



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة

Université Chahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de génie civil

MEMOIRE

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

En : Génie civil

Spécialité : Géotechnique

Par : (GUEFASSA Achraf Houcem-eddin)

Sujet

Amélioration des argiles de Doukane par la poudre de verre

Présenté et soutenu publiquement, le 11 /06 /2024 , devant le jury composé de :

M.LAOUAR Mouhammed saleh	Professeur	Président
M.FARES Abdelhafid	Maitre assistant A	Rapporteur
M.BOUCOCHA Abdallah	Maitre assistant A	Examineur 1

Promotion : 2023/2024



Department of Civil Engineering

Filière : Génie civil

Academic year : 2023 – 2024

Spécialité : Géotechnique

Rapport de soutenabilité

1) Données d'identification des étudiants :

Nom : GUEFASSA

Prénom : Achraf Houcem-Eddine

Nom :

Prénom :

Intitulé du projet de fin d'étude (PFE) : Amélioration des argiles de Doukane par la poudre de verre

2) Données d'identification de l'encadreur :

Nom : FARES.....

Prénom : Abdelhafid.....

Grade : MAA.....

3) Données d'identification du co-encadreur :

Nom :

Prénom :

Grade :

Je soussigné, M^r FARES Abdelhafid., juge que l'étudiant sus – nommé est apte à soumettre et soutenir son mémoire de Master et qu'il a respecté les règles d'authenticité scientifique dans l'élaboration d'un travail de recherche.

L'encadreur



Department of Civil Engineering

Academic year : 2023 – 2024

قسم الهندسة المدنية

السنة الجامعية : 2023 – 2024

**Formulaire de déclaration sur l'honneur
relatif à l'engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique
dans l'élaborations d'un travail de recherche**

Je soussigné, l'étudiant,

GUEFASSA Achraf Houcem-Eddine

Détenteur d'une carte d'étudiant N° 171734019105 délivrée le 2017

Inscrit à la Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie civil

Chargé de préparer un mémoire de fin d'étude master.

Sous-titré : Amélioration des argiles de Doukane par la poudre de verre

Déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologique professionnelle et de l'authenticité académique requise dans l'élaboration du projet de recherche suscité.

Tébessa, le 06/06/2024

Signature

Remerciements

Tout d'abord je tien merci notre bon Dieu qui m'a donné le courage et la patience pour réaliser ce très modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant monsieur « *FARES Abd el haffid* » pour son soutien inestimable, ses conseils avisés et son encouragement constant tout au long de ce projet. Sa disponibilité et son expertise ont été essentielles à la réalisation de ce travail.

Je remercie également chaleureusement les enseignants du département de génie civil, dont l'enseignement et les conseils m'ont permis d'acquérir les connaissances nécessaires pour mener à bien ce projet. Leur dévouement à notre formation est grandement apprécié.

Un remerciement particulier va à l'ingénieur responsable du laboratoire de génie civil « *Aichi Souad* ». Sa contribution, en fournissant les ressources et l'expertise technique nécessaires, a été cruciale pour la réalisation des expérimentations et l'analyse des résultats.

Sans oublier de faire passer mon remerciement aux ingénieurs responsables du laboratoire des Mines.

Enfin, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet. Leur aide, leur soutien et leurs encouragements ont été précieux et profondément appréciés.

Dédicace

Du fond de mon cœur je dédie ce travail

A la personne qui m'a appris tous que je suis aujourd'hui, qui
ma donnée tous sans demande.

A la seule personne qui a voulu vivre ces moments avec moi
plus que moi-même.

A mon chère père GUEFASSA BADRI que Dieu le fasse
entrer dans son spacieux paradis.

J'ai l'honneur de dédie mon travail

A la lune de ma vie, ma joie et ma raison de vivre ma chère
mère.

Que DIEU te préserve pour nous.

A mes frères et mes sœurs qui étions des véritables piliers
de soutien.

A la seule qui ma tous données ma chère B.A

Résumé :

Face à l'expansion urbaine et à la disponibilité limitée de terrains constructibles, des solutions de traitement géotechnique adaptées sont nécessaires, ainsi, l'amélioration des sols argileux par l'ajout de poudre de verre est étudiée dans ce travail, afin d'analyser leurs propriétés mécaniques et leur portance. L'étude des caractéristiques des argiles, notamment leur composition minéralogique et leurs propriétés physico-chimiques, en soulignant les défis du gonflement des sols argileux a été examinée. L'exposé de diverses techniques de stabilisation des sols, incluant la stabilisation mécanique, thermique, chimique et par ajout de matériaux inertes, avec un accent particulier sur l'utilisation des déchets de verre comme stabilisant a été fait, ainsi qu'un aperçu sur le verre, sa fabrication, ses propriétés physiques et chimiques, et son potentiel en tant que matériau de valorisation dans le traitement des sols. La partie expérimentale détaille le protocole de prélèvement, de préparation et de traitement des échantillons de sol avec de la poudre de verre. Les essais, comprenant des tests de compactage, de CBR et de cisaillement, montrent une amélioration notable des propriétés mécaniques des sols argileux traités, notamment une augmentation de la résistance au cisaillement et une réduction de la compressibilité. Ces bénéfices sont maximisés jusqu'à une proportion optimale d'environ 5% de poudre de verre. En conclusion, l'ajout de poudre de verre dans les sols argileux est une méthode prometteuse pour améliorer leurs performances mécaniques, offrant une solution durable et respectueuse de l'environnement.

Mots clés :

Amélioration des sols argileux, Poudre de verre, Portance, Stabilisation des sols, Gonflement des sols, Déchets de verre.

الملخص:

في مواجهة التوسع الحضري وتوفر الأراضي القابلة للبناء بشكل محدود، تصبح حلول المعالجة الجيوتقنية المناسبة ضرورية. لذلك، تدرس هذه العمل تحسين التربة الطينية بإضافة مسحوق الزجاج لتحليل خصائصها الميكانيكية وقدرتها على التحمل. يتناول الدراسة خصائص الطين، ولا سيما تركيبها المعدني وخصائصها الفيزيائية والكيميائية، مع التركيز على تحديات انتفاخ التربة الطينية. تتم مناقشة تقنيات تثبيت التربة المختلفة، بما في ذلك التثبيت الميكانيكي والحراري والكيميائي وإضافة المواد الخاملة، مع التركيز بشكل خاص على استخدام نفايات الزجاج كمثبت. بالإضافة إلى ذلك، يتم تقديم نظرة عامة على الزجاج وتصنيعه وخصائصه الفيزيائية والكيميائية وإمكاناته كمادة ذات قيمة في معالجة التربة. الجزء التجريبي يوضح بروتوكول أخذ العينات وتحضيرها ومعالجة عينات التربة باستخدام مسحوق الزجاج. تُظهر الاختبارات، بما في ذلك اختبارات الدمك، CBR، والقص، تحسناً ملحوظاً في الخصائص الميكانيكية للتربة الطينية المعالجة، خصوصاً زيادة في مقاومة القص وتقليل في القابلية للضغط. يتم تحقيق هذه الفوائد بشكل أمثل حتى نسبة حوالي 5% من مسحوق الزجاج. في الختام، يُعد إضافة مسحوق الزجاج إلى التربة الطينية طريقة واعدة لتحسين أدائها الميكانيكي، مما يوفر حلاً مستداماً وصديقاً للبيئة.

الكلمات المفتاحية:

تحسين التربة الطينية، مسحوق الزجاج، قدرة التحمل، تثبيت التربة، انتفاخ التربة، نفايات الزجاج.

Abstract :

In the face of urban expansion and limited availability of buildable land, suitable geotechnical treatment solutions are necessary. Therefore, this work studies the improvement of clay soils by adding glass powder to analyze their mechanical properties and bearing capacity. The study examines the characteristics of clays, notably their mineralogical composition and physico-chemical properties, emphasizing the challenges of clay soil swelling. Various soil stabilization techniques, including mechanical, thermal, chemical stabilization, and the addition of inert materials, are discussed, with a particular focus on using glass waste as a stabilizer. Additionally, an overview of glass, its manufacturing, physical and chemical properties, and its potential as a valorization material in soil treatment is provided. The experimental part details the protocol for sampling, preparing, and treating soil samples with glass powder. The tests, including compaction, CBR, and shear tests, show a notable improvement in the mechanical properties of treated clay soils, particularly an increase in shear resistance and a reduction in compressibility. These benefits are maximized up to an optimal proportion of around 5% glass powder. In conclusion, adding glass powder to clay soils is a promising method for enhancing their mechanical performance, offering a sustainable and environmentally friendly solution.

Keywords :

Improvement of clay soils, Glass powder, Bearing capacity, Soil stabilization, Soil swelling, Glass waste.

1. Liste des tableaux :

Tableau 1: Classification des minéraux argileux. -----	11
Figure 7 : Structure schématique de la kaolinite. Tableau 2: Classification des minéraux argileux. -----	11
Tableau 3: Valeurs de la surface spécifique de quelques familles argileuses. -----	16
Tableau 4 : Avantages et Inconvénients des techniques des techniques de stabilisations couramment utilisées. -----	29
Tableau 5: Composition (en % en masse) des verres industriels. -----	38
Tableau 6 : Verres listés par catégorie, domaine de composition et applications. -----	42
Tableau 7: Les résultats de densité sèche a différentes teneurs en eau. -----	51
Tableau 8: L'optimum de proctor déterminé (ω_{opt} ; γ_{dmax}) -----	51
Tableau 9 : Les résultat de l'ajout de la poudre de verre. -----	52
Tableau 10 : résultat de l'essai pour le sol non traité. -----	55
Tableau 11 : les résultats de l'indice CBR pour le sol non traité. -----	55
Tableau 12 : résultat de l'essai pour le sol traité. -----	56
Tableau 13 : les résultats de l'indice CBR pour le sol traité. -----	56
Tableau 14 : les résultats d'essai pour le sol non traité. -----	60
Tableau 15 : les résultats d'essai pour le sol traité. -----	62
Tableau 16 : Expression des résultats du cycle de chargement pour le sol non traité. ----	65
Tableau 17 : Expression des résultats du cycle de déchargement pour le sol non traité. -	66
Tableau 18 : Expression des résultats de développements des volumes à la fin des cycles pour le sol non traité. -----	67
Tableau 19 : les indices (Cc, Cg) et la contrainte de compression. -----	67
Tableau 20 : Expression des résultats du cycle de chargement pour le sol traité. -----	69
Tableau 21 : L'expression des résultats du cycle de déchargement pour le sol traité. ----	70
Tableau 22 : Expression des résultats de développements des volumes à la fin des cycles pour le sol traité. -----	71
Tableau 23 : les indices (Cc, Cg) et la contrainte de compression. -----	71

Lise des figures :

Figure 1 : Représentation schématique d'un empilement de feuillets.	8
Figure 2 : Différents types d'empilement des feuillets des phyllosilicates.....	8
Figure 3: Différents niveaux structuraux des argiles.	9
Figure 4: la couche tétraédrique.....	10
Figure 5: la couche octaédrique.	10
Figure 6: Agencement des couches octaédriques et tétraédriques dans les phyllosilicates a) type 1 :1 b) type 2:1	10
Figure 7 : Structure schématique de la kaolinite. Tableau 2: Classification des minéraux argileux.....	11
Figure 8: Schéma de la structure de la montmorillonite.	14
Figure 9 : Schéma de la structure 3 D de la montmorillonite.	14
Figure 10 : Schéma de la structure de l'illite.	15
Figure 11 : Liaisons possibles de l'eau inter-foliaire (Morel, 1996).....	19
Figure 12 : Mécanisme d'adsorption de l'eau sur les surfaces argileuses : a) Attraction par osmose, b) Attraction dipolaire (Mitchell, 1993).....	20
Figure 13 : Les types de gonflements.	21
Figure 14: Courbe du gonflement en fonction du temps.....	22
Figure 15: Les fissurations causés par le gonflant.	25
Figure 16 : Le gonflement affecte la route.....	25
Figure 17 : le gonflement à l'intérieur du tunnel.	25
Figure 18 : Classification des liants.	31
Figure 19 : Représentation schématique réseaux de silice (silice cristallisée - à gauche) et (silice vitreuse - à droite).....	41
Figure 20 : Site de prélèvement par satellite (35.380889, 8.087147).	44
Figure 21: site de projet.....	44
Figure 22 : prélèvement des échantillons.....	45
Figure 23: Etuve réglable (50°C-105°C)	46
Figure 24: Le matériel utilisé.	46
Figure 25 : La machine LOS ANGELES.....	47
Figure 26: Le verre broyer avant tamisage.	47
Figure 27 : La poudre de verre.....	47
Figure 28 : préparation d'échantillon.	48

Figure 29 : Appareillages d'essai.	49
Figure 30 : La courbe proctore pour le sol non traité.....	51
Figure 31 : Les valeur de γ_d max pour les diférentes teneur en verre.	52
Figure 32 : Poinçonneuse CBR.....	54
Figure 33 : la démarche d'essai CBR.	54
Figure 34 : l'assemblage de l'essai.	55
Figure 35 : les résultats de CBR sous forme de graphe.	56
Figure 36 : les résultats de CBR sous forme de graphe pour le sol traité.	57
Figure 37 : l'échantillon à la fin d'essai	57
Figure 38 : Schéma de la boite de casagrande.	58
Figure 39 : La machine de cisaillement.	59
Figure 40 : La boite de casagrande.	59
Figure 41 : Assemblage boite + échantillon.....	59
Figure 42 : un échantillon après cisaillement.....	60
Figure 43 : la courbe de cisaillement (contrainte/déformation) pour le sol non traité.....	61
Figure 44 : La courbe intrinsèque sol non traité.	61
Figure 45 : la courbe de cisaillement (contrainte/déformation) pour le sol non traité.....	62
Figure 46 : La courbe intrinsèque sol traité.	63
Figure 47: courbe de compression/gonflement a l'œdomètre.	64
Figure 48 : l'appareillages d'essai.....	64
Figure 49: La boite œdométrique.....	65
Figure 50: la courbe de développement du tassement pour le sol non traité.	66
Figure 51: la courbe de développement du gonflement pour le sol non traité.....	67
Figure 52 : La courbe œdométrique (le développement de l'indice des vides) pour le sol non traité.....	68
Figure 53 : la courbe de développement du tassement pour le sol traité.	69
Figure 54 : la courbe de développement du gonflement pour le sol traité.....	70
Figure 55: La courbe œdométrique (le développement de l'indice des vides) pour le sol traité.....	71

.....	I
.....	II
Remerciements	III
Dédicace	IV
Résumé :	V
:الملخص	VI
Abstract :	VII
1. Liste des tableaux :	VIII
Lise des figures :	IX
Introduction générale :	1
Chapitre I : généralités sur les argiles.	5
1. Introduction :	5
2. Définition :	5
3. Principales utilisations des argiles :	6
1.1 La céramique :	6
1.2 L'industrie papetière :	6
1.3 La fabrication du caoutchouc ou des plastiques :	6
1.4 La peinture :	6
1.5 Cosmétique :	7
1.6 L'industrie pharmaceutique et le domaine médical :	7
2. Composition d'argile :	7
2.1 Le feuillet :	8
2.2 La particule :	8
2.3 L'agrégat :	9
3. Structure minéralogique :	9
4. Classification des argiles :	10
5. Les différentes familles d'argiles :	12
5.1 La kaolinite :	12
5.2 La montmorillonite :	13
5.3 L'illite :	15

6.	Propriétés des minéraux argileux :	16
6.1	La surface spécifique :	16
6.2	La capacité de gonflement et d'adsorption d'eau :	17
6.3	Capacité d'échange cationique :	17
7.	Interactions physico-chimiques entre l'eau et l'argile :	17
7.1	Les différents types d'eau autour du feuillet :	18
7.1.1	Eau libre :	18
7.1.2	Eau capillaire :	18
7.1.3	Eau liée ou adsorbée :	18
7.2	Interactions eau-argile :	19
8.	Le phénomène de gonflement :	20
9.	Les types de gonflement :	20
9.1	Le gonflement inter-foliaire :	20
9.2	Le gonflement inter-particulaire :	21
9.3	Les étapes de gonflement :	22
9.3.1	Le gonflement primaire :	22
9.3.2	Le gonflement secondaire :	22
10.	Les causes principales de gonflement :	22
10.1	Hydratation par adsorption :	22
10.1.1	Force d'attraction :	22
10.1.2	Force de répulsion :	23
10.2	Hydratation par osmose :	23
10.3	Hydratation par capillarité :	23
10.4	La transformation chimique :	23
10.4.1	La transformation de l'anhydrite en gypse :	23
10.4.2	L'oxydation de la pyrite (FeS ₂) :	23
10.4.3	La dissolution des carbonates dans l'eau :	23
11.	Facteurs influençant le gonflement :	24
11.1	Propriétés des sols :	24
11.2	Conditions environnementales :	24
11.3	Conditions des contraintes :	24
12.	Impacte du gonflement sur les constructions :	24
13.	Conclusion :	26

Chapitre II : La stabilisation des sols	28
1. Introduction :.....	28
2. Définition :	28
3. But de stabilisation :.....	28
4. Principe de la stabilisation des sols :.....	28
5. Les techniques de stabilisation utilisées :.....	29
5.1 La stabilisation mécanique :.....	30
5.1.1 Le compactage :.....	30
5.1.2 La substitution :.....	30
5.1.3 Le drainage :	30
5.2 La stabilisation thermique :.....	30
5.3 La stabilisation chimique :.....	31
5.3.1 Les hydrophobes :.....	31
5.3.2 Les liants :.....	31
5.3.2.1 Les liants hydrauliques :.....	32
5.3.2.1.1 La chaux :.....	32
5.3.2.1.2 Le ciment :.....	32
5.3.2.1.3 Les cendres volantes :.....	33
5.3.2.2 Les liants organiques :.....	33
5.4 La stabilisation par ajout des matériaux inertes :.....	33
5.5 Stabilisation des argiles par ajout des déchets de verre :	34
6. Conclusion :.....	34
Chapitre III : Généralités sur le verre.....	36
1. Introduction :.....	36
2. L’histoire du verre :.....	36
3. Définition du verre :	37
3.1 Définition opérationnelle du verre :	37
3.2 Définition structurale du verre :	37
4. La fabrication du verre :	38
5. Les propriétés du verre :.....	38
5.1 Les propriétés physiques :.....	38

5.2	Propriétés thermiques :.....	39
5.3	Les propriétés chimiques :.....	39
6.	Résistance chimique et altération du verre :.....	39
7.	Résistance mécanique : fragilité :.....	40
8.	Structure des verres :.....	40
9.	Les familles des verres :.....	41
9.1	Les verres sodocalciques :.....	41
9.2	Les verres borosilicates :.....	41
9.3	Le verre de silice :.....	42
9.4	Verres spéciaux :.....	42
10.	La poudre de verre :.....	43
10.1	Valorisation de la poudre de verre :.....	43
11.	Conclusion :.....	43
Chapitre IV : étude expérimentale.		44
1.	Introduction :.....	44
2.	DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL :.....	45
2.1	Prélèvement du sol :.....	45
2.2	Stockage :.....	45
2.3	Préparation des échantillons :.....	46
2.4	Préparation de la poudre de verre :.....	46
2.5	Méthode de traitement :.....	48
3.	Essai réaliser :.....	48
3.1	Essai Proctor :.....	48
3.1.1	But d'essai :.....	48
3.1.2	Appareillage :.....	49
3.1.3	Mode opératoire :.....	50
3.1.4	Expression des résultats :.....	51
3.1.4.1	Sol non traité :.....	51
3.1.4.2	Sol traité :.....	52
3.1.4.3	Conclusion :.....	52
3.2	Essai CBR :.....	53
3.2.1	But d'essai :.....	53

3.2.2	Appareillage (CBR immédiat) :	53
3.2.3	Mode opératoire :	54
3.2.3.1	Le poinçonnement :	55
3.2.4	Expression des résultats :	55
3.2.4.1	Sol non traité :	55
3.2.4.2	Sol traité :	56
3.2.5	Conclusion :	58
3.3	Essai de cisaillement :	58
3.3.1	But de l'essai :	58
3.3.2	Appareillage :	59
3.3.3	Mode opératoire :	60
3.3.4	Expression des résultats :	60
3.3.4.1	Sol non traité :	60
3.3.4.2	Sol traité :	62
3.3.5	Conclusion :	63
3.4	Essai œdométrique :	63
3.4.1	But d'essai :	63
3.4.2	Appareillage :	64
3.4.3	Mode opératoire :	64
3.4.4	Expression des résultats :	65
3.4.4.1	Sol non traité :	65
3.4.4.2	Sol traité :	69
3.4.5	Conclusion :	72
4.	Conclusion :	72
	Références :	79

Introduction générale :

Le progrès socio-économique des nations est intrinsèquement lié à leur capacité à entreprendre des projets de construction et de développement urbain. À mesure que les sociétés évoluent, leur demande en infrastructures et en logements croît de manière exponentielle. Cependant, cette expansion urbaine se heurte à des défis majeurs, dont le plus crucial est la disponibilité de terrains constructibles. Dans de nombreux pays, en raison de la croissance démographique soutenue observée au cours du XXI^e siècle, l'utilisation rationnelle de chaque parcelle de terre est devenue impérative. La nécessité de construire sur des espaces limités est confrontée à une diversité considérable dans les caractéristiques géotechniques des sols. Certains sites sont favorables à une construction immédiate, nécessitant peu ou pas de traitement géotechnique préalable. En revanche, d'autres terrains présentent des propriétés mécaniques, physiques et chimiques qui les rendent inhospitaliers à la construction. Cette disparité exige des solutions techniques sophistiquées pour améliorer, renforcer et adapter les caractéristiques du sol. Parmi ces solutions figurent le traitement du sol, ça veut dire mélanger le sol avec des agents stabilisants tels que le ciment, la chaux ou d'autres matériaux, afin de moduler les propriétés géotechniques du sol en fonction des exigences du projet de construction.

Face à ces enjeux, les ingénieurs géotechniciens sont confrontés à un défi de taille, qui nécessite une approche multidisciplinaire intégrant des considérations économiques, environnementales et techniques. La recherche de solutions durables et efficaces pour répondre à la demande croissante en infrastructures tout en préservant les ressources naturelles et en minimisant les impacts environnementaux constitue donc un impératif essentiel dans le domaine de l'ingénierie géotechnique contemporaine. De plus, les sols traités avec ces matériaux peuvent présenter des problèmes d'altération de leurs propriétés physico-chimiques, les rendant souvent impropres à des fins agricoles et susceptibles de provoquer une contamination des eaux souterraines par des substances indésirables. Parallèlement, les coûts associés à l'extraction, à la production et à l'utilisation de ces matériaux connaissent une tendance à la hausse, ce qui accroît la pression financière sur les projets de construction et d'aménagement.

Face à ces défis, la recherche se tourne de plus en plus vers le développement de nouveaux matériaux et procédés de traitement des sols moins nuisibles pour l'environnement et plus économiquement viables. Des alternatives innovantes, telles que les matériaux recyclés ou les géopolymères, gagnent en intérêt en raison de leur potentiel à réduire l'empreinte carbone tout

en préservant la qualité des sols et des eaux souterraines. Le recyclage des matériaux devient ainsi une composante essentielle de l'industrie géotechnique contemporaine, visant à promouvoir la durabilité environnementale et à optimiser les coûts tout au long du cycle de vie des infrastructures.

Le verre, avec ses propriétés uniques, a joué un rôle essentiel dans l'histoire de l'humanité. De la verrerie artisanale aux technologies de pointe, le verre est omniprésent dans notre vie quotidienne. Sa résistance mécanique, sa transparence, sa conductivité électrique et sa résistance à la corrosion en font un matériau polyvalent. L'utilisation de la poudre de verre présente des avantages spécifiques à considérer, notamment sa recyclabilité à 100 % et ses propriétés mécaniques améliorées. Elle réagit avec le sol pour former un matériau plus résistant.

Problématique :

La poudre de verre peut-elle être utilisée pour améliorer les propriétés des sols argileux ?

C'est la question à laquelle nous tenterons de répondre dans ce travail, et cela s'appuie bien entendu sur certains travaux antérieurs que nous avons vus au cours de l'étude bibliographique concernant les techniques d'utilisation de la poudre de verre.

Ce travail se compose de quatre chapitres le premier intitulé 'généralités sur les argiles'. Ce chapitre fournit des informations générales sur divers types de sols argileux, en détaillant leur composition ainsi que leurs propriétés mécaniques et chimiques. Notre attention s'est portée spécifiquement sur les types de sols présentant des problèmes de gonflement. Un phénomène généralement associé à la composition du sol et au pourcentage de vides qu'il contient, qui peut avoir des conséquences menaçantes pour les structures et les infrastructures.

