

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ –BOUIRA

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Présenté par : ***Yahiaoui Yasmina et***

Bech Abdellah

En vue de l'obtention du diplôme de Master en :

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structure

Faculté des Sciences Appliquées

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

PROJET DE FIN D'ETUDE

COMPORTEMENT MECANIQUE ET L'ETAT DE
COMPRESSIBILITE DES SOLS SOUS L'IMPACT D'UN
LIANT A BASE DE DECHETS

Devant le jury :

Mokeddem Youssef
Mohamadi Sadika
Belmihoub Hacene
Saoudi Nacira

Président
Examinatrice
Examinatrice
Promoteur

Univ. Bouira
Univ Bouira
Univ. Bouira
Univ. Bouira

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Nous exprimons toute notre gratitude et sincère dévouement à Dieu Le Tout

*Puissant qui grâce à son aide nous avons terminé ce modeste travail Nous tenons à remercier chaleureusement notre promotrice Dr **Saoudi Nacira** pour son aide et son encadrement, ses encouragements et surtout sa compréhension durant toute la période de préparation de ce mémoire et nous remercions également l'honorable jury Mr **.Mokeddem Youssef** et Mme. **Mohamadi Sadika** Mr.**Belmihoub Hacene** qui a bien voulu examiner notre travail.*

*Nous remercions la chef de département Mme **Mohamadi. S**, maître assistant À la faculté ST de l'université de Bouira. Nous remercions à l'ensemble des techniciens de laboratoire mécanique des sols surtout Mme **Chalabi louiza** et toute l'équipe pédagogique de l'université **AKLI MOHAND OULHADJ** de Bouira*

*Nous remercions aussi le laboratoire de LCTP de Bouira, particulièrement monsieur chef de service **Hamoudi** de nous avoir accueillis pendant notre période de stage et Mme **Yamina***

Je tiens à remercier particulièrement tous les membres du Département de Génie Civil Pour leurs soutiens et leurs aides Nous tenons à exprimer nos Reconnaissances et nos gratitudes à toutes celles et tous ceux qui nous ont aidés Dans la préparation de ce travail.





Dédicace

Hamdoullah,

Pour tout pour la force dans la faiblesse, pour la patience dans l'épreuve et pour la lumière qui a guidé mes pas jusqu' à l'aboutissement de ce travail.

A moi-même

Je dédie ce mémoire à moi-même, pour tous les efforts que j'ai fournis tout au long de mes études. Ce parcours n'a pas toujours été facile. Aujourd'hui, je suis fière du chemin que j'ai parcouru et des expériences que j'ai vécues. Ce travail représente une étape importante de ma vie et le résultat de tout mon engagement

À mon père Yahiaoui Omar, Merci de m'avoir appris les valeurs du travail, de la persévérance et de l'honnêteté. Tes conseils, ton soutien et ta confiance en moi m'ont toujours guidée et encouragée à poursuivre mes rêves. Je te suis profondément reconnaissante pour ton amour et ta présence à mes côtés

A ma chère mère **Merci** pour ton amour, ton soutien et ton dévouement. Tu as toujours été à mes côtés, me guidant et m'encourageant dans chaque étape de ma vie. Je te suis profondément reconnaissante pour tout ce que tu as fait pour moi

A ma chère sœur Mon plus grand soutien, ma force et mon refuge. Merci d'avoir toujours été à mes côtés et de m'avoir accompagnée avec amour et bienveillance tout au long de ma vie. Merci également *à ton mari*, qui a toujours été pour moi comme un frère.

À mes chers frères Pour leur soutien, leur sincérité et leurs beaux moments partagés.

À mon amie proche Amira Qui a toujours été pour moi bien plus qu'une amie, Merci pour ta présence, ton soutien et ta fidélité. Je suis reconnaissante de t'avoir encore aujourd'hui à mes côtés.

A ma cher Binôme Bech Abdellah à notre collaboration, et notre persévérance tout au long de ce parcours universitaire. Je nous souhaite un avenir plein de réussite, de bonheur et de succès.





Dédicace

Hamdoullah,

Pour tout pour la force dans la faiblesse, pour la patience dans l'épreuve et pour la lumière qui a guidé mes pas jusqu' à l'aboutissement de ce travail.

A moi-même

Je dédie ce mémoire à moi-même, pour tous les efforts que j'ai fournis tout au long de mes études. Ce parcours n'a pas toujours été facile. Aujourd'hui, je suis fière du chemin que j'ai parcouru et des expériences que j'ai vécues. Ce travail représente une étape importante de ma vie et le résultat de tout mon engagement

À mon père, Merci de m'avoir appris les valeurs du travail, de la persévérance et de l'honnêteté. Tes conseils, ton soutien et ta confiance en moi m'ont toujours guidée et encouragée à poursuivre mes rêves. Je te suis profondément reconnaissante pour ton amour et ta présence à mes côtés

A ma chère mère Merci pour ton amour, ton soutien et ton dévouement. Tu as toujours été à mes côtés, me guidant et m'encourageant dans chaque étape de ma vie. Je te suis profondément reconnaissante pour tout ce que tu as fait pour moi

A ma chère sœur Mon plus grand soutien, ma force et mon refuge. Merci d'avoir toujours été à mes côtés et de m'avoir accompagnée avec amour et bienveillance tout au long de ma vie. Merci également.

À mes chers frères Pour leur soutien, leur sincérité et leurs beaux moments partagés.

À ma Binôme, qui a été pour moi comme une sœur à notre collaboration, et notre persévérance tout au long de ce parcours universitaire. Je vous souhaite un avenir plein de réussite, de bonheur et de succès

À tous mes amies qui ont partagé les joies les difficultés et les réussites de ce parcours Universitaire.



Résumé

Dans notre étude, nous avons analysé la stabilité d'un versant talus aux glissements de terrain dans la région de bouira en examinant le comportement mécanique et la compressibilité du sol après traitement avec des déchets notamment de la poudre de verre et de la chaux. Ce travail s'inscrit dans la recherche de solution respectueuse de l'environnement permettant le recyclage des déchets et l'amélioration des sols.

Les expériences ont été menées sur deux types de sol (sol supérieur et sol inférieur), mélangés à différents pourcentages de verre (12 %, 15 %, 18 % et 20 %) et de chaux (4 % et 8 %) à l'aide de Na OH.

Plusieurs essais en laboratoire ont été réalisés, dont l'essai de cisaillement direct pour étudier la résistance du sol et l'essai œdométrique pour analyser la compressibilité et la déformation volumétrique. Les résultats ont montré que l'ajout de verre et de chaux améliore significativement le comportement du sol, augmentant sa résistance au cisaillement et diminuant sa compressibilité. La chaux contribue également de manière significative à l'augmentation de la cohésion du sol, tandis que le verre, de par sa nature granulaire, contribue à améliorer le frottement interne. On peut donc conclure que l'utilisation de ces matériaux dérivés de déchets représente une solution pratique et efficace pour améliorer les propriétés du sol.

Mots clés : sol, glissement, cisaillement, la chaux, verre, recyclé

Abstract

In our study, we analyzed the stability of a slope prone to landslides in the Bouira region by examining the mechanical behavior and compressibility of the soil after treatment with waste materials, specifically glass powder and lime. This work contributes to the search for environmentally friendly solutions that enable waste recycling and soil improvement.

The experiments were conducted on two types of soil (topsoil and subsoil), mixed with varying proportions of glass (12%, 15%, 18%, and 20%) and lime (4%, 8%) using NaOH. Several laboratory tests were performed, including the direct shear test to study soil strength, and the odometer test to analyze compressibility and volumetric deformation. The results showed that adding glass and lime significantly improves soil behavior, increasing its shear strength and decreasing its compressibility. Lime also contributes significantly to increasing soil cohesion, while glass, due to its granular nature, helps improve internal friction. It can therefore be concluded that the use of these waste-derived materials represents a practical and effective solution for improving soil properties.

Keywords: soil, sliding, shearing, lime, glass, recycling

الملخص

قمنا في دراستنا بتحليل استقرار منحدر معرض لانزلاق أرضي في منطقة البويرة، بدراسة السلوك الميكانيكي وقابلية الانضغاط للتربة بعد معالجتها بإضافة نفايات، والمتمثلة في مسحوق الزجاج والجير. ويأتي هذا العمل في إطار البحث عن حلول بيئية تسمح بإعادة استغلال النفايات وتحسين خصائص التربة.

تم إنجاز التجارب على نوعين من التربة (طبقة علوية وطبقة سفلية)، حيث تم خلطها بنسب مختلفة من الزجاج (12%، 15%، 18% و 20%) والجير (4% و 8%) بواسطة NaOH

تم الاعتماد على عدة تجارب مخبرية، من بينها اختبار القص المباشر لدراسة مقاومة التربة، بالإضافة إلى اختبار الأودومتر الذي يسمح بتحليل قابلية الانضغاط والتشوه الحجمي

بينت النتائج أن إضافة الزجاج والجير تؤدي إلى تحسين ملحوظ في سلوك التربة، حيث تزداد مقاومتها للقص وتقل قابليتها للانضغاط، كما تبين أن الجير يساهم بشكل كبير في زيادة تماسك التربة، بينما يساعد الزجاج في تحسين الاحتكاك الداخلي بفضل طبيعته الحبيبية. يمكن القول أن استعمال هذه المواد الناتجة عن النفايات يمثل حل عملي وفعال لتحسين خصائص التربة

الكلمات المفتاحية: التربة، الانزلاق، القص، الجير، الزجاج، إعادة التدوير

Sommaire

Introduction générale	1
<i>Chapitre I</i>	2
<i>Synthèse bibliographique</i>	2
I. Synthèse bibliographique	3
I.1. Introduction	3
I.2 Les matériaux de traitement de sol compressible	4
I.3. Les investigations sur les sols compressibles	10
I.4. Les résultats et discussion revue	16
I.5. Conclusion	19
<i>Chapitre II</i>	20
<i>Présentation de logiciel utilise pour la modélisation</i>	20
II.1. Logiciel utilisé pour la modélisation	21
▪ Présentation de logiciel Plaxis	21
II.2. Les Etapes d'application sur plaxis	21
<i>Chapitre III Etude Expérimentale</i>	31
III. Etude expérimental	32
III.1 Introduction	32
III .2. Matériaux utilisés et leurs caractéristiques	32
III.2.1 Situation de la zone de glissement	32
III.2.2 Sol 1 Inférieur	33
III.2.3 Sol Supérieur 2	34
III.2.4 la poudre de verre	35
III.2.5 La molarité de Na OH	35
III.2.6 la chaux	35
III.2.7 Présentation des mélanges	35
III.3. Essais sur les sols	36
III.3.1. Essai Œdométrique	36
III.3.1.1. Résultats de l'essai œdométrique	37
III.3.1.2. Courbes de comparaison	38
III.3.2 Essai cisaillement	45

III.3.2.1 Les calculs	47
II.4.2.3 Présentation des résultats :	48
IV.1. Présentation des résultats de modélisation par plaxis	50
IV.1.1 Introduction	50
IV.1.2 Présentation du profil	50
IV.1.3. Analyse des contraintes	55
IV.1.4. Analyse des déplacements	60
IV.1.5. Analyse de la variation de volume	62
Références bibliographiques	67

Liste des figures

Figure 1: Images MEB des résidus (a) avant et (b) après l'essai à une pression de confinement Consoli et al. (2024)	5
Figure 2: PSD des résidus de minerai de fer non testés et testés Consoli et al. (2024)	5
Figure 3: a) Sable de dune, b) concasseur de roches et c) déchets de PET granulé Graça, C.J.P. et al. (2025)	6
Figure 4: Images de tomographie des échantillons de béton recyclé et quatre images tridimensionnelles extraites de la sphéricité (Hao Yang et al., 2025).	7
Figure 5 : Protocole de compactage Halim et al. (2026)	11
Figure 6: Procédure de test du rapport de palier en Californie (CBR) Halim et al. (2026)	11
Figure 7: Préparation d'échantillons à interface de cisaillement directe Zhou et al. (2025)	12
Figure 8: Schéma de l'expérience de cisaillement d'interface à grande échelle Zhou et al (2025)	13
Figure 9: Schémas d'essai de cisaillement du sol de la zone de glissement Tao Luo et al (2026)	14
Figure 10: Résultats de simulation d'un essai compressé incertain du sol assuré Zhou et al. (2025)	15
Figure 11: Courbe contrainte-déplacement de cisaillement dans une expérience de cisaillement d'interface à grande échelle. Zhou et al (2025)	16
Figure 12: Résultats de cisaillement direct à l'interface sol-sol cimenté. Zhou et al (2025) . ..	16
Figure 13: Relation entre la consommation de ciment par unité de surface et la réduction du rebond. Zhang et al (2026)	17
Figure 14: Effet du temps de durcissement et de la teneur en ciment sur la réduction du rebond Zhang et al (2026)	17
Figure 15: SCU du sol-ciment avec différents ciments Zhang et al (2026)	18
Figure 16: Paramètres des caractéristiques de cisaillement. Tao Luo et al (2026) , ...	19
Figure 17: Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (mode de création géométrique).	22
Figure 18: Fenêtre de réglages généraux (onglet Project).	24
Figure 19: Fenêtre de réglages généraux (onglet Dimensions).	24
Figure 20: Géométrie étudiée	25
Figure 21: Fenêtre des propriétés des matériaux (base de données du projet).	25
Figure 22: Fenêtre des propriétés des sols (onglet General).....	26
Figure 23: représente le maillage du talus.	27
Figure 24: Générer le champ des contraintes effectives initiales.....	28
Figure 25: Fenêtre principale des phases de calcul.	28
Figure 26: Analyse de stabilité par la méthode Phi/c Réduction.	30
Figure 27: Le site du sol.	33
Figure 28: Situation de zone de glissement de sol inférieur.	33
Figure 29: Situation de zone de glissement de sol supérieur.	34
Figure 30: Courbe granulométrique des deux sols.	34
Figure 31 : Représentation schématisée d'un odomètre.....	36
Figure 32: Sol préparé pour l'essai œdométrique.	37
Figure 33: Courbes œdométrique comparatives du sol sup témoin et sol inf témoin.	38

Figure 34: Courbes œdométrique comparatives du sol sup témoin et des sols traités par 12% et 15% de verre.....	39
Figure 35: Courbes œdométrique comparatives du sol sup témoin et des sols traités par 18% et 20% de verre.....	40
Figure 36: Courbes œdométrique comparatives du sol sup témoin et des sols traités par 4% et 8% de chaux activé par NaOH.	41
Figure 37: Courbes œdométrique comparatives du sol inf témoin et des sols traités par 12% et 15% de verre.	42
Figure 38: Courbes œdométrique comparatives du sol inf témoin et des sols traités par 18% et 20% de verre.	43
Figure 39: Courbes œdométrique comparatives du sol inf témoin et des sols traités par 4% et 8% de chaux activé par NaOH.....	44
Figure 40: Appareil de cisaillement	45
Figure 41: Exemple d'étape 1 de préparation de sol avec poudre de verre	46
Figure 42: Exemple d'un échantillon cisailier	47
Figure 43: Courbes de résistance au cisaillement du sol modifié par 12% de verre.....	48
Figure 44: Modèle numérique du profil géotechnique du sol témoin sous plaxis.	50
Figure 45: Modèle numérique du profil géotechnique du sol sup et inf +12% de verre.	51
Figure 46: Champ des déplacements totaux (Utot) pour le cas 12% supérieur et 12% inférieur.....	52
Figure 47: Modèle numérique du profil géotechnique du sol sup 8% chaux et inf 12% de verre.....	52
Figure 48: Champ des déplacements totaux (Utot) pour le cas sol sup 8% chaux +supérieur 12% inférieur.....	53
Figure 49: Modèle numérique du profil géotechnique du sol sup et inf +18% de verre.	54
Figure 50: Champ des déplacements totaux (Utot) pour le cas 18% supérieur et 18% inférieur	54
Figure 51: Maillage du modèle avec numérotation des éléments sous plaxis.	55
Figure 52: Représentation des points de contraintes (conditions aux limites).....	56
Figure 53: Contraintes calculées aux points de l'élément sup 12% et inf 12% verre	56
Figure 54: Contraintes calculées aux points de l'élément Sup 12% et inf 12% verre.....	57
Figure 55: Contraintes calculées aux points de l'élément sup 18% et 18% verre	57
Figure 56: Contraintes calculées aux points de l'élément sup 18% et inf 18% verre.	58
Figure 57: Contraintes calculées aux points de l'élément sup 8% et inf 12%.....	58
Figure 58: Contraintes calculées aux points de l'élément sup 8% et inf 12% verre.....	59
Figure 59: Représentation des points de déplacement	60
Figure 60: Déplacement du point 376 cas 12/12% de verre	60
Figure 61: Déplacement du point 483 cas 12/12% de verre.	61
Figure 62: Déplacement du point 483 cas 8% chaux / 12% de verre.....	61
Figure 63: Déplacement du point 376 cas 8% chaux / 12% de verre.....	61
Figure 64: Déplacement du point 376 cas 18/18% de verre.	61
Figure 65: Déplacement du point 483 cas 18/18% de verre.....	62
Figure 66: Volume du sol sup (cas 12% verre) et sol inf (cas 12% verre).....	63
Figure 67: Volume du sol sup (cas 8% chaux) et sol inf (cas 12% verre).....	63
Figure 68: Volume du sol sup (cas 18% verre) et sol inf (cas 18% verre).	63

Liste des tableaux

Tableau 1: Constituants chimiques des cendres volantes (Behavior et al., 2022).....	4
Tableau 2 : Propriétés techniques du sol, Farah Atiqah Abdul Azam et al, (2024).....	6
Tableau 3: Propriétés physiques du sol de la zone de glissement Wang et al (2025)	7
Tableau 4 : Compactage des échantillons de sol de fondation de Mahle-Nijat, Kandahar. (Halim et al. 2026).....	8
Tableau 5: Limite d'Atterberg et classification des échantillons de sol naturel les systèmes AASHTO et USCS. (Halim et al. 2026).....	8
Tableau 6: Propriétés physiques, consistance, compactage et de résistance du sol. (Halim et al. 2026).	9
Tableau 7: Composition chimique de la chaux hydratée dans l'étude (Halim et al. (2026) , ...	9
Tableau 8: Paramètres de résistance géotechnique utilisés dans l'analyse Liu et al. (2026)	9
Tableau 10: Composition des mélanges de sols traités par poudre de verre et chaux et leur masse volumique sèche.....	35
Tableau 11 : Les résultats de $\Delta\sigma\Delta hH_0$ du sol sup témoin et de sol inf témoin.....	38
Tableau 12: les résultats de $\Delta\sigma\Delta hH_0$ du sol sup témoin et des sols traités par 12% et 15% de verre	39
Tableau 13: Les résultats de $\Delta\sigma\Delta hH_0$ du sol sup témoin et des sols traités par 18% et 20% de verre	40
Tableau 14: Les résultats de $\Delta\sigma/\Delta h H_0$ du sol sup témoin et des sols traités par 4% et 8% de chaux.....	41
Tableau 15: les résultats de $\Delta\sigma\Delta hH_0$ du sol inf et des sols traités par 12% et 15% de verre ..	42
Tableau 16 : les résultats de $\Delta\sigma\Delta hH_0$ du sol inf témoin et des sols traités par 18% et 20% de verre	43
Tableau 17: Les résultats de $\Delta\sigma\Delta hH_0$ du sol inf témoin et des sols traités par 4% et 8% de chaux activé par NaOH.....	44
Tableau 18: Résultats du coefficient de sécurité pour les différents cas de traitement du sol. 55	

Liste des abréviations

USCS : Unified Soil Classification System (Système Unifié de Classification des Sols).

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

RHA : Rice Husk Ash (Cendre de balle de riz).

PET : Polyéthylène Téréphtalate.

LKD : Lime Kiln Dust (Poussière de four à chaux)

NC: Nano Clay (nano argile)

LEM : Limit Equilibrium Method (Méthode d'Équilibre Limite)

C : Cohésion effective.

Φ : Angle de frottement interne effectif.

γ_d : Poids volumique sèche.

A_0 : La surface initiale.

T : L'effort de cisaillement.

A' : La surface cisailée.

τ : La contrainte De cisaillement.

σ : La contrainte normale.

ω : la teneur en eau

F_s : Coefficient de sécurité

Introduction générale

Introduction générale

Dans le domaine de la géotechnique, les propriétés des sols ont une grande importance pour la stabilité des ouvrages, notamment les routes et les infrastructures. Certains sols présentent des faiblesses, comme une faible résistance ou une forte compressibilité, ce qui peut causer des problèmes tels que les tassements ou les glissements de terrain.

La route de La cadat, dans la wilaya de Bouira, en est un exemple. En 2018, elle a été touchée par un glissement de terrain. Depuis, la route est hors service, ce qui montre à quel point il est important d'étudier le comportement du sol dans ces zones et de trouver des solutions pour améliorer sa stabilité.

Pour résoudre ce type de problème, il existe plusieurs méthodes de stabilisation des sols. L'utilisation de liants comme la chaux est une méthode bien connue pour améliorer les caractéristiques mécaniques du sol. L'utilisation de déchets recyclés est également une solution intéressante, surtout dans le contexte du développement durable.

