur l'Argile Naturelle. ----- 39
- Tableau III.14: Les Résultats de l'essai CBR sur l'Argile +3% La chaux. ----- 40

- Tableau III.15: Les Résultats de l'essai CBR sur l'Argile +3% La chaux+1% Aluminium. ----- 40
- Tableau III.16: Les Résultats de l'essai CBR sur l'Argile +3% La chaux+1% Aluminium. ----- 40
- Tableau III.17: Les Résultats de l'essai CBR sur l'Argile +3% La chaux+3% Aluminium. ----- 41
- Tableau III.18 : Caractéristiques intrinsèques des différents mélanges d'argile et d'aluminium. ----- 42
- Tableau III.19: Les résultats de l'essai œdométrique. ----- 44
- Tableau IV.1 : Classification du matériau étudié selon l'abaque de Casagrande....46

## Liste de figures

- Figure I.1 : structure des minéraux argileux. (RAUTUREAU *et al.*, 2011). ----- 7
- Figure I.2 : Photographies au MEB des argiles Mitchell (1976) cité par H uidi et al (2006).----- 7
- Figure I.3: types de gonflements ----- 9
- Figure I.4 : Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen, 1988).----- 10
- Figure I.5 : Mécanismes des causes de gonflement (Gens et Alonso, 1992). ----- 12
- Figurier II.1 La processus de recyclage de l'aluminium (FEDEREC, 2017).----- 22
- Figure III.1. Appareil de l'Essai d'évaluation du taux de carbonates. ----- 26
- Figure III.2 : Les étapes de l'essai de bleu de méthylène. (a) : prélèvement d'une goutte de suspension. (b) : dépôt sur papier filter ----- 27
- Figure III.3 : Série de tamis utilisée pour l'essai de granulométrie par tamisage. 28
- Figure III.4 : Appareillage d'analyse granulométrique sédimentométrie. ----- 29
- Figure III.5: Courbes granulométrique de l'argile (tamisage par voie humide et Sédimentométrie).----- 29
- Figure III.5. Appareillage de limites d'Atterberg. ----- 31
- Figure III.6: Appareil essai Proctor. ----- 34
- Figure III.7: Appareil de poinçonnement (essai CBR).----- 39
- Figure III.8: Essai de cisaillement à la boîte : (a) appareil utilisé ; (b) échantillon cisailé. ----- 42
- Figure III.9. Dispositif de l'Essai œdométrique. ----- 43

- Figure IV.1. Courbes Proctor pour les différents mélanges ----- 47
- Figure IV.2. Courbes Proctor pour les différents mélanges composés de déchets  
d'aluminium de différentes dimensions ----- 47
- Figure IV.3. Valeurs CBR pour les différents mélanges à 10C/C. ----- 48
- Figure IV.4. Valeurs CBR pour les différents mélanges à 25C/C. ----- 49
- Figure IV.5. Valeurs CBR pour les différents mélanges à 56C/C. ----- 49
- Figure IV.6. Angle de frottement en conditions UU des différents mélanges.----- 50
- Figure IV.7. Cohésion non drainé des différents mélanges.----- 50
- Figure IV.8. Courbes de compressibilité des différents mélanges ----- 51

# **Introduction**

## **Générale**

## **Introduction Générale**

L'amélioration des propriétés géotechniques des sols argileux est un sujet d'intérêt croissant dans le domaine de la géotechnique. Les sols argileux sont souvent utilisés dans la construction, mais ils présentent des caractéristiques mécaniques défavorables telles qu'une faible résistance, une forte compressibilité et une sensibilité aux changements d'humidité. Pour remédier à ces problèmes, différentes techniques d'amélioration des sols ont été développées, et l'une d'entre elles consiste à incorporer des déchets d'aluminium dans l'argile.

L'ajout de déchets d'aluminium aux sols argileux vise à améliorer leurs propriétés géotechniques de manière économique et écologique. Les déchets d'aluminium, provenant de diverses sources industrielles ou de recyclage, offrent une solution pour valoriser ces matériaux tout en améliorant les caractéristiques des sols argileux.

L'incorporation de déchets d'aluminium dans l'argile peut entraîner plusieurs effets bénéfiques. Tout d'abord, les particules d'aluminium interagissent avec les minéraux argileux, renforçant ainsi la structure du sol. Cela peut augmenter la résistance à la compression, la résistance au cisaillement et la cohésion de l'argile, ce qui est essentiel pour assurer la stabilité des fondations et des structures construites sur ces sols.

De plus, les déchets d'aluminium peuvent également modifier les propriétés hydrauliques des sols argileux. Ils peuvent réduire la plasticité de l'argile, améliorant ainsi sa capacité à résister aux changements de volume associés aux fluctuations d'humidité. Cela peut réduire les problèmes de retrait et de gonflement, qui sont courants dans les sols argileux, et améliorer la stabilité à long terme des ouvrages.

L'utilisation de déchets d'aluminium dans l'amélioration des propriétés géotechniques des sols argileux présente également des avantages environnementaux. Elle permet de valoriser des déchets industriels qui seraient autrement éliminés, contribuant ainsi à la réduction des déchets et à la promotion d'une économie circulaire. De plus, cette approche peut réduire la dépendance aux matériaux naturels, préservant ainsi les ressources naturelles.

Ce thème s'inscrit dans le contexte global de l'exploration du comportement hydromécanique des argiles. Il s'agit d'étudier, en laboratoire, l'effet d'ajout de déchets d'aluminium sur le comportement mécanique d'une argile prétraitée avec la chaux.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres:

- ✓ Le premier chapitre est réservé au comportement des argiles et les techniques de stabilisation ;
- ✓ Dans le chapitre deux, on présente les déchets d'aluminium et leur recyclage ;
- ✓ Dans le chapitre trois, on présente les essais de laboratoire réalisés sur l'argile prise comme référence (à stabiliser) et les mélanges d'argile prétraitée à la chaux et des déchets d'aluminium à différentes proportions (1% et 3%). Il sera présenté, en particulier, les essais mécaniques et de portance (Proctor, CBR, Essais de cisaillement à la boîte; Œdométriques)
- ✓ Le quatrième chapitre est réservé à l'analyse et l'interprétation des résultats.

En conclusion, l'ajout de déchets d'aluminium pour améliorer les propriétés géotechniques des sols argileux est une approche prometteuse pour l'ingénierie géotechnique. Cette technique offre la possibilité d'améliorer la résistance et la stabilité des sols argileux tout en valorisant des déchets industriels. Cependant, des études approfondies et des essais sur le terrain sont nécessaires pour évaluer l'efficacité et la durabilité de cette technique.

# ***CHAPITRE I :***

***COMPORTEMENT DES ARGILES***

***ET LES TECHNIQUES DE***

***STABILISATION***



# ***CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation***

---

## **I.1. Introduction:**

Le but de ce chapitre est d'introduire des idées fondamentales sur les caractéristiques physico-chimiques des minéraux argileux ainsi que les caractéristiques distinctives qui permettent l'identification de la famille et des espèces. Le phénomène de gonflement dépend des caractéristiques minéralogiques du matériau argileux et de la composition de la solution hydratante. Ainsi, une explication microscopique du phénomène est essentielle pour comprendre pleinement les caractéristiques uniques qui distinguent ces matériaux par rapport à l'eau. Il existe différents types de solutions disponibles, dont l'une étant la stabilisation par la combinaison de chaux et de matrices en aluminium.

## **I.2. Les Argiles :**

### **I.2.1. Historique des argiles :**

Depuis des milliers d'années, le premier matériau naturel utilisé par l'homme pour la construction est la terre. À travers les âges et les continents, l'argile semble avoir eu un impact significatif sur tous, que ce soit à des fins médicales ou pour d'autres réalisations quotidiennes comme la construction, les objets décoratifs, la poterie ou les surfaces d'écriture. Ils ont incontestablement accompagné la croissance des sociétés humaines. Jusqu'à l'avènement de l'industrie pharmaceutique à la fin du XIXe siècle et au début du XXe siècle, l'unanimité régnait. Près de 7000 ans avant Jésus-Christ, l'Égypte ancienne utilisait l'argile pour la momification en raison de ses propriétés purifiantes, absorbantes et mortelles. La fameuse "boue du Nil" était une substance fréquemment utilisée dans cette pratique (**Hernot, F. 2006**).

L'une des premières traces d'argiles dans l'histoire est cette reconstitution de la morphologie originelle. À cette époque, l'arsenic figurait également dans la Pharmacopée en tant que remède très naturel pouvant traiter diverses maladies telles que les brûlures, les maux d'estomac, etc. La facilité de pétrissage et de modelage fait de l'argile un bon support pour la structure initiale. Les premières traces de fabrication de briques remontent à l'époque des Babyloniens, qui les fabriquaient à l'aide de crues et ne les séchaient qu'au soleil. Mais depuis 2500 avant J.-C., l'homme fabrique la brique au four avec des profils variés, ce qui permet à l'artisan d'enrichir la qualité artistique de la construction en fonction des différentes tendances régionales et historiques. La brique en terre cuite est l'un des rares produits fabriqués entièrement à partir de composants naturels tels que les argiles, le sable, l'eau et le feu (**Hernot, F. 2006**).

Ces composants, Les formes opportunistes, grâce aux nouvelles technologies de contrôle de la température de cuisson, produisent un matériau de construction durable, agréable à l'œil et rentable financièrement (**S2**).

Bischof ou Le Chatelier ont mis au point les mécanismes de la céramique cuite en terre vers le début du vingtième siècle.

# ***CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation***

---

## **I.2.2. Définition :**

Le mot "argile" vient du latin "Argilla". Ce même mot est dérivé du grec argillos, dont le racine, argos, signifie "d'une blancheur éclatante». Du XIIe au XVIe siècle, argile se prononçait "Ardille". Ce mot s'est ensuite transformé en "arzille", "arsille" et enfin "argile". L'argile, minéral naturel, est un silicate ou un aluminosilicate hydraté à structure lamellaire. Dans le langage géologique, le mot "argile" renvoie à deux concepts une particule et un minéral.

**Une particule :** est définie comme ayant une taille inférieure à 4 micromètres. Quelle que soit sa nature,

**Minéralogique Minéral :** L'Argile est un minéral, ou plus précisément une famille de minéraux, appartenant à la famille des silicates, plus précisément à la famille des phyllosilicates (silicates en feuillets). Sa structure est reconnaissable par analyse aux rayons X et se distingue par la superposition de feuillets constitués de couches octaédriques ou tétraédriques. Plusieurs cations, tels que K, Na et Ca, sont placés dans l'espace entre les feuilles de papier, ou espace inter-foliaire. L'argile résulte typiquement de la synthèse altérée par l'eau d'autres silicates (sauf le quartz).

C'est pour cette raison qu'on le retrouve systématiquement dans le sol et les formations superficielles. Des détritux minéraux de très faible épaisseur se retrouvent également très fréquemment dans les roches sédimentaires. Combiné à un autre minéral, comme la calcite, il donne naissance à la marne. S'il n'y a que de l'argile, on parlera d'argilite pour décrire la roche. Parfois, les deux idées présentées ici se combinent.

La minérale argile est souvent très finement cristallisé (cristaux ultramicroscopiques voire cryptocristallins). Le composant principal du sol à particules fines (inférieures à 2 micromètres) qui résulte de la désintégration physique ou mécanique des roches et de la transformation chimique qui s'ensuit est l'argile. Ce type de sol est extrêmement sensible à la présence d'eau, cohésif, compressible, extrêmement difficile à travailler, à compacter et parfois à gonfler. Il a un taux d'évaporation très lent car il est peu perméable (**S1**).

## **I.2.3. Les minéraux argileux :**

Ces phyllo-silicates d'aluminium sont reliés par les atomes communs O et OH et ont pour constituants des couches d'Al(OH)<sub>6</sub> octaédriques et de SiO<sub>4</sub> tétraédriques. La distance inter-réticulaire sépare les deux feuillets suivants. Des substitutions atomiques se produisent fréquemment dans les feuillets.

La structure cristalline peut être désorganisée (la cristallinité est faible). D'autre part, il existe des déséquilibres de niveaux de charge ; ce déséquilibre est corrigé par l'adsorption de cations dans la région inter-foliaire (capacité d'échange d'argile). Selon la structure du feuillet, on distingue principalement les argiles 1/1 (1 tétraédrique pour 1 octaédrique) et les argiles 2/1 (2 tétraédriques pour 1 octaédrique) (**CAILLERE et al. 1982**).

# ***CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation***

---

## **I.2.4. Classification des minéraux d'argiles :**

La classification des argiles et leur nomenclature dépendent de leur composition chimique et de l'ordre structural. Les travaux de l'Association Internationale pour l'Etude des Argiles AIPEA (1966-1972) ont permis d'aboutir à une classification qui repose sur les critères suivants :

- Type de feuillet 2:1 ou 1:1.
- Charge globale du feuillet.
- Nature des cations inter-foliaires.

Suivant le mode d'agencement des tétraèdres et des octaèdres, on peut distinguer deux grandes familles de minéraux :

1) Les minéraux fibreux qui sont des espèces à pseudo feuillets, par exemple les sépiolites.

2) Les minéraux phylliteux à structure lamellaire. Ces derniers sont les plus répandus et les plus étudiés. Il existe plusieurs groupes de minéraux :

- Minéraux 7A° : Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique, il est de qualité : T : O ou de type 1 :1 .
- Minéraux 10A° : Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique, il est de qualité : T:O:T ou de type 2 :1 .
- Minéraux 14A° : Le feuillet est constitué de l'alternance de T:O:T et de couche octaédrique inter-foliaire (**Alain Meunier, 2005**).

# CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation

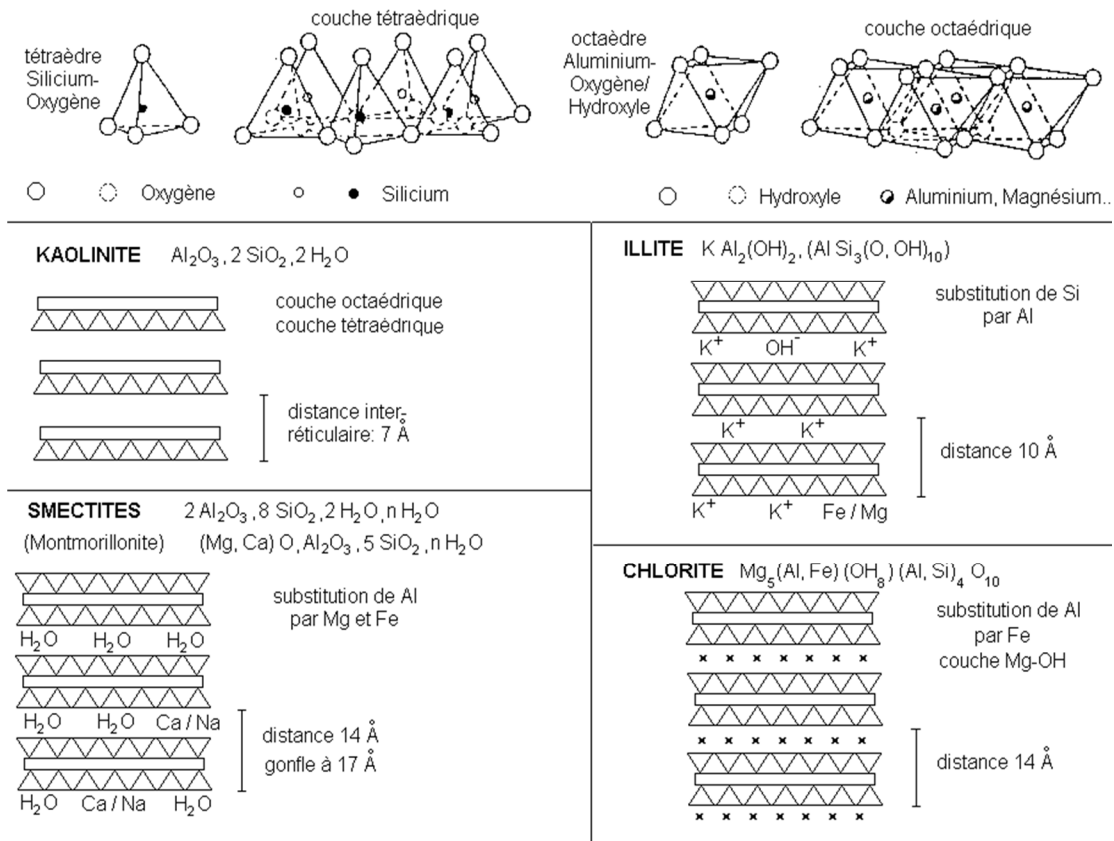


Figure I.1 : structure des minéraux argileux. (RAUTUREAU et al., 2011).

## I.2.5. Les différents types d'argiles :

Il y a lieu de distinguer trois grandes familles d'argiles caractérisées par des propriétés différentes (Du chauffour, 1983 ; Caillère et al, 1982).

Les types d'argiles les plus fréquents sont : la kaolinite, la montmorillonite et l'illite

(Figure I.2).

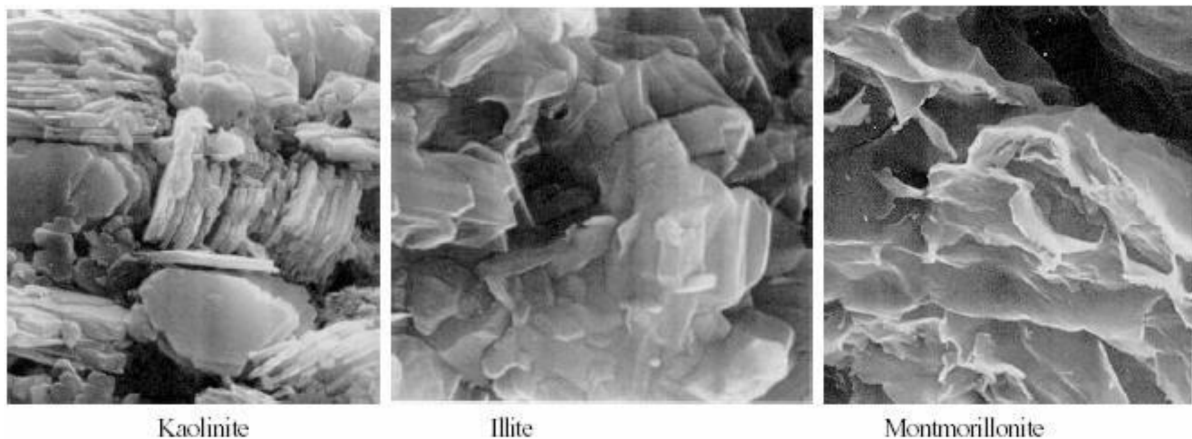


Figure I.2 : Photographies au MEB des argiles Mitchell (1976) cité par Huidi et al(2006).

# ***CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation***

---

## **La kaolinite :**(1/1, $d=7\text{\AA}$ ).

Est créée par l'empilement de nombreuses couches de feuillets tétraédriques et octaédriques alternativement empilés, d'une épaisseur de 0,72 nm chacun. Ces feuilles sont maintenues ensemble par de fortes liaisons hydrogène qui les empêchent de se séparer. La kaolinite est utilisée dans les céramiques, le papier, la peinture et la médecine.

## **Les Illites :**(2/1, $d=10\text{\AA}$ ).

Est créée par l'empilement de plusieurs couches de 0,96 nm d'épaisseur constituées d'un feuillet octaédrique inversé pris en sandwich entre deux feuillets tétraédriques, comme le montre la figure 3.6b. Elles sont maintenues ensemble par des ions potassium, où les connexions sont plus faibles que dans la kaolinite.

## **Les montmorillonites :** (2/1, $d= 14 \text{\AA}$ ).

Également appelées smectites, ont la même structure atomique que l'illite, mais les couches sont maintenues ensemble par une faible force de van der Waals. Lorsque l'eau pénètre entre les couches, celles-ci se séparent facilement et il y a une augmentation substantielle du volume, appelée gonflement. Les argiles du type montmorillonite sont appelées argiles expansives ou réactives. Elles se dilatent en présence de d'eau et se rétractent en séchant.

## **Les Chlorites :**(2/1, $d=14 \text{\AA}$ ).

Une couche inter-foliaire de Mg et OH est utilisée pour remplir l'espace. Localement, le Fe remplace l'Al. Les chlorites se trouvent en plus grandes concentrations dans les roches magmatiques et se forment également au cours du processus diagenétique des roches sédimentaires. On les trouve sous forme de détritiques dans les sols des climats moins abrasifs.

## **La Glauconie :**

Minéral vert ferrique proche de l'illite exclusivement formé en milieu marin peu profond.

## **la Vermiculite :**(2/1, $d= 12 \text{\AA}$ ).

Fréquente dans les sols de la zone tempérée. La couche octaédrique contient du Fe et du Mg. La vermiculite est proche des illites et chlorite mais montre des propriétés gonflantes.

## **Les argiles fibreuses :**

Les feuillets sont discontinus et forment des rubans. Les principaux types sont la sépiolite et l'attapulgitite ou paligorskite. On les trouve dans les milieux confinés force de van der Waals.

# CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation

## I.3. Gonflement des sols argileux :

Le principal facteur influençant le phénomène de gonflement est la minéralogie du matériau argileux. Il implique l'adsorption de molécules d'eau sur la surface extérieure de la particule d'alumine. Les changements de volume qui résultent d'une hydratation particulière sont généralement minimes. On distingue deux types d'inflation : l'inflation intra-particulaire (inter-foliaire) et l'inflation inter-particulaire (Mouroux *et al*, 1988 ; Popescu, 1986)

(Figure I.3).

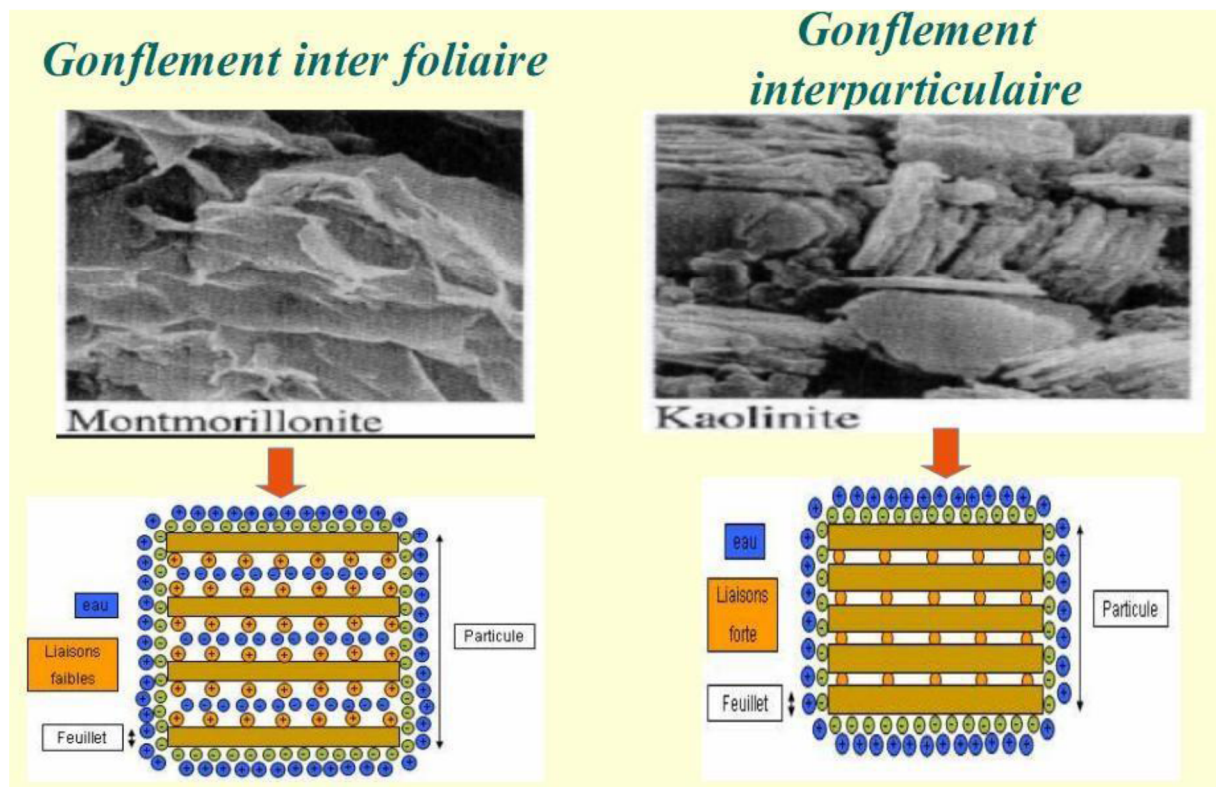


Figure I.3: types de gonflements

Lorsque ces cations compensateurs entrent en contact avec l'eau dans les argiles, leur structure entraîne leur hydratation.