Le deuxième chapitre 'La stabilisation des sols' où on a défini ce que signifie ce terme et aussi on a élaboré quelques méthodes de stabilisation. Nous avons constaté que les méthodes de traitement des sols utilisent des produits chimiques (ciment, chaux et cendres volantes) qui polluent souvent le sol ou augmentent son agressivité. C'est ce qui nous a poussé à nous intéresser à la poudre de verre, qui possède des propriétés chimiques que l'on peut qualifier d'inertes. Il possède également d'importantes propriétés mécaniques qui peuvent contribuer à améliorer le sol. C'est ce à quoi nous avons essayé de répondre dans le troisième chapitre 'généralités sur le verre', où nous avons présenté ce que nous avons extrait de diverses

recherches sur le verre, ce qui faisait que notre théorie sur l'utilisation de la poudre de verre pour traiter le problème de gonflement semblait quelque peu correcte.

Le quatrième chapitre, est le travail expérimental, qui contenait les essais que nous avons menés, ainsi que les résultats que nous avons obtenus et que nous avons analysés et interprétés pour apporter une réponse au problème posé précédemment

Chapitre I :

Généralités sur les

argiles.

1. Introduction :

La terre recense plusieurs matières variées, néanmoins, le plus grand pourcentage des minéraux qui y sont recensés reste les minéraux argileux. Les propriétés physico-chimiques, le changement de volume en fonction de la teneur en eau, les ouvrages géotechniques, ainsi que le phénomène de gonflement feront place dans la recherche menée tout en mettant en avant différentes techniques de stabilisation des argiles.

2. Définition :

L'origine du mot "argile" remonte au grec "Argilos", dérivé d'"argos" signifiant blanc. Cette terminologie est assez vague et comporte plusieurs définitions. En effet, le terme "argile" peut revêtir des significations différentes selon le contexte, que ce soit en mécanique des sols, en mécanique des roches ou en poterie. Il peut désigner diverses espèces minérales, une famille de roches, une catégorie de sols ou encore une classe granulométrique. Derrière cette appellation générique se cache une grande diversité de matériaux (1). Les argiles, en général, sont des produits de décomposition des roches siliceuses, par désagrégations physique et mécanique puis par altération chimique (2). La fraction argileuse d'un sol est définie comme la proportion de particules ayant un diamètre inférieur à 2 μm . Un matériau est considéré comme de l'argile s'il contient plus de 50 % de minéraux argileux, avec une faible quantité de matières organiques (1). Ces particules ($<2\mu\text{m}$) sont les responsables des propriétés physicochimiques des argiles, telles que l'aptitude au gonflement, la plasticité et les propriétés d'adsorption. Cette fraction contient souvent des minéraux non phyllosilicates (carbonates, quartz, feldspaths composés minéraux amorphes sous forme d'oxyde ou hydroxyde de fer et d'aluminium) dits accessoires ou associés aux minéraux argileux (2).

Le caractère argileux des minéraux est lié à quatre critères (2) :

- **division** : les minéraux doivent se présenter à l' état de particules de très petite taille, inférieure à 2 μm .

- **faciès** : leurs particules dissymétriques à tendance lamellaire peuvent glisser les unes sur les autres, ce qui leur confère la plasticité. Cette forme favorise également le piégeage de molécules, en particulier de l' eau.

- **dispersion** : leur dispersion dans l' eau constitue des suspensions colloïdales plus ou moins stables.

- **dimension** : ce sont des phyllosilicates dont au moins une dimension est d' ordre nanométrique.

3. Principales utilisations des argiles :

1.1 La céramique :

Ils jouent un rôle essentiel en tant que composants majeurs et matériaux réfractaires dans divers produits tels que les briques, les ciments et les mortiers. Par exemple, le kaolin est utilisé depuis environ 2000 ans en Chine pour la fabrication de porcelaine. La stéatite, une roche dont le talc est le principal constituant, a été ou est utilisée dans la fabrication de fours, d'éviers, de centrales électriques, d'habillage de résistances électriques (comme dans le chauffe-eau) et dans la construction des poêles de masse (3).

1.2 L'industrie papetière :

Les kaolins, utilisés comme charges ou pour le traitement de surface, ainsi que le talc, employé principalement comme charge, jouent un rôle crucial dans l'industrie papetière. L'ajout de kaolin permet de réduire la quantité de pâte à papier, un matériau relativement coûteux, tout en améliorant ses propriétés optiques. En effet, la blancheur du kaolin renforce l'éclat et l'opacité de la surface du papier. De plus, la taille et la forme des particules individuelles de kaolin contribuent à offrir le brillant et la qualité d'impression nécessaires pour certains types de papier (3).

1.3 La fabrication du caoutchouc ou des plastiques :

Les industries utilisent le talc ou le kaolin dans leurs processus. Le kaolin est particulièrement efficace pour renforcer la résistance à l'abrasion et la résistance mécanique des mélanges de caoutchouc (3).

1.4 La peinture :

Le kaolin est couramment utilisé comme charge minérale inerte dans de nombreuses formulations de peintures, qu'elles soient conventionnelles ou écologiques. Il est également la charge principale des peintures dites « à l'argile ». Par exemple, la palygorskite, un autre minéral, a été un composant essentiel du pigment connu sous le nom de « bleu Maya », largement utilisé par la civilisation maya précolombienne de la Mésoamérique pour la

décoration de céramiques, sculptures, peintures murales et probablement textiles. La teinte bleue observée sur les codex mayas et aztèques, ainsi que sur les manuscrits et cartes de l'ère coloniale, est principalement produite par un mélange organique-inorganique de feuilles d'Indigo fera suffruticosa (indigo guatémaltèque) et de palygorskite, avec de petites quantités d'autres minéraux additifs (3).

1.5 Cosmétique :

Les argiles sont principalement exploitées pour leurs capacités absorbantes, notamment dans la fabrication de produits tels que les shampooings, les crèmes de beauté et les poudres pour bébés. La montmorillonite, sous forme de poudre, est un ingrédient traditionnellement utilisé pour la préparation de shampooings secs et de traitements contre l'acné (3).

1.6 L'industrie pharmaceutique et le domaine médical :

Le talc est fréquemment employé comme excipient dans certains médicaments, principalement en tant que lubrifiant. La montmorillonite, quant à elle, est principalement utilisée pour ses propriétés d'adsorption sur les muqueuses. Elle est utilisée sous forme de suspension dans l'eau dans des produits disponibles en pharmacie tels que Smecta, Beidellix ou Attapulgit, qui sont des médicaments commercialisés. Ces produits sont largement utilisés dans le traitement des affections œsogastroduodénales (telles que les ulcères), des douleurs ou dysfonctionnements gastriques, des diarrhées et des gastroentérites. De plus, la montmorillonite est utilisée comme support dans la préparation d'onguents pour le traitement de la peau. En chirurgie, le talc est utilisé pour rétablir le contact entre la plèvre thoracique et la plèvre pulmonaire, notamment après un pneumothorax. Quant au kaolin, il est utilisé comme activateur pour évaluer la coagulabilité du plasma dans certains tests biologiques, ainsi que comme anti-diarrhéique (3).

2. Composition d'argile :

Les argiles sont des aluminosilicates simples qui se distinguent par leur grande diversité de structures moléculaires, cristallines et compositions chimiques. La plupart des minéraux argileux adoptent une forme lamellaire, ce qui leur vaut le nom de phyllosilicates. Un minéral à structure lamellaire se présente sous forme de poudre fine, chaque particule étant constituée d'un empilement, ordonné ou désordonné, d'une dizaine (particule primaire) ou d'au moins une centaine (agrégat) de feuilletts. L'épaisseur de la particule primaire peut atteindre 10 nm et la taille de l'agrégat peut atteindre jusqu'à 10 µm (4).

2.1 Le feuillet :

La structure fondamentale des minéraux argileux est appelée cristallite, composée d'un feuillet et d'un inter-feuillet, également connu sous le nom d'espace inter-foliaire. Chaque feuillet est formé par la superposition de deux ou trois couches cristallisées, où les atomes sont régulièrement distribués à température ambiante. L'inter-feuillet est constitué d'un fluide, généralement de l'eau, qui assure une liaison électrochimique entre les feuillets. Différents types de liaisons inter-feuillets existent, souvent associés à des phénomènes de substitutions isomorphiques à la surface des cristallites (5).

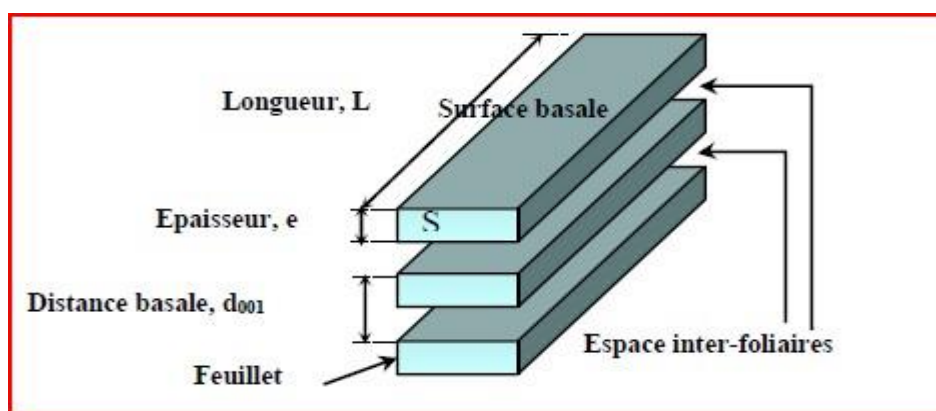


Figure 1 : Représentation schématique d'un empilement de feuillets.

2.2 La particule :

Une particule d'argile résulte de l'empilement face-à-face de quelques cristallites élémentaires, parfois même d'une seule cristallite. Il est parfois utilisé le terme "cristallite" pour désigner un empilement de plusieurs feuillets, ce que nous avons également décrit comme une particule. Nous verrons que ces cristallites peuvent s'assembler de différentes manières (5).

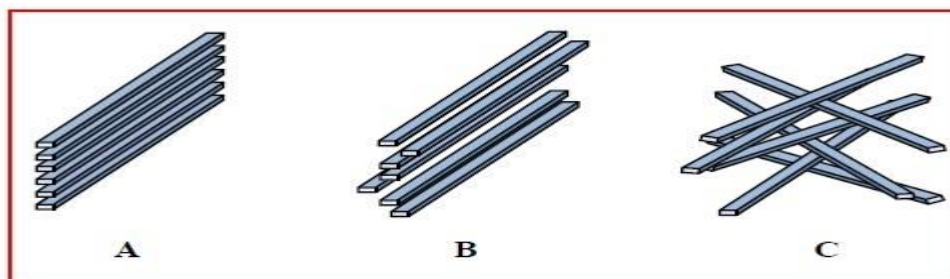


Figure 2 : Différents types d'empilement des feuillets des phyllosilicates.

2.3 L'agrégat :

Les interactions entre les particules conduisent à la formation d'agrégats plus ou moins denses, en fonction du nombre de particules et de leurs distances les unes par rapport aux autres. Ces agrégats sont poreux car l'assemblage aléatoire des particules crée des pores interparticulaires. Ces agrégats peuvent ensuite se disposer pour former des "micro-grains" avec des pores inter-agrégats. Ce niveau d'organisation supplémentaire dépend de la nature de l'argile et de son degré d'hydratation (5).

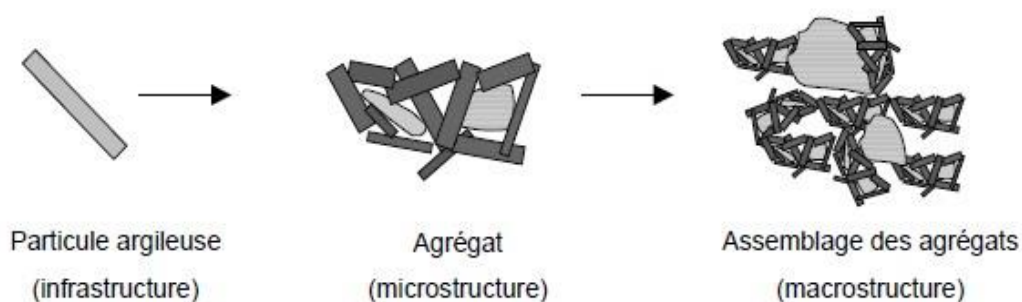


Figure 3: Différents niveaux structuraux des argiles.

3. Structure minéralogique :

Les minéraux argileux sont des phyllosilicates composés d'un feuillet bidimensionnel silicaté comme élément de base de leur structure. Ce feuillet phyllosilicate est formé par un empilement de couches tétraédriques (T) et octaédriques (O). Les tétraèdres, qui forment la couche tétraédrique, se composent d'un atome de silicium au centre relié à quatre atomes d'oxygène situés aux sommets. Parmi ces atomes, trois forment la base (Ob) et sont partagés avec les tétraèdres adjacents, tandis que l'oxygène apical (Oa) au sommet est partagé avec un octaèdre. Les octaèdres, ajoutés pour former la couche octaédrique, contiennent un cation au centre, pouvant être de l'aluminium, du magnésium, du fer, etc., ainsi que des atomes d'oxygène, d'hydroxyle ou de fluorure aux sommets. Selon le nombre de couches tétraédriques et/ou octaédriques empilées, et donc selon l'épaisseur du feuillet, différentes classes de minéraux argileux sont distinguées (6).

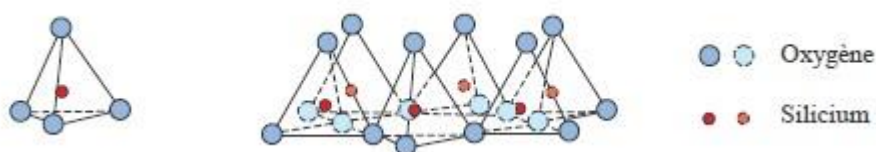


Figure 4: la couche tétraédrique.

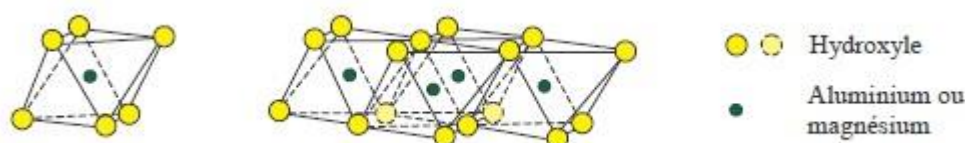


Figure 5: la couche octaédrique.

4. Classification des argiles :

Les argiles sont classées sur la base de l'épaisseur et de la structure du feuillet. Il existe quatre groupes les plus classiques.

- Le feuillet composé d'une couche octaédrique et d'une couche tétraédrique fait partie des minéraux à 7 Å d'épaisseur. Il est identifié par T : O ou 1 : 1 ;
- Le feuillet composé d'une couche octaédrique et de deux couches tétraédriques fait partie des minéraux à 10 Å d'épaisseur. Il est identifié par T : O : T ou 2 : 1 ;
- Le feuillet composé des feuillets T : O : T et des couches octaédriques inter-foliaires par alternance fait partie des minéraux à 14 Å d'épaisseur.
- Les minéraux argileux interstratifiés forment des feuillets d'épaisseurs variables. Ces minéraux proviennent du mélange régulier des différents groupes. La classification des phyllosilicates est réalisée grâce à la valeur de la charge permanente du feuillet (7).

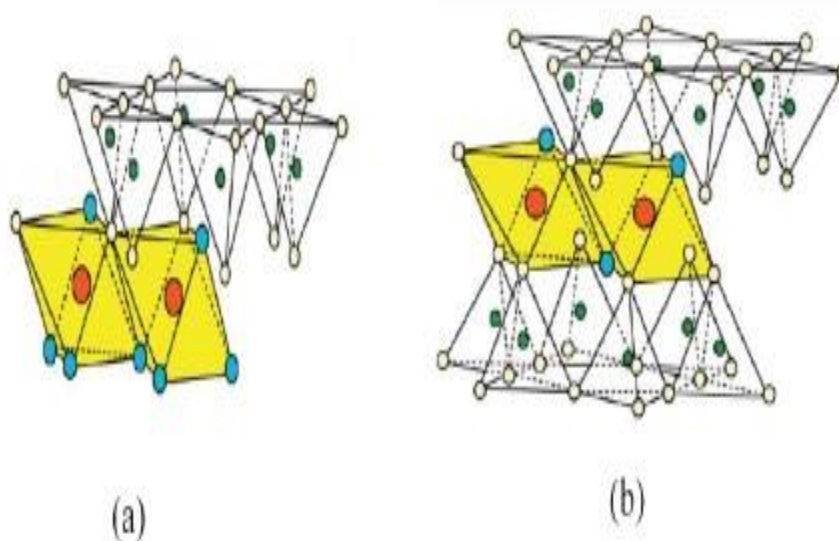


Figure 6: Agencement des couches octaédriques et tétraédriques dans les phyllosilicates a) type 1:1 b) type 2:1.

Types Minéraux		Distance basale (Å)	Charge x du feuillet par unité O ₁₀ (OH) ₂	Espèce inter-feuillet	Groupe de Minéraux	Sous groupe de Minéraux	Exemples
1:1	2 couches T:O	7	≈ 0	Aucune ou H ₂ O	Serpentine – Kaolinite	Kaolinite (Dioctaédrique)	Dickite, Halloysite, Kaolinite, Nacrite,
			≈ 0	Aucune		Serpentine (Trioctaédrique)	Amesite, Berthiérine, Chrysotile, Cronstedtite, Lizardite,
2:1	3 couches T:O:T	9	≈ 0	Aucune	Pyrophyllite - Talc	Pyrophyllite (Dioctaédrique)	Pyrophyllite
						Talc (Trioctaédrique)	Talc, Willemseite
		10	≈ 0,5 – 1	Cations non hydratés (K, Na)	Micas	Mica Dioctaédrique	Céladonite, Glauconite, Illite, Muscovite, Paragonite,
						Mica Trioctaédrique	Annite, Biotite, Lepidolite, Phlogopite,
			≈ 2	Cations non hydratés (K, Na)	Micas mous	Micas mous Dioctaédrique	Margarite,
						Micas mous Trioctaédrique	Clintonite,
	10 à 15	≈ 0,6 – 0,9	Cations ± hydratés échangeables (Ca, Na)	Vermiculites	Vermiculites Dioctaédrique	Vermiculites Dioctaédriques	
					Vermiculites Trioctaédrique	Vermiculites Trioctaédriques	
	10 à 18	≈ 0,2 – 0,6	Cations ± hydratés échangeables (Ca, Na)	Smectites	Smectites Dioctaédrique	Beidelite, Montmorillonite, Nontronite,	
					Smectites Trioctaédrique	Hectorite, Sauconite, Saponite, Stevensite,	
	En lattes (rubans)	----	variable	Cations ± hydratés échangeables	Sepiolite – Palygorskite	Palygorskite	Attapulgate, Palygorskite,
						Sepiolite	Loughlinte, Sepiolite
	----	variable	variable	-----	-----	Minnesotaite, Stilpnomelane, Zussmanite,	
					-----	-----	
4 couches : T:O:T:O	14	variable	Hydroxydes	Chlorites	Chlorites Dioctaédrique	Donbassite,	
					Chlorites Trioctaédrique	Brunsvigite, Chamosite, Clinocllore, Diabanite, Nimite, Pennantite, Ripidolite, Spheridanite, Thuringite	

Tableau 1: Classification des minéraux argileux.

5. Les différentes familles d'argiles :

5.1 La kaolinite :

Les minéraux argileux de type 1 :1 ou T-O, avec une épaisseur de 7,2 Å, correspondent aux kaolinites, où deux feuillets sont superposés. Les ions H⁺ se trouvent sur la surface inférieure, tandis que les ions O⁻ de la surface supérieure établissent entre eux une liaison hydrogène (O-H) forte. Cette liaison hydrogène, combinée à la liaison de Van der Waals, confère une grande stabilité face à l'action de l'eau, assurant ainsi la stabilité des minéraux argileux kaolinites et protégeant leurs structures élémentaires contre l'eau (8).

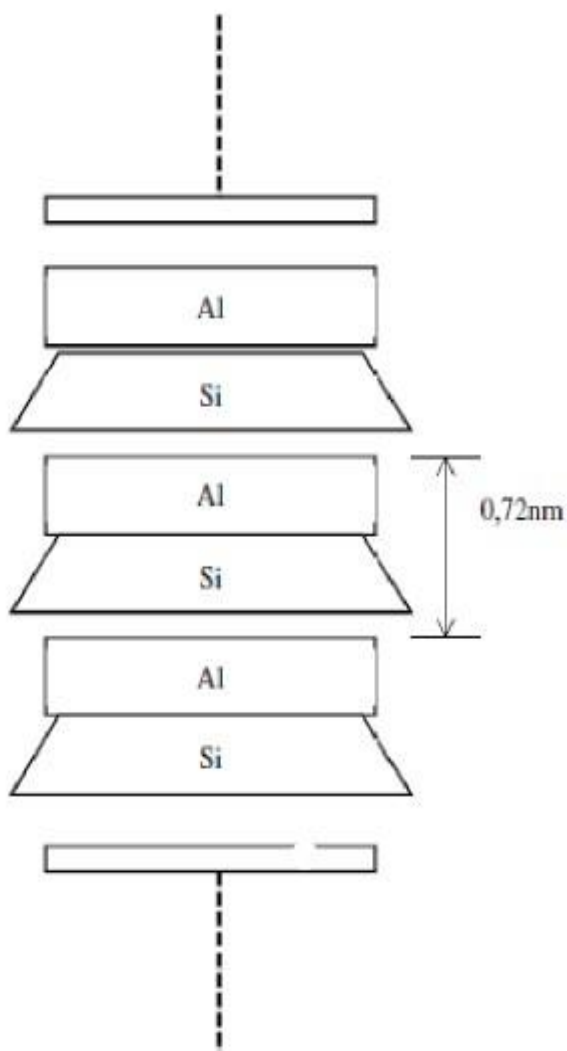


Figure 7 : Structure schématique de la kaolinite.

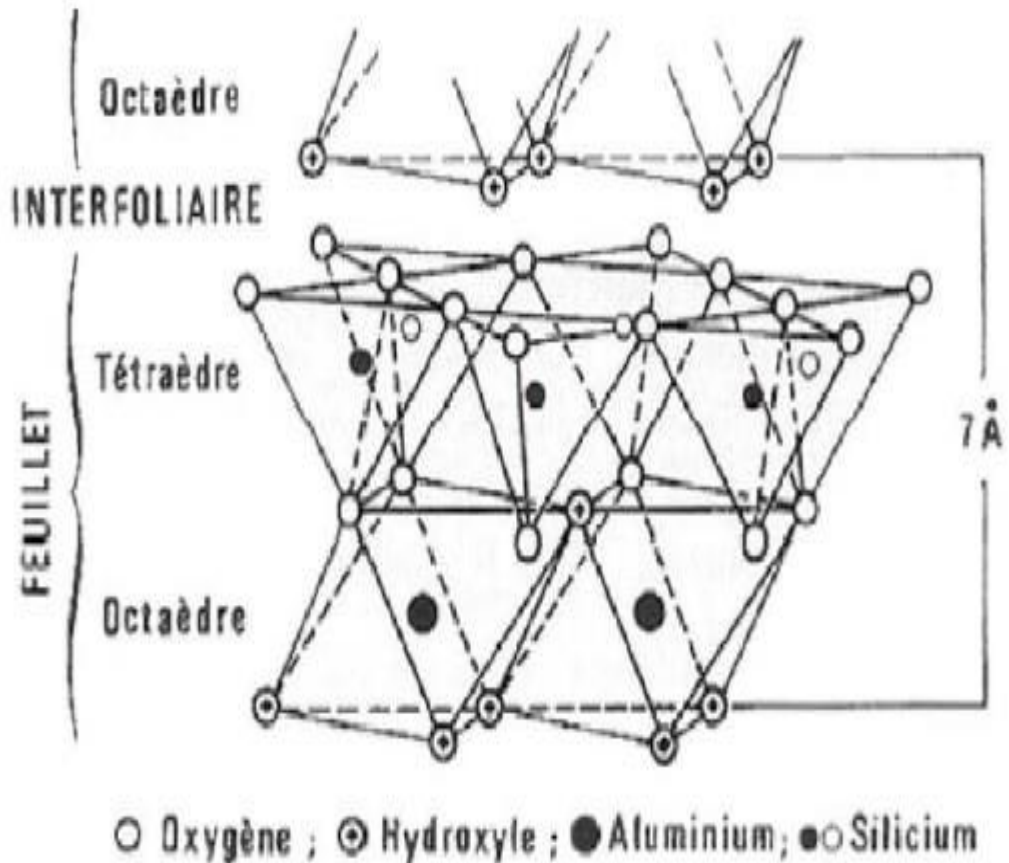


Figure 8 : Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite.

