

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique .

Présenté par : CHEMMAKH Ahref Eddine

**Thème : Caractérisation et Amélioration des sols
affaissables**

Sous la direction de : Pr. Rouaiguia Ammar

Juin 2025



Remerciements

Louange à ALLAH avant tout qui m'a donné la volonté, le courage et la patience pour élaborer ce modeste travail.

Toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études :

*A monsieur, **Pr. Rouaiguia Ammar** mon encadreur pour son soutien, son conseil et son aide, sans lui ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour, on le remercie pour sa disponibilité durant notre réalisation de ce mémoire.*

Nous tenons à exprimer mon profond remerciement à laboratoire L.N.H..C et son équipe qui nous a accompagné de près durant un mois, ainsi que pour son soutien et son encouragement.

Et aussi nos remerciements a laboratoire de recherche de génie civile de l'université 8 mai 1945 –Guelma- et son équipe.

Nos vifs remerciements à tous nos collègues de promo sans exception.

Enfin nous remercions tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail : À mon père qui a sacrifié
sa vie pour que la mienne réussisse*

À ma mère qui m'a soutenu et encouragé tout le temps.

À Mon frère : Walid

Et mes sœurs.

À toute la famille

À tous mes chers amis et mes collègues

Résumé

Les sols affaissables sont des sols non saturés à structure macroporeuse, caractérisés par des tassements importants après leur inondation. Le sud de l'Algérie est lui aussi en grande partie constitué de ce type de sols. Les déchets générés et accumulés en grandes quantités par les industries de la brique rouge dans de nombreux pays augmentent considérablement avec l'expansion continue de l'urbanisation et de l'industrialisation. Cela accroît les risques environnementaux et entraîne, par conséquent, davantage de problèmes écologiques et financiers.

L'objectif principal de cette étude s'articule autour de deux axes : une étude théorique des mécanismes d'affaissement des sols, et une partie expérimentale visant à évaluer l'efficacité d'un traitement à base de poudre de brique rouge.

La première partie présente les différents types de sols à problèmes, en mettant l'accent sur les sols affaissables : leur origine, leur répartition géographique, leurs propriétés physiques ainsi que les techniques disponibles pour leur traitement. La seconde partie est consacrée à une étude expérimentale portant sur le traitement du sol affaissable de la région de Roknia, à Guelma (Algérie), à l'aide de poudre de brique rouge.

Les essais ont été réalisés en effectuant une série de tests, notamment l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, le potentiel d'affaissement, l'essai au bleu de méthylène, les essais de compactage Proctor et les essais de cisaillement (boîte de cisaillement), dans le but d'évaluer l'efficacité de la méthode de traitement par cet additif.

Les résultats montrent que le sol est classé, selon la gravité de l'affaissement, comme modérément sévère. Une augmentation du poids volumique sec maximal, atteignant $1,76 \text{ g/cm}^3$ à 4 % de poudre de brique rouge, suggère une amélioration de la densification du sol. La diminution progressive de l'indice de gonflement indique une réduction de la capacité du sol à reprendre du volume lors du déchargement. Les résultats révèlent également que l'indice de plasticité (IP) diminue nettement dès l'ajout de poudre de brique rouge, pour atteindre une valeur minimale de 7,9 % à un taux de 6 %.

Mots-clés : Sol affaissable ; poudre de la brique rouge ; Œdomètre ; Limites d'Atterberg ; cisaillementrectiligne.

الملخص

تُعدّ التربة القابلة للانهيّار من التربة غير المشبعة ذات البنية المسامية الكبيرة، وتتميز بهبوطات كبيرة بعد تعرضها للغمر بالمياه. ويُعد جنوب الجزائر من المناطق التي تحتوي بدرجة كبيرة على هذا النوع من التربة. من جهة أخرى، تتزايد كميات النفايات الناتجة عن صناعة الطوب الأحمر بشكل كبير في العديد من البلدان، نتيجة التوسع المستمر في التعمير والتصنيع، مما يفاقم المخاطر البيئية ويسبب مشكلات إيكولوجية ومالية إضافية.

يتمثل الهدف الرئيسي من هذه الدراسة في محورين أساسيين: دراسة نظرية لآليات انهيار التربة، وجزء تجريبي يهدف إلى تقييم فعالية معالجة التربة باستخدام مسحوق الطوب الأحمر.

تتناول الجزء الأول من العمل أنواع التربة المشكّلة، مع التركيز على التربة القابلة للانهيّار من حيث الأصل، التوزيع الجغرافي، الخصائص الفيزيائية، والتقنيات المتاحة لمعالجتها. أما الجزء الثاني، فقد خُصص لدراسة تجريبية على تربة قابلة للانهيّار بمنطقة الركنية بولاية قالمة (الجزائر)، باستعمال مسحوق الطوب الأحمر كمادة مضافة.

شملت التجارب عدة اختبارات مثل التحليل الحبيبي، حدود أتربرخ، تجربة الانهيّار، اختبار الأزرق الميثيليني، تجربة بروكتور للدمك، واختبار القص المباشر، بهدف تقييم فعالية هذه المادة المضافة.

أظهرت النتائج أن التربة مصنفة، حسب شدة الانهيّار، على أنها متوسطة الخطورة. كما سُجّلت زيادة في الكثافة الجافة القصوى بلغت 1.76 جم/سم³ عند إضافة 4% من مسحوق الطوب الأحمر، مما يشير إلى تحسن في كثافة التربة. كما لوحظ انخفاض تدريجي في مؤشر الانتفاخ، مما يدل على انخفاض قدرة التربة على التمدد عند تفريغ الحمل. كما انخفض بشكل واضح ليصل إلى 7.9% عند نسبة 6% من المادة المضافة (IP) مؤشر اللدونة.

الكلمات المفتاحية ربة قابلة للانهيّار، مسحوق الطوب الأحمر، تجربة الأودوميتر، حدود أتربرخ، القص المباشر

Abstract

Collapsible soils are unsaturated, macroporous soils characterized by significant settlement upon water inundation. Southern Algeria is largely composed of such soils. Simultaneously, the waste generated and accumulated in large quantities by the red brick industry in many countries has significantly increased due to continuous urbanization and industrial growth, leading to environmental risks and greater ecological and financial concerns.

This study has two main aims: to investigate the theoretical collapse mechanisms of soils and to evaluate experimentally the effectiveness of red brick powder treatment.

The first part of this research reviews the different types of problematic soils, with a focus on collapsible soils: their origin, geographical distribution, physical properties, and the available stabilization techniques. The second part presents an experimental study on the treatment of collapsible soil from the Roknia region in Guelma (Algeria) using red brick powder.

The tests carried out included grain size analysis, Atterberg limits, collapse potential, methylene blue value, Proctor compaction, and direct shear tests, to assess the effectiveness of the additive.

Results indicate that the soil is classified as moderately severe in terms of collapse potential. The maximum dry density increased to 1.76 g/cm^3 at 4% red brick powder, reflecting improved soil densification. The gradual decrease in the swelling index indicates reduced rebound capacity upon unloading. Moreover, the plasticity index (PI) decreased significantly with the addition of red brick powder, reaching a minimum value of 7.9% at 6% dosage.

Keywords: Collapsible soil; red brick powder; oedometer; Atterberg limits; direct shear test.

Sommaire

Remerciements
DEDICACE.....
Résumé	I
المخلص	II
Abstract	III
Sommaire	IV
Liste des figures	VIII
Introduction générale.....	XIII
Chapitre 1 : Les Sols à problèmes	2
1.1. Introduction	2
1.2. Les sols problématiques	3
1.3. Les phénomènes liés aux sols à problèmes	3
1.3.1. Tassement.....	3
1.3.2. Glissement.....	3
1.3.3. Affaissement.....	4
1.3.4. Gonflement.....	5
1.4. Types des sols à problèmes	5
1.4.1. Les sols à problèmes chimiques	5
1.4.1.1. Sol acide	5
1.4.1.2. Sol salin	6
1.4.1.3. Sol alcalin.....	6
1.4.1.4. Sol sodique	7
1.4.2 Les sols à problèmes physique	7
1.4.2.1. Sols dispersifs.....	7
1.4.2.2. Sols affaissables	8
1.4.2.3. Sol liquéfiable	9
1.4.2.4. Sol sableux	10
1.4.2.5. Sol sensible au gel	11
1.4.2.6. Sols tourbeux.....	11
1.4.2.7. Sols gonflants (expansive soils)	12

1.5. Conclusion.....	13
Chapitre 2 : Les Sols Affaissables.....	15
2.1 Introduction	15
2.2 Définition des sols affaissables	16
2.3 Origine des sols affaissables	17
2.4 Répartition des Sols Affaissable	18
2.4.1 Effondrements de sols dans le monde	18
2.4.2 Effondrement rencontrés en Algérie	18
2.5 Propriétés Physiques des Sols Affaissables	19
2.6 Différents Types de Sols Affaissables	21
2.6.1 Sols Compactés par l'Homme	21
2.6.2 Sols Naturellement Déposés.....	21
2.6.2.2 Sols Résiduels	22
2.6.2.3 Dépôts de sols affaissables transportés par l'eau	22
2.7 Classement des Sols Affaissables	23
2.8 Mécanisme de l'Affaissement.....	23
2.9 Essai de Laboratoire pour la détermination du potentiel d'affaissement.....	25
2.10 Conclusion.....	26
Chapitre 3 : TECHNIQUES DES TRAITEMENTSDES SOLS AFFAISSABLES.....	28
3.1. Introduction	28
3.2. Choix du Traitement d'un Sol Affaissable.....	28
3.2.1. Critères influençant le choix	29
3.2.2. Méthodes disponibles selon le contexte	29
3.2.3. Le Choix Basé sur Classes Granulométriques et l'Etat du Sol	29
3.2.4. Le Choix Basé sur le Profondeur du Sol	30
3.3. Traitement par Compactage	31
3.4. Vibrocompactage	31
3.5. Traitement par Pré-Mouillage	32
3.6. Traitement Chimique.....	32
3.7. Traitement par Colonne Ballastée	33
3.8. Traitements par Congélation	34

3.9. Traitements par Pré-Chargement	34
3.10. Techniques par Injection	35
3.11. Traitement des Sols par Addition d'Ajouts Minéraux	36
3.12. Les Avantages et les Inconvénients des Différentes Méthodes	36
3.13. Techniques de traitement in situ.....	37
3.14. Techniques de traitement par amélioration chimique	37
3.15. Autres méthodes complémentaires.....	38
3.16. Conclusion.....	38
Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux	40
4.1. Introduction	40
4.2. Caractéristiques des matériaux utilisés	40
4.2.1. Le sol utilisé	40
4.2.2. L'ajout utilisé : poudre issue du déchet de brique rouge.....	40
4.2.2.1. Masses volumique et coefficient d'absorption.....	41
4.2.2.2. Composition chimique de la poudre du déchet de brique rouge	41
4.3. Les essais préliminaires.....	42
4.4. L'analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056).....	43
4.4.1. Équipements utilisés.....	43
4.4.2. Principe et Mode opératoire	43
4.5. Densités spécifiques des grains solides (NF P 94 -054).....	44
4.5.1. Équipements utilisés et Mode opératoire	44
4.6. Essai Proctor (NF P 94-093).	45
4.6.1. Équipements utilisés et Mode opératoire	45
4.7. Limites d'Atterberg (NF P 94-051).....	46
4.7.1 Limite de liquidité w_L	46
4.7.2 Limite de plasticité w_p	47
4.7.3 Indice de plasticité I_p	48
4.7.4 Indice de consistance I_c	48
4.7.6 Activité A_c	48
4.8 Essai au bleu de méthylène (NF EN 933-9).....	48
4.9. Essais de cisaillement (NF P 94-71)	49

4.9.1. Introduction	49
4.9.3 Matériel utilisé et mode opératoire.....	50
4.10. Essai œdométrique (XP P 94-090-1).....	51
4.10.1 Essai œdométrique simple.....	51
4.10.2 Matériel utilisé et mode opératoire.....	51
Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats	54
5.1 Introduction	54
5.2 Discussion du résultat des essais	54
5.2.1 Teneur en eau initiale (w %)	54
5.2.2 Densités spécifiques des grains solides méthode de	54
5.2.3 Analyse granulométrique	55
5.2.4 Les caractéristiques du sol utilisé.....	56
5.2.4.1 Potentiel d'affaissement libre (CP).	56
5.2.4.2 Essai au double œdomètre.....	56
5.2.5 Essai Proctor :.....	57
A) <i>Augmentation du poids volumique sec maximal</i>	59
B) <i>Augmentation de la teneur en eau optimale</i>	60
5.2.6 Essai de limites d'Atterberg :.....	60
5.2.6.1 Limite de plasticité	60
a. Effet de la poudre de brique rouge (PDBR) sur la texture du sol.....	61
b. Modification de la structure du sol.....	61
c. Réactions physico-chimiques potentielles.....	62
5.2.6.2 Limite de liquidité	62
5.2.6.3 Indice de plasticité.....	63
5.2.7 Essai au bleu de méthylène	64
5.2.8 Essai cisaillement rectiligne :.....	66
5.2.9 Essai de l'œdomètre :	72
Conclusion générale	80

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE 1

Figure 1 Fissures, tassements sur la plateforme du stade.....	3
Figure 2 : Exemple d'un glissement terrain.	4
Figure 3 : Affaissement du terrain et stagnation des eaux	4
Figure 4 : Affaissement et bombement de la chaussée.	4
Figure 5 : Retrait et gonflement des sols.....	5
Figure 6 : l'effet de L'acidification sur le sol.	6
Figure 7 : l'effet du sel sur le sol salin.	6
Figure 8 : Sol alcalin.	7
Figure 9 : Sol sodique.....	7
Figure 10 : Les sols dispersifs.....	8
Figure 11 : L'effondrement du sol a la région de Guelma.	9
Figure 12 : L'effondrement du sol a la région de Guelma.	9
Figure 13 : type de sol sableux.....	11
Figure 14 : type de sol sensible au gel	11
Figure 15 : Type de sol tourbeux	12
Figure 16 : phénomène de gonflements de sol sur la route.....	12

CHAPITRE 2

Figure 2. 1 : Effondrement dans une ville en Chine.....	18
Figure 2. 2 : Effondrement récent à Alger	19
Figure 2. 3 : les principaux types des sols affaissables (d'après Rogers, 1995).....	23
Figure 2. 4 : Liaisons inter-granulaires.	24
Figure 2. 5 : Arrangement des particules du sable limoneux suggéré par Casagrande (1932)	25
Figure 2. 6 : Résultat typique d'un test de potentiel d'effondrement (d'après Clemmence et Finbarr 1981).....	26

CHAPITRE 3

Figure 3. 1 : Les champs d'application des différentes techniques de traitement (Ziani et al., 2019).....	30
Figure 3. 2 : Atelier de compactage dynamique et impacts de la masse (Thomas et Javelaud, 2014).....	31

Liste des figures

Figure 3. 3 : Etapes du Vibrocompactage (Keller, 2016).....	32
Figure 3. 4 : Traitement chimique à la chaux et au ciment.	33
Figure 3. 5 : Mise en œuvre des colonnes ballastées (Belkacem D, 2007).....	34
Figure 3. 6 : Chantier utilisant la congélation du sol (Khebizi, 2011).	34
Figure 3. 7 : Principe de traitement par pré-chargement.	35
Figure 3. 8 : Technique d'injection (Keller).	36

CHAPITRE 4

Figure 4. 1 : Échantillon du sol utilisé – sol affaissable.....	40
Figure 4. 2 : L'ajout utilisé (Poudre du déchet de brique rouge).....	41
Figure 4. 3 : L'analyse granulométrique par tamisage.	44
Figure 4. 4 : Détermination de la densité spécifique des grains solides.....	45
Figure 4. 5 : les équipements utilisés pour l'essai Proctor.	45
Figure 4. 6 : Courbe de Proctor.	46
Figure 4. 7 : Comportement des sols fins avec la variation de la teneur en eau (w).....	46
Figure 4. 8 : Méthode de Casagrande.....	47
Figure 4. 9 : Méthode au cône de pénétration.	47
Figure 4. 10 : Limite de plasticité w _P par la méthode au rouleau.....	48
Figure 4. 11 : Mode opératoire pour limite de liquidité.	48
Figure 4. 12 : valeurs du bleu de méthylène en fonction de la nature du sol.....	49
Figure 4. 13 : Equipements utilisés pour l'essai pour l'essai au bleu de méthylène.	49
Figure 4. 14 : Equipements utilisés pour l'essai de cisaillement.	50
Figure 4. 15 : Préparation des éprouvettes pour l'essai œdométrique.	52

CHAPITRE 5

Figure 5. 1 : Les types de sol selon la taille des particules	55
Figure 5. 2: Courbe granulométrique du sol.	56
Figure 5. 3: Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol non traité	58
Figure 5. 4: Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol + 2% PDBR.....	58
Figure 5. 5: Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol + 4% PDBR.....	58
Figure 5. 6 : Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol + 6% PDBR.....	59

Liste des figures

Figure 5. 7: l'évolution de la limite de plasticité du sol étudié À différents pourcentages en PDRB.	61
Figure 5. 8 : l'évolution de la limite de liquidité du sol étudié à différents pourcentages en PDRB (méthode de cône de pénétration).	63
Figure 5. 9: l'évolution de l'Indice de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en PDRB.	64
Figure 5. 10 : Exemple de l'apparition du bleu de méthylène dans l'auréole.	65
Figure 5. 11 : variation des VBS en fonction du sol traité et non traité.....	66
Figure 5. 12 : Essai de cisaillement (Sol non traité).....	67
Figure 5. 13 : Essai de cisaillement (Sol + 2% PDBR).....	68
Figure 5. 14 : Essai de cisaillement (Sol + 4% PDBR).....	69
Figure 5. 15 : Essai de cisaillement (Sol + 6% PDBR).....	70
Figure 5. 16 : Variation de la cohésion en fonction du pourcentage de PDBR.	71
Figure 5. 17 : Variation de l'angle de frottement (°) en fonction du pourcentage de PDBR. ..	71
Figure 5. 18 : Représentation de la machine œdométrique de laboratoire de LNHC à GUELMA.....	73
Figure 5. 19 : Cellule de consolidation	73
Figure 5. 20 : Courbe œdométrique sol naturel (sol non traité).	75
Figure 5. 21 : Courbe œdométrique (sol naturel + 2% PDBR).	76
Figure 5. 22 : Courbe œdométrique (sol naturelle+ 4% PDBR)	77
Figure 5. 23 : Courbe œdométrique (sol naturelle+6% PDBR).....	78

Liste des tableaux

CHAPITRE 2

Tableau 2.1 : propriétés physiques des sols affaissables.....	20
---	----

CHAPITRE 3

Tableau 3.1 : Méthodes de traitement des sols affaissables (Bara, 1976).....	30
--	----

Tableau 3.2: Les Avantages et les Inconvénients des Différentes Méthodes.	36
--	----

CHAPITRE 4

Tableau 4. 1 : Masses volumiques absolue, apparente et Coefficient d'absorption d'eau de la brique utilisée.	41
---	----

Tableau 4. 2 : Composition chimique de la poudre du déchet de brique rouge utilisé (Nighri. G. 2018).....	41
---	----

Tableau 4. 3 : Composition chimique de la poudre des déchets de brique rouge Des briqueteries Bendjerrah et de Timgad.	42
---	----

CHAPITRE 5

Tableau 5. 1 : Poids volumique des grains solides du sol.....	55
---	----

Tableau 5. 2 : Classification de la gravité de l'affaissement.	57
---	----

Tableau 5. 3 : Caractéristiques physiques du sol utilisé.....	57
---	----

Tableau 5. 4 : Variations de la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale pour sol non traité et traité.....	59
--	----

Tableau 5. 5 : Valeurs des limites de plasticités des sols traités Aux différents pourcentages en PDRB.	60
--	----

Tableau 5. 6 : Valeurs des limites de liquidités des sols traités aux différents pourcentages en PDRB (méthode de cône de pénétration).....	62
---	----

Tableau 5. 7 : Valeurs des indices de plasticités des sols traités aux différents pourcentages en PDRB.	63
--	----

Tableau 5. 8 : Valeurs des VBS des sols traités aux différents pourcentages en PDRB.....	65
--	----

Tableau 5. 9 : Influence du pourcentage d'additifs sur le cisaillement.....	71
---	----

Tableau 5. 10 : Influence du pourcentage de déchet de brique sur l'essai Œdométrique.	73
--	----

Tableau 5. 11 : Classification de sol selon l'indice de compressibilité (selon Terzaghi).....	79
---	----

Liste des symboles et abréviations

- ω (%) : Teneur en eau
 γ_s : Densité spécifique
 γ_d : Poids volumique sec
CP : Potentiel d'affaissement libre
Gs : Gravité spécifique
e : Indice des vides
Sr : Degré de saturation
n : Porosité
Cc : Coefficient de courbure
Cu : Coefficient d'uniformité
 γ_{dmax} : poids volumique sec maximal
W_{opm} : La teneur en eau optimale
Wp : Limite de plasticité,
Wl : limites de liquidités
Ip : indices de plasticités
Cc : Indice de compression
Cg : Indice de gonflement
Pc : Contrainte de pré-consolidation

Introduction

Introduction générale

La stabilité et la durabilité des ouvrages de génie civil reposent fondamentalement sur les propriétés mécaniques et physiques du sol sur lequel ils sont construits. Dans de nombreuses régions, notamment en Algérie, les ingénieurs sont confrontés à des types de sols dits "à problèmes", qui présentent des comportements imprévisibles pouvant compromettre la sécurité des infrastructures. Parmi eux, les sols affaissables représentent une problématique majeure, en raison de leur capacité à subir des réarrangements structurels soudains et à provoquer des affaissements significatifs sous l'effet de l'humidification ou d'une surcharge.

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche d'analyse et de traitement de ces sols, à travers une étude à la fois théorique et expérimentale, visant à évaluer l'impact de l'ajout de poudre issue de déchet de brique rouge comme solution de stabilisation. Pour cela, le document a été structuré en cinq chapitres complémentaires.

Le premier chapitre est consacré à une vue d'ensemble des sols à problèmes, en exposant les différentes catégories et les phénomènes qui y sont associés, tels que le tassement, le glissement, l'affaissement ou encore le gonflement. Il distingue notamment les sols à problèmes chimiques (sols salins, acides, alcalins...) et physiques (sols affaissables, dispersifs, liquéfiables, tourbeux, etc.).

Le deuxième chapitre se focalise spécifiquement sur les sols affaissables. Il en présente la définition, l'origine (éolienne, hydrique, résiduelle), leur répartition géographique à travers le monde et en Algérie, ainsi que leurs propriétés physiques. Le chapitre développe aussi les mécanismes d'affaissement, les classifications existantes et les essais de laboratoire utilisés pour évaluer leur comportement.

Le troisième chapitre aborde les techniques de traitement des sols affaissables. Il présente les différentes méthodes disponibles (compactage, injection, stabilisation chimique, vibrocompactage, congélation, etc.), ainsi que les critères de choix selon la nature du sol, sa profondeur, et les contraintes du projet. Ce chapitre sert de base pour justifier le recours à une solution innovante et durable à base de déchets de brique rouge.