Pour cela, des échantillons de sols ont été prélevés dans la zone étudiée, en distinguant le sol supérieur et le sol inférieur. Ensuite, plusieurs essais de laboratoire de LCTP de bouira ont été réalisés, notamment l'essai de cisaillement et l'essai œdométrique.

Ce travail a pour but d'évaluer l'efficacité de ce type de traitement et de proposer une solution pour améliorer la stabilité des sols, en particulier dans les zones touchées par les glissements de terrain. Le sol est un élément clé pour la stabilité des infrastructures, et la route de Lakadat est un exemple concret de l'importance de prendre en compte les propriétés des sols dans la construction de routes et d'infrastructures.

Ce travail est divisé en trois chapitres étroitement liés :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique, consacrée à Les matériaux de traitement de sol compressible et leurs différents essais sur la mécanique des sols.

Le deuxième chapitre présent le logiciel utilisé pour la modélisation.

Le troisième chapitre est consacré à la partie expérimentale. Il présente les matériaux utilisés ainsi que les résultats des essais œdométriques et de cisaillement réalisés.

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation numérique sous PLAXIS et à l'analyse des résultats obtenus.

Finalement, nous avons obtenu une conclusion générale.

Chapitre I

Synthèse

bibliographique

I. Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

Dans les projets de génie civil, en particulier la construction de routes, de fondations et de structures, les sols occupent une place centrale. Toutefois, certains types de sols qualifiés de compressibles ou faibles se caractérisent par des propriétés peu favorables comme une grande compressibilité, une résistance au cisaillement limitée et une forte réactivité face aux changements d'humidité. Cela peut entraîner des difficultés en matière de stabilité et de continuité des constructions (Halim et al., 2026). En présence de ces contraintes, Blayi et al. (2025) indiquent que l'amélioration des terrains est une étape essentielle avant toute édification. La stabilisation chimique est l'une des méthodes les plus fréquemment employées parmi celles qui sont utilisées. Cela implique l'intégration de liants tels que le ciment, la chaux ou les cendres volantes afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques du sol, notamment en termes de résistance, de portance et de diminution de la compressibilité.

Toutefois, la consommation de matériaux traditionnels entraîne d'importants effets sur l'environnement à cause des émissions de CO₂ et de la forte consommation énergétique. C'est pourquoi un grand nombre d'études actuelles considèrent l'emploi de matériaux durables et alternatifs, notamment les résidus industriels et agricoles (Al-Badrani, 2025).

De plus, de nombreuses recherches ont prouvé que l'alliance de différents liants, tels que la chaux et les cendres volantes, facilite de meilleures performances grâce aux réactions pouzzolaniques qui renforcent la structure du sol et accroissent son durabilité (Halim et al., 2026).

Finalement, la recherche actuelle tend à se tourner vers des solutions novatrices qui combinent performance mécanique et viabilité environnementale. Cela passe notamment par l'emploi de matériaux recyclés et de résidus en tant qu'agents de stabilité, dans le but de satisfaire aux exigences du développement durable dans le monde géotechnique.

I.2 Les matériaux de traitement de sol compressible

(Zha et al., 2008; Jha and Sivapullaiah, 2015) ont utilisés la chaux, La stabilisation du sol par à la chaux commence par un échange de cations, suivi de réactions pouzzolaniques . de même Dans l'étude de Rambabu et al. (2015), les cendres de balle de riz (RHA) constituant riches en silice, révèlent efficaces pour la stabilisation des sols. Selon Fernandes et al. (2016) ainsi que Moraes et al. (2014), leurs performances est liée au processus de combustion, une combustion maîtrisée stimulant leur activité pouzzolanique. Par ailleurs, Jiang et al. (2019), Jittin et al. (2020) ainsi que Kumar Yadav et al. (2017) mettent en exergue que leurs caractéristiques changent en fonction des conditions de production, mais qu'elles peuvent être optimisées.

Par contre Behavior et al. (2022), sa composition est majoritairement basée sur la silice, l'alumine et le calcium, ce qui aide à renforcer les caractéristiques du sol. Le Tableau 1 présente la composition.

Tableau 1: Constituants chimiques des cendres volantes (Behavior et al., 2022).

composant d'oxyde	formule chimique	Class F (%)	Class C (%)
Dioxyde de silicium	SiO ₂	48.6	28.3
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	22.4	15.8
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	9.2	6.6
Oxyde de calcium	CaO	2.2	32.4
Oxyde de magnésium	MgO	1.3	4.2
Trioxyde de soufre	SO ₃	0.9	8.6
Oxyde de sodium	Na ₂ O	0.9	0.3
Oxyde de potassium	K ₂ O	4.1	0.5

Tandis que Akhter et al. (2023) précisent que leur fabrication de balle de riz implique plusieurs phases pour améliorer leur réactivité.

D'un autre coté [Consoli et al. \(2024\)](#), le matériau analysé consiste en un résidu miniers (appelés aussi résidus de minerai de fer) montrant une granulométrie hétérogène et une composition distincte influençant leurs propriétés mécaniques et leur compressibilité, comme le démontre la [figure 1](#)

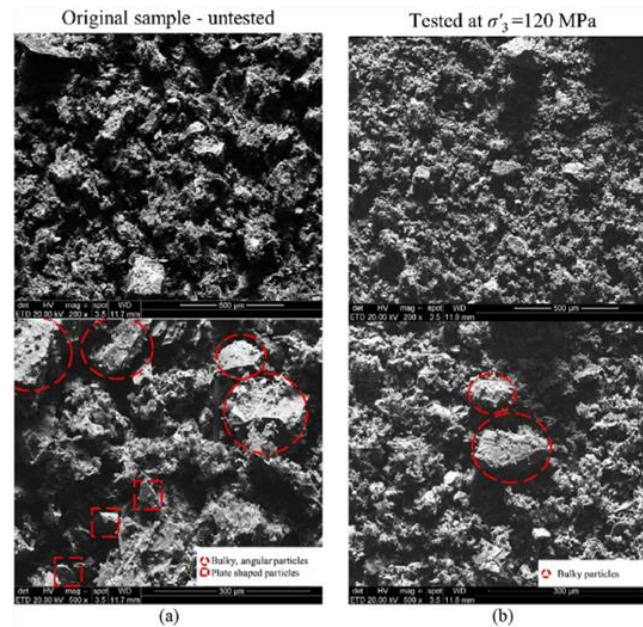


Figure 1: Images MEB des résidus (a) avant et (b) après l'essai à une pression de confinement [Consoli et al. \(2024\)](#)

Par ailleurs, [Consoli et al. \(2024\)](#) indiquent que cette matière peut avoir une modification de sa structure en raison de fortes pressions. Effectivement, la fragmentation des particules génère une hausse des éléments de petite taille et un changement dans la distribution des tailles, ce qui affecte directement les caractéristiques et le fonctionnement du matériau, de plus [Consoli et al. \(2024\)](#), des analyses de disposition granulométrique (PSD) ont été réalisées sur des échantillons de résidus, avant et après la procédure de cisaillement, afin d'examiner l'évolution du matériau. (Voir [figure 2](#))

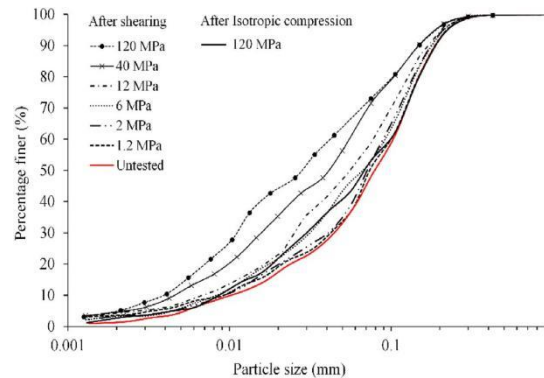


Figure 2: PSD des résidus de minerai de fer non testés et testés [Consoli et al. \(2024\)](#)

Concernant [Farah Atiqah Abdul Azam et al., \(2024\)](#), ont utilisé des déchets organiques et plastiques pour renforcer la stabilité des sols dans une approche technique de durabilité intégrée. Le sol analysé présente une limite de liquidité de 29%, comme le montre le [tableau 7](#).

Tableau 2 : Propriétés techniques du sol, [Farah Atiqah Abdul Azam et al, \(2024\)](#)

Propriétés de l'index clé	Description	Valeurs
Distribution granulométrique Sable limoneux (L/S =2,5)	Gravier (> 2.00 mm)	34.16
	Sable (2.00–0.063 mm)	33.47
	Limon (0.063 – 0.002 mm)	32.08
	Argile < 0.002	0.29
Limite d'Atterberg	Limite de liquide $\omega_l(\%)$	29.51
	Limite de plastique $\omega_p(\%)$	13.01
	Indice de plasticité, I_p	16.50
Poids spécifique	Poids spécifique, γ	2.78
PH	PH	8.13
Propriétés de compactage	Densité sèche maximale (kg/m^3)	1332.2
	Teneur en humidité optimale (%)	8.0%

[Blayi et al. \(2025\)](#), dans ce contexte, l'emploi exclusif du RHA favorise l'amélioration de plusieurs attributs géotechniques du sol, comme la plasticité, la résistance et la compressibilité.

[Graça, C.J.P. et al. \(2025\)](#) a utilisé dans son étude le sable provenant des dunes, un sol naturel et meuble composé majoritairement de quartz et de feldspath, issu de la zone de Praia da Barra au Portugal. Et les déchets plastiques de polyéthylène téréphtalate (PET), issus de bouteilles d'un litre et demi. Ces contenants, comprenant les bouchons et les étiquettes, ont été broyés pour produire des particules granuleuses susceptibles d'être mélangées dans le but d'évaluer l'influence de l'intégration de résidus plastiques recyclés sur les caractéristiques géotechniques du sol.(voir la figure 3)

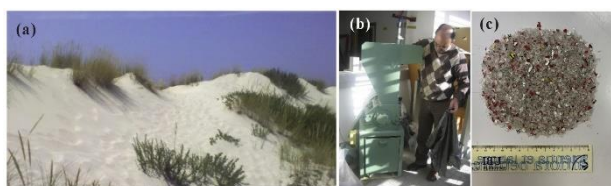


Figure 3: a) Sable de dune, b) concasseur de roches et c) déchets de PET granulé [Graça, C.J.P. et al. \(2025\)](#)

Afin d'étudier le contexte mécanique des sols, [Yang et al., 2025](#) ont traités le sol compressible par les granulats recyclés, pour cela ils ont étudié les caractéristiques mécaniques des matériaux granulaires et l'influence de la forme des particules, réalisée. Cette méthode facilite la compréhension de l'évolution des contraintes et déformations lorsqu'un matériau parvient à un état d'équilibre.

L'analyse tomographie par rayons X (CT scan) de la forme des particules de béton recyclé a permis d'obtenir des représentations exactes de la structure interne des l'échantillons Comme illustré à la Fig. 1, quatre modèles 3D Hao Yang et al, présentant divers niveaux de sphéricité ont été identifiés.

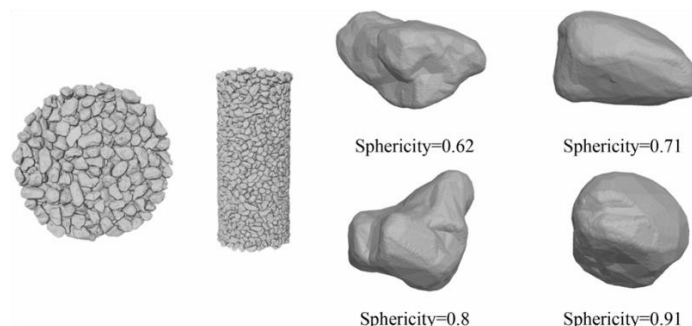


Figure 4: Images de tomographie des échantillons de béton recyclé et quatre images tridimensionnelles extraites de la sphéricité (Hao Yang et al., 2025).

Wang et al (2025) Le sol utilisé est d'origine alluviale et provient de la zone de glissement, caractérisé par sa nature argileuse (argile limoneuse) et se distingue par un taux d'argile plus élevé que celui du limon et du sable (voir tableau 8). Cette configuration rend le sol réceptif aux affects de l'eau et des infiltrations, influençant ainsi son comportement mécanique.

Tableau 3: Propriétés physiques du sol de la zone de glissement Wang et al (2025)

Propriété physique		Value
Masse volumique à sec (g/cm ³)		1.89e2.22
Teneur en eau w (%)		12.01e15.97
Module de compression (kPa)		4.10e14.30
Limites d'Atterberg (%)	w _L	22.03
	w _p	14.58
Rapport de porosité, e		0.44e0.72
Composition des particules (%)	Sand	14.5
	Silt	37
	Clay	48. 50

Selon Zhou et al. (2025), l'argile étudiée est de type molle. Est caractérisé par sa faible résistance et sa forte compressibilité, ce qui exige fréquemment un traitement. Dans le but d'améliorer la qualité du sol, Zhou et al. (2025) ont utilisé au ciment Portland pour créer un sol traité, également désigné sous le nom de sol cimenté. De plus, un superplastifiant a été incorporé afin de rendre le mélange plus homogène et plus facilité manipulable.

D'autre part [Halim et al. \(2026\)](#), il conclut que les différents échantillons de sol collectés possèdent des propriétés géotechniques comparables. Pour une caractérisation plus approfondie, une classification a été effectuée fondée sur la granulométrie et les limites d'Atterberg en utilisant les systèmes USCS et AASHTO, indiquant ainsi le sol en catégorie A-4.

Le [Tableau 4](#) et le [Tableau 5](#) présentent les résultats obtenus. Du fait de cette uniformité, un échantillon représentatif a été choisi pour les tests de stabilisation, dont les attributs sont précisés dans le [Tableau 6](#).

Tableau 4 : Compactage des échantillons de sol de fondation de Mahle-Nijat, Kandahar. ([Halim et al. 2026](#))

S. N	Type sol	Liquide limite (%)	Plastic Limite (%)	Plasticité Index (%)	AASHTO Classification	USCS Classification
1	Lean clay	28.40	18.20	10.2	A-4	CL
2	Lean clay	25.00	20.37	4.63	A-4	CL
3	Lean clay	23.48	16.67	6.81	A-4	CL

Tableau 5: Limite d'Atterberg et classification des échantillons de sol naturel les systèmes AASHTO et USCS. ([Halim et al. 2026](#)).

Propriétés	Représentative Sol (Sample 1)
Distribution de la taille des grains :	
Silt & Clay	79.74
Sable	20.26
Consistance limites :	
Liquide limite (%)	28.4
Limite plastique (%)	18.2
Plasticité index (%)	10.2
Spécifique gravité	2.63
Classification de sol	CL
Caractéristiques de compaction	1.9
Densité sèche maximale (g/cm ³)	
Teneur en humidité optimale (%)	16.6
Résistance :	
CBR trempé (%)	3.6

Tableau 6: Propriétés physiques, consistance, compactage et de résistance du sol. (Halim et al. 2026).

S. N.	type sol	MDD (g/cm ³)	OMC (%)	sable	Limon et argile (%)
1	Lean Clay	1.9	16.6	20.26	79.74
2	Lean Clay	1.802	16.8	11.5	88.5
3	Lean Clay	1.872	15	15.98	84.02

D'après Halim et al. (2026), la chaux hydratée (Ca(OH)₂) utilisé comme agent liant afin d'améliorer les caractéristiques des sols en géotechnique. Dans ses recherches, Le Tableau 5 présente la composition chimique de la chaux commerciale utilise.

Tableau 7: Composition chimique de la chaux hydratée dans l'étude (Halim et al. (2026),

Chemical Composition	Percentage (%)
Calcium hydroxide (Ca (Oh) ₂)	65
Active calcium oxide (Cao)	48
Alumina & iron (Al ₂ o3 & Fe ₂ o3)	1.7
Silica (Si O ₂)	5.2
Magnesium oxide (MgO)	1.5
Calcium carbonate (Ca Co 3)	3.5

Par contre l'étude menée par Liu et al. (2026), ils se basent sur une série de caractéristiques du sol telles que la cohésion (c), l'angle de frottement interne (ϕ) et le poids volumétrique (γ). Ils ont utilisé plusieurs valeurs pour ces coefficients, comme précisé dans le tableau 4, dans le but d'analyser leur impact sur la stabilité des pentes.

Tableau 8: Paramètres de résistance géotechnique utilisés dans l'analyse Liu et al. (2026).

Group	Cohésion, c/kPa	Angle de frottement interne, ϕ /(°)	Poids unitaire, γ /(kN/m ³)	Hauteur équivalente, H*/m
1	76.3	17	19	17
2	114.66	26	23	17
3	519.5	63	23	17

I.3. Les investigations sur les sols compressibles

Dans son étude sur la stabilisation d'un sol de fondation faible à l'aide de la chaux et des cendres volantes Une série complète de tests en laboratoire a été menée par [Halim et al. \(2026\)](#) pour révèle que l'analyse granulométrique, effectuée par tamisage, met en évidence la majorité des particules fines dans le sol examiné.

De plus dans autre étude, [Graça, C.J.P. et al. \(2025\)](#) a été réalisée l'analyse granulaire en utilisant la méthode de tamisage à sec sur un sable dunaire mélangé à des déchets de PET (bouteilles plastiques broyées) afin de déterminer la distribution des tailles de grains au sein de l'échantillon.

L'essai des limites d'Atterberg a été réalisé sur un sol naturel et un sol traité, respectant la norme ASTM. La limite de liquidité (LL) a été établie en utilisant l'appareil de Casagrande, alors que la limite de plasticité (PL) a été déterminée à la main.

Le calcul de l'indice de plasticité (IP) a aussi été effectué selon la différence entre LL et PL. Les expériences ont été menées deux fois afin d'assurer la fiabilité des résultats, et c'est la moyenne finale qui a été retenue. [Halim et al. \(2026\)](#)

En ce qui concerne la recherche de [Rahimabadi et al. \(2026\)](#), des échantillons de sol kaolinique ont été préparés, puis exposé à un traitement avec différentes quantités de nanoargile (NC) et un résidu de four à chaux (LKD). Après avoir homogénéisé le mélange et effectué une phase de cure, les limites d'Atterberg ont été établies pour évaluer l'effet de ces ajouts sur les caractéristiques physiques du sol, notamment sa plasticité et son indice de plasticité.

Pour stabiliser les sols gonflés, [Raza et al. \(2026\)](#) ont formulé des mélanges de sol gonflé intégrant divers déchets plastiques (LDPE, HDPE, PVC) en proportions variées, suivi de l'ajout de chaux en quantités limitées. Par la suite, des analyses d'Atterberg ont été réalisées sur chaque combinaison afin de mesurer la réduction de l'indice de plasticité et l'amélioration de la stabilité du sol.

Comme l'indiquent Halim et al. (2026), les propriétés de compactage des sols argileux maigre naturels et stabilisés à la chaux hydratée et aux cendres volantes ont été définies en utilisant le test Proctor modifié, conformément à la norme ASTM D1557. La recherche a servi à déterminer la densité sèche maximale $\gamma_{d\ max}$ et le taux d'humidité optimal (teneur en eau optimal).

Le compactage a été exécuté en cinq couches, avec 25 frappes appliquées à chaque niveau grâce à un marteau uniformisé, garantissant de cette manière une énergie de compactage stable, compagne de halim figure en (Figures 5).



Figure 5 : Protocole de compactage Halim et al. (2026).

Selon Graça et al. (2025), en examinant l'impact de l'incorporation du PET sur la compactibilité du sol, il a utilisé le test Proctor, avec une énergie de compactage standard de $584,5\text{ kN/m}^2$ a été mise en œuvre sur trois couches de l'échantillon, dans l'intention d'établir la densité sèche maximale et le taux d'humidité idéal,

L'essai CBR a été effectué sur le sol naturel et les sols stabilisés en accord avec la norme ASTM D1883. Les échantillons ont été densifiés à leur teneur en eau excellente dans les moules, puis exposés à l'immersion durant 96 heures pour reproduire un environnement très humide. Cette étude a servi à mesurer la résistance du sol et l'efficacité de la stabilisation à l'aide de la chaux



Figure 6: Procédure de test du rapport de palier en Californie (CBR) Halim et al. (2026)

et des cendres volantes, et un échantillon représentatif de sol argileux (CL) a été choisi comme référence.

Les observations de [Halim et al. \(2026\)](#) ont démontré une progression notable du CBR, liée aux interactions chimiques entre les stabilisants, ce qui a contribué à améliorer la solidité du sol. (voir la figure 6).

[Raza et al. \(2026\)](#), ont utilisé l'essai de portance du sol pour mesurer la résistance du sol naturel et traité. Les échantillons ont été compactés à la densité sèche maximale, puis immergés pendant une durée de 96 heures avant d'être soumis à un essai de pénétration. Le CBR immergé (soaked CBR) a été déterminé dans le but d'examiner la résistance du sol.

Par ailleurs, la recherche sur laquelle se base [Blayi et al. \(2025\)](#) consiste à préparer des sols argileux en ajoutant de la cendre de paille de riz (RHA), dans des proportions allant généralement de 5 % à 20 %. Après mélange et pressage, un test de rapport CBR a été effectué pour chaque rapport, en le comparant afin de déterminer le rapport idéal qui offre la meilleure résistance.