Le cation hydraté grossit en raison de la présence d'une molécule d'eau qui l'entoure. Il en résulte une augmentation de la distance inter-foliaire et, par conséquent, un affaiblissement de la liaison entre les feuillets.

C'est l'adsorption inter-foliaire qui permet à d'autres molécules d'eau de s'étaler entre les fibres d'une même particule.

# CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation

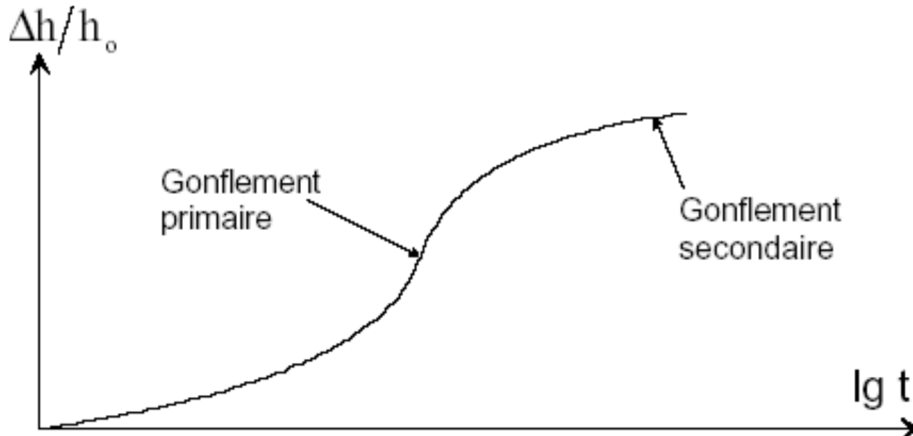
## I.3.1. Le Gonflement au sens mécanique :

Le phénomène de gonflement, de même que le tassement, peut provenir d'une modification de l'état de contraintes dans le sol en présence d'eau. Il est donc important de rappeler les bases de la mécanique des sols appliquées à l'état de contraintes dans un sol.

Selon Holtz et Gibb (1956) et Chen (1988), le gonflement se divise en deux phases : le gonflement primaire et le gonflement secondaire.

- **Gonflement primaire:** qui prend place très tôt, sa fin est caractérisée par un point d'inflexion permettant le changement de l'allure de la courbe.
- **Gonflement secondaire:** qui est caractérisé par la portion linéaire de la courbe.

La fluctuation relative de la hauteur de l'échantillon en fonction du temps est illustrée à la **figure I.4**.



**Figure I.4 :** Courbe du gonflement en fonction du temps (Chen, 1988).

## I.3.2. Facteurs principaux à l'origine du gonflement:

Il existe quatre principaux phénomènes expliquant les causes du gonflement :

- hydratation par adsorption.

# ***CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation***

---

- hydratation par osmose.
- hydratation par capillarite.
- transformations chimiques.

### **I.3.3.Mécanisme de gonflement :**

L'insertion de molécules d'eau entre les feuillets fait gonfler l'argile. Il est évident que l'accès d'une molécule d'eau est envisageable si la distance inter-foliaire est supérieure à  $3A^\circ$  (taille de la molécule d'eau). De ce fait, les forces d'attraction entre les feuilles sont désormais renforcées par sa présence et ont tendance à s'éloigner, augmentant l'écart inter-foliaire et entraînant le phénomène de gonflement. De nombreuses théories ont été émises concernant les mécanismes sous-jacents à l'expansion des argiles. Terzaghi (1948) et Bolt (1956) ont divisé le phénomène d'expansion en deux processus différents, l'un mécanique et l'autre physico-chimique. Certains auteurs, comme Van Olfen (1977), pensent que l'hydratation des particules argileuses peut expliquer le gonflement du sol.

### **I.3.4.Le Gonflement au sens physico-chimique :**

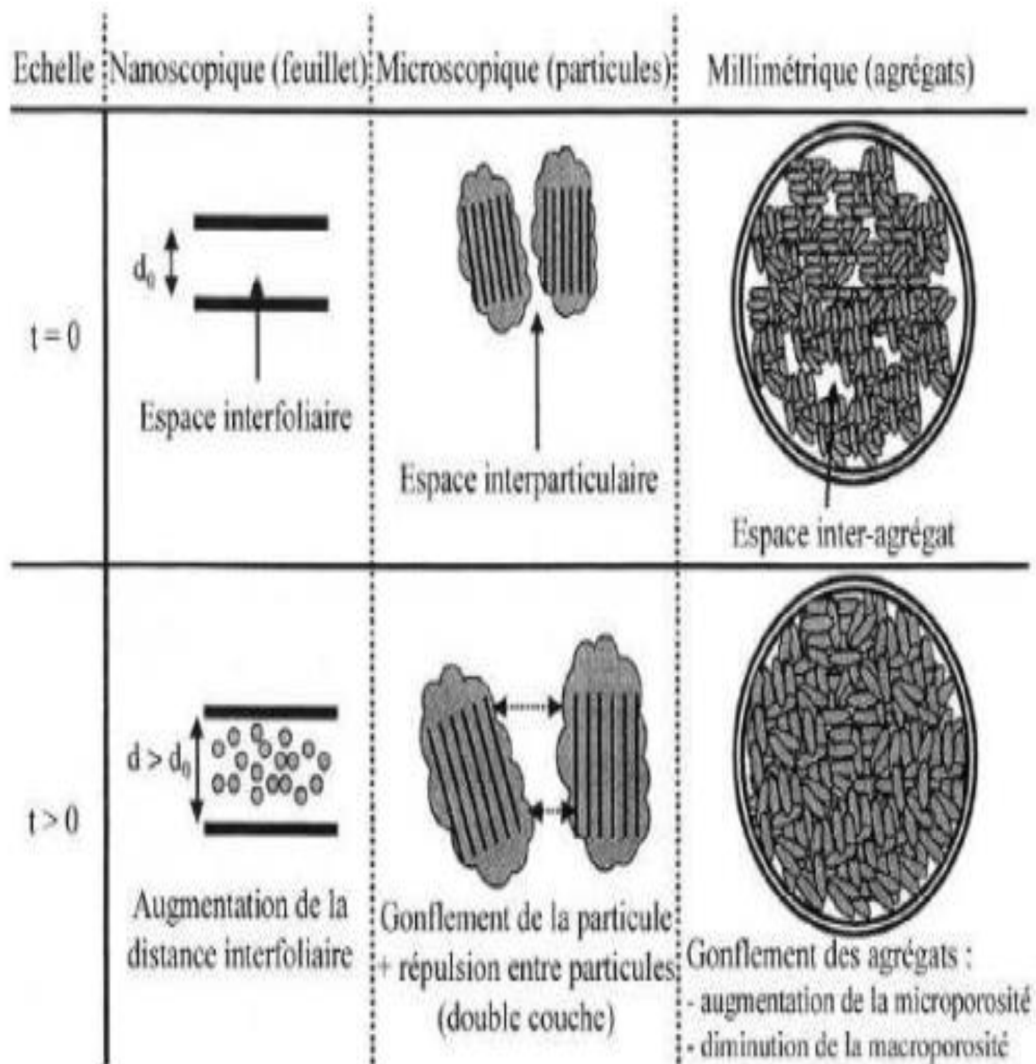
Les forces de répulsion entre les particules argileuses provoquent le gonflement, qui se traduit par une augmentation du volume lorsque la tension de l'eau augmente. Les surfaces minéralogiques, électrochimiques et uniques des particules argileuses, qui varient d'une famille d'argiles à l'autre, sont directement liées au gonflement de ces particules à l'échelle microscopique.

Selon **Morel (1996) et Mouroux *et al.* (1988)**, le phénomène de gonflement a deux origines (**figure I.5**)

- L'hydratation des espaces inter-foliaires qui se traduit par une augmentation de la porosité inter-foliaire (gonflement inter-foliaire ou gonflement des cristallines)
- La répulsion entre les particules qui est une augmentation de la porosité inter-foliaire et inter-particulaire pouvant influencer l'ensemble des argiles (gonflement inter-particulaire ou gonflement osmotique).



# *CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation*



**Figure I.5 :** Mécanismes des causes de gonflement (Gens et Alonso, 1992).

## **I.4. Stabilisation des sols argileux :**

La sélection des matériaux repose avant tout sur un compromis technico-économique, qui prend en compte des facteurs tels que la disponibilité des matériaux et les coûts de transformation et de transport.

Souvent, dans ce contexte, il convient d'envisager la stabilisation de ces matériaux, en particulier pour les sols fins.

# ***CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation***

---

Malgré leur résistance, les sols argileux naturels sont très sensibles aux changements de température et d'humidité lorsqu'ils sont simplement compactés, mis en œuvre et exposés aux conditions extérieures.

L'objectif premier de la stabilisation des sols argileux est de rendre le matériau moins sensible aux variations de la teneur en eau et d'éviter qu'il ne se transforme simultanément en tourbière ou qu'il ne s'évapore sous l'influence de l'humidité.

Après les effets des sols expansifs, de nombreux chercheurs se sont penchés sur la stabilisation des sols expansifs. De nombreux facteurs internes et externes jouent un rôle dans le phénomène complexe qu'est le gonflement des sols argileux. Sa complexité est principalement due à la structure minérale mixte d'illite et de montmorillonite de l'argile (**S3**).

## **I.4.1. But de la stabilisation :**

La stabilisation des sols argileux vise à satisfaire les points énumérés ci-après :

- Rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir.
- Éviter le décapage et le remplissage par des matériaux d'apport.
  
- L'assèchement des sols permettent de les rendre praticables aux engins de chantiers.
- L'amélioration des caractéristiques géotechniques de façon durable.
- Limiter la sensibilité des argiles à l'eau.
- Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre particules (résistance mécanique).
- Chez les sols argileux une réduction instantanée de l'angulosité avec la floculation.
- Diminuer les variations de volume dans le cas des sols gonflants.

## **I.4.2. Techniques de stabilisations utilisées :**

La stabilisation des sols expansifs est souvent opérée pour augmenter leur résistance, ainsi que pour minimiser la sensibilité du sol aux variations de la teneur en eau. Les techniques de stabilisation les plus utilisées sont :

- ✓ La stabilisation mécanique.
- ✓ La stabilisation thermique.
- ✓ La stabilisation chimique.

Le choix de l'une de ces méthodes dépend de plusieurs paramètres tels que ;

- Les considérations économiques.
- La nature du sol à traiter.
- La durée de l'opération.
- La disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement. (**S4**).

# ***CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation***

---

## **I.4.3. Stabilisation chimique (par additifs) :**

Deux techniques de stabilisation chimique peuvent être effectuées :

- *Stabilisations chimiques par ajouts des matériaux.*
- *Stabilisation chimique par additifs.*

## **I.4.4. Stabilisation par ajout de chaux :**

L'application de la chaux pour stabiliser les argiles a été couronnée de succès pendant de nombreuses années. En effet, plusieurs études ont montré que le traitement chimique des sols peut altérer de façon permanente leurs propriétés mécaniques (**Biczysko, 1996 ; Greaves, 1996 ; Kelley, 1988**). **Little (1995)** précise que, de manière générale, un sol stabilisé au niveau des fissures présente des performances structurales comparables à celles d'une fondation en roche naturelle ou concassée.

Lorsque la chaux est ajoutée à un sol à grains fins, de nombreuses réactions sont déclenchées: l'échange cationique et la floculation modifient très immédiatement les propriétés de plasticité, de maniabilité, de résistance et de déformation du sol (**Moore, 1987**).

## **I.5. La chaux :**

### **I.5.1. Définition :**

Le terme "chaux" désigne une matière typiquement blanche et poudreuse produite par la décomposition thermique du calcium. Il est utilisé depuis des siècles. Il existe différentes sortes de chaux utilisées dans divers domaines, notamment le traitement des sols argileux.

Chimiquement, il s'agit d'un oxyde de calcium avec des quantités plus ou moins importantes d'oxyde de magnésium, cependant le terme "chaux" peut faire référence à plusieurs états chimiques de ce produit.

### **I.5.2. Historique de la chaux :**

La chaux existe depuis plusieurs milliers d'années. Nos ancêtres l'utilisaient pour construire et monter des murs, faire des finitions, peindre.

Pour construire les pyramides, les Égyptiens, alliés ou non à la charrue, la regardent à l'œuvre. Les civilisations mésopotamienne, phénicienne, inca et maya ont toutes utilisé la maçonnerie pour construire leurs structures.

Au cours des premiers siècles, la chaux a été au centre de toutes les recherches et a eu son heure de gloire à l'intérieur de la structure.

Les chaux ont perdu leur contrôle sur la structure avec la découverte du ciment dans la seconde moitié du dix-neuvième siècle et au début du vingtième.

# ***CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation***

---

Les fours à chaux très abondants s'éteignirent les uns après les autres. Heureusement, cette disparition ne fut pas complète, et on redécouvre aujourd'hui les vertus incomparables de ce produit.

## **I.5.3.Origine de la chaux :**

La source de production de la chaux est la roche de calcaire (carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ) qui se produit comme roche sédimentaire. Quand la terre est pulvérisée, le carbonate de calcium s'adresse comme chaux d'agriculture. Elle peut être utilisée pour neutraliser les sols acides. Pour le génie civil ou les applications de bâtiment, Plusieurs formes de chaux sont requises.

## **I.5.4.Types de chaux :**

Plusieurs types de chaux ont été utilisés comme agents de stabilisation pendant nombreux années avec succès. Cependant, le produit le plus utilisé étant la chaux hydratée d'une teneur plus élevée de calcium, chaux vive calcique, lait de chaux et chaux dolomitique, chacune d'entre elles présentant avec les sols des interactions spécifiques (**Guezoul Ikram et Bendjazia Fatima, 2020**).

## **I.5.5.Actions de la chaux :**

- Flocculation.
- Carbonatation.
- Réaction pouzzolanique.

## **I.5.6.Action de la chaux sur les argiles :**

La majorité des minéraux argileux proviennent de l'oxydation des roches. On les trouve dans les sols, les sédiments, les roches sédimentaires et les zones d'amplification hydrothermale. La majorité d'entre eux sont des silicatées phyllo.

C'est-à-dire qui se présente sous la forme de petites feuilles d'aluminium plus ou moins hydratées.

Les couches qui composent les feuillets sont des couches tétraédriques de  $\text{SiO}_4$  et octaédriques d' $\text{Al}(\text{OH})_6$  reliées par des atomes partagés d' $\text{O}^{2+}$  et d' $\text{OH}^-$ .

La capacité des minéraux argileux à adsorber les molécules d'eau dans la région inter-foliaire varie d'une espèce d'argile à l'autre. Elle est à l'origine de la sensibilité des argiles à l'eau.

Lorsque des chaux vivantes sont associées à un sol argileux humide, elles s'hydratent rapidement et fixent une quantité importante d'eau (**Guezoul Ikram et Bendjazia Fatima, 2020**).

## **I.5.7.Traitement des sols à la chaux :**

# ***CHAPITRE I : Comportement Des Argiles Et Les Techniques De Stabilisation***

---

Le traitement à la chaux est obtenu par l'oxyde de calcium CaO (chaux vive) ou de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)<sub>2</sub> (chaux éteinte). La chaux agricole est généralement du carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>). Elle est inefficace pour l'amélioration et la stabilisation des sols. L'effet stabilisateur dépend de la réaction entre la chaux et les minéraux argileux. Les principaux effets de cette réaction sont les suivantes:

- Une augmentation de la résistance au cisaillement et de la capacité portante du sol.
- Une réduction de la susceptibilité au gonflement et retrait.
- Une amélioration de la résistance au trafic et aux intempéries.
- Une réduction de la teneur en eau.
- Une amélioration de la maniabilité et les caractéristiques de compactage (**Guezoul Ikram et Bendjazia Fatima, 2020**).

## **I.6. Conclusion :**

Les problèmes posés par l'expansion des sols et des roches au cours des projets de génie civil se sont considérablement développés. Le phénomène affecte plusieurs types de projets de construction et intéresse un large éventail de secteurs géographiques.

Le besoin de caractériser ce type de comportement et d'établir les paramètres qui lui sont associés afin de concevoir de nouvelles structures ou d'améliorer le confort des structures existantes s'est donc fait sentir depuis longtemps. Cela a conduit à la nécessité de tester les sols et les roches en laboratoire à l'aide d'expériences de gonflage.

Les procédures de stabilisation les plus populaires sont déterminées par un certain nombre de facteurs, notamment les considérations économiques, le type de sol à traiter, la durée du projet, l'accessibilité des matériaux et les conditions environnementales.

***CHAPITRE II :***  
***LES DÉCHETS D'ALUMINIUM***

**II.1 Historique de l'aluminium**

L'aluminium est un métal léger, malléable et résistant à la corrosion, qui est utilisé dans une grande variété d'applications industrielles et commerciales. L'histoire de l'aluminium remonte au début du 19<sup>ème</sup> siècle, lorsque le métal a été découvert par le chimiste danois Hans Christian Orsted en 1825(Marietta, 1995).

Cependant, il a fallu attendre plusieurs décennies pour que l'aluminium soit produit à grande échelle. En 1854, l'ingénieur français Henri Étienne Sainte-Claire Deville a développé un procédé de production d'aluminium par électrolyse, qui a permis de produire le métal en grandes quantités à un coût abordable(Yehia, 2017).

Au cours des décennies suivantes, la production d'aluminium s'est considérablement développée, notamment grâce à des avancées technologiques telles que la mise au point de méthodes de production plus efficaces et moins coûteuses, ainsi que l'expansion des utilisations industrielles et commerciales du métal(Durrant, 2000).

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, l'aluminium est devenu un matériau de choix pour la construction de véhicules, d'avions et de bateaux, ainsi que pour la fabrication de boîtes de conserve et de produits électriques. Au fil du temps, l'utilisation de l'aluminium s'est étendue à d'autres secteurs, tels que l'emballage alimentaire, la construction, l'industrie pharmaceutique et les produits de consommation courante(Suárez-Ruiz, 2019).

**II.2 Obtention de l'aluminium**

L'aluminium est principalement obtenu à partir de la bauxite, un minerai contenant de l'alumine ( $Al_2O_3$ ) et de la silice ( $SiO_2$ )(Iakovleva, 2013). Le procédé d'extraction de l'aluminium à partir de la bauxite consiste en plusieurs étapes :

1. Extraction de l'alumine : La bauxite est d'abord broyée et mélangée avec de la soude caustique (NaOH) pour former une solution alcaline. L'alumine est ensuite extraite de la solution en la faisant réagir avec de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) pour former de l'hydroxyde d'aluminium ( $Al(OH)_3$ ).
2. Électrolyse de l'hydroxyde d'aluminium : L'hydroxyde d'aluminium est ensuite fondu à haute température et électrolysé pour produire de l'aluminium liquide et de l'oxygène gazeux. Ce processus nécessite beaucoup d'énergie, car il faut faire fondre l'hydroxyde d'aluminium à une température supérieure à 2000°C.

Purification de l'aluminium : L'aluminium liquide obtenu par électrolyse est ensuite purifié par distillation sous vide pour éliminer les impuretés et améliorer sa qualité(Haupin, 2000).

**II.3 Propriétés physiques de l'aluminium**

L'aluminium possède un certain nombre de propriétés physiques intéressantes, en voici quelques-unes :

1. Léger : l'aluminium a une densité faible, d'environ 2,7 g/cm<sup>3</sup>, ce qui le rend environ trois fois plus léger que l'acier(**Davis, 2003**).
2. Bonne conductivité thermique : l'aluminium est un bon conducteur thermique, environ deux fois meilleur que l'acier(**Totten, 2003**).
3. Bonne conductivité électrique : l'aluminium est également un bon conducteur électrique, environ deux tiers de celui du cuivre(**Polmear, 1995**).
4. Malléable et ductile : l'aluminium est malléable et ductile, ce qui signifie qu'il peut être facilement déformé sans se rompre, permettant ainsi de le former en différentes formes et de le travailler en feuilles, en fils ou en tubes(**Davis, 2003**).
5. Résistant à la corrosion : l'aluminium forme une couche d'oxyde protectrice qui le protège de la corrosion(**Totten, 2003**).
6. Faible point de fusion : l'aluminium a un point de fusion relativement bas, d'environ 660°C, ce qui le rend facile à fondre et à mouler(**Polmear, 1995**).
7. Non magnétique : l'aluminium n'est pas magnétique, ce qui peut être utile dans certaines applications (**Polmear, 1995**).

#### **II.4. Propriétés mécaniques de l'aluminium**

L'aluminium possède également plusieurs propriétés mécaniques intéressantes qui en font un matériau de choix pour de nombreuses applications. Voici quelques-unes de ces propriétés :

1. Résistance à la traction : l'aluminium est relativement résistant à la traction, avec une résistance à la traction typique de 270000 kilo pascals à 621000 kilo pascals. (**Lee, 2015**).
2. Résistance à la flexion : l'aluminium a également une bonne résistance à la flexion, ce qui le rend utile pour les applications structurelles (**Wang, 2018**).
3. Résistance à la fatigue : l'aluminium a une bonne résistance à la fatigue, ce qui signifie qu'il peut résister à des cycles répétés de stress (**Garmendia, 2009**).
4. Résistance à la corrosion : l'aluminium a une bonne résistance à la corrosion, ce qui le rend utile dans les environnements corrosifs (**Totten, 2003**).
5. Rigidité : l'aluminium a une rigidité élevée, ce qui signifie qu'il peut résister à des charges importantes sans se déformer de manière significative (**Lee, 2015**).
6. Ductilité : l'aluminium est ductile, ce qui signifie qu'il peut être facilement déformé sans se rompre (**Totten, 2003**).