Le quatrième chapitre est dédié à la partie expérimentale. Il décrit les matériaux utilisés, notamment le sol affaissable de la région de Roknia (Guelma) et la poudre de brique rouge. Il détaille ensuite les essais réalisés en laboratoire : analyse granulométrique, limites d'Atterberg, Proctor, œdomètre, bleu de méthylène, cisaillement, etc., afin de caractériser le sol et mesurer l'effet du traitement.

Enfin, le cinquième chapitre présente une discussion approfondie des résultats obtenus. Il met en évidence les améliorations constatées sur les propriétés mécaniques du sol traité, notamment la réduction du potentiel d'affaissement, l'augmentation de la densité sèche

Introduction

maximale, et la diminution de l'indice de plasticité. Ces résultats permettent de conclure sur la pertinence du traitement par poudre de brique rouge comme solution économique, locale et écologiquement responsable.

À travers cette étude, nous espérons contribuer au développement de solutions de valorisation des déchets industriels dans le domaine géotechnique, tout en apportant une réponse concrète au défi que représentent les sols affaissables dans les régions sensibles.

Chapitre 1 :
Les Sols à problèmes

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes

1.1. Introduction

La mécanique des sols est l'une des disciplines du *génie civil*, en lien notamment avec la stabilité des ouvrages. D'une manière générale, on peut dire que toutes les constructions doivent s'inscrire dans un état initial stable. Cependant, plusieurs phénomènes peuvent influencer cette stabilité, tels que :

- le glissement de terrain,
- le gonflement des sols,
- la compressibilité des sols,
- l'effondrement,
- ou encore l'érosion des sols, etc.

L'ingénieur se trouve dans un double souci de sécurité et d'économie, c'est parce qu'il doit prendre en considération les différentes conditions et choisir la bonne solution et la meilleure technique pour résoudre chaque problème, car une mauvaise conception ou une mauvaise réalisation d'un ouvrage peuvent conduire à des désordres et donc à des dommages voire même à des pertes en vie humaine ; la responsabilité de l'ingénieur est alors à prendre en compte.

L'ingénieur en génie civil, et en particulier *l'ingénieur géotechnicien*, est souvent confronté à des problématiques majeures lors de l'étude des ouvrages construits sur un sol support. Parmi les problèmes fréquemment rencontrés dans le monde, et en Algérie en particulier, on peut citer :

- les phénomènes de glissement de terrain,
- le gonflement des sols argileux,
- les sols effondrables,
- et les sols compressibles.

L'histoire a montré que la plupart des sols instables, par tassement, effondrement, glissement ou gonflement. Ils sont généralement des sols de nature argileuse ou alluvionnaire, contenant un pourcentage significatif de particules fines.

Cela a été confirmé par plusieurs études, notamment celles d'Arab (2008) et Lade & Yamamuro (1997).

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes

1.2. Les sols problématiques

Parfois, et pour des raisons imprévisibles, le sol peut se dilater, gonfler, s'effondrer ou présenter des comportements inattendus. Dans certains cas, la structure du sol peut également se modifier, ce qui altère sa résistance et compromet la stabilité des ouvrages.

De nombreux sols peuvent poser des problèmes en géotechnique, car ils peuvent se disperser, se dilater, se rétracter, subir un tassement excessif, présenter une faible résistance ou même être solubles. Ces comportements sont souvent liés à leur composition, à la nature de leurs fluides interstitiels, à leur minéralogie ou à leur structure interne.

Il existe de nombreux types de sols problématiques, parmi les plus notables : les argiles gonflantes, les sols sujets à l'affaissement, ainsi que les sols souples et dispersifs. Tous ces types de sols peuvent engendrer d'importants problèmes en construction.

1.3. Les phénomènes liés aux sols à problèmes

1.3.1. Tassement

Il s'agit d'une diminution de volume de certains sols très compressibles (tels que les vases, tourbes et argiles) sous l'effet des charges appliquées ou de l'abaissement du niveau des nappes aquifères dû à une surexploitation.

La figure 1 illustre les fissures et les tassements observés sur la plateforme du stade de Harraten, à Jijel.



Figure 1 Fissures, tassements sur la plateforme du stade

1.3.2. Glissement

Le glissement de terrain se définit comme le déplacement d'une masse de sol meuble ou de roche le long d'une surface de rupture par cisaillement, correspondant souvent à une discontinuité préexistante (voir figure 2).

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes

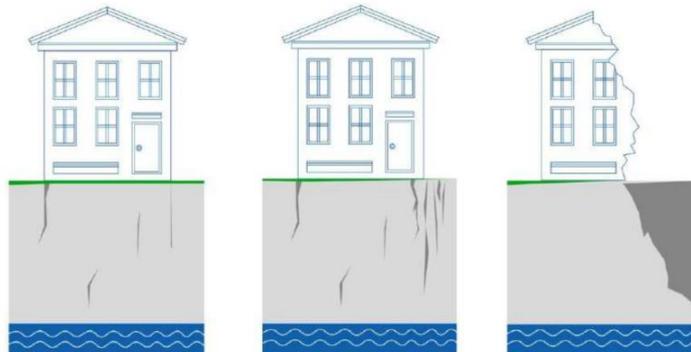


Figure 2 : Exemple d'un glissement terrain.

1.3.3. Affaissement

Le phénomène d'effondrement (collapse) désigne la diminution du volume d'un sol, soumise à certaines conditions, lors de son humidification.

Cette réduction de volume entraîne une densification irréversible du sol, initialement lâche ou peu dense (voir figures 3 et 4).



Figure 3 : Affaissement du terrain et stagnation des eaux



Figure 4 : Affaissement et bombement de la chaussée.

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes

1.3.4. Gonflement

Le gonflement est le terme utilisé pour désigner l'augmentation du volume du sol lorsqu'il absorbe de l'eau. Ce phénomène est au moins partiellement réversible : un sol gonflant subit un retrait (une diminution de volume) lorsque sa teneur en eau diminue. Dans les pays à climat sec, l'accent est mis sur le phénomène de gonflement, tandis que dans les régions à climat humide, c'est plutôt le retrait qui retient l'attention. La figure 5 illustre les phénomènes de retrait et de gonflement des sols.

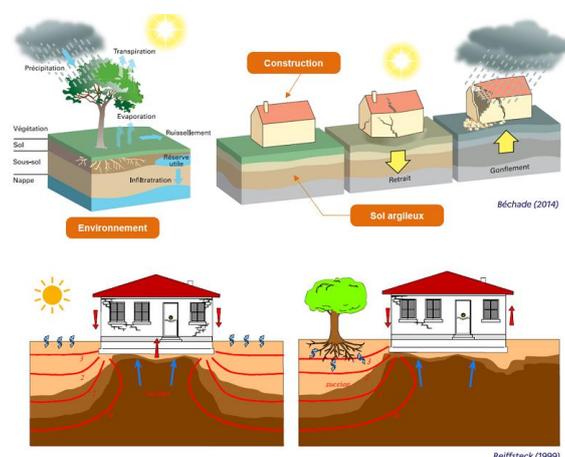


Figure 5 : Retrait et gonflement des sols.

1.4. Types des sols à problèmes

Il existe deux types de sols à problèmes : les sols à problèmes **chimiques** et les sols à problèmes **physiques**.

1.4.1. Les sols à problèmes chimiques

1.4.1.1. Sol acide

L'acidification est un phénomène naturel, inéluctable et lent. Elle se produit aussi bien dans les milieux naturels que dans les milieux cultivés, mais elle peut s'accroître dans l'horizon de surface en absence du travail, comme en non-labour (NL) ou semis direct (SD).

En effet, l'apport d'engrais acidifiants sans travail du sol entraîne une concentration de l'acidité en surface. C'est la quantité d'ions H^+ présents dans la solution du sol qui détermine le pH d'un sol, et donc son acidité : Plus la concentration en H^+ est élevée, plus le sol est acide et plus le pH est bas. La figure 6 illustre l'effet de l'acidification sur le sol.

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes



Figure 6 : l'effet de L'acidification sur le sol.

1.4.1.2. Sol salin

Lorsqu'une quantité excessive de sels est présente dans le sol, on parle de sol salin. Ce type de sol contient principalement du chlorure de sodium (NaCl), mais d'autres sels peuvent également être présents, tels que le chlorure de magnésium (MgCl_2), le chlorure de potassium (KCl), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), le sulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) et le sulfate de magnésium (MgSO_4). Ce phénomène d'augmentation de la teneur en sel du sol est appelé **salinisation**.

La salinité diminue la teneur en eau du sol, ce qui le rend sec et rugueux. De plus, un sol salin présente d'autres problèmes physiques, tels qu'une **compressibilité élevée**, une **faible capacité portante** et une **tendance accrue à l'expansion**. La figure 7 présente un sol salin.



Figure 7 : l'effet du sel sur le sol salin.

1.4.1.3. Sol alcalin

Un sol est dit **alcalin** lorsque son pH est supérieur à 7. Les principaux composants présents dans ce type de sol sont le **carbonate de sodium** et le **bicarbonate de sodium**. Les sols alcalins possèdent de très mauvaises propriétés physiques et présentent une **forte dispersion** des particules.

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes

La figure 8 présente un sol alcalin.



Figure 8 : Sol alcalin.

1.4.1.4. Sol sodique

Le sol sodique contient une forte concentration de sodium échangeable, avec une faible concentration d'autres sels. Le sodium est un cation monovalent (Na^+), et sa présence en excès affaiblit les propriétés physiques du sol. Les cations sodiques perturbent les liaisons entre les particules du sol, provoquant leur **gonflement** et leur **dispersion**.

L'effet du sodium est également de **réduire la teneur en humidité** du sol, le rendant **sec et rugueux**.

Le sol sodique dégrade également la structure du sol, entraînant un problème physique connu sous le nom de dispersion du sol. Il peut aussi provoquer un **gonflement** important. La Figure 9 Présente un sol sodique.



Figure 9 : Sol sodique.

1.4.2 Les sols à problèmes physique

1.4.2.1. Sols dispersifs

Les sols dispersifs présentent une défaillance physique liée à la structure du sol. Le terme disperser signifie s'éloigner *se séparer* ou *se désagréger*. De même, dans un sol dispersif, les

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes

particules superficielles ont tendances à se désagréger et à se séparer les unes des autres. Ce phénomène est principalement dû à une faible cohésion entre les particules du sol, notamment l'argile, en raison d'un taux élevé de sodium échangeable. La Figure 10 Présente un sol dispersif.



Figure 10 : Les sols dispersifs.

Les caractéristiques mécaniques des sols dispersés dépendent principalement de la nature des liaisons structurelles entre les particules. Ces caractéristiques sont influencées par la résistance des particules minérales, qui est généralement élevée, et par leur faible compressibilité. Dans les sols argileux, les liaisons entre les particules peuvent offrir une certaine résistance à la traction et au cisaillement.

La résistance au cisaillement liée aux liaisons structurelles entre les particules est appelée cohésion. Cette propriété est tellement caractéristique des sols argileux que, par opposition aux sols pulvérulents (ou non cohérents), on les désigne souvent sous le nom de sols cohérents.

1.4.2.2. Sols affaissables

Un sol affaissable est un sol dont les constituants présentent un arrangement ouvert, formant une structure métastable.

Cette structure peut s'affaisser brusquement sous l'effet d'une charge ou d'une infiltration d'eau, pour devenir une structure plus stable, plus dense, et de volume considérablement réduit. La figure 11 présente un exemple d'effondrement de sol dans la région de Guelma.

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes



Figure 11 : L'effondrement du sol a la région de Guelma.

1.4.2.3. Sol liquéfiable

La liquéfaction du sol est un phénomène géologique, généralement brutal et temporaire, qui se produit lors d'un séisme.

Il se manifeste lorsqu'un sol saturé en eau perd tout ou partie de sa portance, ce qui peut entraîner l'enfoncement ou l'effondrement des constructions situées en surface.

Le phénomène de liquéfaction concerne les formations géologiques peu compactes, à granulométrie fine et uniforme, comprise entre 0,05 mm et 2 mm.

Les formations les plus susceptibles de subir la liquéfaction sont les sables, les limons et les vases.

La figure 12 montre des bâtiments renversés à El Asnam en 1980, à la suite du phénomène de liquéfaction.



Figure 12 : L'effondrement du sol a la région de Guelma.

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes

Caractéristiques :

Ce phénomène se produit en présence d'eaux souterraines, qui remontant à la surface, provoquant la perte de cohésion entre les particules du sol en surface. Le sol se comporte alors comme une roche meuble. Lors d'une secousse sismique, sous l'effet des ondes de compression, la pression de l'eau dans les interstices des sols granulaires augmente, entraînant une perte de cohésion et une perte temporaire de portance.

Des jets d'eau et de sable remontent à la surface sous l'effet de la surpression, puis sont projetés en l'air avant de retomber sous forme de cônes de sable. Des affaissements localisés peuvent également se produire, dus au tassement de la couche de sable dont les grains se réorganisent. Lorsque la couche de sol liquéfié se trouve sous un talus, cela peut entraîner un glissement de terrain.

La liquéfaction ne se produit que dans un sol saturé en eau. Ses effets sont souvent observés dans des zones situées à proximité de plans d'eau, comme les rivières, lacs, baies ou océans.

Parmi les conséquences possibles figurent les glissements de terrain ou des mouvements plus faibles, qui peuvent provoquer des fissures de tension, comme celles observées sur les berges de la rivière Motagua lors du tremblement de terre de 1976 au Guatemala.

1.4.2.4. Sol sableux

Ce type de sol est composé de grosses particules et contient peu ou pas d'argile. Étant constitué de particules granulaires de grande taille, il ne permet pas un compactage aussi efficace que celui des sols argileux ou limoneux. C'est pourquoi les sols sableux sont généralement déconseillés pour la construction. La figure 13 illustre un exemple de sol sableux.

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes



Figure 13 : type de sol sableux

1.4.2.5. Sol sensible au gel

Lorsque l'humidité présente dans le sol gèle, son volume augmente d'environ 9 %, créant une pression dans la couche de sol environnante. Cette pression provoque un déplacement du sol, ce qui entraîne le mouvement de la couche supérieure et peut causer des fissures à la surface des bâtiments.

Lors du dégel, les particules du sol se réorganisent et retrouvent en partie leur position initiale, mais les fissures dans la structure du bâtiment persistent. La figure 14 montre un type de sol sensible au gel.



Figure 14 : type de sol sensible au gel

1.4.2.6. Sols tourbeux

Une tourbière est une zone humide caractérisée par l'accumulation progressive de tourbe, un sol riche en matière organique végétale, peu ou pas décomposée. La figure 15 montre un exemple de sol tourbeux.

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes



Figure 15 : Type de sol tourbeux

Les sols tourbeux sont gorgés d'eau (environ 90 %) et riches en matière organique (environ 10 %). On les trouve dans des zones où l'eau circule peu et où la matière organique s'accumule, notamment dans les tourbières.

1.4.2.7. Sols gonflants (expansive soils)

Les sols gonflants posent des problèmes aux constructions sur tous les continents. Pour ces sols, les variations de volume sont liées à la présence de particules argileuses. Il existe également des roches gonflantes, comme l'anhydrite. Le gonflement désigne l'augmentation de volume du sol lorsqu'il absorbe de l'eau. La figure 16 montre un exemple du phénomène de gonflements de sol sur la route.



Figure 16 : phénomène de gonflements de sol sur la route.

Chapitre 1 : Les Sols à problèmes

1.5. Conclusion

es sols à problèmes présentent des comportements particuliers (gonflement, affaissement, glissement...) qui menacent la stabilité des ouvrages. Leur origine peut être chimique ou physique selon leur composition. Ces sols exigent une attention particulière en géotechnique. Une mauvaise évaluation peut entraîner des désordres graves. Parmi eux, les sols affaissables feront l'objet d'une étude détaillée dans le chapitre suivant.

Chapitre 2 :
Les Sols Affaissables

Chapitre 2 : Les Sols Affaissables

2.1 Introduction

Les sols affaissables sont largement répandus dans la plupart des régions du monde (par exemple, aux États-Unis, au Brésil, en Égypte, au Koweït, en Afrique du Sud et en Chine), en particulier dans les régions arides et semi-arides. Lorsqu'ils sont mouillés, ces sols représentent une menace potentielle pour les structures qui y sont construites. À l'état sec et naturel, ils présentent une rigidité et une résistance apparente au cisaillement élevée ; mais une fois mouillés, ils peuvent subir une diminution significative de volume (effondrement, hydroconsolidation, hydrocompression). Ces sols, qui présentent ce phénomène à des niveaux de contrainte relativement faibles, sont appelés sols affaissants (Tadepalli et al., 1992 ; Rollins et Rogers, 1994).

Les sources d'eau peuvent être naturelles, comme les précipitations et les fluctuations de la nappe phréatique, ou artificielles, comme l'irrigation excessive et les fuites des conduites d'eau et d'égouts. L'effondrement peut être déclenché par l'eau seule ou par l'action combinée de l'humidité et des charges.

Les sols affaissables sont caractérisés par une structure ouverte et instable qui, sous l'effet de l'humidification ou du chargement, subit une réduction rapide de volume. Cette instabilité est généralement due à des liaisons interparticulaires faibles, souvent sous forme de ponts capillaires ou de liaisons salines ou argileuses, qui se rompent lors de l'humidification ou du chargement, entraînant un affaissement du sol.

Des études récentes ont approfondi la compréhension des mécanismes d'affaissement et des méthodes d'identification des sols affaissables. Par exemple, une revue publiée par (Opukumo et al., 2022) a examiné les méthodes d'identification des sols affaissables, mettant en évidence les défis liés à la reconnaissance de leur potentiel d'affaissement avant la construction. Les auteurs ont souligné l'importance de comprendre les caractéristiques géologiques, structurales et mécaniques de ces sols pour prévenir les dommages structurels dans les régions sujettes à l'affaissement des sols.

Concernant les mécanismes d'affaissement, une étude publiée par (Houston et Zhang, 2021) a proposé un cadre unifié pour modéliser les changements de volume des sols expansifs et affaissables, en utilisant une approche élastoplastique modifiée. Cette approche permet de mieux comprendre les réponses complexes des sols non saturés aux variations de succion, qu'ils soient expansifs ou affaissables.

En ce qui concerne les méthodes de stabilisation, des recherches récentes ont exploré l'utilisation de nanoparticules d'argile pour améliorer le comportement mécanique des sols affaissables. Une étude publiée en 2020 a montré que les suspensions de nanoparticules d'argile présentent une mobilité élevée dans le sol et une performance remarquable pour réduire le potentiel d'affaissement, en formant des ponts solides capillaires qui renforcent les liaisons interparticulaires pendant le séchage post-grouting.

Chapitre 2 : Les Sols Affaissables

Les sols affaissables sont principalement constitués de sable et/ou de limons déposés par le vent, ainsi que de dépôts de poussière volcanique. Ces dépôts se caractérisent par des poids volumiques relativement faibles, une faible teneur en humidité naturelle, des indices de vides élevés et une cohésion moins cohésive ou légèrement cohésive (Das, 2007 ; Maeda et al., 1993).

Les sols affaissables possèdent une structure métastable avec des vides importants et une faible densité apparente. À leur teneur en eau naturelle, ces sols présentent une résistance apparente élevée. Cependant, lors de l'humidification, les liaisons entre les grains se dégradent, entraînant un effondrement du sol. (Culshaw et al., 2018).

Les sols affaissables sont des structures ouvertes, métastables qui s'affaissent suite à l'humidification et/ou l'humidification et chargements Derbyshire et al (1995). L'affaissement est la transition d'un arrangement d'instabilité à un autre arrangement plus dense et plus stable. Selon cette définition, les sols compactés (remblai de routes), les sols naturellement déposés et partiellement saturés (læss) et les sols complètement saturés tels que les argiles sensibles peuvent être considérés comme sols affaissables. Parmi les recherches réalisées sur les sols affaissables, nous citons celles de Clemence et Finbarr (1981), et Rogers (1995). Parmi les recherches faites pour déterminer le mécanisme de l'affaissement, nous citons celles de Barden et al (1973), Jenning et Knight (1975).

Les sols affaissables ont une masse volumique sèche relativement faible et un indice des vides élevé. L'affaissement constitue un risque majeur aux constructions dans plusieurs régions du monde. Les dépôts les plus considérables des sols affaissables sont ceux des sols éoliens. Dans la plupart des cas, les dépôts sont caractérisés par des structures lâches de particules solides sous forme de limon et de sable fin, Clemence et Finbarr (1981). La littérature indique que les sols affaissables peuvent avoir différentes origines de formation. Cependant, ils ont toujours une propriété commune d'être très poreux.

L'affaissement du sol est associé aux trois caractéristiques fondamentales telles que la structure ouverte d'indice des vides élevé avec la faible masse volumique sèche et la résistance de liaison inter particulaire relativement faible.

2.2 Définition des sols affaissables

Les *sols affaissables* sont des sols à structure généralement lâche et partiellement saturée, susceptibles de subir un réarrangement brutal de leur structure granulaire lorsqu'ils sont soumis à une humidification soudaine, avec ou sans application de charges externes. Ce phénomène se traduit par une réduction importante et rapide de leur volume. Selon Zur et Wiseman (1973), l'effondrement des sols peut être défini comme toute diminution rapide de volume induite par l'augmentation de l'un des facteurs suivants :

Chapitre 2 : Les Sols Affaissables

- Le taux d'humidité ou la teneur en eau (W) ;
- Le degré de saturation (S_r) ;
- La contrainte tangentielle moyenne (τ) ;
- La contrainte de compression (σ) ;
- La pression interstitielle (U).

Ce comportement particulier des sols affaissables peut engendrer des désordres importants dans les ouvrages de génie civil construits sur de tels terrains, d'où la nécessité de leur identification et de leur traitement préalable lors de projets de construction.

2.3 Origine des sols affaissables

L'origine des sols affaissables à structure macroporeuse fait l'objet de plusieurs hypothèses.

Deux théories principales sont généralement avancées:

- **L'origine éolienne** : cette hypothèse suggère que les sols affaissables, notamment les lœss, se sont formés par dépôt de particules fines transportées par le vent. Ce mode de sédimentation favorise une structure lâche et instable, sensible à l'humidification.
- **L'origine pédologique** : selon cette approche, la structure affaissable résulterait de processus de formation des sols (pédogenèse), notamment sous l'effet d'alternances climatiques, de lessivage ou de phénomènes biologiques qui contribuent à créer des vides intergranulaires instables.

Les sols présentant un comportement d'effondrement brutal ont reçu diverses appellations selon les contextes géographiques ou scientifiques. Parmi les termes les plus fréquemment utilisés pour désigner les *sols affaissables*, on peut citer :

- Sols effondrables
- Sols collapsibles
- Sols instables à l'humidification
- Sols à structure métastable
- Lœss effondrables
- Sols pulvérulents

Chapitre 2 : Les Sols Affaissables

2.4 Répartition des Sols Affaissable

2.4.1 Effondrements de sols dans le monde

Les sols affaissables à structure macroporeuse, en particulier les **loëss**, couvrent une superficie estimée à près de 13 millions de kilomètres carrés à travers le globe. Ces dépôts sont principalement répartis dans deux larges bandes situées entre 30° et 55° de latitude, au nord comme au sud. Cela représente environ 10 % des terres émergées de la planète.

