Republique Algerienne Democratique et Populaire

وزارة التـــــعـليـم العـــالي والبـــحث العـــلـمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــــامعة الشهيد الشيخ العربـــــي التبســـــي – تـبســـــــــــــة

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **Master Académique**

En : genie civile

Spécialité : Géotechnique

Par : Labdaoui Chaouki

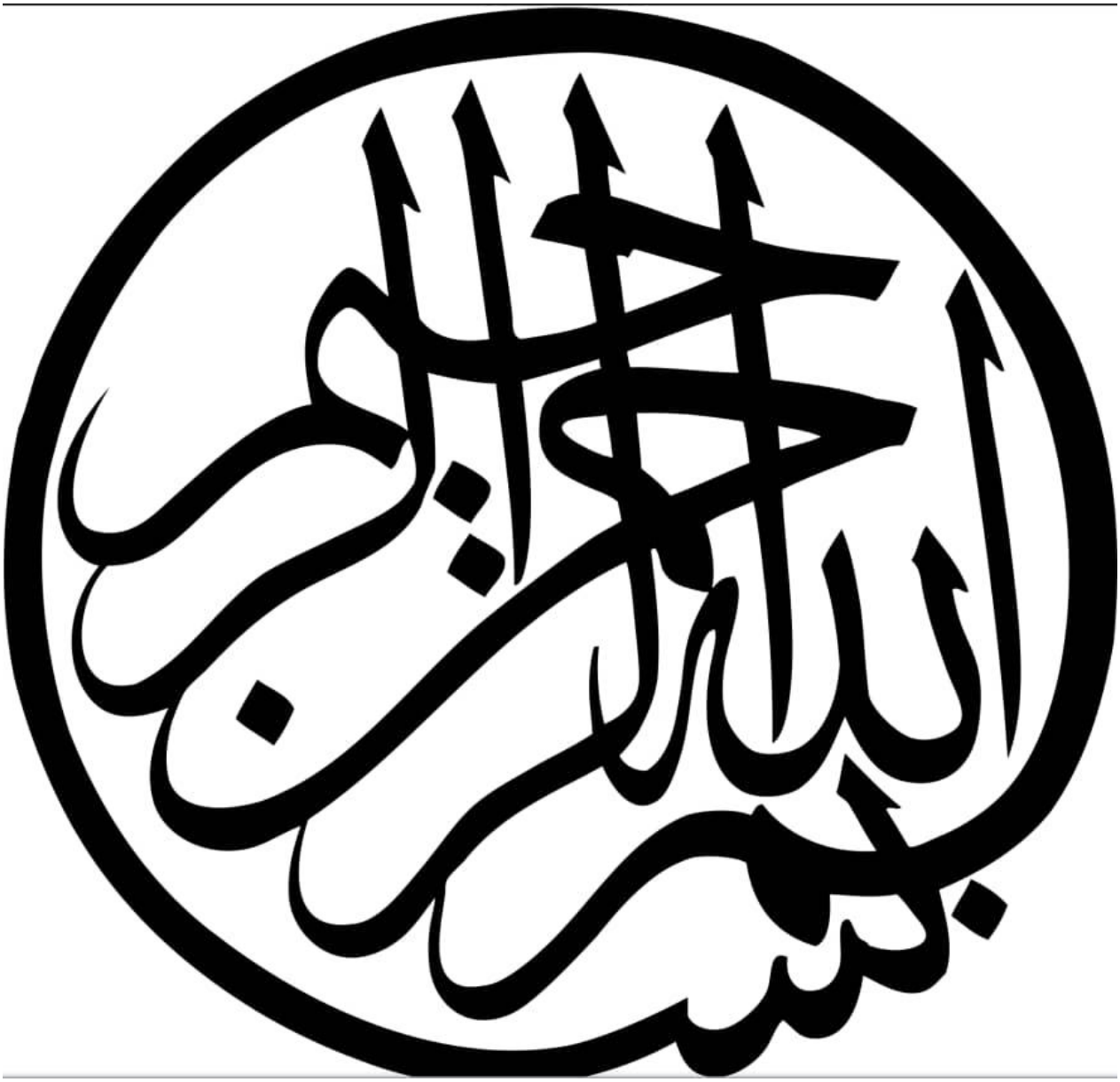
Sujet

Amélioration des sols gonflants par des poudres en caouetchouc

Présenté et soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

Laouar mouhamed salah	Grade	Président
Bouchoucha abdallah	Grade	Rapporteur
Fernane ali	Grade	Examinateur 1
…	…	…

Promotion : 2024/2025


بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciement :

On tient à remercier on premier lieu ALLAH. *Le tout puissant de nos donner le courage, la santé et la patience pour achever en travail.*

Tout d'abord, j'adresses mes remerciement à Mr ..... qui m'a aidée avec la thèse de fin d'étude.

Je tiens à remercier le directeur de laboratoire de contrôle routes et construction pour accueil le temps passé ensemble et le partage de son expertise à la quotidienne grâce aussi à sa confiance. Nous avons pu nous réaliser pleinement pendant la période de stage.



Dédicace :

Tout d'abord, je remercie dieu pour son aide dans la réalisation de ce travail

deuxièmement,je dédie cette réalisation à ma famille, qui m'ont soutenu et m'ont fourni toutes sortes de soutien.

En conclusion,je remercie mes collègues

Liste des figures

Figure 1.1 - Couches tétraédrique et octaédriques typiques des argiles	05
Figure I.2 - Structure des feuillets de kaolinite et de montmorillonite	06
Figure 1.3 - Différents niveaux structuraux des sols gonflants	08
Figure 1.4 : structure des minéraux argileux.	09
Figure 1.5: a: Structure de la Kaolinite b : photomicrographie électronique de l'argile Kaolinite	10
Figure 1.6: a: Structure de la illite b : photomicrographie électronique de l'argile illite	10
Figure 1.7: a: Structure de la Montmorillonite b : photomicrographie électronique de l'argile Montmorillonite	11
Figure 1.8: cristaux de chlorite et de kaolinite vus au microscope électronique à balayage.	12
Figure 1.9: Trois états d'un même sol (sec, initial, saturé d'eau).	14
Figure 1.10: Phénomène de tassement	14
Figure 1.11: Phénomène de glissement	15
Figure 1.12: Diagramme de plasticité	18
Figure 1.13: Diagramme de Casagrande remanié en 1973	19
Figure 1.14: positions des minéraux argileux dans le diagramme de Casagrande.	19
Figure 1.15: Diagramme de classification du potentiel de gonflement.	20
Figure 1.16: Facteur qui affectant le gonflement	23

Figure 1.17: Formes de Dégâts Sur des Bâtiments Reposant Sur des Terrains Gonflants.	24
Figure 1.18: Formes et Directions de Fissuration.	25
Figure 1.19: Mécanisme d'évolution d'une route sur sol argileux gonflant.	26
Figure 2.1. Dimension moyenne des grains (mm)	29
Figure 2.12. Les méthodes d'améliorations des sols	30
Figure 2.3 : déférents types de compactage	31
Figure 2.4. Principe du pré-chargement pour le contrôle des tassements.	32
Figure2.5. l'installation des drains verticaux	32
Figure2.6 types de chaux	34
Figure2.7 Clinker	35
Figure2.8 Ciment	36
Figure 2.9: pouzzolane calibrée.	37
Figure 2.10 : Fibre plastique.	38
Figure 2.11 : Fibres de caoutchouc des pneus usés (1), Poudre de caoutchouc (2 & 3).	39
Figure2.12 : : Effet de la teneur fibres en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement de sol A .	40
Figure 2.13 :: Effet de la teneur en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement de sol B	41
Figure 3.1: Situation géographiques de la zone d'étude	45

Figure 3.2: Carte des précipitations annuelles du Nord-est de l'Algérie (service ANRH- Unité de Tébessa, 2003)	46
Figure 3.3: La zone du sol étudié	46
Figure 3.4: Répartition mensuelle des températures 72/2012. (Service ANRH-Unité de Tébessa, 2003)	47
Figure 3.5: Variation des moyennes mensuelles interannuelles des précipitations (Station de Tébessa, période 1972/1973-2011/2012). (service ANRH-Unité de Tébessa, 2003)	48
Figure 3.6: Vue satellitaire de la zone d'étude. (Google Map)	48
Figure 3.7.Aspect des poudrettes de caoutchouc	49
Figure 3.8: Essai analyse granulométrique par tamisage.	51
Figure 3.9: Analyse granulométrique par tamisage	52
Figure 3.10: appareillage dessai sedimentaire.	54
Figure 3.11: protocole expérimental d'essai sédimentaire.	54
Figure 3.12: Courbe granulométrique du sol.	55
Figure 3.13: Appareillage d'essai poids spécifique.	56
Figure 3.14: Quelques-unes étape d'essai poids spécifique.	56
Figure 3.15: Appareillage d'essai limite d'Atteberg.	58
figure 3.16 : Résultats d'essai limite d'Atterberg	59
Figure 3.17 : Appareillage d'essai bleu de méthylène.	61
Figure3.18: Quelques-unes étape d'essai bleu de méthylène.	61
Figure 3.19: Appareillage d'essai Proctor.	63

Figure 3.20: quelques-unes étape d'essai sédimentaire.	63
Figure 3.21 : Détail d'un odomètre.	65
Figure 3.22: Cellule œdométrique type Terzaghi.	66
Figure 3.23 : Cellule oedométrique fermé.	66
Figure 3.24: système de la mise en charge	67
Figure 3.25: Dame de compactage.	68
Figure 3.26: Quelques-unes étape d'essai œdométrique.	69
Figure 3.27: Diagramme de plasticité [19]	74
Figure 3.28: Diagramme de Casagrande remanié en 1973	74
Figure 3.29: Diagramme de classification du potentiel de gonflement. [18]	74
Figure 4.1: courbe de variation de gonflement pour le sol vierge en fonction de temps	78
Figure 4.2 : courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour sol vierge en fonction de temps.	78
Figure 4 .3: courbe de variation de gonflement pour le sol étudié+ 2% de poudre en caoutchouc en fonction de temps.	79
Figure 4 .4: courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol étudié+ 2% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.	79
Figure 4.5: courbe de variation de gonflement pour le sol étudié+ 4% de poudre en caoutchouc en fonction de temps.	80
Figure 4.6: courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol étudié+ 4% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.	80

Figure 4.7: courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol étudié+ 6% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.	80
Figure 4.8 courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol étudié+ 6% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.	81
Figure 4 .9: courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol étudié+ 8% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.	81
Figure 4 .10 courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol étudié+ 8% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.	81
Figure 4.11: courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol étudié+ 10% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.	82
Figure 4 .12 courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol étudié+ 10% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.	82
Figure 4.13: courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol étudié+ 12% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.	82
Figure 4.14 courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol étudié+ 12% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.	83
Figure 4.15: courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol étudié+ 14% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.	83
Figure 4.16 courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol étudié+ 14% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.	83
Figure 4.17: Courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol vierge +sol+2%+4%+ 6 %+8% + 10% +12% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps	85
Figure 4.18: Courbe de le potentielle (le taux) de gonflement pour le sol vierge +sol+2%+4%+ 6 %+8% + 10% +12% de la poudre en caoutchouc en fonction de l'échelle logarithmique.	85

Figure 4.19 : courbe de la variation de Δh en fonction de teneur en eau	86
Figure courbe 4 .20 : de la variation de Δh en fonction d'Energie de compactage	87
Figure 4.21 : courbe de la pression de gonflement pour le sol vierge en fonction des charges	89
Figure 4.22: courbe de la pression de gonflement pour le sol étudié +10% poudre en caoutchouc en fonction des charges.	89
Figure 4.23 : courbe de la pression de gonflement pour le sol vierge en fonction des charges variables	91
Figure 4.24: courbe de la pression de gonflement pour le sol étudié +10% poudre en caoutchouc en fonction des charges variables	92

Liste des tableaux

Tableau 1.1 - Caractéristiques microscopiques des principales argiles	12
Tableau 1.2: Relation entre Ip et le potentiel de gonflement [24]	20
Tableau 1.3: Classification des sols gonflants basée sur l'Ip	20
Tableau 1.4: Classification des sols suivant leur activité Ac [23]	21
Tableau 1.5: Activité des principales familles d'argiles [23]	21
Tableau1.6: Activité au bleu Acb des argiles [12]	22
Tableau 1.7: Sensibilité d'une argile au retrait-gonflement [05]	22
Tableau 3.1: Les cordonnées de la station météorologique de Tébessa. (service ANRH- Unité de Tébessa, 2003)	45
Tableau 3.2: Moyenne mensuelle des températures 72/2012. (Service ANRH-Unité de Tébessa, 2003)	47
Tableau 3.3: Précipitations moyennes mensuelles (mm) à la station de Tébessa (72/2012). (service ANRH-Unité de Tébessa, 2003)	47
Tableau 3.4: formulation propose pour le traitement du sol.	50
Tableau3.5: Analyse granulométrique par tamisage humide.	52
Tableau 3.6: norme de la granulométrique par tamisage.	52
Tableau 3.7.: granulométrie et sédimentation .	54
Tableau 3.8: Résultats d'essai poids spécifique.	57
Tableau 3.9: Résultats d'essai limite d'Atterberg (WI).	58
Tableau 3.10: Résultats d'essai limite d'Atterberg (WI).	59
Tableau 3.11: Résultats d'essai limite d'Atterberg	60

Tableau 3.12 Classification d'essai bleu de méthylène.	62
Tableau 3.13 : résultats d'essai Proctor.	64
Tableau 3.14 : Caractéristique du sol étudié.	64
Tableau 3.15 : Caractéristique de l'anneau de cellule oedométrique.	67
Tableau 3.16 : Correspondance entre le nombre de coups et l'énergie de compactage.	68
Tableau3.17: Caractéristique de l'échantillon du sol.	69
Tableau 3.18: potentielle de gonflement D'après seed et al (1962).	71
Tableau 3.19: potentielle de gonflement D'après holtz BRE (1980).	71
Tableau 3.20 Des sols suivant leur activité Ac (Skempton, 1953).	72
Tableau 3.21: Activité au bleu Acb des argiles d'après Lautrin (1989)	72
Tableau 3.22: Potentielle de gonflement d'après Dakshanamurthy et Raman (1973).	73
Tableau 4 .1: formulations des caractéristiques des sol vierge et traité.	77
Tableau 4.2: Taux de réduction par rapport au sol non traité	86
Tableau 4.3: L'effet de la teneur en eau du sol traité	86
Tableau 4.4: L'effet de l'Energie de compactage	87
Tableau 4 .5 : Taux de réduction de la pression par rapport au sol non traité.	90
Tableau 4.6: Les valeurs des pressions de gonflement des 4 sols et le taux de réduction d'un sols traités par rapport au sol non traité.	91
Tableau 4.7: Taux de réduction de la pression par rapport au sol non traité des charges variables	93

Tableau 4.8: Les valeurs des pressions de gonflement des 4 sols et le taux de réduction d'un sols traités par rapport au sol non traité.	93

Résumé

Certains sols argileux de région d'el Kouif willaya de Tébessa sont connus par leur caractères de gonflement. Le phénomène de gonflement devient la cause d'énorme dommages qui touche des différents types d'ouvrage, en particulier les constructions légères, les chaussée et canalisation.

Contenu des importantes conséquences financière liées au gonflement, il est essentiel de mettre en place un procède de stabilisation a la fois efficace et économique.

L'utilisation de poudre de caoutchouc pour traiter les sols gonflants, souvent issue de pneu recyclés, présente une solution efficace et économique qui a été explorée dans certaine recherche. La variation des déchets de pneus usagés, réduction potentielle du recours à des stabilisants couteux et l'amélioration des propriétés a long terme des sols gonflants ce sont des avantages à tenir en compte dans le traitement des sols gonflants.

Les résultats de cette étude montrent que l'incorporation de poudre de caoutchouc dans le sol étudié a entrainé une réduction remarquable du taux et la pression de gonflement.

Les mots clés : sol gonflant – taux de gonflement – pression de gonflement – poudre de caoutchouc- oedomètre

Abstract

Some clay soils in the El Kouif region of Tébessa are known for their swelling characteristics. This swelling phenomenon causes enormous damage to various types of structures, particularly lightweight construction, roadways, and pipelines.

Given the significant financial consequences associated with swelling, it is essential to implement a stabilization process that is both effective and economical.

The use of rubber powder to treat swelling soils, often derived from recycled tires, presents an effective and economical solution that has been explored in some research. The reduction of used tire waste, the potential reduction in the use of expensive stabilizers, and the improvement of the long-term properties of swelling soils are advantages to consider in the treatment of swelling soils.

The results of this study show that the incorporation of dense rubber powder into natural soil resulted in a remarkable reduction in the swelling rate and pressure.

Keywords: expansive soil – swelling rate – swelling pressure – rubber powder – odometer

ملخص

تتميز بعض التربة الطينية في منطقة الكويف بولاية تبسة بخصائصها الانتفاخية. تتسبب ظاهرة التورم هذه في أضرار جسيمة لمختلف أنواع الهياكل، وخاصة الإنشاءات الخفيفة والطرق وخطوط الأنابيب.

ونظراً للعواقب المالية الكبيرة المترتبة على التضخم، فمن الضروري تنفيذ عملية استقرار فعالة واقتصادية.

إن استخدام مسحوق المطاط لمعالجة التربة المتوسعة، غالبًا من الإطارات المعاد تدويرها، يمثل حلاً فعالاً واقتصاديًا تم استكشافه في بعض الأبحاث. إن تنويع نفايات الإطارات المستعملة، وإمكانية تقليل الحاجة إلى مثبتات باهظة الثمن وتحسين خصائص التربة المتوسعة على المدى الطويل هي مزايا يجب أخذها في الاعتبار عند معالجة التربة المتوسعة.

وتظهر نتائج هذه الدراسة أن دمج مسحوق المطاط الكثيف في التربة الطبيعية أدى إلى انخفاض ملحوظ في معدل التورم والضغط.

الكلمات المفتاحية: التربة المتمددة – معدل الانتفاخ – ضغط الانتفاخ – مسحوق المطاط – عداد المسافات

Table des matières

Remercîment

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Table des matières

Introduction ……..……01

Chapitre I : Généralités sur les sols gonflants

1.1 Introduction ……...…….……04

1.2 Définition des argiles…….,,,…04

1.3. Structure minéralogique des argiles……04

1.3.1. Le feuillet ……...…….……05

1.3.2. La particule ……...…..……07

1.2.3. L'agrégat ……..…...……07

1.4. Les minéraux argileux……09

la Kaolinite ……...……10

a) les Illites …….,,,,.……11

b) les Smectites ……..……11

c) Les Chlorites …….……11

1.5. Les problèmes les plus souvent des sols argileux……13

1.5.1. Phénomène de tassement…….……13

1.5.2. Phénomène de glissement……14

1.5.3. Phénomène de gonflement……...……14

1.6. Comportement des sols argileux gonflants (phénomène de retrait- gonflement) ……15

1.7. Mécanismes de gonflement des argiles……...……15

1.7.1. Gonflements au sens physico-chimique……...……16

1.7.2. Gonflement au sens mécanique……16

1.8. Définition des paramètres du gonflement……...……16

1.9. Les méthodes directes de calcul des paramètres de gonflement…….……17

1.9.1. Méthode à gonflement libre…….……17

1.9.2. Méthode sous charge constante……17

1.9.3. Méthode à volume constant…….……18

1.10. Méthodes indirectes de caractérisation des sols gonflants : ……18

1.10.1. Par la mesure des limites d'Atterberg……18

1.11. Conséquences de gonflement……23

a- Gros-œuvres : ……...…… 24

b- Second-œuvres : ……24

c- Aménagement extérieur : ……...……25

1.12. Protection des ouvrages sur sols gonflants……...…….27

1.13. Conclusion …….……..27

Chapitre II: Techniques d'améliorations des sols gonflants

2.1 Introduction……..……29

2.2. Les méthodes d'améliorations des sols……...……30

2.2.1. Traitements mécaniques…….…..……30

2.2.1.1. Le compactage…….…..……30

2.3. Accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux……..……32

2.3.1.Principe Installation des drains…….……33

2.3.2 Traitement hydraulique…….……33

2.3.2.1 Drainage, rabattement de nappe…….……33

2.3.3 Traitements thermique…….…..……33

2.3.3.1 Congélation……...……33

2.3.3.2 Déshydratation…….……..……34

2.3.4 Traitements chimique……...……34

2.3.4.1 La chaux……34

2.3.4.2 Clinker……..……35

2.3.4.3 Ciment……...……35

2.3.4.5 Pouzzolane……36

2.4.1. Stabilisations par les fibres de plastique : ……...……37

2.4.2. Stabilisation par les poudres de caoutchouc……38

2.4.3. Utilisation Les déchets des pneus……39

2.7. Conclusion…….…….……42

Chapitre III : materieaux, materiel et programme des essais

3.1. Introduction ……..……44

3.2. Matériaux utilisés……..…….……44

3.2.1. Le sol……...……44

3.2.1.1. Situation géographiques de la zone d'étude……..……44

3.2.1.2.Situation climatique……..…..……45

3.2.1.3. Etude des paramètres climatiques……..…...……46

A. La température……...……46

B. La précipitation……..……47

3.2.2. La Poudrette de caoutchouc……...……..……48

3.2.3.Les caractéristiques des granulats de caoutchouc……...……..……49

3.3. Essais d'identification ……...……50

3.3.1. Les essais préliminaires (identification du sol) ……51

3.3.2. Essai analyse granulométrique par sédimentation……...……..…53

3.3.3.2.1. Essai poids spécifique……..……..……55

3.3.2.2. Essai limites d'Atterberg (indice de plasticité +indice de liquidité) ……..……57

3.3.2.3. Essai VBS……....……60

3.3.2.4. Essai Proctor……....……62

3.3.3. Caractérisation des paramètres de gonflement……..…...……71

3.3.4. Conclusion……..…….……75

Chapitre IV : Résultats œdométrique et interprétation

4.1 Introduction……, „.…..……77

4.2 Mesure du taux de gonflement libre Ɛg……...……77

4.2.1 Sol vierge non traité…….……..…78

4.2.3 L'effet de la teneur en eau…….……86

4.2.4 L'effet de l'Energie de compactage ……...……..87

4.2.5 Mesure de la pression de gonflement……...…….88

4.2.6 Méthode de gonflement sous charges constantes……..……90

4.2.7 Effet du pourcentage de poudre en caoutchouc sur la pression de gonflement……..…90

4.2.8 Méthode de gonflement sous charge variable……...……91

4.2.9 Effet du pourcentage de poudre en caoutchouc sur la pression de gonflement……..……93

4.3. Interprétation des résultats……..……94

Conclusion ……..……..……96

Bibliographie

Introduction générale

Introduction

Depuis longtemps, on constate que certains sols argileux présentant des phénomènes de retrait et de gonflement dans les régions au climat aride et semi-aride.

Dans les pays à climat sec, l'attention se porte sur le gonflement, tandis que dans les régions à climat humide, c'est le retrait qui pose problème.

Le gonflement résulte de la présence d'eau au sein des particules argileuses et engendre fréquemment des dégâts considérables sur les ouvrages.

La région de El Kouif – Tébessa repose majoritairement sur des sols a caractère gonflant ce type de sol est à l'origine de pathologie géotechniques significatives, telles que la fissuration des structures bâties, la déformation des chassées et le tassement différentiel des fondations.

L'amélioration des sols gonflants constitue une étape cruciale pour garantir la stabilité des constructions érigées sur des terrains sensible A l'humidité pour limiter les risques dus au gonflement des sols, plusieurs techniques sont mises en œuvre comme le traitement chimique et les méthodes dynamiques ainsi d'autres techniques. Le choix de la solution dépend de la nature des sols, des conditions du site et des exigences du projet.

L'utilisation de caoutchouc, en particulier sous forme de particules, constitue une solution innovante et double pour améliorer les sols gonflants l'ajout de poudre de caoutchouc permet de réduire le potentiel de gonflement et de diminuer la plasticité de sol. En plus de ses avantages techniques. Une démarche à la fois écologique et économique

Cette et menée par les chapitres suivants

- Chapitre 1 : Généralités sur les sols gonflants
- Chapitre 2 : Techniques d’améliorations des sols gonflants
- Chapitre 3 : matériaux, matériel et programme des essais
- Chapitre 4 : Résultats œdométrique et interprétation

Ce travail vise. Dans un premier temps a caractérises en laboratoire les propriétés de gonflement d'échantillons reconstitué de l'argile d’el kouif Tébessa connue pour son fort potentiel de gonflement et dans un second temps. A analyser l’effet de l'ajout de poudre de caoutchouc en tant que matériaux de traitement sur l'atténuation de ces phénomènes de gonflement

Chapitre I

Généralités sur les sols gonflants

1 Chapitre I : Généralités sur les sols gonflants

1.1 Introduction

Les études géotechniques sont réalisées pour éviter les risques d'aléas naturels pouvant affecter le projet, parfois avant le démarrage du projet, et parfois pendant la phase de réalisation.

Les causes de détérioration géotechnique sont nombreuses, notamment le retrait et l'expansion des sols argileux.

Les variations de volume des sols argileux dues au retrait dû aux températures estivales élevées ou au gonflement dû aux inondations hivernales peuvent menacer les fondations, les installations techniques et les routes.

Dans ce chapitre, nous discuterons de la définition et de la classification des argiles et découvrirons les changements physiques et mécaniques qui se produisent dans les particules d'argile et comment protéger et éviter ces changements.

1.2 Définition des argiles

En termes géologiques, le mot « argile » a deux définitions. La première définition stipule que l'argile est constituée de particules de taille inférieure à 2 microns, quelle que soit leur nature minérale. Deuxièmement, il s'agit d'un minéral (plus précisément d'une classe de minéraux) de la famille des silicates, plus précisément des phyllosilicates (silicates en feuillets).

Il est généralement issu de l'altération par l'eau des autres silicates. C'est pour cette raison qu'on les trouve systématiquement dans les sols et les formations superficielles. On les trouve aussi très fréquemment dans les roches sédimentaires. Mélangée à un autre minéral comme la calcite, elle formera la marne. Si l'argile est seule présente on désignera la roche sous le nom d'argilite. Souvent les deux définitions se rejoignent. [2]

1.3. Structure minéralogique des argiles

Les minéraux argileux sont des silicates hydratés (généralement des aluminosilicates, mais parfois des silicates de magnésium) dont la structure feuilletée permet de les classer dans la famille des phyllosilicates. Ils sont produits par la dégradation lente de minéraux préexistants. Les conditions dans lesquelles se produit cette dégradation et l'état de sa progression expliquent

la grande diversité des argiles [9]. Leur phase solide s'organise selon une organisation spatiale spécifique : paillettes, granules et agrégats.

1.3.1. Le feuillet

Le feuillet est défini comme une superposition de plans ioniques organisés suivant deux types de couches (fig. I.1) : les couches tétraédriques (fig. I.1a), de formule générale SiO_4 et dont l'épaisseur est de 3 A° : l'oxygène occupe les sommets du tétraèdre et le centre est occupé par un atome de silicium et les couches octaédriques (fig. I.1b), de formule générale $Al_2(OH)_6$ ou $Mg3(OH)_6$ et dont l'épaisseur est de 4 A° : les octaèdres ont leurs sommets occupés par des hydroxyles OH dont le centre est occupé par un atome d'aluminium ou un atome de magnésium. Il représente l'élément de base constitutif d'une argile et joue par conséquent un rôle très important dans la connaissance des caractéristiques de celle-ci et de son comportement hydromécanique.