5.2 La montmorillonite :

La montmorillonite est composée de feuillets élémentaires de type 2 pour 1 ou T:O:T. Elle se caractérise par deux couches tétraédriques de silice entourées d'une couche octaédrique d'alumine. L'empilement des feuillets n'est pas ordonné : chaque feuillet est incliné dans son plan par rapport au précédent, avec une extension latérale extrêmement importante par rapport à son épaisseur, estimée à 9,6 Å. De plus, la montmorillonite présente une grande sensibilité à l'eau et un gonflement conséquent, car les molécules d'eau s'infiltrèrent entre les feuillets. Les épaisseurs des feuillets varient de 9,6 Å à 15 Å, et en fonction du type de cation compensateur et de la présence d'humidité entre les feuillets, ces épaisseurs peuvent augmenter davantage (8).

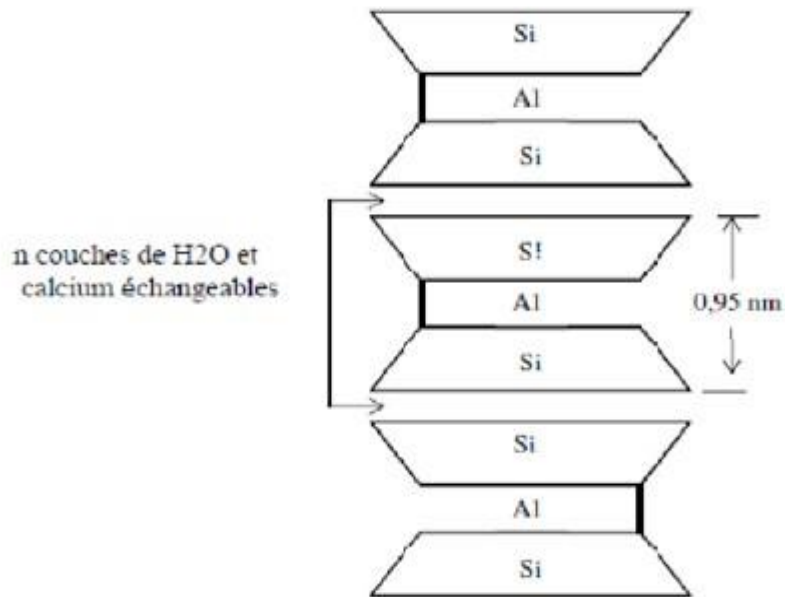


Figure 8: Schéma de la structure de la montmorillonite.

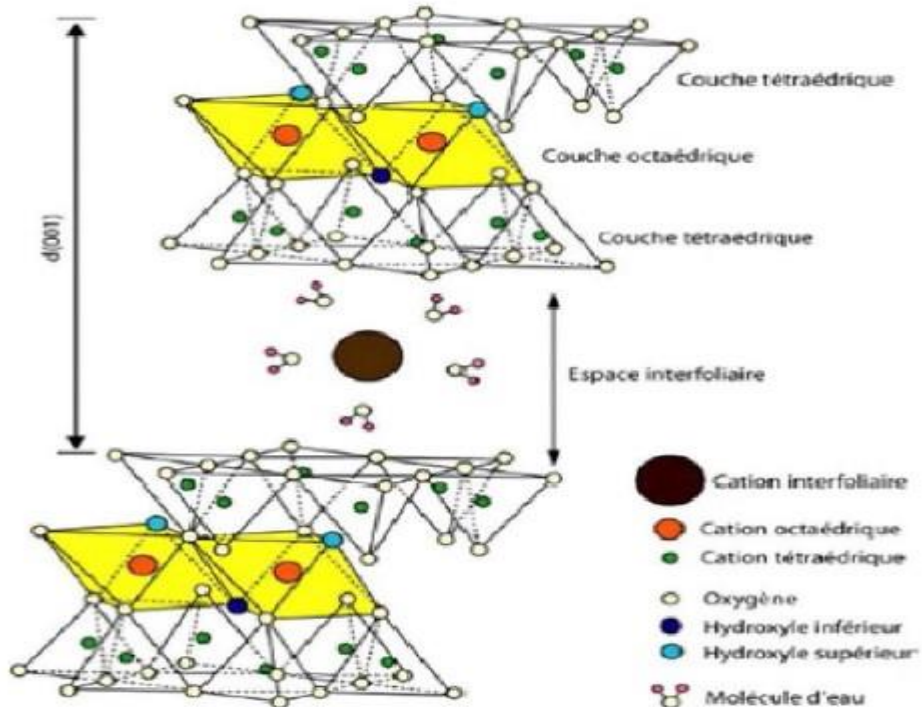


Figure 9 : Schéma de la structure 3 D de la montmorillonite.

5.3 L'illite :

La structure de l'illite de type 2 pour 1 est similaire à celle de la montmorillonite, avec la différence que l'illite présente un déficit de charge résultant du remplacement des ions par des cations de potassium (K^+). Les cations potassium (K^+) présentent l'avantage de pouvoir remplir la cavité dans laquelle ils sont logés. Les ions potassium anhydre assurent une liaison forte entre les feuillets, empêchant ainsi la pénétration des molécules d'eau entre ces feuillets et maintenant l'espace inter-foliaire à une taille fixe de 9,6 Å. Par conséquent, l'illite offre une stabilité face à l'eau par rapport à la montmorillonite (8).

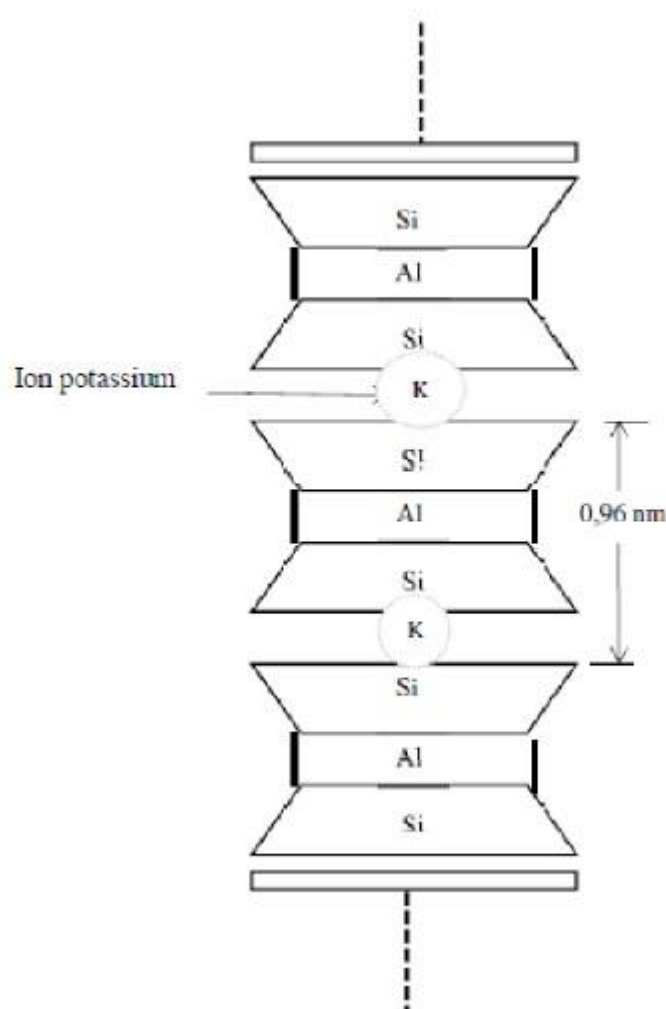


Figure 10 : Schéma de la structure de l'illite.

6. Propriétés des minéraux argileux :

Les minéraux argileux se distinguent par plusieurs propriétés physico-chimiques essentielles. Parmi celles-ci, la surface spécifique joue un rôle crucial, déterminant la quantité d'interactions possibles avec d'autres substances. De plus, la capacité d'adsorption d'eau et de gonflement est une caractéristique majeure des argiles, influençant leur comportement face à l'humidité et leur plasticité. Enfin, la capacité d'échange cationique est une propriété fondamentale qui détermine la capacité des argiles à échanger des ions avec leur environnement, ce qui peut avoir des implications importantes dans divers processus géologiques et environnementaux (9).

6.1 La surface spécifique :

Malgré leur fine granulométrie, les argiles possèdent une surface spécifique considérable, laquelle dépend de la nature du minéral argileux. Cette surface totale comprend à la fois une surface externe facilement accessible et une surface interne qui se développe lors de l'expansion de l'espace inter-foliaire. Les minéraux de la famille des smectites se démarquent par une surface spécifique particulièrement élevée par rapport aux autres types d'argiles, en raison de leurs propriétés de gonflement. Cette surface peut atteindre jusqu'à 800 m²/g lorsque les particules sont complètement hydratées. Parmi les méthodes couramment utilisées pour évaluer la surface spécifique, la volumétrie d'adsorption d'azote exploitée par la méthode de Brunauer, Emmett et Teller (BET) est prépondérante. Cette approche consiste à faire adsorber des molécules d'azote (N₂) sur une surface argileuse préalablement activée par un traitement thermique, en tenant compte de leurs dimensions et de leurs possibilités d'arrangement. L'azote est choisi pour sa neutralité, ne présentant aucune interaction spécifique lors de son mécanisme d'adsorption. Toutefois, en raison de sa faible affinité pour les liaisons dans l'espace inter-foliaire, ce gaz inerte permet principalement de mesurer la surface externe des particules (9).

Tableau 3: Valeurs de la surface spécifique de quelques familles argileuses.

Argiles	Surface interne (m ² /g)	Surface externe (m ² /g)	Surface total (m ² /g)
Kaolinite	0	15	15
Illite	5	25	30
Smectite	750	50	800
Vermiculite	750	1	751
Chlorite	0	15	15

6.2 La capacité de gonflement et d'adsorption d'eau :

En règle générale, toutes les argiles ont la capacité de retenir des molécules d'eau dans des proportions variables. Cependant, seules certaines sont capables d'incorporer des quantités significatives de molécules d'eau dans leur espace inter-foliaire. Les smectites, les vermiculites et les minéraux inter-statifiés font partie des argiles qui se distinguent par leur forte capacité d'adsorption d'eau entre les feuillets de leur structure, ce qui entraîne une variation de leur volume et provoque leur gonflement. Il convient de souligner que le gonflement des argiles dépend également de leur composition, car ces matériaux sont composés à la fois de minéraux argileux et d'autres minéraux associés. La texture des argiles joue également un rôle crucial dans ce processus d'expansion. Pour les argiles naturelles, cette propriété est également influencée par le site d'échantillonnage, ce qui confère à chaque type d'argile une spécificité en fonction de son origine et de son environnement de formation. Les minéraux gonflants ont une structure de base avec une distance inter-feuillets de 10 Å, mais cette distance varie en fonction de leur degré d'hydratation. Par exemple, elle peut atteindre environ 12,5 Å pour l'incorporation d'une couche d'eau autour du cation inter-foliaire et 15 Å pour deux couches. Cette hydratation entraîne une augmentation significative du volume, pouvant aller jusqu'à 95 %. Par ailleurs, certains minéraux argileux contiennent de l'eau adsorbée mais ne présentent pas de propriétés de gonflement, comme c'est le cas des argiles fibreuses (9).

6.3 Capacité d'échange cationique :

Pour maintenir l'électroneutralité à l'interface solide-liquide, les charges de surface des particules d'argile sont neutralisées par des ions de charge opposée provenant de la solution, généralement des cations. La capacité d'échange cationique (CEC) représente la concentration totale des sites de surface disponibles pour les cations. Cette caractéristique est exprimée en quantité de charge par unité de masse (meq/100g). Pour évaluer la CEC, on mesure généralement la quantité totale de cations indicateurs fixés en excès dans une suspension d'argile. Cette mesure est souvent effectuée à pH constant, car la CEC dépend également du pH en raison de la présence de groupes silanols et aluminols sur les surfaces latérales, susceptibles de se protoner ou de se déprotoner (9).

7. Interactions physico-chimiques entre l'eau et l'argile :

En raison de la nature électrique des feuillets ou de la présence de cations compensateurs, des interactions qui diffèrent de celles généralement observées dans les milieux poreux peuvent se manifester.

7.1 Les différents types d'eau autour du feuillet :

Trois types d'eau sont couramment distingués dans les argiles : l'eau libre, l'eau capillaire et l'eau adsorbée ou liée. L'impact de ces différents types d'eau dépend de la composition chimique (présence de cations), de la porosité de l'argile, qui est directement liée à la taille des pores, du degré de compactage et de saturation, ainsi que de la minéralogie spécifique des argiles (1).

7.1.1 Eau libre :

Comme pour tous les sols humides, les argiles contiennent de l'eau libre. Cette eau est principalement présente dans les espaces inter-agrégats et éventuellement dans les espaces inter-particulaires, loin des surfaces externes des particules. Elle peut circuler librement dans le milieu et s'évaporer complètement lorsque le sol est chauffé et maintenu à une température d'environ 105°C. Son déplacement peut également se produire en réponse à un gradient de charge hydraulique, conformément à la loi de Darcy.

7.1.2 Eau capillaire :

Pour les argiles non saturées, l'eau est retenue sous forme de ménisques près des points de contact entre les grains grâce aux forces capillaires, ce qui crée des forces d'attraction entre eux. Son déplacement est induit par un gradient de succion à l'échelle des pores, ce qui se traduit par une loi de Darcy généralisée (10).

7.1.3 Eau liée ou adsorbée :

Les milieux argileux se distinguent des milieux granulaires par la présence d'une couche semi-solide d'eau adsorbée autour de chaque particule, dont les propriétés diffèrent considérablement de celles de l'eau libre. En raison de sa dissymétrie, la molécule d'eau agit comme un dipôle électrique, avec le centre de gravité des charges négatives divergeant de celui des charges positives. Ses propriétés varient en fonction de sa localisation dans le système eau-particules solides, en raison des interactions eau-argile. Près de la particule solide, à l'intérieur de la couche adsorbée, la densité de l'eau adsorbée dépasse celle de l'eau libre, lui conférant des propriétés similaires à un solide. En s'éloignant de la particule, la viscosité de l'eau diminue progressivement jusqu'à atteindre les propriétés de l'eau normale à la frontière entre l'eau libre et l'eau adsorbée, avec une densité finale équivalente à celle de l'eau libre (11).

Les molécules d'eau de la couche adsorbée peuvent se déplacer aisément le long de la surface du minéral, mais difficilement dans une direction perpendiculaire. Pour une argile donnée, une augmentation de la valence des cations (par substitution de cations) ou de leur

concentration dans le liquide interstitiel entraîne une réduction de l'épaisseur de cette couche. Cette épaisseur est également influencée par la constante diélectrique du milieu et la température. Elle peut varier de quelques molécules d'eau à plusieurs dizaines de molécules d'eau. La suppression de cette couche adsorbée n'est possible qu'à des températures élevées, généralement entre 90 et 300 °C (11) (12).

7.2 Interactions eau-argile :

Au sein d'une même couche ou entre deux couches successives d'un même feuillet, les liaisons interatomiques sont des liaisons de valence primaire très solides. Cependant, entre deux feuillets successifs, ces liaisons sont généralement de 10 à 100 fois moins robustes en raison de la présence de cations adsorbés. En effet, différents mécanismes d'interaction peuvent se former entre les feuillets chargés négativement et l'eau dans l'espace inter-foliaire ou à proximité de la surface externe d'une particule. Ces mécanismes comprennent (12) :

- Les liaisons hydrogène.
- Les forces d'attraction de van der Waals.
- L'hydratation des cations échangeables.
- L'attraction par osmose.
- Une analogie avec un condensateur.

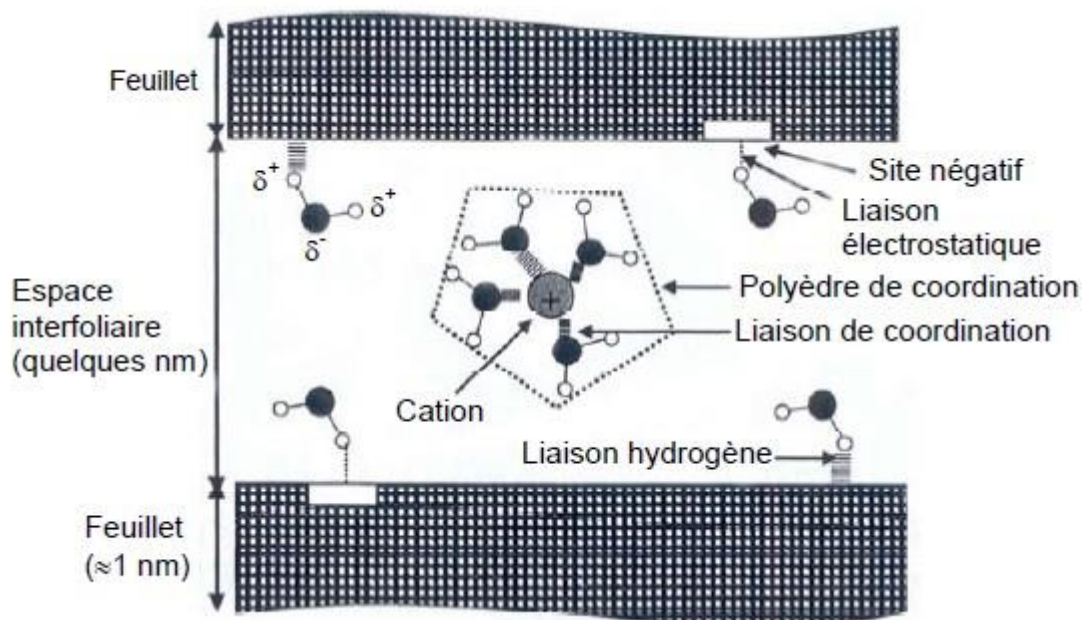


Figure 11 : Liaisons possibles de l'eau inter-foliaire (Morel, 1996).

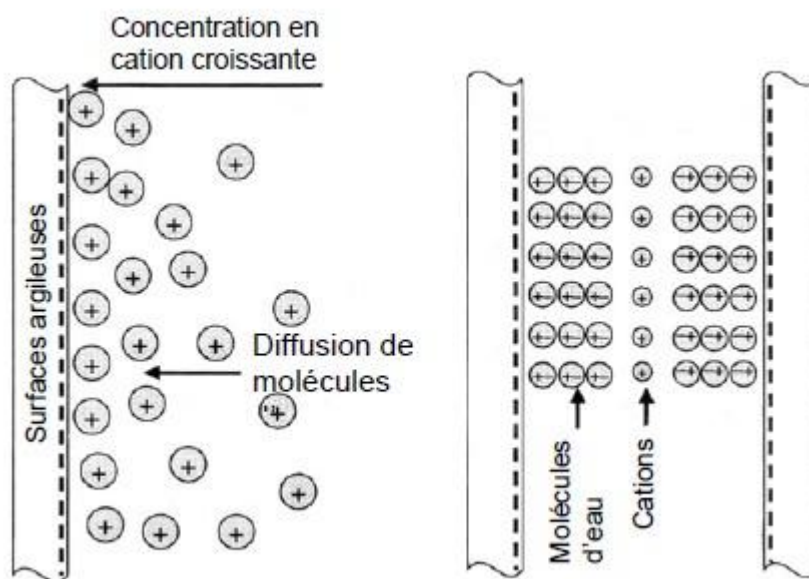


Figure 12 : Mécanisme d'adsorption de l'eau sur les surfaces argileuses : a) Attraction par osmose, b) Attraction dipolaire (Mitchell, 1993)

8. Le phénomène de gonflement :

Le phénomène de gonflement des particules argileuses dépend à la fois de leurs propriétés minéralogiques et de la composition de la solution d'hydratation. Il se manifeste lors de l'humidification, où le volume initial V_1 augmente pour atteindre un volume final V_2 supérieur à V_1 . Ce gonflement, résultant des propriétés électrochimiques des argiles, varie considérablement selon leur type. Les montmorillonites sont les plus sujettes au gonflement, suivies des illites, tandis que les kaolinites présentent un gonflement minime (6).

9. Les types de gonflement :

La littérature montre qu'on a deux types principaux de gonflement :

9.1 Le gonflement inter-foliaire :

L'hydratation des espaces entre les feuillets provoque une augmentation de leur taille (augmentation de la porosité entre les feuillets), ce qu'on appelle le gonflement cristallin (13).

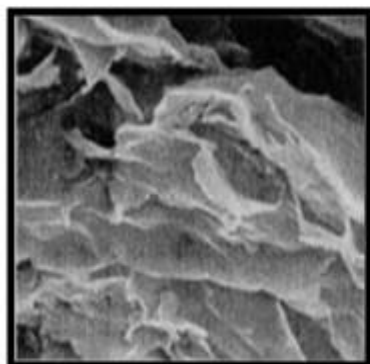
Lorsque de l'eau hydrate une éprouvette d'argile sèche, elle pénètre dans les espaces inter-foliaires et forme des couches monomoléculaires. L'eau interagit ensuite avec les feuillets et les cations présents. Cette hydratation crée une pression de disjonction, augmentant la distance entre les feuillets et provoquant leur gonflement. Ce phénomène se produit uniquement lorsque les liaisons entre les feuillets sont suffisamment faibles pour permettre l'infiltration de l'eau,

comme dans le cas de la montmorillonite. Le gonflement dépend de la nature des cations interfoliaires : la montmorillonite sodique (Na^+) gonfle davantage que la montmorillonite calcique (Ca^{2+}) (14).

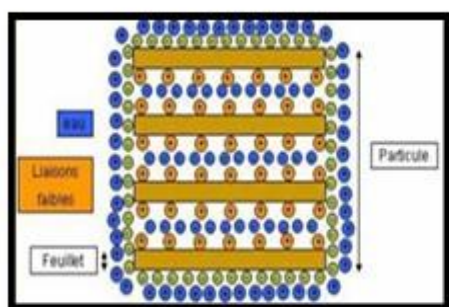
9.2 Le gonflement inter-particulaire :

Lorsque des couches d'eau pénètrent entre les feuillets des argiles, où des cations compensateurs sont présents, une hydratation de ces cations se produit au contact de l'eau. Ces cations hydratés augmentent de taille en s'entourant de molécules d'eau, et cette augmentation dépend de l'humidité, de la température et de la pression. L'augmentation de la taille des cations hydratés provoque une expansion de la distance inter-foliaire, ce qui affaiblit les liaisons entre les feuillets. Ce processus permet à d'autres molécules d'eau de s'immiscer entre les feuillets d'une même particule, augmentant encore davantage la distance inter-foliaire. Par conséquent, l'affaiblissement des liaisons et l'infiltration continue de l'eau entraînent un gonflement des argiles (15).

Gonflement inter foliaire



Montmorillonite



Gonflement inter particulaire



kaolinite

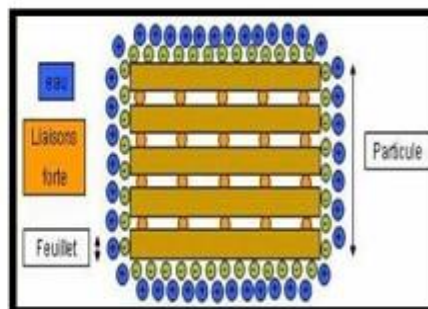


Figure 13 : Les types de gonflements.

9.3 Les étapes de gonflement :

Le gonflement est divisé en un gonflement primaire et un gonflement secondaire, la figure montre l'évolution relative de la hauteur de l'échantillon en fonction du logarithme du temps, avec deux phases de gonflement se distinguant (16) :

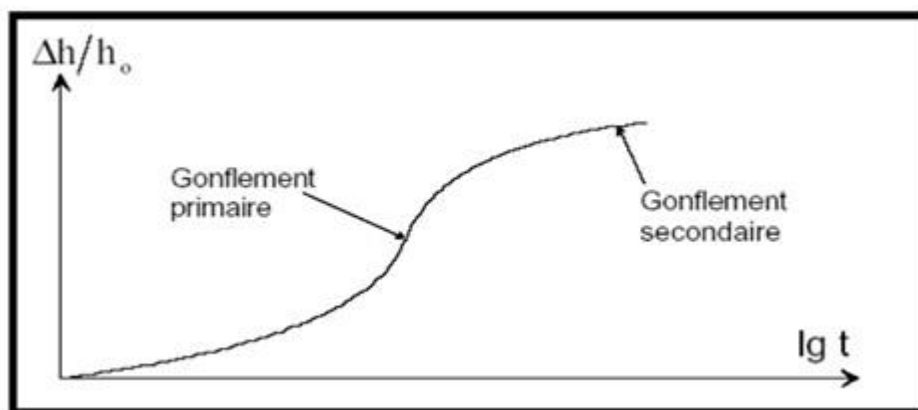


Figure 14: Courbe du gonflement en fonction du temps.