De vastes territoires sont concernés par la présence de ces sols, notamment dans les régions suivantes :

- Europe et Asie : Russie, Afghanistan, Chine, Inde, Pakistan
- Asie du Sud-Est et Moyen-Orient : Thaïlande, Arabie Saoudite
- Amériques: États-Unis, Argentine
- Océanie: Nouvelle-Zélande, Australie
- Afrique: Afrique du Nord

Ces zones sont particulièrement exposées aux phénomènes d'affaissement des sols en cas d'humidification ou de surcharge, ce qui pose des défis importants pour les infrastructures, les habitations et les aménagements. (Voir Figure 2.1 pour une illustration de la répartition d'effondrement dans une ville en Chine, des sols affaissables.)



Figure 2. 1 : Effondrement dans une ville en Chine

2.4.2 Effondrement rencontrés en Algérie

Les tassements et effondrements de sols sont des mouvements verticaux causés par la circulation souterraine, qui crée des vides dans le sous-sol par entraînement mécanique et

Chapitre 2 : Les Sols Affaissables

hydraulique de matériaux fins, ou par dissolution de roches solubles. L'évolution de ces processus peut être aggravée par l'intervention humaine.

Un cas plus récent d'affaissement brutal, survenu le 18 novembre 2016, est celui qui a eu lieu à Alger, sur l'autoroute au niveau de Ben Aknoun, en direction de Zéralda. Cet incident a fait 11 blessés, à la suite de la chute de leurs véhicules dans un immense trou causé par l'effondrement. Celui-ci mesurait environ 9 mètres de diamètre et de 4 à 5 mètres de profondeur. Selon les déclarations relayées par les médias, l'effondrement serait dû à l'éclatement de la conduite principale d'alimentation en eau potable (Figure 2.2).



Figure 2. 2 : Effondrement récent à Alger

2.5 Propriétés Physiques des Sols Affaissables

Désignant l'ensemble des caractéristiques physiques qui rendent certains sols susceptibles de s'affaisser (c'est-à-dire de subir un affaissement ou un tassement soudain), généralement sous l'effet de l'eau ou de charges supplémentaires.

Voici les principales propriétés physiques des *sols affaissables* :

A. Faible densité et forte porosité

- Ces sols ont une structure lâche, souvent peu compacte.
- Cela signifie qu'il y a beaucoup d'espaces vides (pores) entre les particules solides.
- Sous l'effet de l'eau ou d'un poids, la structure peut s'effondrer, provoquant un affaissement.

B. Présence de fines (limons, silt)

- Les sols affaissables sont souvent riches en particules très fines.
- Ces particules peuvent être facilement déplacées ou dissoutes par l'eau, aggravant le phénomène.

Chapitre 2 : Les Sols Affaissables

C. Cohésion faible à moyenne

- Leur cohésion est souvent insuffisante pour résister aux sollicitations mécaniques ou à la saturation en eau.
- Ils peuvent perdre leur stabilité rapidement.

D. Saturation en eau

- Certains de ces sols restent stables tant qu'ils sont secs, mais s'affaissent brutalement une fois mouillés.
- C'est typique des sols collapsibles comme les lœss ou certains limons non consolidés.

E. Structure fragile (squelette instable)

- Leur structure est souvent formée par des liaisons faibles (par capillarité ou cimentation légère).
- L'introduction d'eau peut rompre ces liaisons, provoquant un effondrement.

Exemples de sols affaissables :

- Lœss (dépôts éoliens riches en limons)
- Tufs volcaniques poreux
- Sol alluvial meuble
- Certaines argiles non consolidées

L'analyse des nombreuses études ont permet d'établir les caractéristiques principales des sols lœssiques ou affaissables On peut énumérer :

Tableau 2.1 : propriétés physiques des sols affaissables.

PROPRIETES DE SOL	CARACTERISTIQUES
Poids volumique (γ)	Varie de 12.8 à 21.1 KN/m ³
Poids volumique des grains solides (γ_s)	Varie de 25.1 à 28.4 KN/m ³
Teneur en eau (w)	Une faible teneur en eau, qui varie de 6 à 11%
Porosité (n)	La porosité totale des sols lœssiques est comprise entre 30 et 60%
Indice de vide (e)	Compris entre 42.85 et 150%

Chapitre 2 : Les Sols Affaissables

2.6 Différents Types de Sols Affaissables

Les sols affaissables sont des matériaux dont le type de particules et le mode de dépôt se combinent pour provoquer un affaissement. Selon cette définition, Rogers (1995) a classé ces sols en deux catégories :

- Les sols compactés artificiellement dans la partie sèche de la courbe de Proctor.
- Les sols naturellement déposés à structure métastable.

2.6.1 Sols Compactés par l'Homme

Depuis 1953, plusieurs cas de dommages graves dus à l'affaissement de sols dans des remblais compactés ont été rapportés dans la littérature.

Lawton et Fragaszy (1992) ont indiqué que presque tous les types de sols compactés sont susceptibles de s'affaisser. Il est important de souligner que même les sables propres, les argiles pures, ainsi que les sols contenant une forte proportion de graviers peuvent subir un affaissement.

Des tassements par affaissement ont été observés dans divers types de remblais routiers compactés. Par ailleurs, plusieurs cas de ruptures de barrages en terre ont également été documentés dans la littérature.

2.6.2 Sols Naturellement Déposés

Les dépôts de sols naturels résultent d'un processus combinant l'érosion, le transport et la déposition de matériaux issus de la décomposition des roches mères.

Les sédiments à structure affaissable se forment à la suite de ce processus géologique. Les sols résiduels, l'argile sensible (déposée par l'eau) et le lœss (déposé par le vent) constituent les exemples les plus importants de sols affaissables naturellement déposés.

2.6.2.1 Lœss (Éoliens)

Ce type de sol est évidemment non saturé et se trouve dans les régions arides et semi-arides. Il est transporté par le vent, allant du lœss pour les particules les plus fines, jusqu'au sable des dunes, des plages, ou encore aux dépôts de poussières volcaniques pour les particules les plus grossières.

La structure naturelle de ces sols peut être maintenue par des liaisons cimentées d'argile, comme dans le cas des sols lœssiques. Ces dépôts sont caractéristiques des zones arides, où le niveau de la nappe phréatique est situé à grande profondeur par rapport à la surface du sol.

Chapitre 2 : Les Sols Affaissables

Cependant, en cas de saturation, les liaisons cimentées d'argile s'affaiblissent fortement et perdent leur résistance, ce qui entraîne une destruction rapide et complète de la structure du sol.

Parfois, ces dépôts éoliens sont protégés des précipitations par la présence d'une croûte d'argile imperméable. Cette croûte empêche l'infiltration de l'eau et préserve ainsi la structure naturelle du sol. Pour cette raison, même durant des périodes de précipitations modérées, les dépôts éoliens fins ne sont pas altérés, ou seulement partiellement.

2.6.2.2 Sols Résiduels

Les sols résiduels se forment **in situ** sous l'effet de l'érosion, c'est-à-dire par la décomposition, la désintégration et l'altération mécanique des composants de la roche mère. Les particules produites peuvent avoir des dimensions variées : fragments grossiers, gravier, sable, limon et argile.

Les dépôts de sols résiduels se caractérisent par une couche dont l'épaisseur peut varier de quelques centimètres à plusieurs mètres, en fonction du climat et des conditions environnementales de la région.

Une structure affaissable peut se développer à la suite du lessivage et de la perte des matériaux solubles dans l'eau, comme l'ont souligné Clemence et Finbarr (1981).

2.6.2.3 Dépôts de sols affaissables transportés par l'eau

Les dépôts de sols affaissables d'origine hydrique peuvent être classés en deux grands groupes : les dépôts alluvionnaires et les argiles sensibles. Dans les dépôts alluvionnaires, les particules du sol sont transportées et déposées par l'eau, formant parfois des écoulements boueux. Jefferson et Smalley (1997) ont défini les argiles sensibles comme étant constituées de petites particules semi-angulaires, en forme de lames, de dimensions comprises entre 2 et 5 μm . Ces particules se déposent par décantation lente, formant ainsi des structures de sol à maillage ouvert.

Les argiles sensibles présentent généralement une teneur en eau supérieure à leur limite de liquidité.

La caractéristique la plus importante de l'argile sensible est son rétrécissement considérable lorsqu'elle perd de l'eau, ce qui peut entraîner de graves problèmes pour les fondations. Cela illustre les propriétés physiques typiques des sols affaissables.

Chapitre 2 : Les Sols Affaissables

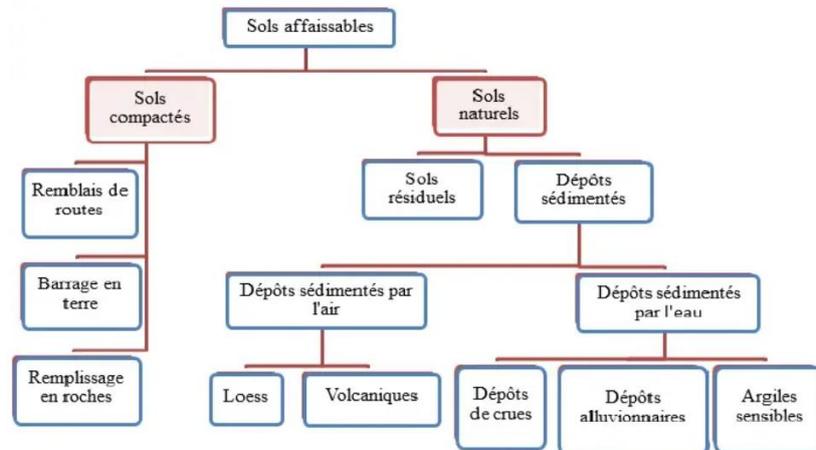


Figure 2. 3 : les principaux types des sols affaissables (d'après Rogers, 1995).

2.7 Classement des Sols Affaissables

Uriel et Serrano (1973–1974) ont classé les sols à effondrement brusque en deux groupes :

Groupe 1 : sols dans lesquels un changement rapide dans la relation entre les pressions et les déformations se produit, sans atteindre la résistance à la rupture. L'effondrement est alors uniquement provoqué par une variation des pressions. Ce groupe comprend les limons, les argiles cimentées et les roches très poreuses.

Groupe 2 : sols pouvant subir un effondrement même en l'absence de changements brusques de pression ou de conditions spécifiques déclenchantes. C'est le cas, par exemple, des loess et de certaines argiles contenant des sulfates.

Lors d'une humidification progressive, la relation contrainte–déformation suit une courbe lisse et continue, sans variations soudaines. La saturation peut néanmoins entraîner un changement significatif de volume, dû à l'augmentation de la pression interstitielle dans les pores. Cela provoque un affaiblissement de la résistance au cisaillement du sol.

2.8 Mécanisme de l'Affaissement

Selon Lawton et Fragazy (1992), quatre conditions sont généralement nécessaires pour qu'un affaissement se produise dans un sol partiellement saturé :

1. Une structure métastable, ouverte et partiellement saturée ;
2. Une contrainte totale appliquée suffisamment élevée ;
3. Un matériau de liaison ou de cimentation stabilisant le sol à l'état partiellement saturé ;
4. L'ajout d'eau au sol, qui entraîne la dégradation du matériau de liaison.

Chapitre 2 : Les Sols Affaissables

Cette dégradation provoque l'effondrement des liaisons intergranulaires par cisaillement, ce qui conduit à une réduction significative du volume de la masse de sol. Quelle que soit la nature des liaisons entre les grains dans les sols affaissables, celles-ci perdent leur résistance après l'ajout d'eau (voir Fig. 2.4).

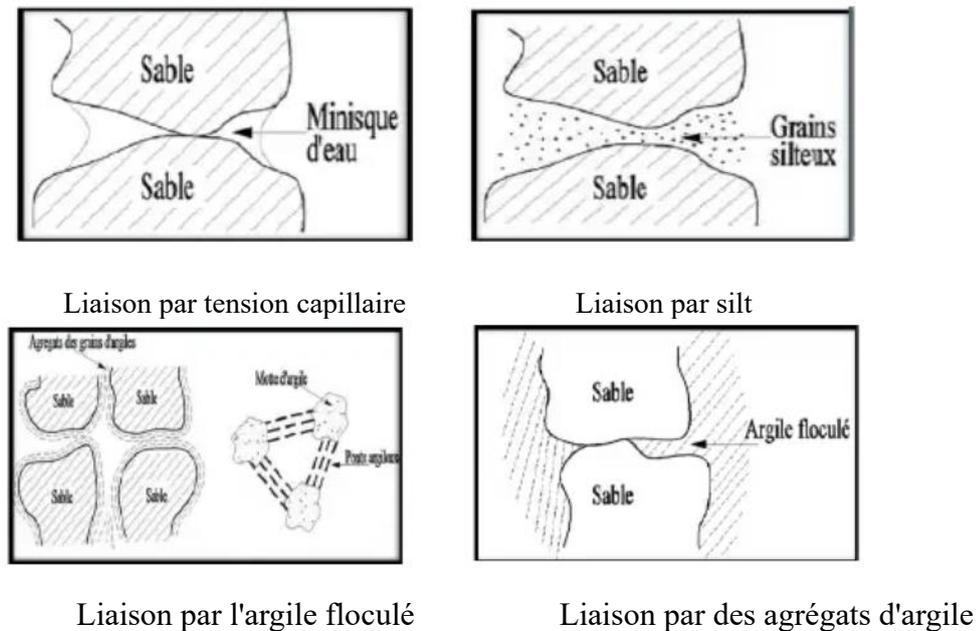


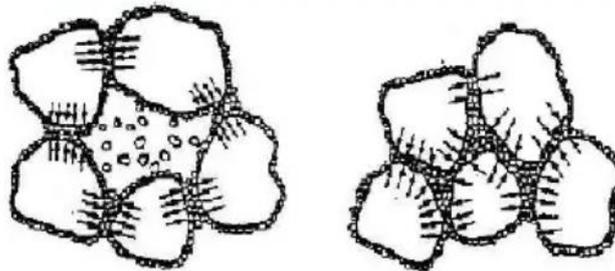
Figure 2. 4 : Liaisons inter-granulaires.

Dans une étude menée par Ayadat et Belouahri (1996), il a été constaté que la granulométrie exerce une influence directe sur l'amplitude et le taux d'affaissement. Il a également été avancé que la migration des particules fines d'un horizon du sol à un autre — un phénomène connu sous le nom de suffusion — peut constituer l'une des causes de l'effondrement (Ayadat, 1998).

Casagrande (1932) a proposé un modèle décrivant l'arrangement des particules dans un sable limoneux lâche et affaissable. Dans ce modèle, les particules fines se consolident sous l'effet de la contrainte totale, acquièrent une certaine résistance et jouent un rôle de liant entre les grains de sable.

L'application d'une contrainte sur le sol, à sa teneur en eau naturelle, provoque une légère compression des particules fines (figure 5a). Si de l'eau est ensuite ajoutée jusqu'à atteindre une certaine teneur, les liaisons assurées par les fines ne résistent plus aux forces locales de micro-cisaillement. Par conséquent, la structure du sol s'effondre (figure 5b).

Chapitre 2 : Les Sols Affaissables



(a) Structure du sol chargée avant inondation

(b) structures du sol chargée inondation

Figure 2.5 : Arrangement des particules du sable limoneux suggéré par Casagrande (1932)

2.9 Essai de Laboratoire pour la détermination du potentiel d'affaissement

Jennings et Knight (1975) ont proposé une procédure utilisant le double œdomètre pour déterminer le potentiel d'affaissement. En prenant un échantillon non perturbé à sa teneur en humidité naturelle, on le place dans un anneau de consolidomètre. L'échantillon est ensuite progressivement chargé jusqu'à une pression de 200 kPa. À cette pression, l'échantillon est immergé dans l'eau et laissé en place pendant 24 heures, puis l'essai de consolidation est poursuivi jusqu'à sa limite de charge maximale normale. La figure 6 illustre les étapes de l'essai de potentiel d'effondrement. Le potentiel d'effondrement (PC) est alors défini comme suit :

$$CP = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e_c}{1 + e_0} \cdot 100\%$$

Chapitre 2 : Les Sols Affaissables

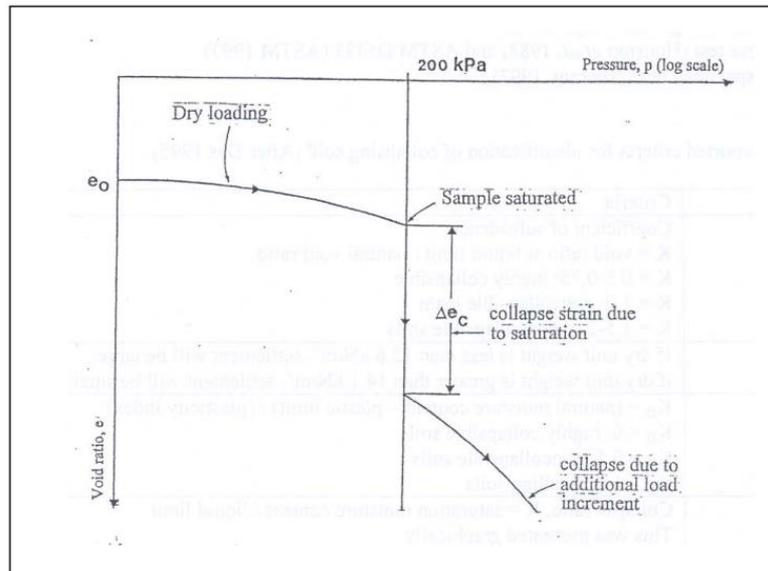


Figure 2. 6 : Résultat typique d'un test de potentiel d'effondrement (d'après Clemmence et Finbarr 1981).

2.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'origine, la formation, les types, les propriétés physiques ainsi que la répartition des sols affaissables dans le monde et en Algérie.

À partir de ces informations, nous avons conclu que le sol affaissable est généralement d'origine éolienne. Il se caractérise par une structure particulière, une composition chimique spécifique, ainsi qu'une stratigraphie bien définie.

Ce type de sol couvre de vastes surfaces à travers le monde. Il est généralement fin et homogène, avec une couleur variant du gris au rouge.

Chapitre 3 :
TECHNIQUES DES
TRAITEMENTS
DES SOLS AFFAISSABLES

Chapitre 3 : TECHNIQUES DES TRAITEMENTS DES SOLS AFFAISSABLES

3.1. Introduction

Les **sols affaissables** sont des sols susceptibles de subir un tassement important lorsqu'ils sont humidifiés ou soumis à une charge. On les retrouve souvent dans les terrains sableux ou limoneux faiblement cohésifs, parfois en présence de matières organiques. Lorsqu'un sol **affaissable** est sollicité par une structure, cela peut entraîner des fissures, des affaissements différentiels, voire des effondrements localisés. Pour prévenir ces risques, des techniques de *traitement des sols* sont mises en œuvre avant ou pendant la construction.

Donc, le traitement des sols affaissables consiste à réduire leur potentiel d'effondrement (C_p) à un niveau acceptable. Pour y parvenir, plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre, et le choix dépend principalement de la profondeur des couches concernées et de la capacité portante du sol.

Parmi les techniques utilisées, on trouve les méthodes d'**injection**, qui consistent à introduire dans le sol des matériaux comme le **bitume**, le **ciment**, le **chaux** ou encore le **laitier**, afin de combler les vides et de solidifier la structure du sol. D'autres procédés comme le **pilonnage** ou même la **congélation artificielle** peuvent également être envisagés, bien qu'ils soient généralement coûteux et réservés à des cas particuliers.

Cependant, dans le domaine des travaux routiers, la solution la plus courante reste le **compactage mécanique**. Elle est moins onéreuse et permet d'obtenir une amélioration efficace des caractéristiques du sol, notamment en termes de densité et de portance, tout en limitant les risques d'affaissement ultérieur.

3.2. Choix du Traitement d'un Sol Affaissable

Le choix du traitement d'un sol affaissable repose sur plusieurs critères techniques, économiques et environnementaux. L'objectif principal est de garantir la stabilité des ouvrages en réduisant le potentiel d'effondrement du sol à un niveau acceptable. Pour cela, il est indispensable de réaliser une étude géotechnique préalable, qui permet d'identifier la nature du sol, son comportement en présence d'eau, sa profondeur, ainsi que sa capacité portante.

Chapitre 3 : techniques des traitements des sols affaissables

3.2.1. Critères influençant le choix

Parmi les facteurs les plus déterminants figurent :

- La profondeur de la couche affaissable : Si elle est superficielle, un compactage peut suffire. Si elle est plus profonde, des techniques comme les injections ou les inclusions rigides peuvent être nécessaires.
- La charge appliquée par la structure : Plus la charge est élevée, plus le traitement devra être performant pour limiter les tassements différentiels.
- L'accessibilité au site et le coût des travaux influencent aussi fortement le choix. Certaines méthodes, comme le pilonnage ou les injections profondes, peuvent être techniquement adaptées mais financièrement trop lourdes.

3.2.2. Méthodes disponibles selon le contexte

Dans les projets routiers ou les remblais, le compactage mécanique reste le traitement le plus courant en raison de sa simplicité et de son coût réduit. Pour les bâtiments sensibles ou les infrastructures stratégiques, on peut recourir à des injections de liants (ciment, chaux, silicates) ou à des techniques plus complexes comme le vibroflottage, la congélation temporaire ou les micropieux.

3.2.3. Le Choix Basé sur Classes Granulométriques et l'Etat du Sol

Le choix des méthodes d'amélioration des sols repose en grande partie sur la granulométrie du sol ainsi que sur son état, souvent évalué à l'aide de la résistance de cône mesurée au pénétromètre statique. En fonction de la classe granulométrique (argileuse, limoneuse, sableuse ou graveleuse), certaines techniques seront plus adaptées que d'autres. Par exemple, les sols fins à faible résistance nécessitent généralement des traitements chimiques (stabilisation à la chaux ou au ciment), tandis que les sols grossiers, comme les sables ou graviers, peuvent être densifiés efficacement par des méthodes mécaniques telles que le compactage ou le vibrocompactage. La résistance de cône permet de déterminer la portance du sol en place et oriente ainsi le choix de la méthode la plus efficace selon la nature et l'état initial du terrain.

Chapitre 3 : techniques des traitements des sols affaissables

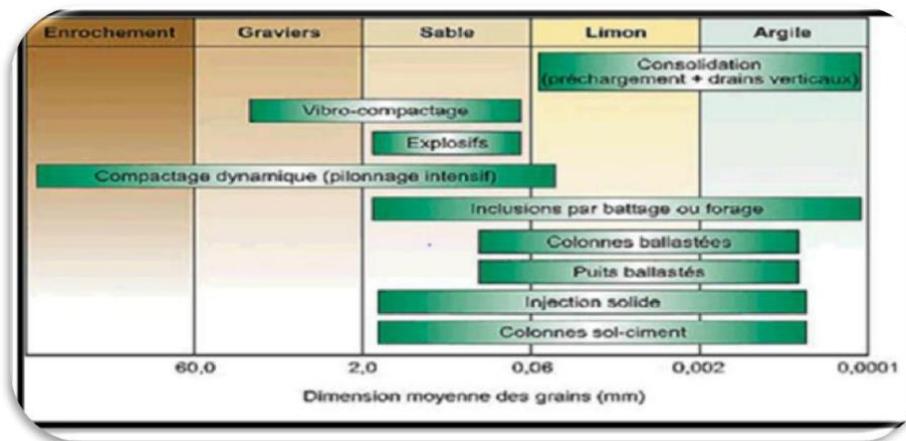


Figure 3. 1 : Les champs d'application des différentes techniques de traitement (Ziani et al., 2019).