Les feuilles formées par la combinaison de feuilles tétraédriques et octaédriques sont appelées type 1:1 ou type Te-Oc (par exemple feuille de kaolinite, Fig. I.2a), et l'épaisseur de la feuille est d'environ 7,2 A°. Bien que les paillettes formées par l'insertion d'une couche octaédrique entre deux couches tétraédriques soient de type 2:1 ou Te-Oc-Te (par exemple les paillettes de montmorillonite, Fig. I.2b), dans ce cas l'épaisseur des paillettes est d'environ 9,6 A°

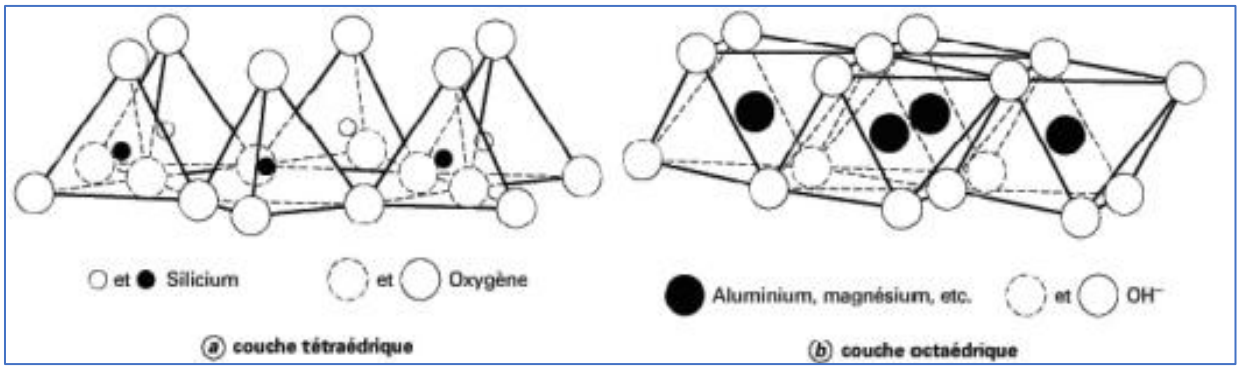


Figure 1.1 - Couches tétraédrique et octaédriques typiques des argiles [20]

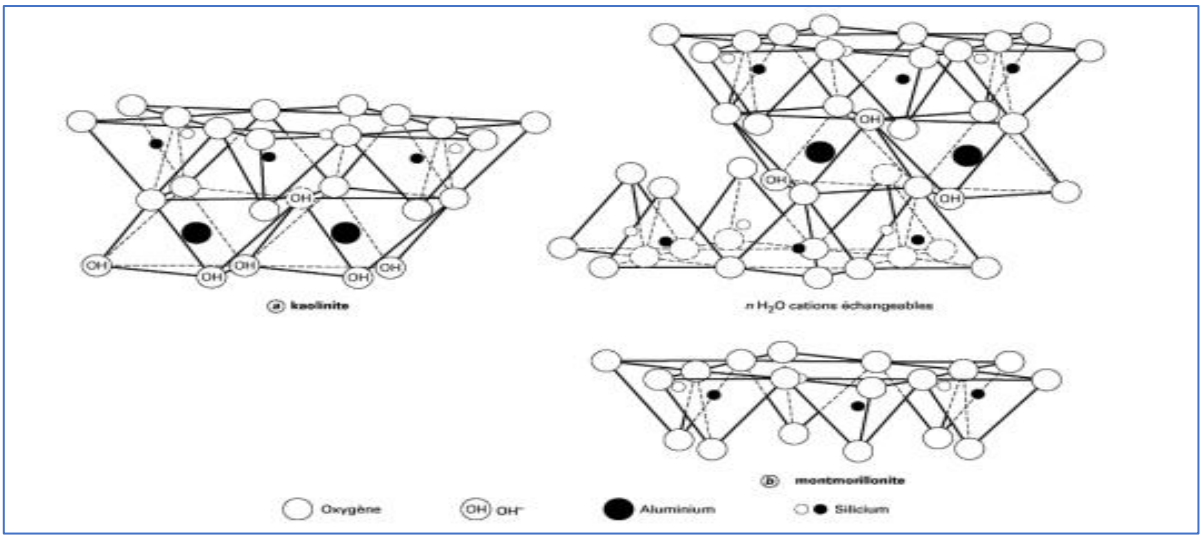


Figure 1.2 - Structure des feuillets de kaolinite et de montmorillonite [21]

1.3.2. La particule

La particule, également appelée cristallite ou tactoïde, est constituée d'un empilement de feuillets d'argile superposés selon différentes configurations, pouvant atteindre une taille maximale de 2 µm. La disposition des feuillets ainsi que leur nombre au sein d'une même particule varient selon le type d'argile et dépendent aussi de son niveau d'hydratation [1][21]. L'espace entre deux feuillets, appelé espace interfoliaire, peut mesurer plusieurs nanomètres. Lorsqu'on étudie les particules argileuses, deux types de porosité peuvent être observés :

- La porosité interlamellaire (également appelée interfoliaire ou intra-particulaire), située entre deux surfaces internes d'une même particule ;
- La porosité interparticulaire (ou lenticulaire), située entre les surfaces externes de deux particules distinctes.

Les feuillets d'argile ne sont pas toujours électriquement neutres. En effet, des substitutions isomorphes peuvent survenir au sein de leur structure : le silicium (Si^{4+}) dans les couches tétraédriques peut être remplacé par de l'aluminium (Al^{3+}) ou du fer (Fe^{3+}), tandis que l'aluminium (Al^{3+}) des couches octaédriques peut être substitué par du magnésium (Mg^{2+}) ou du fer (Fe^{2+}). Ces substitutions, dites isomorphes, ne modifient ni la forme générale du minéral ni les dimensions des feuillets, qui restent globalement constantes.

Une autre origine du déséquilibre électrique provient de la neutralisation partielle des charges situées en bordure des couches, ainsi que des charges de surface générées lors d'une rupture cristalline. Ce déséquilibre interne se manifeste au niveau des feuillets et de la particule entière, conférant aux argiles une charge de surface négative. Cette électronégativité est une propriété fondamentale des matériaux argileux.

Pour compenser ce déficit de charge, des cations présents dans l'environnement viennent se fixer près des feuillets, notamment dans l'espace interfoliaire. Ces cations, qui ne font pas partie intégrante de la structure cristalline, peuvent être échangés avec d'autres cations en solution. Ils influencent fortement les propriétés des argiles [21]. La quantité de charge négative excédentaire est quantifiée à l'aide de la capacité d'échange cationique (CEC), un paramètre clé pour la classification des argiles et un critère distinctif par rapport aux milieux granulaires.

1.2.3. L'agrégat

L'agrégat, ou grain, est en réalité une combinaison aléatoire de particules d'argile, se présentant sous une grande diversité de formes et de dimensions. Lorsqu'on examine de près sa composition, trois niveaux structurels principaux peuvent être distingués :

- **L'infrastructure**, correspondant à la particule d'argile individuelle ;
- **La microstructure**, résultant de l'assemblage de ces particules avec d'autres constituants du sol ;
- **La macrostructure**, représentant l'organisation visible à l'échelle des agrégats.

La figure I.3 illustre clairement cette hiérarchie structurelle. Comprendre le comportement spécifique des argiles gonflantes nécessite une connaissance approfondie de ces différents niveaux, en particulier de la microstructure. Toutefois, établir des relations précises entre ces niveaux reste une tâche complexe.

Pour alléger cette complexité, certains chercheurs, comme mentionné dans [6], ont proposé une simplification en ramenant les trois niveaux à deux :

- **Le niveau microstructural**, regroupant à la fois l'infrastructure et la microstructure ;
- **Le niveau macrostructural**, inchangé.

Cette approche simplifiée est communément désignée sous le terme de **"structure double"**.

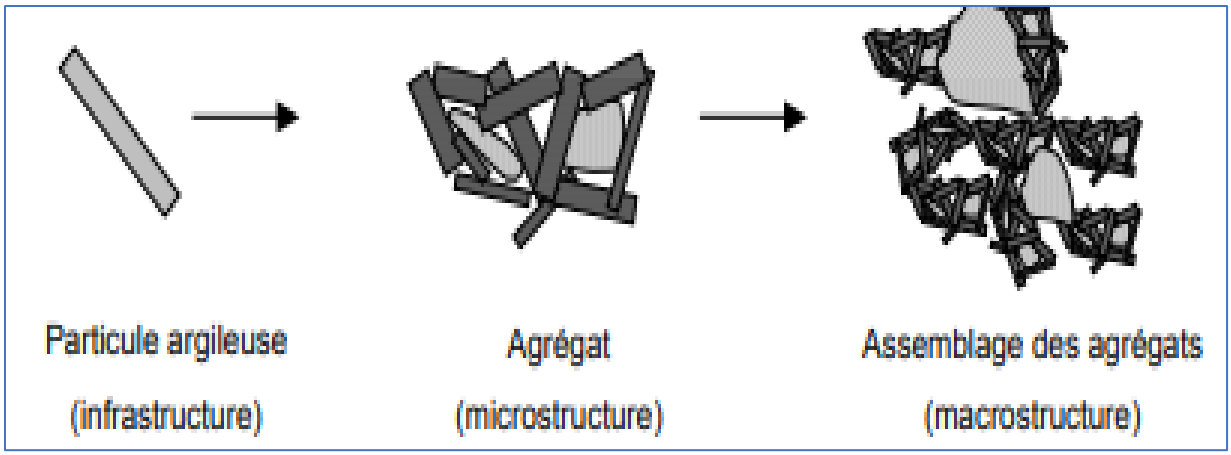


Figure I.3 - Différents niveaux structuraux des sols gonflants [11]

1.4. Les minéraux argileux

Les argiles sont des phyllosilicates d'aluminium dont les feuillets sont formés par l'alternance de couches d'octaèdres $Al(OH)_6$ et de couches de tétraèdres SiO_4, liées entre elles par des atomes d'oxygène et des groupes hydroxyles partagés. Ces feuillets sont séparés par une distance interréticulaire ddd, qui correspond à l'espacement entre deux feuillets successifs. Des substitutions atomiques se produisent fréquemment au sein des feuillets, ce qui peut entraîner une certaine désorganisation de la structure cristalline et donc une cristallinité réduite.

En outre, ces substitutions créent des déséquilibres de charge, compensés par l'adsorption de cations dans l'espace interfoliaire — un phénomène à l'origine de la **capacité d'échange cationique** des argiles.

En fonction de la structure des feuillets, on distingue principalement deux grands types d'argiles :

- Les **argiles 1:1**, constituées d'une couche tétraédrique associée à une couche octaédrique ;
- Les **argiles 2:1**, formées de deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique.

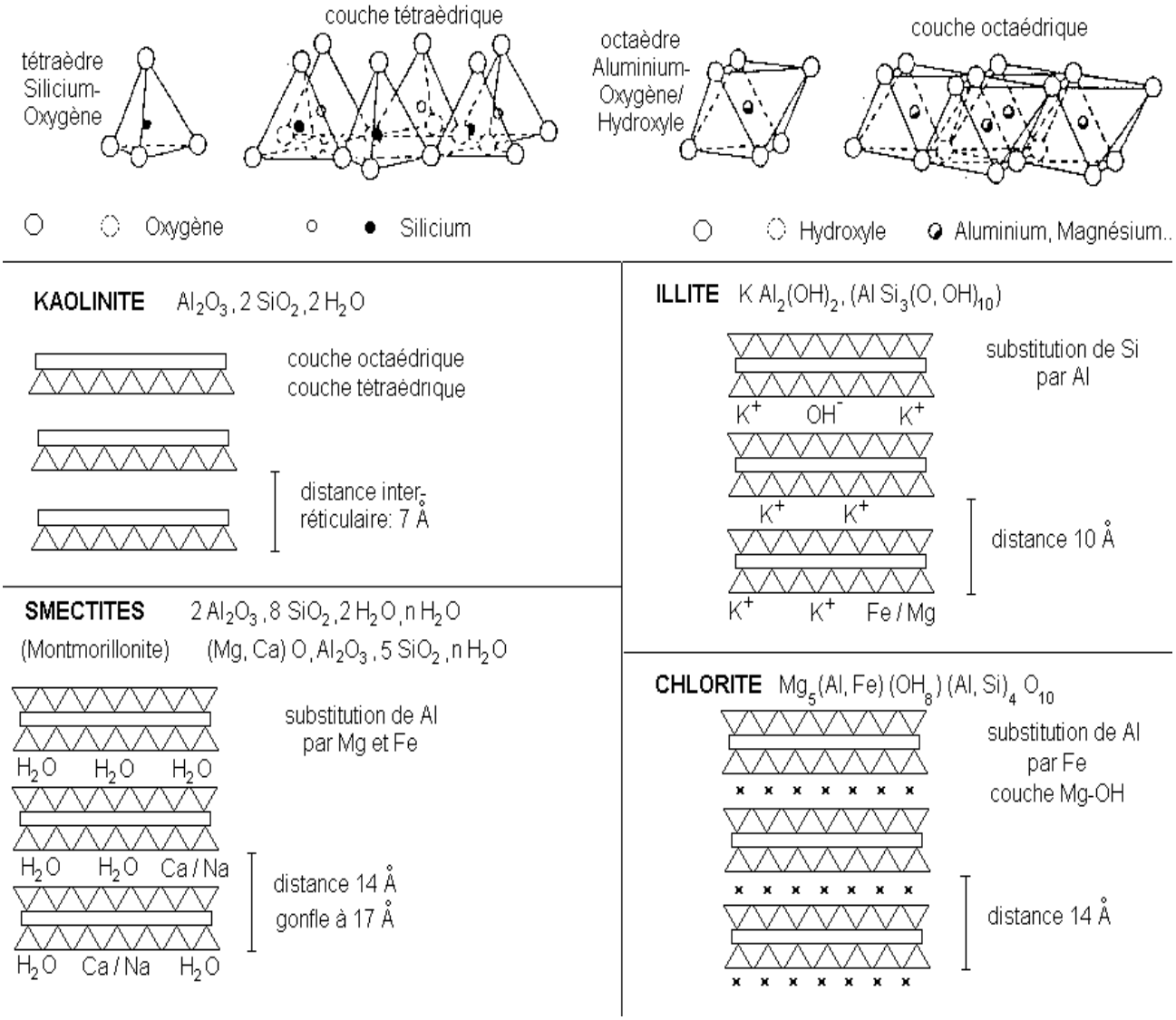


Figure 1.4 : structure des minéraux argileux.

a) la Kaolinite

Pas de substitution dans les couches. Le feuillet est neutre. La kaolinite se forme dans les sols bien drainés, par pH acide, surtout en climat subtropical et tropical. Ses cristaux sont souvent grand (jusqu'à 15 µm).

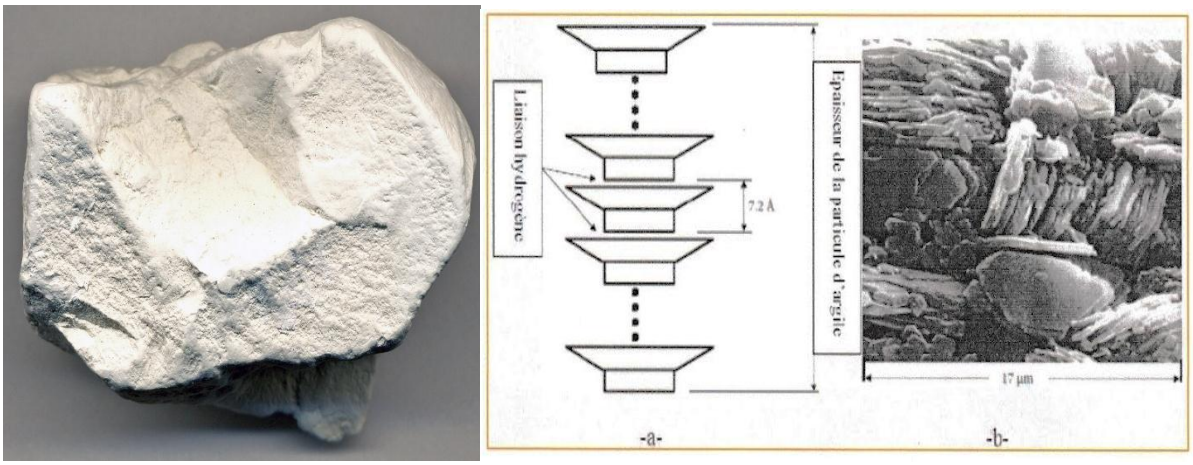


Figure 1.5: a: Structure de la Kaolinite

b : photomicrographie électronique de l'argile Kaolinite [33]

b) les Illites

Association d'une CO (alumineuse) et deux CT (siliceuses). Mais il peut y avoir des substitutions (remplacement de Si par Al). Des cations (K+) sont adsorbés dans l'espace interfoliaire afin de compenser le déséquilibre des charges. C'est le minéral ubiquiste par excellence. Sa structure est proche de la muscovite (plus d'eau, moins de K+).

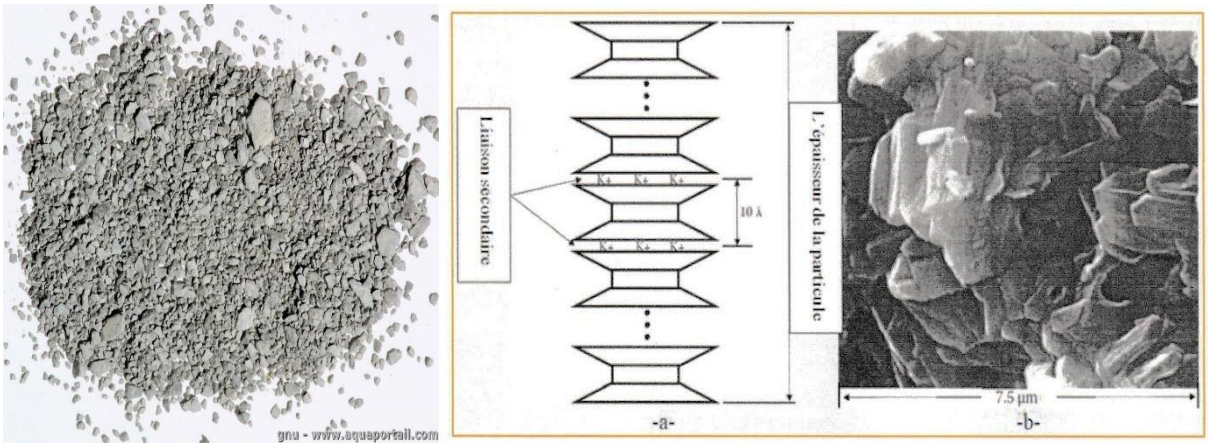


Figure 1.6: a: Structure de la illite

b : photomicrographie électronique de l'argile illite [33]

c) les Smectites

L'empilement des feuillets dans certaines argiles est désordonné : chaque feuillet est légèrement tourné dans son propre plan par rapport au précédent. De nombreuses substitutions atomiques ont lieu au sein des feuillets. Ce désordre structural, combiné à une faible charge de surface, favorise l'élargissement de l'espace interfoliaire et permet l'adsorption de diverses molécules telles que l'eau, les cations ou encore des composés organiques. Cet espace peut atteindre une distance interfoliaire de 18 Å.

Les smectites, ou montmorillonites, appartiennent à cette catégorie. Elles sont généralement de type calcique, plus rarement sodique, et se forment principalement dans des sols mal drainés et plutôt alcalins. Les feuillets de smectites peuvent s'intercaler de manière régulière ou irrégulière avec d'autres types de feuillets argileux, souvent d'origine illitique. Ce mélange forme des structures appelées interstratifiés.

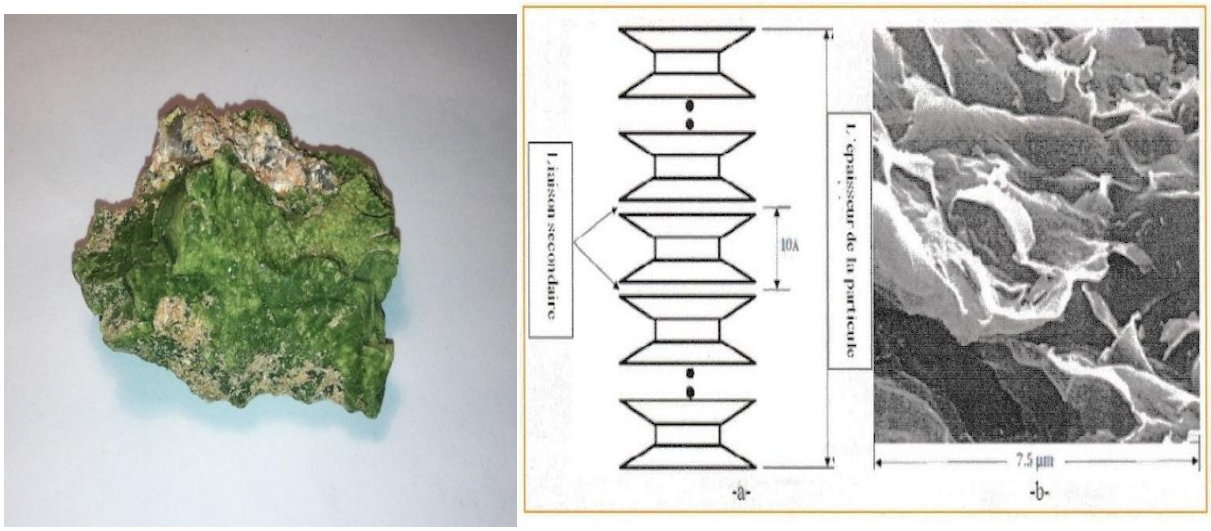


Figure 1.7: a: Structure de la Montmorillonite

b : photomicrographie électronique de l'argile Montmorillonite [33]

d) Les Chlorites

L'espace inter foliaire est garni par une couche composée de Mg et OH. L'Al est remplacé localement par le Fe. Les chlorites existent en plus grands cristaux dans les roches magmatiques ; elles sont également formées pendant la diagénèse des roches sédimentaires. On les retrouve en éléments détritiques dans les sols sous climat peu agressif.

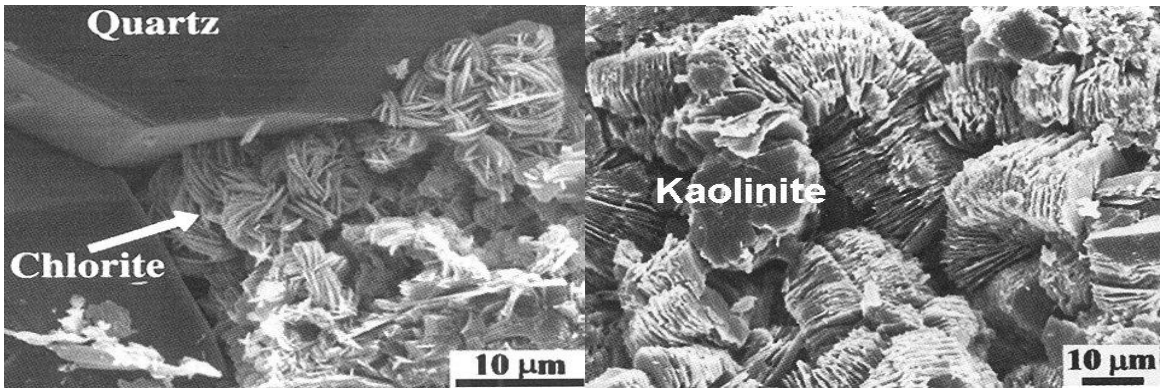


Figure 1.8: cristaux de chlorite et de kaolinite vus au microscope électronique à balayage.

Le tableau I.1 résume les différentes caractéristiques de chaque argile citée ci-dessus.

Dans l'univers complexe des argiles, l'**illite** et la **smectite** présentent une étonnante similitude : leur structure en feuillets est pratiquement identique. Pourtant, leurs **capacités d'échange cationique (CEC)** diffèrent nettement. D'où provient cette divergence ? Elle s'explique principalement par leurs **modes de formation** et la **nature des cations** présents dans leur structure. Dans l'illite, les cations intégrés au réseau cristallin ne sont pas les mêmes que ceux présents dans la smectite. Ce contraste engendre un déséquilibre de charge différent, à l'origine de la variation marquée de leur CEC. Il est remarquable de constater qu'une différence aussi subtile dans la composition peut conduire à des propriétés aussi distinctes.

Tableau 1.1 - Caractéristiques microscopiques des principales argiles

Argile	Kaolinite	Illite	Smectites
Type de feuillet	1 :1	2 :1	2 :1
Epaisseur de feuillet A°	7	10	9.6
Nombre de feuillet par particule	10-150	5-20	1-10 (montmorillonite sodique) 10-40 (montmorillonite calcique)
CEC (méq/100 g)	5-15	10-40	80-150
Surface spécifique (m²/g)	10-45	80-100	700-900
Matériau inter foliaire	-	K+	H2O, Na+, Ca 2+ …
Comportement dans l'eau	Non-gonflant	Peu-gonflant	Gonflant

Les **kaolinites** possèdent une **surface spécifique réduite** et une **faible capacité d'échange cationique**, en raison de leur structure compacte : les couches minérales y sont fortement liées entre elles, ce qui rend l'accès à l'espace interlamellaire pratiquement impossible. À l'opposé, les **smectites** présentent une grande facilité de séparation entre leurs couches chargées, ce qui leur confère une **surface spécifique élevée** et une **importante capacité d'échange cationique**.

Les **illites** représentent une situation intermédiaire : seules leurs **surfaces latérales et basales externes** portent des charges accessibles, les couches internes étant **solidement liées par des cations potassium**, ce qui limite leur expansion. Il est également observé que la **présence d'impuretés** peut réduire significativement la surface spécifique des argiles [21].

Dans les **sols naturels**, les argiles les plus courantes sont les **illites**, **kaolinites**, **argiles interstratifiées** et **smectites de type montmorillonite**. En revanche, les **argiles utilisées à des fins industrielles** proviennent majoritairement de **gisements riches en montmorillonite**. Lorsqu'une argile contient plus de **65 % de montmorillonite**, elle est désignée sous le nom de **bentonite**, reconnue pour sa **très forte capacité de gonflement**.

1.5. Les problèmes les plus souvent des sols argileux

Les sols argileux, ces capricieux compagnons de notre terre, se métamorphosent au gré des caprices de l'eau qui les entoure. Lorsqu'une sécheresse s'installe, le sol se resserre, se contracte, provoquant un tassement irrégulier à sa surface – c'est ce qu'on appelle le retrait. En revanche, à la moindre goutte qui se déverse sur ces terres, elles réagissent avec une bouffée d'enthousiasme : un phénomène de gonflement se produit, comme si le sol prenait une grande inspiration bienfaisante. Et parlons de ce fléau que l'on appelle le glissement. Ce phénomène redoutable affecte particulièrement les sols fins ; il s'agit d'un déplacement, souvent lent, qui se faufile le long d'une pente. On peut le reconnaître grâce à une surface de rupture évidente, un cisaillement qui révèle le ballet discret mais constant d'une masse de terrain cohérente, dont le volume et l'épaisseur peuvent varier au fil du temps. La nature nous rappelle sans cesse ses mystères et ses défis.

1.5.1. Phénomène de tassement

Il s'agit de la diminution de volume de certains sols très compressibles sous l'effet de charges appliquées et de l'abaissement du niveau des nappes aquifères par surexploitation Figure I.10



Figure 1.10: Phénomène de tassement

1.5.2. Phénomène de glissement

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu d'un versant instable de montagne ou de colline.

Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites. La masse de matériaux meubles ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes diverses Figure I .11

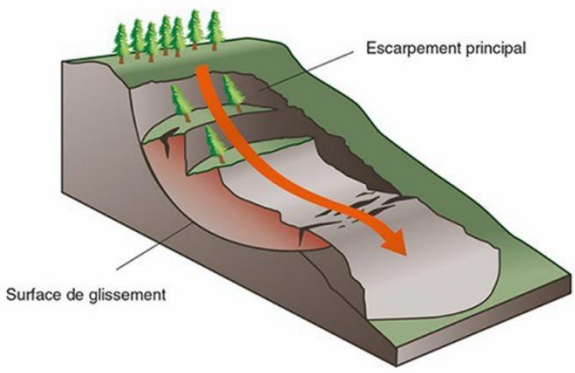


Figure 1.11: Phénomène de glissement

1.5.3. Phénomène de gonflement

Ce phénomène est directement lié aux variations d'humidité affectant certains sols très argileux, comme ceux riches en montmorillonite ou en matière organique (tourbe). Ces sols ont la capacité d'absorber l'eau disponible en période humide, mais aussi de se rétracter lorsqu'ils se dessèchent. Le retrait-gonflement désigne ainsi un mouvement de tassement différentiel propre

aux terrains argileux, dont le volume varie en fonction de leur teneur en eau. Cette variation est généralement induite par l'alternance entre les périodes de sécheresse, qui provoquent une déshydratation en surface, et les périodes pluvieuses, qui entraînent une réhydratation du sol.

1.6. Comportement des sols argileux gonflants (phénomène de retrait-gonflement)

Le gonflement des sols (augmentation de volume) doit être associé à leur retrait (diminution de volume), si l'on veut comprendre l'évolution du terrain lors des cycles d'humidification et de séchage. Ces variations de volume, provoquées par l'interaction des molécules d'eau avec les particules d'argile, dépendent de l'état initial du sol entre les états éextrêmes que sont l'état sec caractérisé par la limite de retrait et l'état d'humidité maximale (limite d'absorption du sol).

