

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS SETIF 1**

**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**

**THÈSE**

**Présentée au Département de *Génie Civil***

**Pour l'obtention du diplôme de**

**DOCTORAT**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : *Génie Civil***

**Option : *Matériaux et Structures***

**Par**

**FELOUAT Samira**

**THÈME**

***Modélisation numérique du comportement d'un sol renforcé par des inclusions rigides et verticales***

**Soutenue le / / devant le Jury :**

<b>Pr. KEBICHE Khelifa</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Sétif 1</b>	<b>Président</b>
<b>Dr. MOKRANI Larbi</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ. Sétif 1</b>	<b>Directeur de thèse</b>
<b>Dr. BRIANCON Laurent</b>	<b>MC</b>	<b>INSA. Lyon</b>	<b>Co-directeur de thèse</b>
<b>Dr. BERRABAH Fouad</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ. Sétif 1</b>	<b>Examineur</b>
<b>Pr. BOUDAUD Zeineddine</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Oum El Bouaghi</b>	<b>Examineur</b>
<b>Pr. ABBECHE Khelifa</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Batna 2</b>	<b>Examineur</b>
<b>Dr. MANSOURI Mouloud</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ. Sétif 1</b>	<b>Invité</b>

## **REMERCIEMENTS**

Je dois tout d'abord remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance aux Dr. Larbi MOKRANI et Dr Laurent BRIANCON, respectivement mon encadreur et Co-encadreur de thèse, pour leur encadrement tout au long de ces travaux. Ce fut une véritable chance pour moi de pouvoir travailler à leurs côtés. Merci infiniment au Dr. MANSOURI Mouloud pour ses orientations, son soutien et son encouragement qui ont été très positif et constructif.

Je remercie chaleureusement tous les membres du laboratoire GEOMAS pour leur accueil, leur aide et leur soutien, et particulièrement mes collègues doctorants. Tous m'ont permis de travailler dans d'agréables conditions. Un spécial merci à Atefeh, Adnan, et Nicole.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont permis d'oublier momentanément le travail: Riad, Mehdi, Abdelaziz, Amdjed, Fatima, Wafa, Mouloud, Nasima et Kamilia.

*À mes parents, mes frères et mes sœurs*

## **RESUME**

L'amélioration des sols compressibles par des inclusions rigides verticales est l'une des méthodes les plus utilisées ces dernières années. Cette technique constitue une alternative intéressante par rapport à celles traditionnellement choisies au niveau du délai et le coût de réalisation.

Le travail présenté dans ce mémoire constitue une contribution à la compréhension du comportement de ce type d'ouvrages et plus particulièrement les mécanismes qui gouvernent le transfert des charges vers les inclusions. Il est réalisé suivant deux approches complémentaires :

- Expérimentale : à l'aide d'un ensemble d'essais réalisés sur un nouveaux modèle physique réduit.
- Numérique : sur la base d'un modèle numérique en axisymétrie de révolution utilisant le logiciel Plaxis.

Dans un premier temps, le travail expérimental effectué nous a permis de comparer l'efficacité du système pour différentes configurations, généralement, adoptées dans le domaine du génie civil. L'effet de certains paramètres sur le transfert des charges, et les déplacements à l'interface sol compressible-remblai, a été mis en évidence. Parmi ces paramètres on peut citer la présence d'une nappe de geosynthétique , la présence des dalles et la compressibilité du sous-sol. Dans un second temps, la validation d'un modèle numérique a été effectuée grâce aux résultats expérimentaux recueillis et qui sont représentés par l'efficacité de transfert des charges et les déplacements enregistrés à l'interface sol compressible-remblai. Le modèle numérique, ainsi adopté, a permis de mener une étude paramétrique dans le but d'approcher et de mieux interpréter l'influence des différents paramètres observés physiquement sur le modèle réduit.

**Mots-clés** : Amélioration des sols, Transfert de charge, Compressibilité, Inclusions rigides, Modélisation.

## **ABSTRACT**

Improving compressible soils with vertical rigid inclusions is one of the most used methods in recent years. This technique constitutes an interesting alternative compared to those traditionally chosen in terms of time and construction cost.

The work presented in this thesis constitutes a contribution to the understanding of the behavior of this type of structure and more particularly the mechanisms which govern the load transfer towards the inclusions. It is carried out using two complementary approaches:

- Experimental: using a set of tests carried out on a new reduced physical model.
- Numerical: on the basis of a numerical model in axisymmetry of revolution using the Plaxis software.

Initially, the experimental work carried out allowed us to compare the efficiency of the system for different configurations, generally adopted in the field of civil engineering. The effect of some parameters on the load transfer, and displacements at the compressible soil-embankment interface, has been demonstrated. These parameters include the presence of a geosynthetic layer, the presence of caps and the compressibility of the subsoil.

Secondly, the validation of the numerical model was carried out thanks to the experimental results collected, and which are represented by the efficiency of load transfer and the displacements recorded at the compressible soil-embankment interface. The numerical model thus adopted made it possible to carry out a parametric study in order to approach and better interpret the influence of the various parameters physically observed on the reduced model.

**Keywords:** Soil improvement, Load transfer, Compressibility, Rigid inclusions, Modeling.

## ملخص

يعتبر تحسين التربة القابلة للضغط من خلال عمليات تضمين الخوازق الصلبة من أكثر الطرق استخداما في السنوات الأخيرة. وتعتبر هذه التقنية بديلا مثيرا للاهتمام عن تلك التي يتم اختيارها تقليديا من حيث الوقت والتكلفة.

العمل المعروض في هذه الأطروحة هو إسهام في فهم سلوك هذا النوع من العمل ، ولا سيما الآليات التي تحكم نقل الأحمال نحو الخوازق الصلبة. وقد تم باستخدام نهجين متكاملين:

- تجريبي: باستخدام مجموعة من الاختبارات التي أجريت على نموذج فيزيائي مصغر جديد
- عددي: على أساس نموذج رقمي محوري باستخدام برنامج بلاكسيس

في البداية ، سمح لنا العمل التجريبي بمقارنة كفاءة النظام بالنسبة لتشكيلات مختلفة ، تعتمد عموما في مجال الهندسة المدنية. تم تسليط الضوء على أثر بعض العوامل على نقل الحمولة و هبوط التربة. وتشمل هذه العوامل وجود طبقة جيوسنتيكية ، وجود بلاطات اعلى رؤوس الخوازق ، وانظغاطية التربة.