Dans cette étude, [Zhou et al. \(2025\)](#) ont effectué des tests de cisaillement directs sur des échantillons miniatures afin d'analyser le comportement du sol face à diverses contraintes verticales. Ils ont appliqué des valeurs de 50, 150 et 250 kPa afin d'évaluer l'impact de ces pressions sur la résistance au cisaillement. (voir la figure 7)

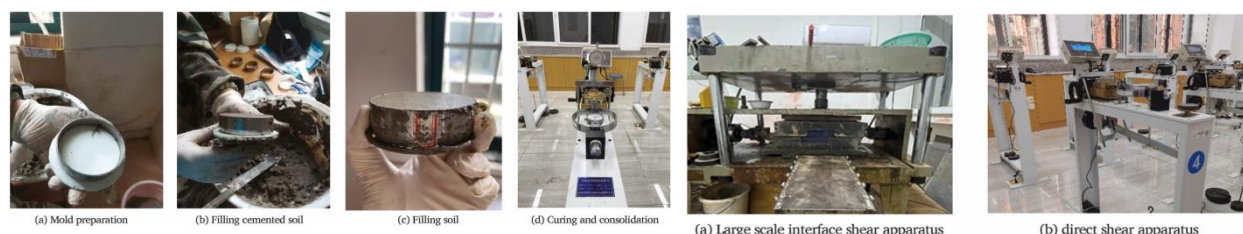


Figure 7: Préparation d'échantillons à interface de cisaillement directe [Zhou et al. \(2025\)](#)

Le cisaillement à grande échelle afin d'appréhender le comportement de l'interface entre le sol / sol, [Zhou et al \(2025\)](#), dans ce contexte, ils ont réalisé une expérience, qualifiée plus près de la réalité. L'échantillon a été positionné dans un appareil spécifique et une pression verticale progressive a été exercée jusqu'à obtenir 150 kPa, assurant de ce fait la stabilité de la matière avant le commencement du cisaillement. Par la suite, la partie inférieure a été déplacée à une vitesse constante de 1 mm/min, tandis que la partie supérieure restait fixe. L'expérimentation s'est poursuivie jusqu'à ce que le déplacement atteigne 40 mm Cette approche a autorisé une observation minutieuse de l'évolution de la contrainte de cisaillement et l'établissement précis de la résistance au cisaillement de l'interface. (voir figure 8) .

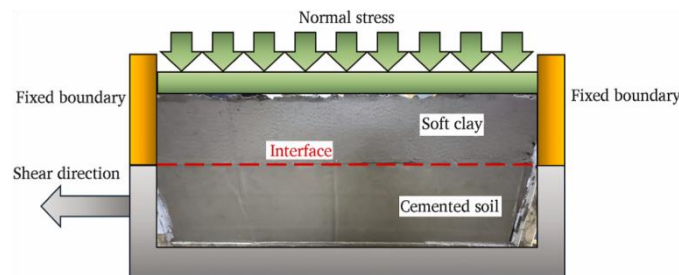


Figure 8: Schéma de l'expérience de cisaillement d'interface à grande échelle
[Zhou et al \(2025\)](#).

De sa part [Graça et al. \(2025\)](#), ont mené un test de cisaillement direct sur des échantillons saturés soumis à plusieurs pressions verticales avant de les cisailier, dans but d'examiner la résistance du sol et l'impact de l'incorporation du PET.

[Wang et al \(2025\)](#) expliquent le protocole de son expérience de cisaillement direct menée un sol de la zone de glissement de type argile limoneuse en utilisant une pression verticale suffisante pour assurer la stabilité de l'échantillon, puis en le déplaçant de manière horizontale à un rythme constant jusqu'à ce qu'il atteigne une certaine intensité de déplacement. Durant leur démarche, l'évolution de la perméabilité du sol a été suivie en quantifiant le volume d'eau qui en est extrait, étant donné que ses caractéristiques ne demeurent pas fixes mais se modifient plutôt au fur et à mesure que la déformation progresse.

Tao Luo et al (2026) ont prélevé un échantillon à une profondeur réduite à l'intérieur du puits, qui s'est révélé être un sol argileux alluvial à haute teneur en eau, pour assurer l'exactitude des résultats, ils ont procédé à une nouvelle préparation des échantillons en conservant les mêmes caractéristiques naturelles, telles que la densité et le taux d'humidité. Par la suite, l'échantillon a été positionné dans le mécanisme de cisaillement annulaire (voir figure 9) et a d'abord été soumis à la phase de cohésion sous une pression de 800 kPa jusqu'à ce qu'il parvienne à un état stable. Ensuite, des essais de cisaillement ont été réalisés sous quatre niveaux distincts de contrainte normale et à une vitesse constante, dans le but d'étudier le comportement du sol durant l'opération de cisaillement.

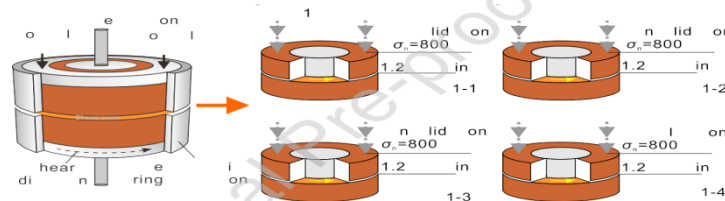


Figure 9: Schémas d'essai de cisaillement du sol de la zone de glissement
Tao Luo et al (2026)

Des tests de compression non confinés réalisés pour adapter le modèle numérique du sol cimenté sol cimenté à base d'argile molle et de ciment Portland P42.5. Zhou et al (2025) Ils ont utilisé un échantillon cubique sur lequel ils ont exercé une pression en fonction de critères précis, puis ils ont mis en parallèle les résultats expérimentaux avec ceux issus de la simulation dans le but d'analyser l'impact de plusieurs facteurs sur le comportement du sol. (voir figure 10) . Pour Zhang et al (2026). Ils réalisent l'essai de compression en plein air sur des échantillons de sol cimentaire à des pourcentages de 8 %, 13 %, 15 % après deux périodes de traitement (7 et 28 jours) pour mesurer la modification de sa résistance en vérifiant sa capacité à résister à la pression.

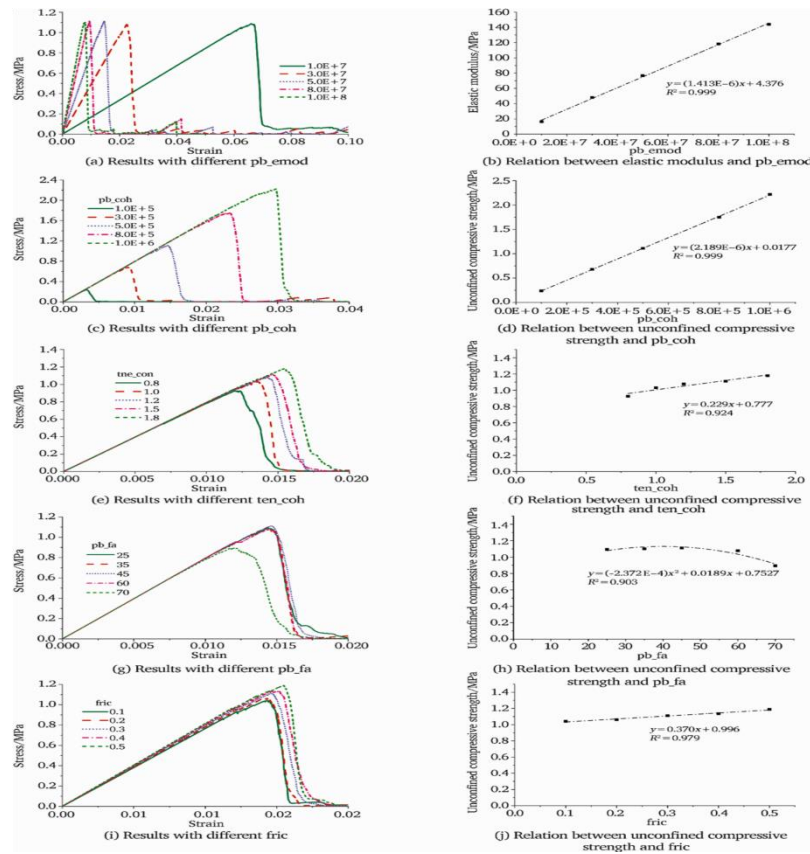


Figure 10: Résultats de simulation d'un essai compressé incertain du sol assuré Zhou et al. (2025)

Graça et al (2025) conclut que le PET pur présente une forte compressibilité comparativement à d'autres matériaux, tandis que l'inclusion minime (3% et 5%) n'a pas un impact considérable sur le comportement du sol. Les mélanges préservent les caractéristiques du sable dunaire renforcé par du PET, étant donné que le coefficient de compression reste bas.

Dans leur recherche, Huan Liu et Ze Liu détaillent qu'ils ont utilisé l'approche de l'équilibre marginal (LEM) pour examiner la stabilité des pentes. Ils ont segmenté le bloc incliné en plusieurs petites sections, puis examiné les forces appliquées sur chaque section, tant les forces motrices que les forces résistantes. Grâce à cette balance des forces, ils ont pu estimer le coefficient de sécurité et établir la stabilité de la pente.

I.4. Les résultats et discussion revue

La finalité de l'étude de [Zhou et al \(2025\)](#). Sur le comportement au cisaillement, est variable et influencée par la dimension de l'échantillon, car pour les spécimens de grande taille, la contrainte croît graduellement avec l'accroissement du déplacement jusqu'à ce qu'une valeur stable soit obtenue ([voir figure 11](#)). Dans les petits échantillons, la tension dépasse rapidement pour atteindre une valeur élevée avant de redescendre à un niveau plus bas ([voir figure 12](#)).

Cela signifie que l'évolution de la résistance au cisaillement est fortement dépendante de la dimension de l'échantillon.

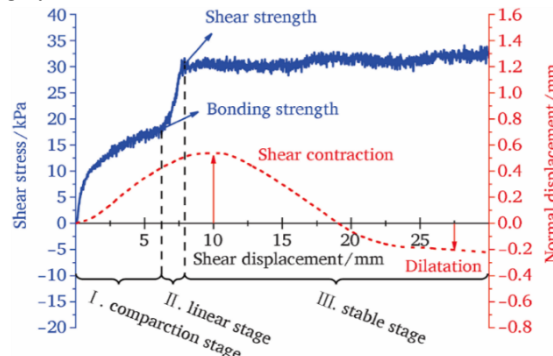


Figure 11: Courbe contrainte-déplacement de cisaillement dans une expérience de cisaillement d'interface à grande échelle. [Zhou et al \(2025\)](#).

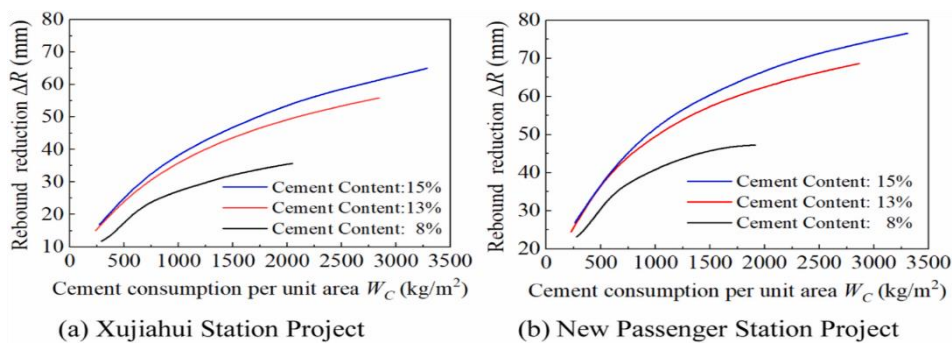


Figure 12: Résultats de cisaillement direct à l'interface sol-sol cimenté. [Zhou et al \(2025\)](#).

D'après les résultats [Zhang et al \(2026\)](#) exposés à la [Fig. 13](#), l'efficacité du renforcement des sols est liée non seulement à la quantité de ciment, mais également à la technique de répartition utilisée. Il a été démontré que, pour une même quantité de ciment, accroître la proportion de ciment tout en diminuant la profondeur du traitement entraîne une plus grande amélioration dans la diminution de la déformation par rapport à l'application à une plus grande profondeur à un taux inférieur. Il est possible d'affirmer que l'optimisation des performances est essentiellement réalisée en concentrant le matériel à petite échelle plutôt qu'en le dispersant sur un volume plus grand.

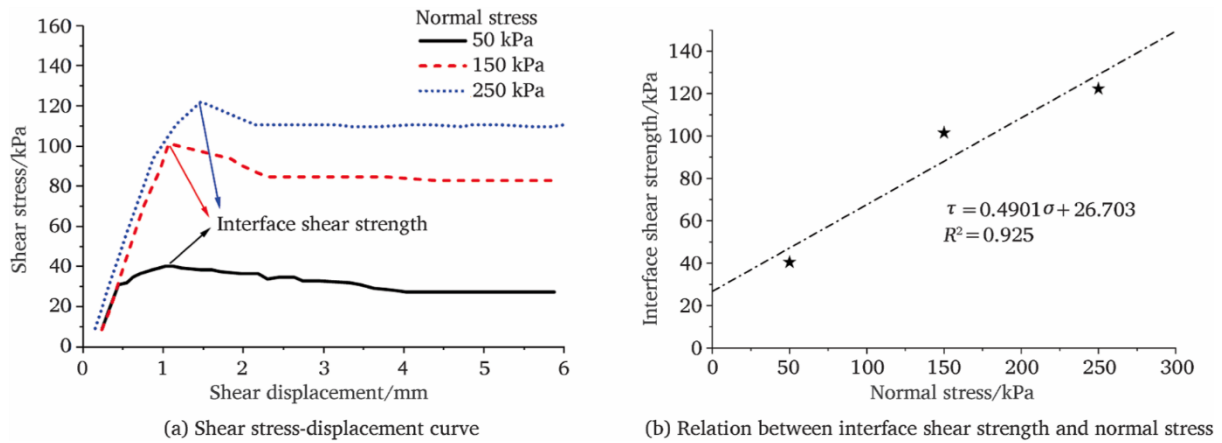


Figure 13: Relation entre la consommation de ciment par unité de surface et la réduction du rebond. Zhang et al (2026)

Dans le même contexte, les résultats confirment que (Fig. 14) le délai de traitement n'est pas l'unique élément déterminant, sa brièveté peut être réduite par une augmentation de la quantité de ciment. L'utilisation de 15% pendant une semaine offre de meilleures performances que le contenu de moindre quantité, même sur une durée de 28 jours. Cela signifie que l'accroissement de la composition en ciment stimule l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol, facilitant ainsi la mise en œuvre des solutions efficaces même dans les projets à court terme.

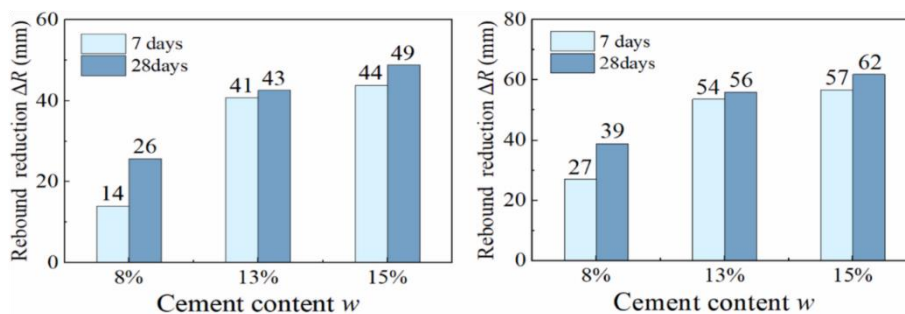


Figure 14: Effet du temps de durcissement et de la teneur en ciment sur la réduction du rebond Zhang et al (2026)

La résistance à la compression (SCU) se renforce à mesure que la quantité de ciment augmente et que la durée du durcissement s'allonge, indiquant une amélioration de la. L'analyse montre aussi que le coefficient de gonflement (κ) se réduit lorsque la quantité de ciment augmente, signifiant ainsi une moindre sensibilité du sol à la déformation. (Voir figure 15)

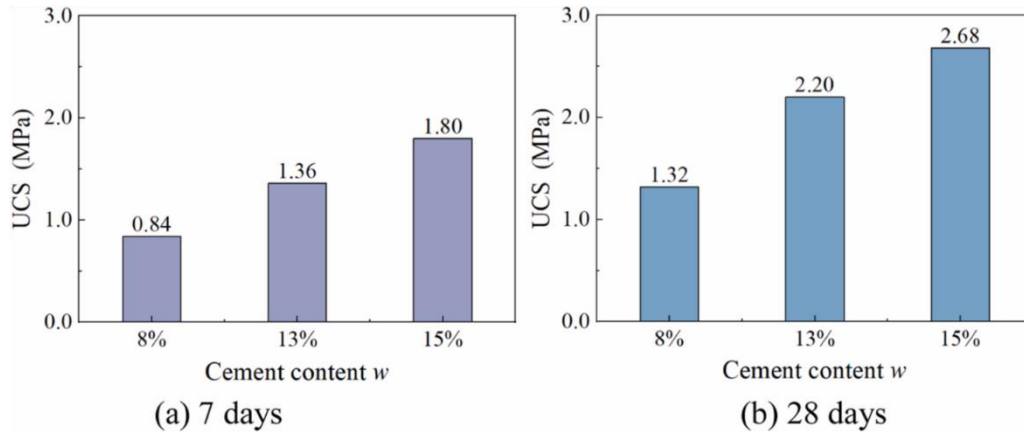


Figure 15: SCU du sol-ciment avec différents ciments Zhang et al (2026)

Selon Zhou et al (2025). Pour ce comportement, une relation mathématique sous forme de fonction exponentielle reliant la dimension de l'échantillon à la résistance au cisaillement a été proposée. Cette formule pourrait être utilisée pour rectifier les résultats des expériences de petite envergure

$$y = 71,401e^{\left(\frac{x}{85,742}\right)} + 27,152$$

Tao Luo et al (2026), précisent que le sol dans la zone de glissement subit diverses phases pendant le processus de rupture. Au début, le sol présente un comportement flexible et atteint vite sa résistance maximale, par la suite, sa résistance commence à se réduire progressivement à cause du processus d'adoucissement (ramollissement par déformation), étant donné que la structure du sol se dégrade au fur et à mesure de l'avancement. A la fin, le sol atteint une valeur minimale connue sous le nom de résistance résiduelle, qui illustre la diminution significative de sa capacité à résister au cisaillement.

Selon Tao Luo et al (2026), une élévation des contraintes normales rend le sol plus compact et renforce sa résistance au glissement, car les particules deviennent plus solides et moins susceptibles de se déformer. (Voir figure 16)

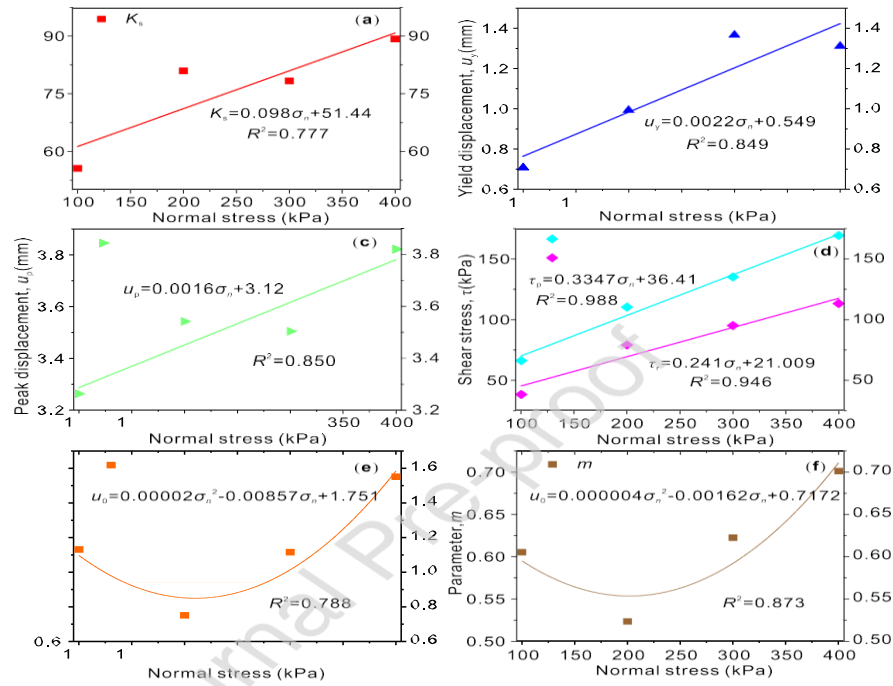


Figure 16: Paramètres des caractéristiques de cisaillement. [Tao Luo et al \(2026\)](#),

I.5. Conclusion

Cette partie de la bibliographie réalisée nous a permis d'avoir une idée générale sur les sols compressibles et les méthodes présentées pour améliorer leurs caractéristiques. D'après les différentes recherches examinées, nous avons noté que l'emploi de divers produits de traitement, tels que la chaux et la fine de verre, pourrait favoriser l'amélioration des propriétés du sol. Ces données nous ont donné une base de travail pour poursuivre notre recherche expérimentale.