La figure 1.9 montre trois états d'un même sol, état sec, état initial et état gonflé. La diminution de la teneur en eau provoque une diminution de volume, un durcissement (évolution de la consistance vers l'état solide sans retrait) et une fissuration (visible sur la photo). [18]

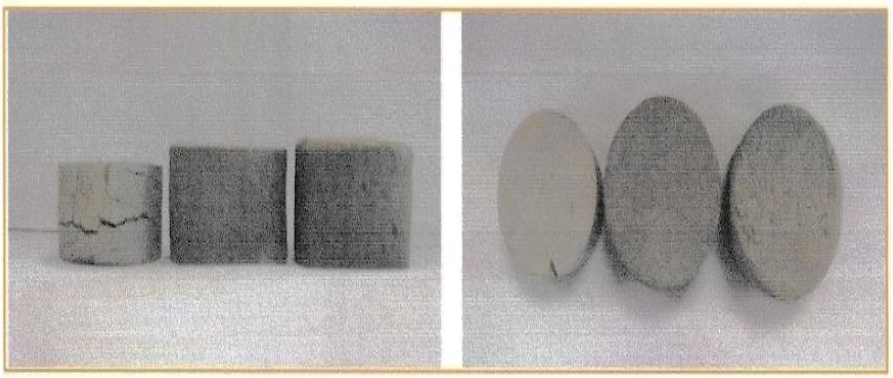


Figure 1.9: Trois états d'un même sol (sec, saturé).

1.7. Mécanismes de gonflement des argiles

Le gonflement des sols argileux fait intervenir plusieurs mécanismes physicochimiques ainsi que mécaniques.

1.7.1. Gonflements au sens physico-chimique

Le gonflement se produit en présence d'humidité et l'hydratation se fait par l'hydratation des espaces interfoliaire (attraction des particules d'eau) ou par la répulsion des particules argileuses appelées aussi le gonflement osmotique.

1.7.2. Gonflement au sens mécanique

Le gonflement, tout comme le tassement, peut résulter d'une modification de l'état de contraintes dans un sol en présence d'eau. Il est donc essentiel de rappeler les principes fondamentaux de la mécanique des sols concernant cet état de contraintes.

Un sol est un système triphasique composé de :

- une phase solide (les particules minérales),
- une phase liquide (principalement l'eau interstitielle),
- et une phase gazeuse (bulles ou films d'air).

On considère un sol comme **saturé** lorsque la phase gazeuse disparaît, c'est-à-dire que tous les pores sont remplis d'eau interstitielle. Dans ce cas, lorsqu'une contrainte totale (qu'elle soit géostatique ou due à une surcharge externe) s'applique, elle se décompose selon la théorie de Terzaghi :
σ=σ′+u= + uσ=σ′+u

où σ\sigmaσ est la contrainte totale, σ′\sigma'σ′ la contrainte effective (celle réellement supportée par le squelette solide), et uuu la pression interstitielle, c'est-à-dire la pression exercée par l'eau dans les pores.

Si le sol est **sec**, la pression interstitielle uuu est nulle, et la contrainte effective est égale à la contrainte totale (σ′=σ\ σ′=σ).

Enfin, pour un sol situé sous la nappe phréatique à une profondeur zzz, la pression interstitielle correspond à la pression hydrostatique exercée par la colonne d'eau sus-jacente, soit :
u=γw·zu = _w \cdot zu=γw·z

avec γw\wγw la densité de l'eau [02].

1.8. Définition des paramètres du gonflement

Les paramètres de ce phénomène sont nombreux et complexes dans les études géotechniques en fonction des conditions d'exposition du sol nous en distinguons trois dans ce travail:

- La pression de gonflement (бg) d'un élément de sol ou de roche, dont l'état physique initial est connu, peut être définie comme l'état de contrainte à exercer pour maintenir son volume constant pendant l'imbibition sans distorsion jusqu'à sa saturation complète.
- Le potentiel de gonflement ($\varepsilon g = \frac{\Delta h}{h}$)d'un élément de sol ou de roche, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximal ($\frac{\Delta h}{h}$) que provoque l'imbibition de cet élément soumis à un état de contrainte nulle ou quasi-nulle jusqu'à sa saturation complète.
- L'essai de compressibilité l'indice de gonflement (Cg) traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donné.

1.9. Les méthodes directes de calcul des paramètres de gonflement

1.9.1. Méthode à gonflement libre

- le taux de gonflement Δh represente la variation entre la hauteur final et la hauteur initial de l'eprouvette

- le potentiel de gonflement $\frac{\Delta h}{h}$ represente le pourcentage de gonflement

Une éprouvette est insérée dans une cellule œdométrique classique, puis soumise à la charge du piston et enfin saturée. Ses déformations verticales sont mesurées, la déformation maximale rapportée à la hauteur initiale est le potentiel de gonflement. L'éprouvette est ensuite chargée de manière progressive. La pression verticale nécessaire pour ramener l'éprouvette à sa hauteur initiale est la pression de gonflement.

1.9.2. Méthode sous charge constante

Au moins quatre éprouvettes sont soumises à quatre pressions verticales différentes dans des cellules œdométriques. Après application de ces charges, les éprouvettes sont saturées, puis le potentiel de gonflement final est mesuré pour chaque cas. On trace ensuite la courbe représentant Δh/h\ h / hΔh/h en fonction de la pression appliquée durant l'humidification. Une interpolation linéaire entre ces quatre points permet d'estimer la pression pour laquelle le gonflement est nul, appelée pression de gonflement. Dans cette méthode, le potentiel de gonflement correspond à la variation de hauteur sous une pression donnée.

Deux variantes de cette procédure existent, qui diffèrent par la manière d'appliquer la charge verticale :

- La méthode ASTM (procédure B) applique la charge avant la saturation, cette dernière intervenant cinq minutes après.
- La procédure AFNOR exige la stabilisation des déformations mécaniques dues au chargement avant de commencer la saturation [19].

1.9.3. Méthode à volume constant

Le principe est de saturer une éprouvette tout en maintenant son volume constant. La pression nécessaire pour maintenir le volume constant à la saturation complète est la pression de gonflement. Suivant la norme ASTM (méthode C), l'éprouvette est soumise avant humidification à une pression verticale voisine des conditions in situ, et ensuite saturée. Les déformations verticales sont empêchées en augmentant progressivement la charge appliquée avant l'effondrement. La pression de gonflement est alors la pression maximale appliquée. Il existe des cellules spécialement conçues pour effectuer des essais à volume constant. Elles sont équipées d'un capteur de pression permettant de déterminer l'évolution de la pression exercée par le sol au cours de l'humidification. **[20]**

1.10. Méthodes indirectes de caractérisation des sols gonflants :

Les scientifiques ont découvert plusieurs façons indirectes de déterminer l'étendue du gonflement du sol au moyen d'essais préliminaires (Limite d'Atterberg, Essai VBS et L'analyse granulométrique...etc.), en utilisant des formules expérimentales que nous mentionnerons comme suit:

1.10.1. Par la mesure des limites d'Atterberg

Pour illustrer l'importance du mécanisme d'interaction eau-minéral argileux et notamment la complexité de l'hydratation des actions échangeables dans l'eau interstitielle à l'échelle macroscopique, le comportement gonflant d'une argile est à rapprocher des limites d'Atterberg. En (1953) Casagrande a établi un diagramme de plasticité représentant l'évolution de l'indice de plasticité Ip en fonction de la limite de liquidité Wl. (Figure 1.12)

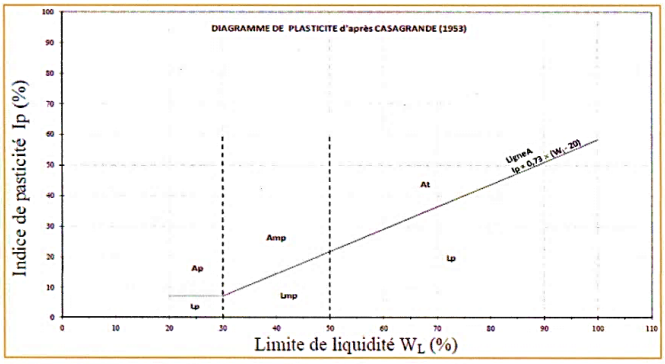


Figure 1.12: Diagramme de plasticité [24]

Vijayvergiya et Ghazzali (1973) ont modifié le diagramme de Casagrande prouve que(les argiles se situant au-dessus de la ligne A ne sont pas toutes gonflantes, seul celles ayant une limite de liquidité wL> 50%, sont dites « gonflantes » et classées At) :

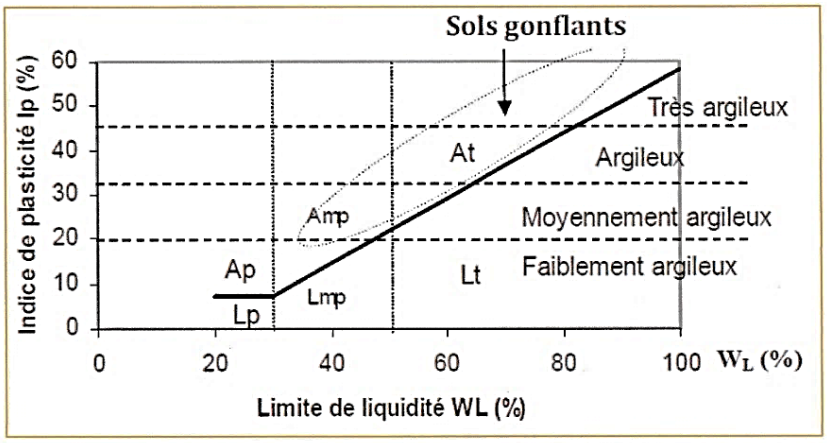


Figure 1.13: Diagramme de Casagrande remanié en 1973 [13]

En effet, deux sols présentant le même indice de plasticité IpI_pIp peuvent avoir des comportements très différents selon la proportion de la fraction argileuse et sa nature minéralogique. C'est pourquoi Magnan, J.P. (2013), cité par Mouroux et al. (1988), s'est

appuyé sur le diagramme de Casagrande pour établir une corrélation entre le comportement plastique et la composition minéralogique d'un sol argileux (Figure 1.8) [10].

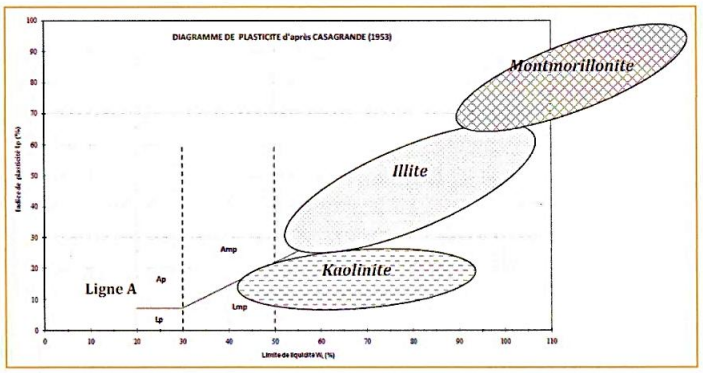


Figure I.14: positions des minéraux argileux dans le diagramme de Casagrande. [20]

L'estimation de caractère gonflant du sol à partir des seuils retenus par Holtz et Gibbs (1956) au tableau (1.2):

Tableau 1.2: Relation entre Ip et le potentiel de gonflement [30]

Ip (%)	Potentielle de gonflement
<18	Faible
22-32	Moyen
25-48	élevé
>35	Très élevés

Daksanamurty, V., Raman,V. (1973) suite à une série de tests réalisés sur des sols américains non remaniés. On obtient alors la classification suivante des sols gonflants (Tableau I.3). [07]

Tableau 1.3: Classification des sols gonflants basée sur l'Ip

Ip (%)	Potentielle de gonflement
0-15	Faible
10-35	Moyen
20-55	élevé
>35	Très élevés

Nelson D., et Miller D. J (1992), ont proposé une méthode d'estimation du taux de gonflement, qui se définit comme le pourcentage de gonflement libre d'un échantillon de sol argileux confiné latéralement en présence d'eau et compacté à l'optimum Proctor avec une surcharge de 7 kPa (norme américaine de l'essai de compactage AASHO).

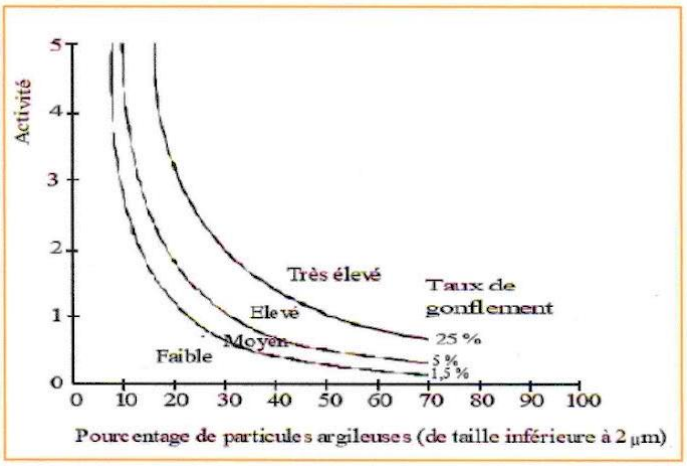


Figure 1.15: Diagramme de classification du potentiel de gonflement. [23]

Skempton, A,W (1984) explique quant à lui qu'il est possible de combiner les limites d'Atterberg et le pourcentage en particules fines argileuses avec un paramètre dit «< activité des argiles Ac ». Cet indice Ac défini la notion d'activité de Skempton $Ac = \frac{Ip}{c2}$ qui rapporte l'indice de plasticité du matériau à sa teneur en particules argileuses, notée C2 (en %) et qui correspond à la teneur en particules de dimensions inférieures à 2 µm interagissant avec l'eau. Skempton suggère une classification des argiles selon leur activité, comme le montre le tableau I.4[29]

Tableau 1.4: Classification des sols suivant leur activité Ac [23]

Activité Ac	Type sol
0,50 -0,75	Sol inactif
0,75 -1,25	Sol normal
1,25-2,00	Sol actif
>2	Sol très actif

Tableau 1.5: Activité des principales familles d'argiles [29]

Minéral argileux	Indice activité argiles Ac

Kaolinite	0,33 à 0,46
Illite	0,90
Montmorillonite Ca 2+	1,50
Montmorillonite Na 2+	7,20

1.9.2. Par l'estimation de la surface spécifique des argiles

Après que les chercheurs ont découvert la valeur de bleu de méthylène analogues et une relation entre cette valeur et la surface spécifique total << S.S.T » et la valeur de bleu de méthylène absorbée de la fraction argileuse VBS, mise en évidence par Gaillabaud et Cinot (1982) et cité par Bultel (2001):

S.S.T(m^2/g)=20.93×VBS

Avec 20,93 = surface correspondant théoriquement à 1 cm3 de bleu de méthylène

À partir de ces constatations, Lautrin (1989) s'intéresse aux travaux de Skempton sur l'activité des argiles afin de justifier et développer l'utilisation de la valeur de bleu dans la classification des sols.

$$Abc = \frac{100 \times VBS}{C2}$$

Avec C2 : teneur en éléments de dimensions <2 µm (%) et VBS (0/D) en g/100g de sol

Tableau1.6: Activité au bleu Acb des argiles [15]

Acb	Type d'argile	Classe
0 à 1	Sol non argileux	1
1 à 3	Argiles inactives	2
3 à 5	Argiles peu actives	3
5 à 8	Argiles normales	4
8 à 13	Argiles actives	5
13 à 18	Argiles très actives	6
> 18	Argiles nocives	7

Chassagneux et al. (1996) ont établi des seuils de sensibilité des sols argileux à partir de la valeur de bleu VBS (Tableau I.7):

Tableau 1.7: Sensibilité d'une argile au retrait-gonflement [06]

Valeur de bleu	VBS Sensibilité
<2,5	Faible
2,5-6	Moyen
6-8	Forte
> 8	Très forte

Les résultats de nombreuses études ont montré que l'amplitude du gonflement dépend de deux types de facteurs intrinsèques et extrinsèques.

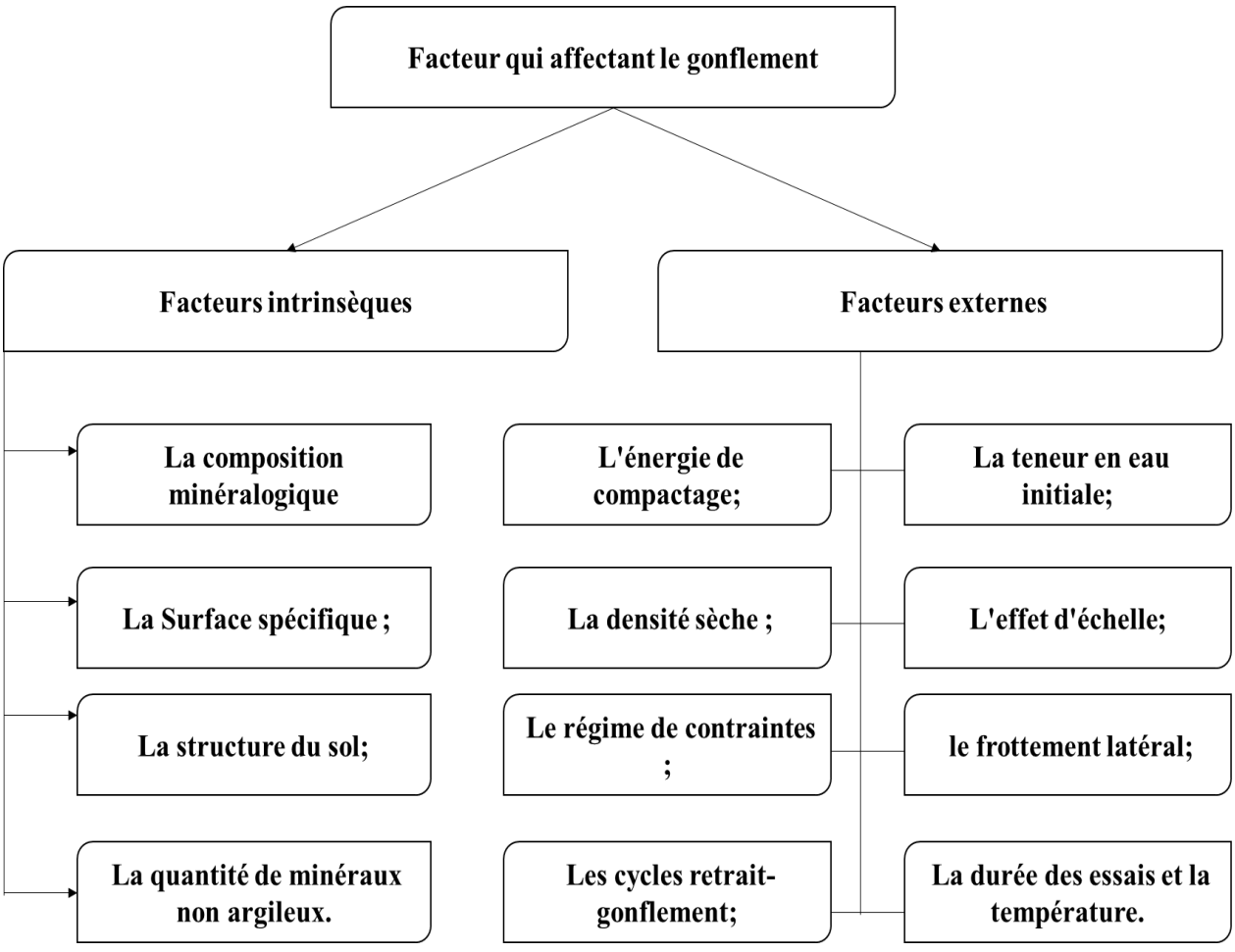


Figure 1.16: Facteur qui affectant le gonflement

1.11. Conséquences de gonflement

Les sols argileux causent des dégâts aux structures civiles et aux chaussées. Les dégradations causées par le gonflement du sol sont plus spectaculaires que celles de tout autre risque naturel tel que le tremblement de terre et l'inondation [11]

Les désordres causés par le gonflement du sol sont amplifiés lorsque l'expansion est différentielle. L'analyse pathologique des désordres occasionnés par le gonflement du sol atteste que ces derniers sont dus à la température, à l'humidité, à l'évaporation, au degré de saturation, à la distribution irrégulière de l'eau dans le sol et à l'hétérogénéité structurelle du sol [18]. L'accumulation de l'humidité sous la structure est une conséquence directe de l'altération du régime d'évapotranspiration.

L'humidité est sensiblement plus élevée au centre de la structure comparativement à la périphérie. Ceci produit des sollicitations distinctives entre les deux parties (centre et périphérie) tel que montre la Figure 1.17

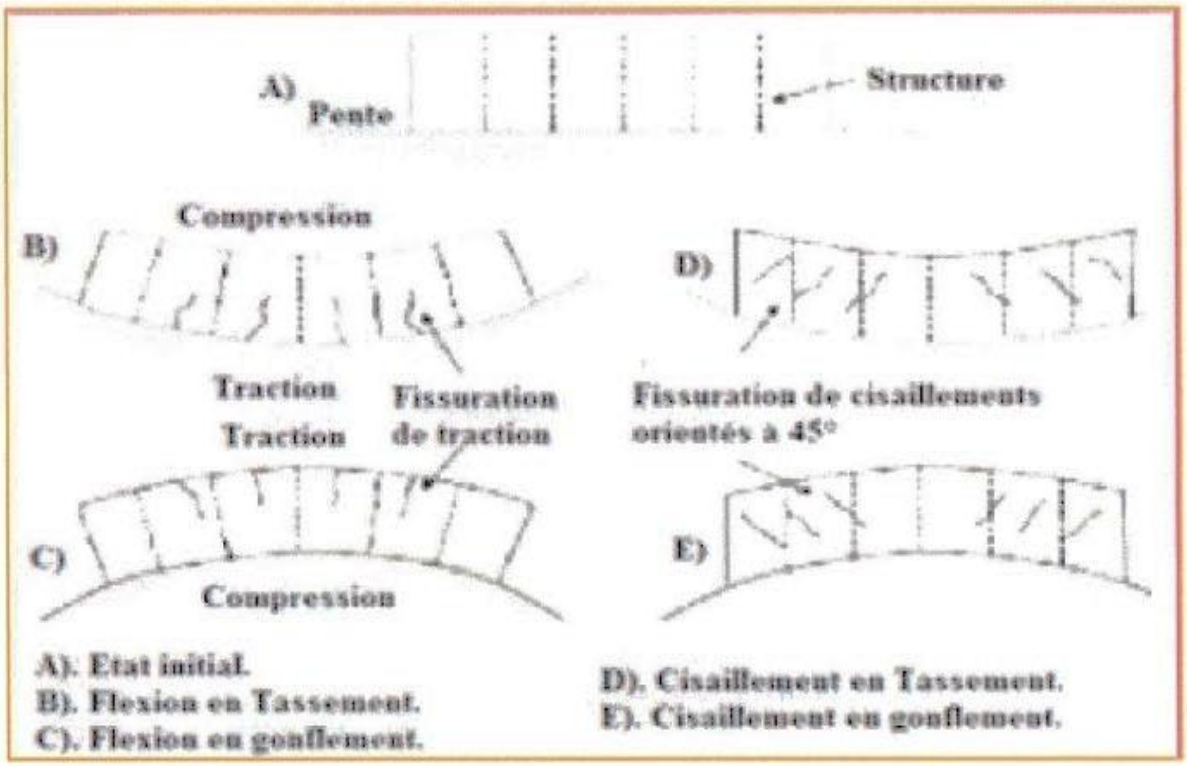


Figure 1.17: Formes de Dégâts Sur des Bâtiments Reposant Sur des Terrains Gonflants.

[22]

Les mouvements différentiels du terrain d'assis d'une construction se traduisent par l'apparition de désordres qui affectent l'ensemble du bâti et qui sont en générale les suivants :

a- Gros-œuvres :

Il s'agit d'une fissuration des structures enterrés ou aériennes, plus le déversement de structures fondées de manière hétérogène, des encastrements des éléments de charpente ou de chainage et la dislocation des cloisons.

b- Second-œuvres :

Se découle en distorsion des ouvertures, plus en décollement des éléments composites (carrelage, plâtre,...) et en rupture de tuyauteries et canalisation.

c- Aménagement extérieur :

Réalistion des fissurations des terrasses et décollement des bâtiments annexes, terrasses, perrons

La nature, l'intensité et la localisation de ces désordres dépendent de la structure de la construction, type de fondation réalisée et bien sûr de l'importance des mouvements différentiels de terrain subis. BRGM/RP-51994 - FR Décembre 2002

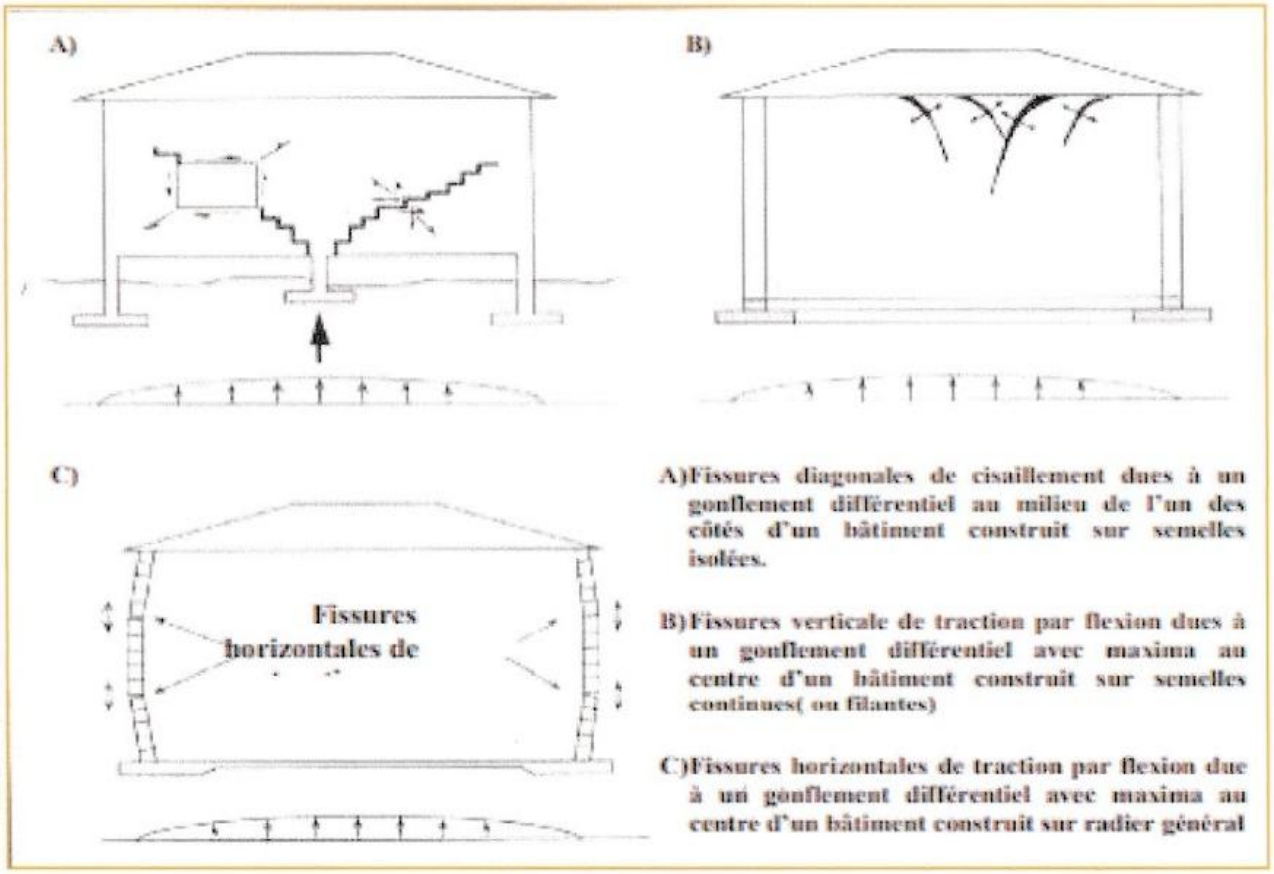


Figure 1.18: Formes et Directions de Fissuration.