ثانيا ، تم التحقق من صحة النموذج الرقمي باستخدام النتائج التجريبية التي تم جمعها ، والتي تتمثل في كفاءة نقل الحمولة وهبوط التربة. وقد أتاح النموذج العددي ، الذي اعتمد بالتالي ، إجراء دراسة عددية بهدف تناول تأثير مختلف العوامل التي لوحظت في النموذج المصغر وتفسيرها بشكل أفضل.

**كلمات مفتاحية :** تحسين التربة ، نقل الحمولة ، قابلية الضغط ، الخوازق الصلبة ، النمذجة.

## TABLE DES MATIERES

Remerciements .....	2
Résumé .....	4
Abstract .....	5
ملخص.....	6
Table des matières .....	7
Liste des figures.....	10
Liste des tableaux.....	13
Notations.....	14
Introduction générale.....	17
Chapitre 1 Présentation de la technique de renforcement des sols par inclusions rigides...20	
1.1 Introduction.....	21
1.2. La technique de renforcement des sols par inclusions rigides.....	21
1.2.1. Le principe de fonctionnement.....	21
1.2.2. Les éléments constitutifs.....	22
1.2.2.1. Les inclusions rigides.....	22
1.2.2.2. La plate-forme de transfert de charge.....	24
1.2.3. Domain d'application.....	24
1.3. Le mécanisme de transfert des charges dans un remblai construit sur un sol compressible renforcé par des inclusions rigides.....	25
1.4. L'efficacité de transfert des charges.....	26
1.5. Brève bibliographie sur les méthodes analytiques de calcul et dimensionnement.....	27
1.5.1. Les méthodes analytiques pour l'effet d'arc.....	27
1.5.2. Les méthodes analytiques pour la déformation du géosynthétique en traction.....	29

1.6. Brève bibliographie sur les modèles physiques tridimensionnels.....	31
1.7. Brève bibliographie sur des études numériques.....	36
1.8. Conclusion.....	40
Chapitre 2 Présentation du dispositif expérimental et analyse des résultats.....	41
2.1. Introduction.....	42
2.2. Le modèle physique.....	42
2.2.1. Description.....	42
2.2.2. Matériaux.....	45
2.2.3. Les instruments de mesure.....	46
2.2.3.1. Mesure du transfert de charge .....	46
2.2.3.2. Mesure des déplacements.....	47
2.3. Programme d'essais.....	48
2.3.1. Configuration des essais.....	48
2.3.2. Protocole suivi.....	49
2.4. Analyse des résultats.....	51
2.4.1. Les forces mesurées aux pieds des inclusions.....	51
2.4.2. Evaluation du transfert de charge.....	56
2.4.3. L'effet de la hauteur du remblai sur l'efficacité du transfert des charges.....	60
2.4.4. Les déplacements à l'interface mousse-remblais.....	61
2.5. Conclusion.....	63
Chapitre 3 Simulation numérique.....	64
3.1. Introduction.....	65
3.2. L'outil numérique utilisé et les modèles de comportement.....	65

3.2.1. Présentation du code de calcul PLAXIS.....	65
3.2.2. Interfaces.....	66
3.2.3. Géogrilles.....	66
3.2.4. Les modèles de comportements utilisés dans PLAXIS.....	66
3.2.4.1. Model élastique linéaire.....	67
3.2.4.2. Le modèle de Mohr-Coulomb (élastique parfaitement plastique).....	67
3.3. Modélisation du problème.....	68
3.3.1. Simulation numérique proposée.....	68
3.3.2. Analyse de l'effet de la compressibilité du sous-sol sur le transfert de charge.....	71
3.3.3. L'effet de la rigidité des dalles sur le transfert des charges.....	79
3.3.4. Renforcement avec géosynthétique (GSY).....	81
3.3.4.1. Déflexion du géosynthétique.....	82
3.3.4.2. La force de traction dans le géosynthétique.....	83
3.4. Conclusion.....	84
Conclusion générale et perspectives.....	86
Références bibliographiques.....	88
Annexes.....	93

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1.1 Principe du renforcement par inclusions rigides

Figure 1.2 Géométrie d'une maille élémentaire

Figure 1.3 Exemple des dalles

Figure 1.4 Exemples d'ouvrages renforcés par des inclusions

Figure 1.5 La distribution des charges, remblai sur des inclusions rigides et GSY (Van Eekelen 2012)

Figure 1.6 Calcul d'efficacité

Figure 1.7 Tranche de sol élémentaire, (a) représentation de Terzaghi (1943), (b) représentation de Mc Kelvey (1994)

Figure 1.8 Géométrie proposé par Russel et Pierpoint (1997)

Figure 1.9 2D et 3D forme géométrique de transfert des charges (Carlsson, 1987)

Figure 1.10 Des modèles proposés, décrit le transfert des charges par effet de voûte

Figure 1.11 Approximation de la répartition des charges résultant de l'effet de

Figure 1.12 Modèle de Kempfert et al.1999

Figure 1.13 Modèle de Hironaka et al.2006

Figure 1.14 Modèle de Van Eekelen, (2015)

Figure 1.15 Model de Mac\_Guire (2011)

Figure 1.16 Model de HOUDA (2016)

Figure 1.17 Modèle de Lee et al 2019

Figure1.18 Modèle d'Eweron et al. (2018)

Figure 1.19 Modèle numérique de Boussetta et al (2016)

Figure 1.20 Modèle numérique de Balaban et Onur (2018)

Figure 1.21 Modèle numérique de Lee et al (2019)

Figure 2.1 Le modèle physique

Figure 2.2 Section horizontale du model physique

Figure 2.3 Section vertical du model physique

Figure 2.4 Courbe contrainte-déplacement de la mousse utilisée.