3.2.4. Le Choix Basé sur la Profondeur du Sol

Généralement, les méthodes de traitement dépendent de la profondeur du sol affaissable et de la capacité portante requise par l'ouvrage à édifier. Les techniques varient selon que l'affaissement potentiel se situe en surface ou en profondeur, influençant le choix entre un traitement superficiel ou profond. Les méthodes utilisées dans le passé, et qui seront probablement encore employées à l'avenir, ont été résumées par Bara (1976) et sont reprises dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Méthodes de traitement des sols affaissables (Bara, 1976).

Profondeur du sol à traiter	Les méthodes de traitement de sols
0 à 1.5 m 1.50 à 10m	<p>Méthodes courantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mouillage du sol et compactage. - Excavation et compactage (avec ou sans utilisation d'un - Contrôle des sources d'eau par drainage. - Vibroflottation. - Utilisation des pieux. - Injection du silt ou de la chaux. - Inondation et infiltration d'eau par des puits. - Inondation et infiltration d'eau par des puits avec utilisation des explosifs
Plus de 10m	<p>Futures méthodes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Traitement à la chaleur pour solidifier le sol sur place. - Traitement aux ultrasons, les vibrations peuvent modifier les mécanismes de liaisons entre les grains. - Utilisation d'un mortier additif, remplissant les pores, avant

Chapitre 3 : techniques des traitements des sols affaissables

	solidification. - Traitement électrochimiques (addition d'un produit chimique pouvant rendre très résistant les liaisons inter granulaires).
--	---

3.3. Traitement par Compactage

Le compactage de surface est généralement utilisé pour des profondeurs allant jusqu'à environ 3 mètres. Pour des profondeurs supérieures, on a recours au compactage dynamique. Le compactage regroupe l'ensemble des opérations mécaniques (apport d'énergie mécanique) visant à accroître la densité d'un sol. Ce processus resserre la texture du sol, ce qui réduit les déformations et les tassements, augmente la compacité et améliore la capacité portante du sol. Les ouvrages couramment concernés par le compactage sont notamment les remblais routiers, les barrages en terre et les pistes d'aérodrome.

La densification mécanique du sol peut entraîner :

- Une modification de la granulométrie ;
- Une modification de la teneur en eau ;
- Une réduction ou une élimination des risques de tassement ;
- Une augmentation de la résistance du sol et de la stabilité des talus ;
- Une amélioration de la capacité portante ;
- Une limitation des variations de volume causées par le gel, le gonflement et le retrait.



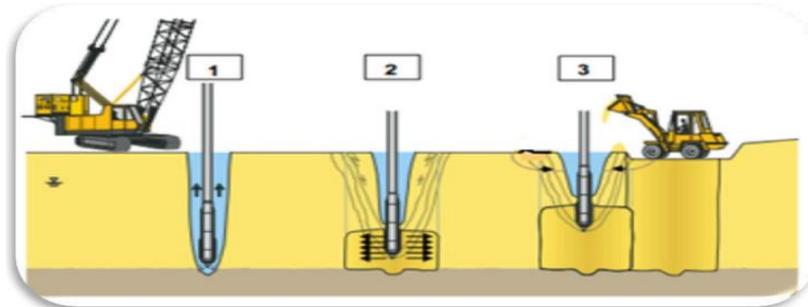
Figure 3. 2 : Atelier de compactage dynamique et impacts de la masse (Thomas et Javelaud, 2014).

3.4. Vibrocompactage

Le procédé de vibrocompactage, développé à la fin des années trente, permet de compacter localement, les sols grenus sans cohésion (sables, graviers, cailloux) en place ou mis en remblai au-dessus ou en-dessous de la nappe et ceci jusqu'à des profondeurs maximum de plus de 50 m. c'est une technique d'amélioration des sols pulvérulents de type sablo-graveleux permettant de les densifier sous l'effet de la vibration. Ces vibrations, émises par l'outil, se propagent de grains en grains et provoquent un réarrangement optimal du volume

Chapitre 3 : techniques des traitements des sols affaissables

initial. La réduction de la porosité du matériau permet aussi d'augmenter sa capacité portante de manière significative.



1 : Fonçage du vibreur ; 2 : Compactage des sols ; 3 : Apport des matériaux et finition

Figure 3. 3 : Etapes du Vibrocompactage (Keller, 2016).

Ce procédé de vibrocompactage est appelé aussi la vibroflotation. Cette méthode trouve son application dans les sols granulaires particulièrement les sables propres et les sables siliceux avec une teneur en fines inférieure à 20%. Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense.

3.5. Traitement par Pré-Mouillage

Ces méthodes sont efficaces pour les sols ayant des épaisseurs d'environ 5 m et exigent une disponibilité d'eau en grande quantité, par contre elle est poursuivie dans les sites urbains, Cette technique consiste à réaliser un étang artificiel permettant d'accumuler une grande quantité d'eau au-dessus du sol affaissable, le poids propre du terrain et l'infiltration lente de l'eau seront les causes principales de l'affaissement.

3.6. Traitement Chimique

Le traitement chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Aujourd'hui, les différents produits et techniques utilisés font partie des pratiques courantes dans la réalisation des grands ouvrages de Génie Civil à l'échelle mondiale.

Le recours massif à cette technique, qui valorise les matériaux en place et entraîne une diminution notable des coûts, s'explique principalement par les facteurs suivants : la raréfaction des gisements naturels de matériaux nobles, ainsi qu'un souci écologique croissant, imposant à la fois la préservation des ressources naturelles existantes et la limitation de la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme.

Chapitre 3 : techniques des traitements des sols affaissables

Les ajouts cimentaires et les produits chimiques les plus utilisés sont le ciment, la chaux et les cendres volantes. L'objectif principal du malaxage de ces ajouts avec le sol est d'améliorer ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité. Les différentes propriétés pouvant être améliorées sont : la résistance, la plasticité, la compressibilité, la perméabilité, le potentiel de gonflement et le potentiel d'effondrement. L'amélioration de ces propriétés se traduit soit par l'augmentation de certaines d'entre elles, comme la résistance, soit par la réduction d'autres, telles que la plasticité, la perméabilité et l'érosion.

Un bon malaxage des ajouts cimentaires avec le sol à traiter est un facteur important qui affecte de manière significative la qualité des résultats. Ce malaxage peut se faire par incorporation ou injection de produits chimiques dans le sol, tels que le ciment Portland, la chaux, l'asphalte, le chlorure de calcium ou de sodium, ainsi que des résidus de pâtes et papiers. Il existe trois types courants de traitement chimique :

- Traitement à la chaux ;
- Traitement au ciment ;
- Les colonnes de sol traité ;

Cette technique de stabilisation au ciment a pour effet de rendre les sols plus résistants contre les sollicitations causées par la circulation et les facteurs climatiques.



Figure 3. 4 : Traitement chimique à la chaux et au ciment.

3.7. Traitement par Colonne Ballastée

Les colonnes ballastées, au sens le plus large de terme, ont été élaborées afin de permettre l'amélioration des sols de mauvaises qualités géotechniques. Le fait d'incorporer et de compacter un matériau ayant des caractéristiques géotechniques supérieures au sol en place entraîne un renforcement de ce dernier. Les différentes méthodes d'amélioration répondent à des contraintes techniques liées aux caractéristiques géotechniques des sols en place. Les objectifs généraux qui sont attendus d'une amélioration sont attendus d'une amélioration de sols par inclusions souples sont :

- L'augmentation de la capacité portante du sol ;
- L'augmentation de sa résistance au cisaillement ;
- L'obtention d'un drainage radial efficace assurant la consolidation ;

Les colonnes ballastées sont des colonnes constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactés par passes succes

Chapitre 3 : techniques des traitements des sols affaissables

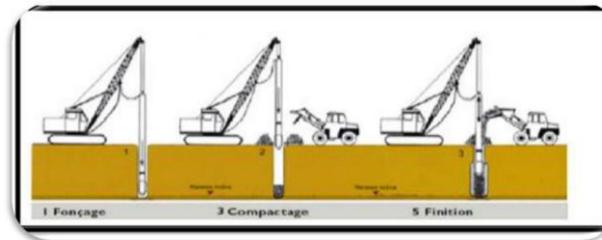


Figure 3. 5 : Mise en œuvre des colonnes ballastées (Belkacem D, 2007).

3.8. Traitements par Congélation

La congélation des terrains instables est un procédé ancien à caractère provisoire employé pour le creusement des fouilles de puits ou de galeries. Cette technique rend le sol étanche et résistant provisoirement. Ce procédé est généralement développé pour les sols grenus mais il peut être appliqué aux argiles molles et aux limons. 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.

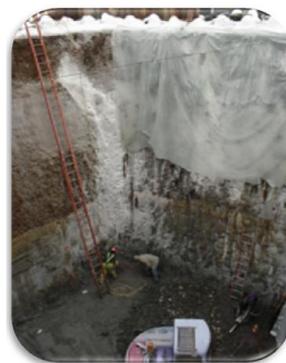


Figure 3. 6 : Chantier utilisant la congélation du sol (Khebizi, 2011).

Les techniques de congélation utilisées sont basées sur la circulation d'un fluide froid dans des tubes enfoncés dans le massif de sol. Une saturation complète du sol est souhaitée. La congélation du sol s'effectue d'habitude en deux étapes à savoir les étapes active et passive de congélation. L'étape active est la plus importante et l'appareillage de réfrigération marche avec sa grande capacité que durant l'étape passive nécessaire pour maintenir l'épaisseur du front de gel contre le dégel.

3.9. Traitements par Pré-Chargement

Le pré-chargement nécessite la compression du sol sous une pression appliquée avant l'application des charges. Cette méthode est utilisée sur des terrains dont le tassement va se

Chapitre 3 : techniques des traitements des sols affaissables

prolonger durant plusieurs années. On applique généralement ces méthodes sur des mauvais terrains de composition principalement argileuse. Le principe consiste à surcharger le terrain afin qu'il se tasse naturellement.

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

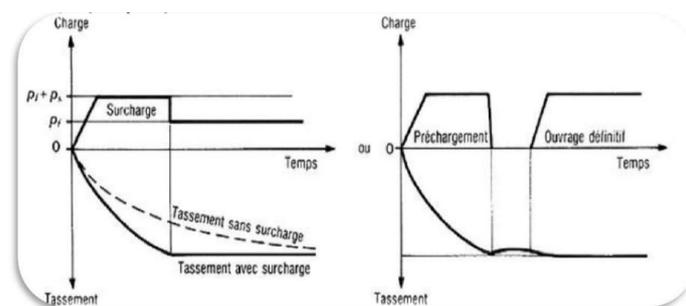


Figure 3. 7 : Principe de traitement par pré-chargement.

Principe du pré-chargement pour le contrôle des tassements. Les effets bénéfiques de ce procédé incluent une augmentation considérable de la capacité de portance par la réduction des pressions interstitielles excessives et de plus la réduction de la compressibilité des sols mous par l'accélération de la consolidation.

3.10. Techniques par Injection

L'injection est une technique d'origine américaine (compaction grouting) initialement utilisée pour stabiliser et remettre à niveau des constructions sujettes à tassements. Elle a été introduite en France en 1983 et utilisée pour des applications beaucoup plus variées. Elle consiste à injecter dans le sol un coulis fluide qui pénètre dans les vides du sol. Un matériau composite est donc obtenu après la prise du coulis. Cette méthode est subdivisée en deux types : Injection classique et le jet grouting. Le résultat de l'injection est donc une diminution de la perméabilité du massif, ce qui est le plus souvent le but recherché. Mais aussi une amélioration des caractéristiques de résistance et de déformabilité est également obtenue. L'injection peut stabiliser un ouvrage en stoppant des déformations. (Khebizi, 2011).

Chapitre 3 : techniques des traitements des sols affaissables

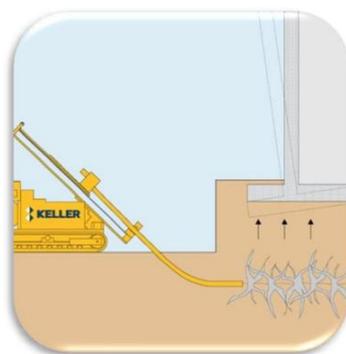


Figure 3. 8 : Technique d'injection (Keller).

3.11. Traitement des Sols par Addition d'Ajouts Minéraux

L'amélioration via les ajouts minéraux est une technique qui est très largement utilisée de nos jours car non seulement elle concerne la majorité des sols mais en plus elle peut se faire in situ, avant compactage et aussi sur des matériaux excavés. Elle provoque une modification physico-chimique créant ainsi des réactions d'échanges de base avec les particules d'argile (cation) et les réactions pouzzolaniques (cimentation). Ces réactions corrigent les défauts de perméabilité et augmentent la résistance et la durabilité du sol. Les ajouts minéraux le plus souvent utilisées sont la chaux, le ciment, les ajouts cimentaires (pouzzolane, cendre volante, laitier, fumée de silice, écorce de riz...), le bitume, les sels.

3.12. Les Avantages et les Inconvénients des Différentes Méthodes

Tableau 3.2 : Les Avantages et les Inconvénients des Différentes Méthodes.

Avantages	Inconvénients
Pré mouillage à l'eau	Pré mouillage à l'eau
Prix abordable. Facilité d'application.	Tassement excessifs sans pré chargement. Impossibilité de densifier les couches supérieures.
Pré mouillage avec silicate de sodium	Pré mouillage avec silicate de sodium
Réduction spectaculaire d'effondrement. Développement d'une cimentation permanente. Réduction de la conductivité hydraulique (perméabilité). Réduction significative des tassements dus au Fluage	Coût t plus élevé. Expérience limitée. Profondeur de traitement limitée à moins de 2m.
Excavation partielle et remplacement avec remblai	Excavation partielle et remplacement avec remblai
Coût t relativement faible. Facilité d'application. Réduction de contraintes appliquées sur le sol effondrable sous-adjacent.	Traitement des zones de surfaces uniquement. Tassement important dans le cas des zones profondes. Demande une grande expérience.

Chapitre 3 : techniques des traitements des sols affaissables

Réduction des tassements pour des volumes d'eau limitée.	
Compactage dynamique à teneur naturelle	Compactage dynamique à teneur naturelle
Grande réduction de l'affaissement. Réduction de la conductivité hydraulique (perméabilité).	Coût t plus élevé. Dégâts potentiels dus aux vibrations. Traitement non uniforme.
Compactage dynamique après pré mouillage	Compactage dynamique après pré mouillage
Diminution significative d'affaissement. Efficacité de compactage. Réduction au niveau de vibration. Plus grande uniformité dans la densification	Coût t plus élevé. Augmentation du fluage à long terme. Risque de liquéfaction quand la teneur en eau est élevée. Réduction de la teneur en eau à la suite du traitement peut être assez longue.

3.13. Techniques de traitement in situ

Parmi les méthodes les plus utilisées, on distingue :

- **Le compactage dynamique** : Cette méthode consiste à faire tomber de lourdes masses sur le sol pour densifier les couches superficielles. Elle est particulièrement efficace pour les sols sableux peu profonds.
- **L'injection (ou la consolidation par injection)** : On injecte sous pression des liants (comme du coulis de ciment ou de silicate) dans le sol afin de combler les vides et renforcer sa cohésion .C'est une technique adaptée aux zones urbaines ou sensibles.
- **La vibrocompaction et le vibroflottage** : Ces techniques consistent à utiliser des sondes vibrantes pour densifier les sols granulaires. Elles améliorent la portance et réduisent les risques d'affaissement.

3.14. Techniques de traitement par amélioration chimique

D'autres techniques font appel à des liants chimiques :

- **La stabilisation à la chaux ou au ciment** : Ce traitement consiste à mélanger le sol avec de la chaux ou du ciment afin de modifier sa structure et d'augmenter sa résistance mécanique. Il est efficace sur les limons ou les argiles faiblement cohésives.
- **Les géopolymères et polymères injectés** : De nouveaux produits chimiques peuvent être utilisés pour renforcer les sols sans creuser. Ils sont souvent employés dans des cas d'urgence ou lorsque l'accès est limité.

Chapitre 3 : techniques des traitements des sols affaissables

3.15. Autres méthodes complémentaires

On peut également utiliser :

- **Le drainage** : Permet de contrôler l'humidité du sol pour limiter les risques d'affaissement après construction.
- **Les inclusions rigides (colonnes ballastées ou micropieux)** : Ce sont des éléments porteurs insérés dans le sol pour transférer les charges de la structure vers des couches plus stables.

3.16. Conclusion

Le choix du traitement d'un sol affaissable est une démarche d'ingénierie qui repose sur un équilibre entre performance, coût et faisabilité. Il n'existe pas de solution universelle : chaque projet nécessite une analyse spécifique afin de garantir la sécurité et la durabilité des ouvrages.

La sélection de la technique de traitement dépend de nombreux facteurs : la nature du sol, la profondeur des couches affaissables, la charge de la structure, les conditions d'accès au site et le budget disponible. Une étude géotechnique préalable est indispensable pour identifier les caractéristiques du sol et concevoir une solution adaptée.

Ces traitements visent soit à améliorer les propriétés mécaniques initiales du sol afin de lui conférer les performances nécessaires pour supporter l'ouvrage en toute sécurité, soit à renforcer le sol par l'incorporation d'inclusions. La méthode choisie dépendra de la profondeur des couches affaissables ainsi que des exigences en matière de portance et de limitation des tassements imposées par le projet.

Chapitre 4

Matériaux utilisés et essais expérimentaux

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux

4.1. Introduction

À partir de ce chapitre, nous entamons notre contribution à l'étude expérimentale, qui sera présentée comme suit :

- Caractéristiques des matériaux testés
- Matériels utilisés et manipulation

Deux groupes d'essais seront effectués : des essais préliminaires, nécessaires à l'identification géotechnique des sols, et des essais principaux, réalisés dans le but d'analyser le comportement en compressibilité et en résistance selon les normes spécifiques à ce type de sols, ainsi que de vérifier l'affaissabilité des échantillons testés.

4.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

4.2.1. Le sol utilisé

Les essais ont été réalisés sur un échantillon de sol prélevé à Roknia, située dans la wilaya de Guelma.



Figure 4. 1 : Échantillon du sol utilisé – sol affaissable.

4.2.2. L'ajout utilisé : poudre issue du déchet de brique rouge

Les déchets de brique rouge proviennent de l'usine de briqueterie de Bendjerrah, située dans la wilaya de Guelma. Après leur transport, ces déchets ont été broyés puis soumis à une caractérisation complète.

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux



Figure 4. 2 : L'ajout utilisé (Poudre du déchet de brique rouge).

4.2.2.1. Masses volumique et coefficient d'absorption

Les valeurs de ces deux caractéristiques physiques sont illustrées dans le tableau 4.1

Tableau 4. 1 : Masses volumiques absolue, apparente et Coefficient d'absorption d'eau de la brique utilisée.

Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Coefficient d'absorption d'eau (%)
2.65	1.4	16.1

4.2.2.2. Composition chimique de la poudre du déchet de brique rouge

La composition chimique de la poudre de brique rouge, déterminée par fluorescence X, est présentée dans le **tableau 4.2**.

Les résultats obtenus mettent en évidence des teneurs élevées en **silice (SiO₂)** et en **alumine (Al₂O₃)**, avec un rapport caractéristique entre ces deux oxydes :

$$\left(\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}\right) = 4.89$$

Tableau 4. 2 : Composition chimique de la poudre du déchet de brique rouge utilisé (Nighri. G. 2018).

Eléments	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P.A.F
(%)	4.28	14.17	6.30	69.26	2.25	0.28	1.34	0.02	1.96

Comme il fallait s'y attendre, on constate que notre brique est riche en *silice* et en *alumine*. Pour être utilisée comme **constituant secondaire actif** dans l'industrie du ciment, la poudre de brique doit répondre à certains critères chimiques.

Ainsi, selon la norme américaine ASTM C618 (1980) [1], les matériaux minéraux issus de l'argile cuite doivent satisfaire aux trois conditions suivantes :

- La somme totale des trois oxydes (%SiO₂) + (% Al₂O₃) + (% Fe₂O₃) supérieure à **70%**,
- Le taux de dioxyde de soufre inférieur à **4%**,
- La perte au feu inférieur **10%**.

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux

Si les trois conditions citées précédemment sont vérifiées, le matériau peut être déclaré comme « **pouzzolanique actif** ».

Conformément aux trois critères de la norme ASTM C618 (1998), les déchets de briques utilisés répondent bien à la définition d'un *matériau pouzzolanique actif*.

En effet :

- $(\%SiO_2) + (\%Al_2O_3) + (\%Fe_2O_3) = 69.26 + 14.17 + 6.30 = 89.73\% > 70\%$
- $(\%SiO_3) = 0.02 < 4\%$
- $P.A.F = 12.96 < 10\%$.

Par ailleurs, une deuxième norme indienne [2] exige, afin d'assurer une bonne pouzzolanicité, le respect des deux conditions suivantes :

- La somme des pourcentages en silice (SiO_2) et en alumine (Al_2O_3) doit être supérieure à 50%
- Le pourcentage en chaux (CaO) doit être inférieur à 10 %.

Concernant cette norme indienne, il apparaît que ces deux conditions sont bien remplies, puisque :

- ❖ $(\%SiO_2) + (\%Al_2O_3) = 69,26 + 14,17 = 83,43 \% > 50 \%$,
- ❖ $(\%CaO) = 4,28 \% < 10 \%$.

Ainsi, les résultats de l'analyse chimique confirment le caractère pouzzolanique des produits rouges, et les valeurs obtenues sont conformes aux exigences des normes américaine et indienne. Par ailleurs, en comparant la composition chimique obtenue avec celle d'une autre briqueterie située à Timgad, on remarque des teneurs en oxydes nettement plus élevées dans la poudre de briques de Bendjerrah, comme le montrent les résultats du tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Composition chimique de la poudre des déchets de brique rouge Des briqueteries Bendjerrah et de Timgad.

Eléments	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P.A.F
Bendjerrah(%)	4.28	14.17	6.30	69.26	2.25	0.28	1.34	0.02	1.96
Timgad(%)	12.88	16.61	6.22	53.78	2.20	0.87	2.13	0.65	//

4.3. Les essais préliminaires

- Analyse granulométrique
- Limites d'Atterberg
- Densité spécifique des grains solides
- Essai au bleu de méthylène
- Essai Proctor
- Essai de cisaillement
- Essai mécanique (œdométrique)

Le matériel utilisé dans cette section correspond à l'équipement de laboratoire couramment utilisé, adapté à chaque type de manipulation.

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux

4.4. L'analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056)

L'opération de détermination de la granulométrie consiste à mesurer la taille des grains d'un sol ainsi que les pourcentages en poids des différentes familles de grains constituant un échantillon. Elle s'applique à la fraction du sol dont le diamètre des particules est supérieur à 0.08 mm.

Elle permet ainsi d'établir la distribution dimensionnelle des grains constituant les granulats de taille supérieure à 0.08 mm.

4.4.1. Équipements utilisés

La Figure 4.3 présente les équipements utilisés pour l'analyse granulométrique par tamisage.