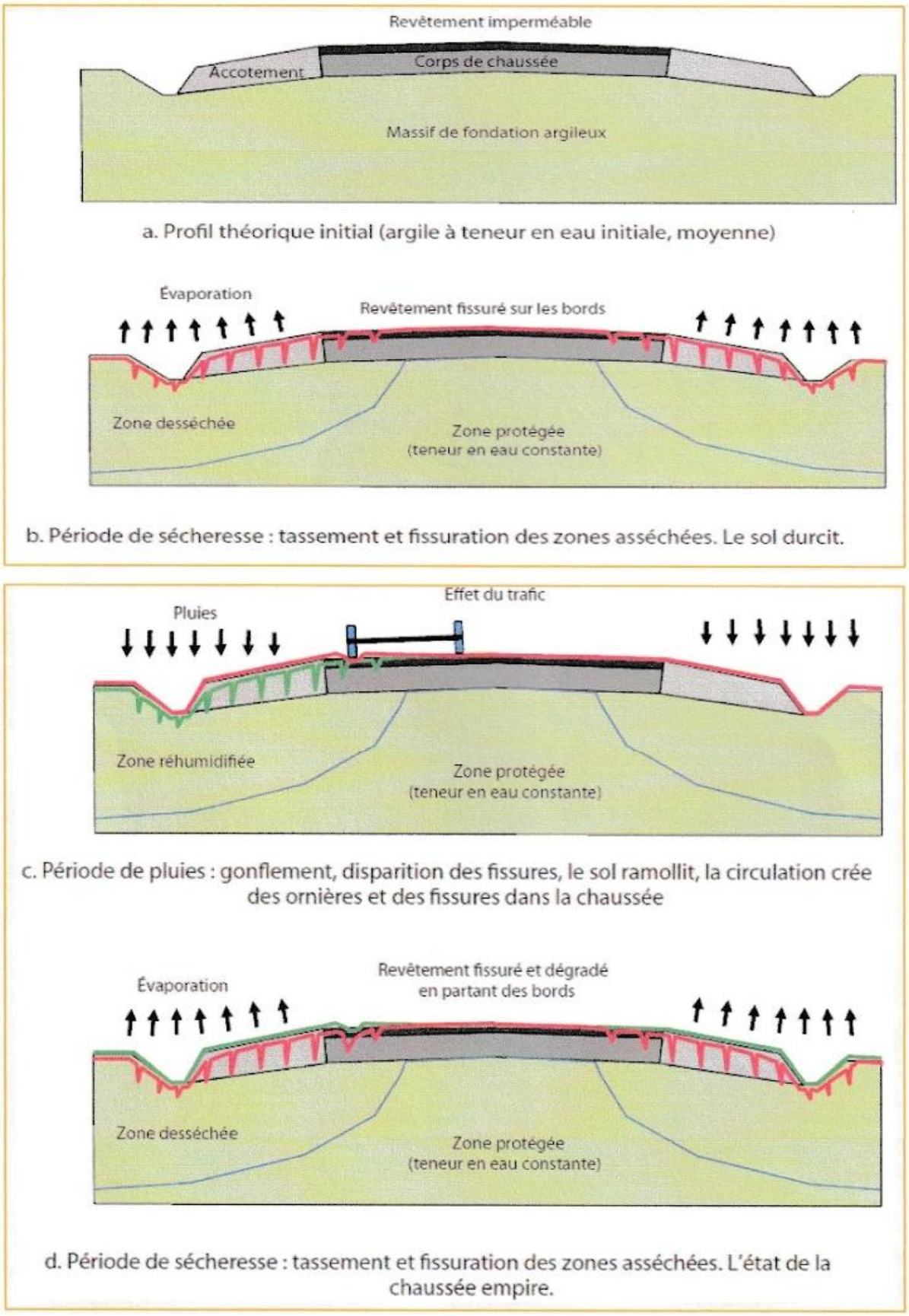


Figure 1.19: Mécanisme d'évolution d'une route sur sol argileux gonflant.

1.12. Protection des ouvrages sur sols gonflants

La protection des constructions contre les effets du gonflement et retrait des sols s'appuie sur deux stratégies :

1- Empêcher les variations de volume du sol. Pour empêcher le gonflement on retrait du sol, on peut :

-Empêcher le gonflement et le retrait, en modifiant ou remplaçant le sol.

-Empêcher le gonflement et le retrait, en maintenant constante la teneur en eau

2- Limiter ou supprimer les effets du gonflement ou du retrait.

- Limiter les effets du gonflement ou du retrait en adaptant la géométrie de l'ouvrage pour que le sol se déforme librement.
- Limiter les effets du gonflement ou du retrait en modifiant la rigidité et la résistance de la construction.

1.13. Conclusion

Cette section expliquera que le gonflement et le rétrécissement du sol sont un phénomène complexe et que chaque type d'argile a un certain comportement et un certain mécanisme pour ce phénomène en termes de composition et de propriétés.

L'expansion des sols peut entraîner de graves conséquences : dommages aux bâtiments et pertes en vies humaines, ce qui nous incite à rechercher des solutions pour le traitement des sols.

Chapitre II:

Techniques d'améliorations des sols gonflants

2. Chapitre II: Techniques d'améliorations des sols gonflants

2.1 Introduction

Les méthodes d'amélioration des sols constituent l'un des outils à la disposition de l'ingénieur pour remédier aux problèmes de stabilité ou de déformation rencontrés lors de la conception d'un projet. Au cours du XXe siècle, de nombreuses techniques ont été mises au point par les ingénieurs géotechniciens pour renforcer les propriétés géotechniques et mécaniques des sols, avec des résultats jugés efficaces. Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux en bois dans des terrains peu portants, tandis que d'autres sont plus récentes. Ces techniques consistent à modifier les caractéristiques d'un sol, soit par une action physique (comme les vibrations), soit par l'ajout ou le mélange d'un matériau plus résistant, dans le but de :

- Augmenter la capacité portante et/ou la résistance au cisaillement
- Diminuer les tassements, tant absolus que différentiels, et le cas échéant les accélérer,
- Diminuer ou éliminer le risque de liquéfaction en cas de tremblement de terre ou de vibrations importantes.

Comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation. Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un dével oppement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

Les champs d'application des différentes techniques dépendent essentiellement de la nature et de la granulométrie des terrains que l'on désire améliorer.

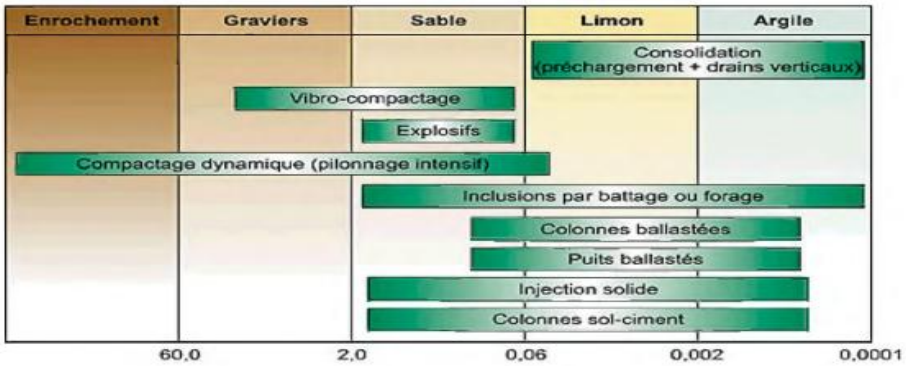


Figure 2.1. Dimension moyenne des grains (mm)

2.2. Les méthodes d'améliorations des sols

Il existe plusieurs techniques permettant de valoriser les sols possédant des caractéristiques médiocres. Il s'agit de la stabilisation :

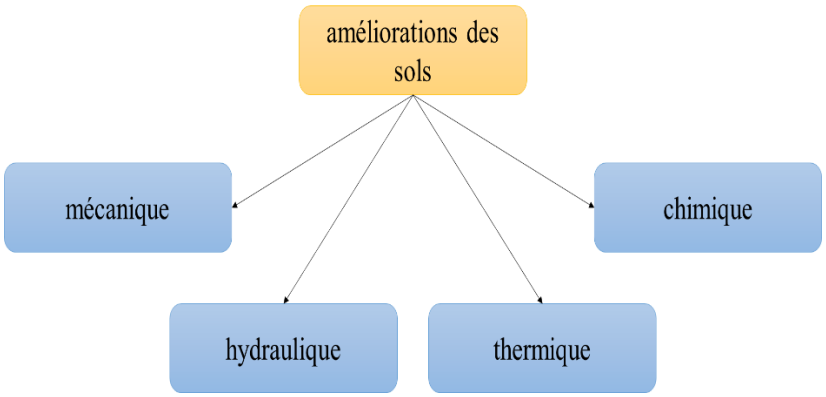


Figure 2.12. Les méthodes d'améliorations des sols

Ces précédentes techniques nous permettent de densifier le sol, de diminuer la teneur en eau, de modifier la fraction argileuse, ou de changer le comportement du sol par traitement. Une méthode mixte consistant à stabiliser le sol par une technique physico-chimio-mécanique . [32]

2.2.1. Traitements mécaniques

2.2.1.1. Le compactage

Le compactage est une opération visant à réduire les vides présents dans un matériau en vrac afin d'en améliorer la cohésion, garantissant ainsi la stabilité durable de l'ouvrage. Cette opération peut être réalisée à l'aide de compacteurs statiques (à pneus ou à pieds dameurs), qui agissent uniquement par leur poids, ou de compacteurs vibrants (à bille lisse ou à pieds dameurs), qui combinent le poids et les vibrations (amplitude et fréquence). Il est également possible d'utiliser une combinaison des deux types. Le choix du compacteur, ainsi que sa vitesse, le nombre de passes et l'épaisseur maximale de la couche à traiter, dépend de la nature du matériau et du niveau de compacité recherché.

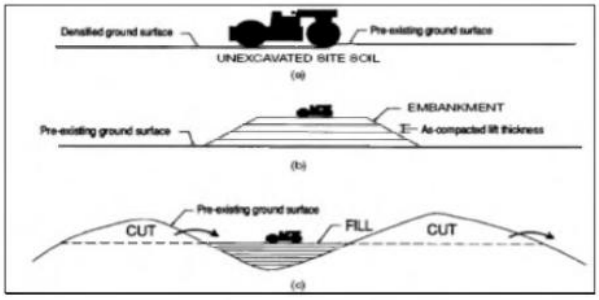
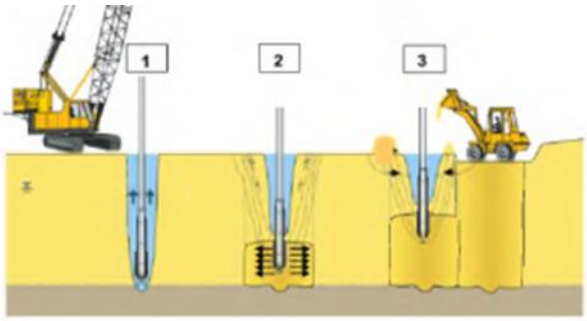
Compactage de surface	
Compactage dynamique	
Vibro-compactage	 

Figure 2.3 : déférents types de compactage

2.2.1.2. Préchargement ou Pré-compression

La pré-compression consiste à comprimer le sol en lui appliquant une charge avant l'installation des charges définitives. Cette méthode est particulièrement adaptée aux sols dont le tassement naturel s'étale sur plusieurs années, notamment les terrains de mauvaise qualité à dominante

argileuse. Le principe repose sur la surcharge du sol afin de provoquer un tassement anticipé. Le préchargement s'applique aussi bien aux sols fins qu'aux sols grenus, selon les mêmes principes. Toutefois, en raison de leur perméabilité plus élevée, les sols grenus permettent d'atteindre les résultats escomptés en un temps bien plus court que les sols fins, surtout argileux. La figure II.4 illustre le principe du préchargement utilisé pour maîtriser les tassements.

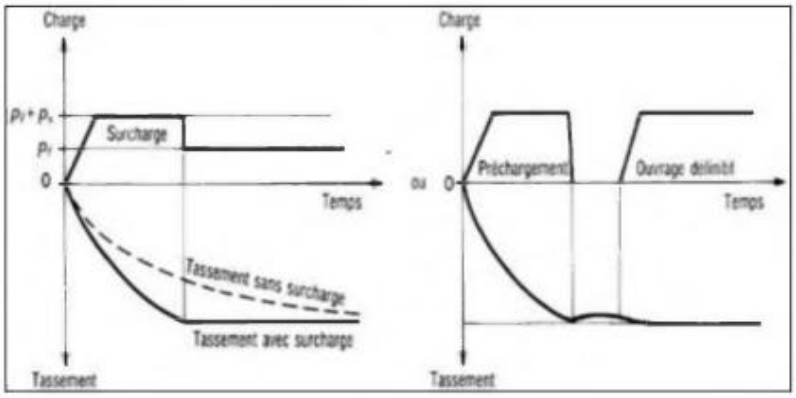


Figure 2.4. Principe du pré-chargement pour le contrôle des tassements.

2.3. Accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux

Les drains verticaux sont largement utilisés pour accélérer le processus de consolidation primaire dans les zones soumises à un pré-chargement, que ce soit avec ou sans surcharge additionnelle. Toutefois, cette méthode se révèle inefficace dans certains types de sols, comme les argiles très organiques et les tourbes, dont le tassement est principalement lié à la compression secondaire. Les drains verticaux facilitent le drainage à la fois dans les directions horizontale et verticale, améliorant ainsi l'efficacité de la consolidation dans les sols appropriés. (voir Figure II.5).



Figure2.5. l'installation des drains verticaux

2.3.1.Principe Installation des drains

Durant les années 1980, les drains verticaux sont constitués généralement de sable réalisé par différents procédés tels que le battage et le vibro-fonçage. A partir des années 1980, une nouvelle génération de drains qui sont les drains préfabriqués en forme de bande a fait son apparition. La part de ces drains a augmenté de façon très rapide.

2.3.2 Traitement hydraulique

2.3.2.1 Drainage, rabattement de nappe

Au sens du spécialiste, un rabattement selon les règles de l'art assure trois conditions:

- Non entraînement des fines,
- Fond de fouille sec,
- Fond et talus sables

2.3.2.2 Fond et talus stables

2.3.2.3 Rabattement de nappe

Cette technique est employée en France et à l'étranger dans de nombreux cas d'assèchement de fouilles en terrains alluvionnaires.

2.3.3 Traitements thermique

2.3.3.1 Congélation

C'est une technique de consolidation provisoire des terrains aquifères. (Pas nécessairement saturés), permettant ainsi de creuser des puits relativement profonds.

La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé. [7]

2.3.3.2 Déshydratation

L'utilisation de la chaleur pour la déshydratation des sols est très peu répandue en géotechnique. Cette technique permet notamment de durcir certains types d'argiles. Concrètement, elle consiste à brûler un carburant à l'intérieur d'un forage, en utilisant un forage adjacent relié au premier pour assurer le tirage des gaz, jouant ainsi le rôle de cheminée.

2.3.4 Traitements chimique

Le traitement chimique des sols gonflant par injection de silicate est le procédé le plus efficace qui permet de conforter instantanément ces types des sols en leur conférant des propriétés nouvelles. Le sol traité devient résistant à l'action de l'eau et acquiert une résistance mécanique, la résistance à la compression peut atteindre 2 Mpa. [32]

L'efficacité du traitement dépend :

- De sa capacité d'absorption d'échange du sol
- De sa perméabilité et de sa teneur en eau.

2.3.4.1 La chaux

En plus de son application dans le traitement des sols pour la construction routière, la chaux est utilisée dans de nombreux secteurs tels que la sidérurgie, la verrerie, l'industrie papetière, l'agriculture ou encore le bâtiment. Aujourd'hui, les chaux destinées à la construction sont des produits conformes à des normes spécifiques, notamment les normes NBN EN 459 - 1 et 2. En complément des critères définis par ces normes, d'autres exigences techniques sont souvent précisées dans les cahiers des charges types. [12]

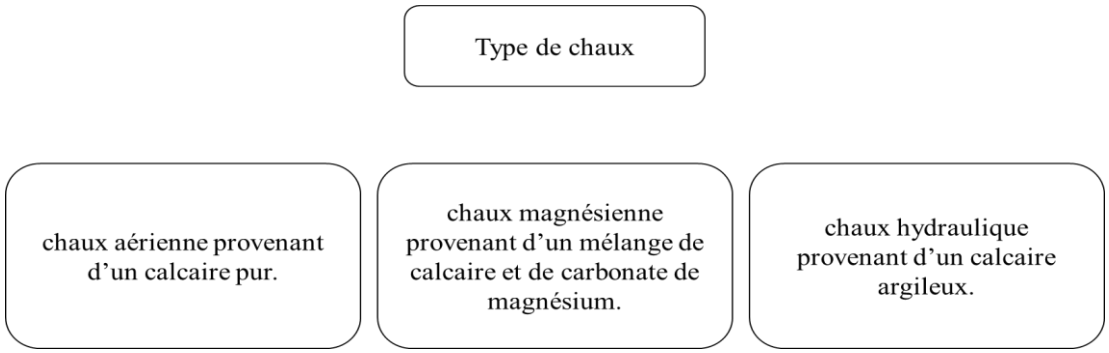


Figure2.6 types de chaux

Les chaux utilisées en technique routière sont essentiellement les chaux aériennes

Elles se présentement sous deux formes :

- chaux vive
- chaux éteinte

2.3.4.2 Clinker

C'est un produit obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkirisation) du mélange calcaire + argile, dosé et homogénéisé et comprenant principalement de la chaux (CaO) de la silice (SiO2) et de l'alumine (A1203).

Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne..). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des Portland. [32]



Figure2.7 Clinker

2.3.4.3 Ciment

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450-1550 C°, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et durcir en présence d'eau, et par ce que cette hydratation transforme la pate liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcicement

est du à l'hydratation de certain composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium. [14]

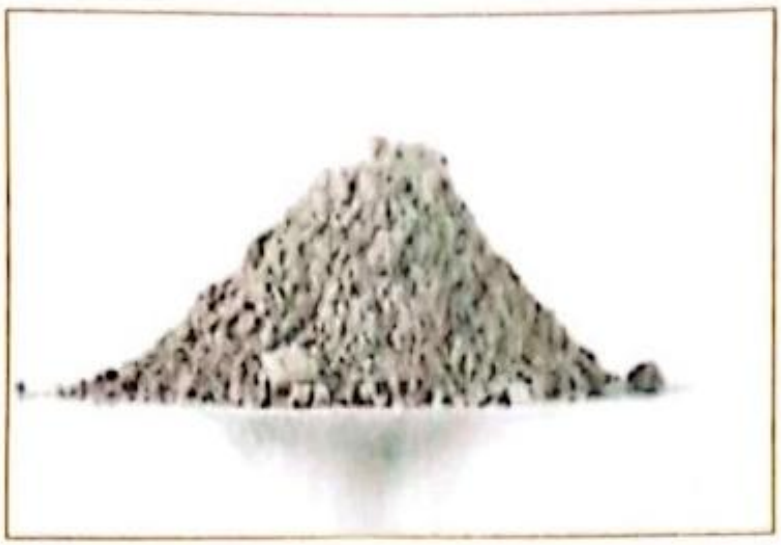


Figure2.8 Ciment

2.3.4.4Laitier

Les laitiers ont des propriétés très différentes suivant la composition chimique, et l'état plus au moins cristallisé, où plus au moins vitreux (teneur en verre) résultant du traitement effectué, et suivant la vitesse de refroidissement les laitiers de haut fourneau acquièrent des différentes.

2.3.4.4.1 Composition chimique du laitier

Le laitier du haut fourneau est un co-produit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Toutes les impuretés contenues dans le minerai de fer et dans le coke se trouvent dans le laitier de haut fourneau. On ajoute des agents fondants dans la charge du haut fourneau pour obtenir une composition chimique globale des impuretés qui reste dans une zone particulièrement bien définie. [19]

2.3.4.5 Pouzzolane

Parmi les roches et minéraux industriels, les ponces et les pouzzolanes sont des matériaux naturels d'origine volcanique, de type pyroclastique, meubles, légers et dotés d'une structure alvéolaire. Ils sont principalement constitués de verre volcanique. Classés parmi les granulats ou agglomérats légers, ils se distinguent par leur composition chimique et leur texture.

Bien qu'une classification en deux grandes catégories soit généralement adoptée — les ponces correspondant au pôle "acide" et les pouzzolanes au pôle "basique" —, il existe également des formations pyroclastiques présentant des caractéristiques intermédiaires. Ces matériaux, souvent désignés sous des appellations diverses, peuvent faire l'objet d'une valorisation industrielle dans certains pays.



Figure 2.9: pouzzolane calibrée.

2.4.1. Stabilisations par les fibres de plastique :

La bouteille plastique d'eau est la plus forte croissance de l'industrie des boissons dans le monde. Au cours de la dernière décennie 1,5 millions de tonnes de plastique sont utilisées pour la mise en bouteille de l'eau chaque année.

Les études montrent que 1500 bouteilles sont sous-évaluées comme déchets chaque seconde.

D'autre part, le nombre de bouteilles recyclées ou retourné est très faible.

La fibre plastique, est un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un semi-produit ou à un objet. La matière de base (la résine) est un polymère. Les résines des matières plastiques sont issues de produits intermédiaires (éthylène, propylène, acétylène, benzène, etc.) dont les matières premières sont le pétrole.

Le type de ce matériel est en polyéthylène, les fibres plastiques sont coupées en morceaux formes 1mm de diamètre et 20 mm d'épaisseur.

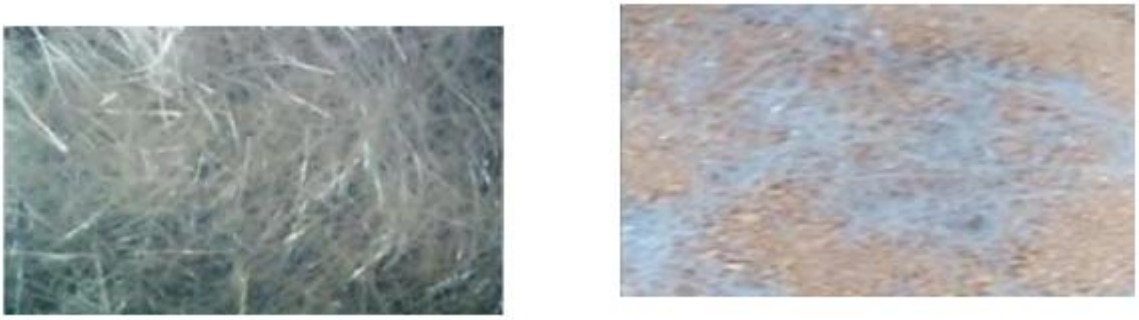


Figure 2.10 : Fibre plastique.

2.4.2. Stabilisation par les poudres de caoutchouc

Le principal inconvénient de l'utilisation des fibres en géotechnique demeure leurs prix.

L'utilisation des fibres comme renforts aux seins des matrices, dépend essentiellement de la compatibilité des propriétés physiques, mécaniques et chimiques, que possède la fibre avec les constituants de la matrice (sol), sans toutefois ignorer le facteur économique (coût), qui est très important dans la mesure où le prix des fibres sur le marché est relativement élevé. Des fibres de toute nature ont été expérimentées dans le renforcement des matériaux. Les plus répondues sont :

l'amiante, le verre, l'acier, le plastique (nylon et polypropylène), le carbone, les fibres des pneus usées, et les fibres végétales [3]

Le mélange d'échantillons d'argile expansive avec des fibres de caoutchouc issues de pneus usés permet de réduire à la fois la pression et l'amplitude du gonflement. Cette réduction s'explique par le remplacement partiel de l'argile gonflante par les fibres de caoutchouc, ainsi que par la résistance mécanique apportée par ces fibres au niveau de l'interface argile-fibre (Trouzine et al., 2012). Les sols argileux ainsi modifiés présentent une pression et un potentiel de gonflement nettement inférieurs à ceux des mêmes sols non renforcés. La figure 10 illustre les fibres de caoutchouc de pneus usés ainsi que la poudre de caoutchouc. [34]

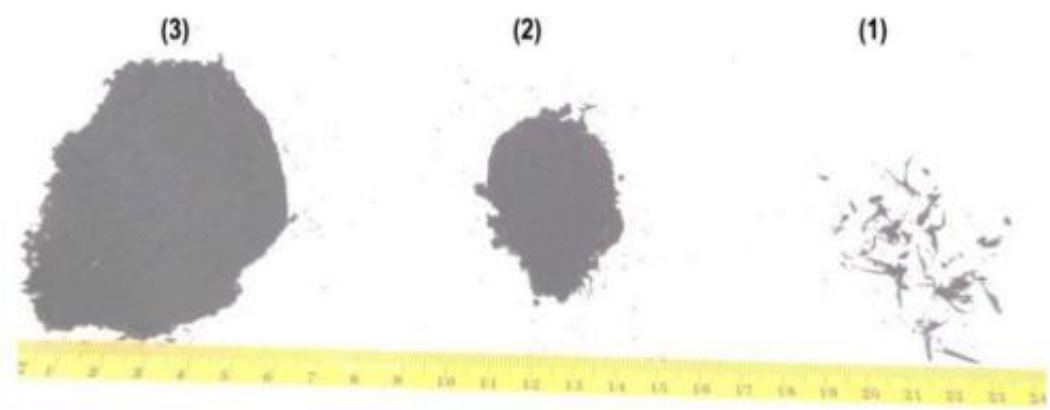


Figure 2.11 : Fibres de caoutchouc des pneus usés (1), Poudre de caoutchouc (2 & 3).

Bekhiti, et al. 2016 ont trouvé que le mélange des échantillons d'argile expansive avec des fibres de caoutchouc des pneus usés réduit le potentiel et la pression de gonflement. [3]

2.4.3. Utilisation Les déchets des pneus

Déchets du pneu est sont des produits issus du processus de granulation, un second broyage fin des pneus en fin de vie, où le caoutchouc est séparé des fibres textiles et desfils métalliques que l'on trouve également dans les pneus. La seule différence entre la poudre et les granulats est la granulométrie.

D'une manière générale, il est possible de caractériser les déchets du pneu par un certain nombre de propriétés :

- Taille de la particule.
- Distribution de taille des particules.

Les pneumatiques usagés peuvent êtres broyés en poudrettes ou en granulés de caoutchouc.

Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux.

Poudrettes : il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2mm.

Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers.

Les pneus possèdent des propriétés multiples qui leur donnent un intérêt dans l'ingénierie civil et géotechnique : ductilité, faible conductivité thermique.

Plusieurs techniques utilisant les PU en génie civil sont connue dans le monde : la technique

Pneu sol et ses dérivées « Pneurésil, Pneutex et l'Arma-Pneusol », la technique TDA « Tires Derived Aggregate », la technique Tires Balles et la technique Tirecel. [8]

Le Pneu sol est une association des pneus usés entiers, partiellement ou entièrement découpés à des sols pulvérulents ou cohérents.

Les domaines d'application sont variés « Ouvrages de soutènements, remblai léger, répartiteur des contraintes, protection des pentes...). Plus de 2000 ouvrages valorisant les PU, selon les différentes techniques sont connues dans le monde, dont environ une

vingtaine en Algérie [34] [25]

L'utilisation des déchets du pneu dans le domaine du génie civil a connu un développement rapide durant les dernières années. Ils ont entièrement remplacé les matériaux de construction traditionnels.

Dans de nombreux cas, l'utilisation d'un déchet de pneu peut augmenter le facteur de sécurité, et réduire les coûts en comparaison avec les matériaux classiques de construction.