Figure 2.5 La position des capteurs de force

Figure 2.6 Les capteurs de force

Figure 2.7 Localisation des capteurs

Figure 2.8 Le capteur de déplacement

Figure 2.9 Configuration avec dallettes

Figure 2.10 Géosynthétique de renforcement

Figure 2.11 Mise en place du remblai par couche

Figure 2.12 Mesures des forces à la base des inclusions de la grille centrale de l'essai T1

Figure 2.13 Mesures des forces à la base des inclusions de la grille centrale des essais T2 et T2'

Figure 2.14 Mesures des forces à la base des inclusions de la grille centrale des essais T3 et T3'

Figure 2.15 Mesures des forces à la base des inclusions de la grille centrale de l'essai T4

Figure 2.16 Mesures des forces à la base des inclusions de la grille centrale des essais T5 et T5'

Figure 2.17 Efforts et efficacités moyennes mesurés au niveau des pieds des inclusions de la grille centrale.

Figure 2.18 Variation de l'efficacité durant la construction du remblai pour l'ensemble des tests

Figure 2.19 Déplacements mesurés à l'interface mousse-remblai

Figure 3.1 Comportement élastique-parfaitement plastique

Figure 3.2 La cellule unitaire simulée

Figure 3.3 Equivalence entre la géométrie 3D et la géométrie axisymétrique.

Figure 3.4 Maillage du modèle numérique

Figure 3.5 Evolution des déplacements à l'interface remblai-mousse durant la construction du remblai.

Figure 3.6 Evolution de l'efficacité durant la construction du remblai

Figure 3.7 Evolution de l'efficacité en fonction de l'épaisseur du sous-sol

Figure 3.8 Déplacements verticaux dans le remblai à la frontière du modèle, en fonction de la profondeur dans le remblai.

Figure 3.9 Les déformations verticales calculées ( $\epsilon_{yy}$ ), (a) Epaisseur de mousse : 0.05 m, (b) Epaisseur de mousse: 0.5 m

Figure 3.10 Contrainte verticale à la frontière du modèle en fonction de la profondeur dans le remblai, pour 4 épaisseurs de sous-sol

Figure 3.11 Les différentes phases d'évolution de la contrainte verticale

Figure 3.12 Le maillage du model numérique représentant la configuration avec dalle

Figure 3.13 Evolution de l'efficacité du transfert des charges avec la hauteur du remblai

Figure 3.14 La variation de l'efficacité pendant la construction du remblai avec présence des dalles (T2)

Figure 3.15 Le maillage du model numérique qui représente la configuration avec GSY

Figure 3.16 La variation de l'efficacité pendant la construction du remblai avec présence du GSY (T3)

Figure 3.17 La déflexion du géosynthétique au cours de la construction du remblai en fonction de la distance à l'inclusion.

Figure 3.18 La force de traction dans le géosynthétique au cours de la construction du remblai en fonction de la distance à l'inclusion.

## **LISTE DES TABLEAUX**

Table 2.1 Résumé des propriétés du sable (Propriétés de la courbe granulométrique, propriétés physiques et mécaniques obtenues à partir d'essais triaxiaux)

Table 2.2 Les propriétés du géosynthétique

Tableau 2.3 Le programme des tests réalisé

Tableau 2.4 Configuration réalisée avec 5 couches de mousse renforcé par des inclusions

Tableau 2.5 Configuration réalisée avec 5 couches de mousse renforcée par des inclusions coiffées par des dallettes

Tableau 2.6 Configuration réalisée avec 5 couches de mousse renforcée par des inclusions surmontée par une nappe géosynthétique

Tableau 2.7 Configuration réalisé avec 2 couches de mousse renforcé par les inclusions

Tableau 2.8 Configuration réalisée avec 2 couches de mousse renforcée par des inclusions surmontée par une nappe géosynthétique

Tableau 2.9 Configuration réalisé avec 5 couches de mousse renforcé par les inclusions

Tableau 2.10 Configuration réalisé avec 5 couches de mousse renforcée par des inclusions coiffées par des dallettes

Tableau 2.11 Configuration réalisé avec 5 couches de mousse renforcé par des inclusions surmontée par une nappe géosynthétique

Tableau 2.12 Configuration réalisée avec 2 couches de mousse renforcées par des inclusions

Tableau 2.13 Configuration réalisé avec 2 couches de mousse renforcé par des inclusions surmonté par une nappe de géosynthétique

Tableau 2.14 Les déplacements mesurés à l'interface mousse-remblai (T4, T5 et T5')

Tableau 3.1 Propriétés des matériaux

Table 3.2 Les valeurs du module d'élasticité utilisées dans les modèles équivalents.

Tableau 3.3 Confrontation des efficacités maximales.

## NOTATIONS

PTC : Plate-forme de transfert de charge

GSY : Géosynthétique

$A_p$  : Surface occupée par l'inclusion

$A_s$  : Surface totale de l'air d'influence d'une inclusion rigide

$E_p$  : Efficacité de transfert des charges

$F_p$  : La force transmise à la pointe de l'inclusion

H : La hauteur du remblai.

$\gamma$  : Le poids unitaire.

s : Espacement entre les axes des inclusions

a : Diamètre d'inclusion

$D_{max}$  : Le diamètre maximal des grains

$D_{50}$  : Le diamètre moyen des grains

$C_u$  : Coefficient d'uniformité

$C_c$  : coefficient de courbure

$\gamma_s$  : Le poids unitaire des grains de sol.

$e_{min}$  : L'indice de vide du sol à son état le plus dense

$e_{max}$  : L'indice de vide du sol à son état le plus lâche

$\varepsilon$  : Déformation

T : Résistance à la traction par unité de longueur du géosynthétique.