Chapitre II
Présentation de
logiciel utilise pour la
modélisation

II.1. Logiciel utilisé pour la modélisation

▪ Présentation de logiciel Plaxis

PLAXIS est un logiciel numérique conçu pour les analyses géotechniques, reposant sur la technique de la méthode des éléments finis (FEM). Ce programme est formulé pour simuler le comportement des sols et des structures géotechniques dans différents environnements et conditions de charge.

Avec ses compétences de modélisation avancées, PLAXIS est fréquemment employé dans les initiatives d'ingénierie géotechnique afin d'examiner divers types de structures comme les fondations, les pentes, les excavations, les murs de soutien, les barrages et les tunnels.

Plusieurs modèles constitutifs sont disponibles dans le logiciel pour expliquer le comportement des matériaux géotechniques en fonction de leurs propriétés physiques et mécaniques. Il permet aussi d'examiner divers paramètres essentiels comme les contraintes internes, les mouvements, les déformations et la stabilité générale des structures examinées.

Pour cette recherche, PLAXIS a contribué à modéliser le comportement des deux genres de sols analysés, avant et après leur modification grâce à l'incorporation de résidus de verre et de chaux en divers pourcentages. Les paramètres associés dans le modèle numérique sont issus des essais de cisaillement effectués en laboratoire, afin d'analyser l'impact de ces ajouts sur la solidité mécanique et la stabilité du sol.

II.2. Les Etapes d'application sur plaxis

1. Le programme d'entrée des données (INPUT)

L'image suivante ([Figure 17](#)) illustre la fenêtre principale de l'application Input du logiciel PLAXIS. Ce cadre sert de milieu principal pour l'élaboration et la détermination du modèle géométrique à examiner. Elle donne à l'utilisateur la possibilité de saisir toutes les informations nécessaires avant le déroulement des calculs numériques.

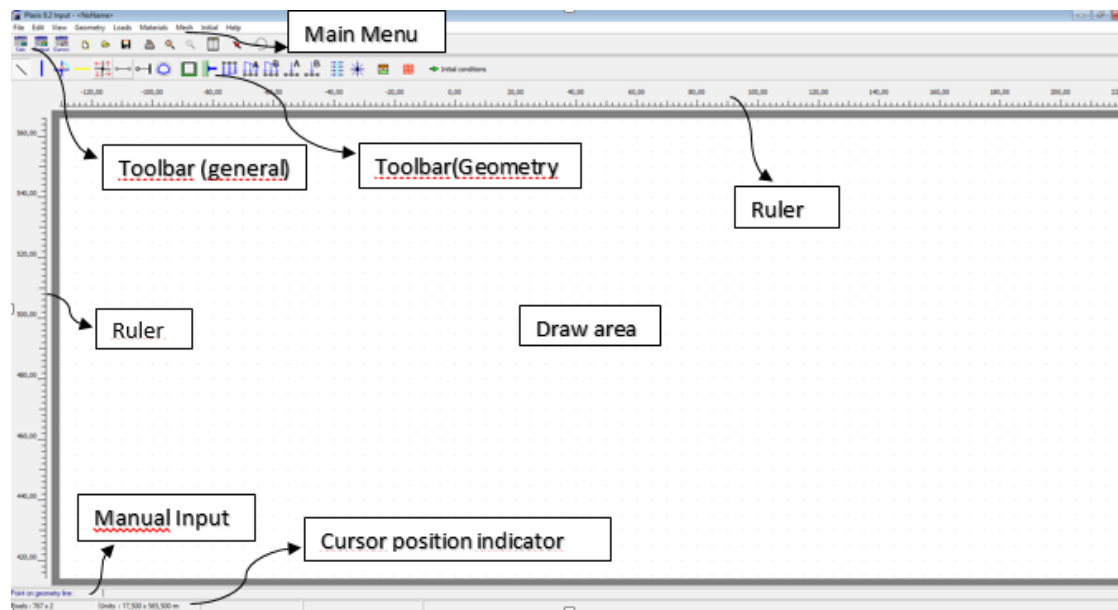


Figure 17: Fenêtre principale du programme d'entrée des données (Input) (mode de création géométrique).

Menu d'entrée des données (MAIN MENU): Le menu Input contient tous les éléments sur les données et les opérations du programme Input.

- **Barre d'outils générale (General Toolbar) :** Cette barre comporte les symboles liés aux actions habituelles comme l'ouverture et la sauvegarde des fichiers, l'impression, les opérations de zoom, de même que les outils de choix des éléments.
- **Barre d'outils de géométrie (Geometry Toolbar) :** Elle rassemble les outils employés pour concevoir et modifier la géométrie du modèle.
- **Rulers :** Des lignes horizontales et verticales sont placées respectivement sur les parties supérieures et latérales de l'aire de dessin. Elles présentent les coordonnées physiques en fonction des axes (x) et (y), accordant de ce fait une représentation instantanée des dimensions du modèle géométrique.
- **Le menu d'entrée des données (INPUT) :** Le menu principal du logiciel de saisie de données comprend des menus déroulants liés à la plupart des options pour le traitement de fichiers, le transfert de données, l'affichage de graphiques, et la création.

Un modèle géométrique génère des maillages d'éléments finis et introduit des données globalement. On peut différencier le menu pour la création de la géométrie du menu des conditions initiales. Le premier inclut les menus Fichier, Édition, Affichage, Géométrie, Charges, Matériaux, Maillage, Initial et Aide.

Le second, lui, est constitué des menus Fichier, Modifier, Affichage, Géométrie, Générer et Aide.

Le menu File : Apporte la possibilité de mettre en place un nouveau projet, de charger un projet déjà existant, d'enregistrer le projet actuel sous son nom original, d'imprimer le schéma géométrique sur une imprimante sélectionnée et donne également l'option de fermer le logiciel Input...

Le menu Édit : Autorise la remise à l'état antérieur du modèle géométrique et offre la possibilité de dupliquer le modèle géométrique dans le presse-papiers Windows.

Le menu view : Autorise le zoom sur une zone rectangulaire (le programme va inclure la surface sélectionnée), restaurer la vue qui a précédé le dernier agrandissement, visualiser le tableau des coordonnées x et y de chacun des points de la géométrie et activer ou désactiver les flèches indiquant les axes x et y.

Le menu Geometry : Ce menu comprend les options fondamentales pour la création d'un modèle géométrique.

Le menu loads : Le menu loads inclut les options pour ajouter des charges et des Conditions aux frontières appliquées au modèle géométrique.

Menu des Matériels : Le menu des Matériels permet d'activer la base de données concernant la création et la modification des propriétés des matériaux pour les sols, interfaces, plaques, géogrilles et ancrages.

Le menu Mesh: Ce menu donne accès à des options pour spécifier le genre d'éléments (à 6 ou 15 nœuds), pour produire un maillage d'éléments finis ou pour mettre en place un raffinement de maillage local ou général.

Le menu initial : Le menu initial donne accès au menu des conditions de départ du programme Input.

2. Paramètres généraux du projet (General Settings)

Dans cette partie, la première étape consiste à créer un nouveau projet dans le logiciel PLAXIS version 8. La fenêtre des réglages généraux (General settings) apparaît lors de la création d'un nouveau projet et peut être ouverte depuis le menu File.

L'étude des talus comportant une section stable a conduit au choix du modèle Plane Strain, qui est particulièrement approprié dans ce cadre. L'utilisation d'éléments de type 15-Node Eléments a également été choisie dans le but d'augmenter la précision des calculs.

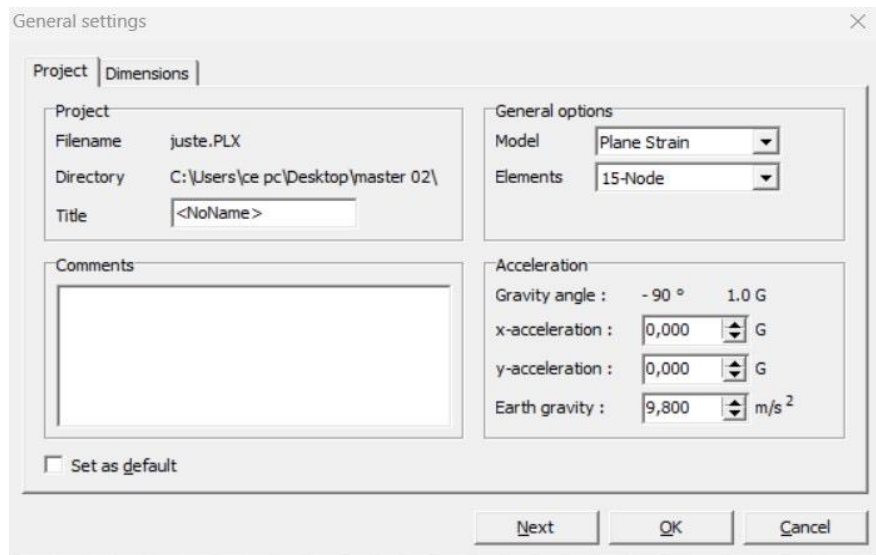


Figure 18 : Fenêtre de réglages généraux (onglet Project).

Suite à la création du projet, les dimensions du cadre de calcul ont été déterminées via le menu « Dimensions ». De PLAXIS. Les limites géométriques du modèle ont été fixées à **-90 m** à gauche (Left), **180 m** à droite (Right), **-470 m** en profondeur (Bottom) et **510 m** en hauteur (Top). Par ailleurs, un espacement de grille de **5 m** avec **10 intervalles de capture (Snap intervals)** a été retenu afin de faciliter la construction de la géométrie du modèle (Figure 19).

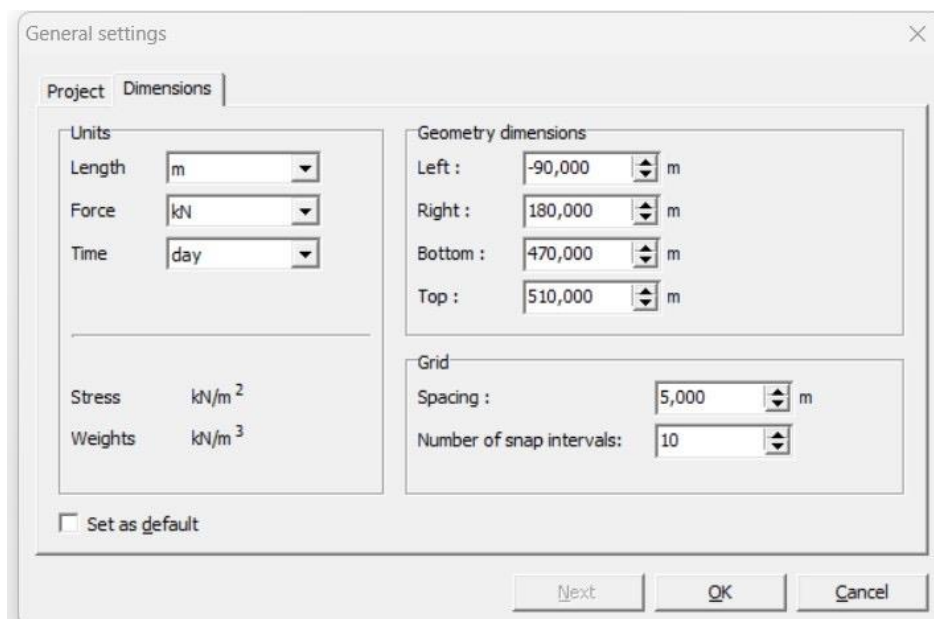


Figure 19: Fenêtre de réglages généraux (onglet Dimensions).

3. La géométrie du talus

Par la suite, la configuration du talus (Figure 20) a été créée à l'aide de l'interface graphique de PLAXIS. Les diverses lignes et points ont été dessinés pour illustrer la configuration du talus

ainsi que les deux strates de sol examinées : le sol superficiel et le sol profond. Cette phase a facilité l'établissement de l'arrangement géométrique employé dans l'analyse.

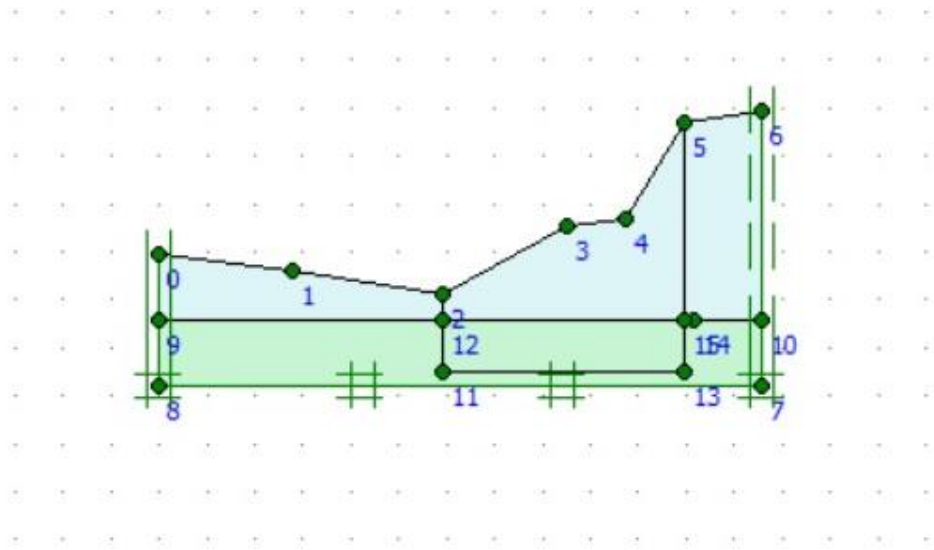


Figure 20: Géométrie étudiée

4. Propriétés des matériaux

Dans PLAXIS, les propriétés du sol et les propriétés des matériaux des structures sont toutes Stockées dans une base de données (Figure 21). Il y a deux types différents de sol (sol supérieur et sol inférieur) modifiés par 12%, 15%, 18%, 20% de poudre de verre et 8% de la chaux activé

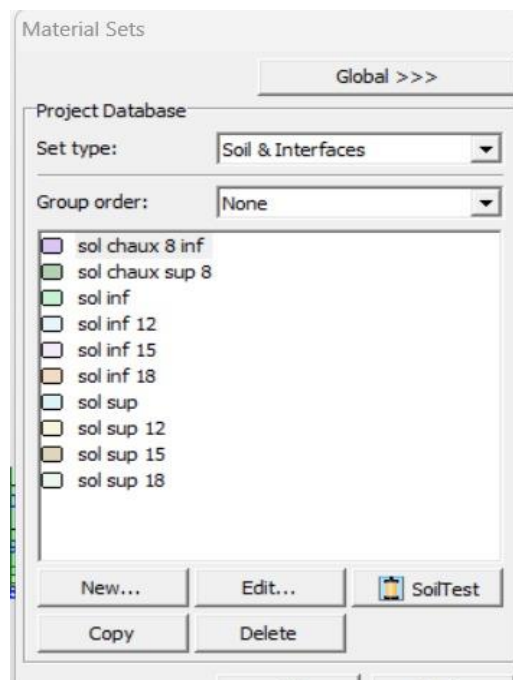


Figure 21: Fenêtre des propriétés des matériaux (base de données du projet).

par Na OH . A partir de la base de données, ces paramètres peuvent être assignés à des Couches de sol, ou aux Éléments de structure dans le modèle géométrique.

5. Modélisation du comportement d'un sol

Le système bien établi de Mohr Coulomb peut être vue comme une approximation de premier niveau du comportement effectif du sol. Ce modèle, qui est entièrement plastique, exige cinq paramètres essentiels (Figure 22) le module d'Young, E , le coefficient de Poisson, ν , la cohésion, c , l'angle de friction, ϕ , et l'angle de dilatation, ψ . De plus, PLAXIS inclut des modèles de sols plus sophistiqués ; vous trouverez une description de ces modèles et de leurs paramètres dans le guide des Modèles Matériaux.

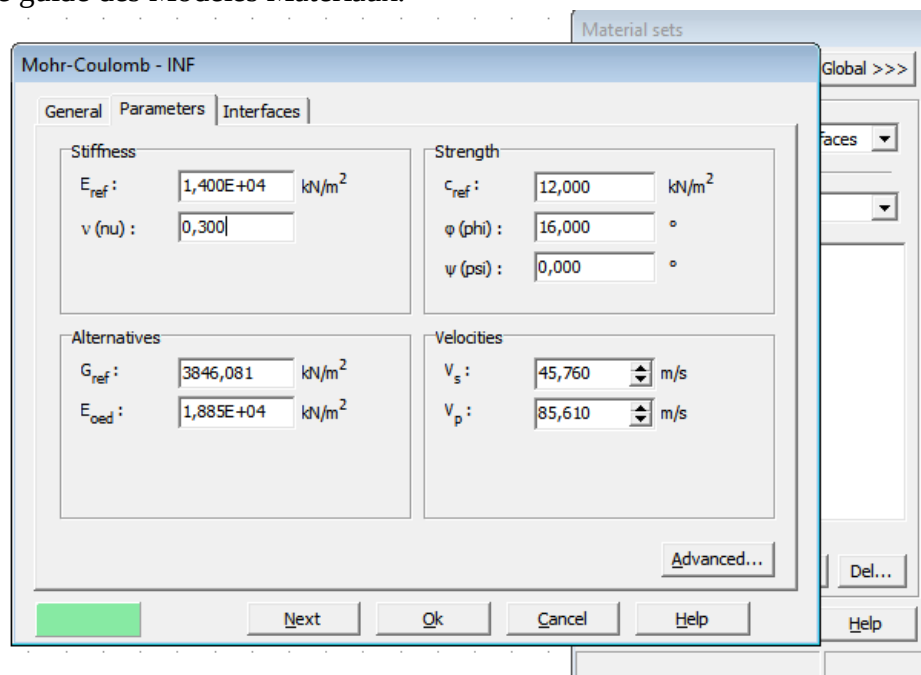


Figure 22: Fenêtre des propriétés des sols (onglet General).

6. Génération du maillage (Mesh)

Après avoir établi la géométrie et les matériaux, PLAXIS a généré automatiquement une grille. Le modèle a été divisé en divers composants triangulaires (Figure 23) afin de pouvoir appliquer la technique des éléments finis. Cette étape est indispensable pour garantir l'exactitude des calculs et la représentation du comportement du sol.

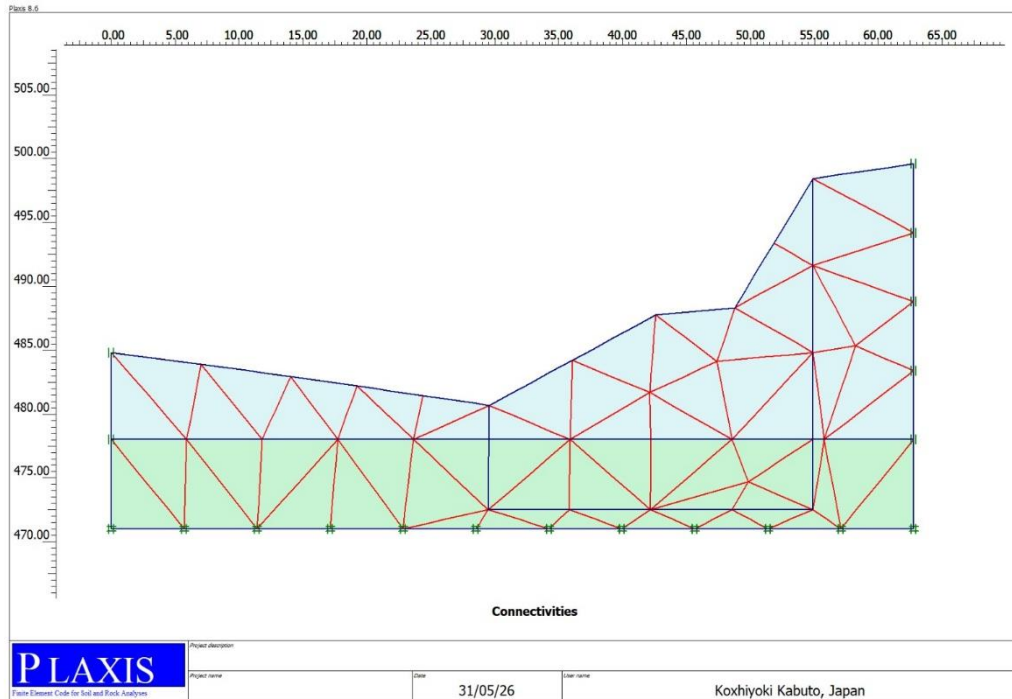


Figure 23: représente le maillage du talus.

7. Analyse des contraintes effectives

Suite à la réalisation des calculs, on a utilisé le module Output de PLAXIS pour visualiser les contraintes effectives. La (figure 24) illustre la distribution des contraintes dans le talus.