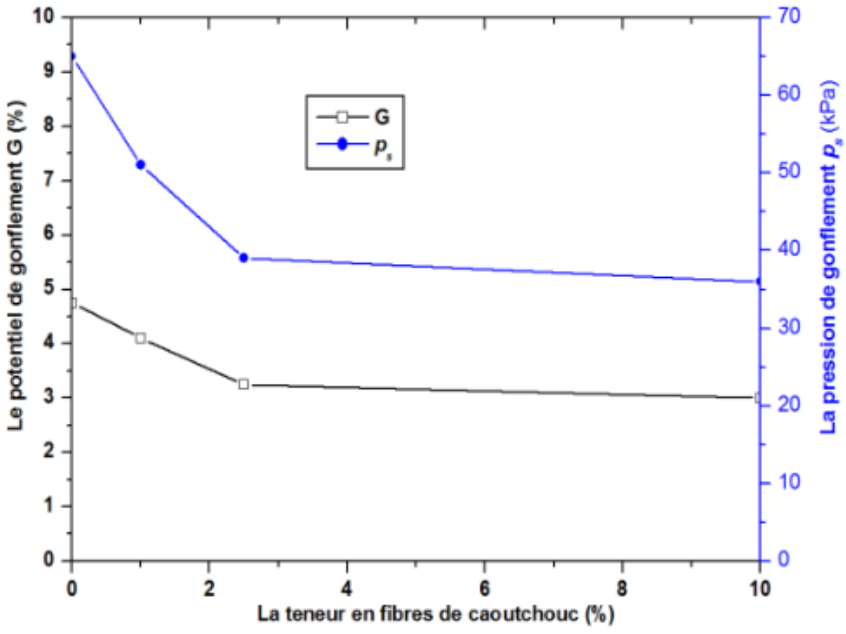


Figure 2.12 : : Effet de la teneur fibres en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement de sol A . [34]

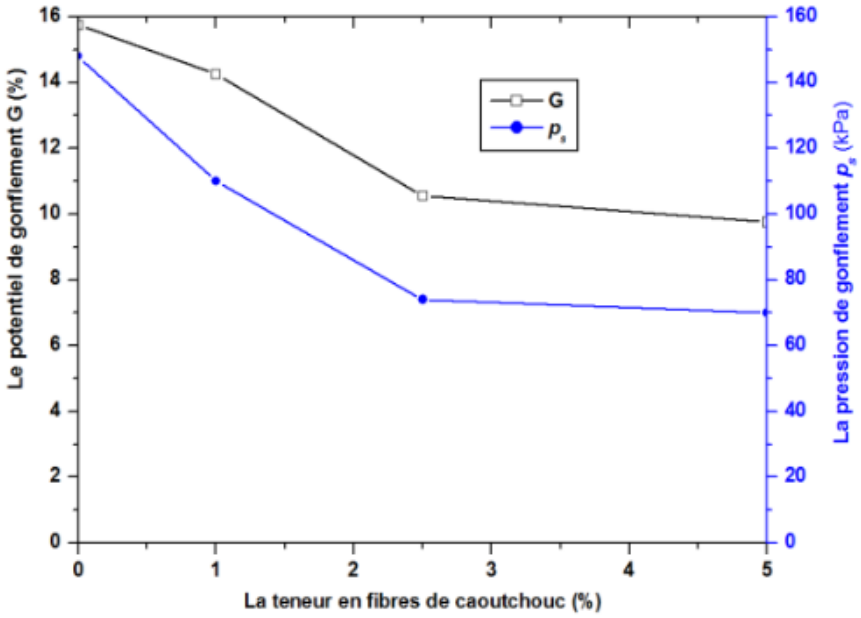


Figure 2.13 :: Effet de la teneur en caoutchouc des pneus usés sur le potentiel et la pression de gonflement de sol B [34]

L'effet de fibres de caoutchouc est similaire pour les deux argiles étudiées sur les paramètres du gonflement, plus le pourcentage augmente plus le gonflement libre et la pression de gonflement diminuent, à un pourcentage de 10% fibres, on constate à une diminution remarquable pour les deux argiles.

L'étude précédente présente les résultats obtenus sur des sols argileux à faible plasticité (CL) et à forte plasticité (CH) mélangés avec différentes proportions de fibres de caoutchouc issues de pneus usés. Les principales conclusions sont les suivantes :

- L'ajout de fibres de caoutchouc dans des échantillons d'argile expansive réduit à la fois le potentiel et la pression de gonflement.

- Une diminution progressive du gonflement est observée avec l'augmentation de la teneur en fibres. Pour la bentonite, le gonflement maximal initial de 15,75 % chute à 9,75 % pour un taux de poudrette de 10 %, soit une réduction d'environ 38,10 %. Pour l'argile d'Oran, le gonflement maximal est de 4,75 %, avec une réduction allant de 13,7 % à 36,8 % lorsque la teneur en fibres augmente de 1 % à 10 %.

- Les fibres de caoutchouc absorbent jusqu'à 3 % de leur propre poids en eau, ce qui permet aux échantillons composites (fibres + sol) d'atteindre leur soulèvement final en moins de temps que les sols argileux purs.

II.7. Conclusion

L'incorporation de fibres de pneus usés réduit significativement le gonflement des sols argileux, quel que soit leur degré de plasticité, mais elle augmente également la compressibilité des mélanges. Pour maîtriser cette compressibilité, il est possible de renforcer les sols en couches distinctes à l'aide de géo synthétiques. Des essais à l'échelle réelle sur le terrain ou des projets pilotes sont nécessaires pour valider ces recommandations.

Chapitre III :

Matériaux, matériel et programme des essais

CHAPITRE III : MATERIEAUX, MATERIEL ET PROGRAMME DES ESSAIS

3.1. Introduction

Les essais géotechniques en laboratoire sont très importants pour comprendre les propriétés du sol, ce qui nous permet de connaître le sol et sa qualité grâce à des tests d'identification tels que le test d'analyse granulométrique, la limite d'Atterberg, la valeur du bleu de méthylène, le test Proctor, etc.

Dans ce chapitre, nous effectuerons des tests de sol pour étudier et apprendre comment traiter le sol afin d'assurer la sécurité de la construction.

3.2. Matériaux utilisés

3.2.1. Le sol

Dans notre étude, nous avons choisir un type de sol situé dans la région de (el kouif, wilaya de Tébessa, Nord-Est de l'Algérie).

3.2.1.1. Situation géographiques de la zone d'étude

La ville d'El Kouif se trouve à environ 30 km du centre du gouvernorat de Tébessa.

Elle est bordée au nord par la ville d'Ain Zegwa, au sud par la ville de Beccaria, à l'est par la frontière algéro-tunisienne et à l'ouest par les montagnes du Jebel Boulehfdir.

La superficie de la ville couvre 257 kilomètres carrés (figure). La zone d'étude est située entre les coordonnées suivantes : longitude : 8° 18′ - 8° 21′, latitude : 35° 28′ - 35° 31′. Depuis l'indépendance, la commune a connu une expansion considérable, résultat du développement démographique. L'essentiel de l'expansion vise le quartier de Ghilène, où se trouvent l'ancienne gare de Ghilène et l'ancienne usine de phosphate. Malheureusement, les nouveaux bâtiments de la région souffrent de fissures à des degrés divers. Comme mentionné ci-dessus, ces problèmes sont liés aux mouvements différentiels de retrait/gonflement du sol de fondation.

D'un point de vue géologique, la région se situe au nord-est des montagnes de l'Atlas saharien et de la frontière algéro-tunisienne. La ville d'El Kuif, objet de notre étude, est située dans le

Jebel Kuif, qui est un affleurement du Paléocène. La base de la marne paléo-éocène contient une couche de phosphate. Il s'agit du siège des mines de phosphate d'El Kouif. Les emplacements des sites impliqués dans cette étude sont indiqués dans la figure 3.1

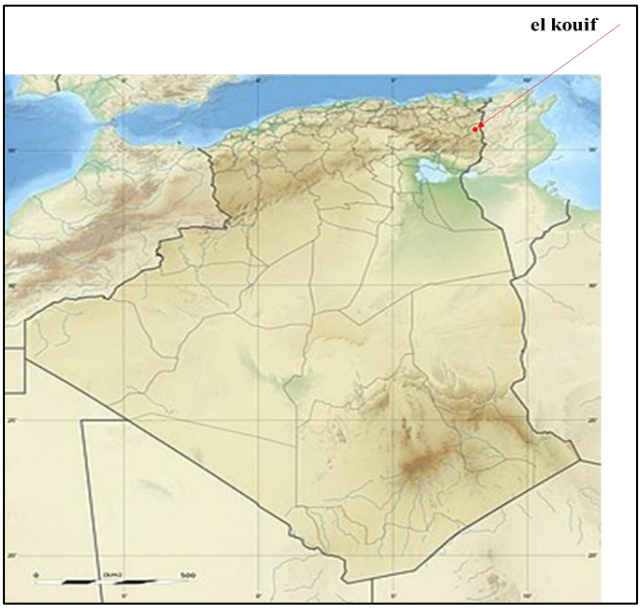


Figure 3.1: Situation géographiques de la zone d'étude

3.2.1.2.Situation climatique

Sur le plan climatique régional, El Kouif appartient, d'un point de vue bioclimatique, à l'étage semi-aride, caractérisé par des hivers froids et des étés chauds. Il se situe entre les isohyètes de 300 mm au sud et 350 mm au nord (voir Figure 3.1). Cette région souffre d'un manque notable de données et d'informations spécifiques. En raison de cette insuffisance, nous avons choisi de nous référer à une zone géographiquement proche et présentant des caractéristiques similaires, pour laquelle les données sont disponibles.

Tableau 3.1: Les cordonnées de la station météorologique de Tébessa. (service ANRH-Unité de Tébessa, 2003)

Période d'observation	Code	Cordonnées		Latitude	Longitude	Altitude
		X	Y			
1972-2012	12-03-01	991.900	247.200	35°28N	08°07E	820m

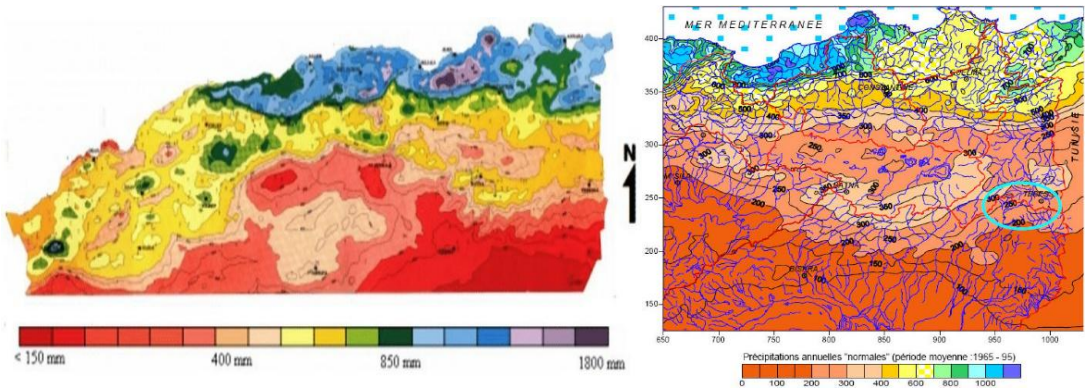


Figure 3.2: Carte des précipitations annuelles du Nord-est de l'Algérie (service ANRH-Unité de Tébessa, 2003)



Figure 3.3: La zone du sol étudié

3.2.1.3. Etude des paramètres climatiques

A. La température

La température est un facteur très important, qui conditionne le déficit d'écoulement (sécheresse). Les observations des températures enregistrées au niveau de la station de Tébessa pour une période 40 ans (1972/2012) ont permis de constater que :

A l'échelle mensuelle l'hiver est très froid et humide, ce qui provoque le gonflement des sols, l'été est chaud et sec. C'est ce qui conduit au retrait des sols, avec des enregistrements de température minimale de 6.65°C au mois de Janvier et maximale de 26.28°C au mois de Juillet (Figure 3.3).

Tableau 3.2: Moyenne mensuelle des températures 72/2012. (Service ANRH- Unité de Tébessa, 2003)

MOIS	Jan	fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	oct	Nov	dec
MOY	6.65	7.82	10.47	13.41	18.62	23.43	26.28	25.55	21.53	17.14	11.10	7.88

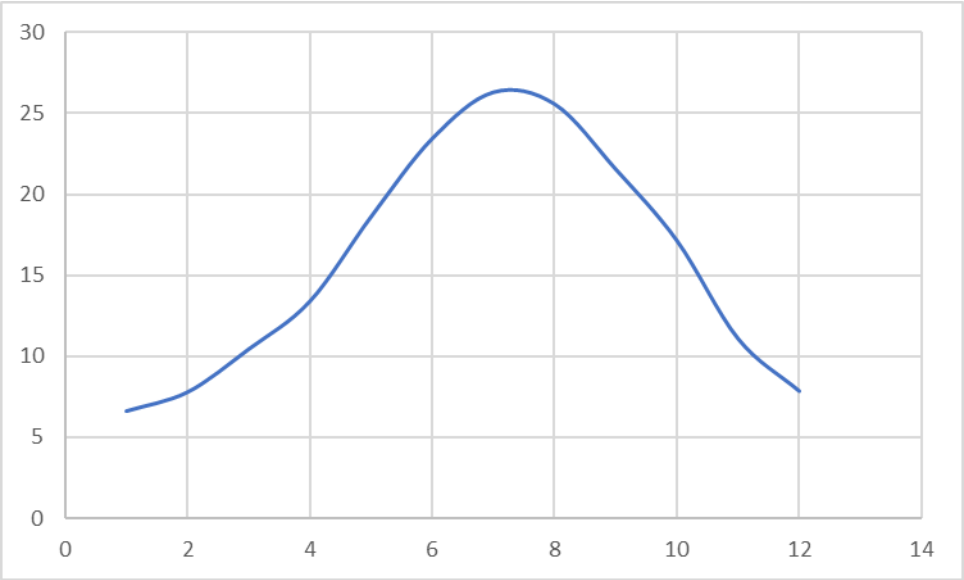


Figure 3.4: Répartition mensuelle des températures 72/2012. (Service ANRH- Unité de Tébessa, 2003)

B. La précipitation

Pour évaluer le taux de ruissellement, d'infiltration et de l'alimentation des réserves aquifères, il est nécessaire de connaître la quantité de précipitation dans la région de l'El Kouif. L'apport d'eau dans le sol se fait sous forme de pluie, neige, rosée et brouillard. L'eau des précipitations n'atteint pas intégralement le sol, une partie se dissipe sous forme de ruissellement, une partie s'évapore, une partie retenue par les racines de la couverture végétale et une autre s'infiltre en profondeur.

- **Variation mensuelle des précipitations**

La courbe des moyennes mensuelles interannuelles des précipitations sur une période de 40 ans (Figure III.4) révèle que le mois de mars enregistre la moyenne de précipitations la plus élevée, avec 44,1 mm, ce qui en fait le mois le plus pluvieux et celui où le taux de gonflement est le plus important. En revanche, le mois de juillet est le plus sec, avec une moyenne de précipitation de seulement 13,1 mm.

Tableau 3.3: Précipitations moyennes mensuelles (mm) à la station de Tébessa (72/2012). (service ANRH-Unité de Tébessa, 2003)

MOIS	Jan	fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	oct	Nov	dec
MOY	26.4	26.9	44.1	32.7	38.8	26.8	13.1	29.4	40.7	36.1	33.3	28.5

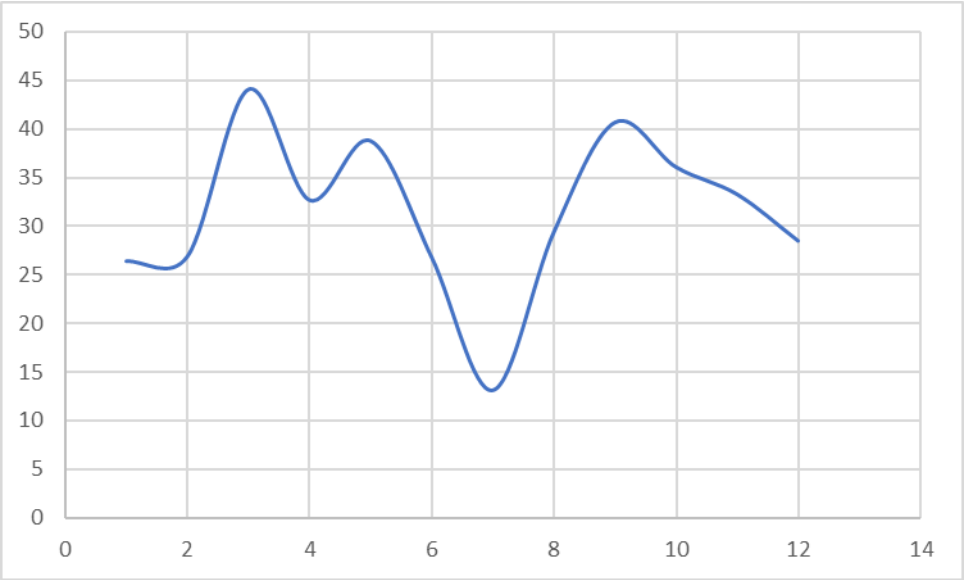


Figure 3.5: Variation des moyennes mensuelles interannuelles des précipitations (Station de Tébessa, période 1972/1973-2011/2012). (service ANRH-Unité de Tébessa, 2003)

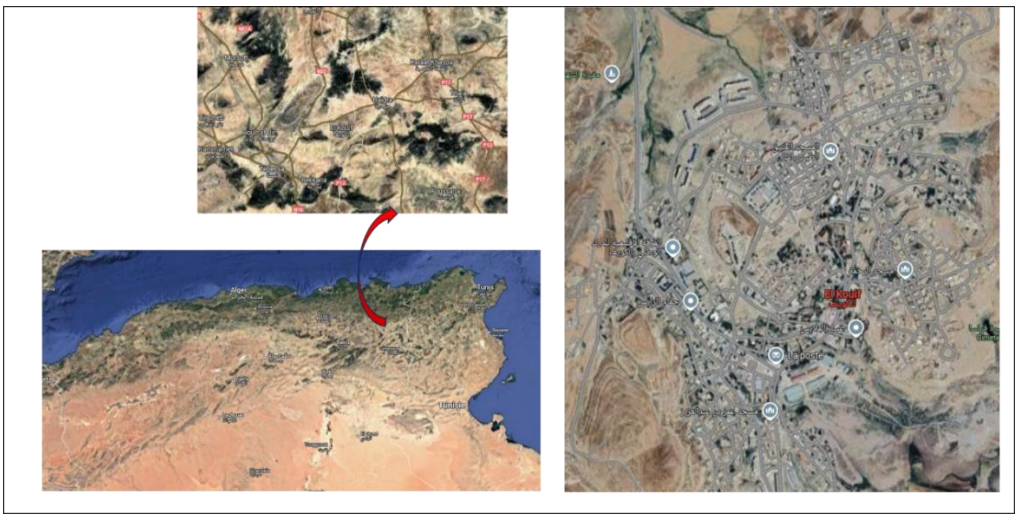


Figure 3.6: Vue satellitaire de la zone d'étude. (Google Map)

3.2.2. La Poudrette de caoutchouc

Afin de faciliter la compréhension de la terminologie propre à l'industrie du pneu, il est utile de revenir brièvement sur l'histoire du développement du caoutchouc naturel et synthétique. Le

caoutchouc naturel est extrait de plusieurs plantes, dont la principale source est l'hévéa (Hevea brasiliensis). À l'inverse, le caoutchouc synthétique est obtenu par des procédés chimiques à partir de dérivés pétrochimiques. Les matières premières utilisées dans sa fabrication sont notamment :

- Isobutylène.
- Isoprène.
- Styrène.
- Butadiène.

La poudrette de caoutchouc est issue du broyage de pneus usagés non réutilisables (PUNR) ou de résidus provenant du rechapage (voir Figure 3.6). Ce broyage peut être réalisé par voie mécanique ou cryogénique, cette dernière consistant à fragiliser le caoutchouc par le froid. Le procédé cryogénique permet d'obtenir une poudrette de meilleure qualité, bien que plus coûteuse.

Cette poudrette est utilisée dans divers domaines : fabrication de revêtements de sols industriels et sportifs, matériaux d'isolation phonique, membranes anti-fissures pour les routes, membranes antivibratoires pour les infrastructures ferroviaires, roulettes, etc.

Elle est également incorporée aux bitumes en tant que liant, ce qui confère à l'enrobé une forte capacité de drainage, réduisant ainsi le risque d'aquaplaning, atténuant le bruit de roulement et ralentissant le vieillissement du revêtement.



Figure 3.7.Aspect des poudrettes de caoutchouc

3.2.3.Les caractéristiques des granulats de caoutchouc

D'une manière générale, il est possible de caractériser un granulat de caoutchouc par un certain nombre de propriétés :

- Taille de la particule.
- Distribution de taille des particules.

3.3. Essais à réaliser :

Diverses étapes d'étude doivent être envisagées dans le cadre du traitement des sols, notamment:

- **Essais initiaux (identification du sol) :**

Avant d'envisager tout traitement, il est essentiel d'identifier le sol concerné et de prélever un échantillon représentatif. Les premières analyses en laboratoire se concentreront sur l'état initial du sol et ses principales caractéristiques afin d'évaluer l'adéquation et l'efficacité potentielle d'un traitement.

- Essai analyses granulométriques par tamisage ;
- Essai analyses granulométrique par sédimentation ;
- Essai poids spécifique ;
- Essai limites d'Atterberg (indice de plasticité +indice de liquidité);
- Essai VBS :
- Essai Proctor normal.

- **Les essais principaux (essai oedométrique) :**

Dans notre étude, nous allons retourner l'essai oedométrique pour le traitement du sol dans chaque cas à partir les formulations suivantes :

Tableau 3.4: formulation propose pour le traitement du sol.

Formulation
Sol
Sol +2% poudre en caoutchouc
Sol +4% poudre en caoutchouc
Sol +6% poudre en caoutchouc

Sol +8% poudre en caoutchouc
Sol +10% poudre en caoutchouc
Sol +12% poudre en caoutchouc
Sol +14% poudre en caoutchouc

3.3.1. Les essais préliminaires (identification du sol)

Essai analyse granulométriques par tamisage

L'analyse granulométrique par tamisage humide est une méthode permettant de classer les matériaux en fonction de la taille de leurs grains, conformément à la norme XP P94-041. Elle a pour objectif de déterminer la répartition dimensionnelle des particules constituant un granulat, dont les dimensions sont comprises entre 0,063 mm et 125 mm.

- **Principe d'essai :**

L'essai consiste à séparer par lavage les grains agglomérés d'un échantillon d'une masse connue de matériau, puis à les fractionner, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement après séchage le refus cumulé sur chaque tamis. (Norme XP P94-041)

- **appareillage d'essai :**

1. Une série des tamis (2; 1.25; 0.8; 0.63; 0.5; 0.4; 0.2; 0.08)
2. Une série de tares pesées préalablement
3. Un tamiseur mécanique
4. Balance
5. Bac
6. Etuve

La figure 3.8 nous montre quelques-unes des étapes de notre essai en laboratoire :





Figure 3.8: Essai analyse granulométrique par tamisage.

-

- **Résultats obtenus:**

Tableau 3.5: Analyse granulométrique par tamisage humide.

tami	RP	RC g	RC%	Tamisât %
6,3	0	0	0	100
5	8,33	8,33	15,22	84,78
2,5	8,59	16,92	30,92	69,08
2	2,11	19,03	34,77	65,23
1	8,26	27,29	49,87	50,13
0.08	13.52	40.81	74.57	25.43
fond	13,9	54,71	99,98	0,02
	total	54,72		

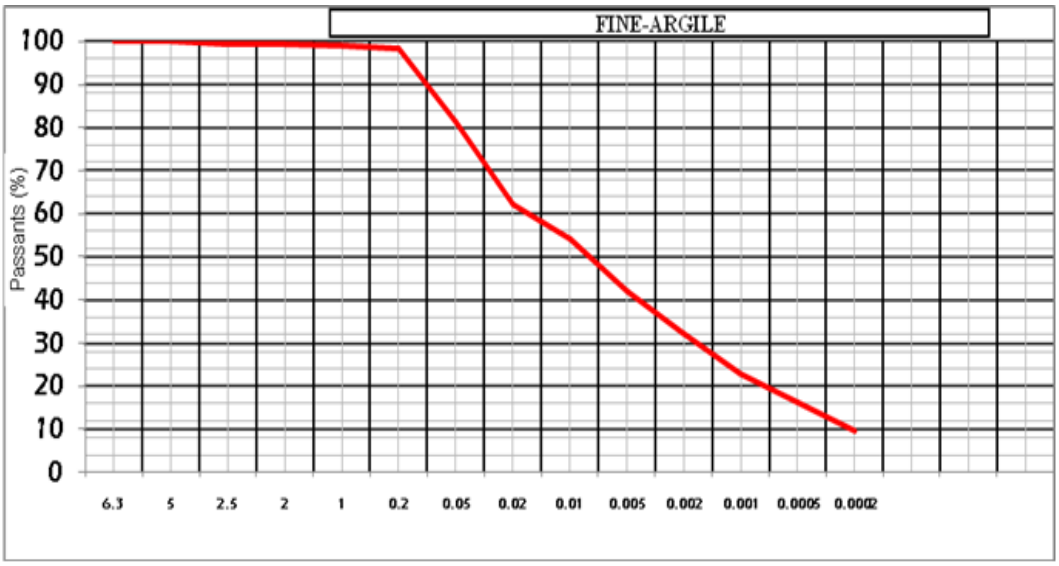


Figure 3.9: Analyse granulométrique par tamisage

Tableau3.6: norme de la granulométrique par tamisage.

Poids i	2000 g
Poids f	1869 g
Poids < 0.08	54.72 g
% < 0.08	98%

3.3.2. Essai analyse granulométrique par sédimentation

Cette analyse permet de déterminer le pourcentage de particules argileuses (Demolon et Leroux, 1952) et de déterminer la distribution en poids des particules fines (de diamètre inférieur à 80u) d'un sol en fonction de leurs dimensions donc elle complète l'analyse par tamisage (El-ALI, 2015). Dans l'étude des sols, on désigne par argile la fraction de matériau comprenant des éléments de diamètres inférieurs à 2 µm, et séparés au cours de l'analyse mécanique. L'essai de sédimentation s'est réalisé au niveau de laboratoire de contrôle routes et construction « CONSTRIM »

- **Principe d'essai :**

L'analyse granulométrique par tamisage humide, conforme à la norme XP P94-041, est une technique utilisée pour classer les matériaux selon la taille de leurs particules. Elle vise à déterminer la distribution granulométrique des éléments constituant un granulat, dont les dimensions se situent entre 0,063 mm et 125 mm.

- **appareillage d'essai :**

1. Balance;
2. Tamis;
3. Bac;
4. Étuve ;
5. Mortier;
6. Agitateur mécanique ;
7. Densimètre ;
8. Thermomètre:
9. Dé floculant.;
10. Chronomètre ;
11. Agitateur manuel.



Figure 3.10: appareillage d'essai sédimentaire.

La figure 3.11 nous montre quelques-unes des étapes de notre essai en laboratoire :



Figure 3.11: protocole expérimental d'essai sédimentaire.

- **Résultats obtenus:**

Tableau 3.7.: granulométrie et sédimentation .

Tami	TAMISAT (%)
6,3	100
5	100
2,5	99,5
2	99,3
1	98,9
0,2	98,4
0,05	81,2
0,02	62,1
0,01	54,2
0,005	41,9
0,002	32,3
0,001	23
0,0005	16,2
0,0002	9,6

Les résultats trouvés de l'essai de granulométrie par tamisage et par sédimentation du sol sont présentés dans la figure 3.12 :

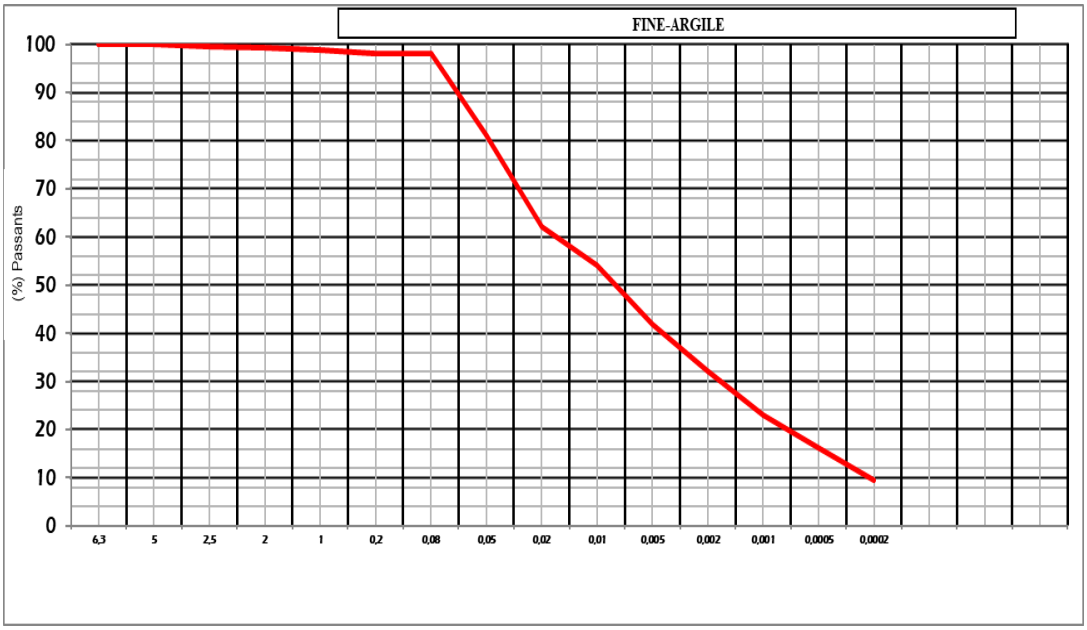


Figure 3.12: Courbe granulométrique du sol.