J : Rigidité à la traction par unité de longueur

IR : Inclusion rigide

$R_{inter}$  : Facteur de réduction des caractéristiques au niveau d'interface

$C_{inter}$  : La cohésion à l'interface

$\Phi_{inter}$  : L'angle de frottement à l'interface

$\Psi_{inter}$  : L'angle de dilatance à l'interface

EA : la Rigidité axiale élastique

$\Delta l$  : L'allongement

L : La longueur initiale

$\sigma$  : Contrainte

E : Module de Young

$\nu$  : Coefficient de Poisson

c: Cohésion

$\varphi$ : Angle de frottement

$\psi$ : Angle de dilatance

$d_{eq}$  : Diamètre équivalent

$h_s$  : L'épaisseur du sol compressible

$E_{eod}$  : Module oedométrique

$\beta$ : Coefficient de corrélation entre le module de Young et oedométrique

$E_s$  : Le module de Young du sol compressible

$E_{eqv}$  : Le module de Young équivalent

$\varepsilon_{yy}$  : Déformations verticales

$C_{sol}$  : La cohésion du sol

$\Phi_{sol}$  : L'angle de frottement du sol

$\Psi_{sol}$  : L'angle de dilatance du sol

A : La partie de la charge transmis directement aux têtes des inclusions

B : La partie de la charge transmis aux têtes des inclusions à travers le geosynthetic

C : La partie de la charge supporté par le sol compressible

$c'$  : La cohésion effective

$\Phi'$  : L'angle de frottement effectif

X : La distance à l'axe (x)

$\sigma_p$ : la contrainte moyenne sur l'inclusion

$\sigma_s$ : la contrainte moyenne sur le sol

# **Introduction générale**

Construire des remblais et des bâtiments sur des sols de faibles caractéristiques, représente un défi important pour les ingénieurs civils. Un sol compressible est généralement caractérisé par des tassements importants, faible capacité portante et un degré de saturation élevé. L'application des charges externes engendre des tassements totaux et différentiels excessifs, des mouvements latéraux et instabilité des pentes, ce qui peut endommager les structures. De nombreuses techniques disponibles sont appliquées pour résoudre ces problèmes, telles que le pré-chargement, les drains verticaux, renfort géosynthétique, remplacement du sol.

Le renforcement des sols par des inclusions rigides verticales, a suscité de plus en plus l'intérêt des chercheurs en géotechnique. Cette technique présente plusieurs avantages caractérisés par sa rapidité de construction, son efficacité en terme de capacité portante et de réduction des tassements absolus et différentiels (Nunez et al., 2013 ; Girout et al., 2014 ; Briançon et al., 2015).

La combinaison entre les inclusions rigides traversant le sol compressible et le matelas granulaire, associé ou non à un géosynthétique, et posé sur le sol compressible permet de transférer une grande partie des charges de l'ouvrage vers les inclusions rigides. Le matelas de transfert de charge a pour rôle de mieux répartir la charge vers les têtes des inclusions tout en minimisant la charge revenant à la surface du sol compressible.

L'objectif de cette thèse est d'améliorer la compréhension du comportement des remblais en sol renforcé par des inclusions rigides. Dans ce cadre, deux aspects complémentaires : Expérimentations en laboratoire et Modélisation numérique ont été développés.

La présente thèse est organisée en 3 chapitres.

Le premier chapitre comporte une présentation du principe de fonctionnement de la technique d'amélioration des sols par inclusions rigides verticales. Une bibliographie des travaux réalisés sur cette technique a été développée. Des méthodes analytiques sont citées, des modèles de simulation physique sont décrits et des approches par calculs numériques sont présentées. La synthèse de ce chapitre nous a permis de mieux comprendre le mécanisme de transfert de charge et de souligner quelques insuffisances constatées dans les études antérieures. Ces anomalies ont été prises en compte dans la conception du modèle réduit développé au sein du laboratoire GEOMAS à INSA de Lyon et qui a servi d'outil pour notre travail de thèse.

Le deuxième chapitre comporte deux parties. La première partie est consacrée à la description du modèle physique réduit, avec lequel ont été réalisés les essais sur un remblai reposant sur un sol compressible renforcé par un groupe d'inclusions rigides. La deuxième partie est consacrée à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus sur le modèle physique. Ces résultats sont présentés en termes de déplacements à l'interface sol compressible-remblai et de l'efficacité des inclusions rigides mesurés pour plusieurs configurations souvent rencontrées dans la réalité.

Au troisième chapitre, une étude numérique a été menée à l'aide du logiciel Plaxis. L'objectif est de prédire le tassement et le coefficient d'efficacité pour le modèle réduit présenté au deuxième chapitre. Ce qui permettra de valider le comportement observé sur le modèle numérique par confrontation avec les mesures obtenues sur le modèle physique. L'influence de la compressibilité du sous-sol et de la présence des dalles sur le transfert des charges est décrite. La déflexion et les forces de tractions calculées au niveau du géoynthétique utilisé comme renforcement sont, aussi, présentés.

Les principaux résultats obtenus à l'issue de ce travail sont regroupés à la conclusion générale.