7. Usinabilité : l'aluminium est facile à usiner, ce qui le rend utile pour les applications qui nécessitent des formes complexes (**Garmendia, 2009**).

Le **tableau II.1** illustre les valeurs moyennes de certaines propriétés mécaniques de l'aluminium.

Propriété \ Etat	Coulé	Laminerecuit
Résistance traction (N/mm)	70 à 100	70 à 90
Limite appd'elast. (N/mm <sup>2</sup> )	30 à 40	30 à 40
Allongement (%)	15 à 25	40 à 30
Dureté de brinell	15 à 25	15 à 25
Module d'élasticité (N/mm <sup>2</sup> )	67500	67500

**Tableau II.1:** Propriétés mécaniques de l'aluminium .

([www.tigersalu.com](http://www.tigersalu.com), consulté 17/04/2023)

### II.5 Influence des éléments d'addition :

Les éléments d'addition peuvent avoir une influence significative sur les propriétés de l'aluminium (**Polmear, 1995**).

**Le silicium :** L'ajout de silicium à l'aluminium permet de renforcer sa résistance mécanique et sa résistance à la corrosion. Le silicium améliore également les propriétés de moulage et de soudage de l'aluminium (**Totten, 2003**).

**Le cuivre :** L'ajout de cuivre à l'aluminium renforce également sa résistance mécanique, mais peut réduire sa ductilité et sa résistance à la corrosion (**Davis, 2003**).

**Le magnésium :** L'ajout de magnésium à l'aluminium améliore sa résistance à la corrosion et à l'usure, ainsi que sa résistance mécanique à haute température (**Davis, 2003**).

**Le zinc :** L'ajout de zinc à l'aluminium améliore sa résistance à la corrosion, mais peut réduire sa résistance mécanique (**Totten, 2003**).

**Le titane :** L'ajout de titane à l'aluminium permet de renforcer sa résistance à la corrosion et à l'usure, ainsi que sa résistance mécanique à haute température (**Raghunathan, 2009**).

Ces éléments d'addition peuvent être utilisés seuls ou en combinaison pour obtenir des alliages d'aluminium avec des propriétés spécifiques adaptées à différents types d'applications. Par exemple, les alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie aéronautique contiennent souvent du silicium, du magnésium et du cuivre pour obtenir des propriétés mécaniques élevées tout en conservant une bonne résistance à la corrosion (Davis, 2003).

De ce fait, on peut résumer les effets des éléments d'addition dans le **Tableau II.2**

**Tableau II.2 :** Propriétés physiques de l'aluminium (Tho. 1997)

<i>éléments</i>	<i>effets</i>
<b>Manganèse (Mn)</b>	Il est ajouté pour éliminer l'effet nuisible du fer en évitant la formation de la phase Fe-Al.
<b>Zinc (Zn 5%)</b>	L'addition du zinc, jusqu'à 5%, abaisse le potentiel de l'anode, mais au-dessus de ce niveau aucun avantage n'est obtenu. En dessous de 0,9%, le zinc a peu d'influence sur l'exécution des anodes d'aluminium.
<b>Mercure (Hg), l'indium(In) ou de l'étain(Sn)</b>	Il active la surface de l'anode en évitant sa passivation. il déplace le potentiel de corrosion vers des valeurs plus électro-négatives.
<b>Magnésium (Mg 0,2% à 2%)</b>	Il améliore les caractéristiques mécaniques du matériau (dureté).
<b>Cadmium (Cd)</b>	Il est ajouté pour favoriser la formation d'un produit mou de corrosion.
<b>Titane (Ti)</b>	Il agit en tant qu'acquéreur pour l'hydrogène ou sert simplement à raffiner les grains et à augmenter le secteur de frontière de grain diluant de ce fait l'effet de fragilisation.

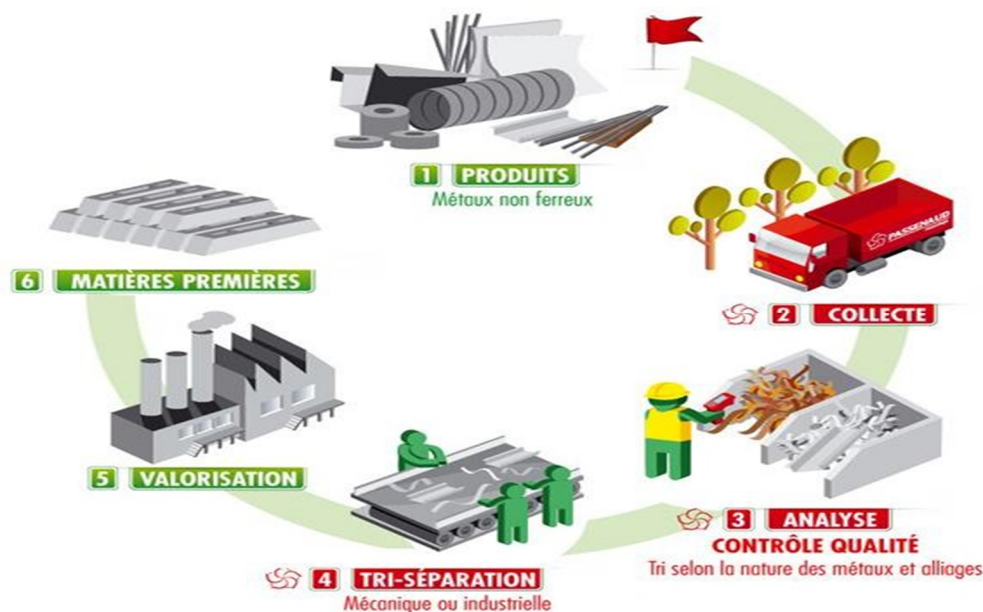
## II.6 Le recyclage de l'aluminium

Le recyclage de l'aluminium est un processus qui permet de récupérer les matériaux en aluminium tels que les canettes, les emballages, les châssis de fenêtres, les portes, etc., et de les transformer en lingots ou en billettes qui peuvent être utilisés pour fabriquer de nouveaux produits en aluminium. Le recyclage de l'aluminium est important car il permet de préserver les ressources naturelles et de réduire les émissions de gaz à effet de serre (Zhu, 2014).

### II.6.1 Le processus de recyclage de l'aluminium (Figure II.1)

1. Collecte : Les matériaux en aluminium tels que les canettes, les emballages, les châssis de fenêtres, les portes, etc., sont collectés et transportés vers les centres de recyclage.

2. Tri : Les matériaux en aluminium sont triés manuellement ou par des machines en fonction de leur qualité et de leur composition.
  
3. Traitement : Les matériaux en aluminium triés sont nettoyés pour retirer les contaminants tels que la peinture, les étiquettes, etc. Les matériaux en aluminium propres sont ensuite fondus.
  
4. Fusion : Les matériaux en aluminium fondus sont coulés en lingots ou en billettes, qui peuvent être utilisés pour fabriquer de nouveaux produits (Jönsson, 2017).



Figurier II.1 La processus de recyclage de l'aluminium (FEDEREC, 2017).

### II.6.2 Les avantages de recyclage de l'aluminium

Le recyclage de l'aluminium présente plusieurs avantages :

- Économie d'énergie : le recyclage de l'aluminium nécessite beaucoup moins d'énergie que la production d'aluminium à partir de bauxite. Selon l'Association européenne de l'aluminium, le recyclage de l'aluminium permet d'économiser jusqu'à 95% de l'énergie nécessaire à la production primaire (Khaliq, 2017).
  
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre : en réduisant la consommation d'énergie nécessaire à la production d'aluminium, le recyclage permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre (Khaliq, 2017).
  
- Conservation des ressources naturelles : le recyclage de l'aluminium permet de préserver les ressources naturelles, car il permet de réutiliser l'aluminium déjà produit plutôt que de puiser dans les réserves de bauxite (Sivaprasad, 2019).

- Création d'emplois : l'industrie du recyclage de l'aluminium crée des emplois dans la collecte, le tri, la transformation et la distribution de l'aluminium recyclé (**Sivaprasad, 2019**).
  
- Réduction des déchets : le recyclage de l'aluminium permet de réduire la quantité de déchets qui sont envoyés dans les décharges (**Khaliq, 2017**).
  
- Économie d'argent : le recyclage de l'aluminium permet d'économiser de l'argent car il est moins cher de recycler l'aluminium que de produire de l'aluminium à partir de bauxite (**Sivaprasad, 2019**).

### **II.7 L'utilisation des déchets d'aluminium dans la construction**

L'utilisation des déchets d'aluminium dans la construction présente plusieurs avantages environnementaux et économiques. Voici quelques points importants à considérer :

- Recyclage de l'aluminium.
- Réduction des déchets.
- Légèreté et résistance.
- Faible entretien.
- Applications variées.
- Performances énergétiques.
- Esthétique (**Al-Saadi, 2016**).

### **Conclusion :**

Les déchets d'aluminium représentent une quantité non négligeable et doivent être bien gérés pour protéger l'environnement et réduire l'utilisation des ressources naturelles. De ce fait, il est important de valoriser les déchets d'aluminium pour la fabrication de nouveaux produits ou comme matériau d'addition dans les matériaux de construction.

***Chapitre III :***  
***Présentation des essais réalisés***

**III.1. Introduction :**

Le contenu de ce chapitre est une étude expérimentale qui a été réalisée dans le Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest de Tiaret (L.T.P.O.), conformément aux modes opératoires résumés ci-dessous.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'impact de l'ajout de déchets d'aluminium à différentes concentrations (1%, 3%) sur le comportement des mélanges réalisés avec l'argile prétraitée à la chaux.

Cette étude comporte les essais d'identification de l'argile ainsi que les essais de portance (Proctor et CBR) et de cisaillement à la boîte effectués sur les différents mélanges.

**III.2.. Argile non traitée :**

## A) Essais d'identifications :

Des essais de caractérisation géotechniques ont été effectués suivant les normes AFNOR sur notre échantillon prélevé (argile de GUERTOUFA).

- Analyse chimique (teneur en carbonates  $\text{CaCO}_3$ , bleu de méthylène **VBS**, sulfates, la teneur pondérale en matières organiques de sol **MO**).
- La granulométrie (par tamisage, et par sédimentométrie).
- Les limites d'Atterberg.

## B) Essais de portance :

- Proctor modifié.
- CBR.

## C) Essais de mécaniques

- Cisaillement à la boîte.
- Essai Œdométrique.

**III.3. argile traitée :**

## A) Essais mécaniques :

- Cisaillement à la boîte.
- Essai Œdométrique.

B) Essais de portance :

- Proctor modifiée.
- CBR

### III.4. Analyse de l'argile non traitée:

#### III.4.1. Essais d'identification :

##### III.4.1.1 Analyses chimiques :

Le but de cet essai est de déterminer la nature chimique des échantillons choisis. Cette étape étant importante dans l'identification des matériaux locaux utilisés en construction.

##### Essai d'évaluation de carbonates (NA-2789) $\text{CaCO}_3$ :

L'objectif de cet essai est la détermination du volume du ( $\text{CO}_2$ ) dégagé sous l'action d'un acide. Cette opération est réalisée à l'aide d'un appareil dit 'calcimètre' (**figure III.1**), dont le mode opératoire consiste tout d'abord à régler le zéro dans le grand tube en verre gradué puis peser 0.5g du sol, ensuite l'introduire dans un flacon en verre, puis ajouter 10 ml de (HCL à 10%) et enfin, boucher le flacon avec le tube du calcimètre. A ce moment on prend note du niveau d'eau dans le grand tube gradué (A),(V) puis agiter bien le contenu du flacon, ensuite il faut régler l'appareil de telle façon à avoir au même niveau l'eau qui contient le grand flacon en verre (B) et le tube en verre gradué (A) , une fois cette tâche faite, lire sur le tube en verre gradué (A) le niveau d'eau (V2), d'où le volume final à retenir sera ( $V=V2-V1$ ) .

$$(\text{CaCO}_3)=1000 \times M2 (V1-V3)/M1 (V2-V3) \times 100+ w(\text{H}_2\text{O}) /100$$



**Figure III.1.** Appareil de l'Essai d'évaluation du taux de carbonates.

**Essai de bleu de méthylène :**

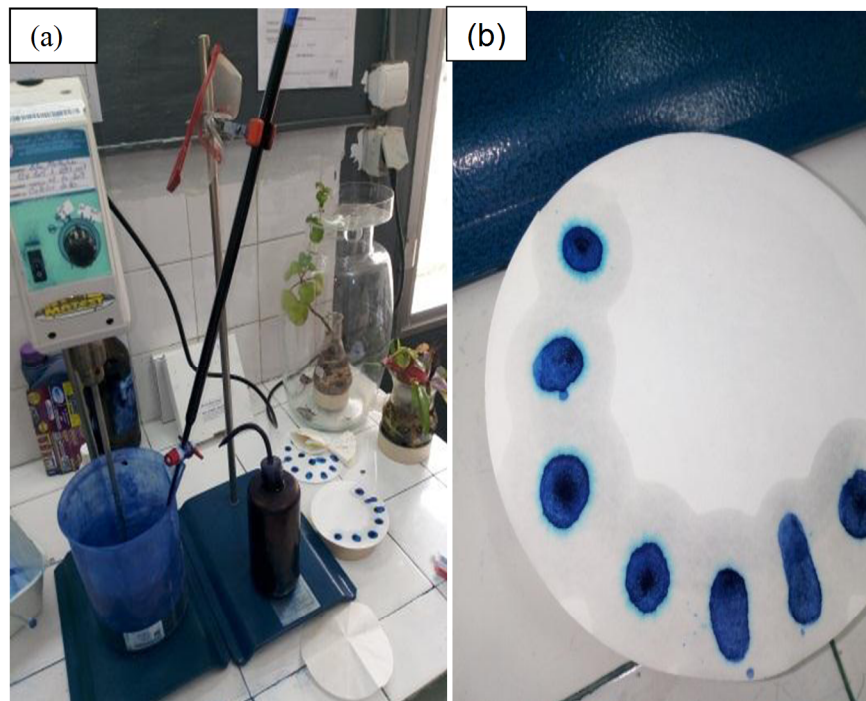
Le but de cette expérience est de quantifier la quantité de bleu de méthylène qui peut être absorbée par une substance en suspension dans l'eau. Cette quantité est proportionnelle à l'épaisseur du sol 0/50 mm. La valeur du bleu du sol est directement liée à la surface unique des particules constitutives du sol ou du matériau rocheux.

Cette dose est administrée en augmentant progressivement la quantité de bleu de méthylène et en surveillant l'absorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension et on la place sur un morceau de papier filtre pour former une tache.

L'adhérence maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleue claire de longue durée apparaît autour du bord de la tache.

$$\text{VBS} = (\text{V}/\text{m}^0) \times \text{C}.$$

Sur la **figure III.2**, on présente les étapes de l'essai.



**Figure III.2 :** Les étapes de l'essai de bleu de méthylène. (a) : prélèvement d'une goutte de suspension. (b) : dépôt sur papier filtre.



Tableau III.1: Résultats de l'essai de VBS pour l'argile

Nature	°ECH	Volume( ml)	C	Fraction (%)	VBS
ARGILE	P01	130	1	100	4.33

### III.4.1.2. Analyse granulométrique :

#### a) par tamisage (NF P 94-056)

Son but est de déterminer la répartition des particules qui composent le squelette

Sols à classer.

L'expérience consistait à séparer les particules agrégées de la matière connue en les trempant dans l'eau, en fractionnant le sol sec à l'aide d'une série de tamis, puis en pesant les déchets accumulés sur chaque tamis à tour de rôle. Comparez la quantité de déchets accumulés sur chaque tamis au poids sec total de l'échantillon analysé.



Figure III.3 : Série de tamis utilisée pour l'essai de granulométrie par tamisage.

b) Par sédimentométrie (NA 5251, NF P 94-057) :

Les particules inférieures à 80 µm sont séparées du reste du sol par tamisage puis mises en suspension dans de l'eau additionnée d'un défloculant. Les particules se déposent à des vitesses différentes liées à leur taille. A l'aide d'un hydromètre, mesurer l'évolution de la densité de la solution dans le temps et la profondeur d'immersion de l'appareil.



Figure III.4 : Appareillage d'analyse granulométrique sédimentométrie.

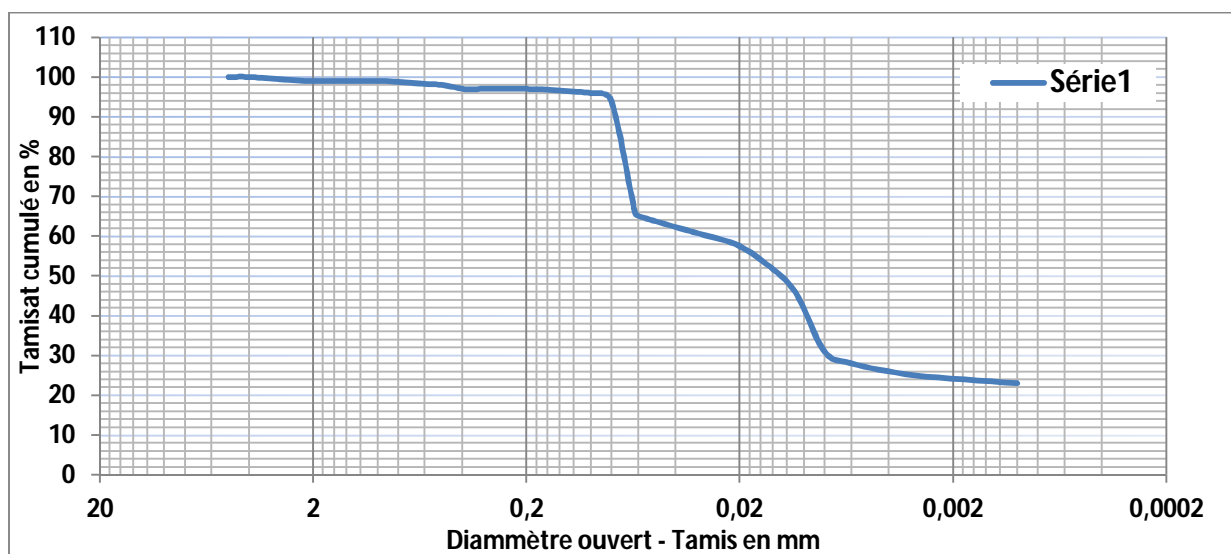


Figure III.5: Courbe granulométrique de l'argile (tamisage par voie humide).

**III.4.1.3. Limites d'Atterberg (NA 16213, NF P 94-051):**

La limite d'Atterberg : limite de plasticité ou limite de consistance, est utilisée pour caractériser le comportement des sols fins, bien que leur comportement puisse varier dans le temps.

La limite d'Atterberg et l'indice de plasticité d'un sol varient non seulement avec sa fraction argileuse mais aussi avec les propriétés des minéraux argileux et des cations adsorbés, et ces limites sont basées sur la notion que seuls quatre états cohérents peuvent exister.

Le sol à grain fin dépend de sa teneur en humidité. Par conséquent, le sol est à l'état solide lorsqu'il est sec. Ajoutez de l'eau petit à petit, et cela devient semi-solide, plastique et enfin liquide.

Le test est réalisé en laboratoire et mesure la cohésion du sol et son taux d'humidité. Selon ces procédures, trois limites sont définies :

➤ **Limite liquide (WL) :**

Lorsque le sol passe d'un état plastique à un état liquide. La teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état liquide à l'état plastique est appelée limite de liquidité. Elle peut être calculée aussi par la formule suivante :

$$WL = W (N/25)^{0.121}$$

➤ **Limite plastique (WP) :**

Lorsque le sol passe d'un état semi-solide à un état plastique. La teneur en eau à laquelle le sol devient semi-solide est appelée limite plastique. La teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état semi-solide à l'état solide est connue sous le nom de limite de retrait.

➤ **L'indice de plasticité IP :**

Il donne l'étendue du domaine plastique  $IP = WL - WP$ . La plasticité d'un sol (c'est-à-dire sa faculté de devenir très déformable en absorbant de l'eau) est appréciée par le couple (WL, IP) qui dépendent de la nature des minéraux argileux contenus dans le sol et de leur quantité. C'est ainsi que Casagrande a défini un diagramme dit "Abaque de plasticité de Casagrande" qui permet de classer les sols fins.



Figure III.5. Appareillage de limites d'Atterberg.

Tableau III.2 : Résultats de l'essai de limite de liquidité de l'argile naturelle.

	1° ESSAI		2° ESSAI		3°ESSAI	
Nombre de coups	19		24		29	
N° de la tare	300	42	4C	67	200	55
Poids total humide(g)	6,03	6,45	6,02	5,90	5,92	6,18
Poids total sec(g)	5,29	5,50	5,28	5,01	5,22	5,37
Poids de la tare(g)	4,13	4,00	4,10	3,58	4,08	4,05
Poids de l'eau	0,74	0,95	0,74	0,89	0,70	0,81
Poids de sol sec(g)	1,16	1,50	1,18	1,43	1,14	1,32
Teneur en eau(%)	63,79	63,33	62,71	62,24	61,40	61,36
La moyenne	63,56		62,47		61,38	

**Tableau III.3:** Résultats de l'essai de détermination de la limite de plasticité de L'argile naturelle.

	1 <sup>°</sup> ESSA I	2 <sup>°</sup> ESSA I	3 <sup>°</sup> ESSA I	4 <sup>°</sup> ESSA I
N° de la tare	BB	XD	H50	45
Poids total humide(g)	4,57	4,83	5,27	4,59
Poids total sec (g)	4,34	4,58	5,02	4,36
Poids de la tare (g)	3,65	3,82	4,25	3,66
Poids de l'eau	0,23	0,25	0,25	0,23
Poids de sol sec (g)	0,69	0,76	0,77	0,70
Teneur en eau (%)	33,33	32,89	32,47	32,86
La moyenne	33,11		32,66	
	32,89			

Dans le tableau III.4, On présente les résultats finaux des limites d'Atterberg de l'argile.

**Tableau III.4:** Les résultats finaux des limites d'Atterberg.

Mesures n°	1	2	3
Teneur en eau (%)	63,56	62,47	61,38
Nombre de coups N	19	24	29

Tableau III.5: Limites d'Atterberg pour l'argile naturelle.

Teneur en eau de plasticité (%)	W=33,3 3	W =33,11	W =32,47	Wp =32,66
	W =32,89		W =32,86	
Limite de liquidité: Wl=62,25%	Indice de plasticité IP= 29,36			
Limite de plasticité: Wp= 32,89%				

### III.5. Essais de portance :

#### III.5.1. Essai Proctor normal (NA 5262, NF P94-093):

Le test Proctor est un test de compactage réalisé en laboratoire pour déterminer la relation entre la teneur en eau ( $w$  en %) d'un matériau et sa compactibilité (exprimée en masse volumique sèche  $\gamma_d$  en  $\text{g/cm}^3$  ou  $\text{kg/m}^3$ ).

Les matériaux sont amenés à différentes teneurs en humidité, puis chaque mélange est compacté couche par couche dans un moule cylindrique par une dame de compactage automatique de taille et de masse standard qui tombe librement d'une hauteur standard. La densité sèche des échantillons ainsi compactés est déterminée pour chaque taux d'humidité.