Il est manifeste que les contraintes sont plus significatives dans la zone basse du modèle, particulièrement au point du pied du talus, à l'endroit où le poids des strates de sol engendre des tensions plus importantes. Au contraire, les contraintes tendent à se réduire graduellement en direction de la surface.

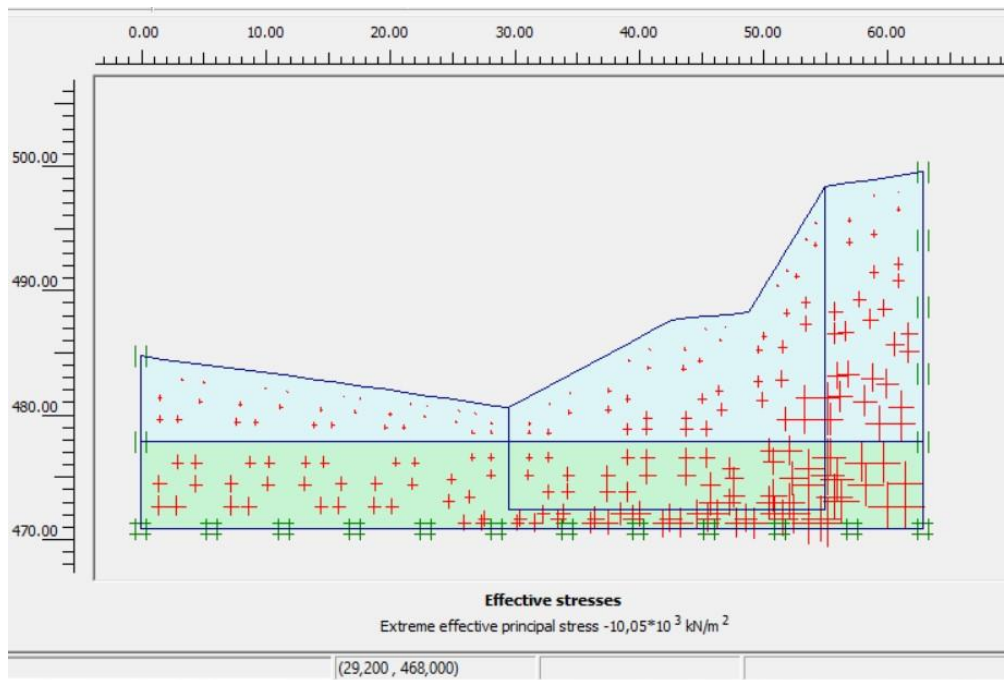


Figure 24: Générer le champ des contraintes effectives initiales.

8. Définition des phases de calcul

L'étape de calcul ont par la suite été conçues dans l'onglet « Calculations ». Pour chaque cas examiné, une analyse plastique a été réalisée. On a recours à la technique de Construction Progressive pour simuler de manière graduelle diverses configurations du sol naturel et du sol modifié, en utilisant divers pourcentages de modifications.

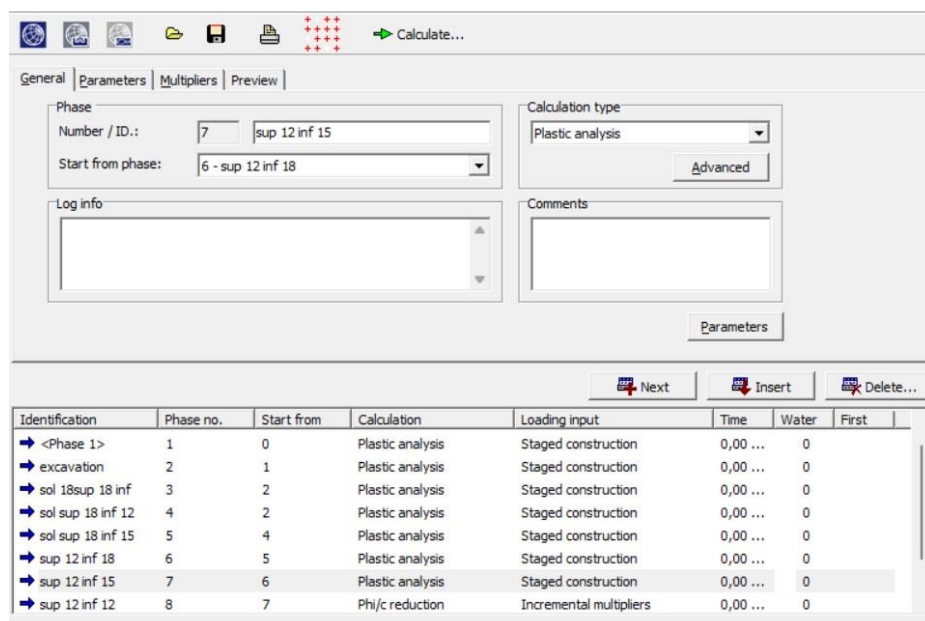


Figure 25: Fenêtre principale des phases de calcul.

9. Calcul de coefficient de sécurité (ϕ_i - c_i réduction)

Dans PLAXIS, on peut effectuer un calcul de facteur de sécurité en diminuant les caractéristiques de résistance du sol. On désigne cette procédure sous le nom de réduction ϕ - c , qui s'apparente à une forme de calcul autonome. La sélection du calcul du coefficient de sécurité (réduction ϕ - c) est nécessaire lorsque l'utilisateur désire déterminer un coefficient de sécurité global pour une situation spécifique. Il est possible de conduire une analyse de sécurité après chaque phase de calcul individuelle, et par conséquent, après chaque étape de construction. Il faut cependant souligner qu'une phase de réduction ϕ - c ne peut pas être employée comme point de départ pour une autre étape de calcul puisqu'elle conclut sur une situation de rupture. Il est donc recommandé de positionner toutes les évaluations de sécurité à l'extrémité de la séquence des étapes de calcul et de recourir au paramètre Démarrer à partir de la phase pour établir la phase de référence pour chacune des phases d'analyse du coefficient de sécurité.

Lors du calcul d'un coefficient de sécurité, il n'est pas possible d'augmenter la charge. En réalité, le calcul ϕ - c réduction est une forme spécifique de calcul plastique. Dans ce contexte, l'entrée d'un pas de temps n'a généralement pas de signification.

Quand on choisit la réduction ϕ - c dans des projets intégrant des modèles de sol sophistiqués, ces derniers se comportent en réalité comme le modèle traditionnel de Mohr-Coulomb, étant donné que l'analyse ne tient pas compte du comportement lié à la rigidité en fonction des

contraintes et des effets reliés à l'équipement. La rigidité est déterminée au commencement de la phase de calcul et demeure inchangée jusqu'à la fin de cette dernière

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water	First
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0	0
✓ <Phase 1>	1	0	Phi/c reduction	Incremental multipliers	0,00 ...	0	1
✓ excavation	2	1	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	0	101
✓ sol 18sup 18 inf	3	2	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	0	106
✓ sol sup 18 inf 12	4	2	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	0	116
✓ sol sup 18 inf 15	5	4	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	0	126
✓ sup 12 inf 18	6	5	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	0	137
✓ sup 12 inf 15	7	6	Plastic analysis	Staged construction	0,00 ...	0	148

Figure 26 : Analyse de stabilité par la méthode Phi/c Réduction.

10. Le programme de résultats (OUTPUT)

En conclusion, les résultats obtenus ont été représentés dans l'onglet « Output » de PLAXIS. L'étude s'est concentrée sur la distribution des contraintes réelles, les mouvements et le coefficient de sécurité. Par la suite, une comparaison a été exécutée entre le sol naturel et les sols traités pour analyser l'impact de la chaux et des résidus de verre sur le renforcement de la stabilité du talus.

Chapitre III

Etude

Expérimentale

III. Etude expérimental

III.1 Introduction

Dans cette partie expérimentale, nous exposons le fondement des données ainsi que les propriétés initiales des matériaux utilisés dans cette recherche.

Le but de notre travail est d'atteindre une bonne résistance au glissement. Nous avons réalisées ces expériences en ajoutant des pourcentages de verre (12% et 15%,18%,20%) et des pourcentages de 4% ,8% de la chaux à deux sols différents pour voir si cet additif empêche le glissement ou non. L'essai de cisaillement a pour but de déterminer l'angle de frottement et la cohésion des sols traités. Tandis que l'essai œdométrique est destiné à évaluer la compressibilité du sol et la pression de pré consolidation (σ'_p), le coefficient de consolidation (C_v), l'indice de compression (C_c), Indice de gonflement (C_s), et la pression de gonflement (σ'_g).

Notre expérience expérimentale a été réalisée dans le laboratoire de mécanique des sols de LCTP (Laboratoire Centrale des Travaux Public) Bouira.

III .2. Matériaux utilisés et leurs caractéristiques

III.2.1 Situation de la zone de glissement

Le sol a été prélevé dans la zone de la route RN5 (36.3878396 N et 3.9001391 E) La cadat (wilaya de Bouira), à proximité du rond-point El Nassim. Cette zone constitue un axe routier important assurant la liaison entre plusieurs quartiers de la ville. Elle été affectée par un phénomène de glissement de terrain en 2018 ([Figure 27](#)) ayant provoqué des dégradations au niveau de la chaussée et perturbé la circulation routière.



Figure 27: Le site du sol.

Ce site possède deux couches d'argile superposée et une couche de tuf. Dans ce cas nous étudions le traitement des deux couches d'argile uniquement.

III.2.2 Sol 1 Inférieur

Le sol inférieur est prélevé à deux points différents en profondeur de la couche inférieure.



Figure 28: Situation de zone de glissement de sol inférieur.

III.2.3 Sol Supérieur 2

Le sol supérieur correspond à la couche superficielle du site, il est donc sensible à l'humidité et aux variations climatiques, ce qui change ses caractéristiques.



Figure 29: Situation de zone de glissement de sol supérieur.

A. Granulométrie

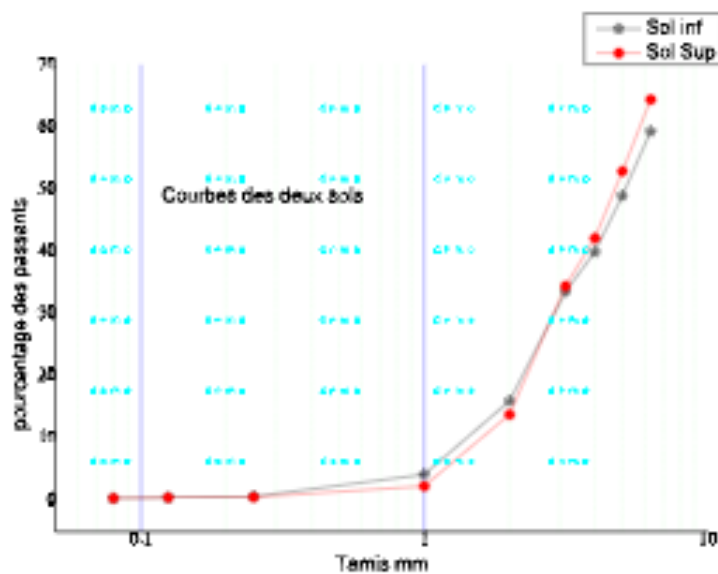


Figure 30: Courbe granulométrique des deux sols.

D'après l'analyse granulométrique, la courbe on se rend compte que les deux sols prélevés, sont des sols grossiers, principalement sableux < 5 % passant au tamis 0,08 mm.

III.2.4 la poudre de verre

La poudre de verre est obtenue à partir de déchets de verre broyés et tamisés, afin d'obtenir des particules de taille comprise entre 1-2 mm Elle est utilisée pour améliorer les caractéristiques du sol en réduisant les vides et en augmentant la résistance.

III.2.5 La molarité de Na OH

NaOH est la formule chimique de L'hydroxyde de sodium (NaOH) a été utilisé dans cette étude comme agent d'activation chimique associé à la chaux. Son rôle est de favoriser les réactions chimiques et d'améliorer l'efficacité de la chaux dans le processus de stabilisation du sol.

III.2.6 la chaux

La chaux utilisée dans cette étude est un matériau commercialisé couramment employé dans le génie civil comme enduit et pour la stabilisation des sols. Elle est utilisée pour améliorer les propriétés du sol. Elle augmente la cohésion, diminue la plasticité et réduit la compressibilité. Le NaOH est ajouté pour améliorer son efficacité.

III.2.7 Présentation des mélanges

Les mélanges ont été préparés en ajoutant à différents pourcentages de verre (12%, 15%, 18%, 20%) et la chaux 4% et 8% avec les deux différents sols (sol supérieur et sol inférieur)

Tableau 9: Composition des mélanges de sols traités par poudre de verre et chaux et leur masse volumique sèche.

Les pourcentages	Les mélanges	γ_d/γ_w
Sol Naturel	Sol supérieur témoin	1,64
	Sol inférieur témoin	1,67
12%	Sol supérieur + 12% verre	1,96
	Sol inférieur + 12% verre	2,08
15%	Sol supérieur + 15% verre	2,22
	Sol inférieur + 15% verre	2,01
18%	Sol supérieur + 18% verre	1,87
	Sol inférieur + 18% verre	1,95
20%	Sol supérieur + 20% verre	1,85
	Sol inférieur + 20% verre	1,83
8%	Sol supérieur + 8% chaux + NaOH	1,98
	Sol inférieur + 8% chaux + NaOH	1,86

III.3. Essais sur les sols

Dans cette étude on a effectué deux essais : l'essai Œdométrique et l'essai de cisaillement consolidé

III.3.1. Essai Œdométrique

L'odomètre est un instrument utilisé pour analyser la compressibilité et le comportement du sol lorsqu'il est soumis à une charge verticale. On le nomme également essai de cohésion pour évaluer les caractéristiques de compression et de cohésion du sol, telles que le coefficient de compactage (C_c), le coefficient de cohésion (C_v) et l'indice de cavitation.



Figure 31 : Représentation schématique d'un odomètre

En prend 110 gramme du sol supérieur et inférieur tamisé au tamis de 1 mm et de 12%(13,2 gramme), 15%(16,5 gramme), 18%(19,8 gramme), 20%(22gramme) de la poudre de verre avec 16,5 gramme de quantité de l'eau ; et 4%(4,4 gramme), 8%(8,8 gramme) de la chaux activé par 16,5 gramme de NaOH.

1. À la surface d'un sac en plastique, étalez la quantité de sable que nous avons pesée, puis saupoudrez une quantité de Matériaux sur le sable. Ensuite, nous arrosons tout avec l'eau pour le cas de la poudre de verre et le NaOH pour la chaux.
2. Mélangez bien le mélange jusqu'à obtenir une bonne consistance, puis versez-le sur la surface de travail. Prenez l'anneau d'œdomètre qui est pesé lorsqu'il est vide
3. Remplissez-le complètement avec le mélange, en vous assurant que tous les blancs sont remplis. Une fois terminé, l'anneau rempli du mélange est pesé.

4. Mettre en place dans l'appareil d'œdomètre.



Figure 32: Sol préparé pour l'essai œdométrique.

Pour obtenir la valeur de teneur en eau on applique la formule suivante :

$$\omega(\%) = \frac{M_{\text{humide}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sec}}}$$

La teneur en eau du sol supérieur : $\omega = 18,83\%$

La teneur en eau du sol inférieur : $\omega = 22,24\%$

III.3.1.1. Résultats de l'essai œdométrique

L'indicateur de capacité du sol à supporter des déformations causées par une pression verticale est souvent déterminé grâce au module œdométrique. Il est établi à partir des données de l'essai œdométrique en corrélant la variation de la contrainte appliquée à la déformation mesurée. Plus la valeur est élevée, plus le sol présente une rigidité améliorée et un risque de compactage réduit. Dans le contexte de cette recherche, le module œdométrique a été employé afin de démontrer l'influence de l'incorporation de verre recyclé et de chaux sur le comportement du sol et d'évaluer leur apport à l'amélioration de ses caractéristiques

mécaniques

$$E_{oeu} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta e}$$

III.3.1.2. Courbes de comparaison

Cas 1 : (sol supérieur témoin + sol inférieur témoin)

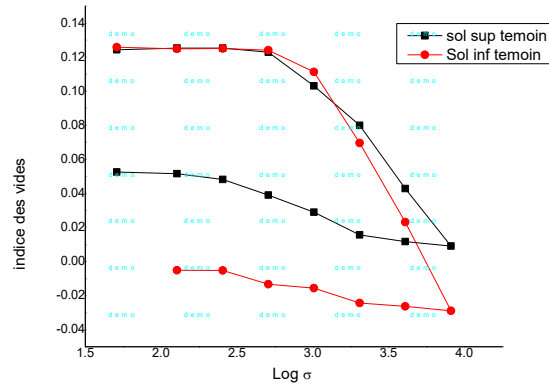


Figure 33: Courbes œdométriques comparatives du sol sup témoin et sol inf témoin.

On note une diminution graduelle du nombre de cellules à mesure que la concentration s'accroît. Le sol témoin au niveau supérieur affiche des valeurs légèrement supérieures à celles du sol témoin de niveau inférieur. La diminution s'accroît aux niveaux de concentration plus élevés.

Tableau 10 : Les résultats de $\frac{\Delta \sigma}{\Delta h} H_0$ du sol sup témoin et de sol inf témoin

Les charges	E Sol sup témoin (MPa)	Sol inf témoin (MPa)
0,1- 0,25	50,94	764,14
0,25 - 0,5	210,51	127,36
0,5- 1	410,83	318,39
1 – 2	188,68	20,79
2 – 4	50,19	78,07
4 – 8	49,88	40,67
8 – 16	55,18	44,61

Cas 2 : (sol supérieur témoin + 12% verre + 15% verre)

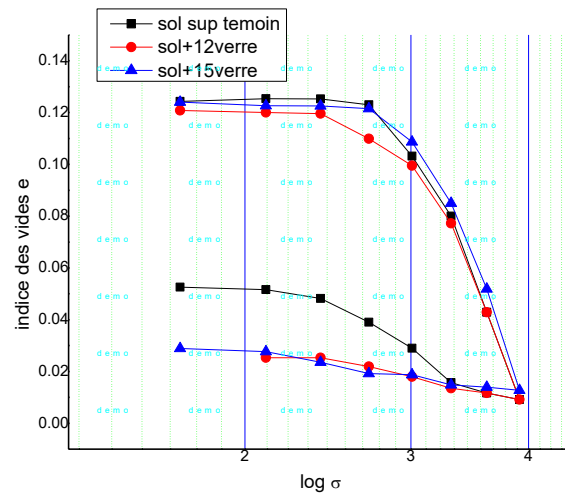


Figure 34: Courbes œdométriques comparatives du sol sup témoin et des sols traités par 12% et 15% de verre

La figure 34 indique que l'incorporation de verre (12% et 15%) accroît notablement l'indice de vides initial (e_0) comparé au sol témoin, traduisant une composition plus poreuse du mélange. Les sols traités, sous l'influence de la pression, indiquent une compressibilité plus importante (angle plus accentué), caractérisée par une diminution rapide du volume des pores sous haute pression. En conclusion, la convergence des courbes vers des contraintes importantes suggère que l'impact du verre s'efface dès que le réarrangement des grains atteint son maximum, s'orientant vers un état final de compaction semblable pour l'ensemble des échantillons.

Tableau 11: les résultats de $\frac{\Delta\sigma}{\Delta h} H_0$ du sol sup témoin et des sols traités par 12% et 15% de verre

Les charges	Sol sup témoin (MPa)	Sol sup traite par 12%(MPa)	Sol sup traite par 15%(MPa)
0,1- 0,25	50,94	509,42	43,66
0,25 - 0,5	210,51	21,05	42,45
0,5- 1	410,83	44,69	80,86
1 – 2	188,68	25,09	566,03
2 – 4	50,19	24,91	66,16
4 – 8	49,88	47,005	55,90
8 – 16	55,18	55,18	61,89

Cas 3 : (sol supérieur témoin + 18% verre + 20% verre)

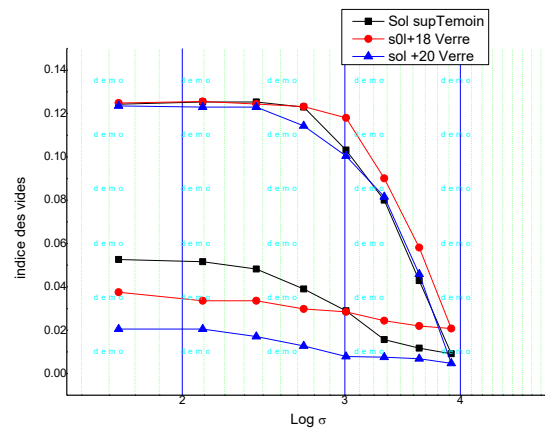


Figure 35: Courbes œdométrique comparatives du sol sup témoin et des sols traités par 18% et 20% de verre.

D'après la figure 35, on remarque le sol témoin présente une compressibilité plus importante, traduite par une diminution plus marquée de l'indice des vides avec l'augmentation de la contrainte appliquée. L'ajout de 18 % et 20 % de poudre de verre améliore le comportement œdométrique du sol en réduisant cette diminution. D'après les courbes obtenues, le mélange contenant 20 % de verre présente le meilleur comportement, avec une compressibilité plus faible que celle du sol témoin et du sol traité à 18 % de verre.