# **Chapitre 1**

## **Présentation de la technique de renforcement des sols par inclusions rigides**

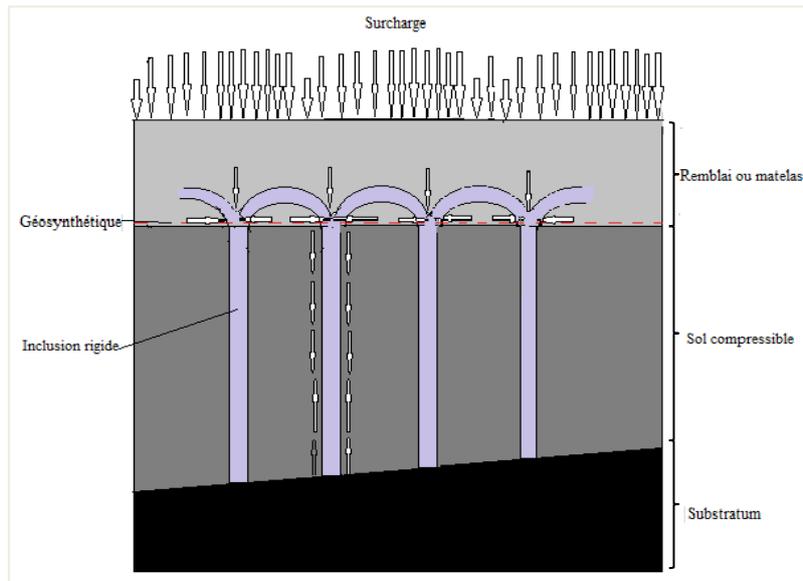
## **1.1. Introduction**

Dans certains cas, il est nécessaire de construire des ouvrages tels que les remblais routiers et ferroviaires dans des zones de sol compressibles. Cependant, de nombreux problèmes peuvent apparaître par la suite, tels que les tassements excessifs pouvant porter atteinte à la stabilité des ouvrages en raison de la compressibilité du sol support. De nombreuses techniques sont disponibles pour résoudre ces problèmes, à savoir le pré-chargement, la disposition de drains verticaux... etc. Cependant, ces méthodes nécessitent du temps pour consommer le tassement de consolidation. Les remblais construits sur des inclusions rigides, parfois renforcés par des nappes de géosynthétiques, font partie des techniques utilisés pour construire sur des sols de mauvaise qualité. Ces derniers ne nécessitent aucun pré-chargement et les tassements prévus, auparavant, se trouvent considérablement réduits avec un impact environnemental moindre. Cette technique consiste à mettre en place un groupe d'inclusions rigides dans la couche de sol compressible surmontée d'une plate-forme granulaire, renforcée ou non par géosynthétique, et ce dans le but de transmettre la charge appliquée en surface au substratum par un mécanisme de voûte au niveau de la plateforme granulaire et de frottement négatif mobilisable sur toute la longueur de chacune des inclusions. Les différentes interactions entre tous les éléments de renforcement cités, rendent la conception de cette technique plus complexe.

## **1.2. La technique de renforcement des sols par inclusions rigides**

### ***1.2.1. Le principe de fonctionnement***

Le renforcement des sols par des inclusions rigides constitue l'une des récentes techniques d'amélioration des sols. Elle consiste à créer un massif composite dans lequel les inclusions traversent le sol compressible afin de transférer les charges appliquées à la surface vers le substratum. La présence d'une plateforme de transfert de charge est nécessaire à cette technique. En effet, cette dernière est disposée, avec une certaine épaisseur, entre les têtes des inclusions et l'ouvrage qu'elle supporte, ce qui entraîne une discontinuité géométrique et mécanique. Le tassement non uniforme à la base de ce matelas provoque un report de charge vers les inclusions par effet de voûte au niveau du matelas et par la mobilisation du frottement négatif le long des inclusions. Une nappe géosynthétique peut être insérée à la base de la plateforme de transfert de charge et contribuer ainsi, au report de charge vers les têtes des inclusions rigides par effet membrane. La figure 1.1 schématise le principe de fonctionnement de cette technique de renforcement des sols.



**Figure 1.1** Principe du renforcement par inclusions rigides

On peut distinguer plusieurs familles des inclusions rigides suivant leur mode d'exécution et les matériaux qui les constituent. Selon la mise en œuvre, Briançon et al., (2004) distinguent deux familles :

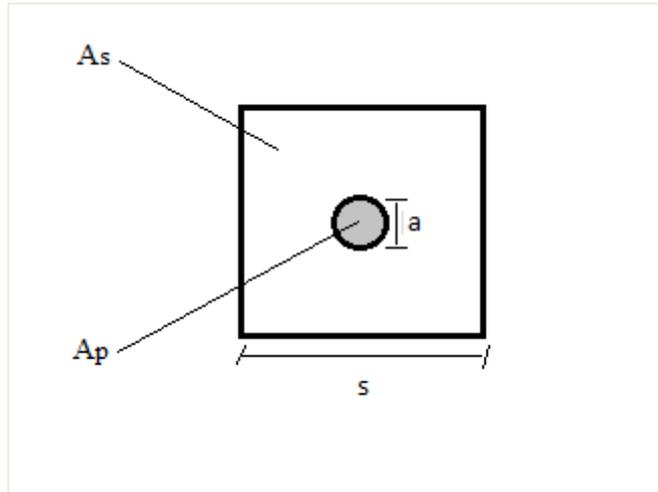
- Les inclusions réalisées par substitution du matériau en place, technologies anciennes, impliquant la préfabrication (inclusions en bois, métallique, béton armé) cette famille présente l'avantage de la bonne prédiction de la rigidité et du module de déformation.
- Les inclusions réalisées pour amélioration locale du sol en place sans qu'il soit substitué. Des technologies d'injection ou de mélange où les propriétés du sol en place sont modifiées par l'ajout de liants et les inclusions deviennent plus rigides que le sol en place.

### ***1.2.2. Les éléments constitutifs***

#### ***1.2.2.1. Les inclusions rigides***

Les inclusions rigides proprement dites sont constituées d'éléments élancés souvent cylindriques, mécaniquement continus, et verticaux. Elles sont considérées comme "rigides", vis à vis du sol compressible traversé.

La surface de la section droite de la tête d'inclusion ( $A_p$ ) rapportée à celle de la maille du renforcement ( $A_s$ ) définit le taux de recouvrement (Figure 1.2), c'est un paramètre important, son choix influence l'efficacité du système ainsi que le temps et le coût de construction de l'ouvrage.



**Figure 1.2** Géométrie d'une maille élémentaire

Afin d'augmenter le taux de recouvrement, on peut utiliser un maillage plus serré ou bien coiffer les têtes des inclusions par des dalles (Figure 1.3).



**Figure 1.3** Exemple des dalles (Briançon et al., 2014)

### *1.2.2.2. La plate-forme de transfert de charge*

La spécificité de la technique de renforcement du sol par des inclusions rigides est la discontinuité géométrique et mécanique entre les inclusions et l'ouvrage, représenté par une couche (ou matelas) de répartition, sur laquelle repose l'ouvrage à construire, appelée également plate-forme de transfert de charge (PTC).

La fonction principale de cette couche est de réduire les tassements sous l'ouvrage, en assurant le transfert de charge vers les têtes des inclusions. Donc, il apparaît qu'une épaisseur minimale du matelas est nécessaire est requise pour permettre un transfert efficace de charge vers ces inclusions et limiter, de ce fait, le tassement de la structure supportée (dallages, semelles...). Cette plateforme peut être constituée, selon les applications, comme suit :

- d'une simple couche de matériau granulaire bien compacté ;
- d'une couche de sol traité aux liants hydrauliques ;
- ou d'une couche de sol granulaire renforcée par nappes horizontales de géosynthétiques.