La figure III.6 montre les principales étapes de l'essai Proctor.

Le tableau III.6 résume les résultats de l'essai qui permettent de tracer par la suite la courbe Proctor (Figure III.6).



Figure III.6: Appareil essai Proctor.

Tableau III.6: Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile Naturelle.

	Teneur en eau max W%	Yd (t/m3)
<b>Argile Naturelle.</b>	16.33	1.47
	19.16	1.52
	20.85	1.57
	27.14	1.51

**Tableau III.7:** Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile + 3% La chaux.

	Teneur en eau max W%	Yd (t/m3)
<b>Argile + 3% La Chaux.</b>	19.46	1.54
	22.01	1.5587
	23.82	1.5589
	27.09	1.50

**Tableau III.8:** Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile +3% La chaux +1% Aluminium.

	Teneur en eau max W%	Yd (t/m3)
<b>Argile + 3% La Chaux+1% Aluminium (&lt; 0.630).</b>	18.32	1.53
	23.46	1.56
	24.80	1.55
	26.69	1.52



**Tableau III.9:** Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile +3% La chaux +1% Aluminium.

	Teneur en eau max W%	Yd (t/m3)
<b>Argile + 3% La Chaux+1% Aluminium ( 0.630/1.00).</b>	21.27	1.53
	23.48	1.58
	24.81	1.57
	26.69	1.54

**Tableau III.10:** Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile +3% La chaux +1% Aluminium.

	Teneur en eau max W%	Yd (t/m3)
<b>Argile + 3% La Chaux+1% Aluminium (1.00/2.00).</b>	20.45	1.55
	21.61	1.58
	23.47	1.56
	25.29	1.53

**Tableau III.11:** Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile +3% La chaux +1% Aluminium.

	Teneur en eau max W%	Yd (t/m3)
<b>Argile + 3% La Chaux+1% Aluminium (2.00/3.15).</b>	19.27	1.53
	23.37	1.57
	24.71	1.56
	26.61	1.52

**Tableau III.12:** Les Résultats de l'essai Proctor sur Argile +3% La chaux +3% Aluminium.

	Teneur en eau max W%	Yd (t/m3)
<b>Argile + 3% La Chaux+3% Aluminium (0.630/1.00).</b>	19.38	1.55
	21.28	1.60
	23.27	1.56
	25.00	1.53

**III.5.2. Essai de portance C.B.R (NA 5252, NF P 94-078):**

Cet essai consiste à mesurer la force appliquée à un poinçon cylindrique telle que

Pénètre dans le matériau d'essai à une vitesse constante.

Les valeurs spécifiques des deux forces qui conduisent à deux dépressions régulières sont respectivement liées aux valeurs de force observées sur le même matériau de référence, L'index de recherche est généralement défini comme la valeur maximale, Exprimé en pourcentage des deux ratios calculés.

**Essai C.B.R après immersion:**

Après quatre (4) jours d'immersion (-+ 2 h) on mesure la hauteur de gonflement  $\Delta h$  indiquée par le comparateur, on extrait l'ensemble hors du bac d'immersion en observant un temps d'égouttage de 15 minutes puis on dépose le trépied, le comparateur, les surcharges et le disque de gonflement.

On pose l'éprouvette sur la presse en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et on procède au poinçonnement de la manière suivante:

On approche la face supérieure de l'éprouvette vers le piston, à l'aide des dispositifs prévus sur la presse jusqu'à ce que le piston vienne affleurer le matériau. On Règle la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur mesurant l'enfoncement du poinçon (**figure III.7**).

On note les efforts de poinçonnement correspondant aux enfoncements suivants : 0,625 ; 1,25 ; 2 ; 2,5 ; 5 ; 7,5 et 10 mm.

L'indice recherché est par conversion la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$= \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (KN)} \times 100}{13,35}$$

$$= \frac{\text{Effort de pénétration à 5.0 mm d'enfoncement (KN)} \times 100}{19,93}$$

La valeur de déformation de l'éprouvette  $g$ , exprime en pourcentage :

$g(\%) = \frac{(\Delta H) \times 100}{h}$
---



Figure III.7: Appareil de poinçonnement (essai CBR).

Tableau III.13: Les Résultats de l'essai CBR sur l'Argile Naturelle.

Energie de compactage		10 c/c	25c/c	50c/c	Indice CBR à 95% yd OPM
Argile Naturelle.	W%	24.96	24.82	24.36	4.75
	Yd(t/m <sup>3</sup> )	1.37	1.5	1.57	
	Indice CBR	1.12	5.04	8.40	

**Tableau III.14:** Les Résultats de l'essai CBR sur l'Argile +3% La chaux.

Energie de compactage		10 c/c	25c/c	50c/c	Indice CBR à 95% yd OPM
<b>Argile + 3% La Chaux.</b>	W%	23.42	22.98	22.71	77.00
	Yd(t/m3)	1.28	1.4	1.59	
	Indice CBR	21.83	47.03	100.77	

**Tableau III.15:** Les Résultats de l'essai CBR sur l'Argile +3% La chaux+1% Aluminium.

Energie de compactage		10 c/c	25c/c	50c/c	Indice CBR à 95% yd OPM
<b>Argile + 3% La Chaux+1%Aluminium (&lt;0.630).</b>	W%	19.54	18.75	17.86	46.00
	Yd(t/m3)	1.35	1.44	1.60	
	Indice CBR	12.33	23.54	70.63	

**Tableau III.16:** Les Résultats de l'essai CBR sur l'Argile +3% La chaux+1% Aluminium.

Energie de compactage		10 c/c	25c/c	50c/c	Indice CBR à 95% yd OPM
<b>Argile + 3% La Chaux+1%Aluminium (0.630/1.00).</b>	W%	18.60	17.59	16.38	37.50
	Yd(t/m3)	1.36	1.46	1.59	
	Indice CBR	16.80	28.55	52.69	

**Tableau III.17:** Les Résultats de l'essai CBR sur l'Argile +3% La chaux+3% Aluminium.

Energie de compactage		10 c/c	25c/c	50c/c	Indice CBR à 95% yd OPM
<b>Argile + 3% La Chaux+3%Aluminium (0.630/1.00).</b>	W%	22.40	21.91	21.28	43.25
	Yd(t/m3)	1.40	1.51	1.60	
	Indice CBR	16.80	38.63	89.01	

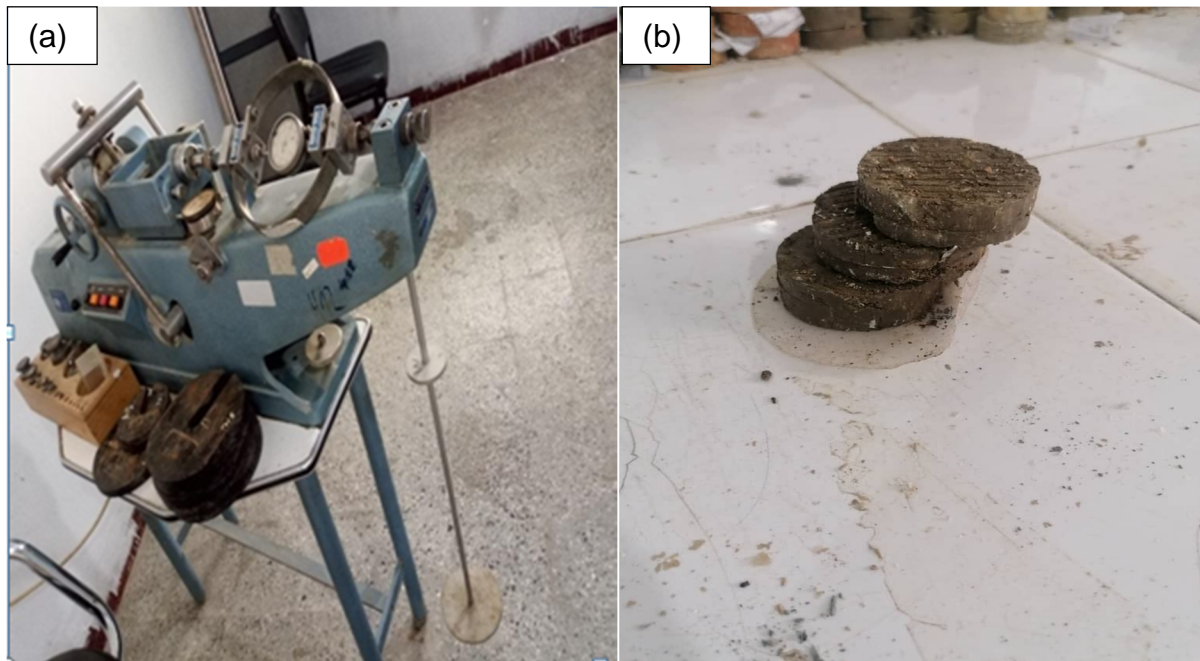
**III.5.3.Essai de Cisaillement à la boîte (NF94-071-1):**

Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement Rectiligne d'un échantillon sous charge constante. L'essai de cisaillement permet de tracer la Courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne  $\phi$  et sa Cohésion C.

Ces valeurs servent entre autre à déterminer la contrainte admissible par le sol dans le cas de fondations superficielles et la poussée du sol sur un mur de soutènement.

Le sol expérimental de l'étude est situé entre deux demi-boîtes qui peuvent être déplacées horizontalement l'une par rapport à l'autre. Un piston exerce une pression normale et prédéterminée sur le sol. La demi-boîte inférieure est déplacée horizontalement à une vitesse constante. La force totale de cisaillement F est mesurée à l'aide d'un dynamomètre fixé sur la moitié supérieure de l'appareil. Un comparateur mesure la déviation verticale de l'échantillon. Ainsi, l'échantillon subit un découpage direct et un dressage selon un plan imposé et soumis à une contrainte normale prédéterminée.

Malgré ses inconvénients ; la difficulté de contrôler le drainage et vu que le plan de rupture et Préalablement imposé, l'essai de cisaillement à la boîte est loin le plus utilisé en géotechnique Pour déterminer les caractéristiques de résistance aussi bien pour les sols naturels que pour sols renforcés de fibres, grâce à sa simplicité.



**Figure III.8:** Essai de cisaillement à la boîte : (a) appareil utilisé ; (b) échantillon cisailé.

**Les essais de cisaillement réalisés sont de type non consolidé-non drainé(UU)**

Les résultats des essais de cisaillement sur les différents mélanges sont présentés sur les tableaux suivants :

**Tableau III.18 :** Caractéristiques intrinsèques des différents mélanges d'argile et d'aluminium.

Composition du mélange	$C_u$ (bars)	$\phi_u$
Argile Naturelle	2.09	20.30°
Argile +3% La Chaux.	1.01	37.60°
Argile +3% La Chaux +1% Aluminium (<0.630)mm.	1.83	41.65°
Argile +3% La Chaux +1% Aluminium (0.630/1.00)mm.	0.90	37.81°
Argile +3% La Chaux +1% Aluminium (1.00/2.00)mm.	1.58	34.99°
Argile +3% La Chaux +1% Aluminium (2.00/3.15)mm.	2.76	23.38°

### III.5.4. Essai de compressibilité et consolidation à l'oedomètre (NF P 94-090-1).

L'essai est effectué conformément à la norme, sur un sol remanié. Au plan quantitatif, le programme expérimental a comporté trois essais de compressibilité permettant de déterminer les paramètres de compressibilité et de consolidation des sols étudiés.

L'essai s'effectue sur des éprouvettes taillées à partir du moule Proctor dans lequel les différents mélanges sont reconstitués. Chaque éprouvette de sol est placée dans une enceinte cylindrique rigide (bague) et un dispositif pour appliquer un effort axial vertical maintenu sur l'éprouvette. L'essai consiste à appliquer à chaque éprouvette une contrainte verticale différente après chaque consolidation et à mesurer la variation de la hauteur lorsqu'elle est mise en présence d'eau (Figure III.9).



Figure III.9. Dispositif de l'Essai œdométrique.

Au cours de l'essai, on mesure :

- **Contrainte de chargement  $\sigma$**  : contrainte moyenne totale  $\sigma$  obtenue en divisant l'effort axial  $N$  par l'aire de la section transversale de l'éprouvette cylindrique ; identique à celle intérieure de l'odomètre.

-**Déformation axiale  $\Delta H/H$**  : déformation qui se produit lorsqu'une contrainte axiale  $\sigma$  est appliquée à une éprouvette de matériau fretté latéralement.

Comme résultat, on obtient 2 courbes :

-**Courbe œdométrique** : représentation du diagramme donnant l'indice des vides( $e$ ) de l'éprouvette soumise à essai à la fin de chaque palier de consolidation, en fonction de la contrainte effective ( $\sigma'_v$ ), égale à la contrainte totale ( $\sigma_v$ ), qui lui est appliquée en début d'essai. La durée du palier est telle que la pression interstitielle est nulle dans l'éprouvette à la fin de la consolidation une représentation dans un système de coordonnées semi-logarithmique est généralement choisie:  $e=f(\lg(\sigma'_v))$ .

-**Courbe de consolidation** : variation de hauteur (tassement) de l'éprouvette en fonction du



temps  $t$  sous l'effet d'une contrainte appliquée au début de l'essai  $\sigma_v$  et maintenue constante. Les représentations choisies sont soit  $s$  en fonction du logarithme du temps soit en fonction de la racine carrée du temps.

Les résultats des essais oedométriques sur les différents mélanges sont présentés dans les tableaux suivants :

**Tableau III.19:** Les résultats de l'essai œdométrique.

	<b>Pc (bar)</b>	<b>Ct</b>	<b>Cg</b>
Argile Naturelle	1.390	0.153	0.037
Argile + 3% La Chaux	1.036	0.064	0.011

### III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents essais effectués dans cette étude, à savoir les essais d'identification physique et mécanique, dont nous avons préféré donner une petite définition suivie de la norme qui s'y rapporte, car ils sont bien connus par les lecteurs géotechniciens. Nous avons essayé de donner quelques détails concernant le principe puis la façon d'exécuter ces essais.

**Chapitre IV :**  
**Analyse et Interprétation des résultats**

**IV.1. Introduction :**

Ce chapitre sera consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats trouvés. Les résultats ont été présentés dans le chapitre précédent et concernent, principalement, les essais de portance et mécaniques sur différents mélanges d'argile, de chaux et des déchets d'aluminium.

**VI.2 Classification de l'argile étudiée :**

D'après les essais d'identification de l'argile, ce matériau peut être classé selon le guide des terrassements routiers (GTR), dans la classe A, sous classe A<sub>3</sub>, et A<sub>3</sub>h selon le classement de l'état hydrique. Le tableau ci-après donne les mesures ayant conduit à un tel classement.

Donc, c'est une argile plastique

D'après l'abaque de Casagrande, le matériau est une argile plastique :

**Tableau IV.1 :** Classification du matériau étudié selon l'abaque de Casagrande

D <sub>max</sub>	% de tamisats à 80µm	IP	VBS	W <sub>nat</sub>	W <sub>OPN</sub>	W <sub>nat</sub> /W <sub>OPN</sub>
4mm < 50 mm	94% > 35%	25 < 29,36 < 40	4,33	16%	20,85%	0.76

**IV.3. Essais de Portance :****IV.3.1. Essais Proctor**

On présente dans la figure IV.2 les courbes Proctor pour les différents mélanges.

On peut remarquer qu'en ajoutant la chaux à l'argile, la teneur en eau optimale augmente puisque le liant hydraulique absorbe de l'eau. Quant à la densité sèche diminue, du fait de la floculation de l'argile (augmentation de volume).

En ajoutant les déchets d'aluminium de classe 0.630/1.00 mm à raison de 1% à l'argile prétraitée à la chaux, on remarque que la densité sèche augmente ce qui traduit une bonne compactabilité du mélange. Pour un ajout de 3% de déchets d'aluminium à l'argile prétraitée, on a remarqué que la densité sèche augmente d'une façon significative.

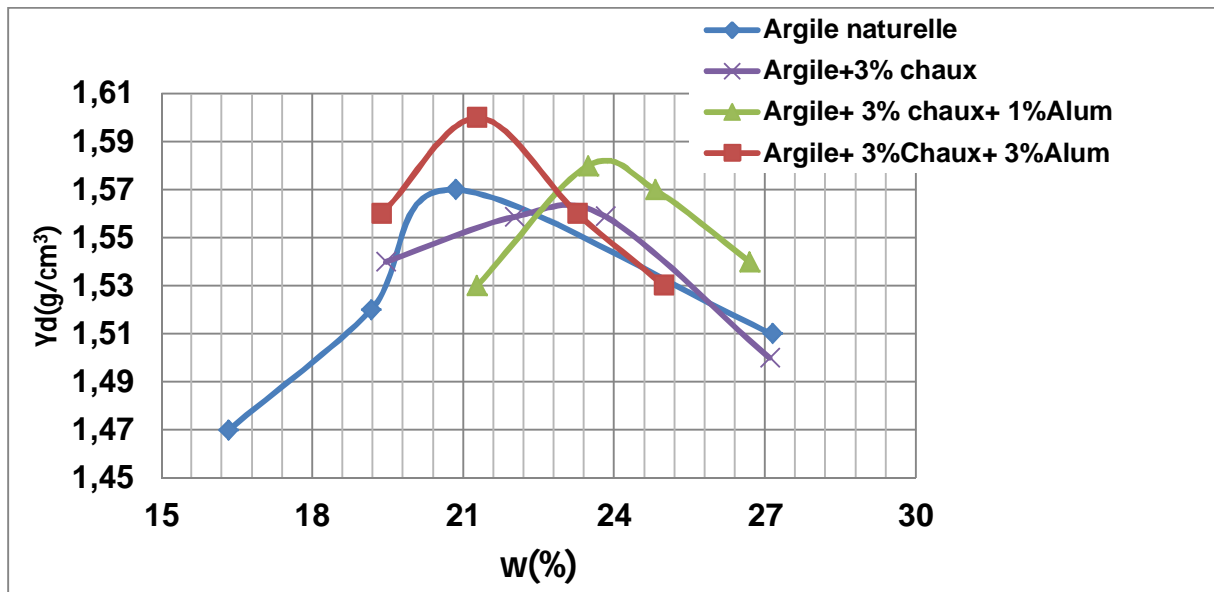


Figure IV.1. Courbes Proctor pour les différents mélanges

Examinons maintenant l'effet de la taille des déchets d'aluminium sur la compactibilité de l'argile prétraitée à la chaux.

On peut remarquer que la classe donnant la meilleure densité du mélange est la classe 0,630/1,0 mm cela s'explique par le fait que cette classe représente la meilleure configuration granulaire conduisant un meilleur arrangement des particules du mélange. Cependant, la classe très fine du déchet de verre, à savoir celle correspondant aux dimensions inférieures à 630  $\mu\text{m}$  influe significativement sur la consistance du mélange, ce qui se traduit par une insensibilité à l'eau. C'est-à-dire les autres classes demande à ce que la teneur en eau soit très proche de l'optimum pour pouvoir obtenir une densité élevée.

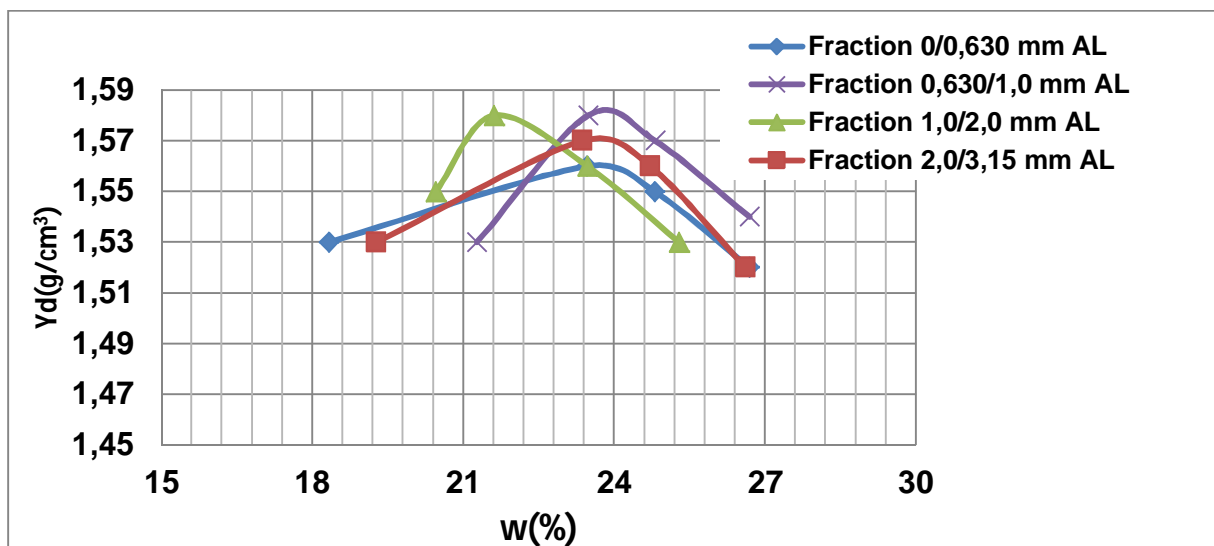


Figure IV.2. Courbes Proctor pour les différents mélanges composés de déchets d'aluminium de différentes dimensions

## IV.3.2. Essais CBR

On présente sur les figures ci-après les résultats des essais CBR immersion réalisés sur les différents mélanges en utilisant différentes énergies de compactage (10 Coups par couches, 25 C/C et 56 C/C).

Concernant le premier niveau d'énergie de compactage, on peut constater que la classe des déchets d'aluminium a plus d'effet que le dosage, car on retrouve les mêmes valeurs de CBR à 1% et à 3% pour la classe 0,630/1,00 mm. Les fines particules de déchets d'aluminium améliorent le CBR par rapport à l'argile naturelle mais pas assez important que pour la classe 0,630/1,00 mm. Il est à rappeler que la densité sèche maximale a été obtenue pour cette classe (0,630/1,0 mm).

Pour le deuxième niveau d'énergie de compactage, on retrouve pratiquement la même tendance. Sauf que le dosage de 3% en déchets d'aluminium de la classe 0,630/1,0 mm est plus important que le dosage de 1%.

En ce qui concerne le troisième niveau d'énergie (56 C/C), on remarque que le CBR du mélange comportant les déchets de la première classe est plus grand que celui de la deuxième classe. Ceci peut être expliqué par le fait que le mélange contenant 1% de déchets d'aluminium ne nécessite pas beaucoup d'énergie de compactage. C'est-à-dire même un comptage moyen peut perturber la structure du mélange et fait chuter la valeur CBR.