Tableau 12: Les résultats de $\frac{\Delta\sigma}{\Delta h} H_0$ du sol sup témoin et des sols traités par 18% et 20% de verre

Les charges	Sol sup témoin (MPa)	Sol sup traite par 18%(MPa)	Sol sup traite par 20%(MPa)
0,1- 0,25	50,94	72,77	33,96
0,25 - 0,5	210,51	318,39	37,46
0,5- 1	410,83	175,66	849,04
1 – 2	188,68	203,77	48,98
2 – 4	50,19	143,50	44,78
4 – 8	49,88	63,88	51,65
8 – 16	55,18	67,59	57,24

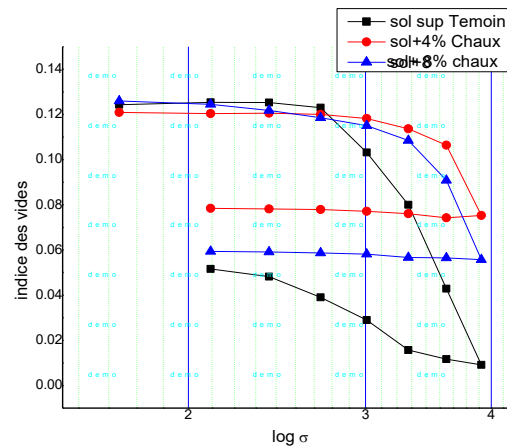
Cas 4 : (sol supérieur témoin + 4% chaux + 8% chaux + NaOH)

Figure 36: Courbes œdométrique comparatives du sol sup témoin et des sols traités par 4% et 8% de chaux activé par NaOH.

La figure 36 démontre que l'incorporation de la chaux améliore les propriétés du sol en diminuant sa capacité de compression. L'utilisation de 8 % de chaux activée par NaOH produit les résultats les plus favorables, en affichant une résistance à la compression supérieure comparée au sol témoin.

Tableau 13: Les résultats de $\frac{\Delta\sigma}{\Delta h} H_0$ sol sup témoin et des sols traités par 4% et 8% de chaux.

Les charges	Sol sup témoin	Sol sup traite par 4% de chaux	Sol sup traite par 8% de chaux
0,1- 0,25	50,94	16,98	1528,27
0,25 - 0,5	210,51	25,47	94,34
0,5- 1	410,83	53,07	67,92
1 – 2	188,68	261,24	76,61
2 – 4	50,19	146,60	105,04
4 – 8	49,88	185,25	131,04
8 – 16	55,18	234,22	130,41

Cas 5 : (sol inférieur témoin + 12% verre + 15% verre)

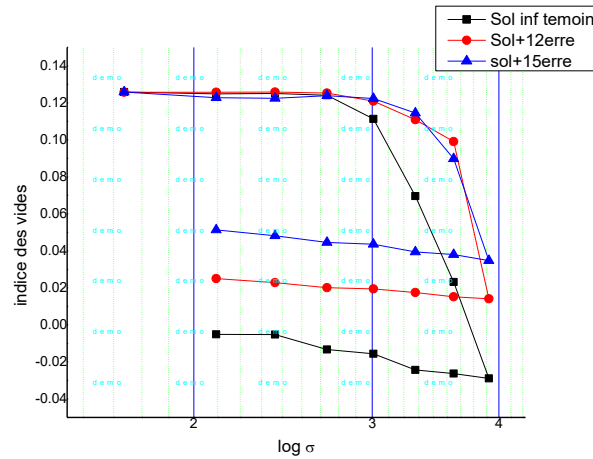


Figure 37: Courbes œdométriques comparatives du sol inf témoin et des sols traités par 12% et 15% de verre.

Selon la figure 37, le sol qui a été traité avec 15 % de verre montre les meilleurs résultats en comparaison avec le sol traité à 12 % de verre et le sol surveillé. On observe que les courbes restent presque constantes au départ, puis décroissent progressivement à mesure que la charge se renforce. Le sol non traité présente une réduction plus significative, tandis que les sols traités soutiennent une performance supérieure. Cela indique que l'intégration de verre renforce la résistance du sol contre les charges imposées.

Tableau 14: les résultats de $\frac{\Delta\sigma}{\Delta h} H_0$ du sol inf et des sols traités par 12% et 15% de verre

Les charges	Sol inf témoin	Sol inf traite par 12%	Sol inf traite par 15%
0,1- 0,25	764,14	382,07	509,42
0,25 - 0,5	127,36	636,78	44,69
0,5- 1	318,39	1698,08	82,17
1 – 2	20,79	351,33	268,12
2 – 4	78,07	73,83	313,49
4 – 8	40,67	132,75	199,77
8 – 16	44,61	170,52	126,76

Cas 6 : (sol inférieur témoin + 18% verre + 20% verre)

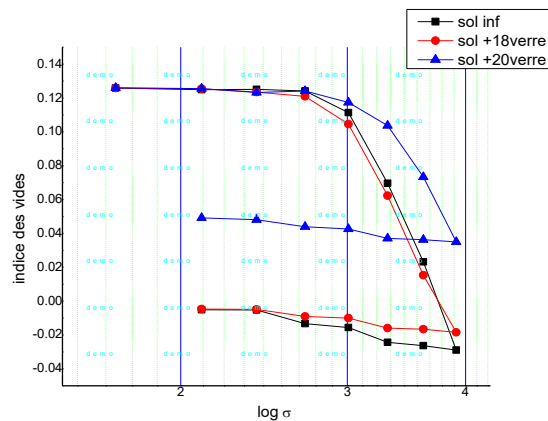


Figure 38: Courbes œdométrique comparatives du sol inf témoin et des sols traités par 18% et 20% de verre.

La figure 38 indique que l'indice des vides diminue lorsqu'on accroît la contrainte appliquée, et ce, pour tous les échantillons. Cependant, le sol qui a été traité avec 20 % de poudre de verre montre une capacité de compression inférieure par rapport au sol témoin et à celui qui a été traité à 18 %. Cela représente que l'incorporation de verre en poudre favorise l'amélioration des propriétés du sol et la diminution des affaissements lorsqu'il est soumis à une charge.

Tableau 15 : les résultats de $\frac{\Delta\sigma}{\Delta h} H_0$ du sol inf témoin et des sols traités par 18% et 20% de verre

Les charges	Sol inf témoin (MPa)	Sol inf traite par 18% (MPa)	Sol inf traite par 20%
0,1- 0,25	764,14	509,42	169,81
0,25 - 0,5	127,36	254,71	50,94
0,5- 1	318,39	113,21	149,83
1 – 2	20,79	114,48	10,89
2 – 4	78,07	53,48	51,33
4 – 8	40,67	36,03	43,54
8 – 16	44,61	41,48	50,44

Cas 7 : Sol inférieur (témoin, traité à 4 % de chaux et traité à 8 % de chaux activée par NaOH)

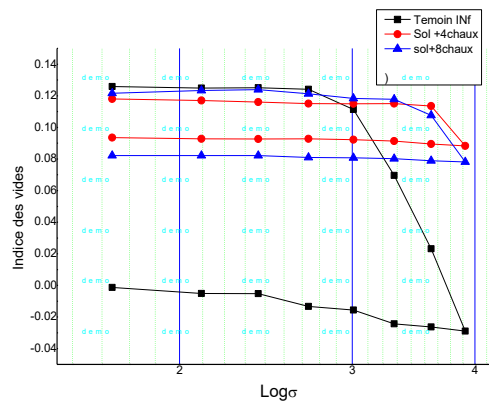


Figure 39: Courbes œdométriques comparatives du sol inf témoin et des sols traités par 4% et 8% de chaux activée par NaOH

Selon la figure 39, les sols traités avec la chaux activée par le NaOH montrent un changement moins significatif que le sol témoin. Cela illustre que le traitement simplifie le comportement du sol tout en diminuant sa compressibilité. En outre, l'échantillon avec 8 % de chaux semble donner de meilleurs résultats, affichant une courbe plus stable lorsqu'il est soumis à une charge. Cette amélioration se manifeste par une résistance accrue aux déformations et un abaissement des tassements.

Tableau 16: Les résultats de $\frac{\Delta\sigma}{\Delta h} H_0$ du sol inf témoin et des sols traités par 4% et 8% de chaux activé par NaOH

Les charges	Sol inf témoin	Sol inf traite par 4% de chaux (MPa)	Sol inf traite par 8% de chaux (MPa)
0,1- 0,25	764,14	6,79	19,35
0,25 - 0,5	127,36	11,85	54,19
0,5- 1	318,39	25,73	134,06
1 – 2	20,79	68,38	121,29
2 – 4	78,07	599,32	148,74
4 – 8	40,67	380,88	277,24
8 – 16	44,61	482,30	249,26

III.3.2 Essai cisaillement

L'étude de la résistance au cisaillement des sols constitue un obstacle majeur en mécanique des sols. Pour résoudre les problèmes de stabilisation mécanique du sol, il est indispensable de comprendre l'angle de frottement interne et la cohésion des sols en réalisant une expérience en laboratoire.



Figure 40: Appareil de cisaillement

Dans l'essai de cisaillement Trois essais sont effectués sur un sol argileux afin de déterminer les valeurs normales suivantes :

Essai n°1 : 1 bar.

Essai n°2 : 2 bar.

Essai n°3 : 4 bar.

La vitesse de cisaillement est conditionnée par le types d'essais à effectuer ; nos essais sont non drainés, nous prenons la valeur maximal 0,2 mm /min.

Préparation des échantillons

Dans cet essai on travaille avec deux défierent sol (sol supérieur et sol inferieur).



Figure 41: Exemple d'étape 1 de préparation de sol avec poudre de verre

1. Préparer environs de 110 gramme de sol tamisé au tamis de 0,5 mm et 12% ,15%,18%,20% de verre et 8% de chaux activé par le NaOH sur trois parts égales de même chose que la poudre de verre et la chaux .
2. Mixer l'ensemble ;
3. remplir les cellules avec les mélanges ; après le remplissage la surface de chaque échantillon a été soigneusement arasée afin d'obtenir un surface plane et uniforme.
4. Ont été placés dans la boîte de cisaillement, Les trois vis métalliques doivent alors être vissées sur la demi-botte supérieure. Dès qu'elles entrent en contact avec la boîte inférieure
5. les échantillons ont été placés dans l'appareil de cisaillement consolidé pendant 24h.
6. Après avoir le cisaillement, on le met dans le four on le laisse pendant 12 heures. Nous pesons l'échantillon avant et après le cisaillement dans les trois étapes.



Figure 42: Exemple d'un échantillon cisailier

III.3.2.1 Les calculs

Détermination de la surface :

$$A_0 = \text{Larg} \times \text{Long} \quad A_0 = 60 \times 60 \quad A_0 = 3600 \text{mm}^2$$

Détermination de la surface cisailée

$$A' = L(1 - \Delta h) \quad A' = 60(60 - \Delta h)$$

Calculer la contrainte de cisaillement

$$\tau = \frac{T}{A'}$$

Calculer la contrainte normale : $\sigma = \frac{F}{A'}$

Pour calculer l'effort normal : **On a**

$$F_1 = \sigma \times A_0$$

$$F_1 = 1(\text{bar}) \times 36$$

$$F_1 = 36 \text{kg}$$

Pour l'effort normal F_2 **On a**

$$F_2 = 2(\text{bar}) \times 36$$

$$F_2 = 72 \text{ kg}$$

Pour l'effort normal F_3 **On a**

$$F_3 = 4(\text{bar}) \times 36$$

$$F_3 = 144 \text{kg}$$

II.4.2.3 Présentation des résultats :

Les résultats des essais réalisés par laboratoire des travaux publics sur la partie suivant :

- Exemple de cisaillement pour un sol inferieur modifié par 12% de verre :

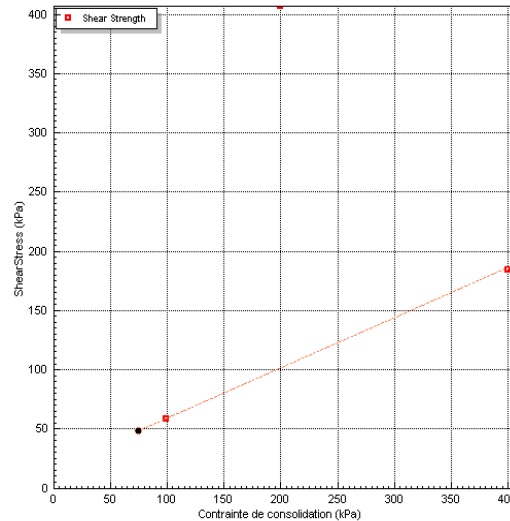


Figure 43: Courbes de résistance au cisaillement du sol modifié par 12% de verre.

Chapitre IV

Modélisation numérique sous PLAXIS

IV.1. Présentation des résultats de modélisation par plaxis

IV.1.1 Introduction

Pour examiner l'impact de l'intégration de déchets de verre et de chaux sur la réactivité du sol, une simulation numérique a été effectuée à l'aide du programme PLAXIS. Les paramètres de cette analyse proviennent des résultats des tests de cisaillement menés en laboratoire.

Grâce à cette modélisation, nous avons pu analyser la stabilité du talus, de même que la répartition des contraintes et des déplacements dans les diverses configurations analysées. L'analyse et la présentation des résultats obtenus permettront de comparer les performances du sol naturel à celles du sol traité

IV.1.2 Présentation du profil

Dans cette partie, nous examinons le profil géotechnique employé pour la simulation numérique. Ce profil a été conçu sur la base des informations recueillies lors des tests effectués sur le sol. Cela facilite l'identification des diverses zones du sol et une meilleure compréhension de leur distribution avant d'examiner les résultats de la simulation.

a) Maillage de sol témoin

Dans cette partie, nous mettons en avant le modèle numérique du sol témoin développé grâce au logiciel PLAXIS. Ce modèle illustre le profil géotechnique du sol avant l'introduction du chaux et verre recyclé, sera utilisé de point de référence pour l'analyse des divers modèles examinés.

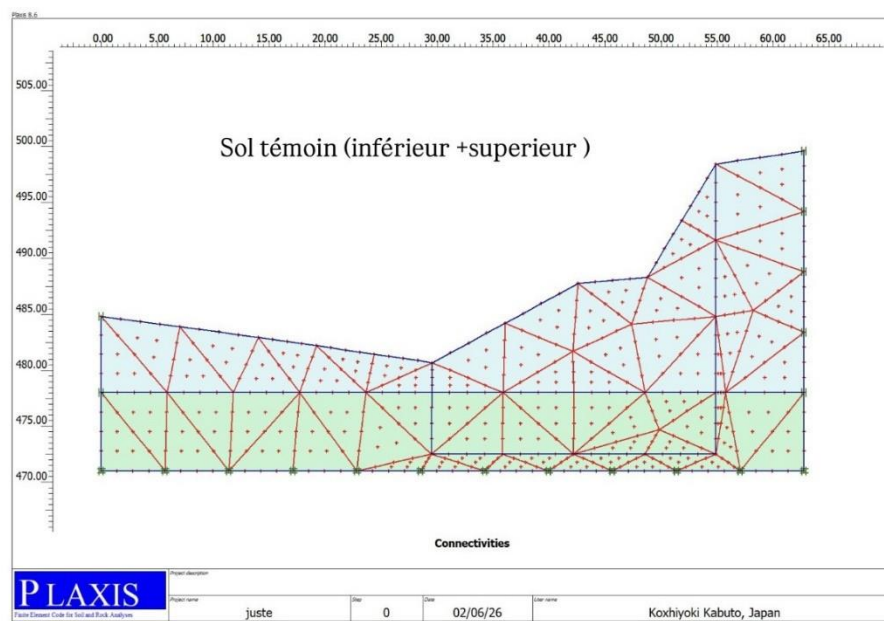


Figure 44: Modèle numérique du profil géotechnique du sol témoin sous plaxis.

La figure 44 présente la division du sol témoin en une couche supérieure et une couche inférieure. Il est visible que le profil du terrain présente des irrégularités et a été segmenté en plusieurs éléments triangulaires pour simplifier les calculs numériques. Ce modèle servira de référence pour la comparaison avec des sols incorporant divers pourcentages de chaux et verre recyclé.

IV.1.2.1. Présentation de cas de sol supérieur +12% de verre et sol inférieur +12% de verre :

b) Maillage de sol supérieur et inférieur a 12% de verre :

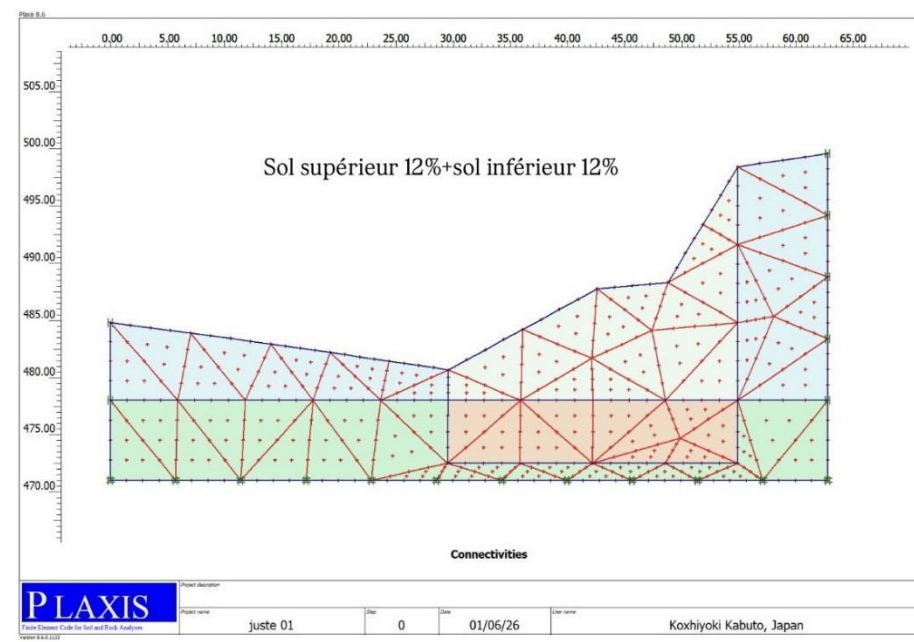


Figure 45: Modèle numérique du profil géotechnique du sol sup et inf +12% de verre.

La figure 45 illustre le modèle numérique du sol supérieur et du sol inférieur, travaillés avec 12 % de verre recyclé. Nous observons que la configuration du profil est maintenue par rapport au sol témoin, tandis que les deux strates sont illustrées par un maillage triangulaire facilitant l'exécution des calculs numériques.

- **Déformation du modèle (cas de sol supérieur 12% - sol inférieur 12%) :**

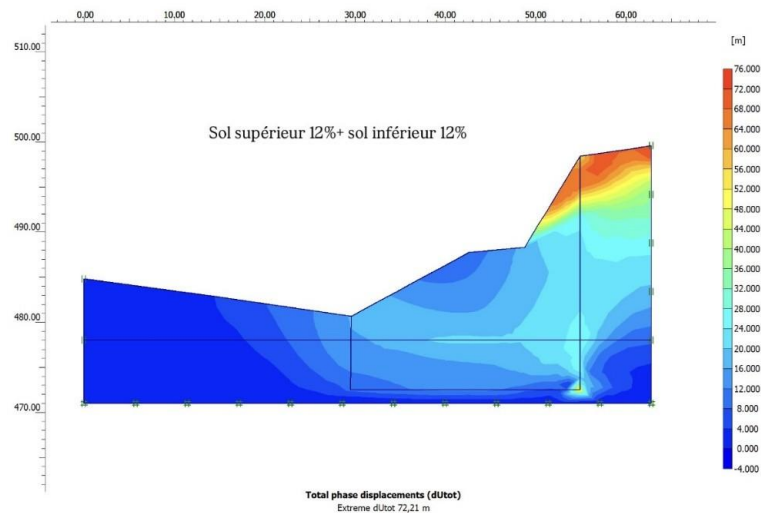


Figure 46: Champ des déplacements totaux (U_{tot}) pour le cas 12% supérieur et 12% inférieur.

Comme l'indique la figure 46, les déplacements au maximum sont situés au sommet du talus, tandis que les déplacements au minimum sont observés dans les zones plus en profondeur. Le modèle illustre un état d'instabilité et une résistance au glissement peu élevée, avec un facteur de sécurité obtenu ($FS = 0,596$) qui est inférieur à 1.