- Une série de tamis (de maille carrée)
- Tamis de 0.08mm pour le lavage
- Une étuve pour le séchage
- Un fond
- Une brosse métallique
- Une balance

4.4.2. Principe et Mode opératoire

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon à l'aide d'une série de tamis (2 mm, 1 mm, 0,4 mm, 0,2 mm et 0,08 mm), emboîtés les uns sur les autres, avec des ouvertures décroissantes de haut en bas.

Le matériau, préalablement séché dans une étuve à une température de 105 °C, est recueilli dans un plat, puis lavé abondamment à l'eau sur le tamis de 0,08 mm afin d'éliminer les particules fines. Le lavage est considéré comme terminé lorsque l'eau qui s'écoule devient claire.

Après le lavage, les refus sont placés dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures. À la sortie de l'étuve, on procède au tamisage.

Il convient de choisir une série de tamis de manière à ce que l'ensemble du granulat puisse passer à travers le tamis de plus grande ouverture. Les tamis sont empilés dans l'ordre croissant des dimensions, du bas vers le haut. L'échantillon est ensuite agité jusqu'à ce qu'il ne reste pratiquement plus de particules en mouvement.

Les refus sont alors pesés de manière cumulative : on pèse d'abord le contenu du tamis supérieur, puis on y ajoute successivement le contenu du tamis immédiatement inférieur, et ainsi de suite. Les résultats sont ensuite reportés dans un tableau.

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux



Figure 4. 3 : L'analyse granulométrique par tamisage.

4.5. Densités spécifiques des grains solides (NF P 94 -054).

La masse volumique spécifique des grains solides du sol est le rapport entre le poids (ou la masse) des grains solides contenus dans une certaine quantité de sol et le volume occupé par ces grains.

$$\gamma_s = W_s / V_s$$

4.5.1. Équipements utilisés et Mode opératoire

Équipements :

- Un pycnomètre en verre
- Une balance de précision
- Un entonnoir à long col

Mode opératoire:

- Préparer un échantillon de sable, sec, préalablement séché à l'étuve puis refroidi.
- Peser le pycnomètre vide, propre et sec : M_0 .
- Dévisser le couvercle, introduire 25 g de matériau dans le pycnomètre, puis peser l'ensemble : M_1 .
- Remplir le pycnomètre à moitié avec de l'eau, puis agiter énergiquement à l'aide d'une tige en verre pour chasser les bulles d'air.
- Ajouter de l'eau jusqu'à 2 cm du bord supérieur, visser le couvercle, puis compléter le remplissage à l'aide d'une pissette par le petit trou du couvercle.
- Reboucher le trou avec un doigt et secouer doucement le pycnomètre.
- Laisser reposer un bon moment afin que l'air résiduel puisse s'échapper.
- Essuyer soigneusement les parois extérieures du pycnomètre, puis peser l'ensemble : M_2 .
- Vider, laver puis remplir le pycnomètre uniquement avec de l'eau jusqu'au niveau du trou supérieur.
- Essuyer les parois extérieures, puis peser à nouveau l'ensemble : M_3 .

Figure 4.4 présente la détermination de la densité spécifique des grains solides

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux

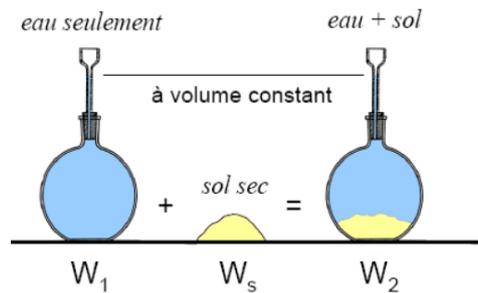


Figure 4. 4 : Détermination de la densité spécifique des grains solides

4.6. Essai Proctor (NF P 94-093).

Cet essai consiste à humidifier un matériau à différentes teneurs en eau, puis à le compacter pour chaque teneur selon un procédé et une énergie de compactage normalisés. Pour chaque teneur en eau, on détermine la masse volumique sèche du matériau, ce qui permet de tracer la courbe représentant l'évolution de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

4.6.1. Équipements utilisés et Mode opératoire

Figure 4.5 présente les équipements utilisés pour l'essai Proctor.

- Moule Proctor avec embase et hausse.
- Dame Proctor normal.
- Règle à araser.
- Balance.



Figure 4. 5 : les équipements utilisés pour l'essai Proctor.

Pour le mode opératoire on suit les étapes suivantes :

- 1) Préparation du matériau :
 - Prendre 2.5 kg du matériau.
 - Humidifier soigneusement le matériau ainsi préparé à la teneur en eau désiré.
 - L'homogénéiser à la truelle, puis en le malaxant à la main ou dans un malaxeur.
- 2) Fixer la hausse sur le moule. Lubrifier l'intérieur du moule et celui de la hausse.
- 3) Mettre une quantité de matériaux dans le moule, suffisante pour qu'une fois compactée chacune des trois couches ait sensiblement la même épaisseur (la dernière couche devant avoir sa face supérieure au-dessus du niveau supérieur du moule, c'est-à-dire à l'intérieur de la hausse).

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux

- 4) Compacter chaque couche à l'aide de dame de compactage en 25 coups. S'arranger pour que le compactage soit uniforme.
- 5) Une fois les trois couches compactées, enlever la hausse avec beaucoup de soin afin d'éviter la rupture de l'échantillon. • Araser le moule à l'aide de la règle. • Nettoyer l'extérieur du moule à l'aide d'un pinceau. • Peser le moule : on obtient le poids total humide.
- 6) Enlever la base du moule.
- 7) Arrêter l'essai quand on obtient par deux fois consécutives une diminution du poids total humide par rapport à l'essai précédent. A la fin on trace la courbe de Proctor (voir figure 4.6).

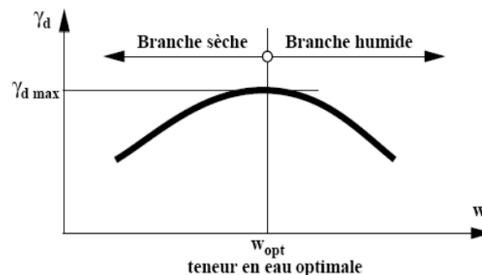


Figure 4. 6 : Courbe de Proctor.

4.7. Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau caractéristiques des sols fins, permettant notamment d'établir leur classification et d'évaluer leur consistance. Ces teneurs en eau permettent de distinguer les différents états du sol, comme le montre la figure 4.7. L'essai est réalisé sur la fraction de sol comprise entre 0 et 400 μm .

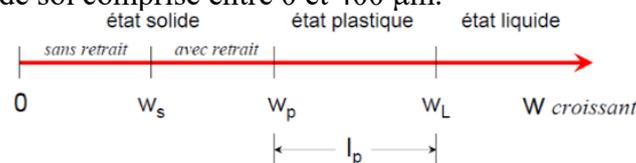


Figure 4. 7 : Comportement des sols fins avec la variation de la teneur en eau (w).

4.7.1 Limite de liquidité w_L

Il existe deux méthodes pour définir la teneur en eau correspondant à la limite de liquidité :

- L'essai à la coupelle de Casagrande (NF P94-051)
- L'essai au cône de pénétration (NF P94-052-1)

A- Méthode de la coupelle de Casagrande

Teneur en eau pour laquelle une entaille est refermée sur 10 mm après 25 coups (figure 4.8).

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux



Figure 4. 8 : Méthode de Casagrande.

B- Méthode du cône de pénétration

Basée sur la relation entre la teneur en eau et la pénétration d'un cône dans un échantillon de sol, la méthode d'essai du pénétromètre à cône (figure 4.9) pour la limite de liquidité fournit une valeur immédiate de la pénétration. La limite de liquidité est déduite pour une pénétration de 17 mm



Figure 4. 9 : Méthode au cône de pénétration.

4.7.2 Limite de plasticité w_p

Teneur en eau correspondant à une limite arbitraire entre les états plastique et solide avec retrait de la consistance d'un sol. En formant un cylindre de 3mm de diamètre se brisant en tronçons de 10 à 20 mm (figure 4.10).

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux



Figure 4. 10 : Limite de plasticité w_p par la méthode au rouleau.

Former une boulette à partir de la pâte préparée, puis la rouler à la main sur une plaque lisse de manière à obtenir un rouleau de 3 mm de diamètre et de 10 cm de longueur, sans qu'il soit creux. La limite de plasticité est atteinte lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm (voir figure 4.11). Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau est réintégré à la boulette. La pâte est ensuite malaxée tout en étant légèrement séchée, éventuellement sous un flux d'air chaud à une température inférieure à 50 °C.



Figure 4. 11 : Mode opératoire pour limite de liquidité.

4.7.3 Indice de plasticité I_p

$$I_p = w_L - w_p$$

4.7.4 Indice de consistance I_c

$$I_c = \frac{w_L - w_{nat}}{I_p}$$

4.7.6 Activité A_c

$$A_c = \frac{I_p}{\text{teneur en argile}}$$

4.8 Essai au bleu de méthylène (NF EN 933-9)

L'essai au bleu de méthylène a pour but de révéler la présence de fines de nature argileuse et d'en déterminer la concentration. Il repose sur la quantité de bleu de méthylène pouvant

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux

s'adsorber sur les particules argileuses. Tant que le bleu de méthylène est adsorbé, il ne colore pas l'eau. Pour le vérifier, on dépose une goutte sur un papier buvard : le centre de la tache apparaît bleu vif (indiquant la présence d'argile ayant adsorbé le bleu), tandis que l'auréole reste incolore.

À partir d'une certaine dose de bleu de méthylène, l'auréole se colore également : c'est le signe que l'argile a épuisé sa capacité d'adsorption. La quantité de bleu consommée constitue donc une indication de la teneur en argile. La valeur du bleu de méthylène (VBS) s'exprime en grammes de bleu consommés pour 100 grammes de fines. Les valeurs de bleu de méthylène en fonction de la nature du sol sont présentées à la figure 4.12.

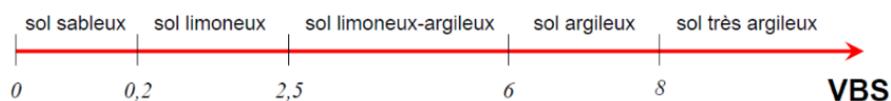


Figure 4. 12 : valeurs du bleu de méthylène en fonction de la nature du sol

Les étapes de l'essai peuvent cependant être définies brièvement comme suit : 500 ml d'eau déminéralisée ou distillée sont ajoutés à 30g d'échantillon dans un récipient de 3 litres. La solution est agitée à l'aide de l'agitateur à ailettes à une vitesse de 700 tr/min pendant au minimum 5 min, puis de manière permanente à 400 tr/min. 5 ml de solution de bleu de méthylène sont ensuite ajoutés à l'aide de la burette et, au bout de 1 minute, le test de la tâche est effectué sur papier filtrer. Les équipements utilisés pour l'essai au bleu de méthylène sont illustrés sur la figure 4.13.

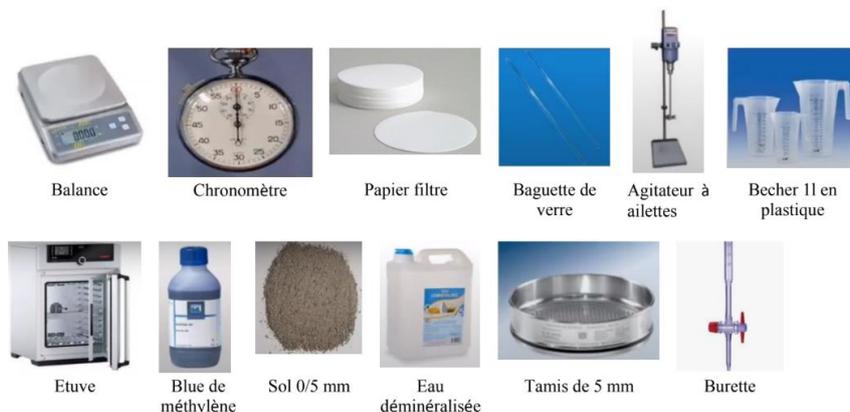


Figure 4. 13 : Equipements utilisés pour l'essai au bleu de méthylène.

4.9. Essais de cisaillement (NF P 94-71)

4.9.1. Introduction

Dans toute étude géotechnique, il est essentiel de connaître la capacité portante du sol, ce qui implique d'évaluer sa résistance mécanique. Cette résistance peut être déterminée à l'aide de différents essais, tels que l'essai de compression simple, l'essai CBR, l'essai au pénétromètre,

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux

l'essai pressiométrique ou encore l'essai triaxial. Dans ce contexte, nous allons aborder l'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande.

Les valeurs de résistance au cisaillement obtenues par cet essai sont représentées sur un graphique appelé droite de Coulomb, en fonction de la contrainte normale appliquée sur le plan de rupture. À partir de cette courbe, on peut déterminer la cohésion du sol (c) et l'angle de frottement interne (φ). On distingue généralement deux grandes catégories de sols :

- Pour les sols pulvérulents, la droite de Coulomb passe par l'origine, ce qui signifie que la cohésion est nulle.
- Pour les sols cohérents, l'eau joue un rôle fondamental dans la résistance au cisaillement.

Afin de simplifier l'analyse, trois types d'essais peuvent être définis selon qu'il y a drainage ou non. La consolidation consiste à appliquer une charge sur l'échantillon tout en le drainant, jusqu'à ce que la pression interstitielle soit totalement dissipée ($u = 0$).

4.9.3 Matériel utilisé et mode opératoire

- Machine de cisaillement
- Une boîte de casagrande
- Une série de poids
- Une trousse coupante
- Un comparateur

La figure 4.14 présente les équipements utilisés pour l'essai de cisaillement.



Figure 4. 14 : Equipements utilisés pour l'essai de cisaillement.

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation entre les deux demi-boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. L'essai consiste à appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort normal de compression N , à l'aide d'un piston, et un effort de cisaillement en déplaçant la demi-boîte inférieure. Un comparateur permet de mesurer le déplacement relatif de l'échantillon.

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux

Il est important de signaler que l'essai est réalisé à l'aide de la boîte de cisaillement soumise respectivement à des contraintes normales de 1 bar, 2 bars et 3 bars. On détermine également la teneur en eau avant et après l'essai, ainsi que la masse volumique par pesée hydrostatique après paraffinage.

Essai UU : essai non consolidé-non drainé.

Essai CU : essai consolidé-non drainé.

Essai CD : essai consolidé-drainé.

4.10. Essai œdométrique (XP P 94-090-1)

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une enceinte cylindrique rigide « odomètre ». Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai. La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissant et décroissant suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

4.10.1 Essai œdométrique simple

L'essai œdométrique simple consiste à charger le spécimen en incréments jusqu'à un certain niveau de contrainte verticale en permettant au spécimen d'être en équilibre sous la contrainte appliquée. L'échantillon est ensuite saturé par l'eau, et la déformation est mesurée. Cette déformation induite par l'addition de l'eau divisée par la hauteur de l'échantillon avant saturation, exprimée en pourcentage, définit le degré d'affaissement.

La manipulation a pour but de déterminer les caractéristiques de compressibilité d'un sol qui permet d'estimer le tassement provoqué par consolidation d'un massif de sol, par exemple sous une fondation superficielle.

Il permet de suivre la consolidation au cours du temps et de déterminer la relation entre les charges de la déformation obtenue après consolidation, il permet également d'atteindre le coefficient de perméabilité verticale pour une compacité donnée.

Il fournit les caractéristiques du sol en place :

- l'indice de compression c_c qui indique la compressibilité du sol
- le coefficient de consolidation c_v qui permet de déterminer le temps de consolidation sous une charge donnée.

4.10.2 Matériel utilisé et mode opératoire

- Balance
- Une étuve
- Une série de poids
- Odomètre cellule de perméabilité

Chapitre 4 - Matériaux utilisés et essais expérimentaux

- Un comparateur

L'échantillon de sol est placé dans une boîte cylindrique rigide de section circulaire entre deux pierres poreuses assurant son drainage. Un piston permet d'appliquer sur l'échantillon une contrainte verticale uniforme constante pendant un temps déterminé. On mesure alors la variation de hauteur de l'éprouvette de sol en fonction de la contrainte appliquée (voir figure 4.15). On recommence le processus à différents paliers de chargement de 24 h ; A partir de cet essai ; on peut établir des courbes de compressibilité (indice des vides en fonction de la contrainte) et de consolidation (variation relative de tassement en fonction du logarithme du temps) utiles pour évaluer l'amplitude des tassements et les durées de consolidation des sols .



Figure 4. 15 : Préparation des éprouvettes pour l'essai œdométrique.

Il est nécessaire de signaler qu'à chaque palier de chargement ou changement de charge, il faut attendre la stabilisation du tassement, c'est-à-dire la dissipation complète de la pression interstitielle, avant de procéder à la lecture. C'est pourquoi, dans notre cas, le chargement est effectué toutes les deux heures, après avoir relevé le tassement correspondant au palier précédent.

Conclusion

Ce chapitre a présenté les essais préliminaires de caractérisation et d'identification réalisés sur les sols utilisés dans notre étude. Les essais principaux ont permis de définir le comportement réel des sols, d'évaluer le taux d'affaissement en conditions saturées et non saturées, ainsi que d'identifier les paramètres influencés par cet affaissement.

L'ensemble des essais a été réalisé en laboratoire, à l'aide d'appareillages, d'outils et de méthodes de manipulation conformes aux normes en vigueur en géotechnique.

Chapitre 5 :
Discussion et Interprétations
des Résultats

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

5.1 Introduction

Cette partie est consacrée à l'étude de la stabilisation du sol de Roknia, situé dans la région de Guelma, par l'ajout de poudre de brique rouge. Des pourcentages variables de cet additif (2 %, 4 % et 6 %) ont été incorporés au sol. L'objectif de ce chapitre est d'interpréter et de discuter les résultats expérimentaux obtenus.

5.2 Discussion du résultat des essais

5.2.1 Teneur en eau initiale (w %)

La teneur en eau du sol, souvent désignée par le symbole ω , est un paramètre essentiel en géotechnique. Elle représente le rapport entre la masse d'eau présente dans un échantillon de sol et la masse des particules solides de ce même échantillon, exprimé en pourcentage.

$$\omega (\%) = (\text{masse d'eau} / \text{masse sèche du sol}) \times 100$$

Dans notre cas, la teneur en eau naturelle est : $\omega = 19$ %.

Cela indique que le sol contient une proportion relativement élevée d'eau, ce qui signifie qu'il n'est pas sec, mais plutôt modérément humide.

5.2.2 Densités spécifiques des grains solides méthode de pycnomètre

On définit la masse volumique des grains solides du sol (G_s) est le quotient de la masse de ces grains solides (γ_s) par leur volume (γ_w), voir équation 1 :

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \dots\dots\dots(1)$$

La masse volumique absolue des particules solides a été déterminée à l'aide d'un pycnomètre, selon l'équation 2.

$$\gamma_s = \frac{\gamma_w (M_2 - M_1)}{((m_4 - m_1) - (m_3 - m_2))} \text{ (g/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots(2)$$

- M1 = Masse du pycnomètre (g)
- M2 = Masse du pycnomètre + sol (g)
- M3 = Masse du pycnomètre + sol + eau (g)
- M4 = Masse du pycnomètre rempli d'eau (g)
- γ_s = Densité des grains solides
- γ_w = densité de l'eau

Le tableau 5.1 présente la valeur du poids volumique des grains solides du sol

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

Tableau 5. 1 : Poids volumique des grains solides du sol

N° d'essai	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g)	γ_s (g / cm ³)
1	121.8	171.8	454.3	422.8	2.58

5.2.3 Analyse granulométrique

Dans cette étude, la courbe granulométrique du sol a été établie à l'aide de deux techniques : Les types de sol peuvent être classés selon la taille des particules comme le montre la (figure 5.1).

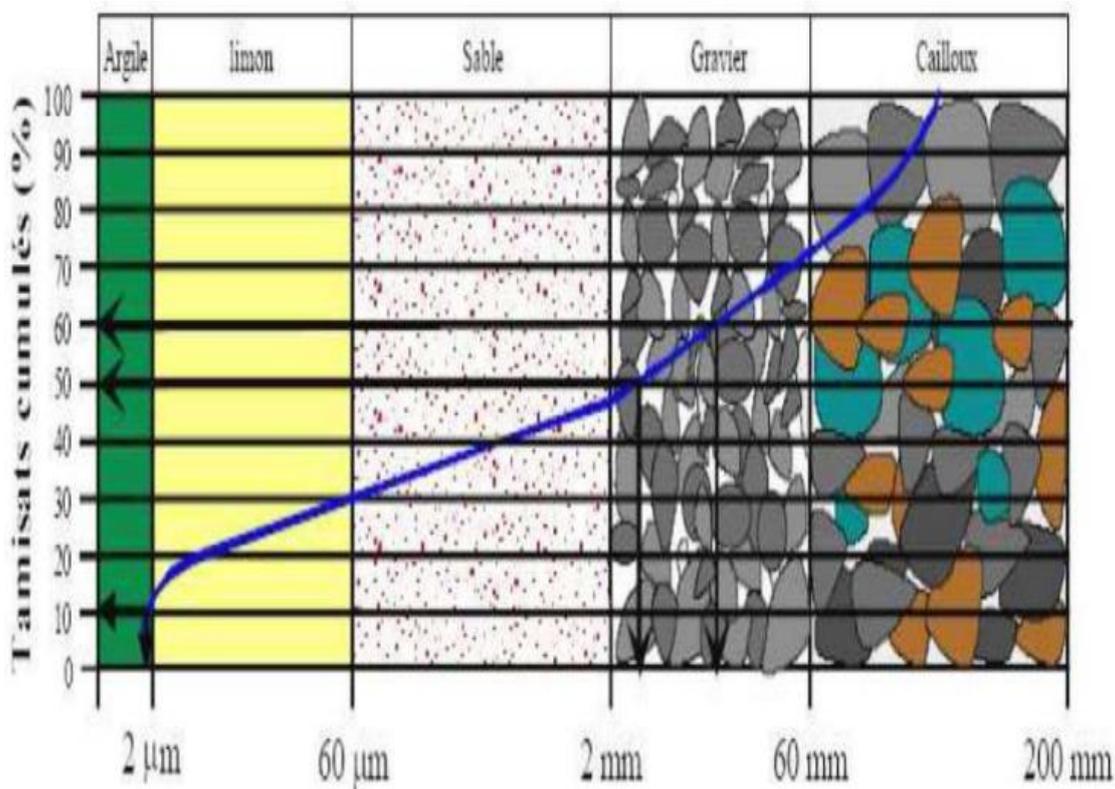


Figure 5. 1 : Les types de sol selon la taille des particules

Cette analyse sur l'échantillon représentatif du sol a donné les pourcentages en poids des tamisats cumulés pour les différents diamètres des grains constituent le sol. La courbe granulométrique est présentée dans la Figure 5.2.