On remarque que plus de 35 % d'éléments ont un diamètre inférieur a 80 µm % et plus de 32.3 % d'éléments sont inferieur a 2 µm. Ce sol est un sol très fin, il est classe comme une argile limoneuse très plastique Ip =33.69 %.

3.3.3.2.1. Essai poids spécifique

La masse volumique des particules solides d'un sol (ρs) correspond au rapport entre la masse des particules solides (ms) et leur volume propre (Vs), selon la formule :

ρs = ms / Vs (conformément à la norme NF P94-054).

L'objectif de cette détermination est de mesurer le volume réel des grains, en excluant les vides, afin de calculer leur poids spécifique en rapportant leur masse à leur volume.

- **Principe d'essai :**

La masse des particules solides est obtenue par pesage, le volume est mesuré au pycnomètre. L'échantillon de sol est séché à l'étuve puis pesé. Le volume des particules est déduit par posée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de masse volumique connue aux particules solides. (Norme NF P94-054)

- **appareillage d'essai :**

1. Une étuve;
2. Une balance sensible;
3. Un bac
4. Une éprouvette;
5. Un tamis à maille carrée de 2 mm d'ouverture;
6. Des coupelles pour le séchage du sol;
7. Un mortier avec un pilon en matériau souple;
8. Deux pycnomètres de volume minimal 50 cm^3 munis de bouchons rodés à tube capillaire; Une réserve d'eau distillée.



Figure3.13: Appareillage d'essai poids spécifique.

La figure 3.14 nous montre quelques-unes des étapes de notre essai en laboratoire :

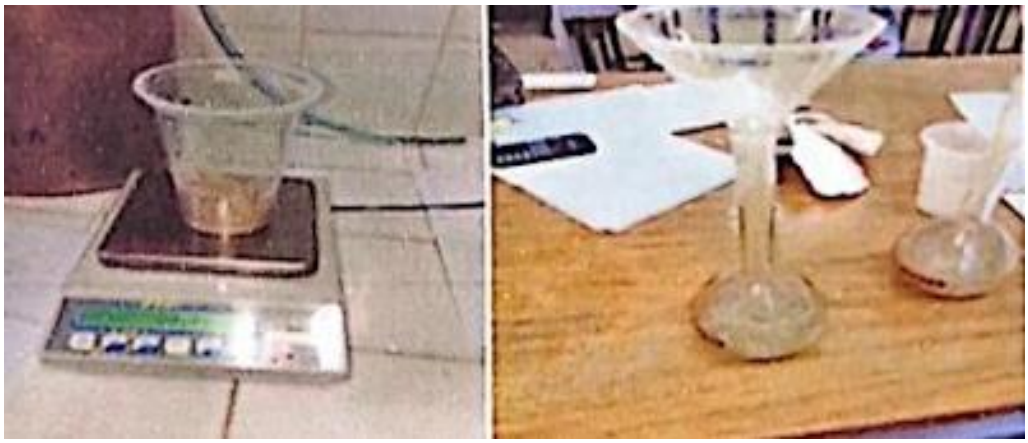


Figure 3.14: Quelques-unes étape d'essai poids spécifique.

- Résultats obtenus:

$\rho = [(M1-M0) \times \rho eau] / [M3+M1-M0-M2]$

Tableau 3.8: Résultats d'essai poids spécifique.

	Essai 01	**Essai 02**
Mo (poids pycnomètre)	164.29	164.10
M1 (pycnomètre + sol)	342.56	343.06
M2 (pycnomètre + sol + eau)	670	670
M3 (poids d'eau)	778	779
Poids spécifique (g/cm3)	2.54	2.56

3.3.2.2. Essai limites d'Atterberg (indice de plasticité +indice de liquidité)

Limites d'Atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité): Teneurs en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol.

- **WI:** limite de liquidité : Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique.
- **Wp :** limite de plasticité : Teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide.

- **Ip:** indice de plasticité : Différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Cet indice définit l'étendue du domaine plastique. (Norme NF P94-051)

Ip = W1 – Wp

- **Principe d'essai :**

L'essai s'effectue en deux phases:

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés ;
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure. (Norme NF P94-051)

- **Appareillage d'essai :**

1. l'appareil de Casagrande: est constitué d'un socle en bois bakélité, d'un support métallique portant une coupelle et une came actionnée par une manivelle, d'un compteur de coups;
2. une étuve ;
3. une balance;
4. une spatule ;
5. Un récipient d'eau ;
6. Un bac;
7. Coupelle;
8. Un tamis à maille carrée de 400 um d'ouverture.





Figure 3.15: Appareillage d'essai limite d'Atteberg.

- **Résultats obtenus**

Tableau 3.9: Résultats d'essai limite d'Atterberg (WI).

LIMITE DE LIQUIDITE			
N°essai	1ER ESSAI	2EME ESSAI	3EME ESSAI
Nombre de coups	16	19	30
N° de la tare	2	1	3
Masse de la tare Mt (g)	6.3	6.2	6.1
Mt+Mh (tare +sol humide)	30.3	19.9	20
Mt+Md (tare +sol sec)	19.2	13.9	14.0
Masse d'eau Mw (g)	11.1	6	6
Masse sol sec Md (g)	12.9	7.7	7.9
Teneur en eau W (%)	86.05	77.92	75.95
LIMITE DE PLASTICITE			
N°essai	1ER ESSAI	2EME ESSAI	3EME ESSAI
N° de la tare	B	A	C
Masse de la tare Mt (g)	9.5	9.5	9.6
Mt+Mh (tare +sol humide)	11.4	12.2	11.9
Mt+Md (tare +sol sec)	11	11.5	11.25
Masse d'eau Mw (g)	0.4	0.7	0.65
Masse sol sec Md (g)	1.5	2	1.65
Teneur en eau W	26.67	35	39.39
W moyenne (%)	33.69		

Tableau 3.10: Résultats d'essai limite d'Atterberg (WI).

WL	Wp	Ip
76.75%	33.69%	43.06%

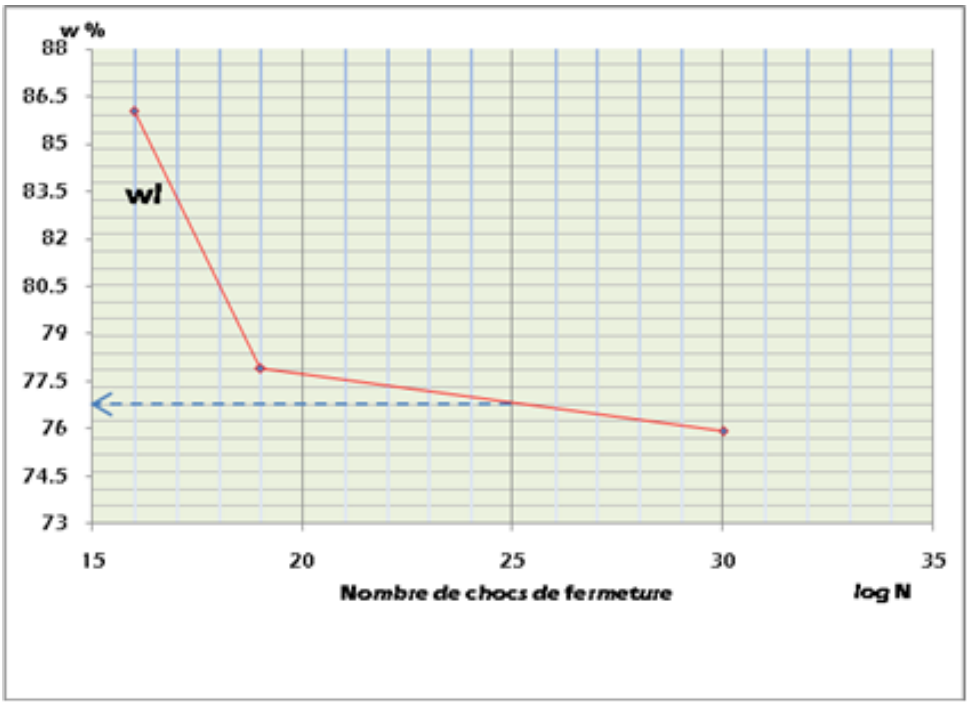


Figure3.16 : Résultats d'essai limite d'Atterberg

- WP moy = 48.93 %
- IP=WL-WP = 76.75-33.69 = 43.06%

Tableau 3.11: Résultats d'essai limite d'Atterberg

Indice de plasticité	Degré de plasticité
0 < Ip = 5	Non plastique
5 < Ip = 15	Moyennement plastique
15 < Ip = 40	Plastique
40< Ip	Très plastique

En se référant à la désignation de plasticité incluse dans les normes fournies dans le tableau et la courbe de classification, notre sol fin est très plastique.

3.3.2.3. Essai VBS

L'essai au bleu de méthylène, dit à la tâche, permet d'évaluer l'activité et la quantité de la fraction argileuse présente dans un échantillon. Le test consiste à ajouter progressivement des

doses de solution de bleu de méthylène tout en surveillant leur adsorption par le sol. À chaque étape, une goutte de la suspension est déposée sur un papier filtre pour observation (selon la norme NF P 94-068).

L'objectif est de déterminer le point d'adsorption maximale, atteint lorsque la tache formée est entourée d'une auréole bleu clair persistante (conformément à la norme P 18-592).

- **Principe d'essai :**

On injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans le bain aqueux contenant la prise d'essai. On contrôle l'adsorption du bleu après chaque ajout, en effectuant une tache sur un papier filtre. Pour un simple contrôle de conformité, la quantité de bleu spécifiée est injectée en une seule fois. (Norme P 18-592).

- **appareillage d'essai :**

1. Balance;
2. Chronomètre ;
3. Bicher;
4. Spatule ;
5. Chronomètre ;
6. Tamis de 0.5 mm;
7. Une burette de capacité 100 ml ou 50 ml et de graduation 1/10 ml ou 1/5 ml ou une micropipette de 5 ml et une de 2 ml;
8. Papier filtre ;
9. Une baguette de verre : longueur 300 mm et de diamètre 8 mm;
10. Un agitateur à mécanique;
11. Pissette de 500 ml.

- **Produits utilisés :**

- Solution de bleu de méthylène de qualité médicinale à 10g dans 100 ml d'eau distillée
- Echantillon du sol (30 g).



Figure 3.17 : Appareillage d'essai bleu de méthylène.

La figure 3.18 nous montre quelques-unes des étapes de notre essai en laboratoire :



Figure 3.18: Quelques-unes étape d'essai bleu de méthylène.

Résultats obtenus :

$$VBS = \frac{v}{m} = \frac{254}{30} = 8.46\ g$$

- V: valeur de bleu
- M: la masse de l'échantillon

Tableau 3.12 Classification d'essai bleu de méthylène.

Valeur au bleu	Susceptibilité	Note

Vb <2.5	faible	1
2.5=Vb <6	Moyenne	2
6=Vb <8	Forte	3
Vb>8	Très forte	4

Après la comparaison entre les résultats de l'essai et le tableau de classement nous avons que notre sol est très forte de note 4.

3.3.2.4. Essai Proctor

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

- **Principe d'essai :**

Le principe de cet essai repose sur l'humidification d'un matériau à différentes teneurs en eau, suivie de son compactage selon un procédé et une énergie standardisés. Pour chaque teneur en eau testée, on mesure la masse volumique sèche du matériau, puis on trace la courbe représentant l'évolution de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

En général, cette courbe — appelée courbe Proctor — présente un maximum correspondant à la masse volumique sèche la plus élevée, obtenue pour une teneur en eau bien précise. Ces deux paramètres définissent les caractéristiques optimales de compactage, dites "Proctor normal" ou "Proctor modifié", selon le type d'essai réalisé (conformément à la norme NF P 94-093).

- **Appareillage d'essai**

1. Le moule Proctor normal: Les deux modèles sont constitués d'un corps de moule, d'une embase et d'une rehausse. Le corps de moule peut être monobloc ou fendu. Les formes et les dimensions fonctionnelles de ces éléments doivent être conformes aux indications portées sur la figure;
2. Dame Proctor normal: la dame dite «dame Proctor normal» est constituée d'un mouton cylindrique de 51 mm ± 1 mm de diamètre. Ce mouton coulisse dans un fourreau qui lui autorise une hauteur de chute de 305 mm ± 2 mm. La masse de l'équipage mobile

est de 2 490 g + 2,5 g. Les formes et autres dimensions fonctionnelles de cette dame doivent être conformes aux indications portées sur la figure;

3. Une règle à araser;
4. Une balance sensible;
5. Un bac;
6. Une éprouvette;
7. Une étuve ;
8. Une spatule.

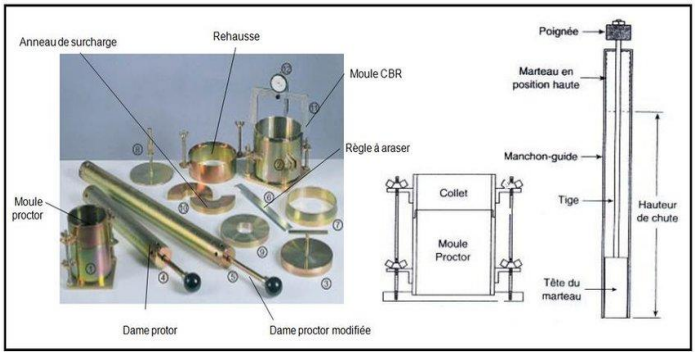


Figure 3.19: Appareillage d'essai Proctor.

La figure 3.20 nous montre quelques-unes des étapes de notre essai en laboratoire :



Figure 3.20: quelques-unes étape d'essai sédimentaire.

Tableau 3.13 : résultats d'essai Proctor.

Teneur en eau %	Poids volumique sec (g/ cm^3)
12	1.261
14	1.374
16	1.369
18	1.355

W opt = 14.5%

$\gamma d\ max = 1.385\ g/\ cm^3$

avec

- W opt : la teneur en eau optimum
- γd max :Le poids volumique optimum

D'après nos essais en laboratoire, les résultats ont été définis comme suit:

Tableau 3.14 : Caractéristique du sol étudié.

Caractéristiques du sol étudié
% <2µm 32.3%
%80µm =98%
Limite de liquidité W1=76.75%
Limite de plasticité Wp =33.69%
Indice de plasticité IP =43.06%
Valeur de Blue VBS=8.46
Activité d'argile AC= 1.33
Ydmax=1.385g/cm3
Wopt=14.5%
Surface spécifique : 176.22 cm^2
Poids spécifique = 1.56 g/cm^3

- **Les essais principaux (œdométrique)**

L'odomètre utilisé pour réaliser les essais de compressibilité à déformation horizontale nulle compote deux parties:

- une cellule contenant l'éprouvette de sol, un système de mise en charge.



Figure 3.21 : Détail d'un odomètre.

1. Vis de fixation du comparateur.
2. Console coulissante sur(04).
3. Réglage de la hauteur du comparateur.
4. Support rigide du comparateur.
5. Vis de réglage du contre poids.
6. Contre poids.
7. Barre supportant le contre poids.
8. Articulation
9. Vérin de support.
10. Articulation entre la poutre et les plateaux recevant les masses.
11. Comparateur au 1/100 mm
12. Traverse de mise en charge.

- **Cellule œdométrique :**

Deux types de cellules œdométriques sont utilisés à l'heure actuelle. Ils se différencient par le fait que, dans un cas on peut contrôler l'écoulement de l'eau qui sort de l'éprouvette ou la pression de l'eau dans le sol pendant l'essai, tandis que, dans l'autre cas, on ne le peut pas.

-Cellule œdométriques ouvertes, cellules œdométriques fermées.

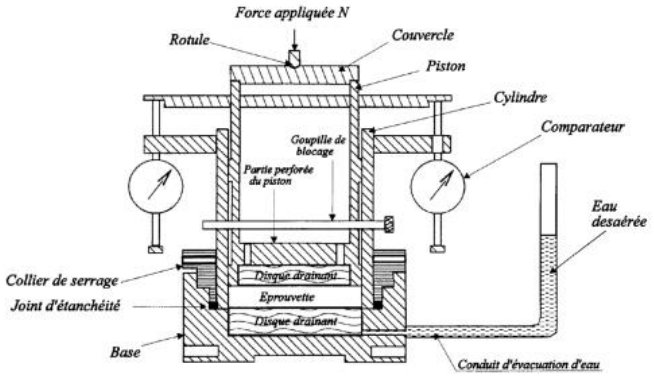


Figure 3.22: Cellule œdométrique type Terzaghi.

Les cellules œdométriques fermées — celles que nous utiliserons dans notre étude — permettent de contrôler la quantité d'eau évacuée de l'éprouvette ou la pression de l'eau dans le sol. Elles se composent de plusieurs éléments :

- Une bague annulaire rigide qui contient l'éprouvette de sol.
- Une embase équipée d'un logement pour la pierre poreuse inférieure ainsi que d'un conduit destiné à l'évacuation de l'eau interstitielle.
- Un piston coulissant à l'intérieur de l'anneau, muni d'un logement pour la pierre poreuse supérieure et d'un conduit d'évacuation de l'eau interstitielle.
- Deux pierres poreuses assurant le drainage des deux faces de l'éprouvette.
- Un comparateur permettant de mesurer les déplacements verticaux du piston.

Les éprouvettes œdométriques ont des dimensions variables selon le matériel utilisé.



Figure 3.23 : Cellule oedométrique fermé.

Les dimensions les plus fréquentes de leur anneau sont les suivantes :

Tableau III.15 : Caractéristique de l'anneau de cellule œdométrique.

Diamètre (mm)	Epaisseur (mm)	Section (mm^2)	Volume (mm^3)
50	20	1963	39250



Figure 3.24: système de la mise en charge

Pour appliquer les charges nécessaires sur le piston de l'odomètre, on utilise principalement :

Des systèmes mécaniques de chargement par poids, en général avec des bras de levier pour augmenter les efforts appliqués

- **Principe d'essai**

Les essais œdométriques permettent d'apprécier la déformation verticale des sols. Le but est de mesurer le potentiel, la pression, l'indice de gonflement au cours du temps d'une éprouvette cylindrique placée dans une enceinte sans déformation latérale possible au fur et à mesure de l'application de différentes charges verticales constantes.

L'éprouvette est saturée d'eau au préalable au premier chargement et étant drainée en haut et en bas, elle est maintenue saturée pendant l'essai.

- **La dame de compactage :**

N'ayant pu trouver un moyen pour compacter le sol dans l'anneau de l'odomètre, nous avons opté à l'utilisation d'une dame de compactage, conçue spécialement au laboratoire, selon les

recommandations des travaux de recherche publiés, voir la figure. La dame de compactage, entièrement usinée en acier, est composée :

- D'un socle de 48,42 mm de diamètre et de 3mm d'épaisseur attaché à une colonne support de guidage de longueur 280mm, à travers laquelle glisse un mouton. Un arrêtoir coulissant le long de la tige permet d'ajuster la hauteur de chute du mouton.
- D'un mouton en forme de disque circulaire de 84.42 mm de diamètre et de 8,40 mm d'épaisseur. Sa masse est de 128g, ayant un perçage centré de 8.45 mm de diamètre.

L'énergie de compactage répercutée à l'éprouvette de sol est égale au travail de lamasse M sur la hauteur H et est donnée par l'expression:

$$E = M \times G \times H$$

Avec:

- M: masse de la dame,
- G: l'accélération de la pesanteur = 9,81 m/s3,
- H: hauteur de chute de la dame.

Le tableau 3.16: indique la correspondance entre le nombre de coups de la dame (N) et l'énergie de compactage E.

Tableau 3.16 : Correspondance entre le nombre de coups et l'énergie de compactage.

Nombre de coups	M (Kg)	G (m/s2)	H (m)	E (joule)
42	**0.128**	**9.81**	**0.25**	**13.184**



Figure 3.25: Dame de compactage.

Préparation de l'échantillon du sol :

Pour tous les essais œdométriques nous préparons les échantillons avec les étapes suivantes

Tableau 3.17: Caractéristique de l'échantillon du sol.

Nombre de coups	Y (g/cm2)	yd(g/cm2)	W(%)
42	1.13	1.385	14.5

Nous avons choisi la masse volumique de y= 1.19g/cm2 car elle est proche de la masse volumique trouvée dans l'essai Proctor.

Notre échantillon du sol plus la teneur en eau est malaxé manuellement dans un mortier en spatule jusqu'à obtention d'un mélange homogène. Nous mettons l'échantillon de sol dans l'anneau

par trois couches on procède au compactage dynamique avec une énergie Ec=7.12, par une dame conçue spécialement au laboratoire avec 42 coups. On les place par ordre: papier filtre à la base de la cellule- l'échantillon- l'autre papier filtre -prière poreuse puis le piston.



Figure 3.26: Quelques-unes étape d'essai œdométrique.

- **Mise en place de l'échantillon du sol dans le moule :**

la cellule est mise en place sur le bâti du chargement de l'odomètre.

-Régler l'horizontalité du bras de levier puis placer le comparateur et le régler à 0.

- **Saturation de l'échantillon du sol :**

La saturation du sol est fait avec le remplir de la cellule œdométrique.

- **Réalisation de l'essai :**

Afin de trouver les trois paramètres du gonflement du sol, nous avons mené quatre essais, chacune avec ses propres étapes sera mentionnée en particulier :

Remarque:

Toutes les échantillons des essais sont préparé par les étapes qui mentionné précédemment pour les sols vierges mais pour les sols traités à la poudre en caoutchouc nous ajoutons chaque fois le pourcentage qui lui est affecté (2%,4%,6%, 8% ,10%).

- **Pour le potentiel de gonflement Nous avons utilisés la méthode de gonflement libre:**

Dans cette essai aucune charge, on pose l'échantillon seulement et on lire la valeur de déplacement vertical par le comparateur avec le respecte le mieux possible des intervalles de temps suivantes :

0s 15s 30s 1min 2min 4min 8min 15min 30min 60min 2h 4h 8h 24h

- **Pour la pression de gonflement nous avons utilisés deux méthodes :**

a- La première méthode de charge constante:

Dans l'essai de la pression de gonflement on pose quatre échantillons du même sol et des mêmes caractéristiques (teneur en eau, énergie de compactage....) et on le charge avec des charges différentes (250 g, 500g, 100g, 1500g) puis on place le comparateur et le régler à 0 et après 24h en lit la valeur finale de déplacement.

b- la deuxième Méthode de gonflement sous charge variable

Cet essai, qui a pour but de la détermination indirect de la pression de gonflement, nécessite plusieurs échantillons identiques préparés dans les mêmes conditions pour chaque sol.il est effectué selon le mode opératoire suivant :

- Préparation de l'échantillon (plusieurs échantillons) et la mise en place dans l'odomètre.
- Humidification des échantillons.
- Pour même échantillon appliqué des charges variables (250, 500, 750, 1000 g) chaque 24 h et prendre les lectures et mesurer Δh soit tassement ou gonflement

Puis en trace la courbe représentant la valeur de Ah . l'abscisse de l'intersection de cette courbe avec la droite (ou Ah = 0) donne la pression de gonflement og .

3.3.3. Caractérisation des paramètres de gonflement par les méthodes indirectes :

Les méthodes indirectes consistent à établir une corrélation entre le taux de gonflement ou la pression de gonflement et quelques paramètres géotechniques faciles à obtenir au laboratoire. Ainsi, après avoir déterminé les paramètres géotechniques du sol, l'emploi de formules empiriques permet de connaître rapidement le potentiel de gonflement du sol, c'est-à-dire d'estimer ou de quantifier le gonflement et (ou) la pression de gonflement qui peuvent se développer en cas de variations des conditions hydriques et (ou) mécaniques.

- **D'après seed et al (1962) :**

Tableau 3.18: potentielle de gonflement D'après seed et al (1962).

IP (%)	G (%)	Potentielle de gonflement
>35	>25	Très élevé
20 à 35	5 à 25	Élevé
10 à 20	1,5 à 5	Moyen
0 à 10	0 à 1,5	Faible

>35 % ce qui indique que notre Potentielle de gonflement est Très élevé.

- **D'après BRE (1980):**

Tableau 3.19: potentielle de gonflement D'après holtz BRE (1980).

IP (%)	%<2µm	Potentielle de gonflement
>35	>95	Très élevé
23 à 35	60à95	Élevé
18 à 20	30à60	Moyen
<18	<30	Faible

Dans notre cas l'indice de plasticité IP = 46,15 % qui est classer dans le tableau D'après BRE (1980) >35%, et les particules %< 2µm =47,85% qui est classer dans le tableau D'après BRE (1980) %<2µm 30 a 60 ce qui indique que notre Potentielle de gonflement est élevé.

D'après (Skempton, 1953).

Tableau 3.20 Des sols suivant leur activité Ac (Skempton, 1953).

Activité Ac	Type sol
0,50 -0,75	Sol inactif
0,75 -1,25	Sol normal
1,25-2,00	Sol actif
>2	Sol très actif

Dans notre cas Activité Ac= 0,96 qui est classer dans le tableau D'après (Skempton, 1953) 0,75 >Ac> 1,25 ce qui indique que notre Type sol est un Sol normal.

- **D'après Lautrin (1989)**

Avec C2 teneur en éléments de dimensions <2 µm (%) et VBS (0/D) en g/100g de sol

Tableau 3.21: Activité au bleu Acb des argiles d'après Lautrin (1989)

Acb	Type d'argile	Classe
0 à 1	Sol non argileux	1
1 à 3	Argiles inactives	2
3 à 5	Argiles peu actives	3
5 à 8	Argiles normales	4
8 à 13	Argiles actives	5
13 à 18	Argiles très actives	6
> 18	Argiles nocives	7

Dans notre cas Activité au bleu des argiles Acb= 13,01 qui est classer dans le tableau d'après Lautrin (1989) ce qui indique que notre type d'argile est un Argiles très actives et classe 6.

D'après Ghen (1988):

WL (%)	%<80µm	Pression de gonflement(Mpa)	Potentielle de gonflement
>60	>95	1	Très élevé
40 a 60	60 a 95	0,25 a 0,5	Élevé
30 a 40	30 a 60	0,15 a 0,25	Moyen
<30	<30	<0,05	Faible

Dans notre cas l'indice de liquidité WL =95,08% et les particules %< 80µm = 97,20 %, qui est classer dans le tableau D'après Ghen (1988) >60% et %<2µm >95% ce qui indique que notre Potentielle de gonflement est Très élevé.

- **D'après Dakshanamurthy et Raman (1973) :**

Tableau3.22: Potentielle de gonflement d'après Dakshanamurthy et Raman (1973).