IV.1.2.2. Présentation de cas de sol supérieur +8% de chaux et sol inférieur +12% de verre

c) Maillage de sol supérieur à 8% chaux et sol inférieur a 12% de verre :

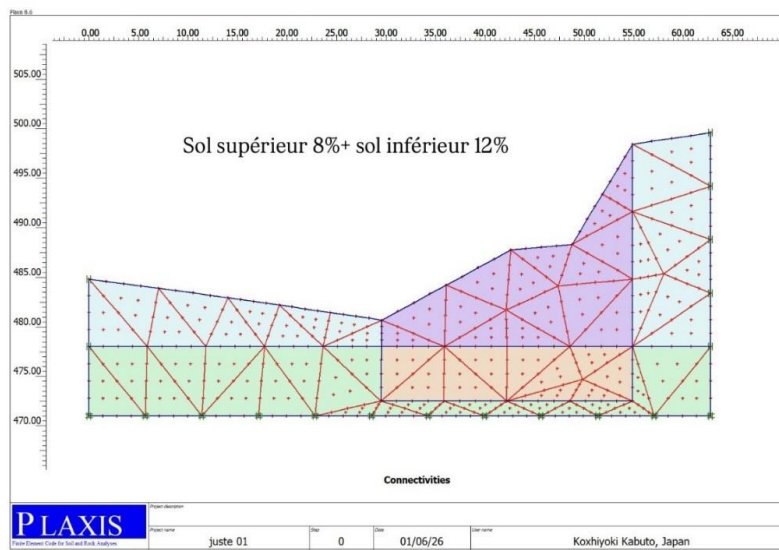


Figure 47: Modèle numérique du profil géotechnique du sol sup 8% chaux et inf 12% de verre.

La figure 47 illustre le maillage du modèle numérique, qui comprend un sol de surface traité avec 8 % de chaux et un sol plus profond traité avec 12 % de verre. L'analyse du profil géotechnique met en évidence une séparation diverse entre les deux matériaux, avec une couche supérieure stabilisée par la chaux et une couche inférieure renforcée grâce à l'incorporation du verre. Cette classification facilite l'identification des zones nécessitant une amélioration mécanique du talus et l'appréciation de l'impact combiné des deux méthodes sur son comportement global.

- **Déformation du modèle (cas de sol supérieur 8% chaux - sol inférieur 12% verre) :**

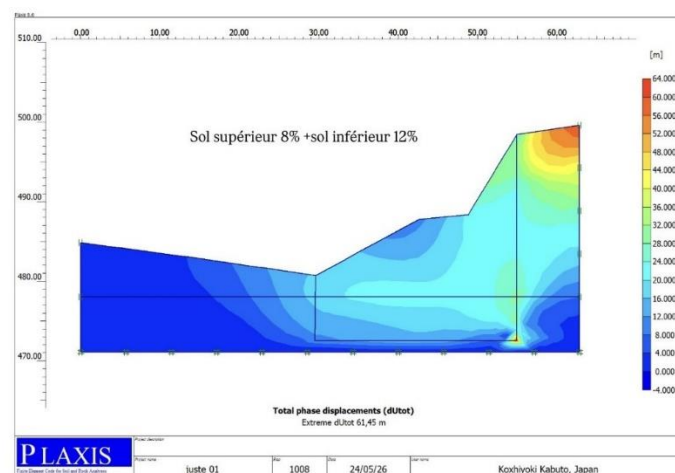


Figure 48: Champ des déplacements totaux (Utot) pour le cas sol sup 8% chaux +supérieur 12% inférieur.

Selon la figure 48, les mouvements principaux se remarquaient dans la zone supérieure du talus, particulièrement à proximité de la crête. Par contre, les valeurs les plus réduites sont relevées dans les zones plus profondes et à la base du modèle. Il est aussi évident que l'activité des déplacements décroît progressivement à mesure qu'on se dirige vers la partie inférieure du talus. Cela signifie que la combinaison d'un traitement de 8 % de chaux sur un sol de surface et d'un traitement de 12 % de verre sur un sol de profondeur a conduit à une diminution des déformations et à une amélioration générale de la stabilité du talus. Ainsi, cette disposition motivante une plus grande stabilité et restreint les déplacements dans les régions profondes.

IV.1.2.3. Présentation de cas de sol supérieur +18% de verre et sol inférieur +18% de verre :

- d) **Maillage de sol supérieur et inférieur a 18% de verre :**

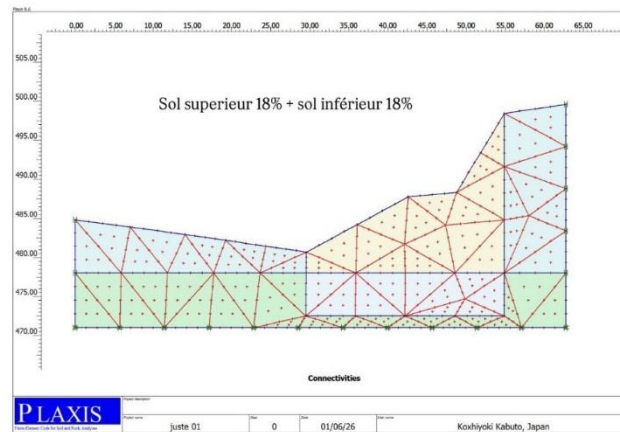


Figure 49: Modèle numérique du profil géotechnique du sol sup et inf +18% de verre.

Selon la figure 49, le zonage indique que le sol supérieur et le sol inférieur ont reçu le même pourcentage de verre (18 %). Une distribution uniforme contribue à assurer une homogénéité accrue du profil géotechnique. On note aussi que la répartition du maillage est équilibrée sur tout le modèle, ce qui contribue à réduire l'analyse du comportement du talus face aux charges imposées. L'application d'une dose identique sur les deux niveaux peut contribuer à optimiser les propriétés mécaniques du sol et à consolider la stabilité du talus.

- **Déformation du modèle (cas de sol supérieur 18% - sol inférieur 18%) :**

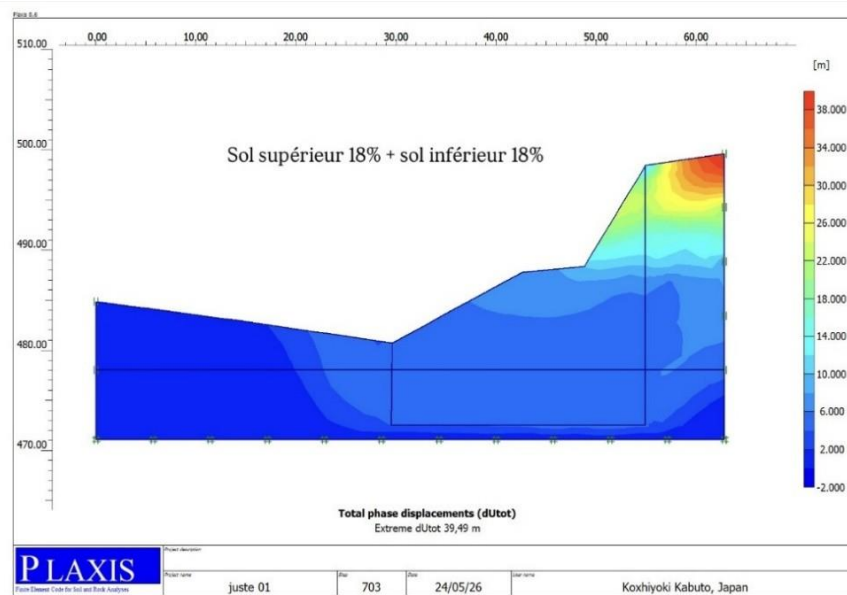


Figure 50: Champ des déplacements totaux (U_{tot}) pour le cas 18% supérieur et 18% inférieur

Dans le tableau ci-après on résume les coefficients de sécurité des différents mélanges

Tableau 17: Résultats du coefficient de sécurité pour les différents cas de traitement du sol.

Les mélanges	Coefficient de sécurité F_s
Sol témoin (supérieur + inférieur)	0,158
sol supérieur +12% de verre et sol inférieur +12% de verre	0,596
de sol supérieur +8% de chaux et sol inférieur +12% de verre	0,594
sol supérieur +18% de verre et sol inférieur +18% de verre	0,595

IV.1.3. Analyse des contraintes

Suite à la création du maillage et à l'attribution des numéros aux éléments du modèle dans PLAXIS, les points d'intérêt numéro 49 et n° 57 ont été repérés dans la zone examinée (voire la figure). Ces nœuds ont par la suite été reliés aux points de contraintes les plus proches dans le modèle. Donc, on a sélectionné les points de contraintes numéro 582 et n° 678, qui se rapportent respectivement au nœud n° 49 et au nœud n° 57. (La figure 52) ci-dessous illustre où se trouvent ces points de contraintes et les conditions limites mises en œuvre dans le modèle.

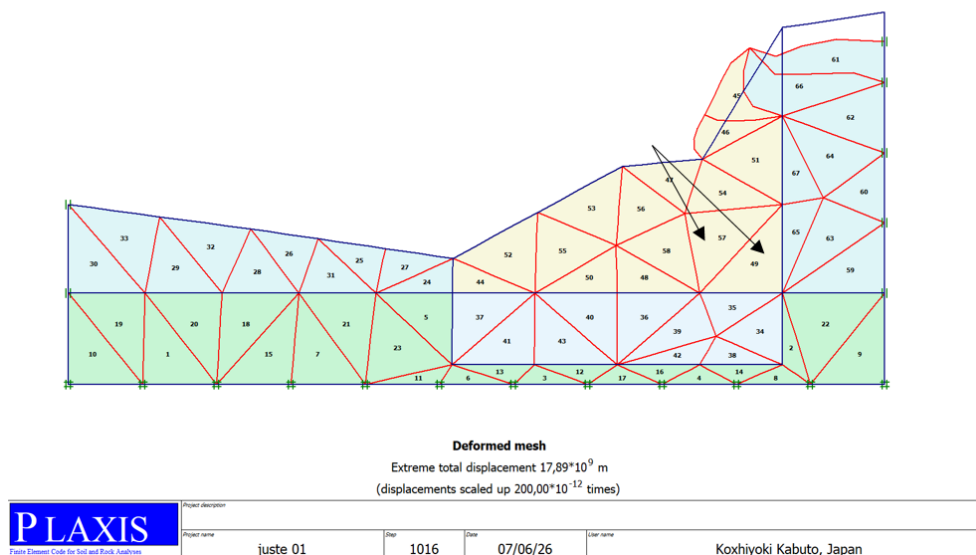


Figure 51: Maillage du modèle avec numérotation des éléments sous plaxis.

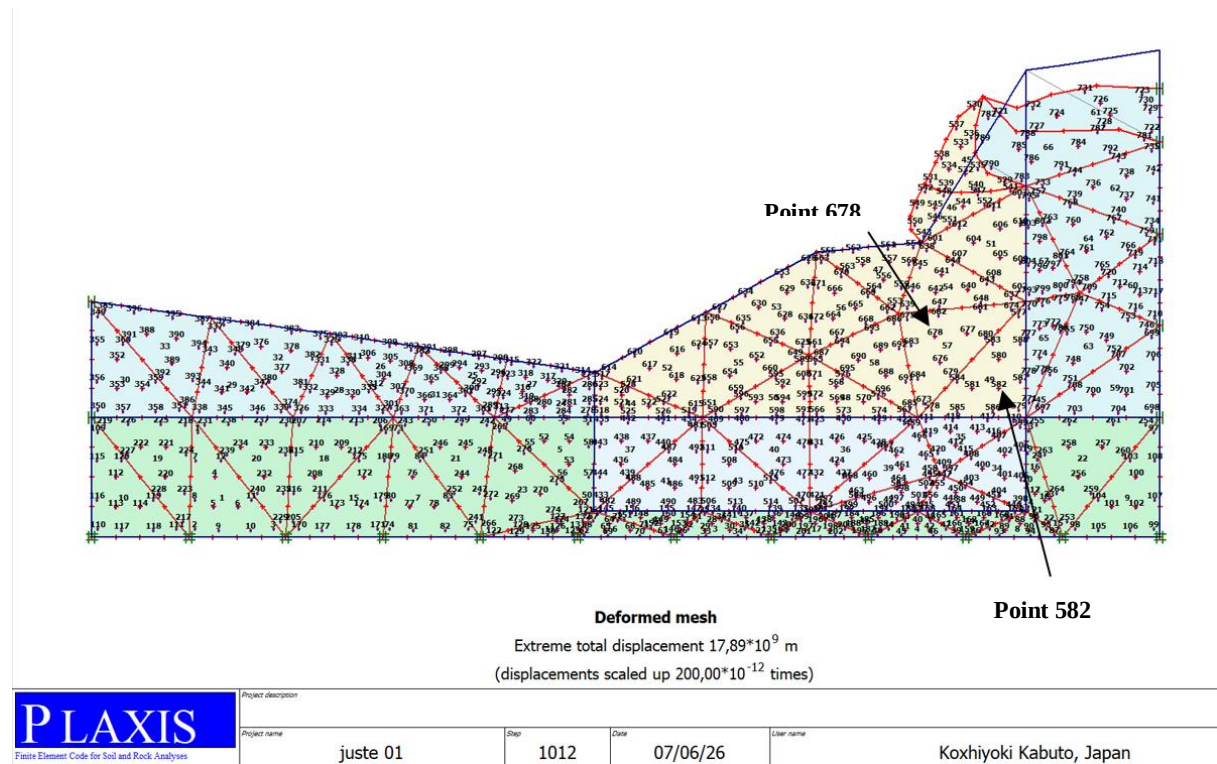


Figure 52: Représentation des points de contraintes (conditions aux limites).

Comparaison des contraintes aux points de contrôle 582 et 678 dans les sols traités :

- 1^{er} cas de sol sup 12% et sol inf 12% :

Soil Element	Stress Point	X [m]	Y [m]	σ_{xx} [kN/m ²]	σ_{yy} [kN/m ²]	σ_{xy} [kN/m ²]	σ_{zz} [kN/m ²]	Status
49	573	44,188	478,195	-506,102	-512,031	-211,993	-349,140	Elastic
	574	46,254	478,195	-520,611	-604,453	-194,034	-382,087	Elastic
	575	46,228	479,141	-525,452	-567,243	-180,412	-377,911	Elastic
	576	44,128	480,339	-425,777	-404,657	-186,384	-291,242	Elastic
	577	54,499	483,948	-316,306	-302,162	-40,173	-188,120	Elastic
	578	49,363	478,429	-476,162	-651,466	-113,322	-375,997	Elastic
	579	54,499	478,429	-438,867	-797,837	-74,282	-330,996	Elastic
	580	53,320	481,413	-357,845	-561,832	-45,859	-274,716	Elastic
	581	51,722	479,697	-428,743	-662,030	-52,807	-336,511	Elastic
	582	53,320	479,697	-391,635	-675,997	-40,508	-308,135	Elastic
	583	52,933	482,332	-293,265	-558,085	-79,177	-264,170	Elastic
	584	50,866	480,112	-417,843	-650,272	-57,631	-344,996	Elastic
	585	50,866	478,362	-452,854	-697,410	-73,249	-357,697	Elastic
	586	52,933	478,362	-448,824	-741,975	25,246	-340,630	Elastic
	587	54,562	480,112	-357,570	-628,530	-75,122	-273,236	Elastic
	588	54,562	482,332	-298,081	-460,853	-74,465	-219,273	Elastic

Figure 53: Contraintes calculées aux points de l'élément sup 12% et inf 12% verre

57	673	48,889	478,815	-440,564	-629,937	-94,942	-369,574	Elastic
	674	54,026	484,333	-230,053	-391,538	-12,909	-196,512	Elastic
	675	47,938	483,766	-330,599	-428,408	-151,932	-260,219	Elastic
	676	49,850	481,219	-407,847	-648,335	-137,104	-364,506	Elastic
	677	51,448	482,936	-374,807	-579,555	-127,145	-321,907	Elastic
	678	49,554	482,759	-373,997	-573,894	-157,963	-325,920	Elastic
	679	50,467	480,437	-418,838	-601,316	-75,094	-338,346	Elastic
	680	52,534	482,657	-294,917	-555,386	-83,297	-272,094	Elastic
	681	52,232	484,228	-314,873	-543,260	-158,195	-290,206	Elastic
	682	49,783	484,000	-345,188	-525,605	-158,453	-298,377	Elastic
	683	48,153	482,249	-408,037	-510,434	-161,949	-316,018	Elastic
	684	48,536	480,257	-468,335	-639,979	-182,615	-383,726	Elastic

Figure 54: Contraintes calculées aux points de l'élément Sup 12% et inf 12% verre

- 2^{ème} cas de sol inf 18% et sol sup 18% :

Soil Element	Stress Point	X [m]	Y [m]	σ_{xx} [kN/m ²]	σ_{yy} [kN/m ²]	σ_{xy} [kN/m ²]	σ_{zz} [kN/m ²]	Status
48	564	45,973	485,459	-281,954	-129,047	-93,801	-138,441	Elastic
	565	42,537	481,212	-380,762	-359,982	-175,927	-255,418	Elastic
	566	42,620	478,232	-490,006	-492,016	-200,069	-338,284	Elastic
	567	47,757	478,232	-479,442	-621,847	-174,579	-375,744	Elastic
	568	43,755	479,843	-447,420	-415,565	-199,658	-303,443	Elastic
	569	43,781	478,916	-480,683	-463,747	-197,435	-331,133	Elastic
	570	45,379	478,916	-513,707	-532,903	-185,455	-362,426	Elastic
	571	42,499	480,339	-430,087	-397,739	-191,473	-287,158	Elastic
	572	42,532	479,141	-463,612	-456,650	-202,710	-323,471	Elastic
	573	44,188	478,195	-506,121	-512,013	-211,972	-349,140	Elastic
	574	46,254	478,195	-520,650	-604,418	-194,010	-382,089	Elastic
	575	46,228	479,141	-525,483	-567,209	-180,376	-377,910	Elastic
49	576	44,128	480,339	-425,778	-404,652	-186,354	-291,240	Elastic
	577	54,499	483,948	-316,368	-302,373	-40,314	-188,202	Elastic
	578	49,363	478,429	-476,241	-651,406	-113,317	-376,003	Elastic
	579	54,499	478,429	-438,925	-797,881	-74,319	-331,027	Elastic
	580	53,320	481,413	-357,936	-561,822	-45,945	-274,740	Elastic
	581	51,722	479,697	-428,842	-661,962	-52,853	-336,520	Elastic
	582	53,320	479,697	-391,722	-676,000	-40,575	-308,162	Elastic
	583	52,933	482,332	-293,366	-558,037	-79,278	-264,186	Elastic
	584	50,866	480,112	-417,946	-650,158	-57,652	-344,993	Elastic
	585	50,866	478,362	-452,939	-697,344	-73,273	-357,703	Elastic
	586	52,933	478,362	-448,898	-741,955	25,196	-340,646	Elastic
	587	54,562	480,112	-357,644	-628,604	-75,178	-273,280	Elastic
	588	54,562	482,332	-298,146	-460,968	-74,551	-219,327	Elastic

Figure 55: Contraintes calculées aux points de l'élément sup 18% et 18% verre

Soil Element	Stress Point	X [m]	Y [m]	σ_{xx} [kN/m ²]	σ_{yy} [kN/m ²]	σ_{xy} [kN/m ²]	σ_{zz} [kN/m ²]	Status
	665	44,880	484,407	-288,187	-205,545	-111,922	-166,271	Elastic
	666	43,669	485,323	-216,146	-120,136	-74,893	-111,102	Elastic
	667	43,783	482,753	-282,246	-274,058	-134,450	-193,328	Elastic
	668	45,500	483,546	-286,097	-278,427	-133,053	-194,494	Elastic
	669	45,620	485,106	-314,866	-196,647	-88,764	-169,595	Elastic
	670	44,054	486,290	-174,027	-66,890	-33,108	-78,713	Elastic
	671	42,699	485,665	-172,825	-98,552	-55,201	-89,873	Elastic
	672	42,548	483,687	-233,612	-195,788	-110,299	-146,584	Elastic
57	673	48,889	478,815	-440,635	-629,873	-94,926	-369,575	Elastic
	674	54,026	484,333	-230,205	-391,681	-13,070	-196,600	Elastic
	675	47,938	483,766	-330,548	-428,364	-151,748	-260,191	Elastic
	676	49,850	481,219	-407,955	-648,190	-137,058	-364,495	Elastic
	677	51,448	482,936	-374,912	-579,317	-127,184	-321,867	Elastic
	678	49,554	482,759	-374,081	-573,693	-157,847	-325,885	Elastic
	679	50,467	480,437	-418,941	-601,190	-75,096	-338,339	Elastic
	680	52,534	482,657	-295,021	-555,274	-83,401	-272,091	Elastic
	681	52,232	484,228	-314,953	-542,974	-158,299	-290,145	Elastic
	682	49,783	484,000	-345,233	-525,316	-158,294	-298,304	Elastic
	683	48,153	482,249	-408,045	-510,351	-161,846	-315,996	Elastic
	684	48,536	480,257	-468,385	-639,895	-182,574	-383,716	Elastic

Figure 56: Contraintes calculées aux points de l'élément sup 18% et inf 18% verre.