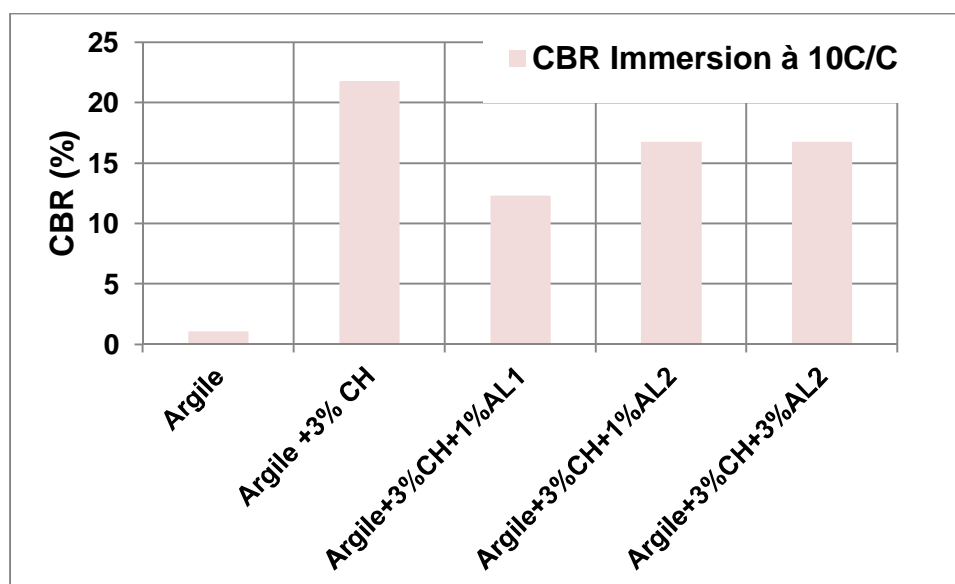


Figure IV.3. Valeurs CBR pour les différents mélanges à 10C/C

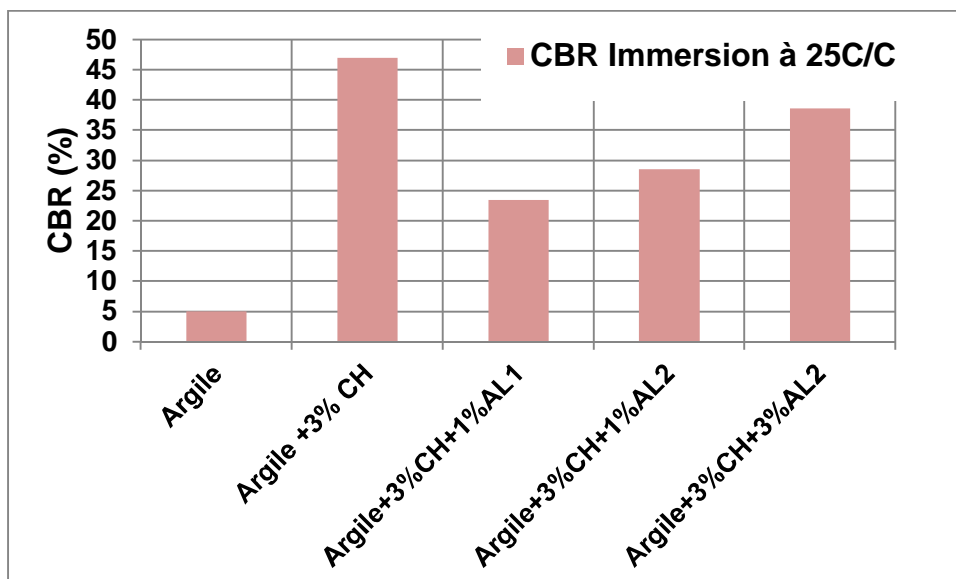


Figure IV.4. Valeurs CBR pour les différents mélanges à 25C/C

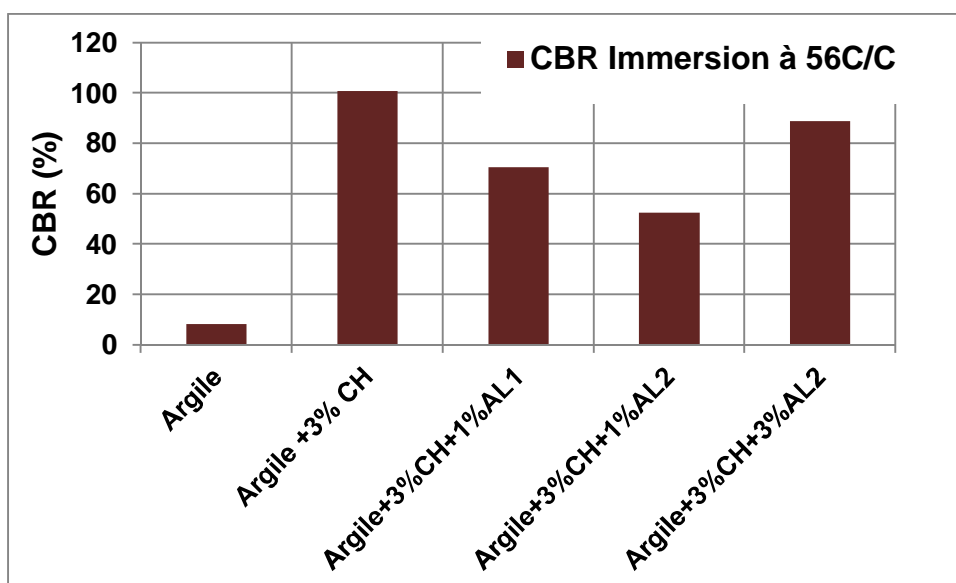


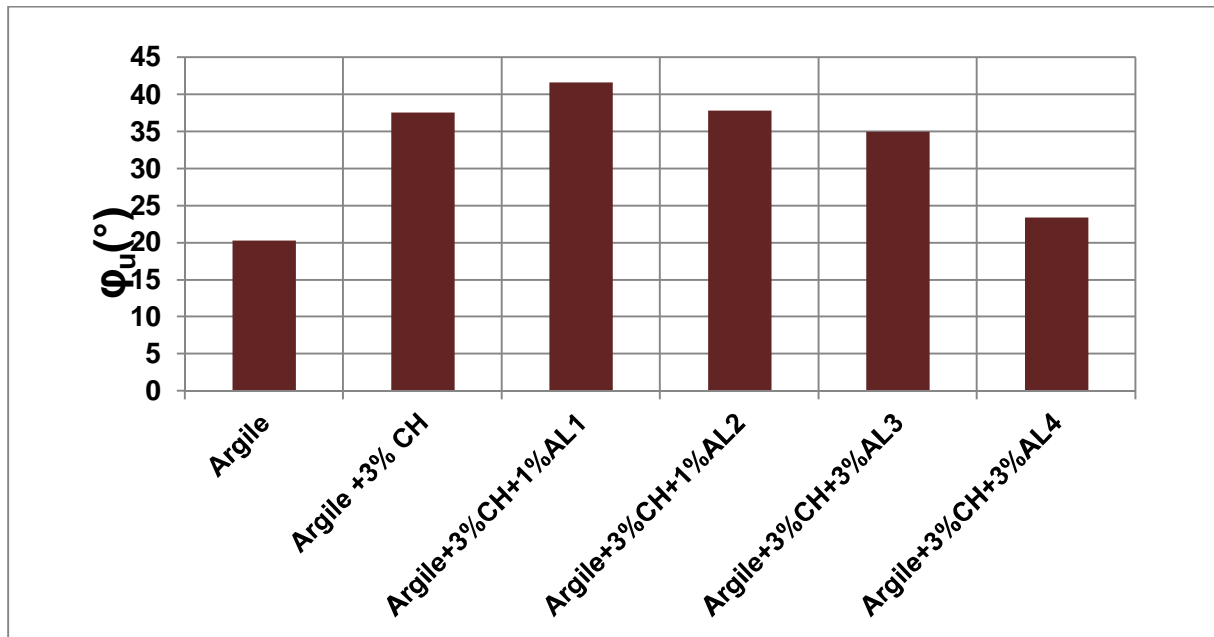
Figure IV.5. Valeurs CBR pour les différents mélanges à 56C/C

## IV.4. Essais Mécaniques

## IV.4.1. Essais de Cisaillement à la boîte

Les essais de cisaillement en conditions UU ont donné les résultats présentés sur les figures IV.7 et IV.8.

Concernant l'angle de frottement, la valeur la plus élevée correspond au mélange contenant 3% de chaux et 1% de déchets d'aluminium de dimensions très fines.



**Figure IV.6.** Angle de frottement en conditions UU des différents mélanges

Concernant la cohésion non drainée, il a été trouvé que la valeur la plus faible correspond au mélange contenant 1% de déchets d'aluminium de dimensions comprises entre 0,630 et 1,0mm.

Il semble que pour le comportement à court terme de l'argile traité à la chaux, il faut ajouter des déchets de dimensions 0,630 et 1,0 mm.

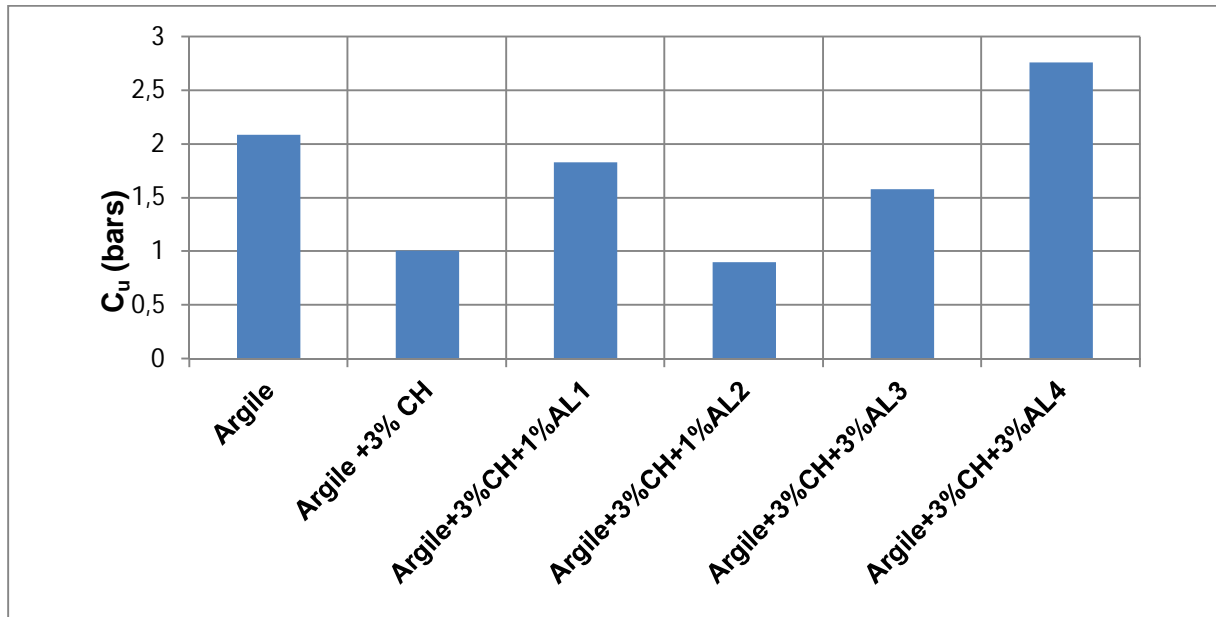


Figure IV.7. Cohésion non drainé des différents mélanges



## IV.4.2. Essais Oedométriques

D'après la figure IV.8, il est clair que le traitement à la chaux diminue la compressibilité de l'argile et son caractère gonflant. En effet les indices de gonflement et de compression diminuent d'une façon significative (voir annexes).

Avec ajout de particules de déchets d'aluminium, le sol devient encore moins compressible, ce qui donne un intérêt à l'ajout de ce type de déchets.

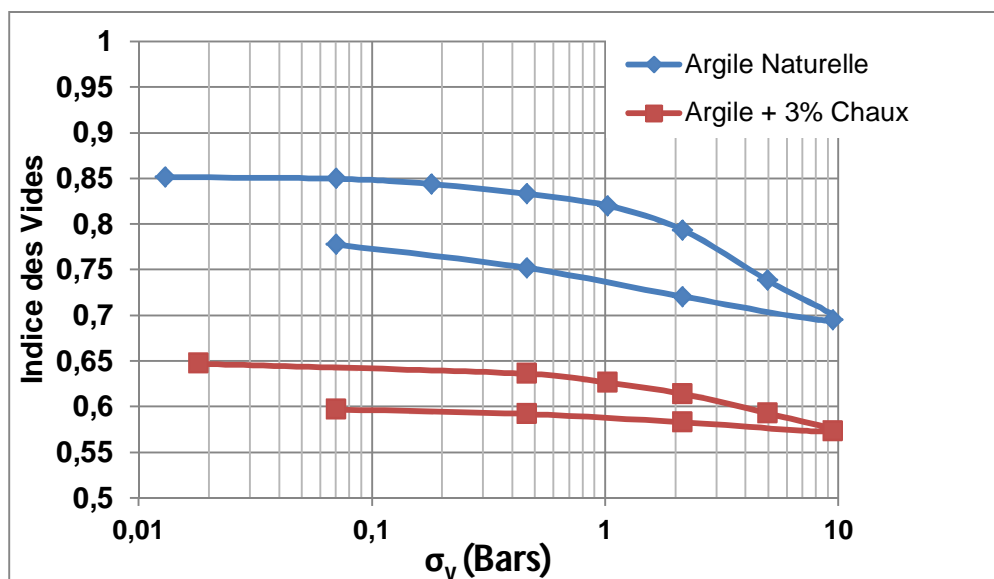


Figure IV.8. Courbes de compressibilité des différents mélanges

## IV.5 Conclusion :

A la lumière des résultats trouvés, il est évident que l'ajout des déchets d'aluminium présente un intérêt pour l'amélioration des propriétés géotechniques des sols argileux. Malgré que le renforcement avec les déchets d'aluminium n'augmente pas la portance d'une argile traitée avec un dosage optimale en chaux, mais il influe sur les autres aspects, tels que les paramètres de cisaillement pour un comportement à court terme.

*Conclusions  
générales et  
perspectives*

## *Conclusions générales et perspectives*

---

### **Conclusion Générale**

L'étude expérimentale a été focalisée sur les essais Proctor Normal, les essais de portance et les essais mécaniques, et ce en vue d'étudier la compactibilité des sols argileux stabilisés et leur comportement mécanique à court terme.

La stabilisation des argiles a été effectuée par ajout de déchets d'aluminium à différents pourcentages (1% et 3%) après un prétraitement avec 3% de chaux. Ce dernier pourcentage est par rapport à la masse totale de l'argile et qui a été calculé en utilisant la méthode EADES&GRIM

Concernant les essais Proctor, il a été trouvé que l'ajout de déchets d'Aluminium augmente la densité sèche du mélange ce qui traduit une bonne compactibilité du sol obtenu. Cela est d'autant plus que le dosage de déchets d'aluminium est important.

Concernant l'étude du comportement des mélanges à court terme à travers les essais de cisaillement à la boîte en conditions non consolidés non drainés (UU), il a été remarqué que l'ajout de déchets d'aluminium augmente l'angle de frottement interne et diminue la cohésion par rapport à l'argile naturelle. La meilleure composition donnant une faible cohésion et un meilleur angle de frottement est formée de 3% de chaux et de 1% de déchets d'aluminium de dimensions comprises entre 630  $\mu\text{m}$  et 1000  $\mu\text{m}$ , ce qui montre l'influence de la taille des fibres d'aluminium.

Pour ce qui est de l'aspect compressibilité, il a été observé à travers les essais oedométriques que l'ajout de fibres d'aluminium réduit les indices de gonflement et de compression.

On peut conclure l'ajout de fibres d'aluminium à l'argile prétraitée à la chaux présente une approche intéressante dans les applications géotechniques.

Durant notre travail, on a été confronté au problème d'approvisionnement en argile naturelle puisque on dépendait des missions du LTPO, ce qui a constitué une entrave pour achever tout le travail expérimental projeté.

Pour la continuité des études dans cette approche, on propose de :

1. Examiner l'effet de taille des fibres d'aluminium sur l'aspect gonflement et résistance ;
2. Examiner en détail l'effet de concentration des déchets d'aluminium dans les argiles prétraitées à la chaux.
3. Etudier l'effet d'ajout de fibres d'aluminium sur une argile prétraitée à un faible dosage en chaux (1%) et ce en vue de mettre en évidence l'intérêt d'ajout de ces déchets.

# **Références bibliographiques**

## *Liste de référence*

---

### Liste de référence :

Al-Saadi, H. N, Ismail, A., & Mohammed, M. K. (2016). Utilisation des déchets d'aluminium dans la construction : opportunités et défis. *Waste Management & Research*, 34(10), 1005-1017. DOI: 10.1177/0734242X16662795.

BELABBACI Zeyneb, Stabilisation des sols gonflants, Thèse de doctorat, Université AbouBekr Belkaid - Tlemcen, 2014.

Benaissa Mohamed, étude expérimentale sur la stabilisation des sols gonflants de la région de Mostaganem et de RELIZANE, 2011.

Davis, J. R. (Ed.). (2003). *Aluminum and aluminum alloys*. ASM International.

Durrant, J. L. (2000). The rise of the aluminum industry. In *Light metals 2000* (pp. 3-11). Springer. doi: 10.1007/978-3-642-59675-9\_1 .

Garmendia, N., & de Argandoña, E. S. (2009). Aluminium: properties and physical metallurgy. *Materials Science Forum*, 636-637, 1-22.

Guezoul Ikram, Stabilisation des argiles par ajout de verre recyclé par un prétraitement à la chaux, université Ibn Khaldoun TIARET, 2020.

Haupin, W. E. (2000). Aluminum production. In *Light metals 2000* (pp. 13-23). Springer. doi: 10.1007/978-3-642-59675-9\_2.

Iakovleva, E., & Warren, L. J. (2013). Production of aluminum from its ores at industrial scale. In *Handbook of aluminum* (pp. 65-87). CRC Press. doi: 10.1201/b14616-5.

Jönsson, C., & Dahllöf, L. (2017). Recycling of aluminium packaging: a life cycle approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(6), 882-890.

Khaliq, A., Kocafe, D., Kocafe, Y., & Pichette, A. (Khaliq, 2017). Recycling of aluminium: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(5), 1105-1126. doi: 10.1007/s13762-016-1186-5.

Lee, W. S., et al. (2015). Influence of grain size on the mechanical properties of aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 625, 238-246.

Marietta, M. G. (1995). *The history of aluminum*. American Chemical Society. doi: 10.1021/ba-1995-0246.ch001.

Polmear, I. J. (1995). *Light alloys: metallurgy of the light metals*. Butterworth-Heinemann.

Raghunathan, V., & Murty, B. S. (2009). Influence of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 62(6), 451-457.

**S 3** : Massinissa Koussaila Saadi, Stabilisation des sols gonflants avec la chaux. Cas de la région de MILA, université Larbi ben M'hidi OUM EL BOUAGHI, 2017.

## *Liste de référence*

---

Sivaprasad, K., & Mutsuddy, B. C. (2019). Recycling of aluminium and its alloys. In *Recycling of Metals: Sustainable Development and Ecological Footprints* (pp. 159-196). Springer. doi: 10.1007/978-3-319-96837-9\_7.

Suárez-Ruiz, I., & González-Castanedo, Y. (2019). Recycling of aluminum: a brief history from the origin to the current time. *Environmental Chemistry Letters*, 17(4), 1683-1694. doi: 10.1007/s10311-019-00887-6.

Tho. G. Thompson. Porous anodic alumina .Fabrication characterization and application. *Thinsolid. Films*; 29 (1-2) -192-201, 1997.

Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of aluminum: physical metallurgy and processes*. CRC Press.

Wang, L., et al. (2018). Mechanical properties and microstructure of aluminum alloy 7075-T651 under hot stamping. *Materials Science and Engineering: A*, 735, 122-129.

Yehia, S., & Ramadan, H. (2017). An overview of the history of aluminum and its industry. *Journal of Advanced Research*, 8(5), 493-501. doi: 10.1016/j.jare.2017.05.001.

Zhu, M., & Low, S. C. (2014). *Handbook of aluminum recycling*. CRC Press.

### **Les sites utilisés :**

1. Article sur l'histoire des argiles <https://www.compagnie-des-sens.fr/histoire-argiles/>. article consulté avril 2023.
2. <https://www.agro-league.com/blog/la-composition-et-la-formation-des-argiles-mineralogiques> article consulté avril 2023.
3. <https://www.tigersalu.com/fr/quelles-est-les-proprietes-physiques-de-l-aluminium/> consulté 17/04/2023.
4. <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/argiles.htm>. article consulté avril 2023.
5. **S 1 :** <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-argile-1053/>. Sur « la géologie de l'argile ». L'article consulté avril 2023.
6. **S 2 :** <http://creations-modelage.e-monsite.com/pages/histoire/histoire-de-l-argile.html> , sur « l'histoire de l'argile », article consulté avril 2023.

# *Les Annexes*

# Annexe 01

## Essais de portance



**Annexes N=°01 : Essai Portance  
sur l'Argile Naturelle.**

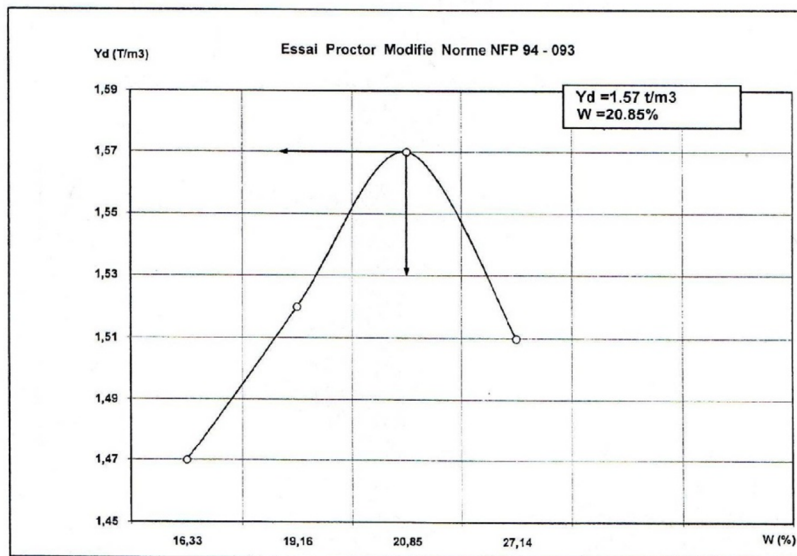
**Essaie de Proctor :**

N° de l'échantillon :

Poids d'eau ajoutée à..... chaque compactage.....	18%	20%	22%	24%
Poids total humide g.....	5205	5301	5383	5404
Poids du moule g.....	3583	3583	3583	3583
Poids du sol humide g.....	1622	1718	1800	1821
Poids du sol sec g.....	1394,38	1441,81	1489,24	1432,33
Volume du moule.....	948,56	948,56	948,56	948,56
Densité sèche t/m3.....	1,47	1,52	1,57	1,51
N° de la tare.....	1	2	3	4
Poids total humide g.....	400	400	400	400
Poids total sec g.....	352	345	341	327
Poids de la tare g.....	58	58	58	58
Poids de l'eau g.....	48	55	59	73
Poids du sol sec g.....	294	287	283	269
Teneur en eau %.....	16,33	19,16	20,85	27,14
Moyenne.....				