9.3.1 Le gonflement primaire :

Ce phénomène, qui commence très tôt, se termine par un point d'inflexion, marquant un changement dans la forme de la courbe (16).

9.3.2 Le gonflement secondaire :

Celui-là se manifeste par la portion linéaire de la courbe (16).

10. Les causes principales de gonflement :

Le gonflement est causé par quatre phénomènes principaux : l'hydratation par adsorption, l'hydratation par osmose, l'hydratation par capillarité et les transformations chimiques (17).

10.1 Hydratation par adsorption :

Les argiles sont principalement caractérisées par un déséquilibre électrique causé par une substitution isomorphe de cations dans la structure octaédrique des feuillets. Cela entraîne la formation d'une double couche diffuse en raison de la fixation des cations échangeables sur la surface des feuillets, sous l'effet des forces électrostatiques suivantes (18) :

10.1.1 Force d'attraction :

Généralement induites par les interactions des forces de Van der Waals entre les feuillets adjacents.

10.1.2 Force de répulsion :

Ayant plusieurs composantes (interaction des doubles couches associées aux deux.

10.2 Hydratation par osmose :

Quand une membrane semi-perméable idéale, qui permet uniquement le passage des molécules d'eau mais pas des solutés, sépare une solution saline de l'eau pure, l'eau pure a une propension à traverser la membrane pour diminuer la concentration de la solution. Ce processus est connu sous le nom d'osmose (18).

10.3 Hydratation par capillarité :

La capillarité est une propriété des matériaux non saturés à faible porosité. Elle se manifeste par une expansion de la phase liquide lors de la saturation et une contraction lors de la désaturation. Lorsque des matériaux fins sont saturés après une phase de drainage, l'air peut être piégé par l'eau à l'intérieur du réseau poreux, entraînant la compression de l'air. Ce mécanisme peut provoquer la dégradation ou la fragmentation des matériaux argileux. La capillarité dépend du phénomène d'adsorption, où le film d'eau adsorbé réduit l'espace poreux, modifiant ainsi la capillarité (17).

10.4 La transformation chimique :

Trois types de transformations chimiques se distinguent principalement :

10.4.1 La transformation de l'anhydrite en gypse :

La transformation de l'anhydrite (CaSO_4) en gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se produit sous des conditions spécifiques de pression, de température et de teneur en eau, entraînant une variation de volume spécifique (17).

10.4.2 L'oxydation de la pyrite (FeS_2) :

C'est le principal processus de décomposition chimique des roches sédimentaires à granulométrie fine. Cette oxydation conduit à la formation d'acide sulfurique, lequel réagit avec les carbonates de calcium. Cette réaction produit du sulfate et peut entraîner la formation de gypse, dont la cristallisation provoque l'éclatement du matériau argileux (18).

10.4.3 La dissolution des carbonates dans l'eau :

La dissolution des carbonates dans l'eau rend l'argilite de plus en plus sensible aux variations de son état hydrique. À long terme, cette dissolution augmente la ductilité des matériaux argileux (18).

11. Facteurs influençant le gonflement :

Le phénomène de gonflement est influencé par de nombreux facteurs, dont certains ont été étudiés par plusieurs auteurs. Cette section résume les principaux facteurs affectant le gonflement de l'argile (19):

11.1 Propriétés des sols :

- Minéralogie de l'argile.
- La chimie de l'eau du sol.
- La succion du sol.
- Plasticité.
- La structure et les tissus du sol.
- Densité sèche (19).

11.2 Conditions environnementales :

- Condition d'humidité initiale.
- Les variations d'humidité.
- Le climat.
- Eaux souterraines.
- Drainage et sources d'eau artificielle.
- Végétation.
- La perméabilité (19).

11.3 Conditions des contraintes :

- L'histoire des contraintes.
- Conditions in situ.
- Chargement.
- Profil du sol (19).

12. Impacte du gonflement sur les constructions :

Les ouvrages superficiels sujets au gonflement comprennent principalement les fondations et les murs de soutènement des bâtiments. Les maisons individuelles construites sans précautions sur des sols gonflants présentent des dégradations et des fissures au niveau des murs porteurs, des murs de remplissage, des routes et des fondations (radier, semelle superficielle ou filante, et pieux). Les ouvrages souterrains sont aussi menacés par le gonflement les dommages

affectent également les réseaux de drainage, qui peuvent subir des inversions de pente provoquant le débordement des drains, ce qui alimente le phénomène de gonflement (20).



Figure 15: Les fissurations causés par le gonflant.



Figure 16 : Le gonflement affecte la route.



Figure 17 : le gonflement à l'intérieur du tunnel.

13. Conclusion :

Cette section a été dédiée à la description des argiles en général, avec un accent particulier sur celles présentant un caractère gonflant. Nous avons abordé les différents types d'argiles et leurs liaisons structurelles. L'explication du phénomène de gonflement des argiles a permis de distinguer plusieurs formes de gonflement. Ce chapitre nous a offert une revue générale des connaissances disponibles dans la littérature sur l'argile et le phénomène de gonflement. En plus de la description générale des argiles, nous avons examiné les causes, les facteurs influençant ce phénomène et l'impact du gonflement sur les constructions civiles, soulignant ainsi les diverses formes et les conséquences du gonflement des argiles.

Chapitre II : La stabilisation des sols

Chapitre II : La stabilisation des sols

1. Introduction :

Le gonflement des sols argileux est un phénomène très complexe impliquant de nombreux paramètres intrinsèques et environnementaux. Plusieurs solutions ont été proposées pour résoudre ce problème, notamment diverses techniques de stabilisation. Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique regroupe et présente les techniques les plus connus dans le domaine de la stabilisation des sols gonflants.

2. Définition :

Malgré ses propriétés de résistance, le sol naturel, lorsqu'il est simplement compacté puis mis en œuvre et soumis aux conditions extérieures, reste très sensible aux variations de température et d'humidité. La stabilisation du sol vise principalement à réduire cette sensibilité aux variations de teneur en eau, empêchant ainsi le sol de se transformer en boue ou de s'effriter sous l'effet de l'humidité (21).

3. But de stabilisation :

- Diminuer le volume des espaces entre les particules solides (augmenter la compacité).
- Remplir les vides que l'on peut éliminer.
- Créer des liens et renforcer les liaisons existantes entre les particules (améliorer la résistance mécanique).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer la résistance mécanique et de réduire la sensibilité à l'eau (20).

4. Principe de la stabilisation des sols :

La stabilisation est le processus d'amélioration des propriétés des agrégats du sol en mélangeant des matériaux qui augmentent la capacité de charge, la fermeté et la résistance aux intempéries ou au déplacement. Elle consiste à modifier les propriétés du sol par des moyens mécaniques ou chimiques afin d'améliorer ses caractéristiques techniques. La stabilisation des sols a trois objectifs principaux : l'amélioration de la résistance, le contrôle de la perméabilité, et l'augmentation de la durabilité et de la résistance aux intempéries (22).

5. Les techniques de stabilisation utilisées :

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue :

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

Dans le tableau suivant, on donne les principaux avantages et inconvénients de chaque technique (21).

Tableau 4 : Avantages et Inconvénients des techniques des techniques de stabilisations couramment utilisées.

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

5.1 La stabilisation mécanique :

La stabilisation mécanique des sols inclut des procédés tels que le compactage, la substitution et la pré-humidification. Le compactage est la méthode la plus économique et aide à réduire le potentiel expansif du sol. Cependant, il nécessite une grande quantité d'eau et un compactage au-dessus de l'optimum avec une teneur en eau élevée. La substitution, qui consiste à remplacer une couche de sol par un autre matériau, est limitée par l'épaisseur de la couche et la disponibilité du matériau. La pré-humidification, qui vise à humidifier uniformément le sol avant le compactage, est contrainte par le temps nécessaire pour l'opération et la distribution uniforme de la teneur en eau.

5.1.1 Le compactage :

Le compactage est une étape cruciale de la stabilisation des sols. Un compactage simple permet de réduire la porosité du sol en expulsant l'air emprisonné. Les caractéristiques optimales de compactage sont déterminées par l'essai Proctor normal, qui mesure la teneur en eau optimale pour atteindre la densité sèche maximale du sol. Ces caractéristiques sont utilisées à la fois lors des études de stabilisation et sur le chantier (20).

Dans le cas des sols fins, un simple compactage ne suffit pas à garantir les caractéristiques optimales de la couche de forme. La cohésion de ces sols dépend principalement de la présence d'eau, un phénomène de tension superficielle reliant les particules du sol (20).

5.1.2 La substitution :

Cette méthode consiste à supprimer la couche de sol gonflant, ce qui est la solution la plus évidente. Cependant, si la couche est très épaisse, une suppression totale n'est pas envisageable. Il s'agit alors d'excaver jusqu'à une certaine profondeur, puis de remblayer avec du sable ou d'autres matériaux graveleux. Cette solution est néanmoins très coûteuse (20).

5.1.3 Le drainage :

C'est la technique la plus classique qui est mise en œuvre. Plusieurs procédés sont utilisés comme les tranchées drainant, drains de carton, drains de sables verticaux (20).

5.2 La stabilisation thermique :

La stabilisation thermique implique principalement l'augmentation de la température du sol. Ce procédé réduit la répulsion électrique entre les particules de sol, ce qui améliore la stabilité du sol. Toutefois, cette méthode est très coûteuse et peut ne pas être économiquement viable pour tous les projets.

5.3 La stabilisation chimique :

Les propriétés d'un sol peuvent être modifiées par l'ajout de certains additifs. Ces derniers sont classés en deux grandes familles (23) :

- Les hydrophobes.
- Les liants.

5.3.1 Les hydrophobes :

Les hydrophobes sont des produits dérivés d'amines issus de composés cationiques, tels que les amines aromatiques et les amines aliphatiques. Les caractéristiques des hydrophobes permettent de réguler les variations de la teneur en eau, rendant ainsi le sol insensible à l'eau, quelles que soient les conditions extérieures. L'absorption d'un produit hydrophobe entraîne deux effets principaux : une diminution temporaire ou définitive de l'affinité du sol pour l'eau, ce qui a pour conséquence d'accroître la résistance mécanique du sol et de réduire son gonflement, et une réduction de la structure microscopique du sol (20).

5.3.2 Les liants :

Les liants se divisent en deux grandes familles qui sont les liants hydrauliques et les liants organiques. Le schéma suivant donne les principaux liants existants dans l'industrie (24).

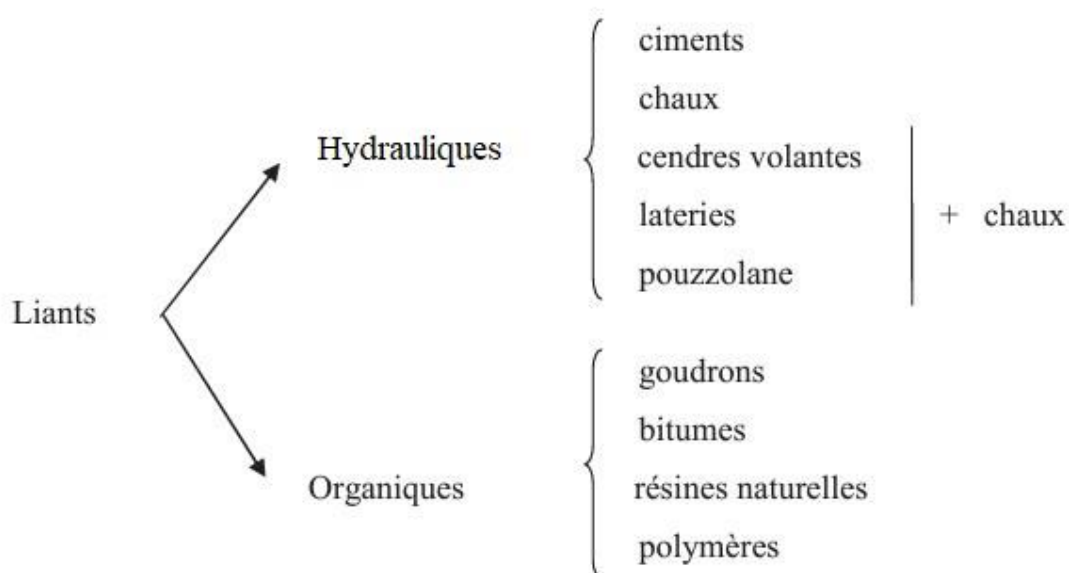


Figure 18 : Classification des liants.

5.3.2.1 Les liants hydrauliques :

Ce sont des produits d'origine minérale qui, par réaction avec l'eau, forment des réseaux cristallins enchevêtrés offrant une bonne cohésion et pouvant se lier au squelette minéral. Ils sont tous à base de chaux, laquelle réagit avec l'argile de la manière suivante (21) :

- Echange cationique.
- Flocculation et agglomération.
- Carbonations.
- Réaction pouzzolanique.

5.3.2.1.1 La chaux :

Elle a pour but de modifier les caractéristiques physiques du sol, en réduisant le pourcentage d'eau contenu dans un sol humide et en flocculant les argiles, ce qui provoque une réaction physico-chimique permettant de passer d'une structure plastique à une composition stable et grumeleuse. De plus, elle agit pour solubiliser la silice et l'alumine contenues dans l'argile, formant ainsi des silicates et aluminates de calcium. Le liant ainsi composé agglomère les composants du sol, augmentant sa dureté (21).

5.3.2.1.2 Le ciment :

Le ciment est généralement fabriqué en cuisant des mélanges de calcaire et d'argile à une température de 1450-1550°C. Ce processus produit des nodules durs appelés clinkers, qui sont ensuite finement broyés avec un peu de gypse pour produire le ciment Portland. Le traitement au ciment est particulièrement adapté aux sols peu plastiques qui répondent moins bien à la chaux, car le ciment rigidifie les sols plus rapidement et efficacement que la chaux, tout en offrant une meilleure résistance au gel. L'utilisation du ciment permet un développement rapide et durable des résistances mécaniques en liant les grains du sol (25). La norme NF-EN 197-1 subdivise le ciment en cinq types selon leur composition :

- Le ciment Portland (CEM I).
- Le ciment Portland composé (CEM II).
- Le ciment de haut-fourneau (CEM III).
- Le ciment pouzzolanique (CEM IV).
- Le ciment composé (CEM V).

5.3.2.1.3 Les cendres volantes :

Les cendres volantes sont une poudre très fine composée de particules sphériques de moins de 50 micromètres de diamètre, et sont couramment utilisées comme pouzzolanes dans l'industrie de la construction. Ces matières siliceuses et alumino-siliceuses forment des composés cimentaires lorsqu'elles sont mélangées à la chaux et à l'eau. L'addition de cendres volantes à l'argile réduit considérablement sa perméabilité. Selon le type de sol, un mélange de cendres volantes et de chaux peut être plus efficace que la chaux seule, agissant comme un liant hydraulique capable de durcir dans l'air et dans l'eau. Un bon dosage de cendres volantes peut augmenter les propriétés mécaniques du sol, notamment sa résistance au cisaillement, et stabiliser les argiles gonflantes en réduisant leur indice de plasticité et leur potentiel de gonflement tout en améliorant la texture (25).

5.3.2.2 Les liants organiques :

Ces produits de type colle, composés organiques offrant une bonne adhésion au squelette minéral, se divisent en deux catégories : les mono-composants, tels que les bitumes de pétrole, les goudrons et les brais de houille, qui sont thermoplastiques, et les bi-composants, qui nécessitent un mélange au moment de la mise en œuvre, produisant un effet intermédiaire entre le collage thermique des mono-polymères, des résines ou des dopes. Ces produits confèrent au sol des propriétés hydrophobes en enrobant les particules de sol avec le liant. Cependant, leur principal inconvénient est leur biodégradabilité sous des climats tropicaux (20).

5.4 La stabilisation par ajout des matériaux inertes :

Les matériaux inertes sont des substances qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique significative. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas, et ne produisent aucune réaction susceptible de polluer l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Parmi ces matériaux, on trouve le béton armé et non armé, les pierres, les briques, les carrelages, le verre, la faïence et les tuiles. En Europe, les entreprises de travaux publics valorisent ou réutilisent 63 % des déchets inertes générés (environ 93 % de leur production) dès la sortie du chantier. Dans le secteur du bâtiment, qui produit 75 % de déchets inertes, la valorisation à la sortie de chantier est moindre, atteignant 46 %, car les entreprises font souvent appel à des collecteurs de déchets. Une simple comparaison laisse imaginer la situation en Algérie (26).

Les déchets de verre, sous-produits de l'industrie verrière, sont abondants au niveau national en raison du grand nombre de verreries et des taux de rejets (verres non conformes ou cassés) qui représentent 10 à 15 % de leur production.

5.5 Stabilisation des argiles par ajout des déchets de verre :

Bien que des progrès significatifs aient été réalisés mondialement dans le recyclage de divers matériaux, le recyclage des déchets de verre a relativement stagné ces dernières années en raison de la complexité et des défis associés à son processus. Les principaux obstacles au recyclage du verre usagé incluent le bris des articles en verre provenant de diverses sources lors de la collecte et du transport, entraînant le mélange de verres de différentes couleurs et leur contamination par d'autres déchets. De plus, les diverses compositions chimiques des différents types de verre compliquent davantage leur recyclage. Ces difficultés ont empêché d'atteindre des taux de recyclage élevés pour le verre usagé, menant à son accumulation dans les décharges (27).

Le verre usagé ne se dégrade pas dans les décharges car il n'est pas biodégradable, ce qui entraîne une accumulation permanente et croissante, posant un risque important pour l'environnement et les écosystèmes. Bien que cette caractéristique soit indésirable pour l'élimination des déchets, elle devient avantageuse lorsque le verre est utilisé comme matériau de construction. En effet, le verre en poudre possède plusieurs propriétés favorables à la construction, telles que son faible capacité d'absorption d'eau, sa bonne résistance mécanique, son poids relativement léger, sa durabilité et sa maniabilité, en faisant un matériau idéal pour les applications de génie civil. Par conséquent, les déchets de verre ont été exploités dans diverses activités et études en génie civil (27).

6. Conclusion :

La stabilisation des sols est un élément crucial dans la construction d'infrastructures durables, et l'utilisation de la poudre de verre et des liants hydrauliques présente des avantages spécifiques à considérer. La poudre de verre offre des atouts indéniables, notamment sa recyclabilité à 100 % et ses propriétés mécaniques améliorées, notamment en tant qu'agent de consolidation par géo-polymérisation. Cependant, son processus de fusion requiert une certaine quantité d'énergie et son transport peut avoir un impact environnemental. Les liants hydrauliques, quant à eux, réagissent chimiquement avec le sol pour former un matériau plus résistant, mais leur fabrication peut entraîner des émissions de gaz à effet de serre et utiliser des ressources naturelles. Le choix entre ces deux approches dépend des priorités du projet, de la disponibilité des matériaux et des considérations environnementales. Il est crucial de trouver un équilibre entre performance technique et durabilité pour garantir la solidité et la respectabilité environnementale des infrastructures.

Chapitre III :

Généralités sur le

verre.

Chapitre III : Généralités sur le verre.

1. Introduction :

Dans un récent développement, les zones urbaines ont vu l'émergence de dispositifs de collecte dédiés aux déchets recyclables, comprenant notamment des conteneurs spécifiques pour le verre, le carton et le plastique. Cette évolution témoigne d'un changement significatif dans la mentalité citadine, mettant en lumière une prise de conscience croissante quant à l'importance de la collecte sélective des déchets. Dans le présent chapitre, nous nous pencherons sur le matériau verre, examinant en détail son rôle et son impact sur le plan écologique et environnemental.

2. L'histoire du verre :

Le verre a joué un rôle prépondérant dans l'histoire de l'humanité, remontant à l'ère préhistorique où les premiers hommes utilisaient l'obsidienne, un verre d'origine volcanique composé principalement de silice. Ses applications ont évolué au fil du temps, avec les premières traces de fabrication de verre remontant à environ 12000 ans avant J.-C., sous la forme d'émaux ornant des céramiques. Les techniques de production se sont perfectionnées au fil des siècles, avec l'élaboration de flacons par la méthode du noyau vers 1500 avant J.-C., suivie du développement du soufflage au premier siècle. L'innovation a continué avec la découverte, au XVIIe siècle en France, de la technique de fabrication du verre plat par coulée sur une table métallique, qui a été modernisée et automatisée par la suite, intégrant des processus tels que le laminage et le polissage (28).

Dans le domaine scientifique, jusqu'au XXe siècle, les recherches se sont principalement concentrées sur la composition du verre. Les avancées dans le domaine de l'optique ont notamment permis d'améliorer les propriétés du verre, telles que l'ajout d'oxyde de plomb pour augmenter l'indice de réfraction, ainsi que la diversification des compositions des verres optiques par l'incorporation d'oxyde de bore et de phosphore. L'intérêt pour la structure du verre a émergé plus tard, dans la seconde moitié du XXe siècle, stimulé par l'émergence de technologies modernes utilisant des verres, telles que les télécommunications par fibres optiques et la xérographie (28).

3. Définition du verre :

Dans le langage scientifique, le terme « verre » désigne un solide non cristallin formé par le refroidissement rapide d'un liquide surfondu. En revanche, dans le langage courant, « verre » se réfère à un matériau fragile et transparent (29).

Le verre est une substance amorphe constituée principalement de silice fondue à haute température, à laquelle sont ajoutés divers oxydes. En refroidissant, il devient rigide sans subir de cristallisation. Selon sa composition, le verre peut être translucide ou opaque (30).

Les applications du verre sont extrêmement diversifiées, allant de l'usage quotidien aux technologies de pointe. Parmi les exemples, on trouve les verres plats utilisés pour le vitrage, les verres coulés pour l'architecture, les verres creux comme les bouteilles, les verres d'optique tels que les lentilles et prismes, les verres au plomb utilisés pour le cristal et la protection contre les radiations, les verres photochimiques pour les protections solaires et les flashes d'appareils photo, les vitrocéramiques, les fibres optiques, ainsi que les verres au fluor (31). Les verres de silicate se distinguent par leur grande dureté et leur résistance mécanique élevée, résultant de la forte liaison atomique du réseau de silice et de leur faible ténacité. En raison de l'absence de plasticité, le verre est susceptible de se casser de manière fragile.

3.1 Définition opérationnelle du verre :

La définition traditionnelle du verre le décrit comme un solide formé par le refroidissement d'un liquide qui n'a pas cristallisé. Cette définition limite la notion de verre aux matériaux résultant du processus de trempe d'un liquide (32).

3.2 Définition structurale du verre :

La désignation du verre comme un solide non cristallin est souvent utilisée, ce qui suggère que les termes "solide amorphe" et "verre" sont interchangeables. Cependant, ces définitions ne capturent pas entièrement la complexité du concept. En effet, bien que le verre soit effectivement un solide non cristallin, tous les solides non cristallins ne peuvent pas être considérés comme du verre. Par exemple, les gels peuvent éventuellement se transformer en verre avec un traitement spécifique (32).

Dans ce travail, le terme verre fait référence au matériau verre, de point de vue structure.

4. La fabrication du verre :

Le processus de fabrication du verre peut utiliser soit des matières premières minérales vierges telles que la silice, soit du verre recyclé broyé, appelé calcin. Ce processus se déroule généralement en quatre étapes principales. Tout d'abord, les matières premières sont fondues, puis le verre en fusion est raffiné pour assurer son homogénéité. Ensuite, il est façonné selon les besoins, et enfin, il subit des processus d'anéantissement pour éliminer les tensions développées pendant le façonnage. Pour certains types de verre spécifiques, des étapes supplémentaires comme le durcissement et la décoloration peuvent être nécessaires. De nos jours, la plupart de ces étapes sont automatisées et réalisées par des machines (33).

Tableau 5: Composition (en % en masse) des verres industriels.

	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO
Verre plat	72,5	-	1,5	13	0,3	9,3	3
Verre à bouteilles	73	-	1	15	-	10	-
Pyrex	80,6	12,6	2,2	4,2	-	0,1	0,05
Fibre de verre	54,6	8,0	14,8	0,6	-	17,4	4,5

5. Les propriétés du verre :

Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant ses propriétés (34).