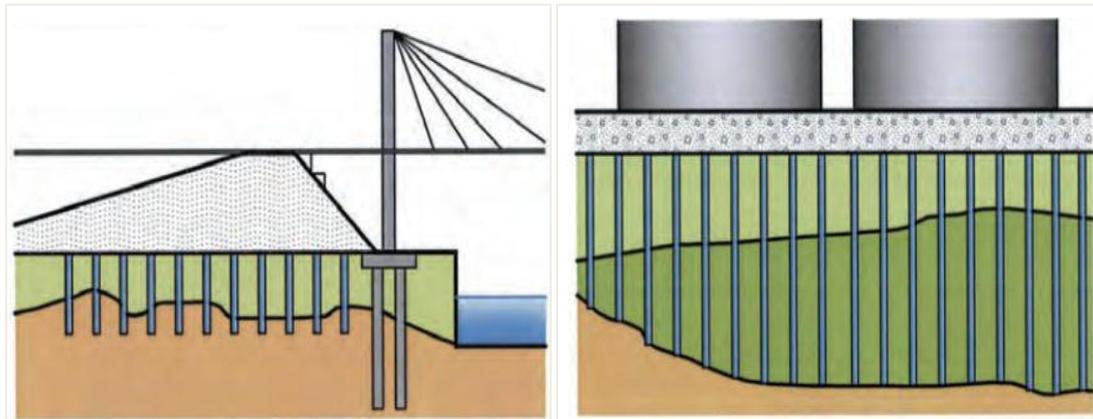
Les nappes de renforcements peuvent être mises quelques centimètres au-dessus des têtes des inclusions ou bien à l'intérieur de la plate-forme granulaire.

### *1.2.3. Domaine d'application*

Les solutions d'amélioration de sols sont utilisées d'une façon générale pour des ouvrages de grande emprise au sol. Dans cette technique de renforcement des sols, il existe généralement deux types d'ouvrage :

- Inclusions sous dallage (des dallages des bâtiments industriels et commerciaux) : pour ce type d'ouvrage une dalle rigide est intercalée entre la PTC et la structure, une attention particulière doit être prise au dimensionnement de la plateforme de transfert de charge à cause des moments fléchissant pouvant se développer et la charge d'exploitation sur le dallage qui n'est pas forcément uniforme.
- Inclusions sous remblai : la charge dans ce cas est permanente, la surcharge d'exploitation est faible et il n'y a pas de structure. La base du remblai doit être traitée, spécifiquement, pour assurer le rôle de la PTC. La stabilité du remblai et les tassements à la surface de ce dernier sont les critères de dimensionnement pour ce type de réalisation. C'est dans le cas de cette configuration que ce travail a été réalisé.

La figure 1.4 présente des exemples d'ouvrages réalisés sur un sol renforcé par des inclusions rigides



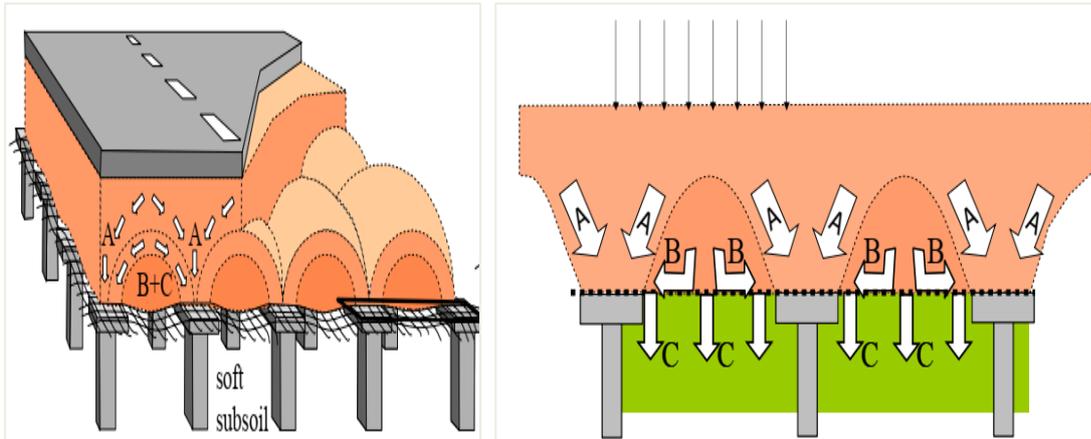
(a) Remblai d'accès à un ouvrage d'art

(b) Réservoirs et bassins

**Figure 1.4** Exemples d'ouvrages réalisés sur un sol renforcé par des inclusions rigides  
(ASIRI 2012)

### 1.3. Le mécanisme de transfert de charge dans un remblai construit sur un sol compressible renforcé par des inclusions rigides

Le mécanisme de transfert de charge à l'intérieur du remblai construit sur des inclusions rigides, est basé en partie sur l'effet de voûte prenant naissance dans le remblai. Ce dernier phénomène est dû à la nette supériorité de la rigidité de l'inclusion à celle du sol compressible induisant ainsi, une augmentation de la contrainte en tête des inclusions et une diminution de la pression à la surface du sol compressible. Par conséquent, les inclusions portent le grand pourcentage des charges totales (partie A), et le sol mou prend la quantité restante du chargement (chargement résiduel) (Figure 1.5). Dans le cas où une nappe géosynthétique est intercalée à la base du remblai, la charge résiduelle est divisée en deux parties : la partie (B) passe du géosynthétique vers les têtes des inclusions, et la partie (C) qui revient au sol compressible sera transférée, en partie, aux inclusions par frottement latéral négatif (Figure 1.5). Ainsi, Les charges appliquées à la tête et sur le fût de l'inclusion sont transférées vers la pointe (Van Eekelen 2012).