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

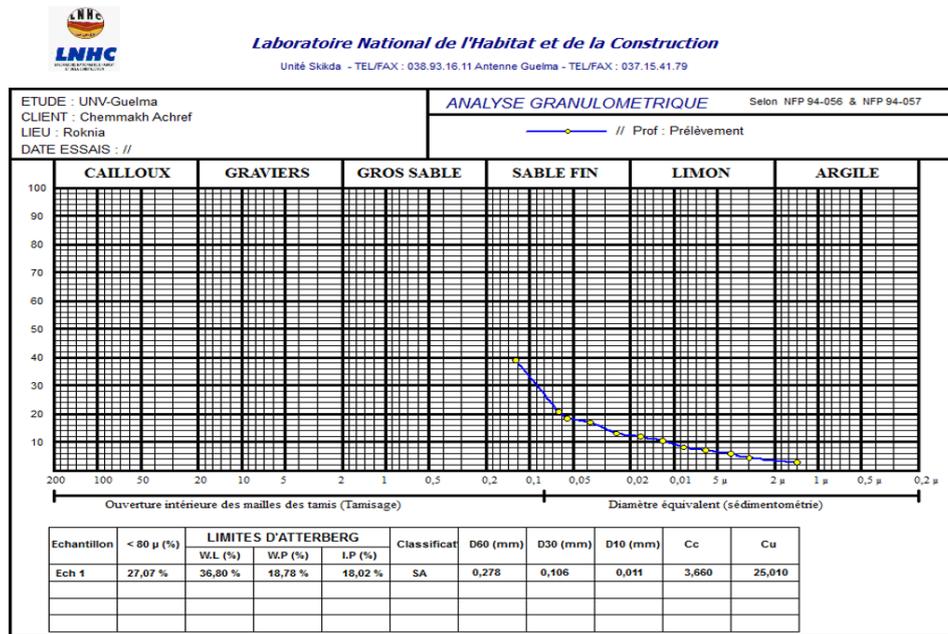


Figure 5. 2: Courbe granulométrique du sol.

5.2.4 Les caractéristiques du sol utilisé

Les caractéristiques physiques du sol, telles que la densité, la porosité et la teneur en eau, sont essentielles pour comprendre son comportement et son utilisation vis-à-vis la stabilisation du sol.

5.2.4.1 Potentiel d'affaissement libre (CP).

Le potentiel d'affaissement libre est déterminé par l'équation suivante :

$$CP (\%) = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100$$

Où,

ΔH - déformation verticale (affaissement) après saturation à un niveau de contrainte donné.

H_0 - hauteur initiale de l'échantillon avant saturation.

5.2.4.2 Essai au double œdomètre

On Prépare deux échantillons de sol identiques : l'un est testé à sec et l'autre est saturé au début de l'essai. On charge ensuite les deux échantillons progressivement jusqu'au niveau de contrainte souhaitée 200 kPa. On enregistre les déformations verticales sous chaque charge pour les deux échantillons.

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

Dans notre cas on a trouvé le potentiel d'affaissement égal à 8.5% pour la charge verticale de 200 Kpa.

D'après la classification de Jennings et Knight (1975), le tableau 5.2 donne la classification de la Gravité de l'affaissement.

Tableau 5. 2 : Classification de la gravité de l'affaissement.

Potentiel d'effondrement	Gravité de l'affaissement
< 1	Aucun problème
1-5	Modéré
5-10	Modérément sévère
10-20	sévère
> 20	Très sévère

Notre sol est classé comme un sol modérément sévère vis-à-vis l'affaissement.

Tableau 5.3 illustre les caractéristiques physiques du sol utilisé.

Tableau 5. 3 : Caractéristiques physiques du sol utilisé.

Les caractéristiques	Symbole	Valeur
Densité spécifique	γ_s (g/cm ³)	2.58
Gravité spécifique	$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$	2.58
Poids volumique sec	γ_d (g/cm ³)	1.5
Indice des vides	$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$	0.614
Degré de saturation	$S_r = \frac{W \times G_s}{e}$	0.79
Porosité	$n = \frac{e}{1+e}$	0.38

D60 = 0.278 mm

D30 = 0.106 mm

D10= 0.011 mm

- Coefficient de courbure $C_c = \frac{(D_{30}) \times 2}{D_{60} \times D_{10}} = 3.66$

- Coefficient d'uniformité $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 25.010$

5.2.5 Essai Proctor :

L'essai est réalisé afin de déterminer les caractéristiques de compactage à l'aide de l'essai Proctor normal, pour le sol non traité ainsi que pour les sols traités avec de la poudre de déchet de brique rouge (PDBR). Le mode opératoire est conforme à la norme NF P94-093.

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

Les figures présentent l'évolution des caractéristiques de compactage (densité sèche et teneur en eau) pour le sol non traité et pour les sols traités avec différents pourcentages de PDBR.

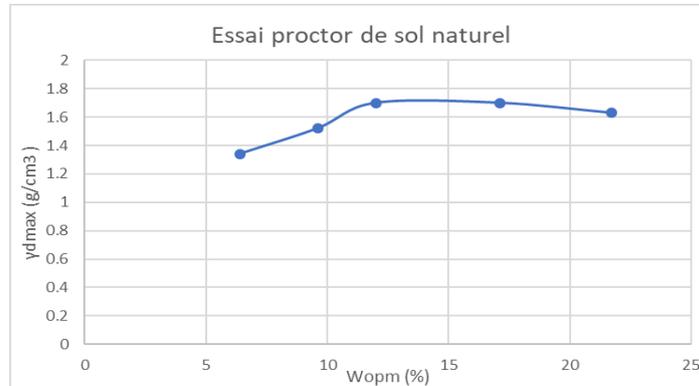


Figure 5. 3: Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol non traité

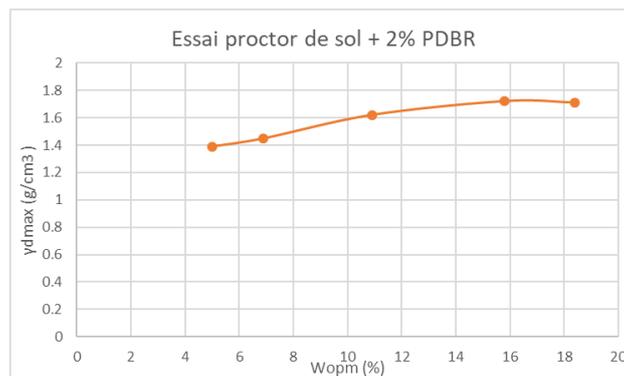


Figure 5. 4: Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol + 2% PDBR

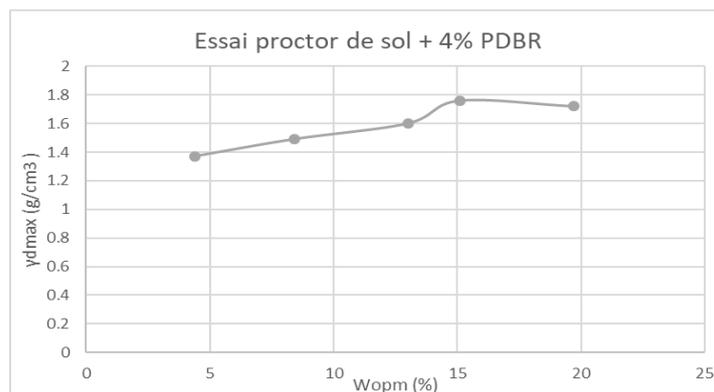


Figure 5. 5: Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol + 4% PDBR

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

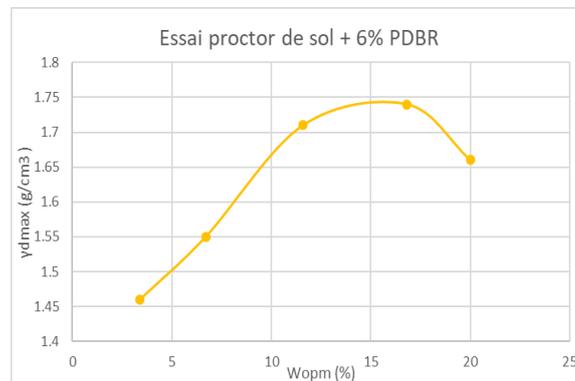


Figure 5. 6 : Relation entre la densité sèche et la teneur en eau pour le sol + 6% PDBR

Le Tableau 5.4 présente les paramètres de compactage (densité sèche maximale et teneur en eau optimale) pour le sol non traité ainsi que pour les sols traités avec différents pourcentages de PDBR.

Tableau 5. 4 : Variations de la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale pour sol non traité et traité

Echantillon	Paramètre de compactage	
	γ _{dmax} (g/cm ³)	W _{optm} (%)
Sol non traité	1.7	12
2% PDBR	1.71	18.4
4% PDBR	1.76	15.1
6% PDBR	1.74	16.8

On constate, d'après les résultats présentés dans le tableau 5.4 ainsi que dans les figures 5.3, 5.4, 5.5 et 5.6, que l'ajout de poudre de déchet de brique rouge (PDBR) entraîne une augmentation du poids volumique sec maximal, atteignant 1,71 g/cm³ pour 2 % de PDBR, 1,76 g/cm³ pour 4 %, et 1,74 g/cm³ pour 6 %.

La teneur en eau optimale augmente également, passant de 12 % pour le sol non traité à 18,4 % pour 2 % de PDBR, 15,1 % pour 4 %, et 16,8 % pour 6 % de PDBR.

A) Augmentation du poids volumique sec maximal

_ L'augmentation du poids volumique sec maximal jusqu'à 1.76 g/cm³ (à 4 % de PDBR) suggère une amélioration de la densification du sol.

_ Cela peut être expliqué par le fait que les particules fines de PDBR remplissent les vides entre les grains du sol, menant à une structure plus compacte.

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

Toutefois, au-delà de 4 % (à 6 %), une légère diminution du poids volumique est observée (1.74 g/cm^3), ce qui peut indiquer :

Un excès de fines qui gêne la réorganisation des particules pendant le compactage.

Une saturation partielle des interstices, réduisant l'efficacité du compactage.

En conclusion, on peut dire qu'il existe un taux optimal d'ajout (ici 4 %) au-delà duquel les bénéfices sur la densité diminuent.

B) *Augmentation de la teneur en eau optimale*

La teneur en eau optimale augmente avec l'ajout de PDBR, atteignant 18.4 % à 2 % de PDBR, puis redescend légèrement à 15.1 % à 4 % et remonte à 16.8 % à 6 %.

Cette augmentation peut s'expliquer par :

_ La nature poreuse et absorbante de la brique rouge, qui retient davantage d'eau.

_ Le besoin en eau pour lubrifier les particules supplémentaires et assurer un bon compactage.

La fluctuation de cette valeur avec les taux d'ajout indique une interaction complexe entre structure granulométrique, porosité, et absorption d'eau.

En conclusion, on peut dire que le sol traité avec PDBR devient plus hydrophile, nécessitant plus d'eau pour atteindre la compacité maximale.

5.2.6 Essai de limites d'Atterberg :

Les limites d'Atterberg sont les paramètres clés pour mesurer les teneurs en eau critiques d'un sol affaissable. Pour chaque pourcentage en poudre du déchet de brique rouge (PDBR), nous avons effectué des mesures de limites d'Atterberg (limite de liquidité, limite de plasticité, et indice de plasticité).

5.2.6.1 Limite de plasticité

Le Tableau 5.5 et la Figure 5.7 illustrent l'évolution de la limite de plasticité du sol en fonction des différents pourcentages de PDBR. On observe, à partir de la Figure 5.7, que la limite de plasticité augmente légèrement avec l'augmentation du taux de PDBR. Cette légère hausse peut s'expliquer par une modification notable des propriétés du sol traité à court terme, due à l'interaction entre les composants du PDBR et les particules du sol.

Tableau 5. 5 : Valeurs des limites de plasticités des sols traités Aux différents pourcentages en PDBR.

SOL	0% PDBR	2% PDBR	4% PDBR	6% PDBR
Limite de plasticité, W_p (%)	18.78	19.15	20.5	23.5

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

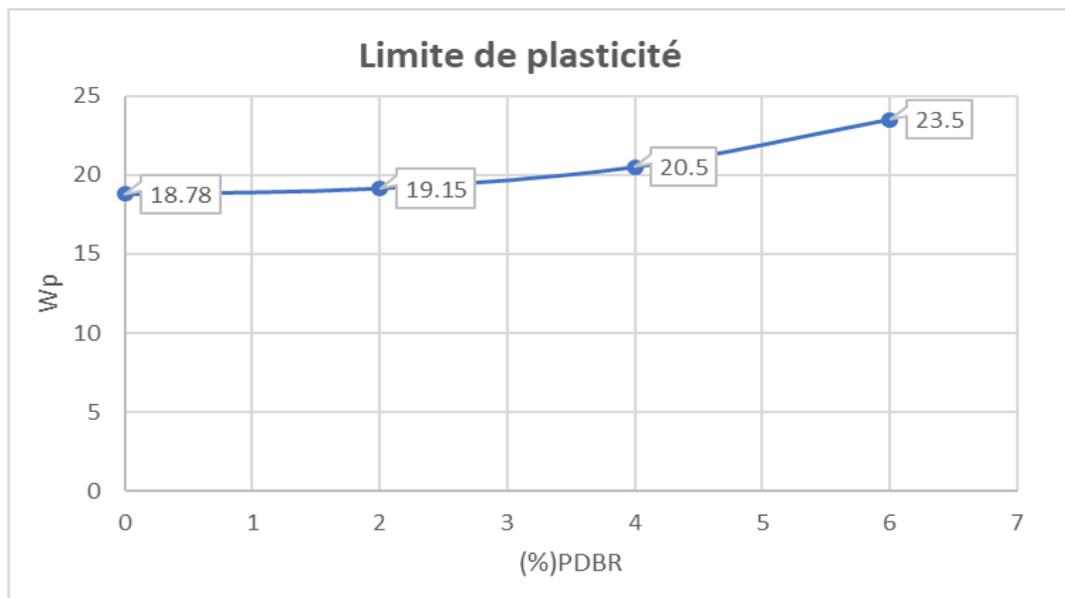


Figure 5. 7: l'évolution de la limite de plasticité du sol étudié À différents pourcentages en PDBR.

La limite de plasticité du sol augmente progressivement avec l'augmentation du pourcentage de poudre de brique rouge :

- À 0% (sol naturel), la limite de plasticité est de 18.78%.
- À 6% de PDBR, elle atteint 23.50%.
- Cette évolution montre une hausse d'environ 25% sur toute la gamme des dosages.

Plusieurs mécanismes peuvent expliquer cette augmentation :

a. Effet de la poudre de brique rouge (PDBR) sur la texture du sol

La poudre de brique rouge est généralement composée de silice, d'alumine et d'autres oxydes. Ces matériaux peuvent interagir avec les particules fines du sol, augmentant leur capacité à retenir l'eau à l'état plastique.

L'ajout de PDBR augmente donc la teneur en eau nécessaire pour atteindre l'état plastique, d'où une augmentation de la limite de plasticité.

b. Modification de la structure du sol

L'ajout de particules fines supplémentaires (comme celles de la PDBR) remplit les vides entre les grains de sol existants, ce qui modifie la microstructure. Cela peut conduire à une augmentation de la cohésion apparente et à une plasticité plus marquée.

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

c. Réactions physico-chimiques potentielles

Les composants minéraux de la brique rouge peuvent aussi réagir avec l'humidité et les argiles présentes dans le sol, formant des liaisons faibles qui influencent la plasticité.

5.2.6.2 Limite de liquidité

La détermination de la limite de liquidité du sol, effectuée selon la méthode du cône de pénétration (NF P 94-052-1), a montré une diminution progressive des valeurs avec l'ajout de poudre de brique rouge (PDBR). Cette réduction, passant de 36.8 % à 31.4 % pour des dosages de 0 % à 6 %, traduit un effet de floculation induit par les cations libérés par les composants minéraux de la PDBR.

Ces interactions réduisent la dispersion des argiles et donc leur capacité à retenir l'eau, ce qui diminue la limite de liquidité. Cette évolution suggère une amélioration de la stabilité du sol à l'état humide, favorable pour les applications en génie civil nécessitant une meilleure tenue à la saturation.

Cette réduction peut être expliquée par une réaction de floculation, provoquée par la présence de cations et d'ions provenant de certains minéraux, qui jouent un rôle important dans ce processus.

Tableau 5. 6 : Valeurs des limites de liquidités des sols traités aux différents pourcentages en PDRB (méthode de cône de pénétration).

SOL	0% PDBR	2% PDBR	4% PDBR	6% PDBR
W _l	36 .8	34.5	32 .3	31.4

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

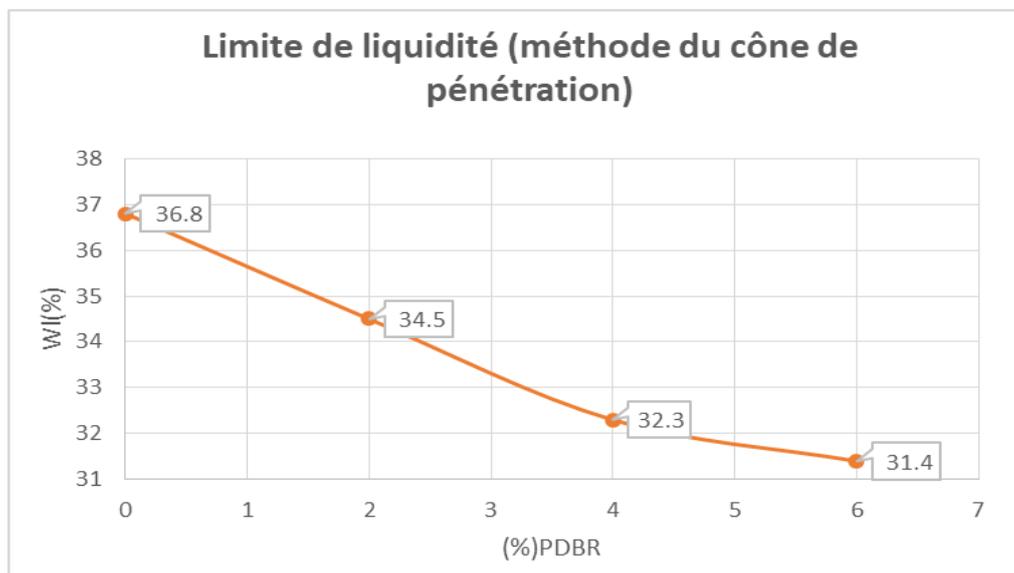


Figure 5. 8 : l'évolution de la limite de liquidité du sol étudié à différents pourcentages en PDRB (méthode de cône de pénétration).

Un sol présentant une limite de liquidité plus faible est généralement **moins sensible aux variations d'humidité**, ce qui le rend **plus stable en conditions hydriques fluctuantes**. Cette diminution de la limite de liquidité s'explique notamment par la **réduction de la surface spécifique disponible pour retenir l'eau**, conséquence de phénomènes tels que la **floculation des particules fines**.

5.2.6.3 Indice de plasticité

Le Tableau 5.7 et la Figure 5.9 montrent une réduction progressive de l'indice de plasticité (I_p) du sol avec l'augmentation du pourcentage de poudre de déchet de brique rouge (PDRB). Cette baisse, de 18.02 % pour le sol naturel à 7.9 % pour un taux de 6 % de PDRB, met en évidence un changement significatif du comportement plastique du sol. Cette réduction peut être attribuée à un effet de floculation des particules fines sous l'action des cations présents dans la PDRB, ainsi qu'à une diminution de la fraction argileuse active.

Tableau 5. 7 : Valeurs des indices de plasticités des sols traités aux différents pourcentages en PDRB.

SOL	0% PDRB	2% PDRB	4% PDRB	6% PDRB
Ip	18.02	15.35	11.8	7.9

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

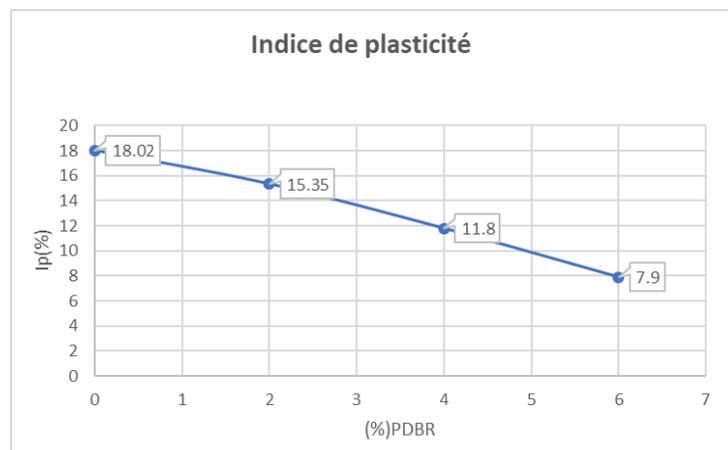


Figure 5. 9: l'évolution de l'Indice de plasticité du sol étudié à différents pourcentages en PDBR.

- L'indice de plasticité diminue nettement avec l'augmentation du taux de PDBR.
- À 0 %, l'IP est de 18.02 % (sol initial), alors qu'il descend à 7.9 % à 6 % de PDBR, soit une réduction de plus de 56 %.
- La baisse est particulièrement marquée entre 2 % et 6 %, traduisant un changement significatif du comportement du sol.

L'ajout de PDBR dilue la teneur en argiles plastiques actives dans le sol, ce qui diminue la plasticité globale du mélange. Les cations libérés par la poudre de brique rouge provoquent la floculation des particules argileuses. Cela réduit leur mobilité et leur capacité à absorber et retenir l'eau, ce qui abaisse, ce qui entraîne une réduction de l' I_P ($I_P = W_1 - W_p$).

5.2.7 Essai au bleu de méthylène

Cet essai (NF P 94-068) est une mesure indirecte de la surface spécifique des grains solides par absorption d'une solution de bleu de méthylène jusqu'à la saturation. La quantité de bleu consommée (voir Figure 5.11) est donc une indication de la quantité d'argile.

Les résultats de l'essai au bleu de méthylène pour sol non traité et sol traité, le sol+ la poudre de brique rouge pour les dosages (2%,4% et 6%) en été présentés sur le Tableau 5.8

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

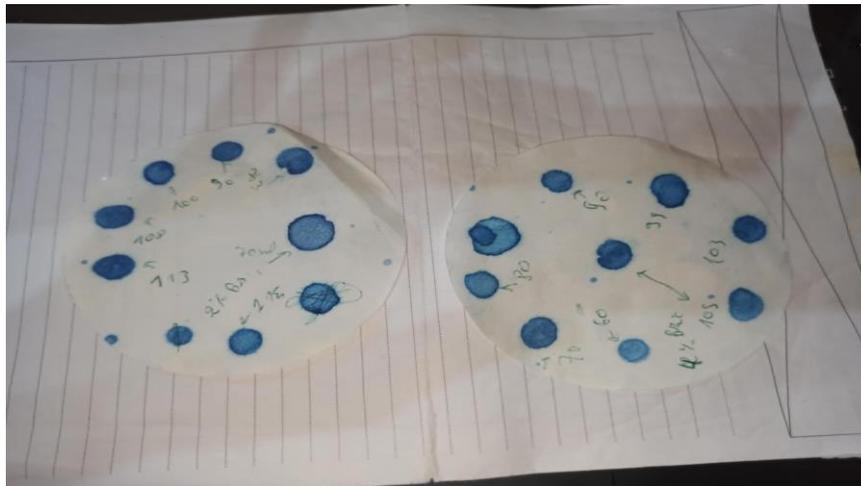


Figure 5. 10 : Exemple de l'apparition du bleu de méthylène dans l'auréole. En se basant sur le type de sol en fonction de la valeur de bleu de méthylène.