WL(%)	Classification
0 à 20	Non gonflant
20 à 35	Gonflement faible
35 à 50	Gonflement moyen
50 à 70	Gonflement élevé
70 à 90	Gonflement très élevé
>90	Gonflement critique

Par la méthode indirecte (schéma limite d'Atterberg)

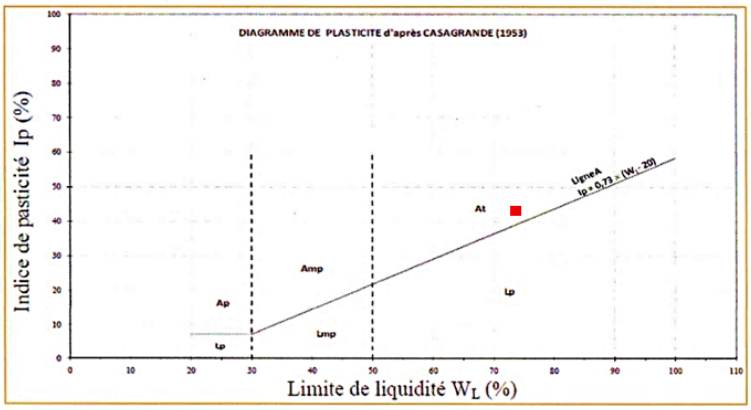


Figure 3.27: Diagramme de plasticité [19]

Notre sol est dit gonflante a classé At

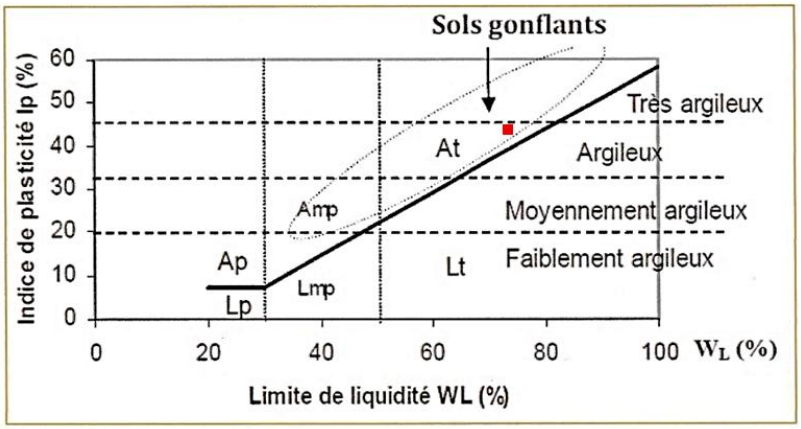


Figure 3.28: Diagramme de Casagrande remanié en 1973

D'après la figure notre sol est argileux a classé At

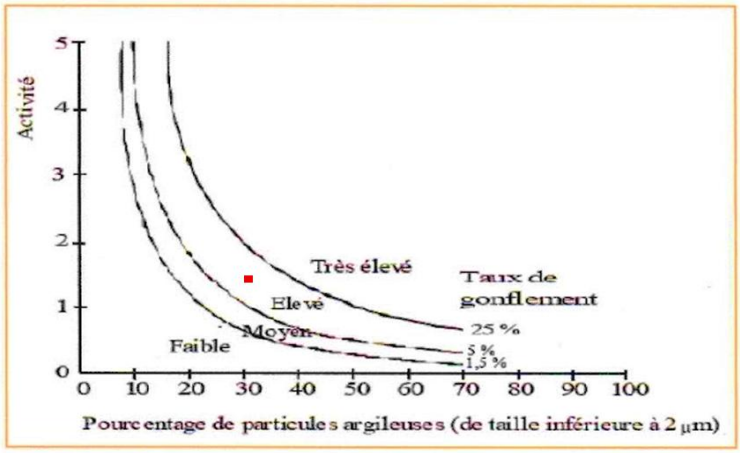


Figure 3.29: Diagramme de classification du potentiel de gonflement. [18]

3.3.4. Conclusion

Après avoir mené les expériences nécessaires pour identifier les sols et observé les propriétés de ces sols, nous avons appris à connaître les types de sols et nous avons constaté que le type de sol étudié était l'Illite.

Chapitre IV:

Résultats œdométrique et interprétation

Chapitre IV : Résultats œdométrique et interprétation

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats des essais au laboratoire réalisés sur des échantillons reconstitués pour déterminer les paramètres de gonflement des sols étudiés. Trois paramètres sont déterminés pour qualifier le gonflement, le taux de gonflement libre$\varepsilon g = \frac{\Delta h}{h}$, la pression de gonflement (σg ou Pg), qui est la pression qu'il faut appliquer à 1 échantillon pour empêcher son gonflement lors de l'humidification, et l'indice de gonflement (Cg ou Cs) qui traduit l'importance de la déformation de gonflement induit par un déchargement par rapport à un état de contraintes donnée.

Formulation de caractéristiques pour sol - sol traité :

Tableau 4 .1: formulations des caractéristiques des sol vierge et traité.

Caractéristiques	Sol	Sol aux poudres de caoutchouc						
W (%)	14.5	14.5						
Γd	1.374	1.374						
Poudres de caoutchouc (%)	0	2	4	6	8	10	12	14

IV.2 Mesure du taux de gonflement libre Ɛg

Ce paramètre correspond à la variation relative de hauteur d'une éprouvette soumise à une surcharge nulle ou quasi-nulle (poids du piston de l'odomètre et la pierre poreuse) lors qu'elle est progressivement saturée en eau jusqu'au stabilisation du phénomène de gonflement (généralement en compte 24heures).

La valeur finale des gonflements après stabilisation permet de calculer la variation relative de hauteur ou de volume de l'échantillon notée $\varepsilon g = \frac{\Delta h}{h}$.

Nous avons réalisé une série d'essai sur huit échantillons de 20 mm d'épaisseur avec la teneur en eau optimale et a une énergie de compactage de 42 coups qui nous a donné une densité proche de celle trouvé par l'essai de Proctor comme indiqué dans le tableau 4.1

4.2.1 Sol vierge non traité

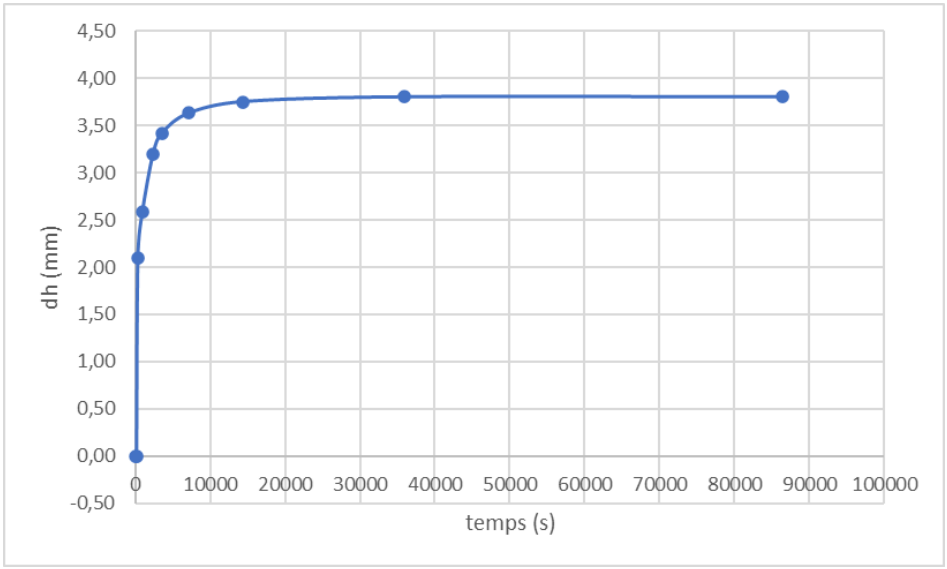


Figure 4.1: variation de gonflement pour le sol vierge en fonction de temps

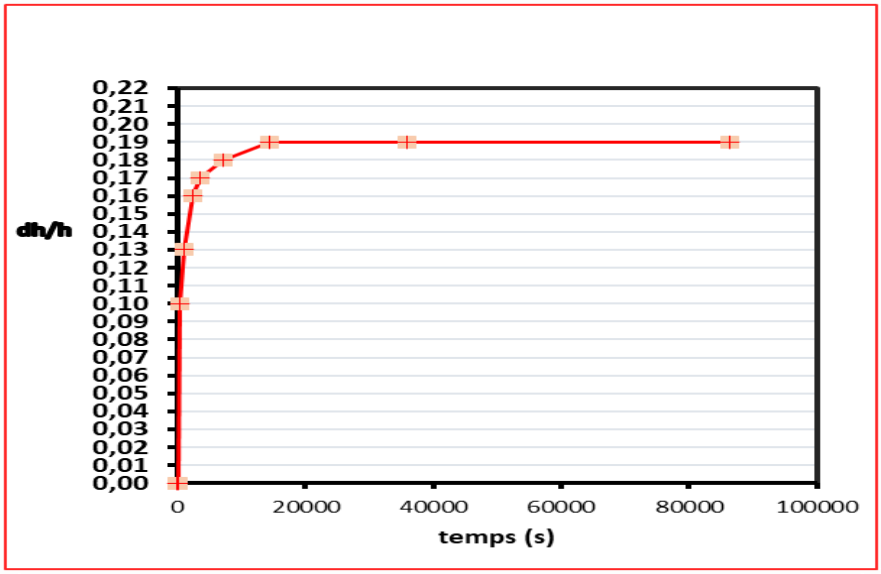


Figure 4.2 : potentiel de gonflement pour sol vierge en fonction de temps.

Les résultats obtenus montrent que le cinétique du gonflement passe par deux phases essentielles :

La première phase allant de 0 à 60 minute (1 heure): la courbe présente une ponte très élevée, cela signifie que le taux de gonflement croit rapidement avec l'hydratation du sol dans un temps

relativement court et qui se termine au bout d'une heure. Dans cette phase on remarque que le taux de gonflement atteint la majeure partie de son gonflement $\frac{\Delta h}{h} = 17\%$

La deuxième phase, allant de 1 heure à 24heures ; est marqué par une pente faible et moins élevée et étalé pouvant que la quasi-totalité du gonflement soit faible dans la deuxième phase et que sol s'arrête de se gonfler et se stabilise après 24 heures et que le taux de gonflement atteint sa valeur maximale après la stabilisation $\frac{\Delta h}{h} = 19\%$

Sol traité aux poudres de caoutchouc

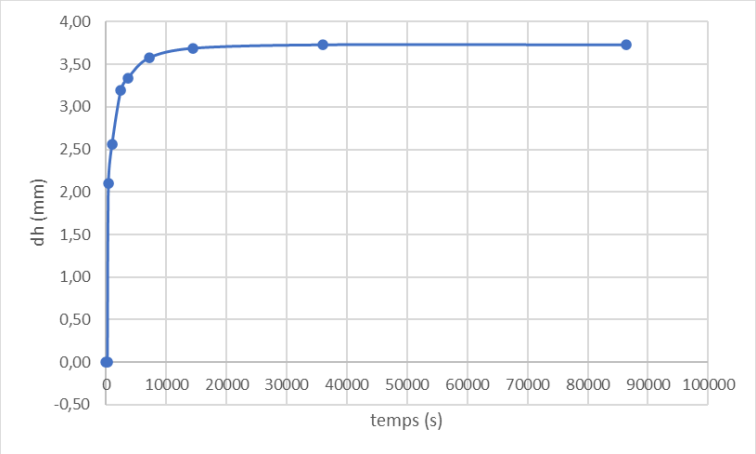


Figure 4 .3: variation de gonflement pour le sol étudié+ 2% de poudre en caoutchouc en fonction de temps.

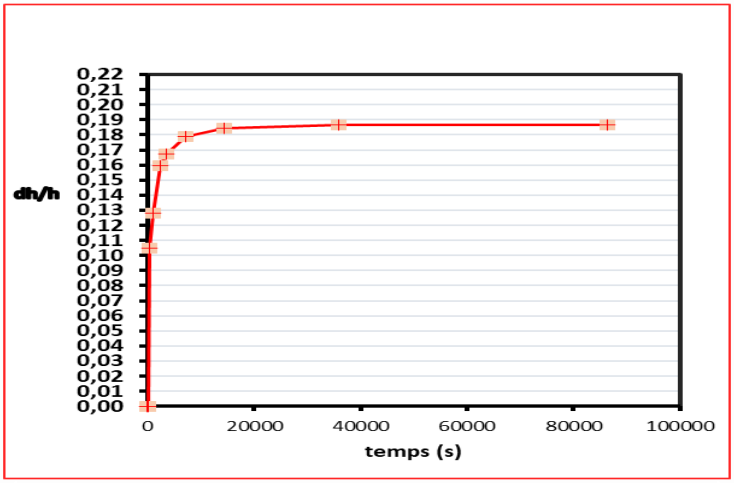


Figure4 .4: potentiel de gonflement pour le sol étudié+ 2% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.

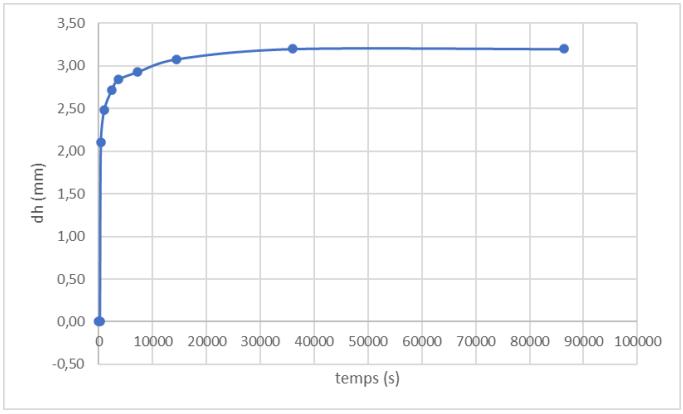


Figure 4.5: variation de gonflement pour le sol étudié+ 4% de poudre en caoutchouc en fonction de temps.

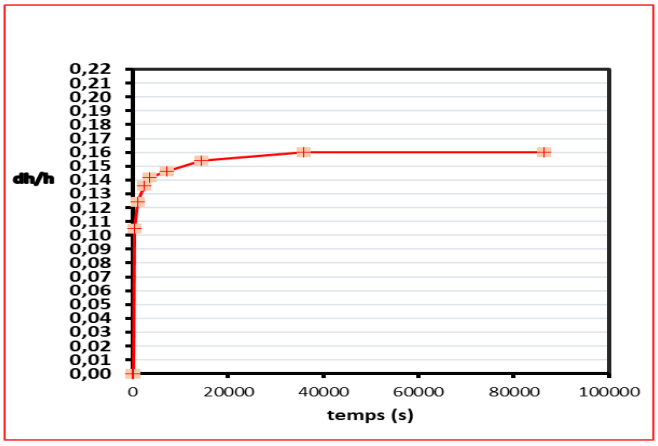


Figure 4.6: potentiel de gonflement pour le sol étudié+ 4% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.

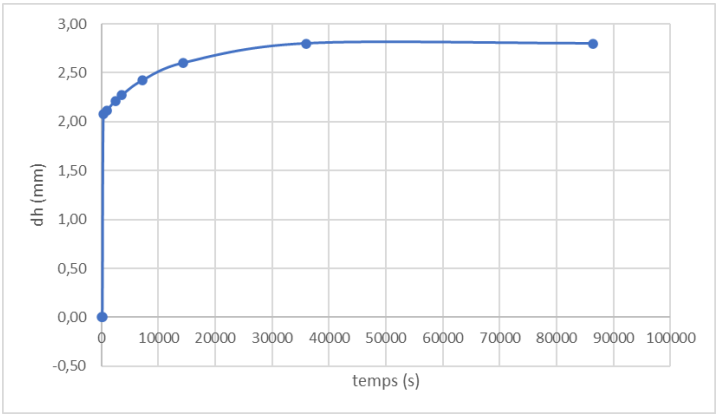


Figure 4.7: potentiel de gonflement pour le sol étudié+ 6% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.

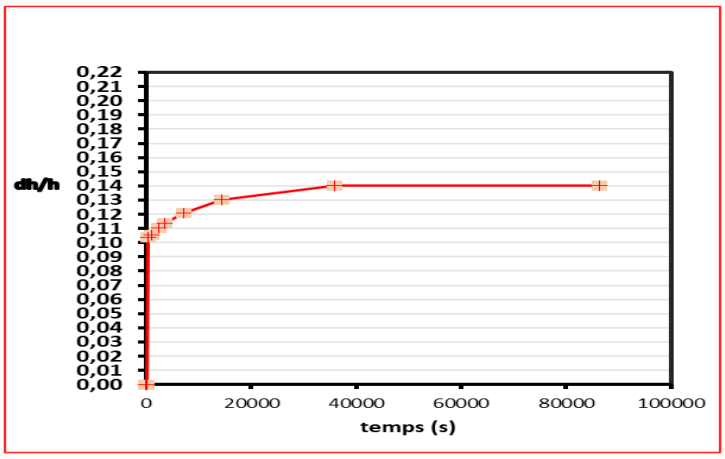


Figure 4.8 potentiel de gonflement pour le sol étudié+ 6% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.

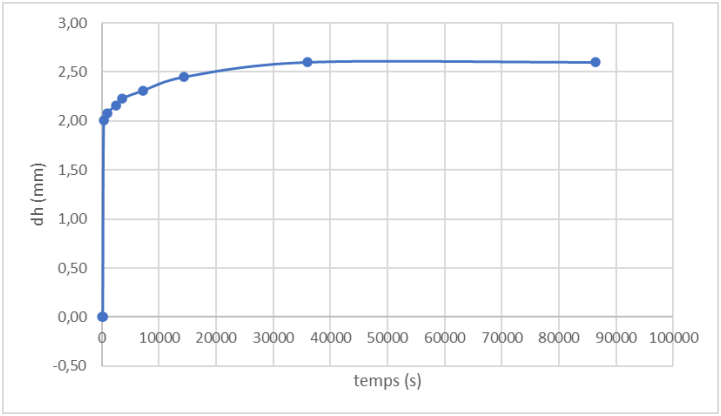


Figure 4 .9: potentiel de gonflement pour le sol étudié+ 8% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.

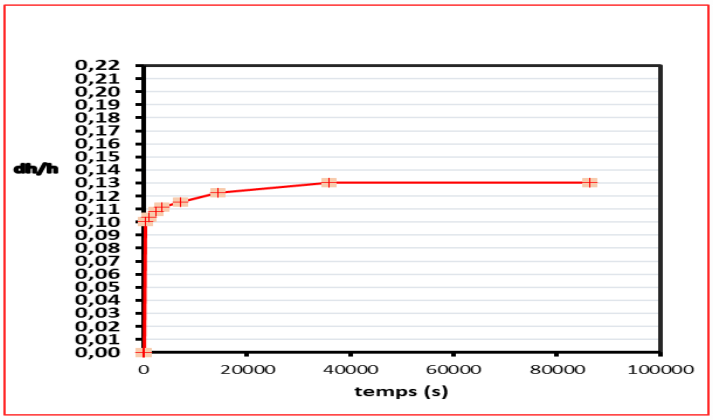


Figure 4 .10 potentiel de gonflement pour le sol étudié+ 8% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.

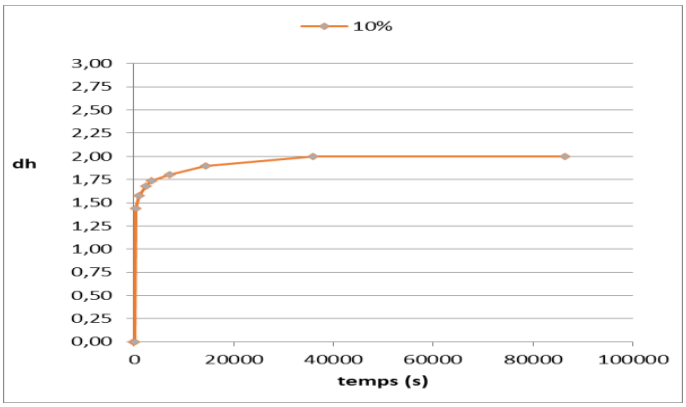


Figure 4.11: potentiel de gonflement pour le sol étudié+ 10% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.

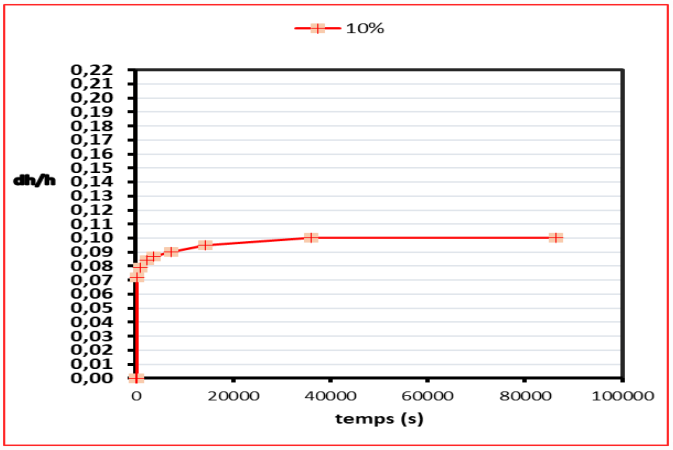


Figure 4 .12 potentiel de gonflement pour le sol étudié+ 10% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.

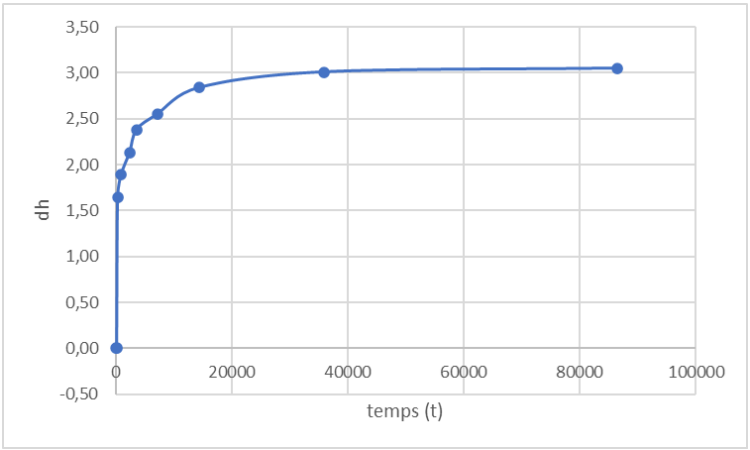


Figure 4.13: potentiel de gonflement pour le sol étudié+ 12% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.

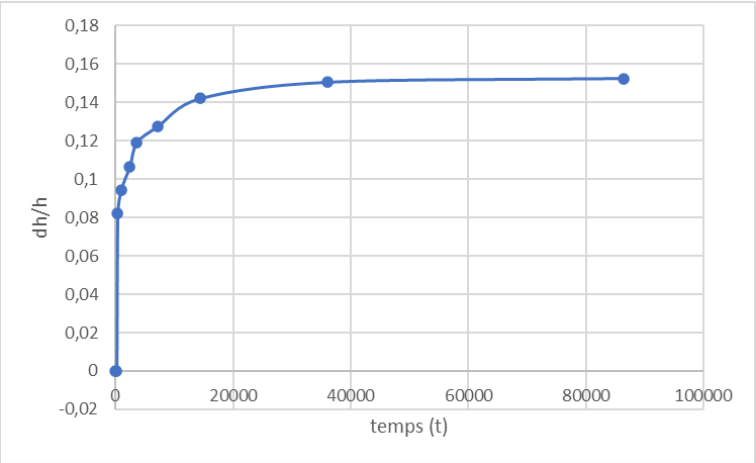


Figure 4.14 potentiel de gonflement pour le sol étudié+ 12% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.

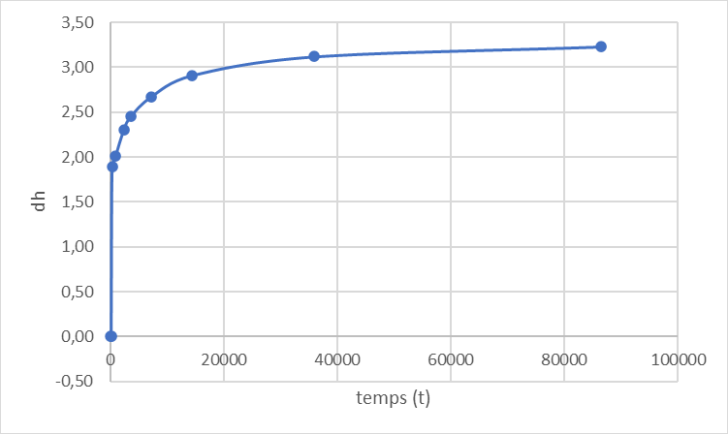


Figure4.15: potentiel de gonflement pour le sol étudié+ 14% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.

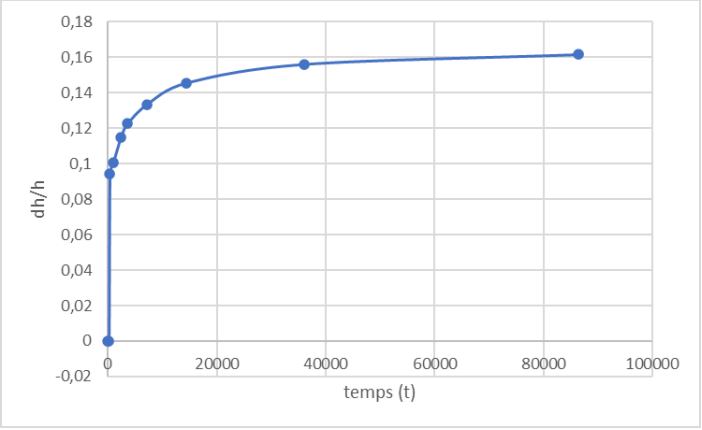


Figure 4.16 potentiel de gonflement pour le sol étudié+ 14% de la poudre en caoutchouc en fonction de temps.

Les figures (IV.3, IV.4, ... IV.16) représentent l'évolution du gonflement des sol traités en fonction de temps. On constate que, comme dans le cas du sol non traité, le gonflement se pro progressivement en fonction de l'évolution du temps de la stabilisation de l'échantillon. Le ciné de gonflement est semblable au cas précédent du sol non traité.

Pour le sol traité à 2 % la poudre en caoutchouc, la première phase de gonflement s'achève au d'une heure en atteignant 16 % et la valeur du taux de gonflement après stabilisation (24 d'environ 18%.

Pour le sol traité à 4 % la poudre en caoutchouc, la première phase de gonflement s'achève au d'une heure en atteignant 13 % et la valeur du taux de gonflement après stabilisation (24 d'environ 16%

Pour le sol traité à 6 % la poudre en caoutchouc, la première phase de gonflement s'achève au d'une heure en atteignant 12 % et la valeur du taux de gonflement après stabilisation (24 d'environ 14%.

Pour le sol traité à 8 % la poudre en caoutchouc, la première phase de gonflement s'achève au d'une heure en atteignant 11 % et la valeur du taux de gonflement après stabilisation (24 d'environ 13%

Pour le sol traité à 10 % la poudre en caoutchouc, la première phase de gonflement s'achève au d'une heure en atteignant 08 % et la valeur du taux de gonflement après stabilisation (24 d'environ 10%.

Pour le sol traité à 12 % la poudre en caoutchouc, la première phase de gonflement s'achève au d'une heure en atteignant 13 % et la valeur du taux de gonflement après stabilisation (24 d'environ 15%.

Pour le sol traité à 14 % la poudre en caoutchouc, la première phase de gonflement s'achève au d'une heure en atteignant 14 % et la valeur du taux de gonflement après stabilisation (24 d'environ 16%.

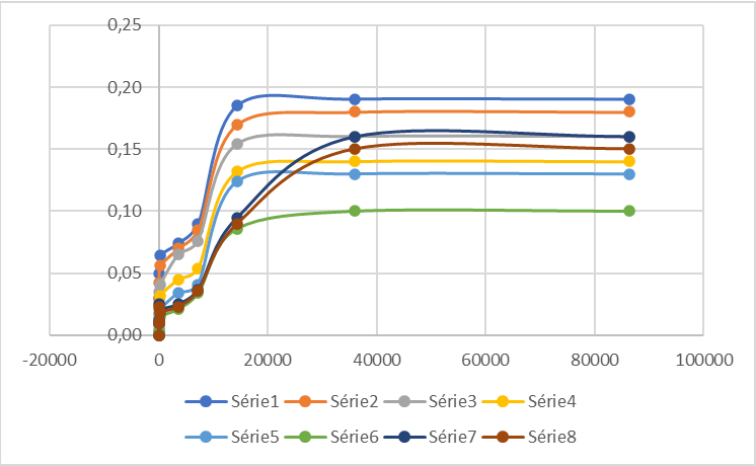


Figure 4.17: Courbe de le potentiel (le taux) de gonflement

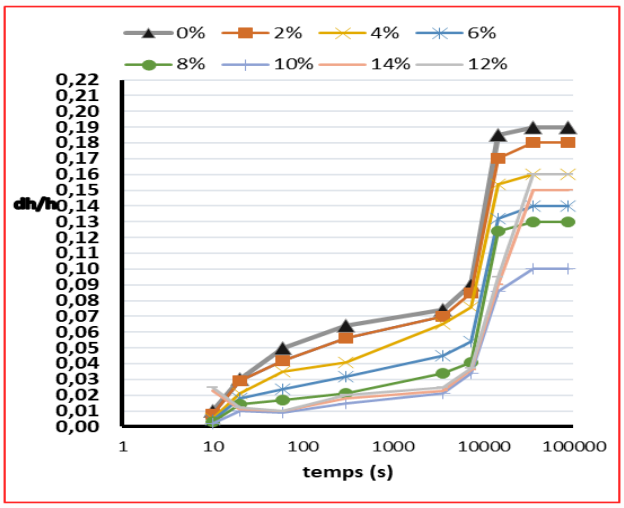


Figure 4.18: Courbe de le potentiel (le taux) de gonflement

La figure (IV.19) représente l'évolution du taux de gonflement en fonction de temps à l'échelle logarithmique pour les huit sols regroupés. La courbe obtenue montre que le gonflement se produit suivant deux phases :

Phase de gonflement primaire : qui se traduit par un gonflement constant et une déformation volumique faible due et observe un amortissement du gonflement

Phase de gonflement secondaire : on remarque qu'il y a dans cette phase, un amortissement de gonflement, le sol est complètement saturé et les grandes déformations .