- 3^{ème} cas de sol sup 8% de chaux et sol inf 12% de verre :

Soil Element	Stress Point	X [m]	Y [m]	σ_{xx} [kN/m ²]	σ_{yy} [kN/m ²]	σ_{xy} [kN/m ²]	σ_{zz} [kN/m ²]	Status
	571	42,499	480,339	-430,744	-399,038	-192,581	-287,745	Elastic
	572	42,532	479,141	-464,377	-457,684	-203,767	-324,011	Elastic
	573	44,188	478,195	-506,776	-512,856	-212,715	-349,589	Elastic
	574	46,254	478,195	-521,003	-604,920	-194,536	-382,345	Elastic
	575	46,228	479,141	-525,810	-567,866	-180,997	-378,206	Elastic
	576	44,128	480,339	-426,285	-405,649	-187,398	-291,692	Elastic
49	577	54,499	483,948	-315,937	-301,337	-40,305	-187,762	Elastic
	578	49,363	478,429	-476,445	-651,414	-113,626	-376,066	Elastic
	579	54,499	478,429	-438,258	-799,149	-73,638	-331,207	Elastic
	580	53,320	481,413	-358,266	-561,936	-45,775	-274,873	Elastic
	581	51,722	479,697	-429,106	-661,686	-53,028	-336,517	Elastic
	582	53,320	479,697	-392,128	-675,835	-40,699	-308,234	Elastic
	583	52,933	482,332	-293,434	-558,124	-78,905	-264,233	Elastic
	584	50,866	480,112	-418,108	-649,779	-57,893	-344,928	Elastic
	585	50,866	478,362	-453,124	-697,180	-73,493	-357,709	Elastic
	586	52,933	478,362	-448,851	-741,255	25,089	-340,422	Elastic
	587	54,562	480,112	-358,144	-629,600	-75,112	-273,729	Elastic
	588	54,562	482,332	-298,456	-461,118	-74,490	-219,465	Elastic

Figure 57: Contraintes calculées aux points de l'élément sup 8% et inf 12%.

Soil Element	Stress Point	X [m]	Y [m]	σ_{xx} [kN/m ²]	σ_{yy} [kN/m ²]	σ_{xy} [kN/m ²]	σ_{zz} [kN/m ²]	Status
57	671	42,699	485,665	-174,268	-98,994	-56,589	-90,439	Elastic
	672	42,548	483,687	-234,402	-196,630	-111,567	-147,074	Elastic
	673	48,889	478,815	-440,717	-629,825	-95,349	-369,586	Elastic
	674	54,026	484,333	-230,465	-390,744	-12,467	-196,397	Elastic
	675	47,938	483,766	-331,091	-429,204	-152,479	-260,606	Elastic
	676	49,850	481,219	-408,187	-648,277	-137,409	-364,591	Elastic
	677	51,448	482,936	-374,291	-579,705	-126,909	-321,797	Elastic
	678	49,554	482,759	-373,391	-573,978	-158,466	-325,763	Elastic
	679	50,467	480,437	-419,239	-601,204	-75,298	-338,433	Elastic
	680	52,534	482,657	-294,400	-555,152	-83,082	-271,868	Elastic
	681	52,232	484,228	-313,754	-543,632	-157,455	-289,983	Elastic
	682	49,783	484,000	-343,284	-525,861	-159,215	-297,883	Elastic
	683	48,153	482,249	-408,204	-510,776	-162,193	-316,171	Elastic
	684	48,536	480,257	-468,508	-639,961	-182,949	-383,773	Elastic

Figure 58: Contraintes calculées aux points de l'élément sup 8% et inf 12% verre

Comparaison au point 582 :

D'après les trois cas on remarque que les valeurs de σ_{xx} restent très proche avec une petite baisse en valeur absolue pour le mélange de 8% de chaux et 12% de verre. De même la contrainte σ_{yy} demeure stable dans tous les cas autour de **-676 kN/m²**, signifiant que la modification dans le genre de traitement ou le rapport d'additifs n'a pas eu un effet notable sur la répartition des contraintes verticales au point 582.

En outre σ_{xy} Montre une légère augmentation en valeur lorsque le mélange contient 8% de chaux et 12% de verre, cependant, la différence reste petite. Et σ_{zz} constitue très peu de changement (inférieure à 0,1 %), ce qui indique une distribution presque identique des contraintes normales.

Comparaison au point 678 :

On observe que les trois valeurs sont extrêmement corrélées et affichent des différences minimales. La plus forte compression a été notée avec le cas 18 % de verre indiquant une valeur de -374,081 kN/m², alors que la combinaison de 8 % de chaux et 12 % de verre montre une légère baisse de valeur. Cependant, ces variations demeurent minimales, suggérant que le changement du pourcentage de verre ou l'intégration de chaux n'a pas d'effet notable sur la contrainte σ_{xx} au point 678. Ainsi, la contrainte σ_{yy} reste presque stable autour de **-573, kN/m²**, suggérant que la distribution des contraintes verticales ne subit pas d'influence liée à la modification du traitement. Concernant la contrainte de cisaillement σ_{xy} pour les trois cas l'écart sont très faible et restent limités aux chiffres après la virgules et les changements dans

la proportion de verre ou l'intégration de chaux n'ont pas d'impact évident sur la contrainte de cisaillement de plus que σ_{zz} maintient des valeurs stables et très proches.

IV.1.4. Analyse des déplacements

Comme dans de l'évaluation des contraintes, l'évaluation des déplacements a été réalisée sur la base de points de contrôle représentatifs. Le point numéro 483 a été sélectionné à proximité du nœud n°49, alors que le point numéro 376 a été choisi à proximité du nœud n° 57. (Voir figure 59)

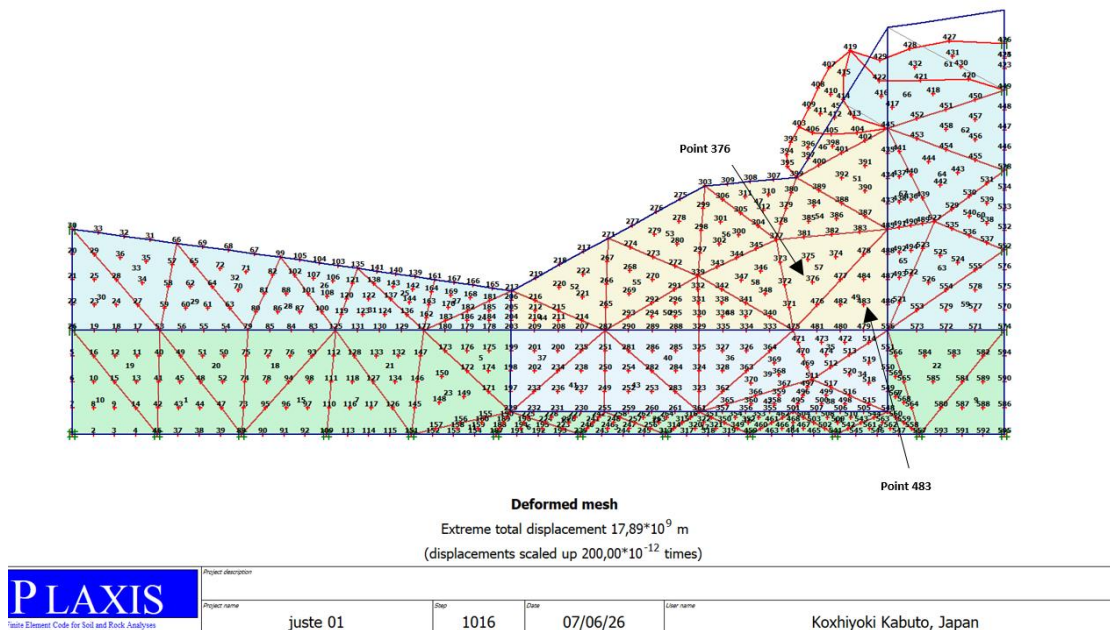


Figure 59: Représentation des points de déplacement

a. Le déplacement total pour le cas de sol sup 12% et sol inf 12% :

Node	X [m]	Y [m]	$\Delta U_{x\text{ phase}}$ [m]	$\Delta U_{y\text{ phase}}$ [m]
374	51,438	482,930	-5,591	0,293
375	49,560	482,755	-5,666	0,067
376	49,854	481,229	-5,479	0,123
377	47,390	484,107	-6,066	-0,374

Figure 60: Déplacement du point 376 cas 12/12% de verre

Node	X [m]	Y [m]	ΔUx_{phase} [m]	ΔUy_{phase} [m]
482	51,731	479,702	-5,390	0,285
483	53,315	479,702	-5,441	0,396
484	53,315	481,403	-5,480	0,407

Figure 61: Déplacement du point 483 cas 12/12% de verre.

b. Le déplacement total pour le cas de sol sup 8% et sol inf 12% :

Node	X [m]	Y [m]	ΔUx_{phase} [m]	ΔUy_{phase} [m]
375	49,560	482,755	-4,410	-0,090
376	49,854	481,229	-4,295	-0,074
377	47,390	484,107	-4,570	-0,265
378	47,736	485,161	-4,728	-0,232

Figure 63: Déplacement du point 376 cas 8% chaux / 12% de verre

Node	X [m]	Y [m]	ΔUx_{phase} [m]	ΔUy_{phase} [m]
482	51,731	479,702	-4,210	0,015
483	53,315	479,702	-4,231	0,104
484	53,315	481,403	-4,326	0,113

Figure 62: Déplacement du point 483 cas 8% chaux / 12% de verre

c. Le déplacement total pour le cas de sol sup 18% et sol inf 18% :

Node	X [m]	Y [m]	ΔUx_{phase} [m]	ΔUy_{phase} [m]
371	48,270	479,527	-5,315	-0,071
372	47,976	481,054	-5,507	-0,135
373	47,683	482,581	-5,764	-0,247
374	51,438	482,930	-5,645	0,318
375	49,560	482,755	-5,715	0,077
376	49,854	481,229	-5,520	0,134
377	47,390	484,107	-6,125	-0,387

Figure 64: Déplacement du point 376 cas 18/18% de verre.

Node	X [m]	Y [m]	$\Delta U_{x_{phase}}$ [m]	$\Delta U_{y_{phase}}$ [m]
482	51,731	479,702	-5,424	0,304
483	53,315	479,702	-5,476	0,424
484	53,315	481,403	-5,525	0,437
485	54,899	484,807	-5,441	0,762

Figure 65: Déplacement du point 483 cas 18/18% de verre

➤ **Analyse au point 376 :**

Les déplacements horizontaux ΔU_x pour le cas de 12% et de 18% de verre sont très proches passe de $-5,479$ m à $-5,520$ m au contraire dans le mélange composé 8% de chaux et 12% de verre réduit ce déplacement à $-4,295$ m. concernant le déplacement ΔU_y montrent des valeurs de signe positif ($0,123$ m et $0,134$ m) Alors que la combinaison de 8 % de chaux et 12 % de verre affiche une faible valeur négative ($-0,074$ m), mentionnant une dynamique différente dans le sens vertical.

➤ **Analyse au point 483 :**

Dans le point 483, on remarque également une proximité notable sur les déplacements ΔU_x entre les situations où le verre est à 12 % et à 18 %. Sont de $-5,441$ m et $-5,476$ m, tandis que les mouvements verticaux ΔU_y se propagent jusqu'à $0,396$ m et $0,424$ m. La combinaison de 8 % de chaux et 12 % de verre montre des valeurs réduites, avec un mouvement horizontal de $-4,231$ m et un mouvement vertical de $0,104$ m. Cette diminution démontre une atténuation des déformations du sol et une stabilité accrue en comparaison avec les deux autres options de traitement.

IV.1.5. Analyse de la variation de volume

Une étude des variations de volume a été conduite pour mieux saisir le comportement du sol traité. Dans le cadre de cette étude, les résultats ont été examinés de façon distincte pour le sol supérieur et le sol inférieur, afin de mettre en évidence les zones de dilatation et de compression dans les tableaux qui suivent :

Segment	Cluster	V_{init} [m ³]	dV_{tot} [10 ⁶ %]	dV_{tot} [10 ⁹ m ³]	dV_{phase} [%]	dV_{phase} [m ³]
1	1	299,931	0,000	0,000	0,430	1,290
	2	141,574	0,000	0,000	-6,772	-9,587
	3	139,543	0,000	0,000	-2,209	-3,082
	4	236,925	1937,265	4,590	-3,689	-8,741
	5	165,582	7915,056	13,106	14,522	24,046

Figure 66: Volume du sol sup (cas 12% verre) et sol inf (cas 12% verre)

Segment	Cluster	V_{init} [m ³]	dV_{tot} [10 ⁶ %]	dV_{tot} [10 ⁶ m ³]	dV_{phase} [%]	dV_{phase} [m ³]
1	1	299,931	0,000	0,000	0,476	1,429
	2	141,574	0,000	-0,001	-6,831	-9,671
	3	139,543	0,000	0,001	-2,225	-3,105
	4	236,925	612,351	1450,809	-3,870	-9,170
	5	165,582	2737,154	4532,241	13,274	21,979

Figure 68: Volume du sol sup (cas 18% verre) et sol inf (cas 18% verre).

Segment	Cluster	V_{init} [m ³]	dV_{tot} [10 ⁶ %]	dV_{tot} [10 ⁹ m ³]	dV_{phase} [%]	dV_{phase} [m ³]
1	1	299,931	0,000	0,000	1,287	3,859
	2	141,574	0,000	0,000	-4,885	-6,917
	3	139,543	0,000	0,000	-0,610	-0,851
	4	236,925	1937,265	4,590	-1,676	-3,971
	5	165,582	7915,056	13,106	8,759	14,504

Figure 67: Volume du sol sup (cas 8% chaux) et sol inf (cas 12% verre).

Comparaison de la variation volumique pour les deux cas de sols traités :

L'analyse de la variation volumique indique des comportements distincts en fonction des zones du modèle. Concernant le sol inférieur, illustré par les zones 1 et 3, on remarque une légère dilatation dans la zone 1, tandis que la zone 3 montre une diminution de volume (compression), signalée par les valeurs négatives de dV dans les trois cas. Au sujet du sol supérieur, qui comprend les zones 2, 4 et 5, une contraction du sol est aussi observée dans les zones 2 et 4, comme le montrent les valeurs négatives de dV . Toutefois, la zone 5 se caractérise par un accroissement considérable du volume dans les divers cas analysés, présentant des chiffres nettement plus élevés que ceux remarqués dans les autres zones. L'analyse comparative des traitements à 12 % de verre (24,046 m³) et à 18 % de verre (21,979 m³) démontre des résultats assez similaires, démontrant que l'augmentation du pourcentage de verre a un impact limité sur le comportement volumique du sol. De plus, la combinaison contenant 8 % de chaux et 12 %

de verre montre une volatilité volumétrique réduite, sont de (14,504 m³) en particulier dans la région 5, ce qui indique un meilleur contrôle des déformations volumétriques de l'ensemble traité

Conclusion générale

Conclusion général

Conclusion générale

L'un des enjeux géotechniques considérables pouvant compromettre la stabilité des structures et des infrastructures est l'hypothèse de glissements de terrain. Ce processus se produit quand les forces déséquilibrantes dépassent la résistance du sol, entraînant le mouvement d'une portion de terrain. Différentes conditions peuvent favoriser son développement, notamment la composition du sol, l'élévation du niveau d'humidité, les pentes importantes ou les charges imposées.

Le but principal de ce projet était de juger l'efficacité de traitements des sols des sites de glissements par les déchets tel que la poudre de verre et de la chaux activée par NaOH pour améliorer le comportement des sols examinés dans la région de la cadat. Pour ce faire, divers tests de laboratoire ont été effectués, englobant le test de cisaillement direct et le test œdométrique.

Les résultats recueillis ont démontré une amélioration des caractéristiques mécaniques des sols traités, comparativement au sol naturel. L'incorporation de poudre de verre et de chaux a participé au renforcement et l'amélioration de la résistance au cisaillement et à diminuer le gonflement et les affaissements. L'utilisation du logiciel PLAXIS nous a permis de toucher à la programmation ou à la modélisation et de témoigné l'efficacité du traitement en révélant une stabilité améliorée et une réduction des déformations du sol.

Cette étude souligne l'importance des matériaux recyclés dans le domaine de la géotechnique et de suggère leurs utilisations dans les prochains projets d'ingénierie civile.

Références bibliographiques

Liste bibliographique

- **Abdelbaset, A.M., Katunský, D., Zelenákov, a, M., El-Feky, M.H., 2024.** Mechanical properties stabilization of low plasticity Kaolin soil using fly ash and hydrated lime. *Case Stud. Constr. Mater.* 21, e03662.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03662>.
- **Akhter, F., Soomro, S.A., Jamali, A.R., Chandio, Z.A., Siddique, M., Ahmed, M., 2023.** Rice husk ash as green and sustainable biomass waste for construction and renewable energy applications: a review. *Biomass. Convers. Biorefinery* 13 (6), 4639–4649.
<https://doi.org/10.1007/s13399-021-01527-5>
- **Albadrani, M. A. (2025).** Utilization of sustainable materials for soil stabilization: A review. *Cleaner Materials*, 11, 100256.
<https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100256>
- **Blayi, R. A., Kakrasul, J. I., & Hamad, S. M. (2025).** An overview of rice husk ash as a waste by-product material for sustainable soil stabilization. *Cleaner Waste Systems*, 12, 100446.
- **Consoli, N. C., et al. (2024).** Mechanical behavior of iron ore tailings under compression. *Journal of Geotechnical Engineering*.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.06.014>
- **Fernandes, I.J., Calheiro, D., Kieling, A.G., Moraes, C.A.M., Rocha, T.L.A.C., Brehm, F.A., Modolo, R.C.E., 2016.** Characterization of rice husk ash produced using different
- **Graça, C. J. P., Ferreira-Gomes, L. M., Pais, L. A., Albuquerque, A., Morais, M. V., Studart, A., & Marchiori, L. (2025).** Assessment of the potential for using PET waste as geomaterials in soil micro-reinforcement. *Geosystems and Geoenvironment*, 4, 100438.
<https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2025.100438>
- **Halim, S., Emran, Q., & Zaray, A.H. (2026).** Stabilization of weak subgrade soil using lime and fly ash: A case study from Afghanistan. *Solid Earth Sciences*.
<https://doi.org/10.1016/j.sesci.2026.100301>

- **Jha, A.K., Sivapullaiah, P.V., 2015.** Susceptibility of strength development by lime in gypsiferous soil—A micro mechanistic study. *Appl. Clay Sci.* 115, 39–50.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.07.017>.
- **Jiang, X., Huang, Z., Ma, F., Luo, X., 2019.** Analysis of strength development and soil–water characteristics of rice husk ash–lime stabilized soft soil. *Materials* 12 (23).
<https://doi.org/10.3390/ma12233873>.
- **Jittin, V., Bahurudeen, A., Ajinkya, S.D., 2020.** Utilisation of rice husk ash for cleaner production of different construction products. *J. Clean. Prod.* 263, 121578.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121578>.
- **Liu, H., & Liu, Z. (2026).** A rapid slope stability assessment method based on slope size parameters and the slope shape influence factor. *Case Studies in Thermal Engineering*, 77, 107502.
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.107502>
- **Raza, M. A., Khan, A. H., Rehman, Z. U., & Sultan, T. (2026).** Experimental investigation into agglomeration behavior of waste thermoplastic microparticles and expansive clay blends subsequently enriched with lime for soil stabilization. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 77, 102346.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2026.102346>
- **Rambabu, P., Varma, J.G., Ramarao, G., 2015.** Durability study on rice husk ash for optimum level of replacement of cement in concrete. *Int. J. Eng. Trends Technol.* 28 (3), 144–149.
<https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V28P228>.
- **Raza, M. A., Khan, A. H., Rehman, Z. U., & Sultan, T. (2026).** *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 77, 102346.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2026.102346>
- **Sivapullaiah, P.V., Sridharan, A., Bhaskar Raju, K.V., 2000.** Role of amount and type of clay in the lime stabilization of soils. *Proc. Inst. Civ. Eng. - Gr Improv.* 4, 37–45.
<https://doi.org/10.1680/grim.2000.4.1.37>
- **Navila Tabassum, Ryo Sekine, Kimitoshi Hayano, Binh Nguyen Phan, Hiromoto Yamauchi (2023),** “Insights into durability assessment for compacted soils treated with

paper sludge ash-based stabilizers” Science Direct Soils and Foundations 63 (2023) 101399

<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101399>

- **Wang Q., Tang H., An P., et al., 2025.** Shear strength and permeability in the sliding zone soil of reservoir landslides. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.04.033>
- **Yang, H., Zhou, B., Wang, J., 2019.** Exploring the effect of 3D grain shape on the packing and mechanical behaviour of sands. *Geotech. Lett.* 9 (4), 299–304.
<https://doi.org/10.1680/jgele.18.00227>.
- **Zha, F., Liu, S., Du, Y., Cui, K., 2008.** Behavior of expansive soils stabilized with fly ash. *Nat. Hazards* 47, 509–523.
<https://doi.org/10.1007/s11069-008-9236-4>.
- **Zhou, J., Liu, C., Ban, C., Shi, Z., Ren, J., Zhou, H., Liu, Z., & Tang, Y. (2025).** Cemented soil-soil interface shear strength evaluation I: Size effect and characteristic experimental size quantization. *Rock Mechanics Bulletin*, 4, 100213.
<https://doi.org/10.1016/j.rockmb.2025.100213>
- **Zumrawi, M.M.E., Hamza, O.S.M., 2014.** Improving the characteristics of expansive subgrade soils using lime and fly ash. *Int. J. Sci. Res.* 3, 1124–1129.