5.1 Les propriétés physiques :

- **La transparence :** Mais il peut être opaque ou opalescent.
- **La dureté :** Seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohême et le cristal est le plus tendre (34).
- **La densité :** Elle dépend des composants ; elle est d'environ 2,5. Cela signifie qu'un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2,5 kg (34).
- **La résistance et l'élasticité :** La rupture du verre est influencée par sa flexion et sa capacité à résister aux chocs. Il se brise là où le métal se plie. Par contraste, sa résistance à la compression est significative : il faut une pression de 10 tonnes pour fracturer un centimètre cube de verre (34).

5.2 Propriétés thermiques :

- **La dilatation :** Le verre est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se fracture en cas de variation brutale de température car ses diverses parties ne se réchauffent pas simultanément. Son coefficient de dilatation est bas, ce qui lui offre diverses applications, notamment comme isolant thermique, tel que dans la laine de verre. Ses coefficients de dilatation sont presque comparables à ceux de certains métaux, ce qui permet la réalisation de soudures verre-métal. Ce coefficient varie en fonction de la composition du verre (34).
- **La conductivité :** Le verre est un conducteur thermique médiocre, environ 500 fois moins efficace que le cuivre, ce qui en fait un choix populaire pour l'isolation électrique. Il agit également comme un bon isolant acoustique, en fonction de l'épaisseur du matériau. Cependant, cette propriété change à des températures élevées, car le verre devient conducteur à partir de 250°C (34).

5.3 Les propriétés chimiques :

- **L'action des acides :** Les acides décomposent la silice, le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué. Le verre peut donc être dissout (34).
- **L'action de l'eau :** L'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence (34).
- **L'action de l'air :** Les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenu dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre (34).

6. Résistance chimique et altération du verre :

Le verre industriel présente une bonne compatibilité avec la plupart des composés chimiques, cependant il est sensible à certains agents corrosifs tels que l'acide fluorhydrique (HF). Il n'est pas non plus insensible à l'action de l'eau ou de l'air. L'eau peut altérer plusieurs propriétés du verre, comme sa viscosité. L'un des phénomènes bien connus est la « propagation sous critique », où les fissures se propagent progressivement dans le verre sous contrainte en raison de réactions d'hydrolyse, pouvant éventuellement conduire à sa rupture à long terme. Il est à noter cependant que la sensibilité à l'altération varie selon la composition chimique du verre, ce qui explique la présence de verres non altérés vieux de plusieurs millions d'années (35).

7. Résistance mécanique : fragilité :

Dans la perception courante, le verre est souvent associé à la fragilité. Effectivement, les verres silicatés, comme la plupart des verres d'oxydes ou de chalcogénures, se montrent fragiles à température ambiante, c'est-à-dire qu'ils peuvent se briser sans subir de déformation permanente, contrairement à des matériaux ductiles comme le plomb, qui peuvent être déformés avant de se rompre. Cependant, il est possible de provoquer une déformation permanente du verre sous haute pression, un phénomène connu sous le nom de « densification », où le volume de la silice vitreuse peut être réduit jusqu'à 25 %. La fragilité des verres, et donc leur incapacité à se déformer plastiquement à température ambiante en dehors de conditions de haute pression, est due à leurs liaisons atomiques fortes, principalement covalentes ou ioniques. En général, on pourrait s'attendre à ce qu'un matériau doté de fortes énergies de liaison soit mécaniquement très résistant, car rompre ces liaisons nécessiterait une grande énergie mécanique (le diamant illustre ce concept). Toutefois, il est aujourd'hui établi qu'une simple rayure en surface peut initier une fissure et conduire à une rupture catastrophique, en raison d'un phénomène de concentration de contrainte. Comme il est pratiquement inévitable qu'un matériau dur comme le verre présente des défauts anguleux en surface, sa résistance mécanique est davantage déterminée par sa ténacité, c'est-à-dire sa capacité à résister à la propagation de ces défauts. La ténacité des verres d'oxyde est relativement faible (0,5-1,0 MPa), soit environ cent fois moins élevée que celle des métaux courants. Toutefois, la ténacité des verres silico-sodocalciques peut être considérablement améliorée par trempe thermique ou chimique. De nos jours, la plupart des écrans de smartphones et de tablettes tactiles sont fabriqués à partir de verres fins trempés chimiquement pour renforcer leur résistance (36).

8. Structure des verres :

Dans tous les solides, y compris les verres, l'agencement des éléments constitutifs détermine leur structure. Il est essentiel de comprendre la structure des verres pour en appréhender ou en prévoir les propriétés. Nous commencerons par présenter un ensemble de données définissant les structures des verres d'oxydes. La silice (SiO_2) a pour élément structural de base un tétraèdre composé de quatre anions O^{2-} entourant un cation Si^{4+} au centre. Par définition, chaque liaison entre deux tétraèdres SiO_4 est formée par un atome d'oxygène, appelé oxygène pontant dans cette configuration (37).

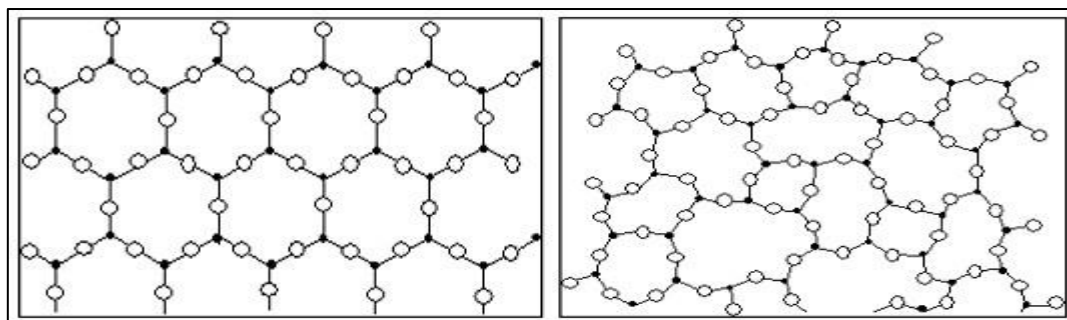


Figure 19 : Représentation schématique réseaux de silice (silice cristallisée - à gauche) et (silice vitreuse - à droite).

9. Les familles des verres :

9.1 Les verres sodocalciques :

La famille de verres la plus couramment utilisée est celle des verres sodocalciques, représentant actuellement plus de 90 % de la production mondiale. Le verre sodocalcique est généralement composé de 71 à 75 % de dioxyde de silicium (SiO_2), principalement extrait du sable, de 12 à 16 % d'oxyde de sodium (Na_2O), présent dans le carbonate de sodium (Na_2CO_3), et de 10 à 15 % d'oxyde de calcium (CaO), issu du calcaire (CaCO_3). De petites quantités d'autres composants sont ajoutés pour conférer des propriétés spécifiques au verre. Dans certaines compositions, une partie de l'oxyde de calcium ou de l'oxyde de sodium est remplacée par de l'oxyde de magnésium (MgO) ou de l'oxyde de potassium (K_2O) (38).

9.2 Les verres borosilicates :

Le verre au borosilicate contient du trioxyde de bore (B_2O_3) ainsi qu'un pourcentage élevé de dioxyde de silice (SiO_2). Sa composition habituelle comprend entre 70 % et 80 % de SiO_2 , de 7 % à 15 % de B_2O_3 , de 4 % à 8 % de Na_2O ou K_2O , et de 2 % à 7 % d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). Les verres de cette composition présentent une haute résistance à la corrosion chimique, un faible coefficient de dilatation, ce qui leur confère une grande résistance aux chocs thermiques, et de bonnes caractéristiques électriques. Parmi les applications de ce type de verre, on trouve les composants de procédés chimiques, les équipements de laboratoire, les récipients pharmaceutiques, l'éclairage, les ustensiles de cuisson, les portes de fours et les plaques de cuisson (38).

9.3 Le verre de silice :

Le verre de silice est obtenu par fusion de quartz ou de sable très pur, sans ajout de fondant, et contient au moins 96 % de silice. Ce type de verre offre des qualités exceptionnelles, notamment une grande résistance aux chocs thermiques, une transparence élevée aux rayonnements et une inertie chimique remarquable. Cependant, sa fabrication est particulièrement difficile en raison de la température de fusion extrêmement élevée (1710 °C) et de la viscosité très élevée du liquide à cette température (105 Pas) (38).

9.4 Verres spéciaux :

Il s'agit d'une catégorie extrêmement diversifiée, comprenant des produits à faible volume de production et à haute valeur ajoutée, dont la composition varie énormément, en fonction des propriétés requises. Parmi les applications figurent des produits spécifiques au borosilicate, des verres pour produits optiques, pour l'électronique, les tubes cathodiques, le verre de silice, le verre scellé, les tubes pour rayons X, le verre pour soudure, le verre fritté, les électrodes et la vitrocéramique (38).

Tableau 6 : Verres listés par catégorie, domaine de composition et applications.

Catégorie	Domaine typique de composition	Applications
Verre Sodocalcique	SiO ₂ , CaO, Na ₂ O	Vitrage, Bouteilles Flaconnage, Gobeletterie
Verre de Borosilicate	SiO ₂ , B ₂ O ₃ , Na ₂ O	Pharmacie, culinaire, laboratoire
Verre d'alumino-silicate	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO, B ₂ O ₃	Fibre de renforcement
Verre au plomb	SiO ₂ , PbO, K ₂ O	Verrerie d'art Flaconnage de luxe Ecrans de protection
Verre de Silice	SiO ₂	Fibre optique
Verre à base de zircon	SiO ₂ , ZrO ₂ , Na ₂ O	Renforcement du ciment
Bio-verres	Na ₂ O, CaO, SiO ₂ , P ₂ O ₅	médicales
Verre fluorés	ZrF ₄ combiné à d'autres fluorures	Fibre optique de courtes distances
Vitrocéramique	Li ₂ O, Al ₂ O ₃ , SiO ₂	Culinaires, optiques

10. La poudre de verre :

La poudre de verre, de couleur blanche, constitue un ajout cimentaire alternatif. Elle est produite par la collecte et le broyage des fragments de verre coloré. Grâce à sa haute teneur en silice amorphe (SiO_2), elle possède des propriétés pouzzolaniques, se combinant avec la chaux pour former d'autres hydrates (39).

10.1 Valorisation de la poudre de verre :

Des recherches récentes aux États-Unis et au Royaume-Uni ont exploré des méthodes pour éliminer le verre recyclé et l'utiliser comme matériau de construction en béton, le rendant potentiellement "adapté à l'usage". Les premières études menées dans les années 1960, 1970 et 1980 sur la réaction de la silice alcaline avec l'agrégat de verre ont abouti à des conclusions définitives. En parallèle à ces avancées scientifiques, les modifications de la législation environnementale encouragent l'utilisation de granulats secondaires dans le béton. De plus, les déchets de verre sont désormais disponibles en plus grandes quantités, provenant de conteneurs en fin de vie (39).

11. Conclusion :

Le verre, avec ses propriétés uniques, a joué un rôle essentiel dans l'histoire de l'humanité. De la verrerie artisanale aux technologies de pointe, le verre est omniprésent dans notre vie quotidienne. Sa résistance mécanique, sa transparence, sa conductivité électrique et sa résistance à la corrosion en font un matériau polyvalent. La poudre de verre, en tant qu'additif cimentaire alternatif, offre des opportunités intéressantes dans la construction civile. Sa haute teneur en silice amorphe lui confère des propriétés pouzzolaniques, ce qui en fait un choix prometteur pour la stabilisation des sols. Cependant, il est crucial de prendre en compte l'impact environnemental, notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de consommation d'énergie. En somme, la poudre de verre offre des solutions durables pour la construction, mais leur utilisation doit être guidée par des principes de durabilité et d'efficacité énergétique

Chapitre IV : étude expérimentale.

Chapitre IV : étude expérimentale.

1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'identification de matériau étudié et les protocoles expérimentaux des expériences effectuées. Les analyses chimique et physique du matériau ont été réalisées par le laboratoire nationale de l'habitation et construction. Les essais mécaniques ont été réalisées au sien des laboratoires du département de génie civil et le laboratoire de géotechnique minière pour un sol prélevé dans la zone de DOUKANE située à la wilaya de TEBESSA.

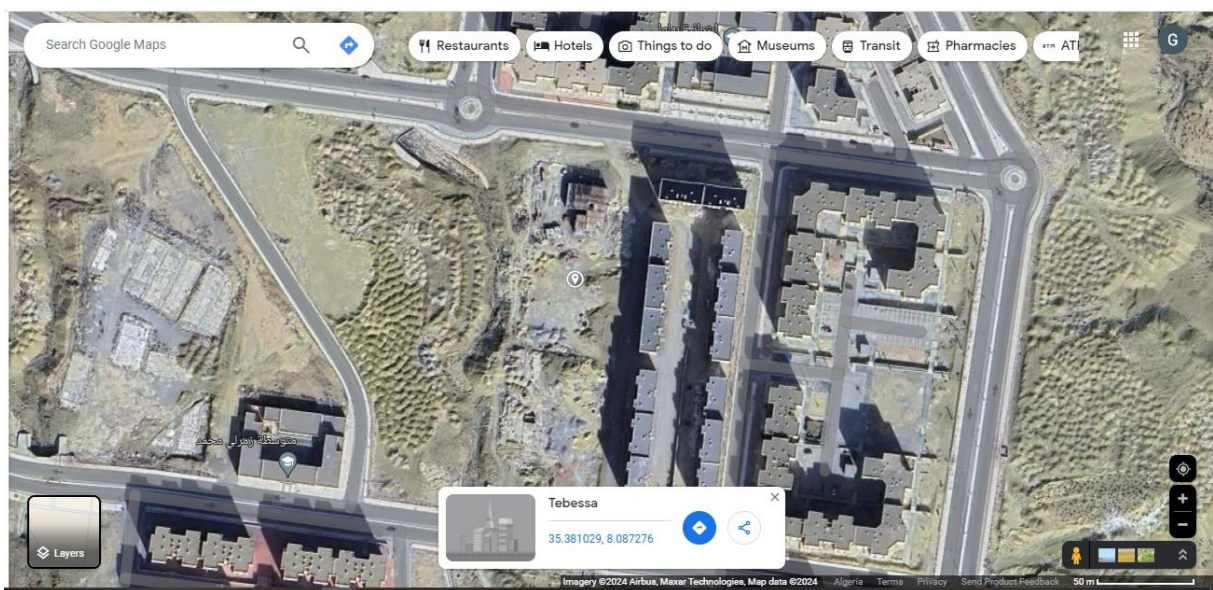


Figure 20 : Site de prélèvement par satellite (35.380889, 8.087147).



Figure 21: site de projet.

2. DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL :

2.1 Prélèvement du sol :

Les prélèvements des argiles ont été effectués le jeudi 07 mars 2024 d'un site consacré à la réalisation de 2440 logements. Sur une profondeur de 1,50 m environ. Par une pelle mécanique.

Nous avons basé notre étude sur celle réalisée par le (LNHC) afin de connaître les caractéristiques naturelles du sol (40).

- Contexte géologique : Argile verte d'aspect schisteux gypseuse.
- Densité sèche γ_d : 1,53.
- Densité humide γ_h : 1,90.
- Teneur en eau : 18%.
- Degré de saturation SR : 72,89%
- Pression de gonflement $P_g=1,00$ bar (Sol très gonflent).
- Le sol est d'agressivité très forte vis-à-vis le béton de construction.

Tableau 7: Analyse chimique du sol (40)

Sondage	Sulfates SO4 (%)	Carbonates CaCO3 (%)	Chlorures Cl (%)
01	0,92	41	0,18
02	3,68	7	0,18



Figure 22 : prélèvement des échantillons.

2.2 Stockage :

Le matériau une fois réceptionnés au niveau du laboratoire, a été mis dans des sacs en plastique. Il n'a pas subi ni pré-dessiccation ni conditionnement.

2.3 Préparation des échantillons :

Le matériau est préparé de manière à ne pas altérer ses caractéristiques initiales. Après le prélèvement du sol, des échantillons ont été séchés dans une étuve à une température de 50°C pendant 24 heures. Par la suite, ils ont été concassés par la machine de Los Angelo et tamisés.



Figure 23: Etuve réglable (50°C-105°C)

2.4 Préparation de la poudre de verre :

Le verre utilisé est le déchet d'un atelier de verrerie. C'est le verre utilisé pour la fabrication des fenêtres simples des maisons (float sodocalcique). Ce type de verre est composé principalement de silice (SiO_2) et contient des proportions de soude (Na_2O) et de chaux (CaO).

Au début, nous avons lavé les grands morceaux de verre et les avons nettoyés à l'eau. Après séchage des morceaux, nous les avons cassés à l'aide d'un petit marteau, puis nous les avons broyés avec la machine de Los Angeles. Enfin, nous avons tamisé le verre broyé avec un tamis de 2 mm de diamètre.



Figure 24: Le matérielle utilisé.



Figure 25 : La machine LOS ANGELES



Figure 26: Le verre broyer avant tamisage.



Figure 27 : La poudre de verre.

2.5 Méthode de traitement :

Tout d'abord, nous avons identifié les caractéristiques du sol : l'optimum Proctor (ω_{opt} , γ_{dmax}), le CBR immédiat, la cohésion (C), l'angle de frottement (ϕ), et les paramètres œdométriques. Généralement l'utilisation d'un pourcentage faible de 2 à 10% est utilisé dans le cas des ajoutes de ciment, de la chaux etc. Ainsi nous avons ajouté de la poudre de verre en proportions respectives de 5 %, 7 %, et 10 % par rapport à la masse du sol tout en maintenant une teneur en eau constante pour tous les mélanges (ω_{opt}). Le mélange qui produira la meilleure densité sèche (γ_d) sera retenu pour l'identification des autres caractéristiques, afin d'évaluer s'il y a une amélioration ou une dégradation des propriétés du sol.

3. Essai réaliser :

3.1 Essai Proctor :

Essai proctor normale (NF P 94-093) :

3.1.1 But d'essai :

Déterminer au laboratoire les conditions de compactage d'un sol donné en fonction de la teneur en eau et l'énergie de compactage. A une énergie de compactage donnée, il s'agit de déterminer la teneur en eau optimale (W_{opt}) et la densité maximale ($\gamma_d \text{ max}$) proctor correspondantes.

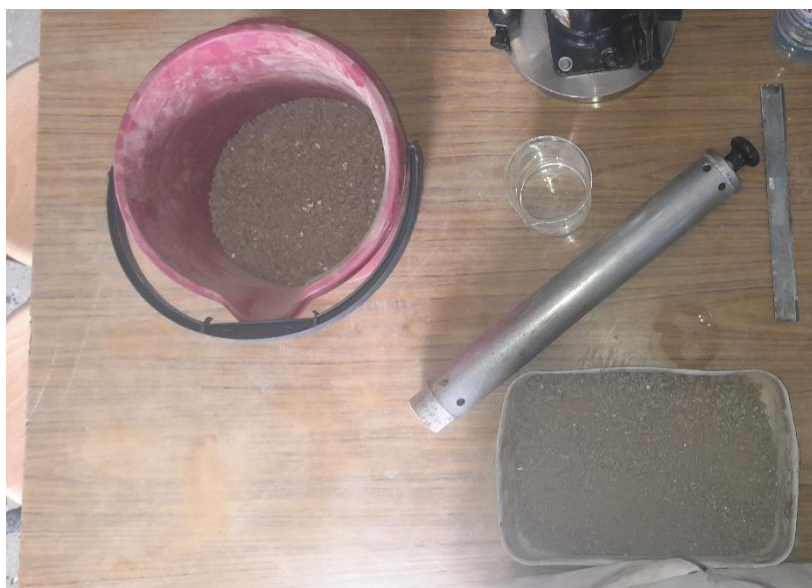


Figure 28 : préparation d'échantillon.

3.1.2 Appareillage :

- Moule de proctor normaliser.
- Compacteur automatique programmer selon la norme.
- Damme de compactage normaliser.
- Quelques bacs de contenance 25kg environ.
- 02 tamis de 20mm et 5mm respectivement.
- Pelle à main, spatules, balayettes, pinceaux, règle a raser.
- Quelques bacs de contenance 10kg et 5kg environ pour la préparation du matériau à compacter.
- Eprouvettes graduées pour la mesure de la quantité d'eau d'humidification.
- Une balance de portée maximale au moins égale à 30kg précise à 5g.
- Une balance de précision d'une portée maximale de 1000g au moins (précision de 0,1g).
- Une étuve ventilée réglable (50°C, 105°C).
- Une burette à huile pour le graissage des parois du moule.
- Papier filtre correspondant aux côtés des deux types de moules.
- Couteau, maillet, burin, marteau.
- Extracteur.



Figure 29 : Appareillages d'essai.

3.1.3 Mode opératoire :

- Prendre 2.0 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.
- Fixer la hausse sur le moule. Lubrifier l'intérieur du moule et celui de la hausse.
- 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)
- Compacter chaque couche à l'aide de dame de compactage en 25 coups. S'arranger pour que le compactage soit uniforme.
- 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.
- Enlever la base du moule.
- Arrêter l'essai quand on obtient par deux fois consécutives une diminution du poids total humide par rapport à l'essai précédent.

3.1.4 Expression des résultats :

3.1.4.1 Sol non traité :

Tableau 8: Les résultats de densité sèche a différentes teneurs en eau.

La teneur en eau ω (%)	Densité sèche γ_d (g/cm ³)
10	1,51
12	1,56
14	1,64
16	1,69
18	1,64
20	1,58

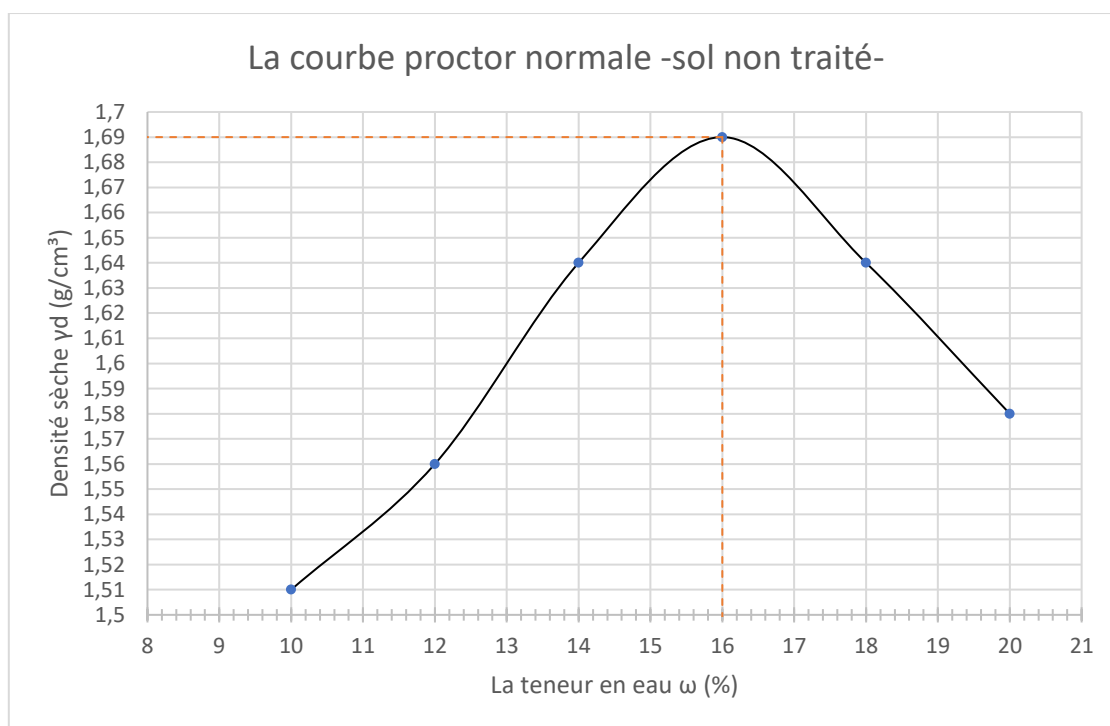


Figure 30 : La courbe proctore pour le sol non traité.

On trouve que :

Tableau 9: L'optimum de proctor déterminé (ω_{opt} ; γ_{dmax})

La teneur en eau optimale ω_{opt} (%)	16
La densité sèche maximum γ_{dmax} (g/cm ³)	1,69

3.1.4.2 Sol traité :

Après la détermination de l'optimum de proctor on ajoute la poudre de verre en différentes proportions (05% ;07% ;10%) et on laisse la teneur en eau ω constante (16%).

Tableau 10 : Les résultat de l'ajout de la poudre de verre.