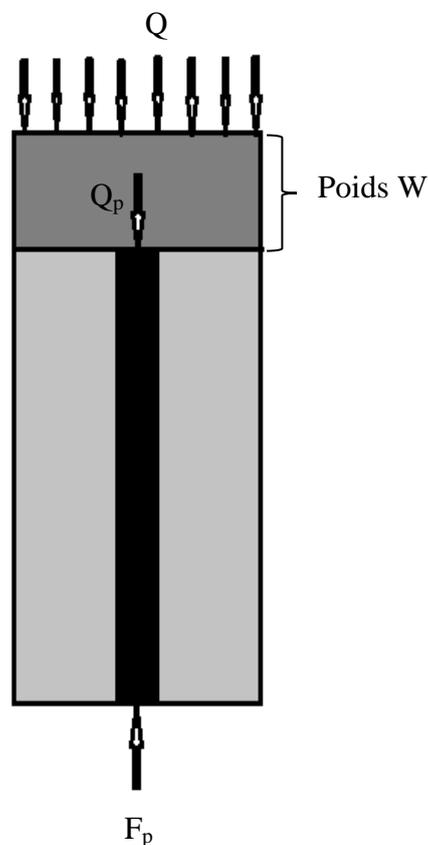


**Figure 1.5** La distribution de charge, remblai sur des inclusions rigides et GSY (Van Eekelen 2012)

#### 1.4. L'efficacité de transfert des charges (E)

L'efficacité est l'un des paramètres qui quantifient le transfert de charge des inclusions, elle est définie comme le rapport de la valeur d'effort transmis en pointe de l'inclusion à la charge verticale appliquée à la surface unitaire affectée à l'inclusion (Figure 1.6), elle est donc exprimée en (%) pour un maillage carré par la relation suivante :

$$E_p (\%) = \frac{F_p}{(s^2 \cdot \gamma \cdot H)} \cdot 100 \quad (1)$$



**Figure 1.6** Calcul d'efficacité

Où  $F_p$  est la force transmise à la pointe de l'inclusion,  $s$  désigne l'espacement entre les axes des inclusions,  $\gamma$  et  $H$  désignent respectivement le poids unitaire et la hauteur du remblai. Il est bien connu que plusieurs paramètres influencent l'efficacité des inclusions, telles que l'espacement entre les axes des inclusions, le diamètre des inclusions et les propriétés physiques du matériau de remblai.

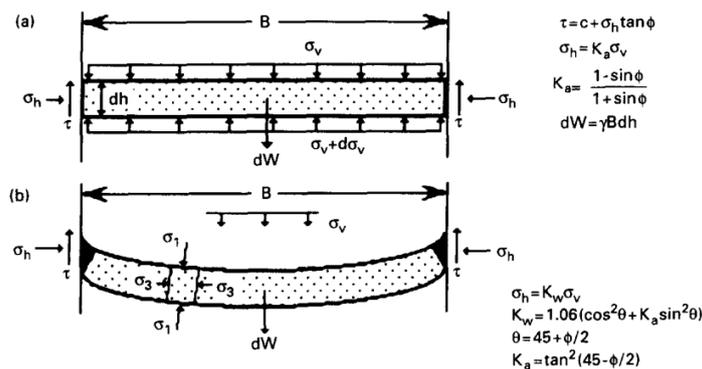
## **1.5. Brève bibliographie sur les méthodes analytiques de calcul et dimensionnement**

Les méthodes analytiques qui quantifier le transfert de charge vers les inclusions rigides sont nombreuses, et les résultats sont souvent aussi très dispersés les uns par rapport aux autres. Dans la majorité de ces méthodes, le calcul se fait en deux étapes : l'étape (1) (ou l'étape d'effet de voûte) dans laquelle la distribution de charge entre les inclusions et le sol avec ou sans renforcement est déterminée. L'étape (2) (ou l'étape d'effet membrane), dans laquelle la déformation et les tensions dans le géosynthétique utilisé sont déterminées.

### ***1.5.1. Les méthodes analytiques pour l'effet de voûte***

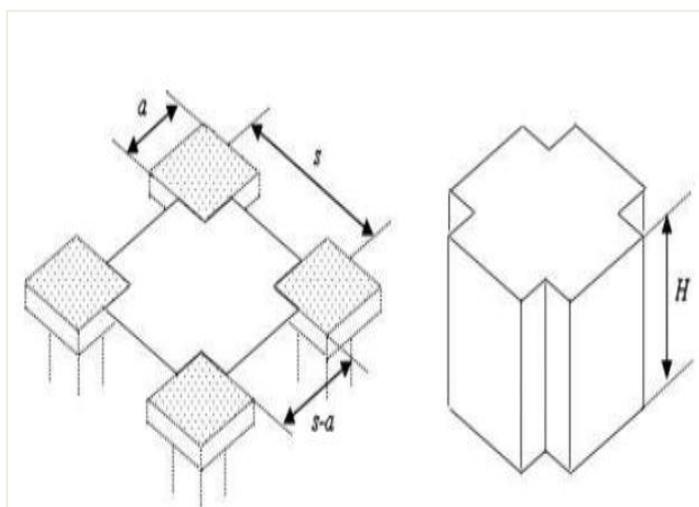
Plusieurs méthodes analytiques sont développées, représentées par différents modèles pour le but de quantifier le transfert de charge causé par l'effet voûte. On exposera brièvement, par la suite, quelques-unes d'entre elles qui sont représentatives.

- Les modèles basés sur le cisaillement suivant un plan vertical dans le remblai. ce dernier est divisé en colonnes au droit des inclusions y compris le sol compressible. Les modèles de ce type sont basés sur la théorie proposée par Terzaghi (1943) pour le cas d'un sol sur une trappe qui s'abaisse, et pour lequel l'effet voûte a été estimé dans un sol purement frottant. Mc Kelvey (1994) a introduit ensuite le géosynthétique et il a supposé l'existence d'un plan d'égal tassement, figure 1.7.



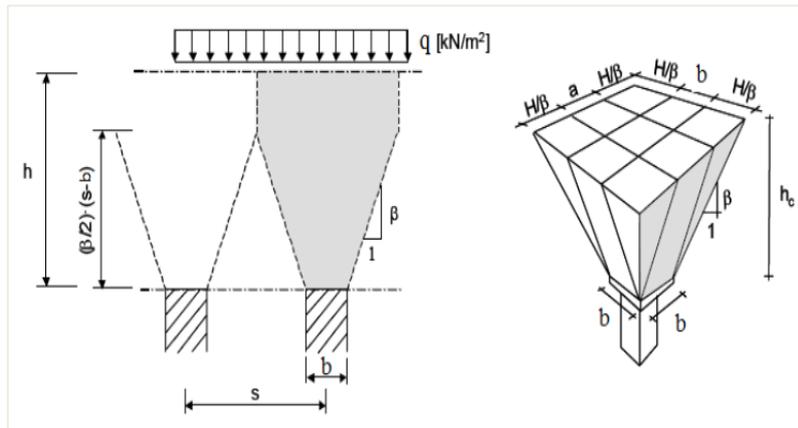
**Figure 1.7** Tranche de sol élémentaire, (a) représentation de Terzaghi (1943), (b) représentation de Mc Kelvey (1994)

Ces modèles ont été développés par la suite par Russell et Pierpoint (1997) par la considération de la troisième dimension (les plans de frottement verticaux sont situés le long des bords des dalles carrées) (Figure 1.8). La contrainte verticale appliquée sur le sol a été déterminée à partir de l'équilibre d'une partie de sol comprise entre les bords de deux inclusions voisines.