L.T.P.O. - Unité de TIARET

Client :		05/02/2023
Projet :	ETUDE DE SOL ARGILE VERDATRE GISEMENT DE GUARTOUFA.	
Lieu :	0	
Dossier :	0	
Privment :	P1 + P2 +P3	
Nature :	ARGIL VERDATRE GISEMENT DE GUERTOUFA.	
Eléments >à 20mm < 30%	(0,00%)	



Le chef de service :  
S.HAMRELAINE

F5-14

## Essaie de CBR :

	poids de moule vide (g)	poids moule+ éch (g)	w% CBR	pd (t/m3)	g,comp		w% finale	valeur de gonflement (mm)	temps min	1						indice portant à 2,5 mm	indice portant à 5 mm
					0 jours	4 jours				1	1,4	2	4	6	8		
										enfoce-ment (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5		
56 coups	7197	11665	24,36	1,57	//	//	26,33	//	force défi	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,11	8,40	7,85
									force totale	//	//	1,12	1,57	//	//		
25 coups	7151	11458	24,82	1,50	//	//	26,8	//	force défi	0	0	0,03	0,04	0,03	0,04	5,04	4,48
									force totale	//	//	0,67	0,9	//	//		
10 coups	7255	11180	24,96	1,37	//	//	26,95	//	force défi	0	0	0	0,01	0,01	0,02	0,00	1,12
									force totale	//	//	0,000	0,224	//	//		

\* indice portant à 2,5 mm = (Effort de pénétration à 2,5 mm d' enfocement) / 13,35 x 100

\* indice portant à 5 mm = (Effort de pénétration à 5 mm d' enfocement) / 20 x 100

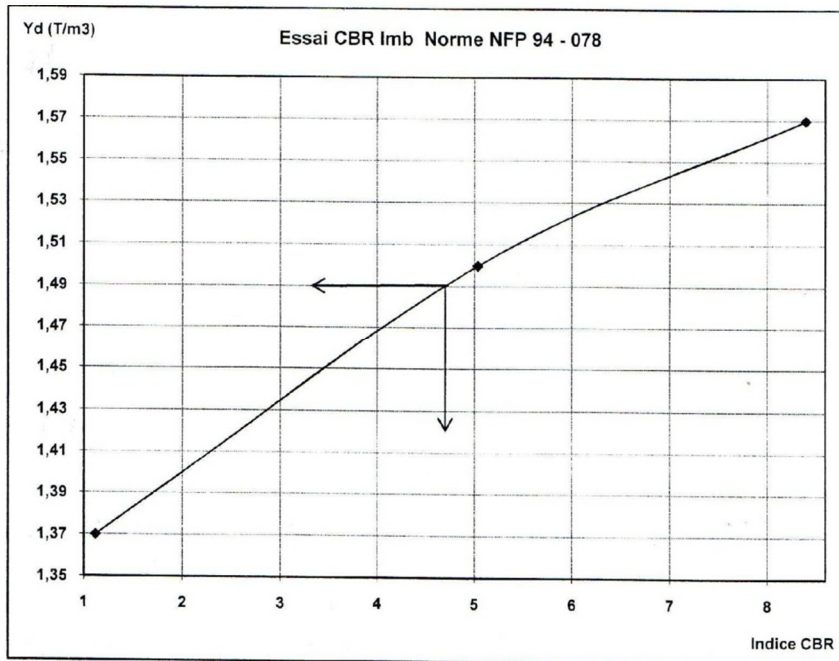
Date d'essai :

Le chef de service :  
S.HAMRELAINE

L'opérateur:

P.O - UNITE DE TIARET

Client :	.	date: 05/02/2023
Projet :	ETUDE DE SOL ARGILE VERDATRE GISEMENT DE GUARTOUFA.	
Lieu :	0	
Dossier :	0	
Prélevement :	P1 + P2 +P3	



Energie de compactage	10 c/c	25 c/c	56 c/c	Indice C.B.R à 95% yd OPM
W%	24,96	24,82	24,36	4,75
Y d (t/m3)	1,37	1,5	1,57	
Imbibition a 4 jours	//	//	//	
W final (%)	26,95	26,80	26,33	
Gonflement	//	//	//	
Indice C.B.R	1,12	5,04	8,40	

Le chef de service :  
S.HAMRELAINE

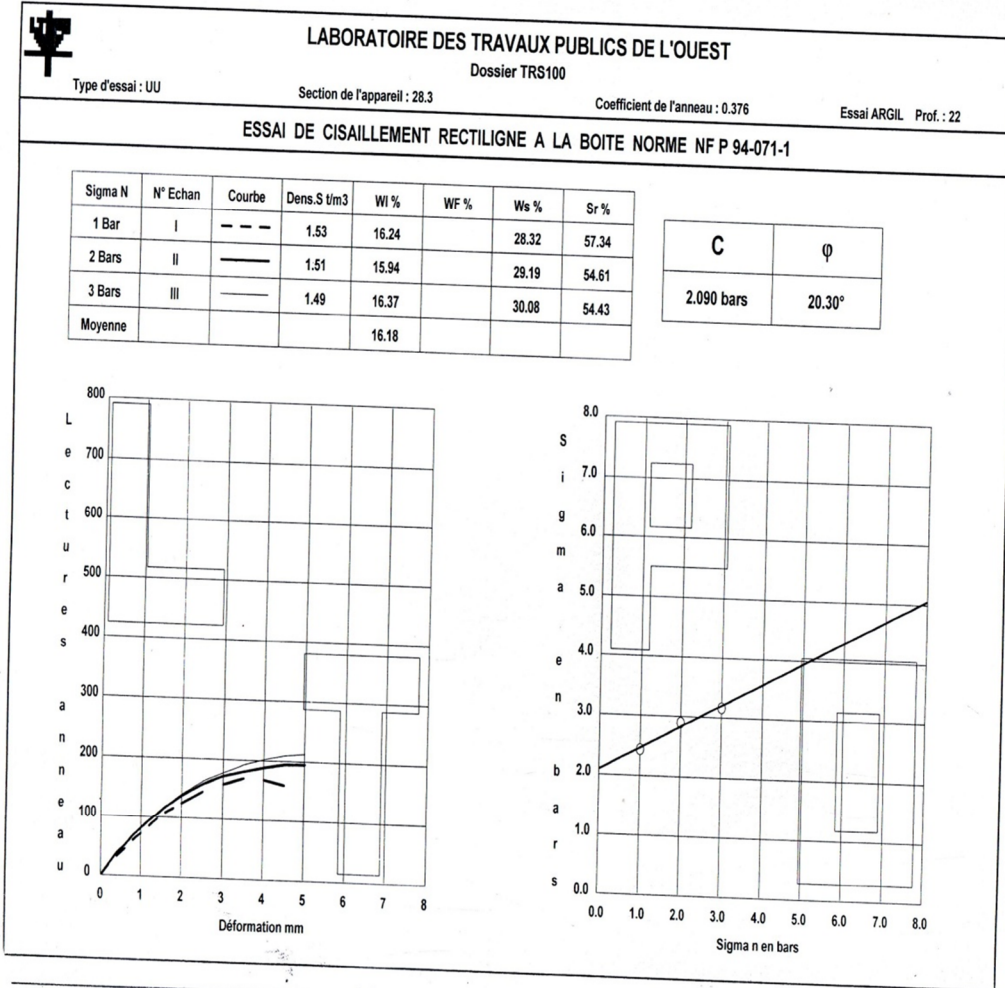
F5-14

# Annexe 02

## Essais de mécaniques

**Annexes N=°02 : Essai Mécanique  
sur l'Argile Naturelle.**

**Essaie de cisaillement :**



TPO-Unité de Tjaret

tbl le 19/02/2023

isé le

y d'r révision

ARGIL GARTOUFA

GARTOUFA

# Essai de L'odométrie :

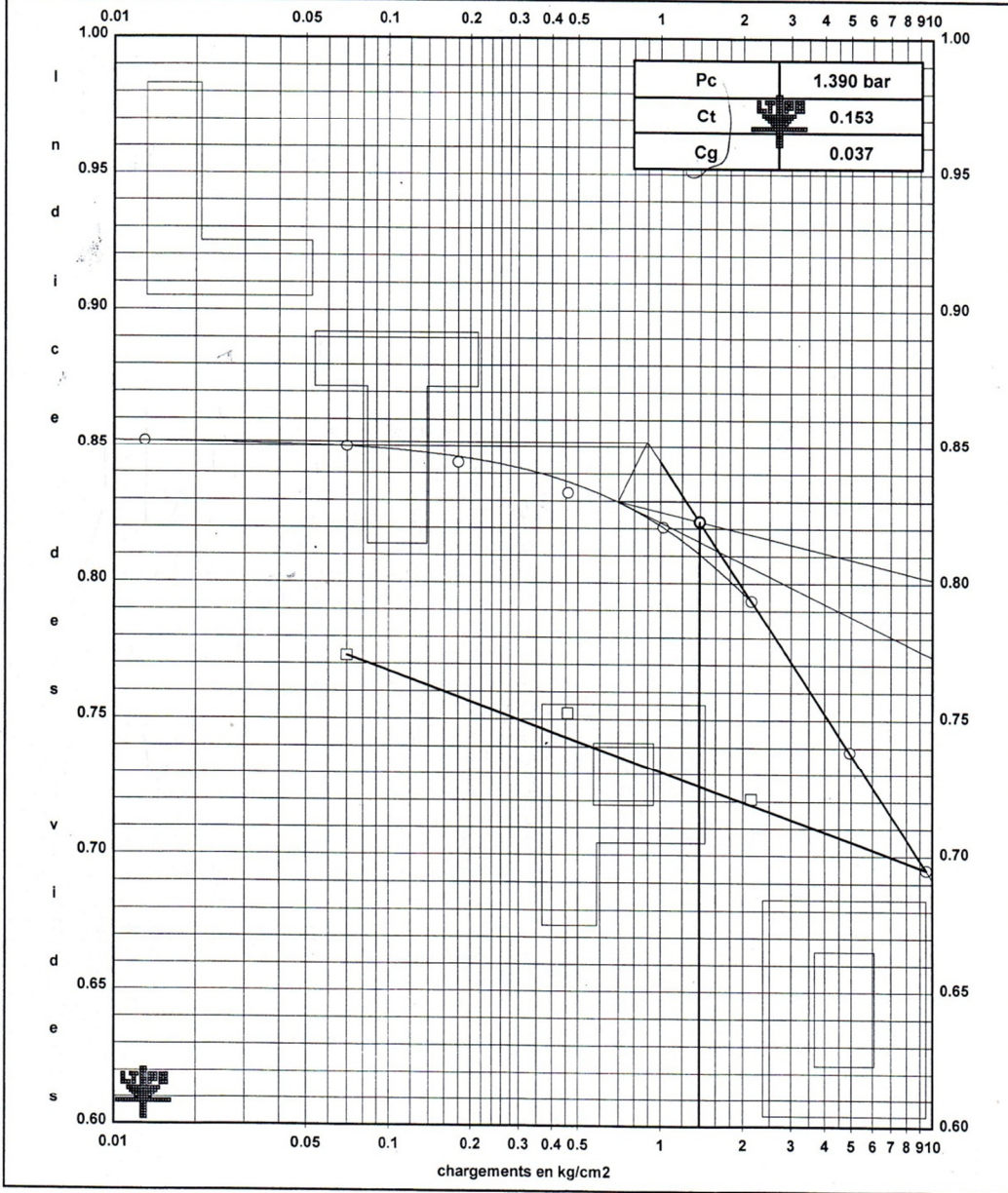


LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'OUEST

Dossier TRS100 03 Prof W24

Feuille 2

## ESSAI DE COMPRESSIBILITE A L'OEDOMETRE



LTPO-Unité de Tiaret

Etabli le 01/03/2023

AREGIL GARTOFA

Révisé le

ETUDIET

Indice de révision

# Annexe 03

## Essais de portance



**Annexes N=°03 : Essai Portance sur l'Argile + 3% La chaux.**

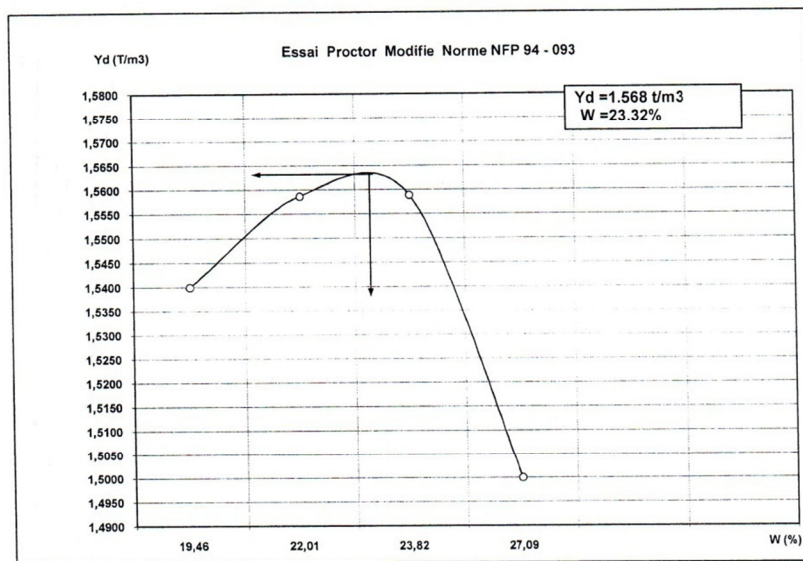
**Essaie de Proctor :**

N° de l'échantillon :

Poids d'eau ajoutée à..... chaque compactage.....	20%	22%	24%	26%
Poids total humide g.....	5328	5387	5414	5391
Poids du moule g.....	3583	3583	3583	3583
Poids du sol humide g.....	1745	1804	1831	1808
Poids du sol sec g.....	1460,78	1478,52	1478,71	1422,84
Volume du moule.....	948,56	948,56	948,56	948,56
Densité sèche t/m3.....	1,54	1,5587	1,5589	1,50
N° de la tare.....	1	2	3	4
Poids total humide g.....	400	400	400	400
Poids total sec g.....	344,3	338,3	334,2	327,1
Poids de la tare g.....	58	58	58	58
Poids de l'eau g.....	55,7	61,7	65,8	72,9
Poids du sol sec g.....	286,3	280,3	276,2	269,1
Teneur en eau %.....	19,46	22,01	23,82	27,09
Moyenne.....				

L.T.P.O. - Unité de TIARET

Client :	05/03/2023
Projet :	ETUDE DE SOL ARGILE VERDATRE GISEMENT DE GUARTOUFA TRAITÉ PAR LA CHAUX A 3 %
Lieu :	0
Dossier :	0
Privment :	ARGIL VERDATRE
Nature :	ARGIL VERDATRE GISEMENT DE GUERTOUFA.
Eléments > à 20mm < 30% :	(0,00%)



Le chef de service :  
S.HAMRELAINE

F5-14

## Essaie de CBR :

	poids de moule vide (g)	poids moule+éch (g)	w% CBR	pd (t/m3)	g,comp		w% finale	valeur de gonflement (mm)	temps min enfoncement (mm)	1	1,4	2	4	6	8	indice portant à 2,5 mm	indice portant à 5 mm
					0 jours	4 jours				1,25	2	2,5	5	7,5	10		
													défl.				
56 coups	10827	14955	22,71	1,59	//	//	25,27	//	défl.	0,35	0,53	0,6	0,7	0,87	0,95	100,77	78,48
									force totale	//	//	13,45	15,70	//	//		
25 coups	10836	14474	22,98	1,40	//	//	32,56	//	défl.	0,1	0,22	0,28	0,34	0,38	0,41	47,03	38,12
									force totale	//	//	6,28	7,6	//	//		
10 coups	10916	14243	23,42	1,28	//	//	38,46	//	défl.	0,08	0,1	0,13	0,16	0,2	0,23	21,83	17,94
									force totale	//	//	2,915	3,587	//	//		

\* indice portant à 2,5 mm = (Effort de pénétration à 2,5 mm d' enfoncement) / 13,35 x 100

\* indice portant à 5 mm = (Effort de pénétration à 5 mm d' enfoncement) / 20 x 100

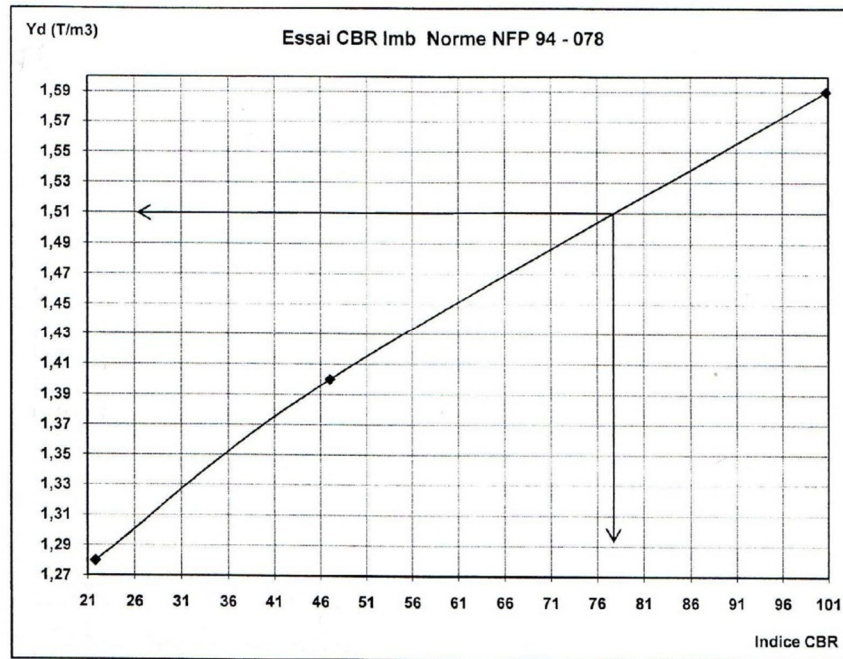
Date d'essai :

Le chef de service :  
S.HAMRELAINE

L'opérateur:

D - UNITE DE TIARET

ent :	.	date: 05/03/2023
rojet :	ETUDE DE SOL ARGILE VERDATRE GISEMENT DE GUARTOUFA TRAITÉ PAR LA CHAUX A 3	
Lieu :	0	
Dossier :	0	
Prélevement :	ARGIL VERDATRE	



Energie de compactage	10 c/c	25 c/c	56 c/c	Indice C.B.R à 95% yd OPM
W%	23,42	22,98	22,71	77,00
Y d (t/m3)	1,28	1,4	1,59	
Imbibition a 4 jours	//	//	//	
W final (%)	38,46	32,56	25,27	
Gonflement	//	//	//	
Indice C.B.R	21,83	47,03	100,77	

Le chef de service :  
S.HAMRELAINE

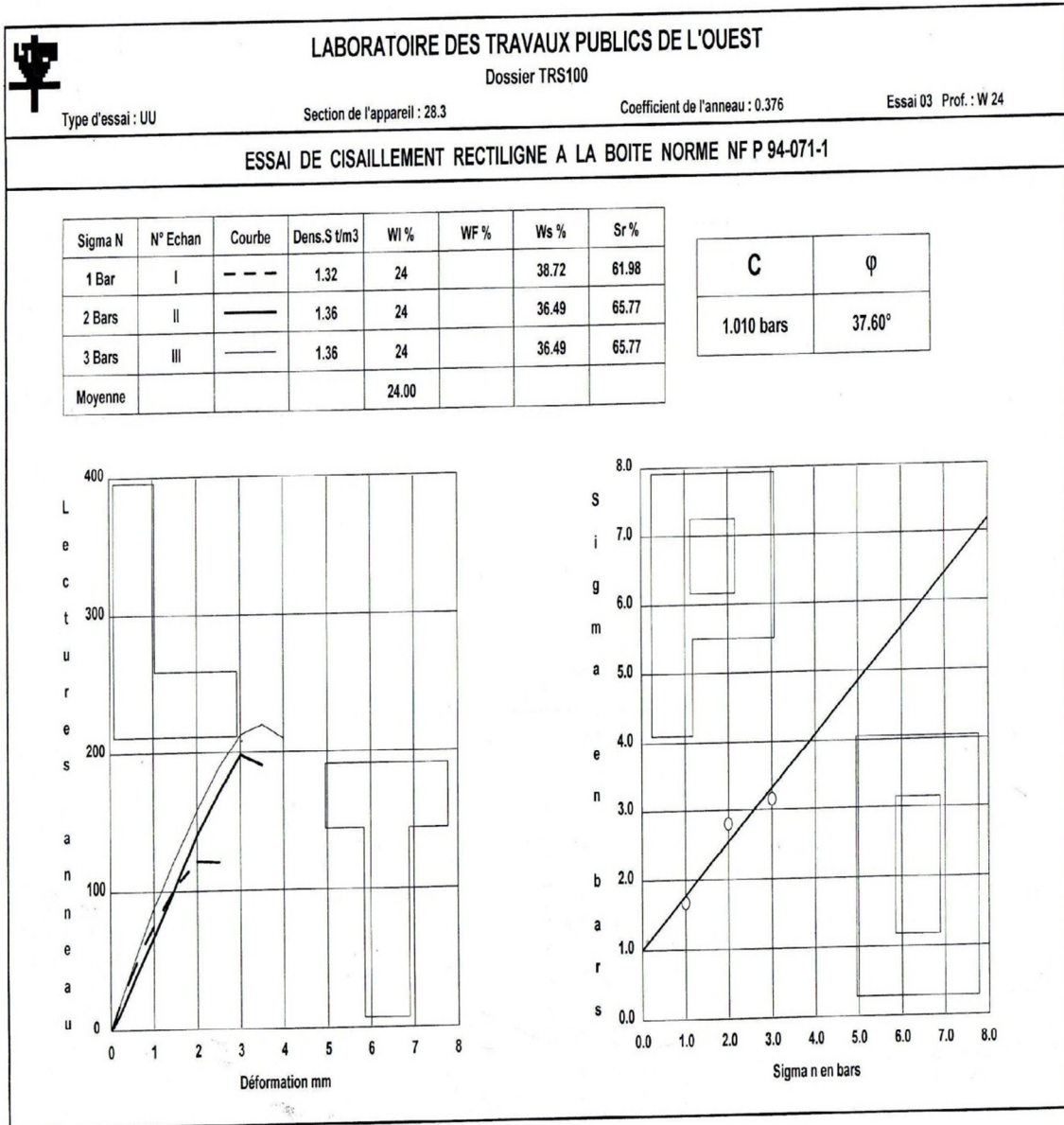
F5-14

# Annexe 04

## Essais de mécaniques

**Annexes N°04 : Essai Mécanique sur l'Argile + 3% La chaux.**

**Essai de cisaillement :**



TPO-Unité de Tiaret

01/03/2023

ARGIL GARTOUFA

GARTOUFA

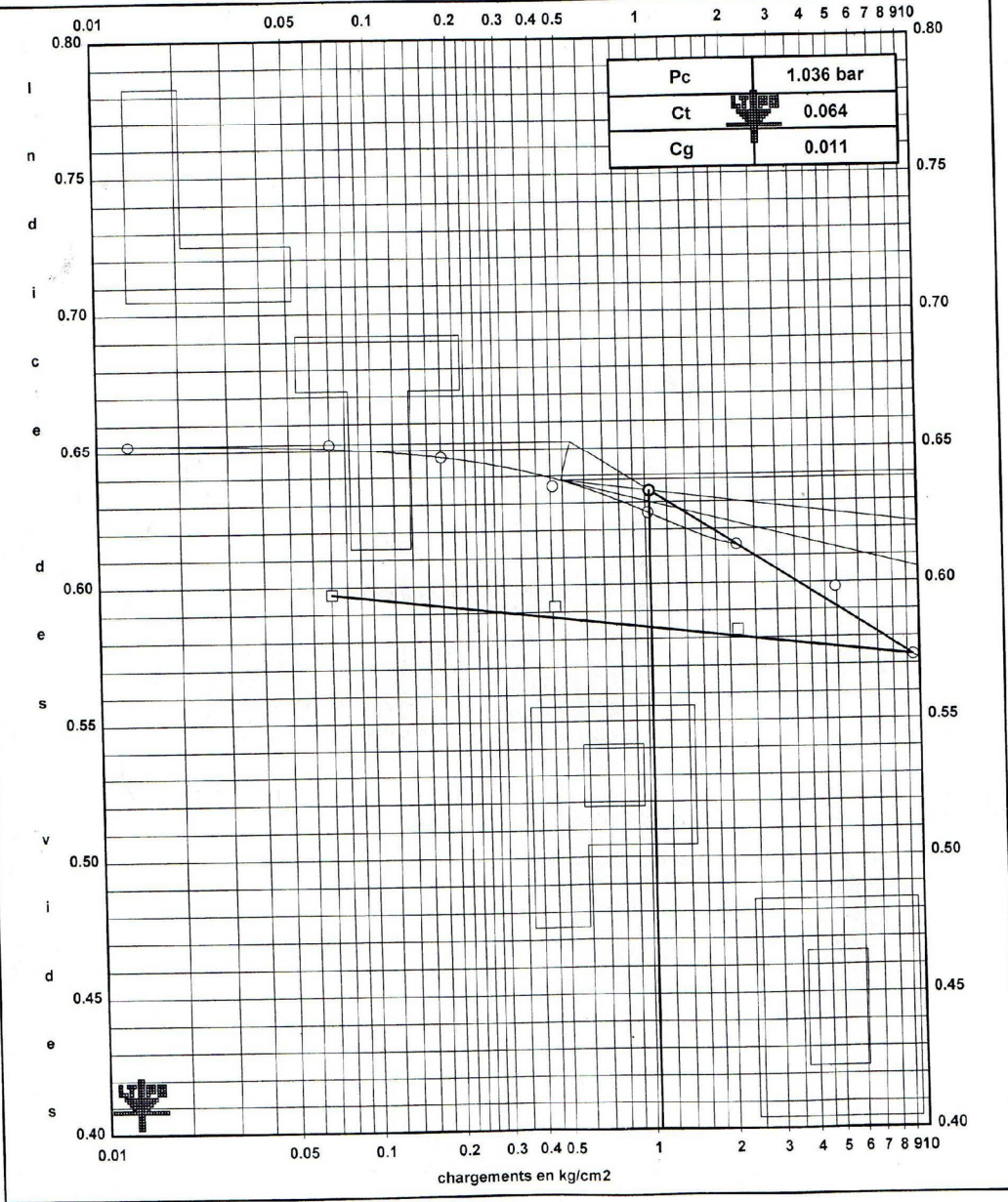
# Essai de L'œdométrie :