La teneur en verre (%)	05%	07%	10%
La densité sèche maximum $\gamma_{d \max}$ (g/cm ³)	1,73	1,70	1,66

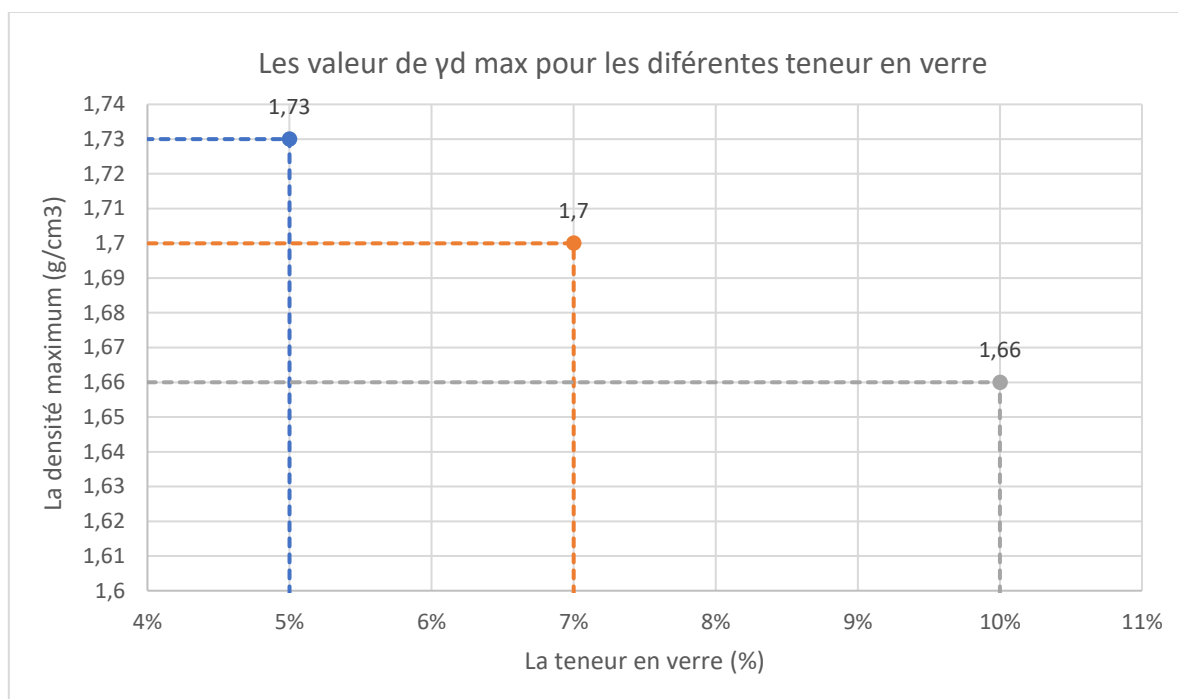


Figure 31 : Les valeur de γ_d max pour les différentes teneur en verre.

3.1.4.3 Conclusion :

Après avoir examiné les résultats de l'essai proctor, nous constatons un changement dans la densité sèche du sol γ_d . La densité augmente avec l'ajout de 5 % et 7 % de poudre de verre, mais diminue lorsque la proportion atteint 10 %. Étant donné que la densité sèche maximale a été obtenue avec 5 % de poudre de verre, nous avons décidé de poursuivre les autres essais en utilisant ce mélange.

3.2 Essai CBR :

Essai cbr (Californian bearing ratio) NF P94-078.

3.2.1 But d'essai :

Déterminer un indice, appelé l'indice CBR, permet de calculer à l'aide d'abaques l'épaisseur nécessaire du corps de chaussée d'une route. Ce calcul tient compte du sol sous-jacent, du trafic et des charges par essieu prévus, ainsi que des conditions hydriques futures auxquelles la route sera soumise. L'indice CBR exprime en pourcentage le rapport entre les pressions produisant, dans le même laps de temps, un enfoncement donné dans le sol étudié et dans un matériau de référence. Par définition cet indice est pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$\text{➤ } I.CBR_{25} = \frac{\text{Force (KN) à 2.5 mm d'enfoncement}}{13.35 \text{ (KN)}} \times 100$$

$$\text{➤ } I.CBR_{50} = \frac{\text{Force (KN) à 5 mm d'enfoncement}}{20 \text{ (KN)}} \times 100$$

$$\text{➤ } I.CBR = \max (I.CBR_{25} ; I.CBR_{50})$$

On distingue 2 types d'essais CBR en fonction des buts fixés :

L'essai C.B.R. immédiat :

Sert à mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à sa teneur en eau naturelle, caractérisant ainsi l'aptitude du sol à supporter la circulation pendant les phases de chantier. Dans les régions peu humides, le C.B.R. immédiat est utilisé directement comme référence, car il n'y a pas de variation hydrique.

L'essai C.B.R. après imbibition :

Sert à mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à différentes teneurs en eau, puis immergé pendant plusieurs jours (généralement 4). Cet essai permet de caractériser l'évolution de la portance d'un sol compacté en fonction de différentes teneurs en eau et des variations de régime hydrique.

3.2.2 Appareillage (CBR immédiat) :

- Le même appareillage d'essai proctor.
- Compateur ou capteur de déplacement (précision $\pm 1/100^{\text{e}}$ mm).
- Poinçonneuse CBR.
- Disque de papier filtre.



Figure 32 : Poinçonneuse CBR.

3.2.3 Mode opératoire :

Le compactage doit être réalisé selon les conditions de l'essai Proctor normal ou modifié. Il est donc nécessaire de réaliser au préalable l'essai Proctor modifié afin de déterminer la teneur en eau optimale et la densité sèche apparente maximale. Le matériau est séché et pulvérisé en brisant les mottes, tout en veillant à ne pas casser les pierres et graviers éventuels. Un écrêtage est effectué pour éliminer les grains supérieurs à 20 mm (tamisage) et les remplacer par une même masse d'éléments compris entre 5 et 20 mm, si nécessaire. On ajoute la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une teneur en eau égale à ω_{optm} , on malaxe le matériau humidifié de manière homogène et on le place dans le moule CBR prolongé à sa partie supérieure par une hausse. On compacte et arase le matériau conformément aux conditions de l'essai Proctor. Après compactage et arasage du matériau, le moule est retourné pour fixer sur la plaque de base l'extrémité qui était en haut, en mettant une feuille de papier filtre.

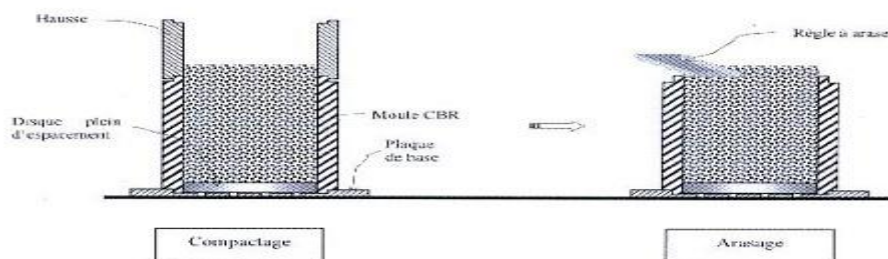


Figure 33 : la démarche d'essai CBR.

3.2.3.1 Le poinçonnement :

On utilise une presse équipée d'un piston de poinçonnement de 4,96 cm de diamètre (section de 19,3 cm²), dotée d'un contrôleur de cadence et d'un comparateur permettant de mesurer les enfoncements au 1/100ème de millimètre près. L'échantillon est placé sur le plateau, bien centré sous le piston de poinçonnement. Les charges annulaires sont remises en place, laissant le passage au piston de poinçonnement à travers leur trou central. La tige est amenée au contact du sol et, lorsque l'aiguille dynamométrique de la presse commence à bouger, le mouvement est arrêté et le comparateur est mis à zéro. La presse est ensuite actionnée à une vitesse constante d'enfoncement de 1,27 mm/min, le mouvement étant réglé soit automatiquement, soit en suivant le cadence mètre de la machine.

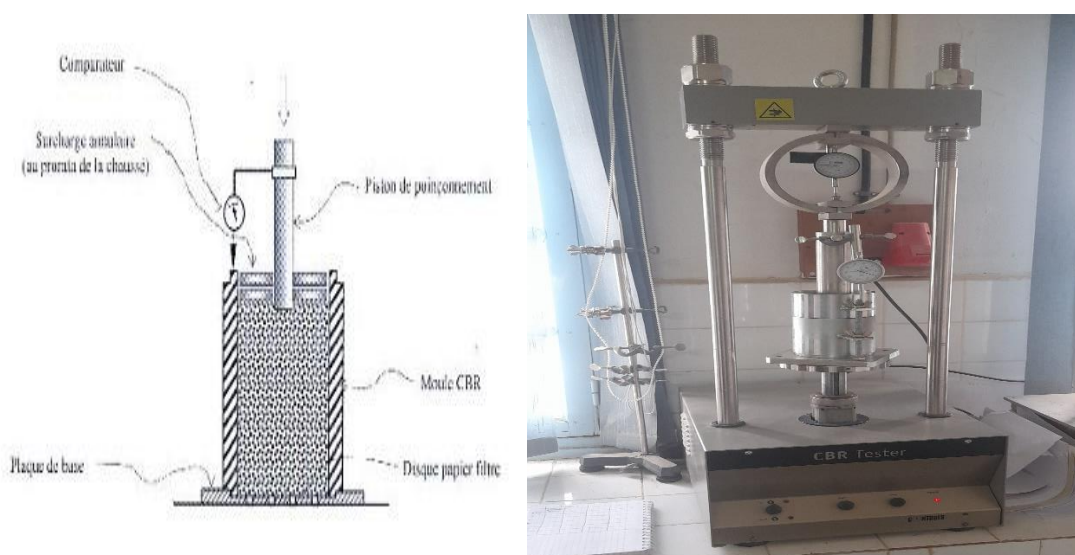


Figure 34 : l'assemblage de l'essai.

3.2.4 Expression des résultats :

3.2.4.1 Sol non traité :

Tableau 11 : résultat de l'essai pour le sol non traité.

Enfoncement (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5	10
La force appliqué (N)	28	110	141	279	363	403
Contrainte poinçonnement (Kpa)	0,5833	2,2916	2,9374	5,8262	7,6059	8,4533

Tableau 12 : les résultats de l'indice CBR pour le sol non traité.

ICBR (25)	22,0029963
ICBR (50)	29,131
ICBR : max (ICBR (25) ; ICBR (50))	29,131

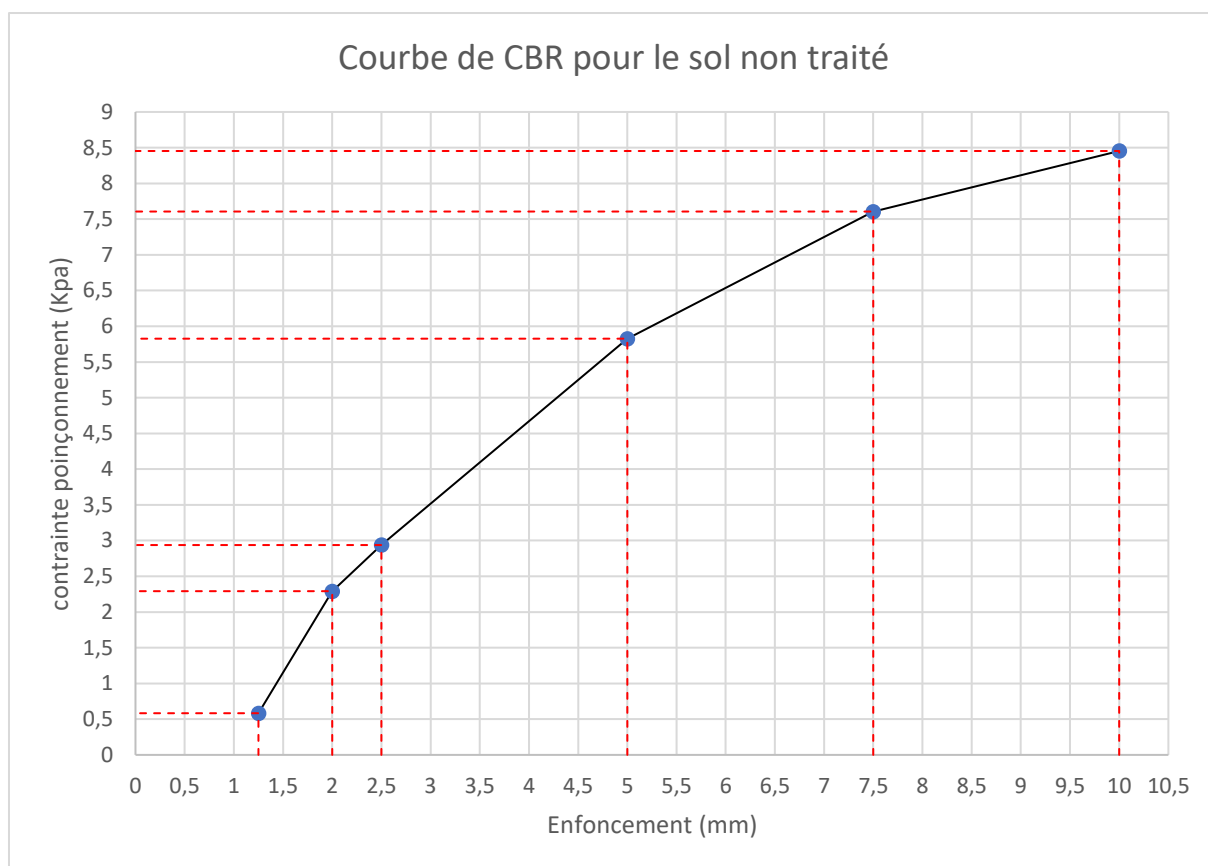


Figure 35 : les résultats de CBR sous forme de graphe.

3.2.4.2 Sol traité :

Tableau 13 : résultat de l'essai pour le sol traité.

Enfoncement (mm)	1,25	2	2,5	5	7,5	10
La force appliquer (N)	98	255	289	335	364	-
Contrainte poinçonnement (Kpa)	2,0416	5,3177	6,0381	7,0127	7,6271	-

Tableau 14 : les résultats de l'indice CBR pour le sol traité.

ICBR (25)	45,2292135
ICBR (50)	35,0635
ICBR max (ICBR (25) ; ICBR (50))	45,2292135

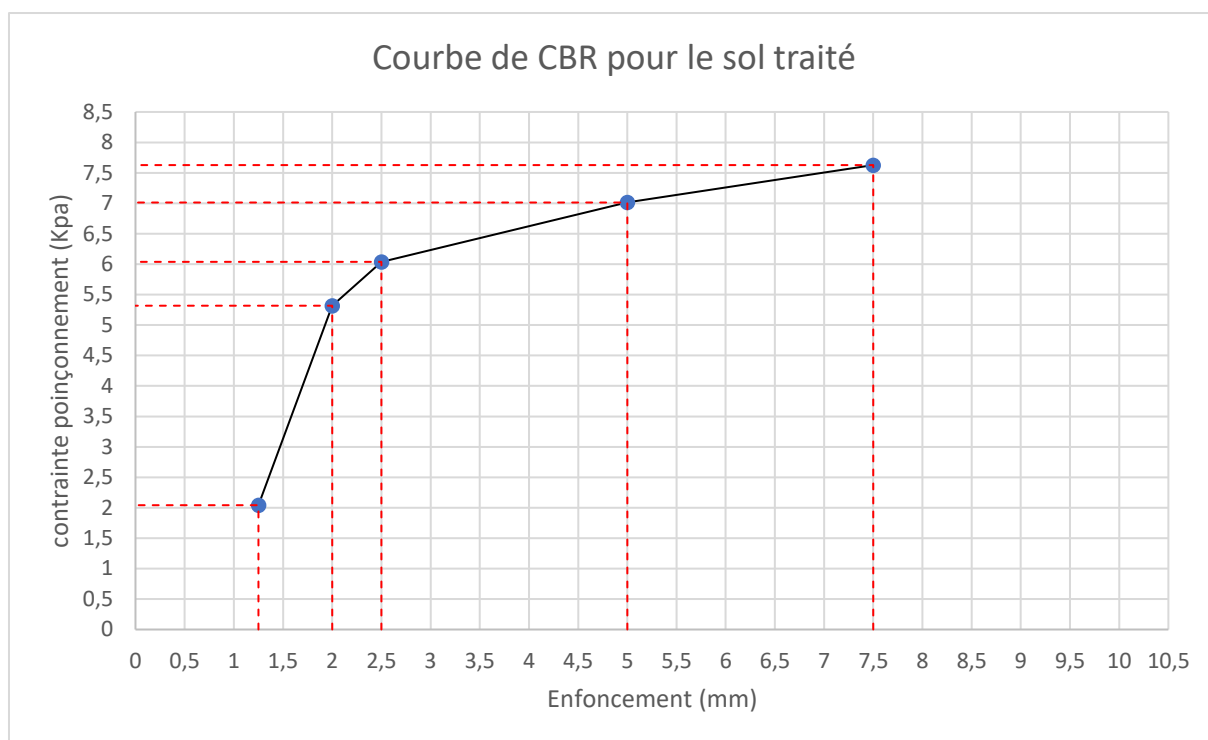


Figure 36 : les résultats de CBR sous forme de graphe pour le sol traité.



Figure 37 : l'échantillon à la fin d'essai

3.2.5 Conclusion :

Pour le sol non traité, la force appliquée augmente avec l'enfoncement, comme attendu, et la contrainte de poinçonnement suit également cette tendance. L'indice CBR (California Bearing Ratio) est 29,131 le sol non traité. En revanche, pour le sol traité, la force appliquée et la contrainte de poinçonnement sont plus élevées que celles du sol non traité. L'indice CBR du sol traité est 45,226. En conclusion, le sol traité présente une meilleure résistance au poinçonnement que le sol non traité, et l'indice CBR élevé pour les deux types de sols indique une bonne capacité portante.

3.3 Essai de cisaillement :

Cisaillement direct (la boîte de casagrande) (NF P 94-71) :

3.3.1 But de l'essai :

Les valeurs de la résistance au cisaillement ainsi définies sont portées sur un graphe appelé droite de coulomb (intrinsèque), en fonction de la contrainte normale s'appliquant sur le plan de rupture à partir de cette courbe on tire la cohésion du sol (C) et l'angle de frottement (ϕ).

Deux grandes catégories de sols

- Sol pulvérulent la droite de coulomb passe par l'origine c'est-à-dire la cohésion est nul $C=0$.
- Sol cohérent : l'eau joue un rôle fondamental dans la résistance au cisaillement des sols cohérent pour simplifier le problème trois types d'essai peuvent être définie suivant qu'il y a drainage ou non ; la consolidation consiste à charger l'échantillon en drainant jusqu'à ce que la pression interstitielle soit totalement dissipée ($u=0$).

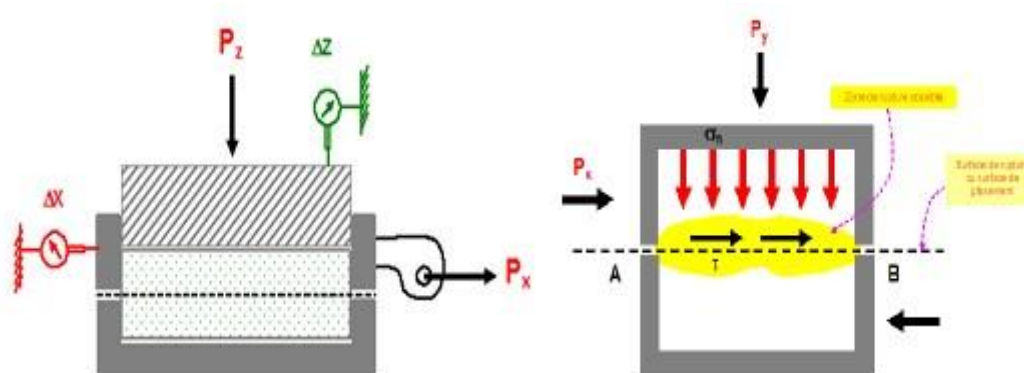


Figure 38 : Schéma de la boîte de casagrande.

3.3.2 Appareillage :

- Machine de cisaillement.
- La boîte de casagrande.
- Trousse coupante, marteau,
- Une série de poids.



Figure 39 : La machine de cisaillement.

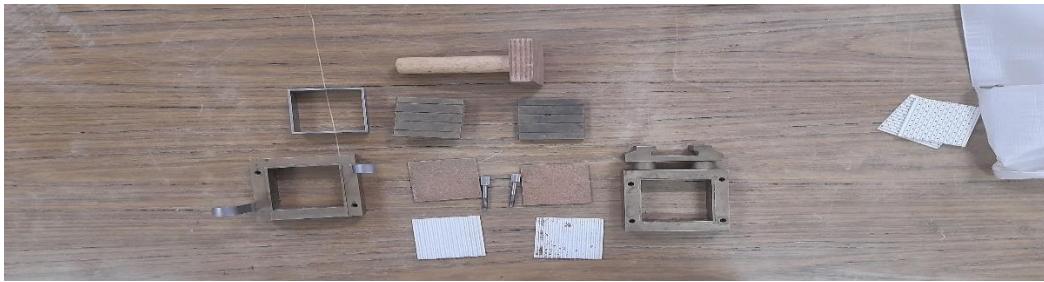


Figure 40 : La boîte de casagrande.



Figure 41 : Assemblage boîte + échantillon.

3.3.3 Mode opératoire :

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de demi boîte indépendante le plan de séparation des deux demi boîte consiste un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. Il consiste à appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort normal de compression N par l'intermédiaire d'un piston et un effort tranchant en déplaçant la demi-boîte inférieure. Un comparateur mesure le déplacement relatif de l'échantillon.



Figure 42 : un échantillon après cisaillement.

3.3.4 Expression des résultats :

3.3.4.1 Sol non traité :

Tableau 15 : les résultats d'essai pour le sol non traité.

CONDITIONS INITIALES	Éprouvette 1	Éprouvette 2	Éprouvette 3
Longueur (mm)	60,0	60,0	60,0
Largeur (mm)	60,0	60,0	60,0
Section (mm ²)	3600,0	3600,0	3600,0
Teneur en eau (initiale) (%)	16	16	16
Densité volumique (g/m ³)	2,014	2,014	2,014
Densité sèche (g/m ³)	1,69	1,69	1,69
CISAILLEMENT			
Vitesse de cisaillement (mm/min)	1,000000	1,000000	1,000000
Résultats au pic			
Contrainte normale (kPa)	49	98	196
Contrainte cisaillement (kPa)	50	141	172
Déplacement horizontal (mm)	1,00	1,75	2,50
Résultats à l'état ultime			
Cohésion (kPa)	34,0		
Angle de frottement (°)	37,2		

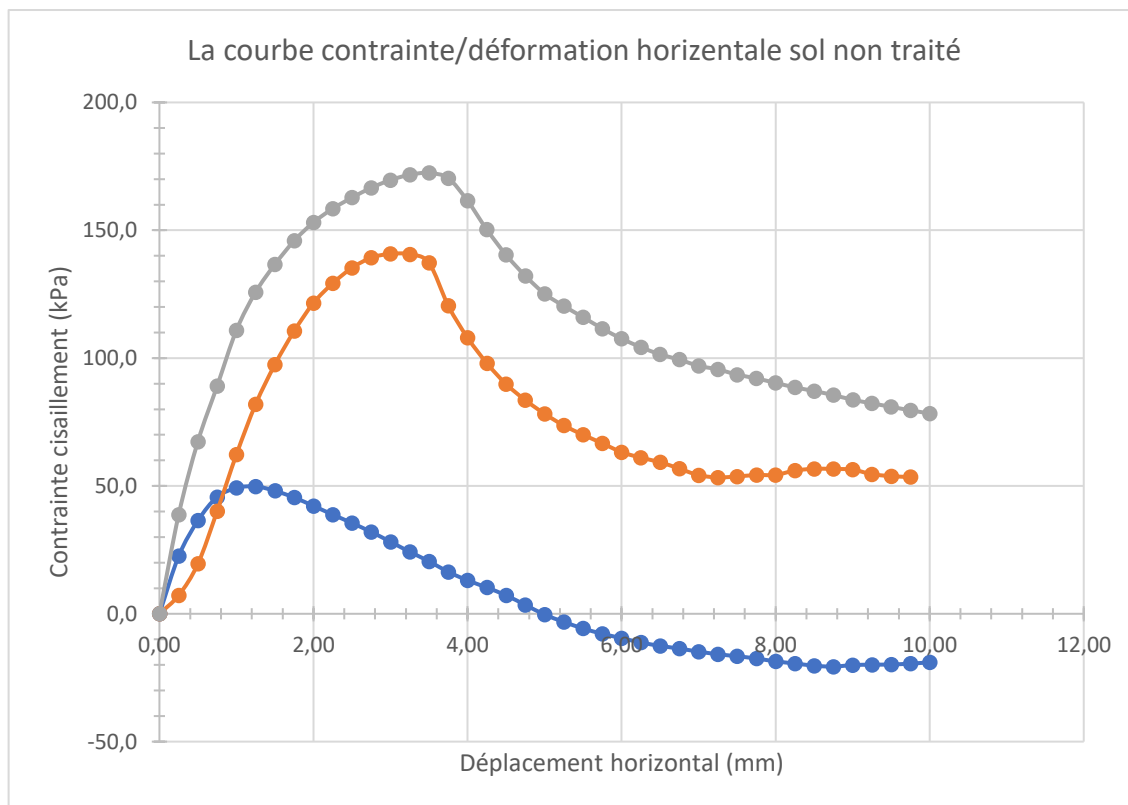


Figure 43 : la courbe de cisaillement (contrainte/déformation) pour le sol non traité.