Le tableau (IV.2) montre l'effet du pourcentage de la poudre en caoutchouc sur la valeur du taux de gonflement.

Tableau 4.2: Taux de réduction par rapport au sol non traité

Sol	Potentiel de gonflement (%)	Taux de réduction par rapport au sol non traité
Sol vierge	19	/
Sol +2% poudre en caoutchouc	18	26
Sol +4% poudre en caoutchouc	16	30
Sol +6% poudre en caoutchouc	14	33
Sol +8% poudre en caoutchouc	12	37
Sol +10% poudre en caoutchouc	10	49
Sol +12% poudre en caoutchouc	15	32
Sol +14% poudre en caoutchouc	16	30

le traitement en poudre en caouetchouc de 10% c'est le plus efficace pour reduire le potentiel de gonflement et le taux de reduction par rapport au sol non traité.

4 .2.3. L'effet de la teneur en eau du sol traité

Il y a deux pourcentages de teneur en eau 12% et 16% 14.5%

Tableau 4.3: L'effet de la teneur en eau du sol traité

w%	12%	14.5%	16%
Δh (mm)	1.93	2	2.9
Δh/h %	9.6	10	14.5

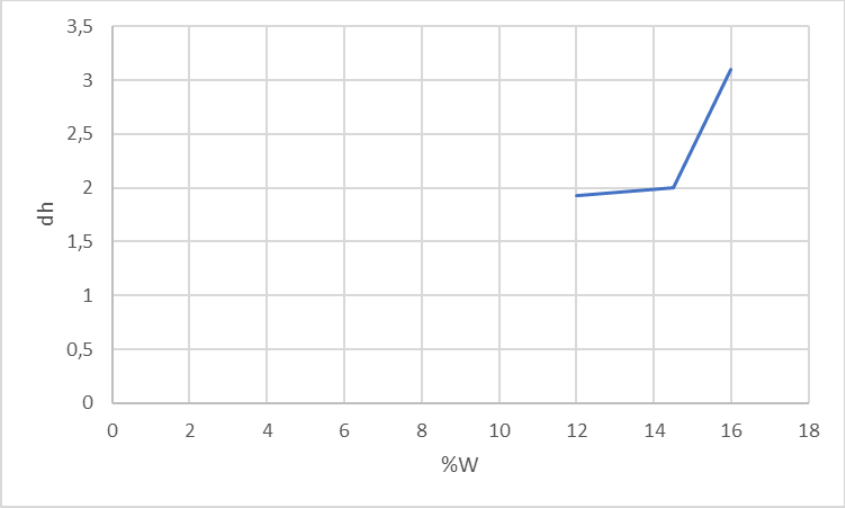


Figure 4.19 : courbe de la variation de Δh en fonction de teneur en eau

Cette partie de cette présente étude vise à déterminer l'influence de la teneur en eau initiale sur le potentiel de gonflement du sol étudié, traité avec 10% de poudre de caoutchouc, en testant trois teneurs en eau distinctes (12, 14.5 et 16%) avec une énergie de compactage de 42 coups.

Les résultats obtenus sont montrés dans la figure 4. 19.

On a observé que le potentiel de gonflement croit légèrement avec l'augmentation de la teneur en eau initial. Cette observation suggère que, pour des teneurs en eau proches de la teneur en optimale, l'impact sur le potentiel de gonflement n'est pas significatif.

4 .2.4. L'effet de l'Energie de compactage

Il y a deux valeurs d'énergie de compactage 22 et 62 coups 42

Tableau 4.4: L'effet de l'Energie de compactage

Nombre de coups n	22	42	62
Δh (mm)	1.87	2	3.1
Δh/h %	9.3	10	15.5

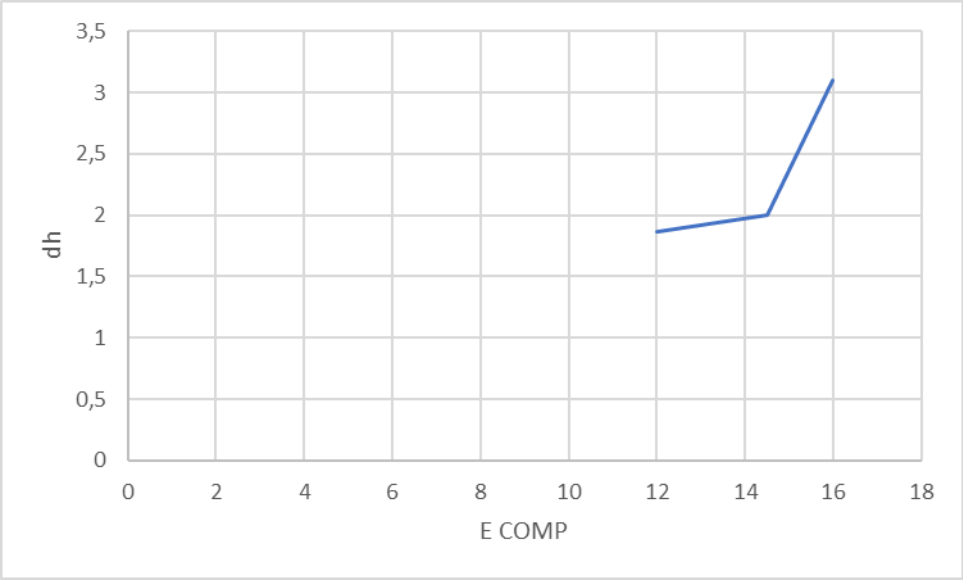


Figure courbe 4 .20 : de la variation de Δh en fonction d'Energie de compactage

Pour évaluer l'influence de l'énergie de compactage sur le potentiel de gonflement du sol traité avec 10% de poudre de caoutchouc nous avons sélectionné trois énergies de compactage différentes (22, 42 et 62 coups) avec la teneur en eau optimale.

Les résultats obtenus sont montrés dans la figure 4. 20.

Nous avons constaté que l'augmentation du potentiel de gonflement est directement liée à l'augmentation de l'énergie de compactage. Cette relation s'explique par le fait qu'un compactage accru conduit à une densification du matériau (augmentation du poids volumique), ce qui concentre davantage l'argile responsable du gonflement.

4.2.4 Mesure de la pression de gonflement

La pression de gonflement est définie comme la pression générée par un sol argileux lors de son hydratation en milieu confié et dans un état physique initial connue. Pratiquement, elle est défini comme la contrainte à exercé pour empêcher le gonflement d'un échantillon argileux pendant l'imbibition et son distorsion.

Deux méthodes ont été utilisée, dans cette étude, pour la détermination de la pression de gonflement de sol vierge non traité, la méthode de gonflement à volume contant et la méthode du gonflement sous charge constante dite méthode en parallèle.

4.2.5 Méthode de gonflement sous charges constantes

Cet essai, qui a pour but de la détermination indirect de la pression de gonflement ,nécessite au mois quatre échantillons identiques préparés dans les mêmes conditions pour chaque sol.il est effectué selon le mode opératoire suivant :

- Préparation de l'échantillon (au moins quatre) et la mise en place dans l'odomètre.
- Humidification des échantillons.
- Applications des charges verticales initiales différents et croissantes à l'état saturé (0.25,0.5; 1:1.5Kg).

Mesure, pour chaque échantillon la variation Ah (tassement ou gonflement) jusqu'à la stabilisation (après 24heure).

Puis en trace la courbe (droite) représentant la valeur de Δh à la stabilisation en fonction de la charge appliquée. l'abscisse de l'intersection de cette courbe avec la droite (ou $\Delta h = 0$) donne la pression de gonflement σg .

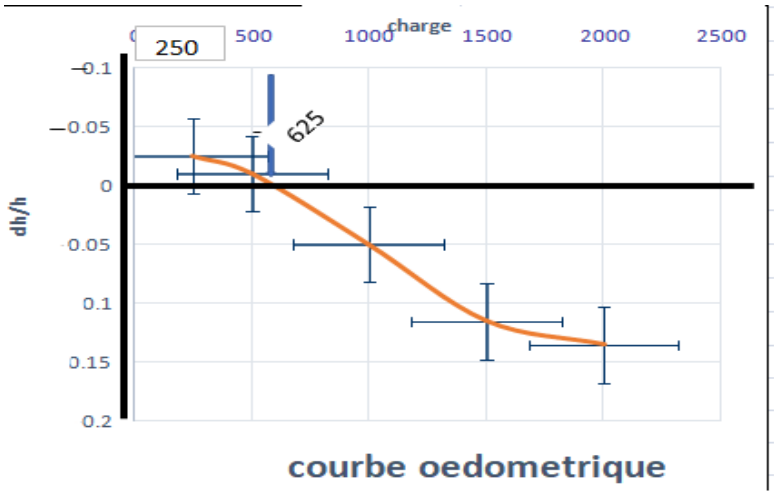


Figure 4.21 : courbe de la pression de gonflement pour le sol vierge en fonction des charges

D'après la courbe et l'interpolation linéaire on a obtenir la pression de gonflement :

500 g <p<100 g p=625 g = 0.625 × 10 =6.25 kg avec

$$\sigma g = \frac{P}{A} = \frac{6.25}{19.63} = \frac{0.3184kg}{cm^2} = 31.84kpa{\sim}32kpa$$

p: la charge correspond $\Delta h = 0$

Sol étudié sol vierge

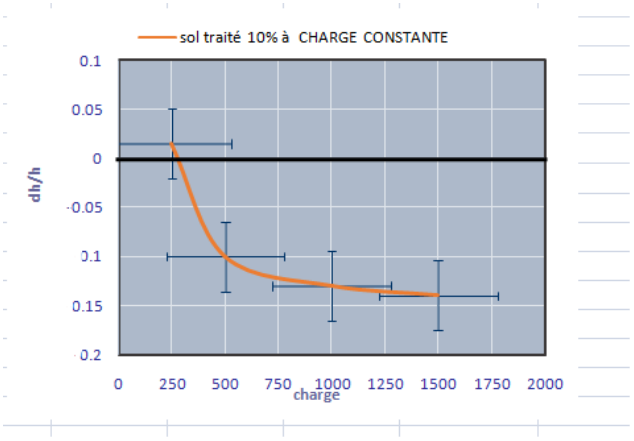


Figure 4.22: courbe de la pression de gonflement pour le sol étudié +10% poudre en caoutchouc en fonction des charges.

D'après la courbe et l'interpolation linéaire on a obtenir la pression de gonflement :

250 g <p<500 g p=290 g = 0.290 × 10 =2.9 kg avec

$$\sigma g = \frac{P}{A} = \frac{2.9}{19.63} = 0.1477 kg/cm^2 = 14.77 kpa \sim 15 kpa$$

p: la charge correspond Δh=0

Sol étudié +10% poudre en caoutchouc

Les figures (4.13, 4.14...4.16) présentent les résultats des essais de gonflement sous charges constantes. Le tableau (IV.4) regroupe les résultats des essais de pressions de gonflement des deux sols. On constate que la pression de gonflement varie entre 32 et 15 kPa.

Tableau 4 .5 : Taux de réduction de la pression par rapport au sol non traité.

Sol	Les charges (kg)	Δh (mm)	σg (Kpa)	Taux réduction par rapport au sol non traité
Sol vierge	6.25	0	32	/
Sol +10% poudre en caoutchouc	2.90	0	15	52

4.2.7 Effet du pourcentage de poudre en caoutchouc sur la pression de gonflement

Les résultats obtenus sur les huit sols étudiés montrent des pressions de gonflements très différents. Cette variabilité est reliée au pourcentage de poudre en caoutchouc dans chaque sol. La pression de gonflement la plus élevé est donnée par le sol vierge non traité, à noter 6g = 32 KPa. On constate que la pression de gonflement diminue avec l'accroissement de la quantité de poudre en caoutchouc. Elle passe de 32KPa par sol non traité à 15 KPa pour le sol traité par 10% de poudre en caoutchouc, ce qui correspond à une réduction de 52%

Le tableau (IV.5) présente les valeurs des pressions de gonflement des 8 sols et le taux de réduction d'un sol traités par rapport au sol non traité.

Tableau 4.6: Les valeurs des pressions de gonflement des 4 sols et le taux de réduction d'un sols traités par rapport au sol non traité.

Sol	σg (Kpa)	$\frac{\Delta h}{h}$ (mm)	Taux réduction
Sol vierge	32	0.19	0
Sol +10% poudre en caoutchouc	15	0.10	50

4 .2.8. Méthode de gonflement sous charge variable

Cet essai, qui a pour but de la détermination indirect de la pression de gonflement, nécessite deux échantillons (traité 10% poudre en caoutchouc et sol vierge) préparés dans les mêmes conditions pour chaque sol.il est effectué selon le mode opératoire suivant :

- Préparation de l'échantillon (plusieurs échantillons) et la mise en place dans l'odomètre.
- Humidification des échantillons.
- Pour même échantillon appliqué des charges variables (250, 500, 750, 1000 g) chaque 24 h et prendre les lectures et mesurer Δh soit tassement ou gonflement

Puis en trace la courbe représentant la valeur deΔh. l'abscisse de l'intersection de cette courbe avec la droite (ou $\Delta h = 0$) donne la pression de gonflement og .

- Pour sol vierge

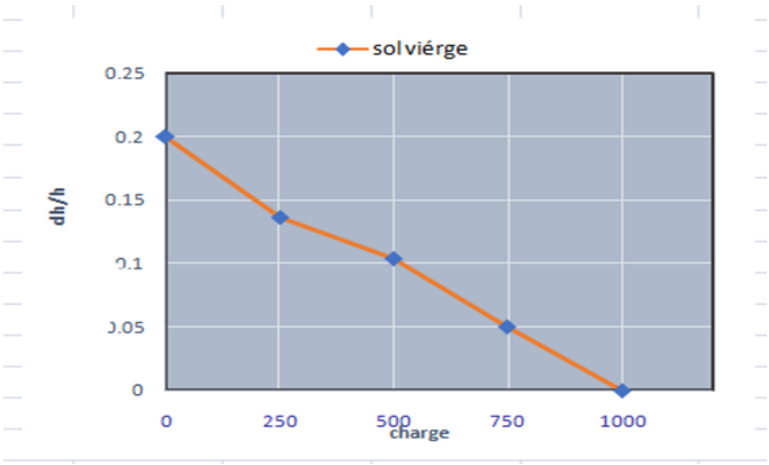


Figure 4.23 : courbe de la pression de gonflement pour le sol vierge en fonction des charges variables

D'après la courbe nous trouvons la formule suivante

$\Delta h = 0$ p=1000 g = 1 × 10 =10 kg avec

$$\sigma g = \frac{P}{A} = \frac{10}{19.63} = 0.509 kg/cm^2 = 50.94 kpa \sim 51 kpa$$

p: la charge correspond Δh=0

- Pour sol traité a 10% poudre en caoutchouc

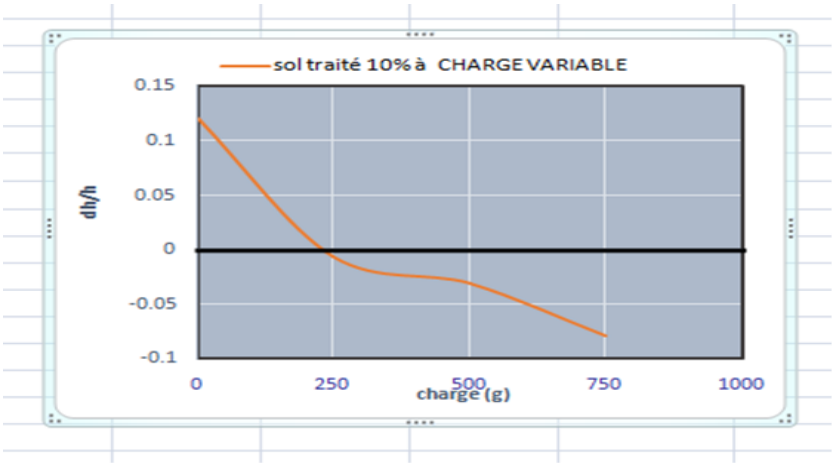


Figure 4 .24: courbe de la pression de gonflement pour le sol étudié +10% poudre en caoutchouc en fonction des charges variables

0 g <p<250 g p=229 g = 0.229 × 10 =2.29 kg avec

$$\sigma g = \frac{P}{A} = \frac{2.29}{19.63} = 0.1166 kg/cm^2 = 11.66 kpa \sim 12 kpa$$

p: la charge correspond Δh=0

Les figures (4.13, 4.14...4.16) présentent les résultats des essais de gonflement sous charges variables . Le tableau (IV.4) regroupe les résultats des essais de pressions de gonflement des deux sols. On constate que la pression de gonflement varie pour sol non traité 51kPa² et sol traité 10% 12 kPa.

Tableau 4.7: Taux de réduction de la pression par rapport au sol non traité des charges variables

Sol	Les charges (kg)	Δh (mm)	σg (Kpa)	Taux réduction par rapport au sol non traité
Sol vierge	1	0	51	/
Sol +10% poudre en caoutchouc	0.229	0	12	80%

4 .2.9. Effet du pourcentage de poudre en caoutchouc sur la pression de gonflement

Les résultats obtenus sur les huit sols étudiés montrent des pressions de gonflements très différents. Cette variabilité est reliée au pourcentage de poudre en caoutchouc dans chaque sol. La pression de gonflement la plus élevé est donnée par le sol vierge non traité, à noter 6g = 51 KPa. On variables que la pression de gonflement diminue avec l'accroissement de la quantité de poudre en caoutchouc. Elle passe de 51 KPa par sol non traité à 12 KPa pour le sol traité par 10% de poudre en caoutchouc, ce qui correspond à une réduction de 80%

Le tableau (IV.5) présente les valeurs des pressions de gonflement des 2 sols et le taux de réduction d'un sol traités par rapport au sol non traité.

Tableau 4.8: Les valeurs des pressions de gonflement des 4 sols et le taux de réduction d'un sols traités par rapport au sol non traité.

Sol	σg (Kpa)	$\frac{\Delta h}{h}$ (mm)	Taux réduction
Sol vierge	51	0.20	0
Sol +10% poudre en caoutchouc	12	0.12	44%

D’après la figure le potentiel de gonflement est élevé.

Ces résultats traduisent l’importance influence du pourcentage de la poudre en caoutchouc sur la performance des sols gonflants.

On consiste qu’il n’y a une corrélation entre le taux de gonflement et la pression de gonflement en fonction du pourcentage de la poudre en caoutchouc ajouté. Chaque accroissement dans la quantité de de la poudre en caoutchouc conduit à une réduction dans les deux paramètres de gonflement $\varepsilon g \; et \; \sigma g$

A titre d’exemple, un traitement 10% de la poudre en caoutchouc donne une amélioration remarquable et importante. On remarque une réduction de 50% sur le taux de gonflement et plus de 80% sur la pression de gonflement par rapport au sol non traité.

Et même entre la charge constante et la charge variable la déférence de pression est remarquable et importante.

4.3. Interprétation des résultats

Le gonflement se produit progressivement en fonction de l’évolution de la saturation dans la structure argileuse.

Les courbes obtenues montrent que le gonflement se produit dans deux phases. Dans la phase primaire, le gonflement se produit massivement et progressivement quand les particules d’eau atteint les feuillets d’argile d’où on remarque une déformation volumique importante de l’échantillon

Dans la deuxième phase de gonflement on registre un amortissement de gonflement et l’échantillon est complément saturé et les reste de déformation est liée au réarrangement de particules de l’argile.

Nous remarquons que la tendance de la variation de gonflement dans le temps est la même pour l’échantillon non traité et les échantillons traité par les déférent pourcentage de caoutchouc.

D’après les paragraphes plus les pourcentages de caoutchouc augmentent, pour les pourcentages de 2% jusqu’à 10 % dépassant 10% de caoutchouc on observe que le taux de gonflement commence a augmenter de nouveau.

On constate que la réduction peut atteindre 49% pour le sol traité par 10% de caoutchouc pour 12% et 14% de caoutchouc la réduction du taux de gonflement et inferieure a celle de 10%

Conclusion

Conclusion générale

Dans le cadre de cette étude, nous avons mené une investigation expérimentale en laboratoire portant sur le gonflement d'une argile issue de la région de El Kouif – Tébessa – en évaluant l'influence de l'ajout de poudre de caoutchouc en tant que matériaux de stabilisation sur les paramètres de gonflement

Cette étude nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- L'échantillon remanié et reconstitué montre un comportement de gonflement comparable a celui d'un échantillon intact, suggérant que la restriction n'a pas altère de manière significative son comportement de gonflement
- La majorité des méthode indirectes de classification, basée sur les propriétés géotechniques, indiquent que le sol étudié possède un potentiel de gonflement élevé ce pont en accord avec les résultats des essais de gonflement libre réalisé a l'odomètre
- Les résultats expérimentaux ont montré que l'ajout d'un faible pourcentage de poudre de caoutchouc dans le sol induit une réduction significative des paramètres de gonflement, notamment la pression de gonflement et le potentiel de gonflements libre
- L'augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc ou de là de 10 % réduit un effet réversible sur le potentiel de gonflement, caractérisé par une augmentation notable du taux de gonflement du sol étudié.
- Les estimations de la pression de gonflement obtenues par les deux méthodes indirectes, choisis dans cette étude, présentent des écarts significatifs mettant en évidence la nécessité de conduire une investigation approfondie et rigoureuse afin de caractériser avec précision ce paramètre déterminant.
- L'effet des teneurs en eau proches de l'optimale n'est pas remarquable sur le potentiel de gonflement du sol étudié traité avec 10% de poudre de caoutchouc.
- L'augmentation de l'énergie de compactage conduit à une augmentation du potentiel de gonflement du sol étudié traité avec 10% de poudre de caoutchouc.

Bibliographie

Reference bibliographique :

1. BEN RHAIEM H., TESSIER D. & PONS CH.C. (1986) - "Comportement hydrique et évolution structurale et texturale des montmorillonites au cours d'un cycle de dessiccation-humectation : partie I. Cas des montmorillonites calciques". Clay Minerals, vol. 21, pp. 9-29.
2. Berrah, Y. (2017). Étude mécanique et minéralogique des sols gonflants de la région de Tébessa N.E Algérie. THÈSE Présentée en vue de l'obtention du diplome de Doctorat En Géologie, Université de Tébessa. p 25, 32, 33, 34, 35
3. Bledzki, A. K., Gassan, J., (1999).Composites reinforced with cellulose based fibers, Elsevier, Progress in polymer science, volume 24, pp.221-274.
4. Bultel A., van Ootegem B., Bourdon A. et Vervisch P., Influence of Ar+2 in an argon collisional-radiative model, Phys. Rev. E 65, 046406, (2002). page 35
5. CASAGRANDE L. (1953). Electro-osmosis in soils, Géotechnique, n°1, vol. 3, pp. 159-177
6. Chassagneux, D., Stieljes, Les Mouroux, P., Menilliet, Cartographie de l' aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse-pluie) à l"échelle départementale Ducreux, G.H. (1996). Approche méthodologique dans les Alpes de Haute-Provence, Rapport BRGM nR39218, 33
7. Daksanamurty, V., Raman,V. (1973). A simple method of identifying an expansive soil. Soils and Foundation, Jap. Soc. Soil Mech. Found Eng., 13(1):97-104
8. Daksanamurty, V., Raman,V. (1973). A simple method of identifying an expansive soil. Soils and Foundation, Jap. Soc. Soil Mech. Found Eng., 13(1):97-104
9. ENS A. & ALONSO E.E. (1992) - "A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays". Canadian Geotechnical Journal, vol. 29, pp. 1013-1032.
   Tovey, N. K., 1971, CUED / C-SOILS (TR5a, Université de Cambridge, Département
10. GAOMBALET J. (2004) - "Le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains destockage". Thèse de Doctorat, École Polytechnique de Palaiseau, 324 p.
11. GENS A. & ALONSO E.E. (1992) - "A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays". Canadian Geotechnical Journal, vol. 29, pp. 1013-1032.
12. Hamma, M (2007) traitement d'un sol macroporeux par ajout de pouzzolane, mémoire de master géotechnique, Ubiversité de Tebessa P 34 ; 37, 38
13. Holtz W, G., GIBBS, H.B. (1956). Engineering properties of expansive clays, ASCE, vol. 121 présentée en vue de l'obtention du grade de docteur de 1'I.N.P.L. Institut nationale supérieur de géologie, France, p20-22

14. Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M., Gorga, R.E., Review article: polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: an overview. J Compos Mater 40(2006): 1511–1565.
15. Lauren, D 1989 utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène, bull de liaison des ponts et chassées °]88 pp 136-147
16. M. Bekhiti, H. Trouzine, F. Belabdelouahab, (2016). Influence des fibres de caoutchouc sur le potentiel de gonflement des argiles. Journée d'Étude Scientifique et Technique sur les Produits Géosynthétiques, Ouargla, Algeria.
17. Magnan, J.P. (2013) Panorama des sols gonflants en géotechnique. Université Paris-Est, IFSTTAR, Marne-la- Vallée, France. P 89, 95, 96
18. Magnan, J.P. (2013) Panorama des sols gonflants en géotechnique. Université Paris-Est, IFSTTAR, Marne-la- Vallée, France. P 89, 95, 96
19. Mezghiche, 1996 « résistance et déformabilité de béton basique » premier séminaire national en génie civil Biskra, 8-9 décembre
20. MITCHELL J.K (1993) - "Fundamentals of soil behaviour". John Wiley and Sons, Inc., New York,ISBN : 0-471-85640-1.
21. Mitchell, J.K. (1976). Fundamentals of soil behavior, lère edition, John Wiley and sons, New York, 437
22. Moore, D. M., Reynolds, R. C. (1989). "X-Ray Diffraction and the identification and analysis of Clay Minerals.' Oxford University Press: 378.
23. Nelson D., et Miller D. J (1992), "Expansive soils problems and practice in foundation and pavement engineeringl, Edition John Wiley et Sons, INC
24. Nowamooz, H. (2007). Retrait gonflement des sols argileux compactes et naturels. Thèse
25. Park, S.S., Effect of fiber reinforcement and distribution on unconfined compressive strength of fiber reinforced cemented sand. Geotextiles and Geomembranes, 27, No. 2(2009), 162–166.
26. SAIYOURI N. (1996) - "Approche microstructurale et modélisation des transferts d'eau et du gonflement dans les argiles non saturées". Thèse de Doctorat, École Centrale de Paris, 228 p.
27. SAIYOURI N. (1996) - "Approche microstructurale et modélisation des transferts d'eau et du gonflement dans les argiles non saturées". Thèse de Doctorat, École Centrale de Paris, 228 p.

28. Seed, H.B., Woodwaerd, R.J., Lundgren, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays, Journal of the Soil Mecanics and Foundation Division, Proceedings ot the American Society of Civil Engineers, Vol. 88, pp. 53-88,
29. Skempton, A,W (1984) the colodial activity of calys in Skempton, A,W, ed selected papers on soil mechanics london, Thomas Telford Limited p 281.
30. Snethen, D,R (1980) expansive soil in high way subgrades, Report FHWA-TS-80-236
31. Snethen, D,R (1980) expansive soil in high way subgrades, Report FHWA-TS-80-236
32. Tangi, L. B. (2010). Caract_erisation et quanti_ cation des _ el_ements perturbateurs de prise lors du traitement des sols. Sciences de l'ingenieur. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL. France, P 10, 19, 20
33. Tovey, N. K., 1971, CUED / C-SOILS (TR5a, Université de Cambridge, Département
34. Trouzine, H., Bekhiti, M., Asroun, N., (2012). Effects of scrap tire rubber fibre on swelling behaviour of two clayey soils in Algeria, Geosynthetics International, 19, N°
35. Vijayvergiya V.N. et Ghazzaly O.I. (1973). Prediction of swelling potentiel for natural clays, proceedings of 3rd International