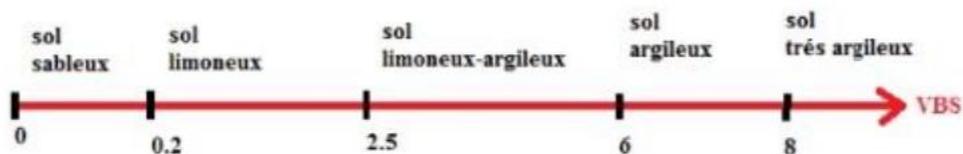


Tableau 5. 8 : Valeurs des VBS des sols traités aux différents pourcentages en PDBR.

Traitement par la PDBR	Sol non traité	2% PDBR	4% PDBR	6% PDBR
VBS	2.75	2.5	2.25	1.75
Type de sol	Limoneux-argileux	Limoneux-argileux	Sol Limoneux	Sol Limoneux

D'après les résultats du Tableau 5.8 et la figure 5.11, on remarque que la poudre de la brique rouge diminue l'argilosité, cela influe sur la composition du mélange et le sol naturel devient plus limoneux.

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

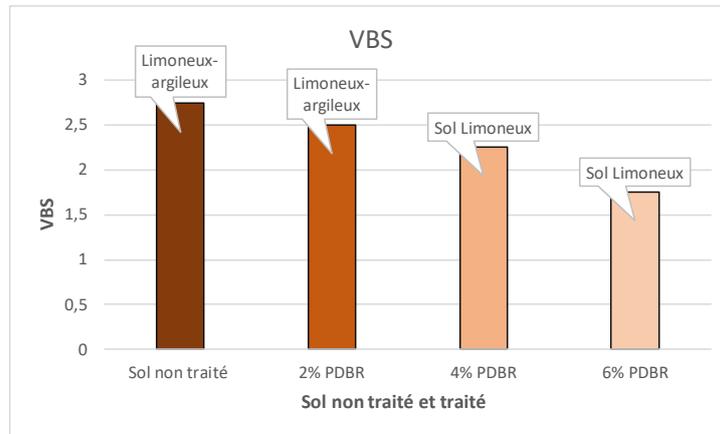


Figure 5. 11 : variation des VBS en fonction du sol traité et non traité

5.2.8 Essai cisaillement rectiligne :

L'objectif de ces essais est la détermination des paramètres de cisaillement du sol et qui sont : l'angle de frottement interne ϕ et la cohésion C .

L'échantillon de sol est mélangé avec différents pourcentages de la poudre du Brique rouge (2%, 4%, et 6%), compacté statiquement, et placés ensuite dans des boites circulaires de 6cm de diamètre. L'essai adopté pour le cisaillement est « l'essai consolidé drainé », avec une vitesse de cisaillement de 1mm/min. Les résultats sont présentés dans les figures et tableaux ci-dessous.

Il est nécessaire de rappeler que les essais de cisaillement ont été réalisés sous trois contraintes normales : 100 kN/m², 200 kN/m² et 300 kN/m². Les variations de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale sont représentées dans les figures suivantes :

Sol non traité

La Figure 5.12 présente les courbes de cisaillement et les courbes intrinsèques pour sol non traité. Les paramètres de cisaillement : cohésion et angle de frottement interne pour sol non traité sont 35 kN/m² et 32,7° respectivement.

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

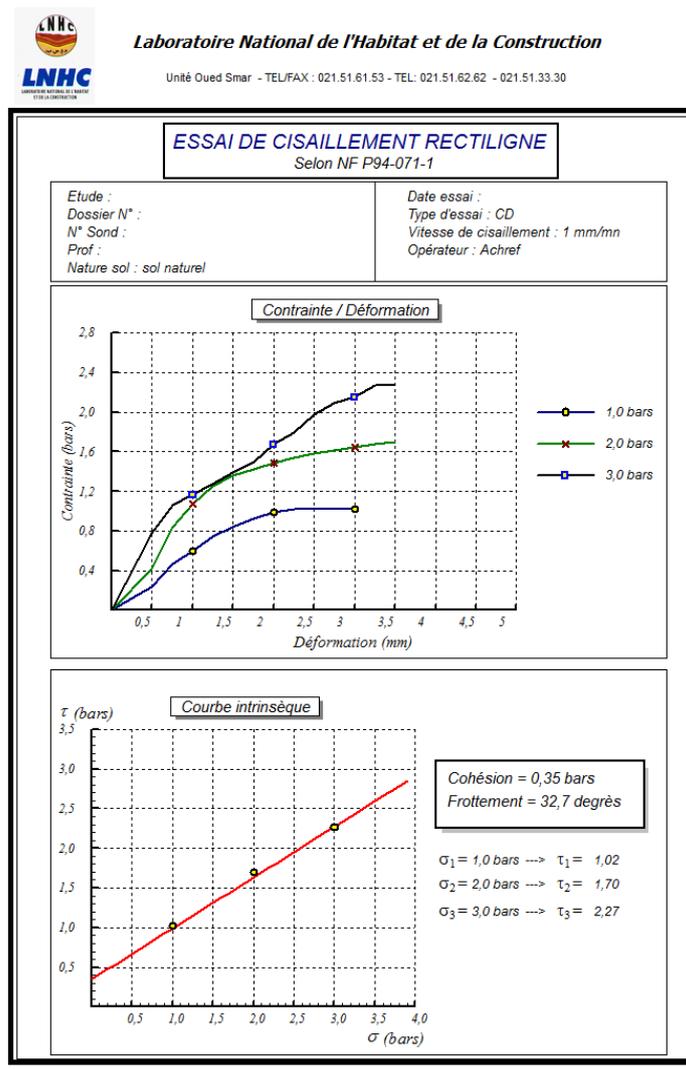


Figure 5. 12 : Essai de cisaillement (Sol non traité)

Sol+ 2% PDBR

La Figure 5.13 présente les courbes de cisaillement et les courbes intrinsèques du sol traité avec 2% de PDBR. Les paramètres de cisaillement, à savoir la cohésion et l'angle de frottement interne, sont respectivement de 33 kN/m² et 13,19°. Nous constatons que la cohésion diminue légèrement, tandis que l'angle de frottement diminue fortement par rapport au sol non traité.

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

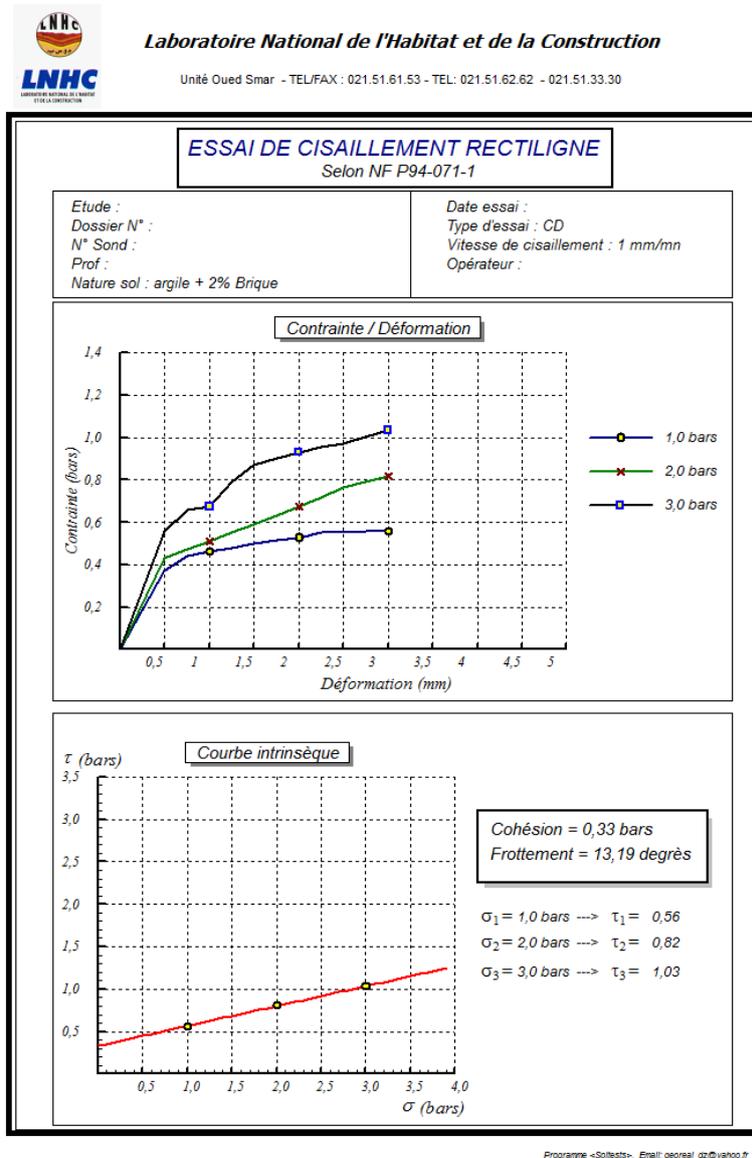


Figure 5. 13 : Essai de cisaillement (Sol + 2% PDBR)

Sol+ 4% PDBR

La Figure 5.14 présente les courbes de cisaillement et les courbes intrinsèques du sol traité avec 4% de PDBR. Les paramètres de cisaillement, à savoir la cohésion et l'angle de frottement interne, sont respectivement de 33 kN/m² et 13,19°. Nous constatons que la cohésion diminue légèrement, tandis que l'angle de frottement diminue fortement par rapport au sol non traité.

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

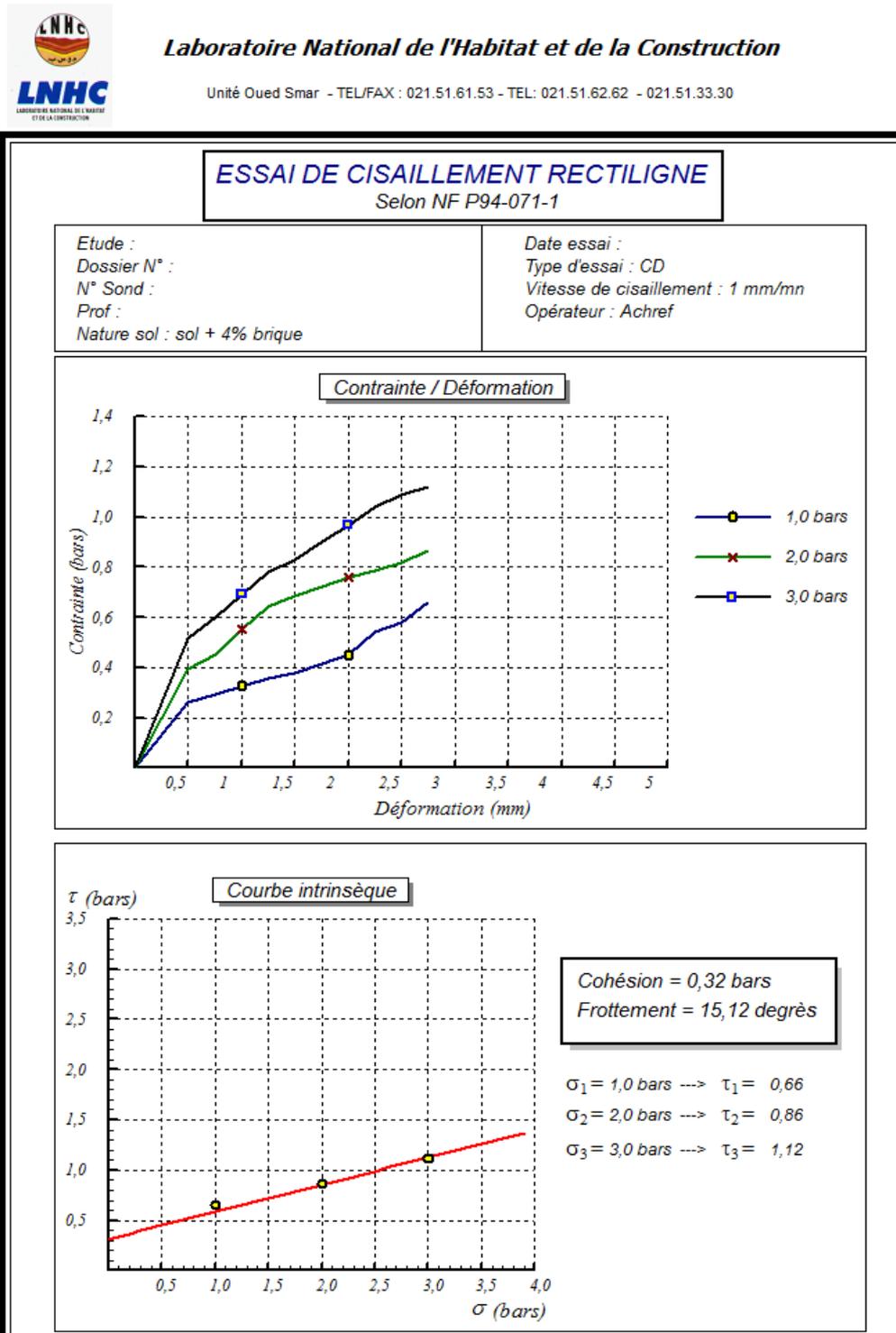


Figure 5. 14 : Essai de cisaillement (Sol + 4% PDBR)

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

Sol+ 6% PDBR

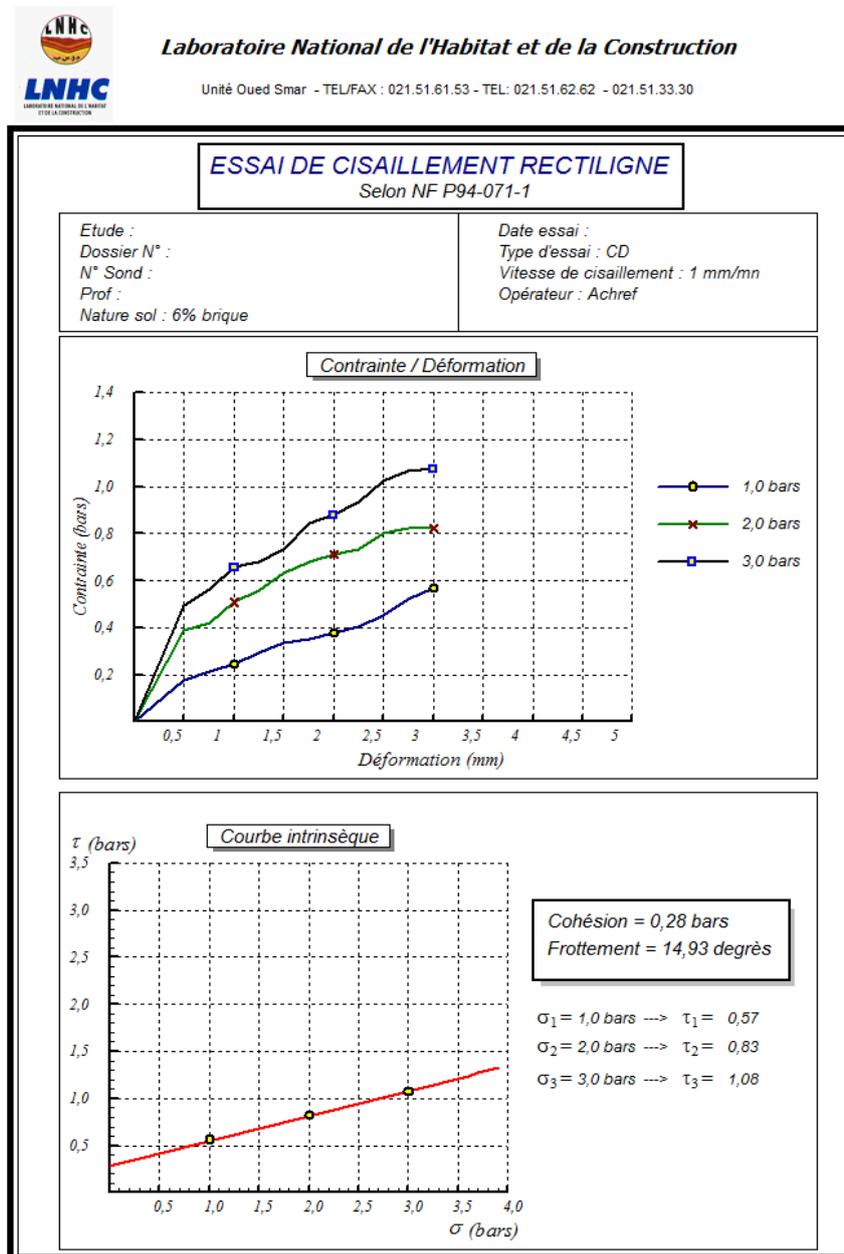


Figure 5. 15 : Essai de cisaillement (Sol + 6% PDBR)

Les résultats des paramètres de cisaillement : la cohésion et l'angle de frottement en fonction des différents pourcentages d'additifs pour le sol traité et non traité sont présentés dans le tableau 5.9.

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

Tableau 5.9 : Influence du pourcentage d'additifs sur le cisaillement.

Paramètre Sol	Cohésion (kN/m ²)	Angle de frottement (°)
Sol non traité (CD)	35	32.7
Sol+ 2% PDBR (CD)	33	13.19
Sol+ 6% PDBR (CD)	32	15.12
Sol+ 6% PDBR (CD)	28	14.93

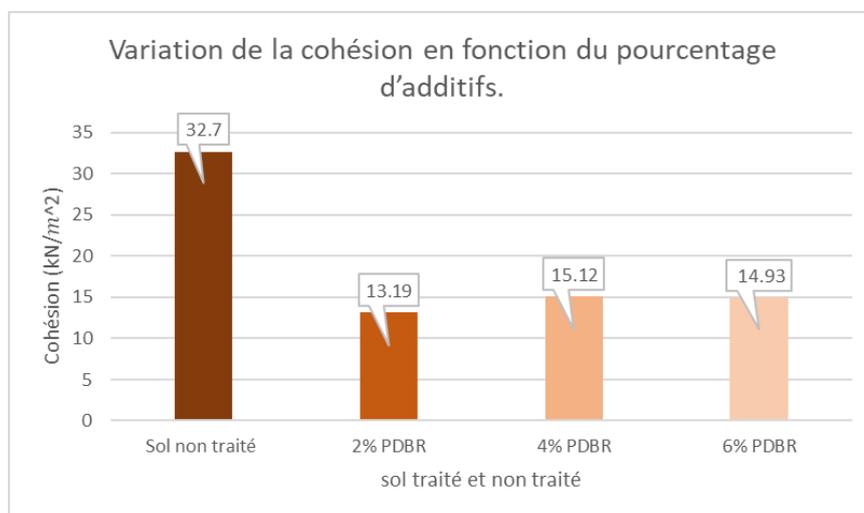


Figure 5.16 : Variation de la cohésion en fonction du pourcentage de PDBR.

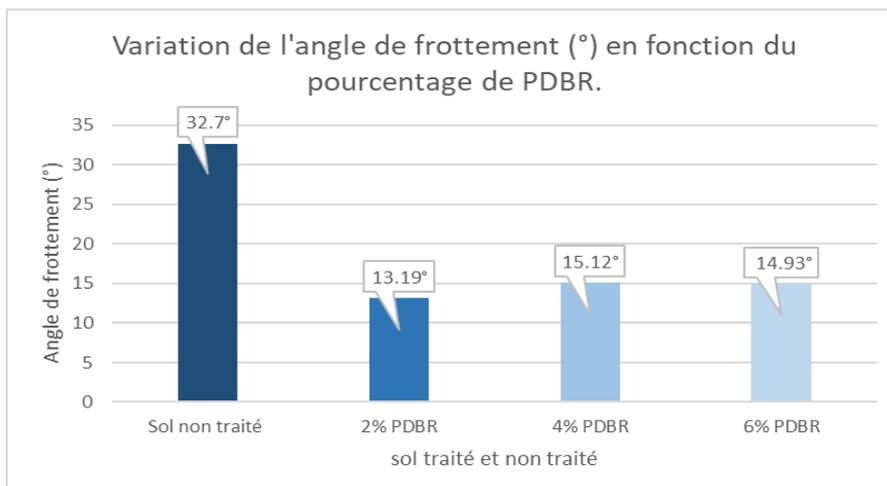


Figure 5.17 : Variation de l'angle de frottement (°) en fonction du pourcentage de PDBR.

Interprétation des résultats du tableau 5.9 et figures 5.16 et 5.17 (cisaillement)

A. Diminution de la cohésion (c)

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

- La cohésion diminue progressivement avec l'ajout de PDBR :
 - Sol non traité : 35 kN/m²
 - 2 % PDBR : 33 kN/m²
 - 4 % PDBR : 32 kN/m²
 - 6 % PDBR : 28 kN/m²

En conclusion, on peut signaler que la diminution de la cohésion peut s'expliquer par la dilution du liant naturel du sol (argile, minéraux colloïdaux) avec l'ajout de PDBR, qui est un matériau inerte, peu plastique et non cohésif.

En plus, le remplacement progressif des particules fines d'origine argileuse (responsables de la cohésion) par de la PDBR conduit à une perte progressive de l'effet de cohésion inter particulaire.

B. Diminution de l'angle de frottement interne (φ)

- L'angle de frottement interne chute de façon marquée :
 - Sol non traité : 32.7°
 - 2 % PDBR : 13.19°
 - 4 % PDBR : 15.12°
 - 6 % PDBR : 14.93°

On peut conclure que cette forte diminution suggère que l'ajout de PDBR modifie la texture et la structure granulaire du sol, en réduisant les forces d'inter-verrouillage entre particules.

- Il est aussi probable que les grains de PDBR, étant anguleux mais légers et poreux, ne contribuent pas efficacement à la résistance au cisaillement par frottement.
- La structure affaiblie par la perte de cohésion et la mauvaise compacité locale (à certains taux) pourrait expliquer cette baisse importante.

5.2.9 Essai de l'œdomètre :

Le but de l'essai de compressibilité à l'œdomètre (Figure 5.18) est d'identifier les paramètres de sol étudié. Il s'effectue sur une éprouvette de matériaux placée dans une enceinte cylindrique rigide (œdomètre). Un dispositif appliqué sur cette éprouvette un effort axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai. L'œdomètre consiste à une cellule ou enceinte œdométrique (Figure 5.19) de consolidation : moule cylindrique rigide empêche toute déformations radiale lors des essais.

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats



Figure 5. 18 : Représentation de la machine œdométrique de laboratoire de LNHC à GUELMA.



Figure 5. 19 : Cellule de consolidation

Pour chaque palier, lectures de tassement de l'échantillon sont effectuées à L'aide d'un capteur électronique connecté directement à l'ordinateur.

Tableau 5. 10 : Influence du pourcentage de déchet de brique sur l'essai Œdométrique.

sol \ Paramètre	Cc(%)	Pc(kN/m ²)	Cg(%)
Sol naturel	10.26	228	5.65
Sol +2% PDBR	24.99	269	4.48
Sol +4%PDBR	22.48	298	3.43
Sol +6%PDBR	12.16	331	1.49

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

Cc : Indice de compression

Cg : Indice de gonflement

Pc : Contrainte de pré-consolidation

Les éprouvettes soumises aux essais effectués pour chaque pourcentage de la poudre de la brique rouge (0%, 2%, 4%, et 6%). On constate d'après la figure 5.20, que pour le sol non traité, on trouve que l'indice de compressibilité atteint 0.105 % et l'indice de gonflement atteint 0.056.