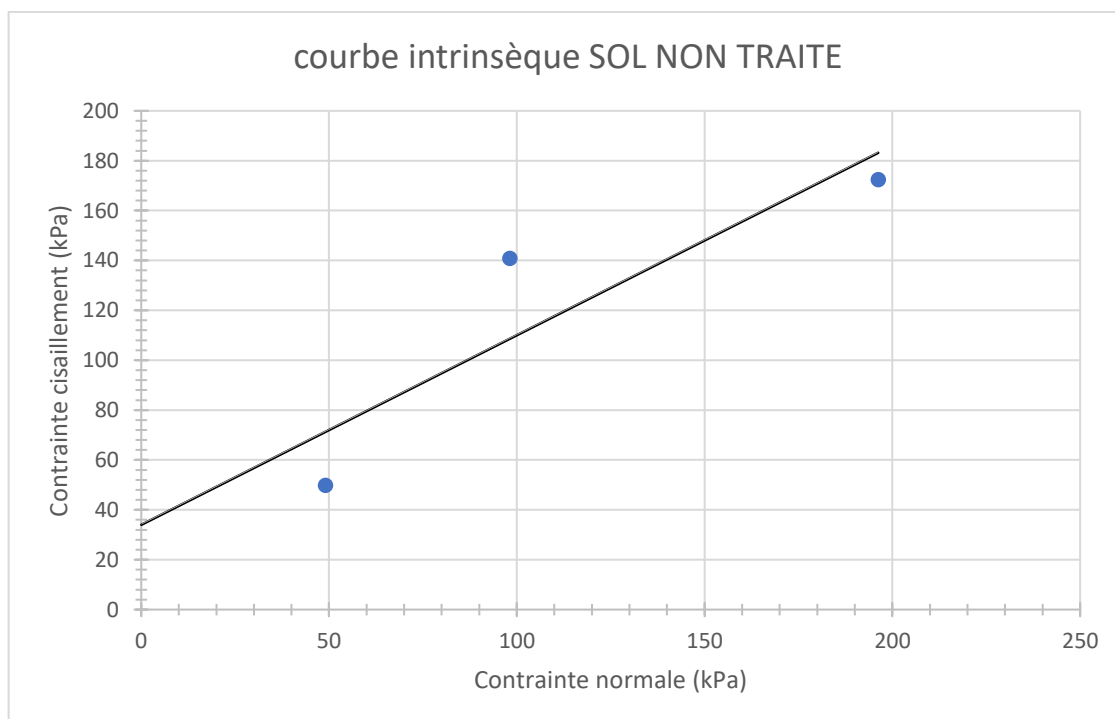


Figure 44 : La courbe intrinsèque sol non traité.

3.3.4.2 Sol traité :

Tableau 16 : les résultats d'essai pour le sol traité.

CONDITIONS INITIALES	Éprouvette 1	Éprouvette 2	Éprouvette 3
Longueur (mm)	60,0	60,0	60,0
Largeur (mm)	60,0	60,0	60,0
Section (mm ²)	3600,0	3600,0	3600,0
Teneur en eau (initiale) (%)	16	16	16
Densité volumique (g/m ³)	2,014	2,014	2,014
Densité sèche (g/m ³)	1,736	1,736	1,736
CISAILLEMENT			
Vitesse de cisaillement (mm/min)	1,000000	1,000000	1,000000
Résultats au pic			
Contrainte normale (kPa)	49	98	196
Contrainte cisaillement (kPa)	57	104	211
Déplacement horizontal (mm)	1,00	1,75	2,50
Cohésion (kPa)			
	4,2		
Angle de frottement (°)			
	46,4		

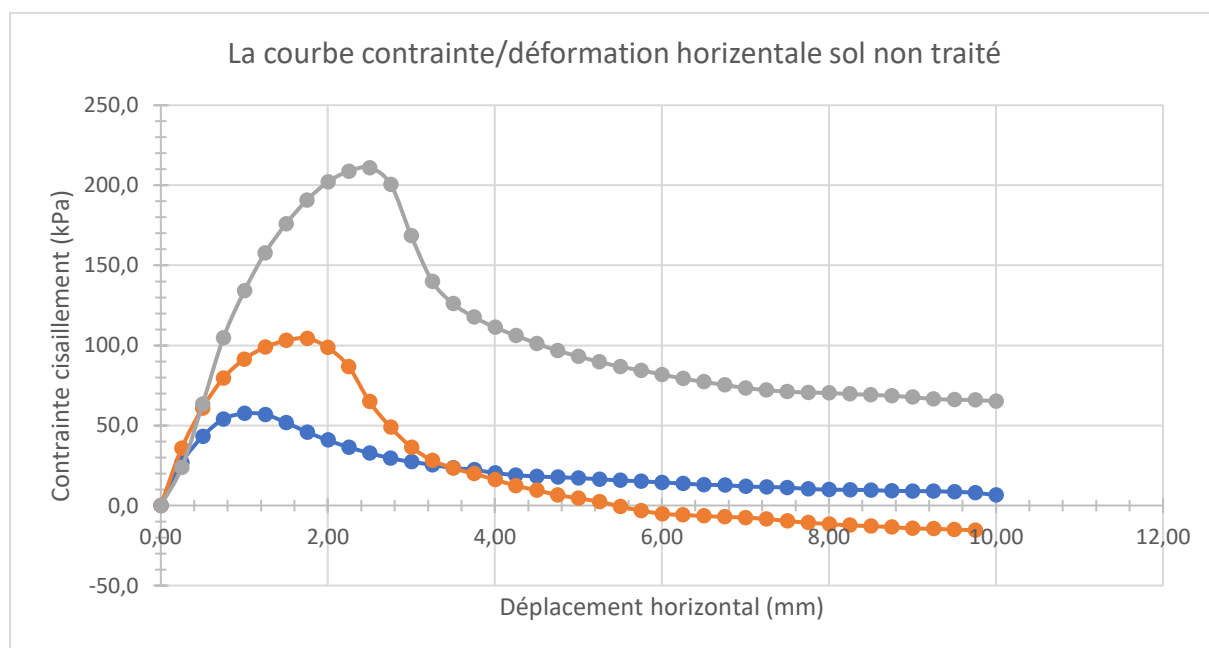


Figure 45 : la courbe de cisaillement (contrainte/déformation) pour le sol non traité.

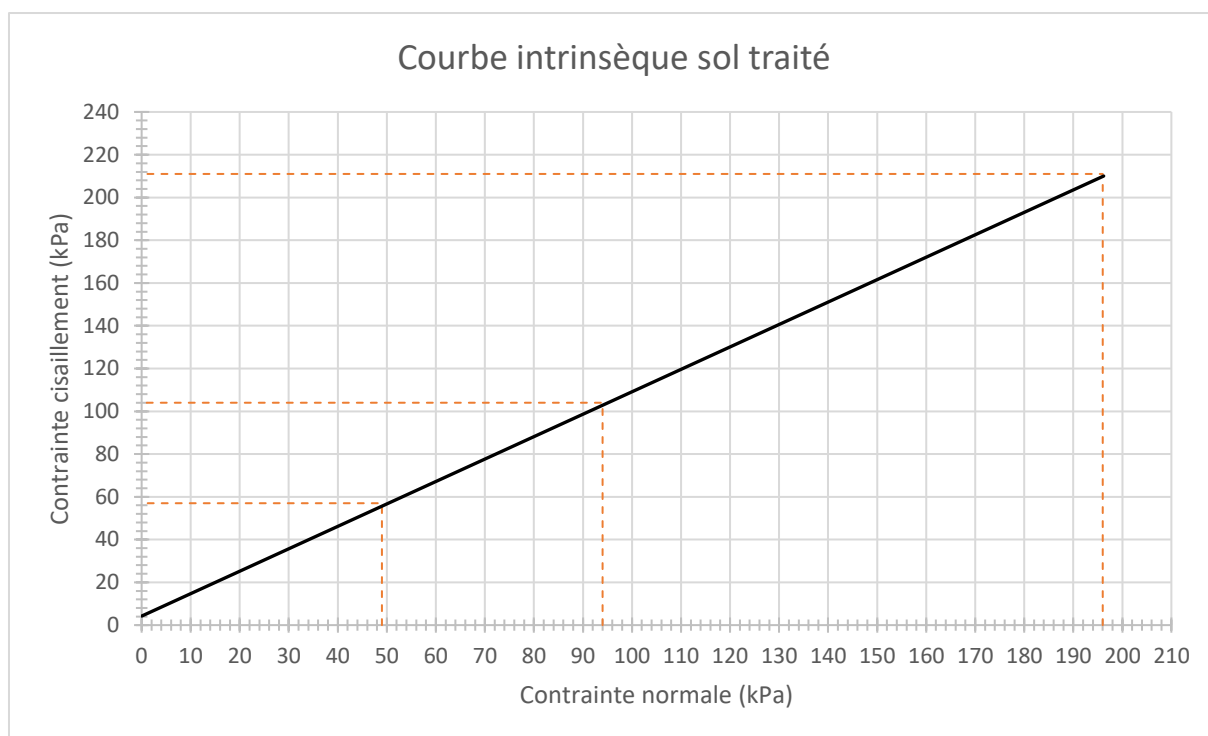


Figure 46 : La courbe intrinsèque sol traité.

3.3.5 Conclusion :

Le sol traité présente une meilleure résistance à la contrainte, il est moins déformable comme en témoigne le déplacement critique plus faible. Cependant, la cohésion du sol traité est nettement plus faible, ce qui peut être un inconvénient dans certaines applications. L'angle de frottement plus élevé du sol traité indique une meilleure capacité à résister au cisaillement. En résumé, le sol traité offre un compromis entre résistance et déformabilité, mais il est important de considérer la cohésion dans la conception géotechnique.

3.4 Essai œdométrique :

Essais œdométrique (XP P 94-090-1) :

3.4.1 But d'essai :

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_s qui permet de déterminer le temps de consolidation sous une charge donnée.

Module œdométrique et indice de compression / gonflement

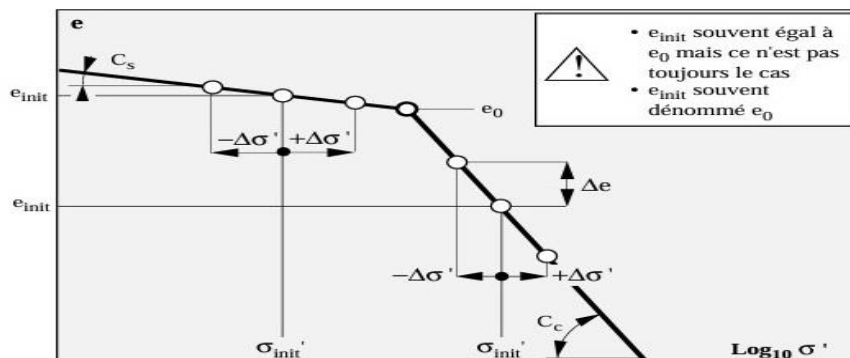


Figure 47: courbe de compression/gonflement à l'œdomètre.

3.4.2 Appareillage :

- Balance.
- Une étuve.
- Une série de poids.
- Odomètre cellule de perméabilité.
- Série des poids.
- Un comparateur.
- Chronomètre.



Figure 48 : l'appareillages d'essai

3.4.3 Mode opératoire :

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.



Figure 49: La boîte œdométrique.

On mesure alors la variation de hauteur de l'éprouvette de sol en fonction de la contrainte appliquée. On recommence le processus à différents paliers de chargement de 24 h. A partir de cet essai on peut établir des courbes utiles pour évaluer l'amplitude des tassements et les durées de consolidation des sols :

- Compressibilité (indice des vides en fonction de la contrainte).
- Consolidation (variation relative de tassement en fonction du logarithme du temps).

3.4.4 Expression des résultats :

3.4.4.1 Sol non traité :

Tableau 17 : Expression des résultats du cycle de chargement pour le sol non traité.

Contrainte (KPa)		2,55	5,11	10,2	20,38
Temps(h)	Temps (s)	Tassement (mm)			
0,00416667	15	0,19	0,52	1	1,76
0,008333333	30	0,21	0,54	1,02	1,79
0,016666667	60	0,25	0,56	1,05	1,81
0,033333333	120	0,28	0,58	1,08	1,85
0,066666667	240	0,3	0,61	1,13	1,89
0,133333333	480	0,32	0,64	1,17	1,93
0,25	900	0,34	0,67	1,22	1,98
0,5	1800	0,36	0,71	1,29	2,06
1	3600	0,38	0,75	1,35	2,14
2	7200	0,38	0,78	1,41	2,24
4	14400	0,38	0,8	1,46	2,32
24	86400	0,4	0,82	1,52	2,38
Hauteur a la fin du cycle (mm)		19,6	18,78	17,26	14,88

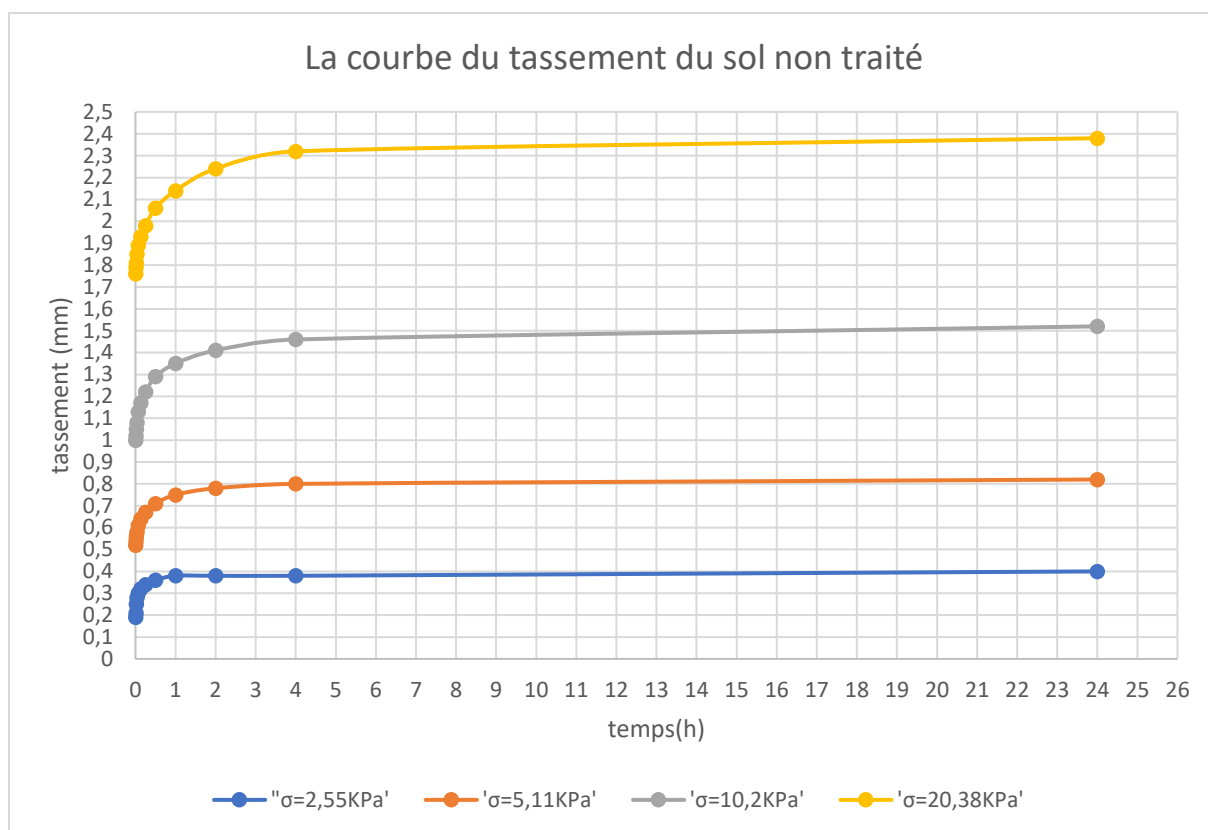


Figure 50: la courbe de développement du tassement pour le sol non traité.

Tableau 18 : Expression des résultats du cycle de déchargement pour le sol non traité.

Contrainte (KPa)		2,55	5,11	10,2	20,38
Temps(h)	Temps (s)	Gonflement (mm)			
0,004166667	15	1,19	2,27	2,38	-
0,008333333	30	1,18	2,27	2,38	-
0,016666667	60	1,18	2,27	2,38	-
0,033333333	120	1,17	2,27	2,37	-
0,066666667	240	1,17	2,27	2,34	-
0,133333333	480	1,16	2,26	2,33	-
0,25	900	1,16	2,26	2,32	-
0,5	1800	1,14	2,25	2,32	-
1	3600	1,13	2,24	2,31	-
2	7200	1,11	2,23	2,3	-
4	14400	1,08	2,21	2,3	-
24	86400	1,05	2,2	2,3	-
Hauteur à la fin du cycle		16,21	15,06	14,96	-

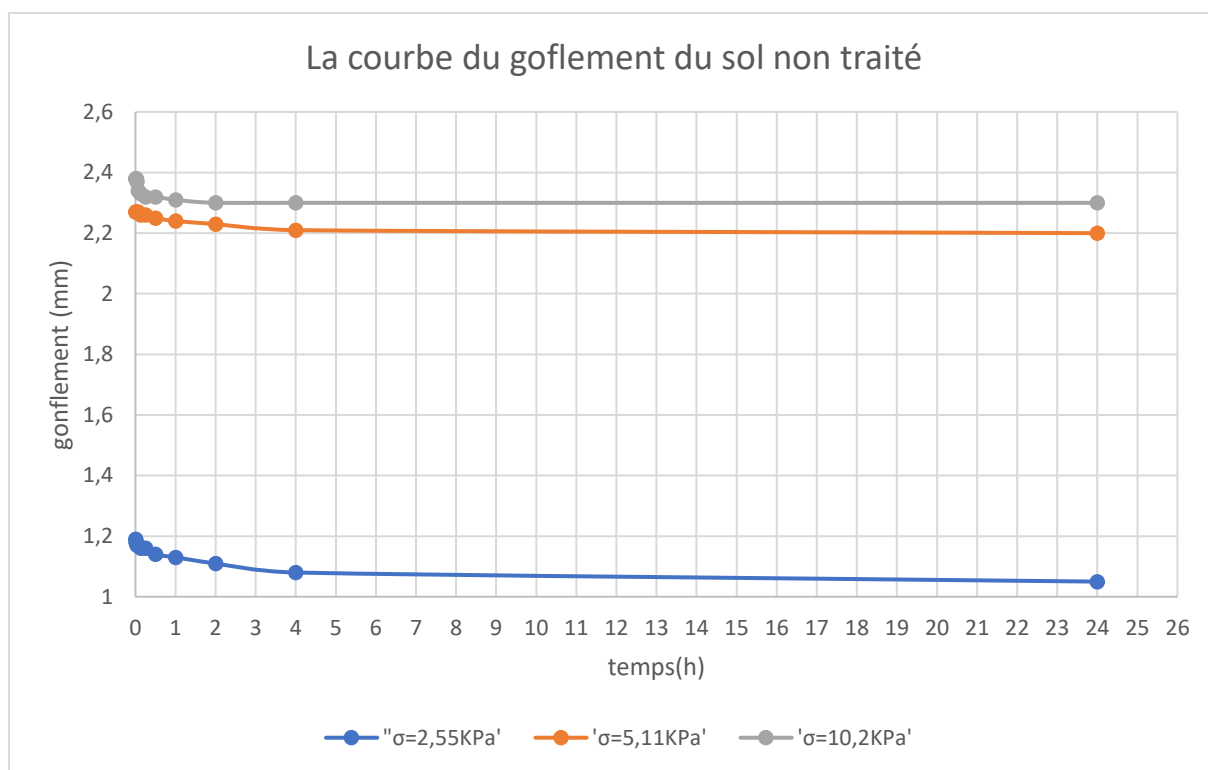


Figure 51: la courbe de développement du gonflement pour le sol non traité.

Tableau 19 : Expression des résultats de développements des volumes à la fin des cycles pour le sol non traité.

Section = 1962,5 (mm ²)		Volume= 39250 (mm ³)	Vs = 23080 (mm ³)	
Contrainte (Kpa)	LOG10 (σ)	Tassement (mm)	Volumes (mm ³)	Indice des vides
0	0	20	39250	0,700606586
2,55	0,40654018	19,6	38465	0,666594454
5,11	0,7084209	18,78	36855,75	0,596869584
10,2	1,00860017	17,26	33872,75	0,467623484
20,38	1,30920418	14,88	29202	0,2652513
10,2	1,00860017	14,96	29359	0,272053726
5,11	0,7084209	15,06	29555,25	0,280556759
2,55	0,40654018	16,21	31812,125	0,378341638

Tableau 20 : les indices (C_c , C_g) et la contrainte de compression.

Indice Compression	0,083662411
Indice Gonflement	0,028326516
Contrainte de compression σ_c (KPa)	4,365

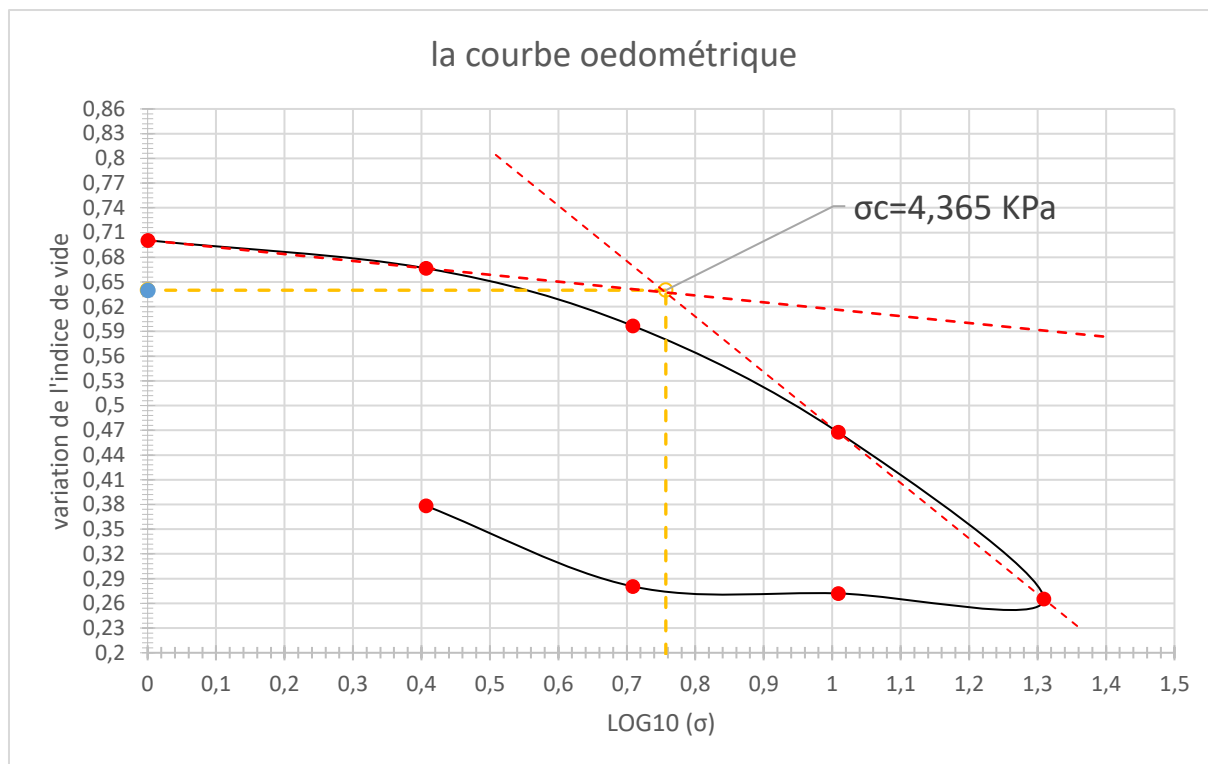


Figure 52 : La courbe œdométrique (le développement de l'indice des vides) pour le sol non traité.