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'OUEST

Dossier TRS100 22 Prof

Feuille 4

## ESSAI DE COMPRESSIBILITE A L'ŒDOMETRE



LTPO-Unité de Tiaret

Etabli le 13/03/2023

AREGIL GARTOFA+3% LA CHAUX

Révisé le

ETUDIET

Indice de révision


# Annexe 05

## Essais de portance



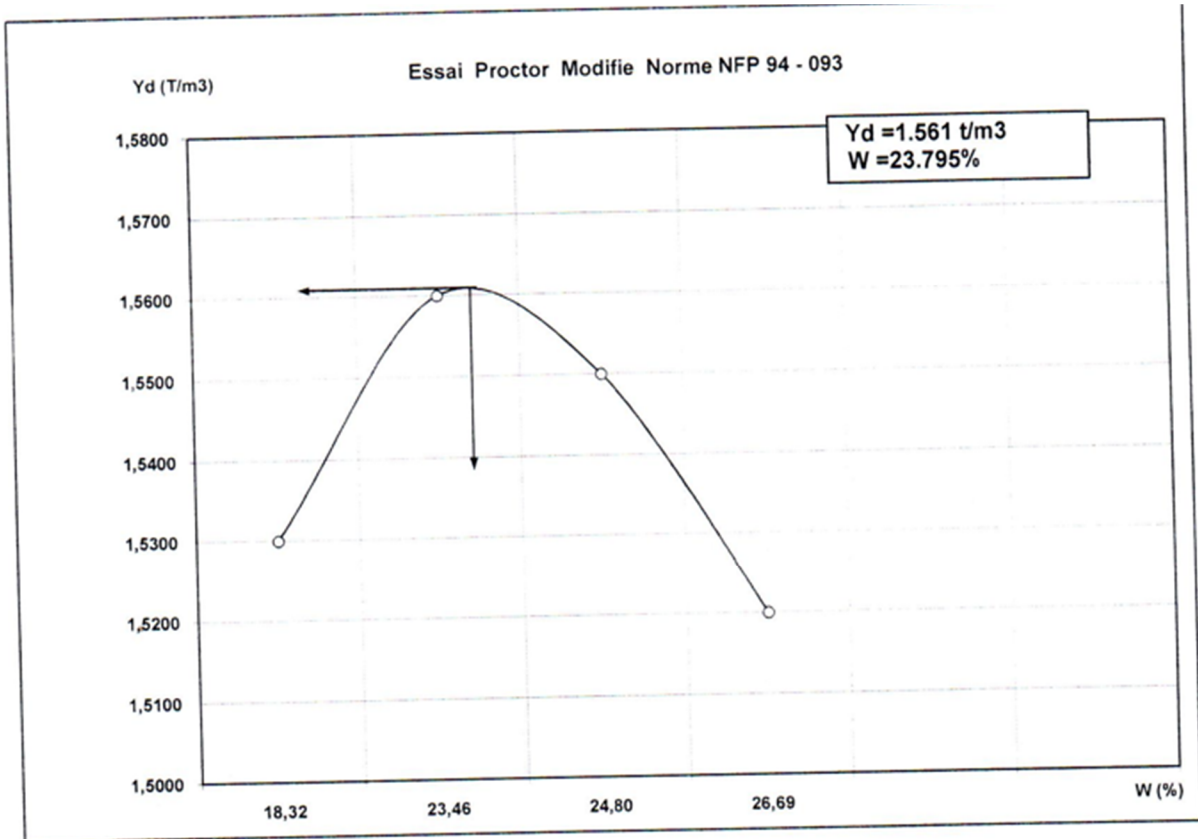
**Annexes N=°05 : Essai Portance sur  
l'Argile + 3% La chaux +1% Aluminium.**

**Essaie de Proctor :**

 **< 0.630**

N° de l'échantillon :

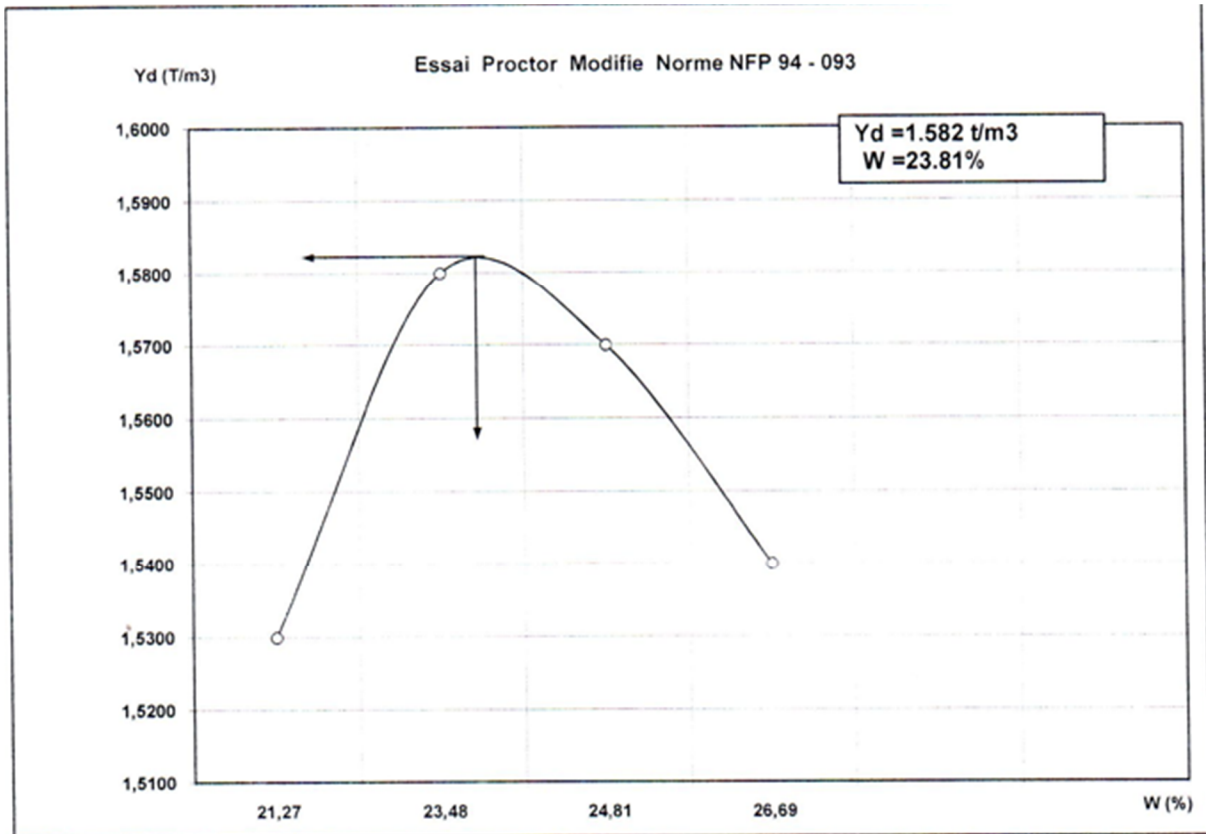
Poids d'eau ajoutée à..... chaque compactage.....	21%	22%	24%	26%
Poids total humide g.....	5300	5410	5418	5410
Poids du moule g.....	3583	3583	3583	3583
Poids du sol humide g.....	1717	1827	1835	1827
Poids du sol sec g.....	1451,30	1479,75	1470,27	1441,81
Volume du moule.....	948,56	948,56	948,56	948,56
Densité sèche t/m3.....	1,53	1,56	1,55	1,52
N° de la tare.....	1	2	3	4
Poids total humide g.....	400	400	400	400
Poids total sec g.....	350	339	337	333
Poids de la tare g.....	77	79	83	82
Poids de l'eau g.....	50	61	63	67
Poids du sol sec g.....	273	260	254	251
Teneur en eau %.....	18,32	23,46	24,80	26,69
Moyenne.....				



✚ (0.630/1.00).

N° de l'échantillon :

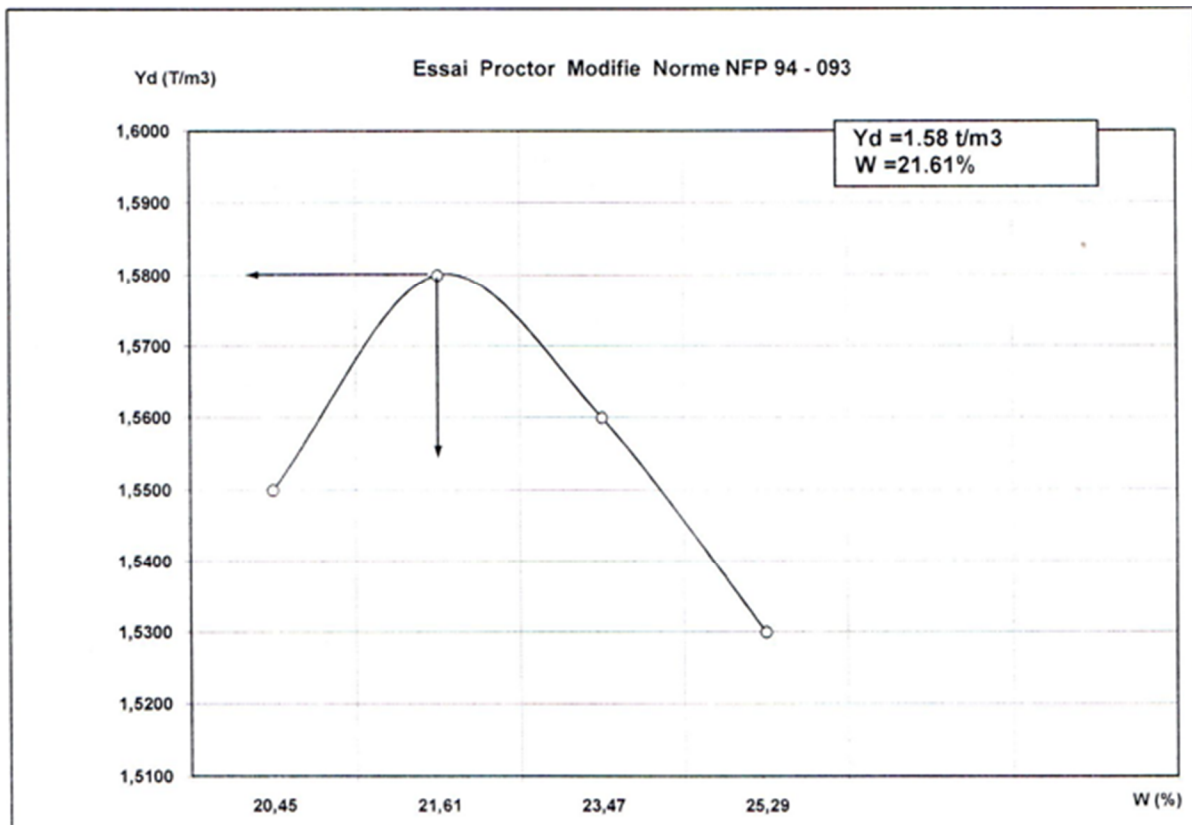
Poids d'eau ajoutée à..... chaque compactage.....	21%	22%	24%	26%
Poids total humide g.....	5343	5434	5442	5434
Poids du moule g.....	3583	3583	3583	3583
Poids du sol humide g.....	1760	1851	1859	1851
Poids du sol sec g.....	1451,30	1498,72	1489,24	1460,78
Volume du moule.....	948,56	948,56	948,56	948,56
Densité sèche t/m <sup>3</sup> .....	1,53	1,58	1,57	1,54
N° de la tare.....	1	2	3	4
Poids total humide g.....	400	400	400	400
Poids total sec g.....	343	338	336	333
Poids de la tare g.....	75	74	78	82
Poids de l'eau g.....	57	62	64	67
Poids du sol sec g.....	268	264	258	251
Teneur en eau %.....	21,27	23,48	24,81	26,69
Moyenne.....				



✚ (1.00/2.00).

N° de l'échantillon :

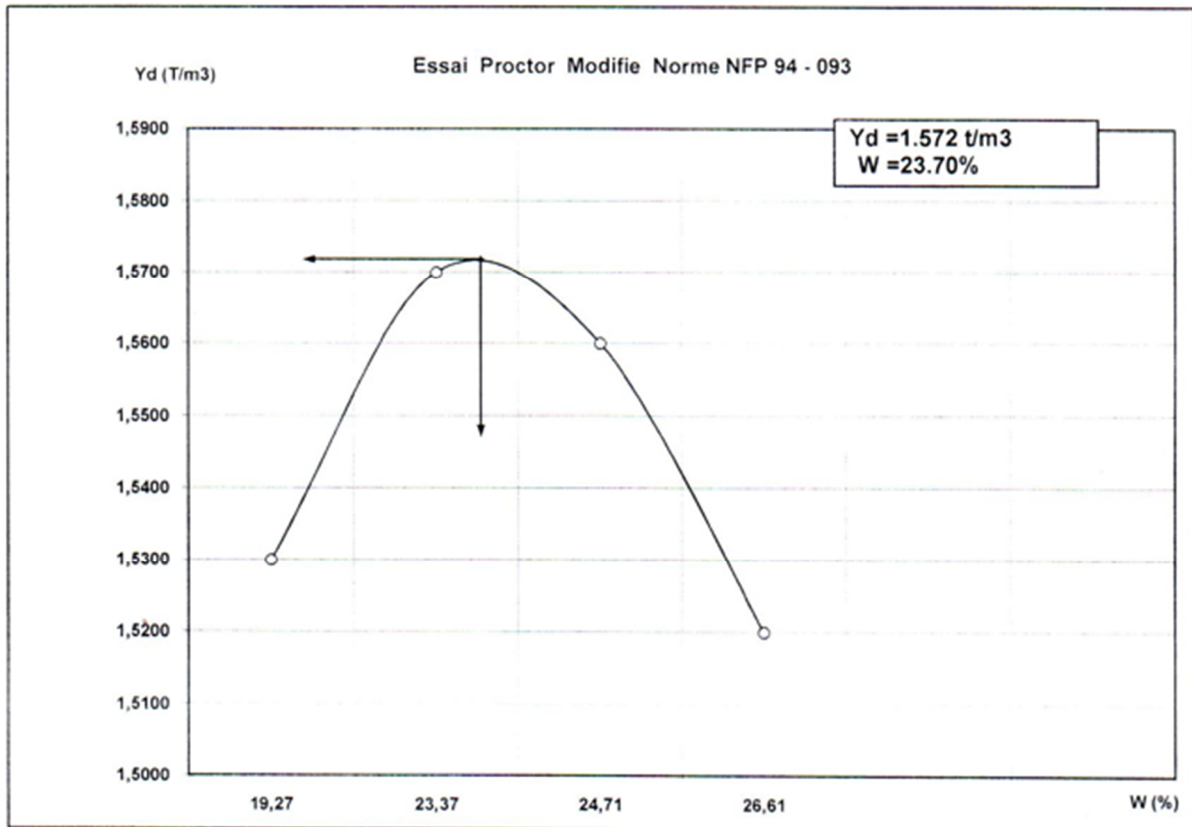
Poids d'eau ajoutée à..... chaque compactage.....	21%	22%	24%	26%
Poids total humide g.....	5354	5406	5410	5401
Poids du moule g.....	3583	3583	3583	3583
Poids du sol humide g.....	1771	1823	1827	1818
Poids du sol sec g.....	1470,27	1498,72	1479,75	1451,30
Volume du moule.....	948,56	948,56	948,56	948,56
Densité sèche t/m <sup>3</sup> .....	1,55	1,58	1,56	1,53
N° de la tare.....	1	2	3	4
Poids total humide g.....	400	400	400	400
Poids total sec g.....	345	341	335	334
Poids de la tare g.....	76	68	58	73
Poids de l'eau g.....	55	59	65	66
Poids du sol sec g.....	269	273	277	261
Teneur en eau %.....	20,45	21,61	23,47	25,29
Moyenne.....				



✚ (2.00/3.15).

N° de l'échantillon :

Poids d'eau ajoutée à..... chaque compactage.....	21%	22%	24%	26%
Poids total humide g.....	5314	5420	5428	5409
Poids du moule g.....	3583	3583	3583	3583
Poids du sol humide g.....	1731	1837	1845	1826
Poids du sol sec g.....	1451,30	1489,24	1479,75	1441,81
Volume du moule.....	948,56	948,56	948,56	948,56
Densité sèche t/m <sup>3</sup> .....	1,53	1,57	1,56	1,52
N° de la tare.....	1	2	3	4
Poids total humide g.....	400	400	400	400
Poids total sec g.....	347	339	336	334
Poids de la tare g.....	72	78	77	86
Poids de l'eau g.....	53	61	64	66
Poids du sol sec g.....	275	261	259	248
Teneur en eau %.....	19,27	23,37	24,71	26,61
Moyenne.....				



## Essaie de CBR.

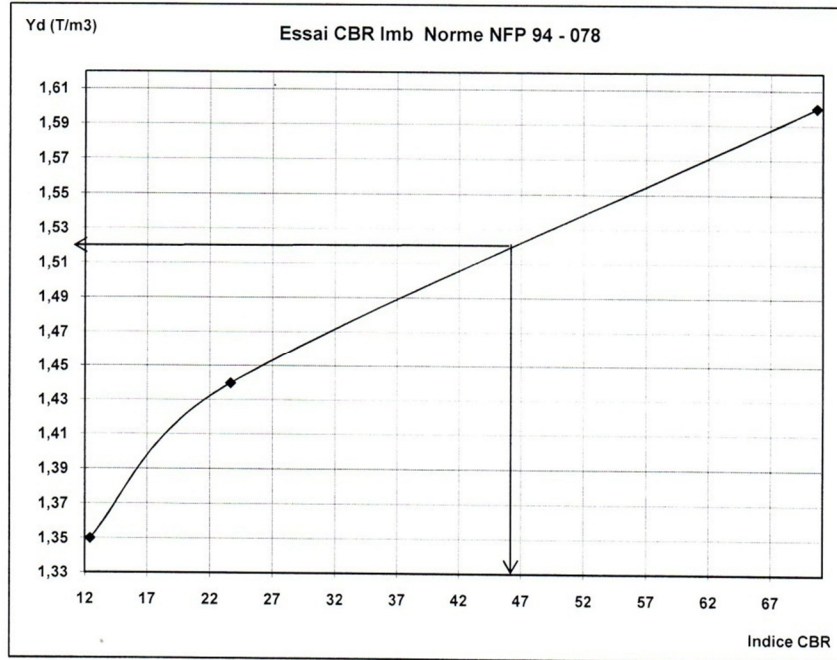
✚ < 0,630.

	poids de moule vide (g)	poids moule+éch (g)	w% CBR	pd (t/m <sup>3</sup> )	g.comp		w% finale	valeur de gonflement (mm)	temps min	1						indice portant à 2,5 mm	indice portant à 5 mm
					0 jours	4 jours				1,4	2	4	6	8			
										enfoce-ment (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5		
56 coups	7179	11422	16,38	1,59	//	//	26,2	//	défl	0,13	0,24	0,31	0,47	0,53	0,55	52,06	52,69
									force totale	//	//	6,95	10,54	//	//		
25 coups	10846	14481	17,59	1,46	//	//	27,13	//	défl	0,06	0,09	0,17	0,2	0,21	0,25	28,55	22,42
									force totale	//	//	3,81	4,5	//	//		
10 coups	10947	14325	18,6	1,36	//	//	34,65	//	défl	0,05	0,08	0,1	0,14	0,18	0,2	16,80	15,70
									force totale	//	//	2,242	3,139	//	//		

\* indice portant à 2,5 mm = (Effort de pénétration à 2,5 mm d<sup>h</sup> enfocement) / 13,35 × 100  
 \* indice portant à 5 mm = (Effort de pénétration à 5 mm d<sup>h</sup> enfocement) / 20 × 100

L.T.P.O - UNITE DE TIARET

Client :	.	date:	15/03/2023
Projet :	ARGILE VERDATRE GISEMENT DE GUARTOUFA TRAITÉ PAR LA CHAUX A 3 %+1% ALM(<0,630)mm		
Lieu :	0		
Dossier :	0		
Prélevement :	ARGIL VERDATRE		