Selon la théorie de Terzaghi, l'indice de compressibilité (Cc) permet de classer les sols en fonction de leur comportement sous charge. Un sol est considéré comme peu compressible si $Cc < 0.2$, compressible si $0.2 < Cc < 0.7$, et très compressible si $Cc > 0.7$.

Dans notre cas, on peut considérer que le sol utilisé est peu compressible puisque il a un coefficient de compressibilité Cc égale à 0.105.

Les sols affaissables ont souvent de faibles indices de gonflement, ce qui signifie qu'ils ne rebondissent pas de manière significative lorsque la charge est supprimée.

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats



Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30

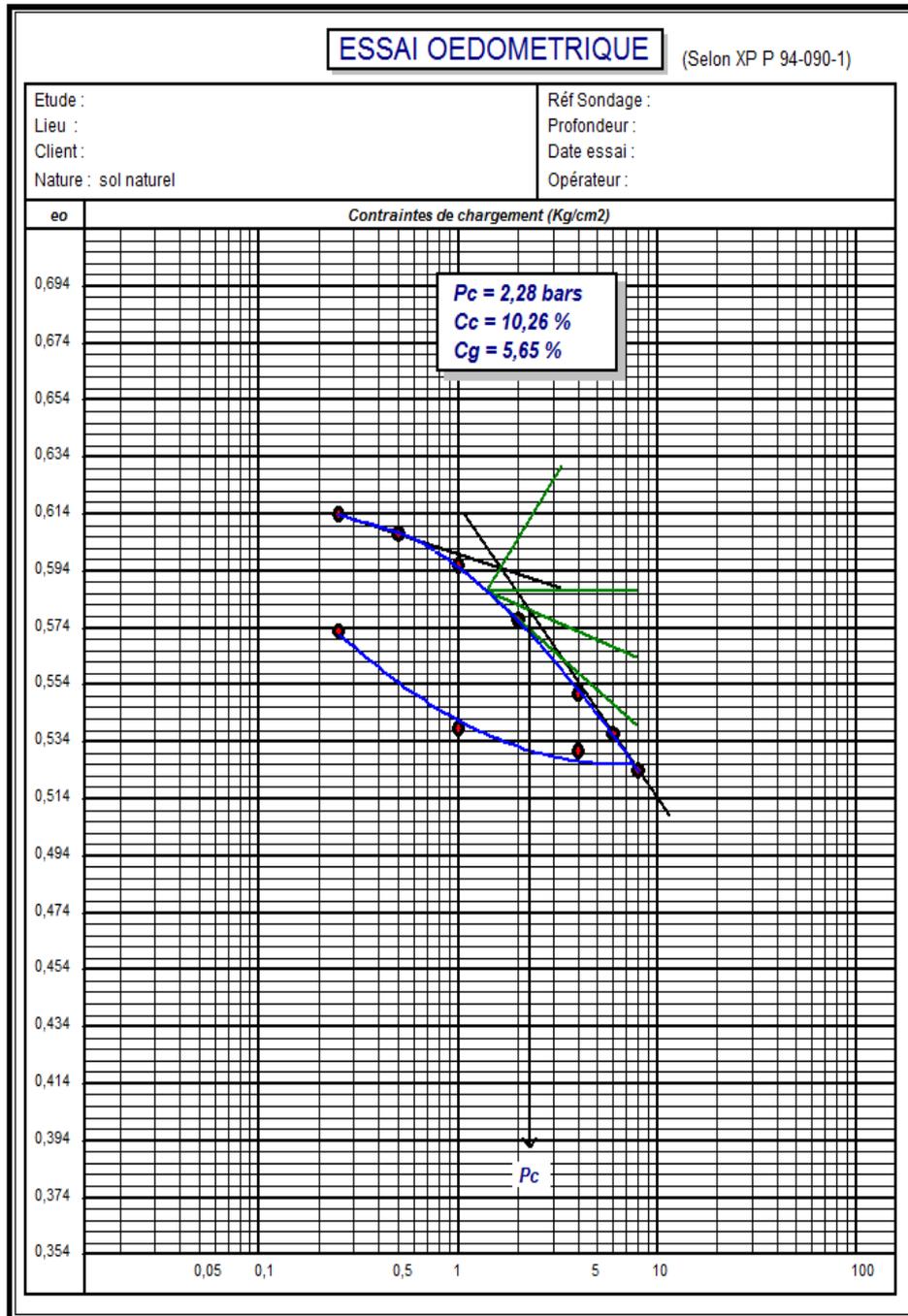


Figure 5. 20 : Courbe œdométrique sol naturel (sol non traité).

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats



Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30

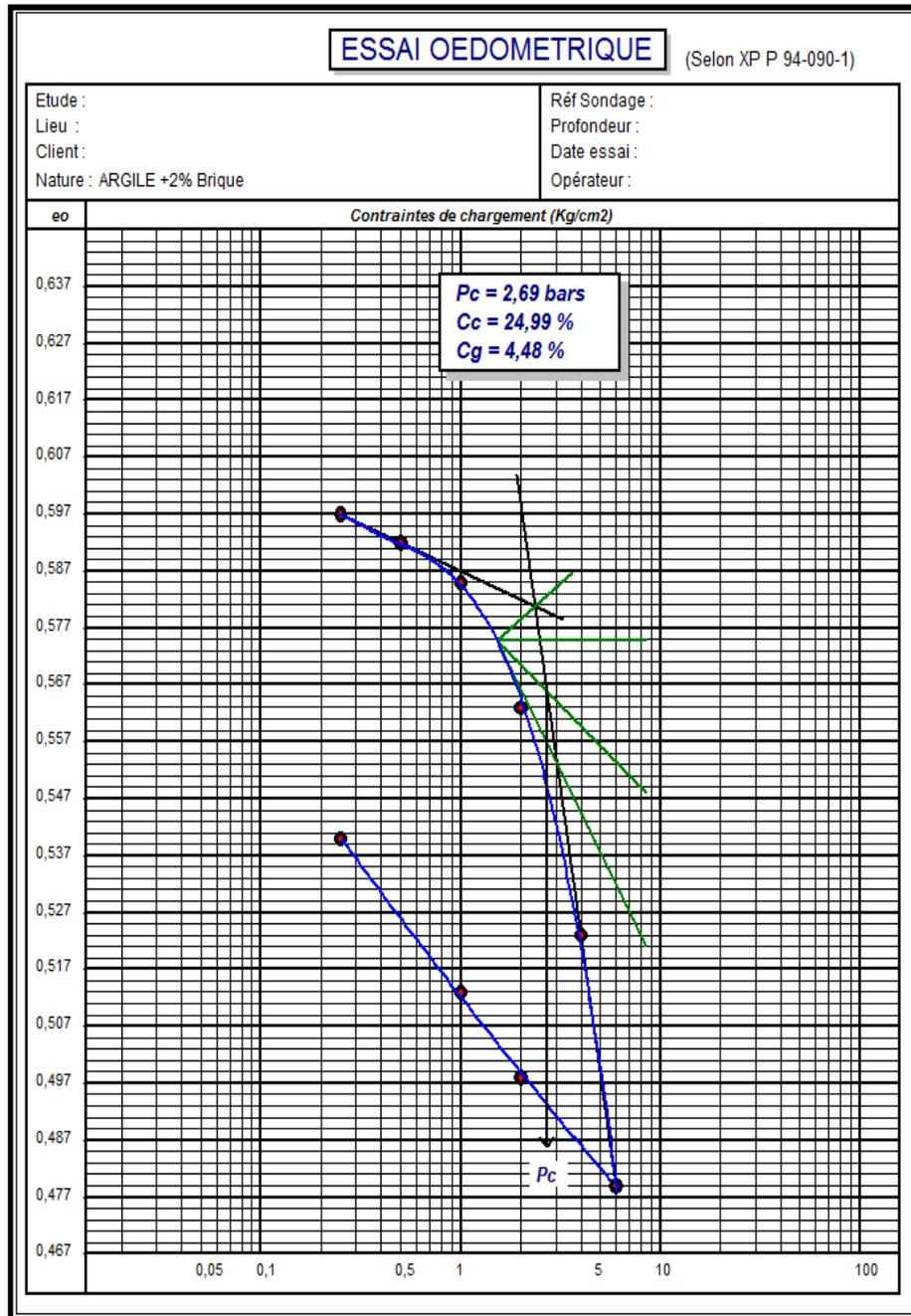


Figure 5. 21 : Courbe œdométrique (sol naturel + 2% PDBR).

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats



Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30

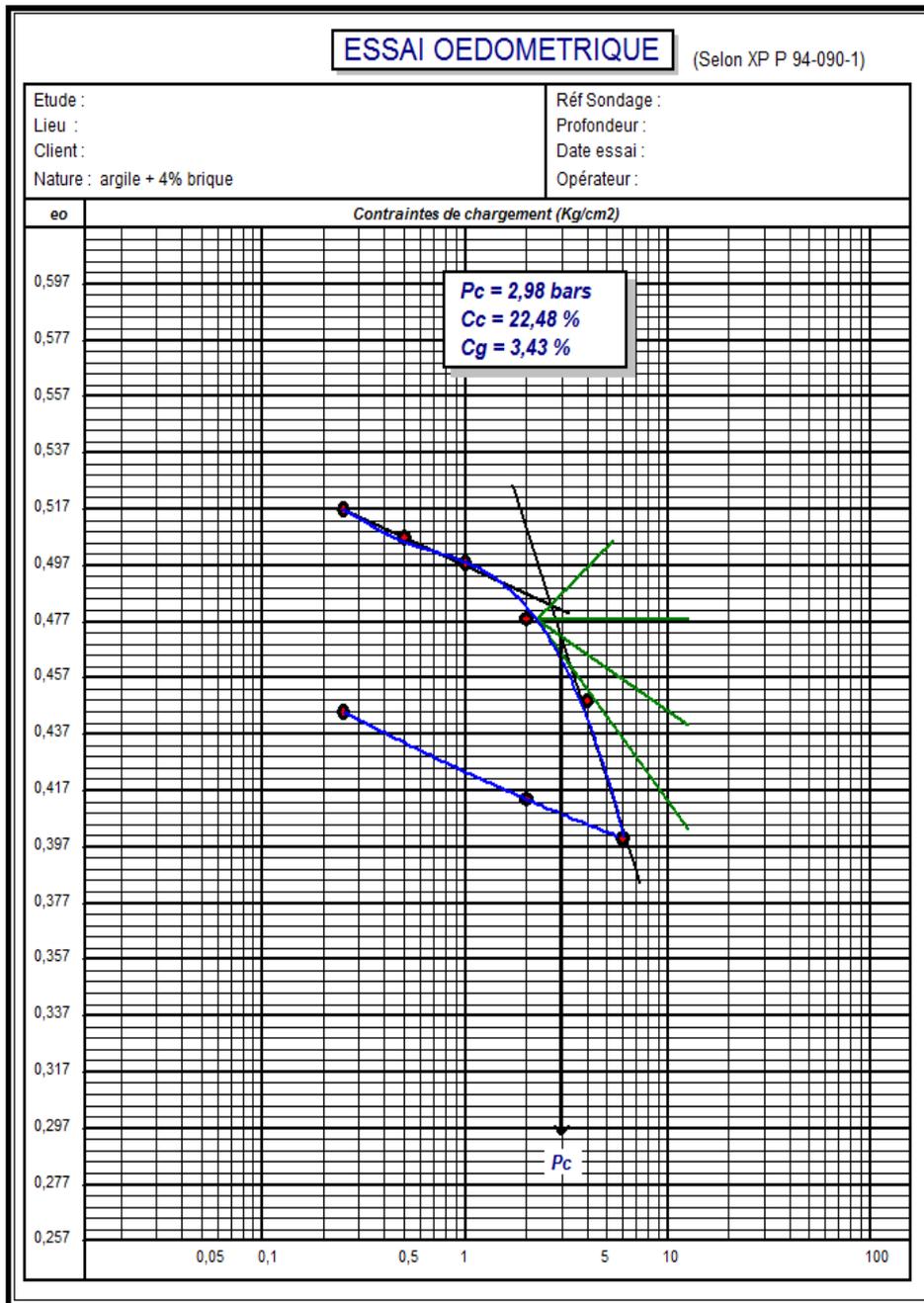


Figure 5. 22 : Courbe œdométrique (sol naturelle+ 4% PDBR)

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

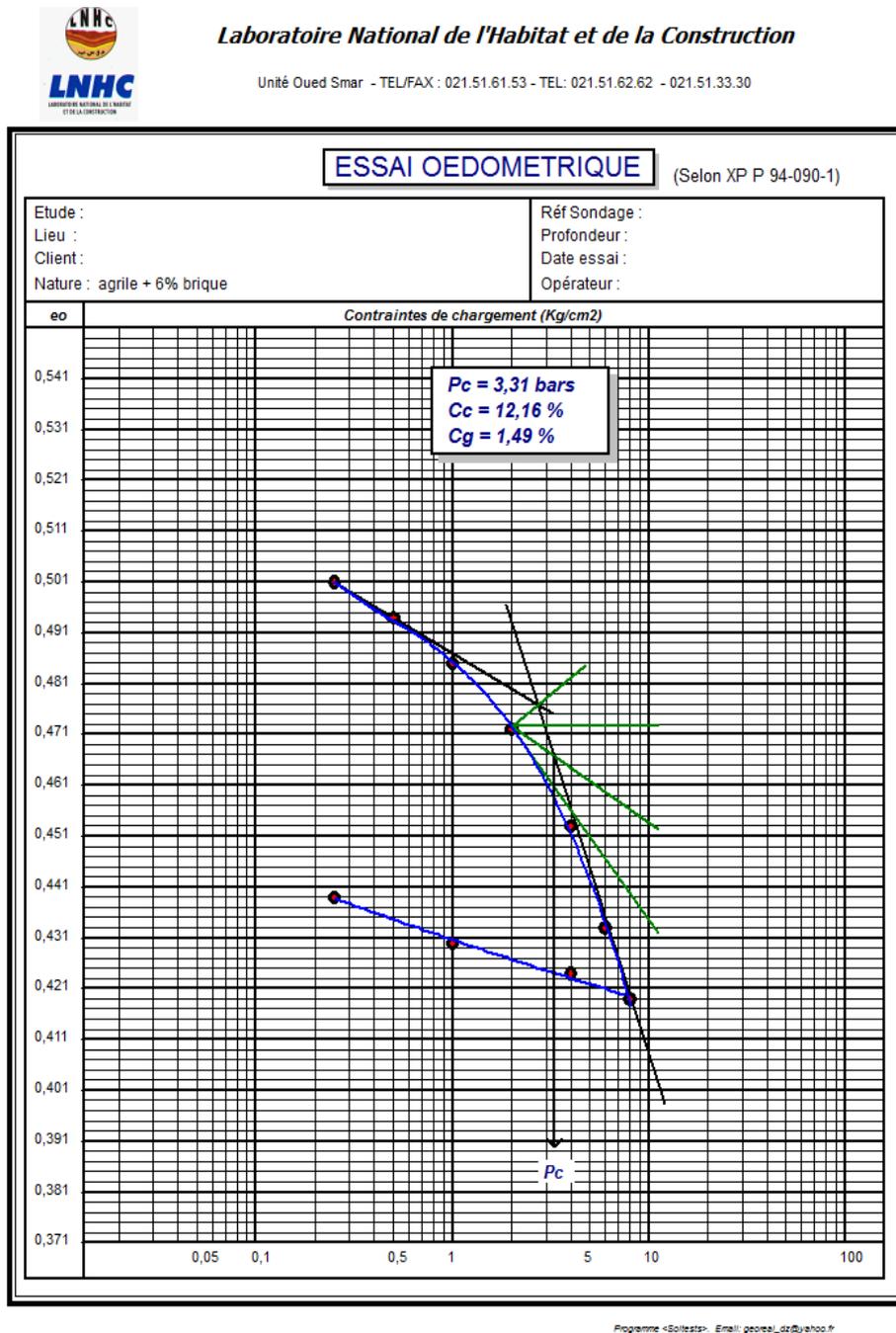


Figure 5. 23 : Courbe œdométrique (sol naturelle+6% PDBR)

Cc plus élevé = potentiel plus élevé d'affaissement après saturation.

L'interprétation des résultats présentés dans le tableau 5.10 et les figures 5.20 à 5.23 concernant les paramètres de consolidation du sol (indice de compression et indice de gonflement) avec l'ajout de poudre de déchet de brique rouge (PDBR) sont comme suit :

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

A. Indice de compression (C_c)

<i>Teneur en PDBR</i>	<i>Indice de compression</i>
0 % (sol non traité)	10,26 %
2 % PDBR	24,99 %
4 % PDBR	22,48 %
6 % PDBR	12,16 %

- D'après les résultats obtenus, on constate que l'indice de compression augmente fortement à 2 % et 4 % de PDBR, puis diminue à 6 %, mais reste supérieur à celui du sol non-traité.
- Une augmentation de l'indice de compression signifie que le sol devient plus compressible sous charge, ce qui peut être dû à:
 - Une structure plus lâche causée par l'ajout de fines non cohésives.
 - Une faible liaison inter-granulaire avec de faibles résistances à la compression.
 - La baisse observée à 6 % pourrait être liée à un **remplissage plus efficace des vides** par la poudre de brique, créant une structure plus stable.

D'après les résultats obtenus, on peut constater les points suivants:

- La diminution progressive de l'indice de gonflement indique une réduction de la capacité du sol à reprendre du volume lors du déchargement.
- Cette baisse est positive du point de vue géotechnique, car elle signifie une meilleure stabilité dimensionnelle.
- Elle peut s'expliquer par:
 - Une réduction des matériaux expansifs (comme les argiles plastiques).
 - Une structure plus compacte et rigide empêchant les déformations réversibles.

La classification selon l'indice de compressibilité :

Tableau 5. 11 : Classification de sol selon l'indice de compressibilité (selon Terzaghi).

Indice de compressibilité, C_c	Classe de sol
$C_c < 0.020$	Sol incompressible
$0.020 < C_c < 0.050$	Sol très peu compressible
$.050 < C_c < 0.100$	Sol compressible
$0.100 < C_c < 0.200$	Sol moyennement compressible
$0.200 < C_c < 0.300$ $C_c < 0.500$	Sol assez fortement compressible
$0.300 < C_c < 0.500$	Sol très compressible
$C_c < 0.500$	Sol extrêmement compressible

Chapitre 5 : Discussion et Interprétations des Résultats

Conclusion générale

La stabilisation des sols affaissables a été étudiée par de nombreux chercheurs dans le but de trouver des solutions permettant de réduire le phénomène d'affaissement soudain. Le choix des techniques de stabilisation les plus couramment utilisées dépend de plusieurs paramètres, tels que les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'intervention, la disponibilité des matériaux, ainsi que les conditions environnementales.

L'étude présentée dans ce travail a pour objectif d'évaluer l'efficacité de la stabilisation d'un sol affaissable de la région de Roknia (Guelma), en utilisant de la poudre de brique rouge. Sur la base des résultats obtenus et à la lumière de leur interprétation, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- o Le sol étudié est classé comme un sol d'affaissement modérément sévère.
- o On constate, d'après les résultats obtenus que l'ajout de poudre de déchet de brique rouge (PDBR) entraîne une augmentation du poids volumique sec maximal, atteignant 1.71 g/cm³ pour 2 % de PDBR, 1.76 g/cm³ pour 4 %, et 1.74 g/cm³ pour 6 %.
- o La teneur en eau optimale augmente également, passant de 12 % pour le sol non traité à 18,4 % pour 2 % de PDBR, 15.1 % pour 4 %, et 16.8 % pour 6 % de PDBR.
- o L'ajout de la poudre de la brique rouge semble défavoriser les propriétés de cisaillement du sol, aussi bien en cohésion qu'en frottement interne. Contrairement à d'autres types d'amendements (comme la chaux ou le ciment), la poudre de la brique rouge ne contribue pas à la stabilisation mécanique du sol ; elle agit plutôt comme un filler qui perturbe les liaisons naturelles du sol sans générer de nouvelles liaisons efficaces.
- o L'ajout de PDBR réduit le potentiel de gonflement du sol, ce qui améliore sa stabilité vis-à-vis des cycles de charge/décharge et des variations d'humidité.
- o L'ajout modéré de PDBR (2–4 %) augmente la compressibilité, mais à 6 %, la densification semble limiter cette tendance.

Références

- Opukumo, A. W., Davie, C. T., Glendinning, S., & Oborie, E. (2022). A review of the identification methods and types of collapsible soils. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69(17). <https://doi.org/10.1186/s44147-021-00064-2>
- Houston, S. L., & Zhang, X. (2021). Review of expansive and collapsible soil volume change models within a unified elastoplastic framework. *Soils and Rocks*, 44(3). <https://doi.org/10.28927/SR.2021.064321>
- Das, B. M. (2007). *Advanced Soil Mechanics* (3rd ed.). CRC Press.
- Maeda, T., Shoji, S., & Dahlgren, R. (1993). Physical characteristics of volcanic ash soils. In *Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization* (pp. 189–208). Elsevier.
- Culshaw, M., Jefferson, I., & Rogers, C. D. F. (2018). Collapsible Soils. Dans *Encyclopedia of Engineering Geology* (pp. 1–6). Springer.
- Derbyshire, E., Dijkstra, T. A., & Smalley, I. J. (1995). Genesis and properties of collapsible soils. In E. Derbyshire, T. A. Dijkstra, & I. J. Smalley (Eds.), *Collapsible Soils* (pp. 1–27). Chapman & Hall.
- Clemence, S.P. and Finbarr, A.O. (1981). Design considerations for collapsible soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 107: GT3, 305-317.
- Rogers, C.D.F. (1995). The identification and geotechnical assessment of collapsible soils. In: Derbyshire, E., et al. (Eds.), *Collapsible Soils*. Chapman & Hall.
- Barden, L., McGown, A., & Collins, K. (1973). The collapse mechanism in partly saturated soils. *Engineering Geology*, 7(1), 49–60.
- Jennings, J. E., & Knight, K. (1975). A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure. *Proceedings of the Sixth Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban*, 99–105.
- TADEPALLI, R., RAHARDJO, H. and FREDLUND, D.G. (1992). Measurement of Matric suction and volume changes during inundation of collapsible soils. *Geotechnical Testing Journal*, 15: 115-122.
- Ziani, H, Abbèche, K, Messaoudene, I and Andrade Pais, L J 2019. Treatment of Collapsible Soils by Additions of Granulated Slag and Natural Pozzolan. *KSCE Journal of Civil Engineering* 23, 1028–1042. Google Scholar
- Bara, J.P., *Collapsible Soils*, Reprint 2979, ASCE Annual Convention, Philadelphia, Sept. 1976
- Pierre, T. et Javelaud, E. (2014). Le compactage dynamique, une méthode pour construire sur des alluvions meubles. Publié par : Olivier Dequincey.
- Keller Group plc. (2016). Entreprise spécialisée dans les travaux géotechniques, www.keller.com
- Belkacem Djebrou . 2007. Traitement du sol par colonne ballastées. SAAD dehleb blida algerie

Références

Khebizi, Wiem. 2011. Etude de la durabilité des sols argileux améliorés avec des ajouts minéraux. Université Hassiba Ben Bouali de Chlef , Algérie.