Les indices (compression, gonflement) : pour connaître la valeur des indice (Cc, Cg) on calcule la pente des deux segments linéaires de la courbe. C'est-à-dire le rapport entre les valeurs absolue de différents indices des vides divisées par les différentes valeurs des logarithme décimales de la pression.

$$\left| \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma_1 - \log \sigma_2} \right|$$

3.4.4.2 Sol traité :

Tableau 21 : Expression des résultats du cycle de chargement pour le sol traité.

Contrainte (KPa)		2,55	5,11	10,2	20,38
Temps(h)	Temps (s)	Tassement (mm)			
0,00416667	15	0,07	0,22	0,44	0,85
0,008333333	30	0,08	0,23	0,45	0,88
0,01666667	60	0,09	0,23	0,46	0,9
0,033333333	120	0,1	0,24	0,48	0,92
0,06666667	240	0,11	0,25	0,49	0,95
0,133333333	480	0,12	0,26	0,52	0,99
0,25	900	0,13	0,27	0,54	1,03
0,5	1800	0,14	0,3	0,56	1,07
1	3600	0,15	0,31	0,6	1,12
2	7200	0,16	0,32	0,64	1,18
4	14400	0,16	0,33	0,67	1,22
24	86400	0,18	0,36	0,71	1,27
Hauteur à la fin du cycle		19,82	19,46	18,75	17,48

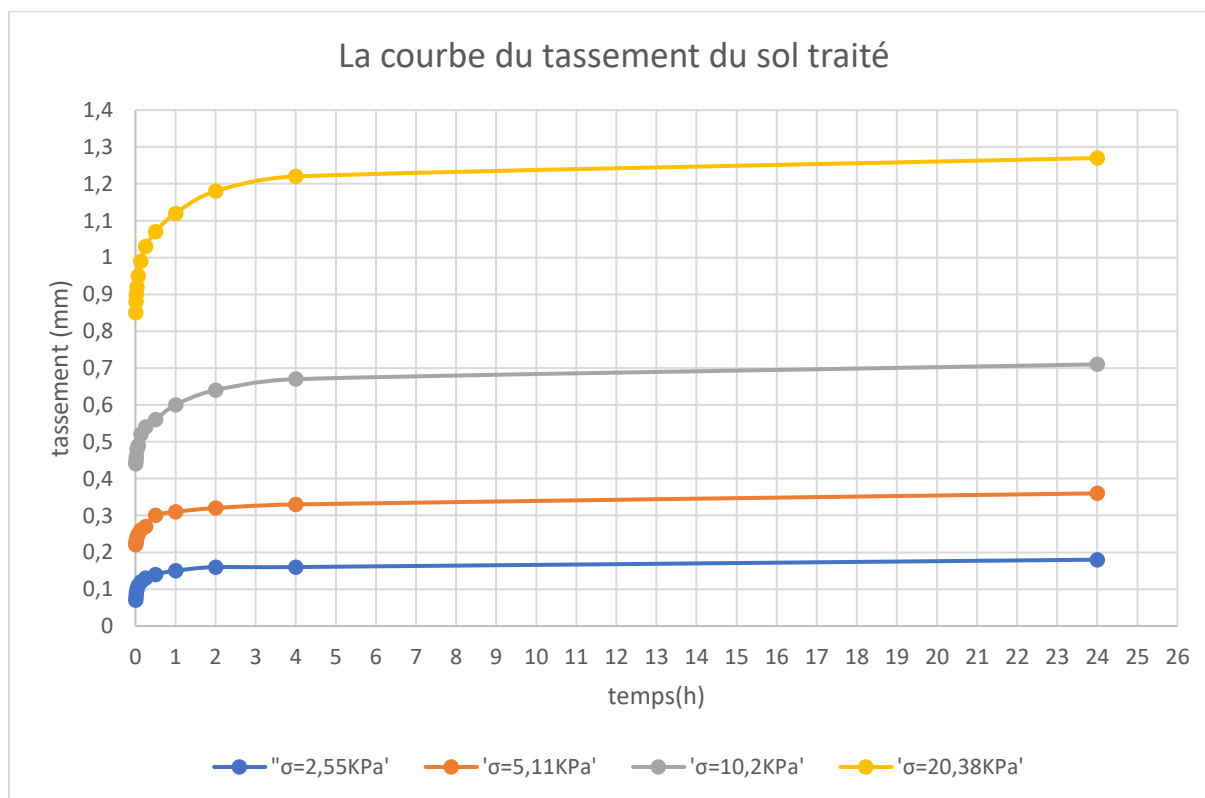


Figure 53 : la courbe de développement du tassement pour le sol traité.

Tableau 22 : L'expression des résultats du cycle de déchargement pour le sol traité.

Contrainte (KPa)		2,55	5,11	10,2	20,38
Temps(h)	Temps (s)	Gonflement (mm)			
0,004166667	15	1,08	1,17	1,24	-
0,008333333	30	1,07	1,17	1,24	-
0,016666667	60	1,07	1,16	1,24	-
0,033333333	120	1,07	1,16	1,23	-
0,066666667	240	1,07	1,16	1,23	-
0,133333333	480	1,06	1,15	1,23	-
0,25	900	1,05	1,15	1,22	-
0,5	1800	1,05	1,14	1,22	-
1	3600	1,04	1,13	1,21	-
2	7200	1,02	1,12	1,21	-
4	14400	1	1,11	1,2	-
24	86400	0,99	1,1	1,2	-
La hauteur à la fin du cycle		17,73	17,62	17,52	-

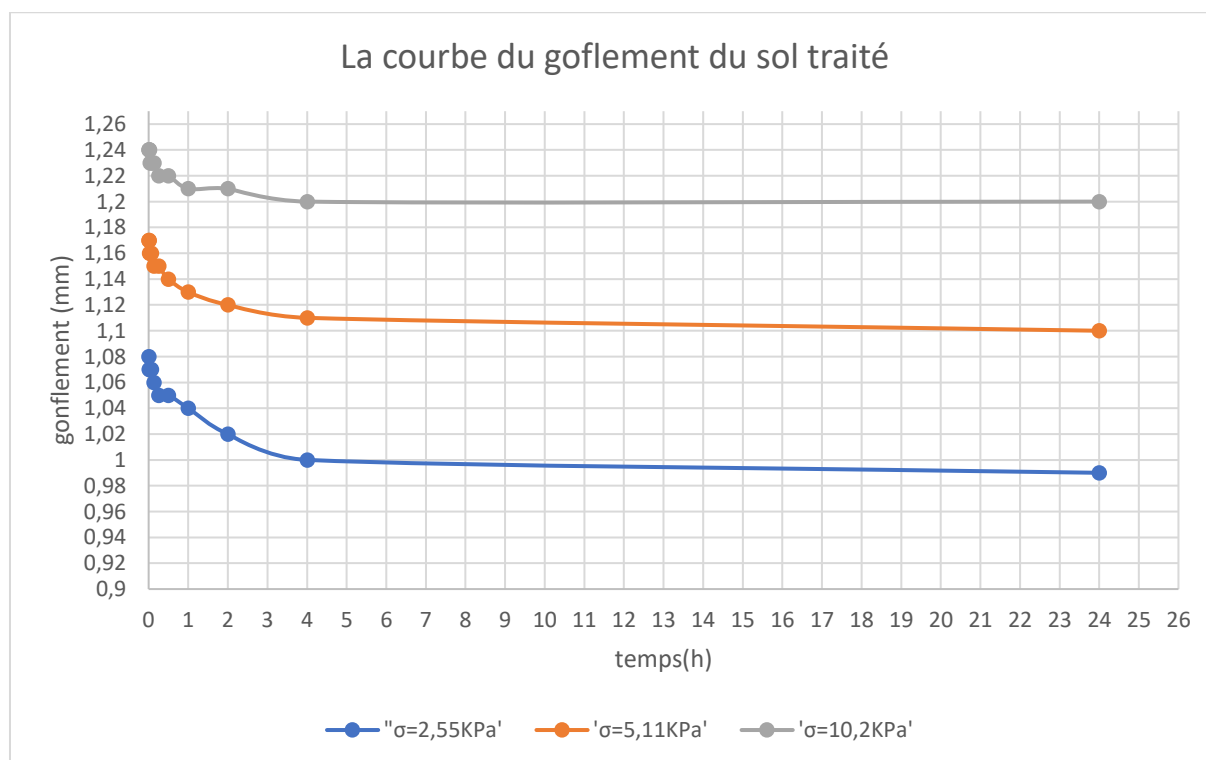


Figure 54 : la courbe de développement du gonflement pour le sol traité.

Tableau 23 : Expression des résultats de développements des volumes à la fin des cycles pour le sol traité.

Section = 1962,5 (mm ²)		Volume = 39250 (mm ³)		
Contrainte (KPa)	LOG10 (σ)	Tassement (mm)	Volumes (mm) ³	Indice des vides (e)
0	0	20	39250	0,700606586
2,55	0,40654018	19,82	38896,75	0,685301127
5,11	0,7084209	19,46	38190,25	0,654690208
10,2	1,00860017	18,75	36796,875	0,594318674
20,38	1,30920418	17,48	34304,5	0,486330156
10,2	1,00860017	17,52	34383	0,489731369
5,11	0,7084209	17,62	34579,25	0,498234402
2,55	0,40654018	17,73	34795,125	0,507587738

Tableau 24 : les indices (Cc, Cg) et la contrainte de compression.

Indice de compression Cc	0,006002141
Indice de gonflement Cg	0,001670537
Contrainte de compression σc (KPa)	6,30

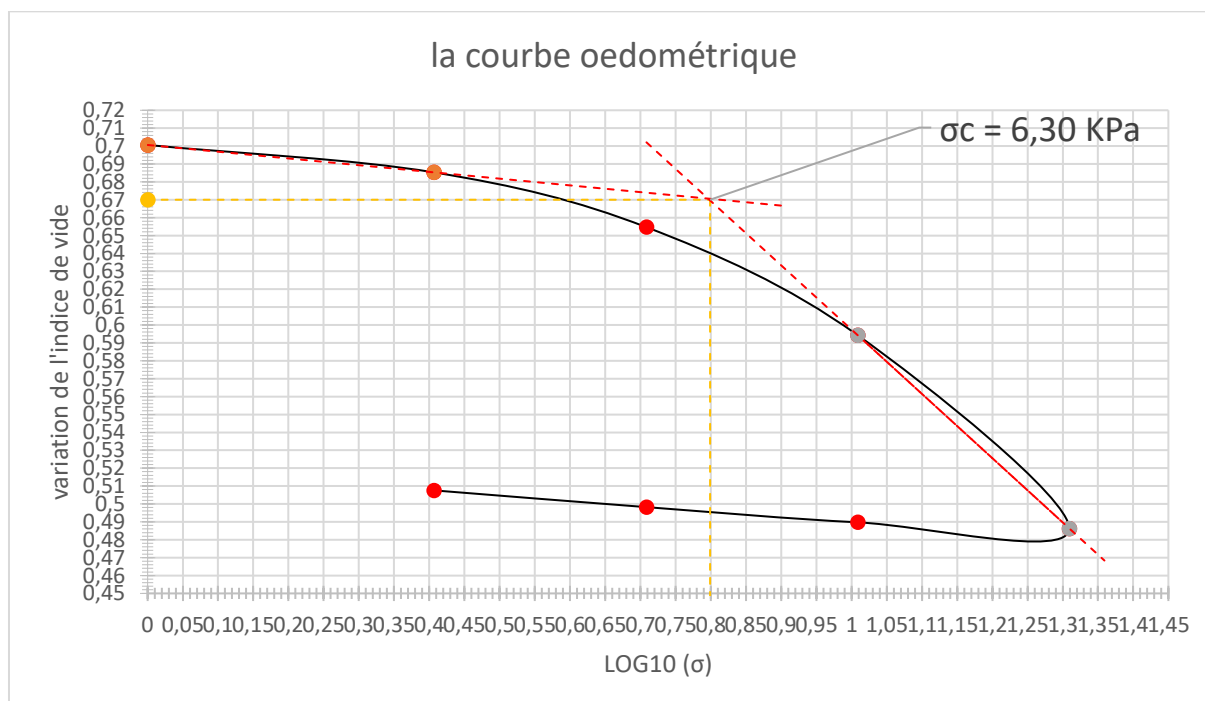


Figure 55: La courbe œdométrique (le développement de l'indice des vides) pour le sol traité.

3.4.5 Conclusion :

Après l'expression des résultats de l'essai œdométrique on constate que le changement du volume total et l'indice de compression au cycle de chargement du sol traité sont inférieurs à ceux du sol non traité c'est-à-dire une résistance plus élevée à la compression, c'est la même remarque quand on peut dire sur les paramètres du gonflement ce qui indique bien que les vides du sol sont partiellement colmatés par la poudre de verre.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des essais réalisés sur l'argile utilisée, incluant des essais de portance (Proctor et CBR) et des essais mécaniques (œdomètre et cisaillement). Nous avons brièvement décrit les différentes étapes des essais réalisés conformément aux normes, puis présenté l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus. L'analyse met en évidence l'influence de l'ajout de la poudre de verre sur le comportement mécanique de l'argile en termes de compressibilité, de tassement et des caractéristiques intrinsèques de l'argil

Conclusion générale :

Après la description des argiles en général, avec un accent particulier sur celles présentant un caractère gonflant. Nous avons abordé les différents types d'argiles et leurs liaisons structurales. L'explication du phénomène de gonflement des argiles a permis de distinguer plusieurs formes de gonflement. En plus nous avons examiné les facteurs influençant ce phénomène et l'impact du gonflement sur les constructions civiles.

La stabilisation des sols est un élément crucial dans la construction d'infrastructures, l'utilisation de la poudre de verre présente des avantages spécifiques à considérer, notamment sa recyclabilité à 100 % et ses propriétés mécaniques améliorées elle réagit avec le sol pour former un matériau plus résistant, le choix de cette approche dépend des priorités du projet, de la disponibilité des matériaux et des considérations environnementales. Il est crucial de trouver un équilibre entre performance technique et durabilité pour garantir la solidité des infrastructures.

Le verre, avec ses propriétés uniques, a joué un rôle essentiel dans l'histoire de l'humanité. De la verrerie artisanale aux technologies de pointe, le verre est omniprésent dans notre vie quotidienne. Sa résistance mécanique, sa transparence, sa conductivité électrique et sa résistance à la corrosion en font un matériau polyvalent. La poudre de verre, en tant qu'additif cimentaire alternatif, offre des opportunités intéressantes dans la construction civile. Sa haute teneur en silice amorphe lui confère des propriétés pouzzolaniques, ce qui en fait un choix prometteur pour la stabilisation des sols. Cependant, il est crucial de prendre en compte l'impact environnemental, notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de consommation d'énergie. En somme, la poudre de verre offre des solutions durables pour la construction, mais leur utilisation doit être guidée par des principes de durabilité et d'efficacité énergétique.

Après avoir examiné les résultats de l'essai, nous constatons un changement dans la densité sèche du sol γ_{dmax} . La densité augmente avec l'ajout de 5 % et 7 % de poudre de verre, mais diminue lorsque la proportion atteint 10 %. Étant donné que la densité sèche maximale a été obtenue avec 5 % de poudre de verre, nous avons décidé de poursuivre les autres essais en utilisant ce mélange.

Pour le sol non traité, la force de poinçonnement appliquée au cours de l'essai CBR augmente avec l'enfoncement, comme attendu, et la contrainte de poinçonnement suit également cette tendance. L'indice CBR (California Bearing Ratio) est 29,131 le sol non traité.

En revanche, pour le sol traité, la force appliquée et la contrainte de poinçonnement sont plus élevées que celles du sol non traité. L'indice CBR du sol traité est 45,226. En conclusion, le sol traité présente une meilleure résistance au poinçonnement que le sol non traité, et l'indice CBR élevé pour les deux types de sols indique une bonne capacité portante.

Le sol traité présente une meilleure résistance à la contrainte de cisaillement, il est moins déformable comme en témoigne le déplacement critique plus faible. Cependant, la cohésion du sol traité est nettement plus faible, ce qui peut être un inconvénient dans certaines applications. L'angle de frottement plus élevé du sol traité indique une meilleure capacité à résister au cisaillement. En résumé, le sol traité offre un compromis entre résistance et déformabilité, mais il est important de considérer la cohésion dans la conception géotechnique.

Après l'expression des résultats de l'essai œdométrique on constate que le changement du volume total et l'indice de compression au cycle de chargement du sol traité sont inférieurs à ceux du sol non traité, c'est-à-dire une résistance plus élevée à la compression, c'est la même remarque quand on peut dire sur les paramètres du gonflement ce qui indique bien que les vides du sol sont partiellement colmatés par la poudre de verre.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des essais réalisés sur l'argile utilisée, incluant des essais de portance (Proctor et CBR) et des essais mécaniques (œdomètre et cisaillement). Nous avons brièvement décrit les différentes étapes des essais réalisés conformément aux normes, puis présenté l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus. L'analyse met en évidence l'influence de l'ajout de poudre de verre sur le comportement mécanique de l'argile en termes de compressibilité, de tassement et des caractéristiques intrinsèques de l'argile

Références :

1. *Modélisation du comportement hydromécanique des sols gonflants non saturés.* **mrad, Mohamad.** 2005, Sciences de l'ingénieur INPL.
2. *Argiles en tant que réservoirs d'inhibiteurs de corrosion métallique issus de ressources naturelles dans des peintures pour la protection des métaux.* **aghazzaf, Ahmed ait.** 2014, Université de Lorraine.
3. *Les argiles dans le génie civil : pathologies et propriétés remarquables.* **Duc, Myriam.** 2020, Université Paris Est - Marne-la-Vallée.
4. *Absorption de composés organiques par la houille et la bentonite .* **abbès, boucheta.** 2017, UNIVERSITE DJILLALI LIABES FACULTE DES SCIENCES SIDI BEL ABBES .
5. *Le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage.* **GAOMBALET.J.** 2004, Thèse de Doctorat, École Polytechnique de Palaiseau.
6. *COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE DES SOLS GONFLANTS COMPACTÉS.* **Cuisinier, Olivier.** 2002, Sciences de l'ingénieur.
7. **RC, Mckenzie.** *The classification of soil silicates and oxydes In : Soil components vol 2.* New york : Giesecking J. E. eds, 1975.
8. *Etude du comportement des argiles stabilisées avec des déchets de verre.* **AMIRA, BOUZIANE BACHIR & FENDIL.** 2021, UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET.
9. *Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines: application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse.* **Bentahar, Yassine.** 2016.
10. **RICHARD.** *Capillary conduction of liquids through porous medium. Physics 1, pp. 169-173.* LA : s.n., 1931.
11. **B.P, YONG R.N. & WARKENTIN.** *Interaction to Soil Behavior.* New York : Macmillan, 1966 .
12. *Physical chemistry of clay-water interaction.* **P.F, LOW.** 1961, Advances in Agronomy, Academic, Vol. 13, pp. 269-327.
13. *Les sols cultivés.* **R, MOREL.** ISBN : 2-7430-0149-6., 1996, Technique & documentation.

14. *Gonflement et pression de gonflement d'argiles compactées*. **A, DARDAINE M. & LAJUDIE**. 18, 1985, Note technique C.E.A., p. 85.

15. *La construction économique sur sols gonflants*. **J.C., MOUROUX P. MARGON P. ET PINTE**. 14, 1988, manuels et méthodes.

16. **CHEN.F.H.** *Foundations on expansive soils. Developments in Geotechnical Engineering*. Amsterdam : Elsevier Publishing , 1988. p. 464 . Vol. 54.

17. **BENAISSA, Mohamed.** *Etude expérimentale sur la stabilisation des sols gonflants de la région de Mostaganem et de Relizane*. s.l. : Université de Mostaganem-Abdelhamid Ibn Badis, 2011.

18. *Influence des solutions aqueuses sur le comportement mécanique des roches argileuses*. **WAKIM.J.** 2005, Thèse doctorat de l'école nationale supérieure des mines de paris.

19. *Modélisation du comportement des fondations superficielles dans un massif de sol gonflant, cas de la région de Sefiane* . **Abdelaziz, KHENNOUF**. 2021, thèse de doctorat Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd .

20. *STABILISATION DES SOLS GONFLANTS* . **BELABBACI, Zeyneb**. 2014, THESE DE DOCTORAT LMD Laboratoire Risk Assesment and Management "RisAM" - Tlemcen .

21. *stabilisation des sols argileux par la chaux*. **REDHA, Babouri**. 2004, thèse de majister Université de M'Sila - Mohamed Boudiaf.

22. *CLAY SOIL STABILISATION USING POWDERED GLASS* . **J. OLUFOWOBI, A. OGUNDOJU, B. MICHAEL, O. ADERINLEWO**. 5, 2014, Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 9, p. 544.

23. *BEKKOUCHE.A, Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie)* . **BEKKOUCHE.A, DJEDID.A et AISSA MAMOUNE**. 2001, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, Réf 4375, pp. 67-75.

24. *Sols Argileux Gonflants– Site Expérimental de Waza-Maltman*. **M, Livet**. 1990, Rapport de Synthèse, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont- Ferrand, Lyon.

25. *Stabilisation d'un sol argileux par traitement à la chaux et au ciment cas du site lotissement Mokadam*. **SILYOUNA, BOUTOUCHE**. 2018, Université Mouloud Mammeri TiziOuzou.

26. *Boukezoula, Soumia, aTraitement des sols plastiques avec des déchets inertes du secteur «bâtiments et travaux publics-BTP».* **Boukezoula, Soumia, and Riad Encadreur Benzaid.** 2018, Université de Jijel.

27. *Effect of crushed glass on the mechanical and microstructural behavior of highly expansive clay subgrade.* **Perera, S. T. A. M., et al.** 2022, case studies in construction materials .

28. *Etude des propriétés optiques et mécaniques des verres binaires silicatés d'alcalins lourds.* **CHLIGUI, Miriam.** 2010, thèse doctorat, UNIVERSITÉ D'ORLÉANS.

29. *Mécanismes d'altération du verre calco-sodique en atmosphère urbaine pollué.* **T, Lombardo.** 2002, Thèse de doctorat ,Université paris XII - val de marne.

30. *Une vie de verre expériences sur l'élaboration et les propriétés d'un matériau .* **Vignes J-L., Beurroies I.** 790, 1997, , Vol. 91 , pp. 197-213. .

31. *Technologie du verre.* **A, Ayadi.** 2007, 2émeedition, place centrale de Ben-Aknoun (Alger). .

32. *Élaboration de matériaux à base de verres à réseau mixte pour la vitrification des déchets nucléaires.* **Abdelmoumene, DJERIDI.** 2019, Thèse de Doctorat UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES.

33. *Guide du verrier; traité historique et pratique de la fabrication des verres, cristaux, vitraux, etc.* **Bontemps, Georges.** 1868.

34. *Comportement du béton à base de la poudre de verre à hautes températures Effet de l'âge.* **ZEGHICHI.LEILA, ZOUBIRI AMINA.** 2016, mémoire master.

35. *Water diffusion into silica glass: structural changes in silica glass and their effect on water solubility and diffusivity.* **Davis, K. and M. Tomozawa.** 189, 1995, Journal of Non-Crystalline Solids, pp. 203-220.

36. *Densification of Glass at Very High Pressures.* **Cohen, H.M. and R. Roy.** 1965, Pennsylvania State University.

37. *Dynamique de fissuration à basse vitesse des matériaux vitreux.* **F, Celarie.** 2004, Thèse de doctorat. Université Montpellier II.

38. *CARACTERISATION-ENRICHISSEMENT DES GRES PAUVRES D'EL-AOUANA: CAS DE L'USINE DE VERRE (AFRICAVER) / JIJEL.* **Soufiane, BOUABDALLAH.** 2016, thèse doctorat, UNIVERSITEBADJI MOKHTAR ANNABA.

39. *ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'AJOUTE DE POUDRE DE VERRE SUR LE COMPORTEMENT THERMO-MECANIQUEDES TIMCHEMT.* **CHAIB.H CHEREFEDDINE, Nadia MELOUAH, Safa.** 2020, thèse de mastere Université KASDI-MERBAH Ouargla.

40. **Laboratoire National Algérien de l'Habitat et de la Construction.** *Etude géotechnique Surete urbaine 02 cite 2440 Logts LPL pos 28 DOUKANE .* **TEBESSA : s.n.,** 2019.

41. *Caractéristiques mécaniques et thermiques de l'argile stabilisée par la gomme arabique et renforcée par la paille de riz.* **abakar, ALI.** 2018, Université de Lorraine,france.