Energie de compactage	10 c/c	25 c/c	56 c/c	Indice C.B.R à 95% yd OPM
W%	19,54	18,75	17,86	46,00
Y d (t/m3)	1,35	1,44	1,60	
Imbibition a 4 jours	//	//	//	
W final (%)	31,54	28,57	27,14	
Gonflement	//	//	//	
Indice C.B.R	12,33	23,54	70,63	

Le chef de service :  
S.HAMRELAINE

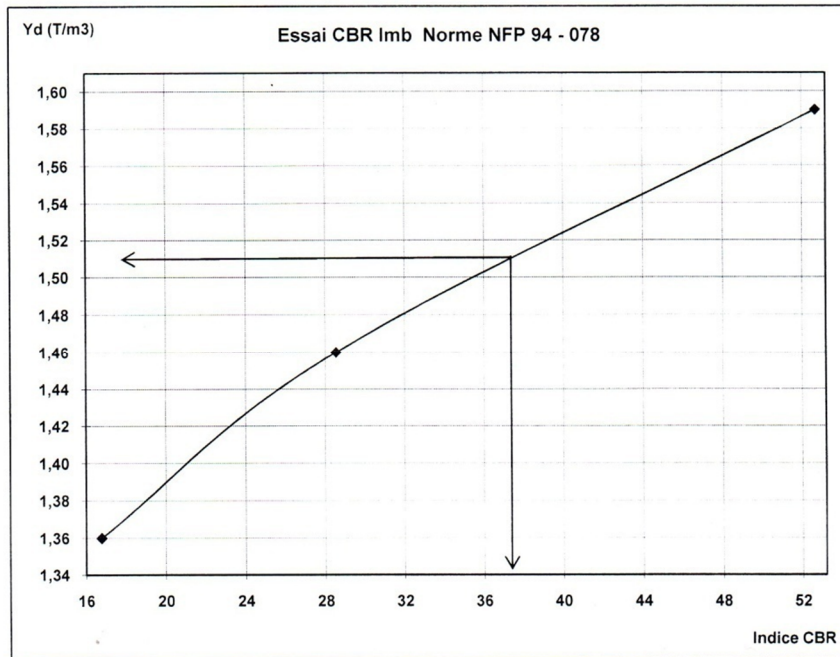
F5-14

✚ (0,630/1,00).

	poids de moule vide (g)	poids moule+éch (g)	w% CBR	pd (t/m3)	g,comp		w% finale	valeur de gonflement (mm)	temps min	1	1,4	2	4	6	8	indice portant à 2,5 mm	indice portant à 5 mm
					0 jours	4 jours											
56 coups	7179	11422	16,38	1,59	//	//	26,2	//	défi	0,13	0,24	0,31	0,47	0,53	0,55	52,06	52,69
									force totale	//	//	6,95	10,54	//	//		
25 coups	10846	14481	17,59	1,46	//	//	27,13	//	défi	0,06	0,09	0,17	0,2	0,21	0,25	28,55	22,42
									force totale	//	//	3,81	4,5	//	//		
10 coups	10947	14325	18,6	1,36	//	//	34,65	//	défi	0,05	0,08	0,1	0,14	0,18	0,2	16,80	15,70
									force totale	//	//	2,242	3,139	//	//		
<ul style="list-style-type: none"> <li>* indice portant à 2,5 mm = (Effort de pénétration à 2,5 mm d^' enfoce-ment)/13,35 x 100</li> <li>* indice portant à 5 mm = (Effort de pénétration à 5 mm d^' enfoce-ment)/20 x 100</li> </ul>																	

L.T.P.O - UNITE DE TIARET

Client :	.	date:	15/03/2023
Projet :	ARGILE VERDATRE GISEMENT DE GUARTOUFA TRAITÉ PAR LA CHAUX A 3 %+1% ALM(0,630/1,00)mm		
Lieu :	0		
Dossier :	0		
Prélevement :	ARGIL VERDATRE		



Energie de compactage	10 c/c	25 c/c	56 c/c	Indice C.B.R à 95% yd OPM
W%	18,60	17,59	16,38	37,50
Y d (t/m3)	1,36	1,46	1,59	
Imbibition a 4 jours	//	//	//	
W final (%)	34,65	27,13	26,20	
Gonflement	//	//	//	
Indice C.B.R	16,80	28,55	52,69	

Le chef de service :  
S.HAMRELAINE

F5-14

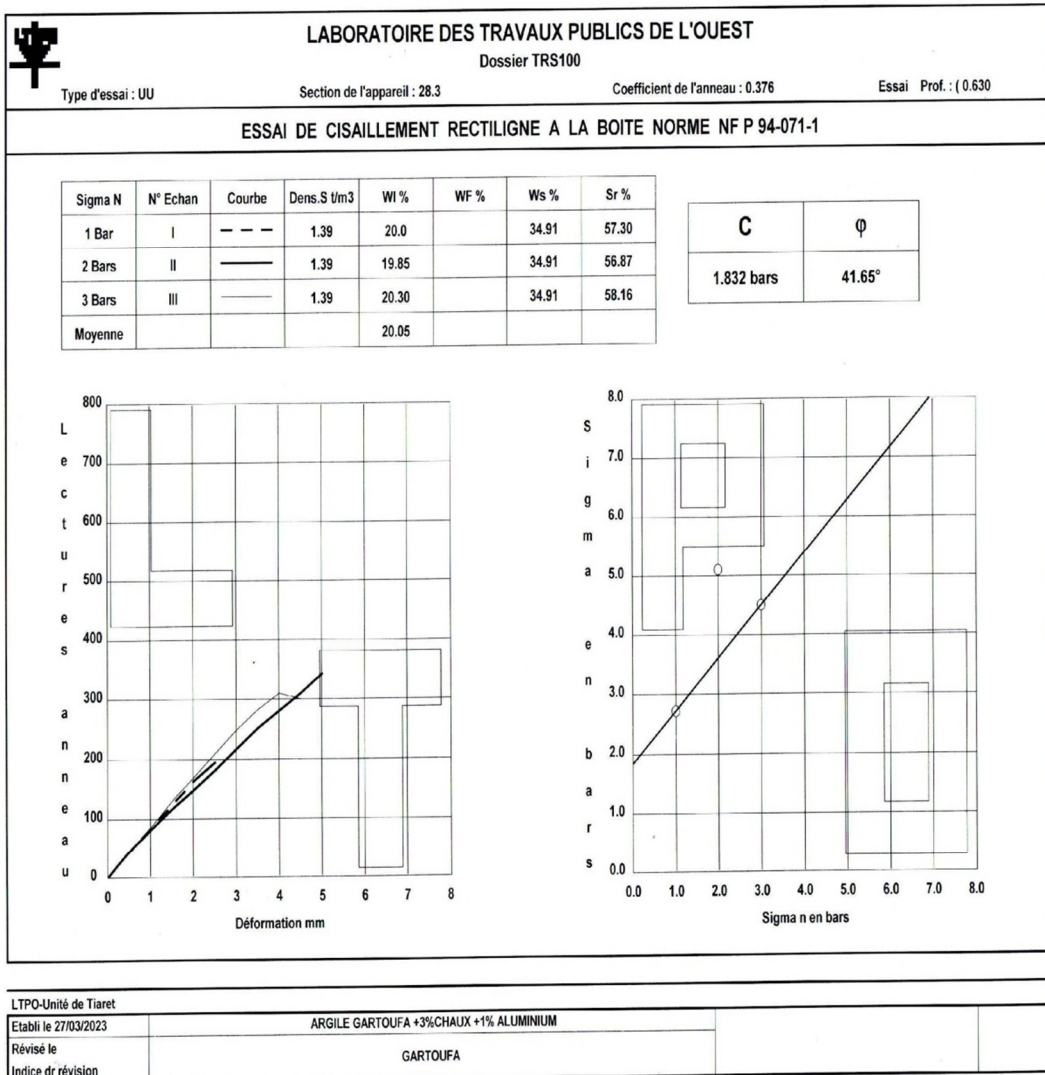


Annexe 06  
Essais de  
mécaniques

**Annexes N=°06 : Essai Mécanique sur l'Argile + 3% La chaux +1% Aluminium.**

**Essaie de cisaillement :**

**$\tau < 0,630$ .**



**$\tau (0,630/1,00)$ .**



LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'OUEST

Dossier TRS100

Type d'essai : UU

Section de l'appareil : 28.3

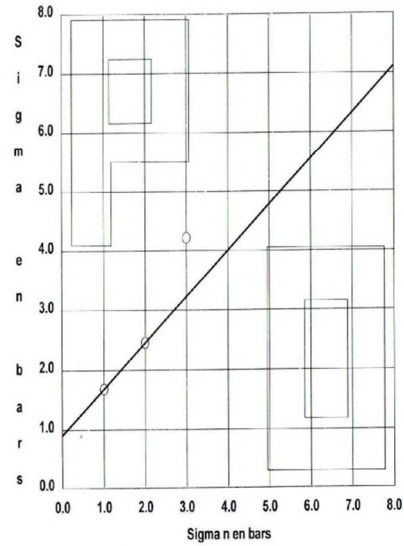
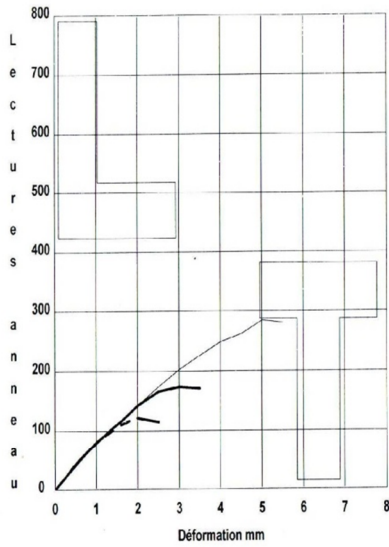
Coefficient de l'anneau : 0.376

Essai Prof. : 0.630/1.00

ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE NORME NF P 94-071-1

Sigma N	N° Echan	Courbe	Dens.S t/m3	WI %	WF %	Ws %	Sr %
1 Bar	I	---	1.35	20.27		37.04	54.73
2 Bars	II	—	1.32	20.09		38.72	51.88
3 Bars	III	—	1.36	20.40		36.49	55.90
Moyenne				20.25			

C	$\phi$
0.903 bars	37.81°



LTPO-Unité de Taret

Etabli le 29/03/2023

ARGILE GARTOUFA +3%CHAUX +1% ALUMINIUM

Révisé le

GARTOUFA

Indice de révision

(1,00/2,00).



LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'OUEST

Dossier TRS100

Type d'essai : UU

Section de l'appareil : 28.3

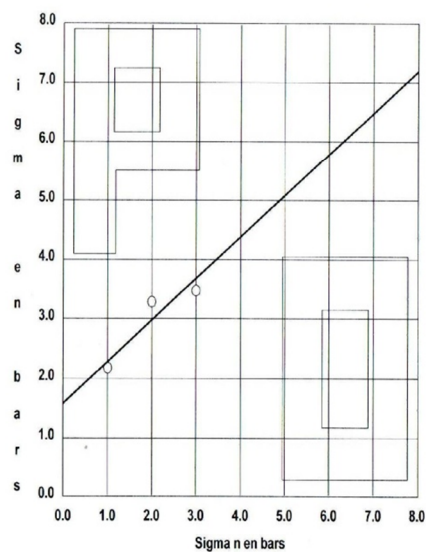
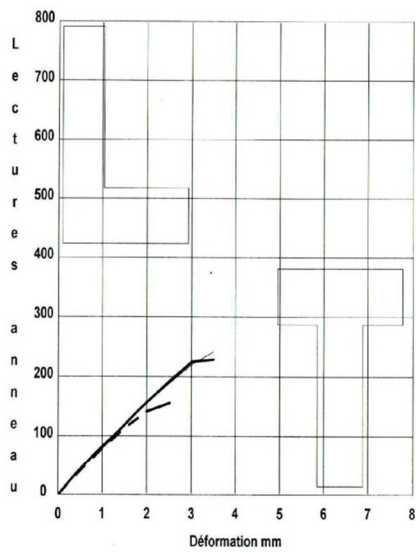
Coefficient de l'anneau : 0.376

Essai Prof. : 1.00M/2.00M

ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE NORME NF P 94-071-1

Sigma N	N° Echan	Courbe	Dens.S t/m3	Wl %	WF %	Ws %	Sr %
1 Bar	I	---	1.33	22.51		38.15	59.00
2 Bars	II	—	1.36	22.48		36.49	61.60
3 Bars	III	—	1.37	22.41		35.96	62.33
Moyenne				22.47			

C	φ
1.580 bars	34.99°



LTPO-Unité de Tiaret

Etabli le 29/03/2023

ARGILE GARTOUFA +3%CHAUX +1% ALUMINIUM

Révisé le

GARTOUFA

Indice de révision

✚ (2,00/3,15).



LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'OUEST

Dossier TRS100

Type d'essai : UU

Section de l'appareil : 28.3

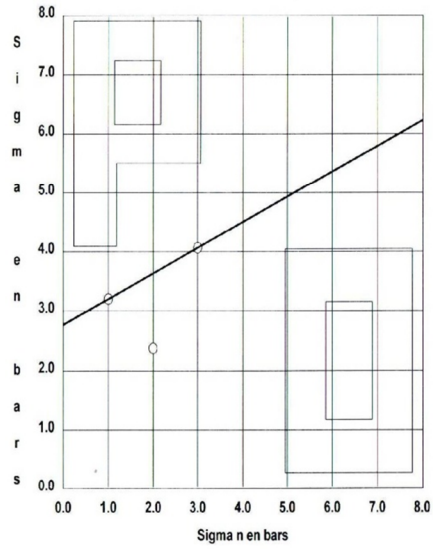
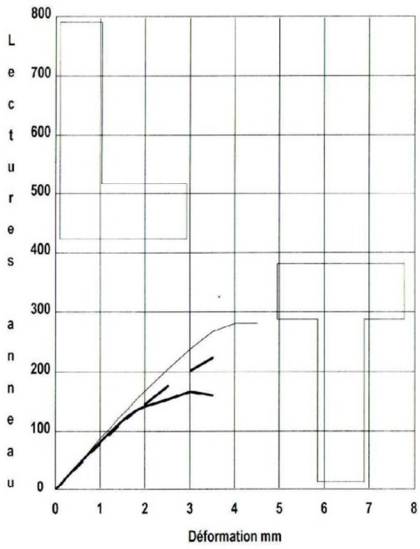
Coefficient de l'anneau : 0.376

Essai Prof. : 2.00/3.15

ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE NORME NF P 94-071-1

Sigma N	N° Echan	Courbe	Dens.S t/m3	Wl %	WF %	Ws %	Sr %
1 Bar	I	---	1.38	22.25		35.43	62.81
2 Bars	II	—	1.36	22.65		36.49	62.07
3 Bars	III	—	1.39	21.79		34.91	62.43
Moyenne				22.23			

<b>C</b>	<b>φ</b>
2.768 bars	23.38°



LTPO-Unité de Tiaret

Etabli le 27/03/2023

ARGILE GARTOUFA +3%CHAUX +1% ALUMINIUM

Révisé le

GARTOUFA

Indice de révision

# Annexe 07

## Essais de portance

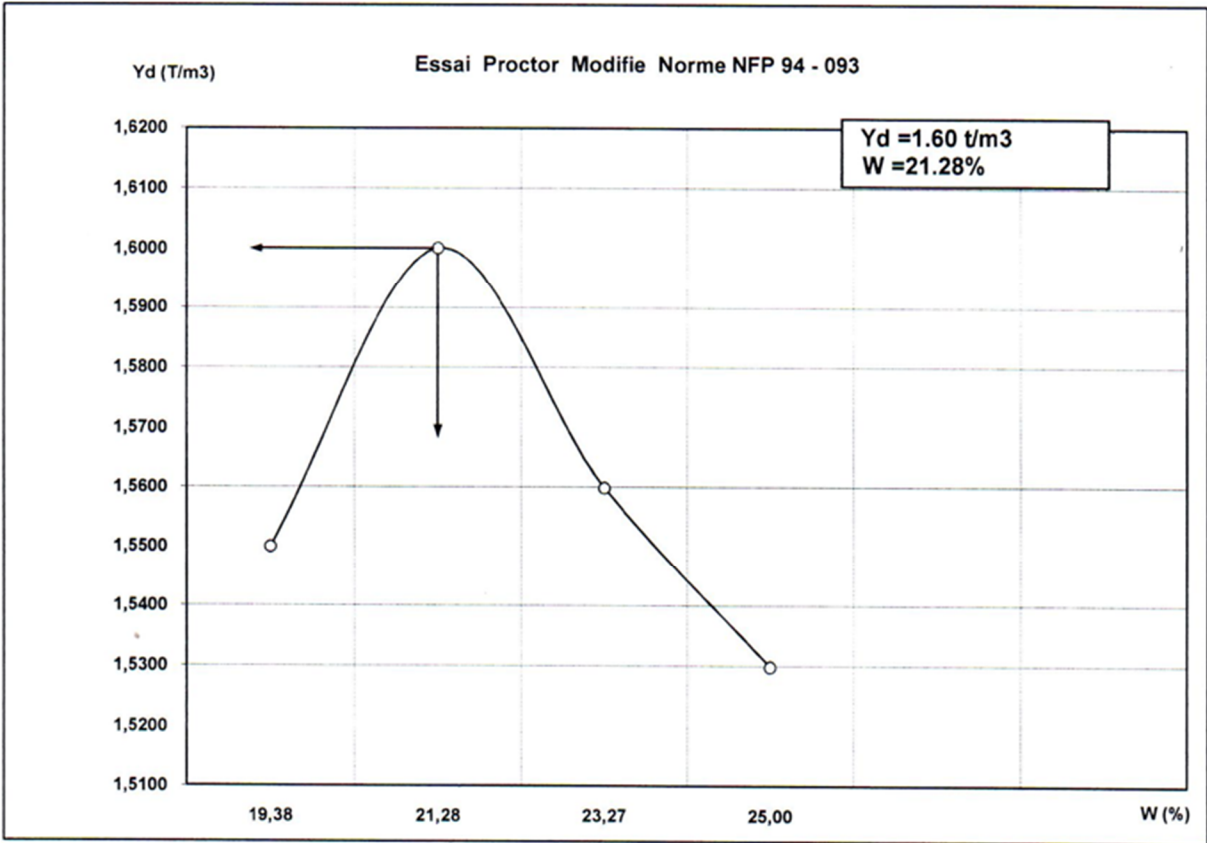
**Annexes N=°07 : Essai Portance sur  
l'Argile + 3% La chaux +3% Aluminium.**

**Essaie de Proctor :**

**+** (0,630/1,00).

N° de l'échantillon :

Poids d'eau ajoutée à..... chaque compactage.....	21%	22%	24%	26%
Poids total humide g.....	14744	14934	14897	14875
Poids du moule g.....	10832	10832	10832	10832
Poids du sol humide g.....	3912	4102	4065	4043
Poids du sol sec g.....	3276,70	3382,40	3297,84	3234,42
Volume du moule.....	2114	2114	2114	2114
Densité sèche t/m3.....	1,55	1,6000	1,5600	1,53
N° de la tare.....	1	2	3	4
Poids total humide g.....	400	400	400	400
Poids total sec g.....	344	340	336	334
Poids de la tare g.....	55	58	61	70
Poids de l'eau g.....	56	60	64	66
Poids du sol sec g.....	289	282	275	264
Teneur en eau %.....	19,38	21,28	23,27	25,00
Moyenne.....				





## Essaie de CBR :

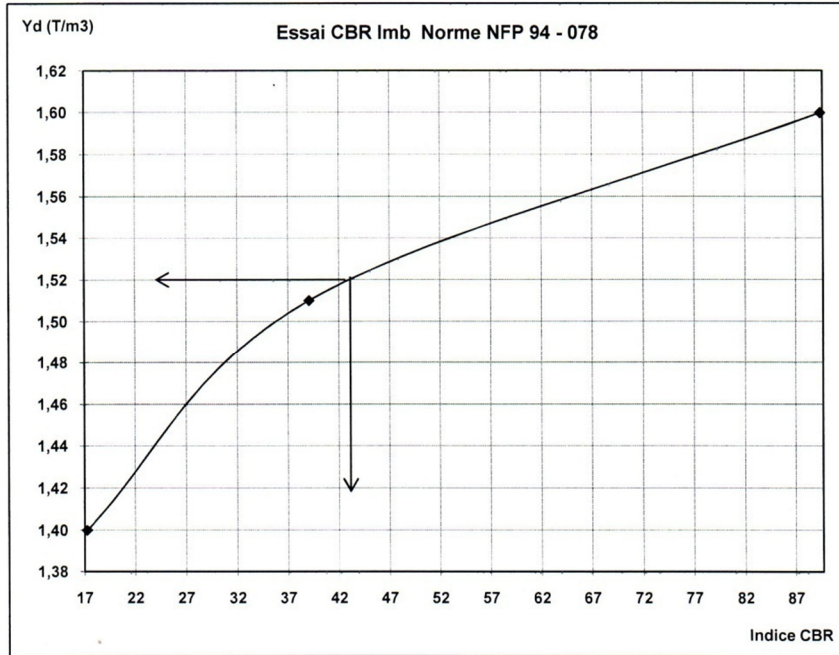
✚ (0,630/1,00).

	poids de moule vide (g)	poids moule+ éch (g)	w% CBR	pd (t/m3)	g.comp		w% finale	valeur de gonflement (mm)	temps min							indice portant à 2,5 mm	indice portant à 5 mm
					0 jours	4jours				1	1,4	2	4	6	8		
										enfoce- ment (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5		
56 coups	7250	11607	21,28	1,60	//	//	23,18	//	défi	0,25	0,45	0,53	0,61	0,64	0,69	89,01	68,39
									force totale	//	//	11,88	13,68	//	//		
25 coups	10855	14702	21,91	1,51	//	3	23,86	//	défi	0,1	0,21	0,23	0,28	0,29	0,33	38,63	31,39
									force totale	//	//	5,16	6,3	//	//		
10 coups	10920	14570	22,4	1,40	//	//	24,4	//	défi	0,04	0,09	0,1	0,12	0,13	0,14	16,80	13,45
									force totale	//	//	2,242	2,691	//	//		

- $indice\ portant\ à\ 2,5\ mm = (Effort\ de\ pénétration\ à\ 2,5\ mm\ d^N\ enfocement) / 13,35 \times 100$
- $indice\ portant\ à\ 5\ mm = (Effort\ de\ pénétration\ à\ 5\ mm\ d^N\ enfocement) / 20 \times 100$

L.T.P.O - UNITE DE TIARET

Client :	.	date:	21/03/2023
Projet :	ARGILE VERDATRE GISEMENT DE GUARTOUFA TRAITÉ PAR LA CHAUX A 3 %+3% Aluminium(0,630/1,00)mm		
Lieu :	0		
Dossier :	0		
Prélevement :	ARGIL VERDATRE		



Energie de compactage	10 c/c	25 c/c	56 c/c	Indice C.B.R à 95% yd OPM
W%	22,40	21,91	21,28	43,25
Y d (t/m3)	1,40	1,51	1,60	
Imbibition a 4 jours	//	3,00	//	
W final (%)	24,40	23,86	23,18	
Gonflement	//	3,00	//	
Indice C.B.R	16,80	38,63	89,01	

Le chef de service :  
S.HAMRELAINE

F5-14