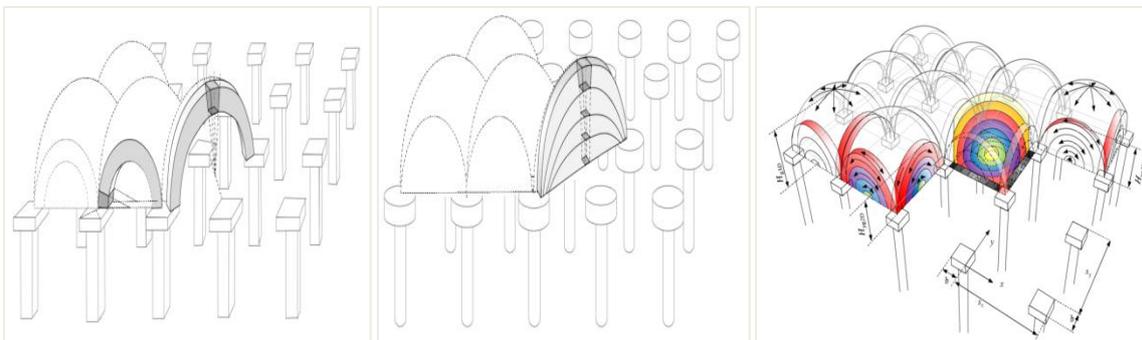
**Figure 1.8** Géométrie proposée par Russell et Pierpoint (1997)

- Les modèles dites de volumes géométriques. Dans cette catégorie la voûte a une forme définie, généralement triangulaire que ça soit en 2D ou 3D, comme le montre la figure 1.9. Elle suppose que toute la charge au-dessus de la voûte est directement transférée aux inclusions et que le poids de sol sous la voûte est supporté par le sous-sol et le géosynthétique. Un ensemble de ces modèles ont été présentés par plusieurs auteurs tel que (Carlsson, 1987; Rogbeck et al., 1998; Collin, 2004 et Eskişar et al., 2012). Ces modèles sont généralement simples. Cependant, les propriétés mécaniques du remblai, tel que l'angle de frottement, ne sont pas prises en compte.



**Figure 1.9** 2D et 3D forme géométrique de transfert des charges (Carlsson, 1987)

- Les modèles basés sur l'hypothèse de transfert de charge vers les inclusions par des mécanismes de voûte. Dans cette catégorie, une voûte de contraintes de compression élevée est supposée se former au-dessus du géosynthétique et du sous-sol entre les éléments rigides. La pression sur le géosynthétique et le sous-sol peut être calculée en considérant l'équilibre de la voûte. Dans la plupart des modèles, la voûte a une certaine épaisseur. La différence principale entre toutes ces méthodes c'est la forme de la voûte considérée. Pour le modèle de Hewlett et Randolph (1988), les voutes sont semi-circulaires avec une épaisseur uniforme. Dans le modèle de Zaeske (van Eekelen et al., 2013), sont divisés en différents éléments de couronne. Van Eekelen et al. (2013) proposent le modèle des voutes concentriques, pour décrire le transfert de charge, ce modèle est applicable juste pour le cas qui présente le geosynthétique. La figure 1.10 montre ces trois modèles présentés.



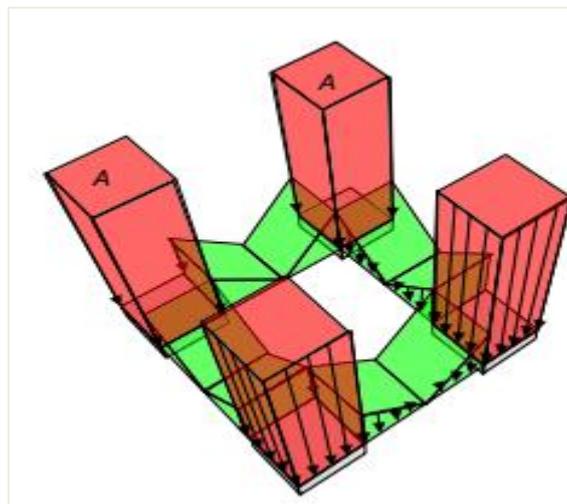
(a) Modèle de Hewlett et Randolph (1988) (b) Model de Zaeske (Van Eekelen et al., 2013) (c) Modèle de Van Eekelen et al. (2013)

**Figure 1.10** Des modèles proposés, décrit le transfert des charges par effet de voûte

### ***1.5.2. Les méthodes analytiques pour la déformation du géosynthétique en traction***

La deuxième étape de calcul consiste à déterminer la force de traction et la déformation du renforcement. Pour atteindre ce but, la pression appliquée sur le géosynthétique et le sol compressible doit être connue. Sous l'effet de voûte, l'étape (1) détermine la pression appliquée sur le géosynthétique et le sol compressible. L'étape (2) permet d'estimer la force de traction et la déformation du renforcement en considérant la bande entre deux inclusions adjacentes, le géosynthétique présente une rigidité plus grande a cette direction et ensuite la plupart des charges sont attirées vers cette bande comme présenté par plusieurs auteurs tels que Van Eekelen et al., (2012), Almeida et al., (2007), Zaeske (2001). La norme britannique BS8006 (2010) ne prend pas en considération la présence du sol compressible, la charge supportée par le sous-sol est supposée nulle et la répartition de charge sur le géosynthétique est considérée comme uniforme.

Comme décrit par Van Eekelen et al. (2015), les pressions sur les bandes entre les inclusions sont élevées à proximité des inclusions et faibles à mi-distance lorsqu'il n'y a pas de support de sous-sol ou bien pour un faible support. Cette répartition de charge peut être décrite, approximativement, par des formes triangulaires (Figure 1.11). Avec plus de support de sous-sol, la répartition de la charge sur la bande devient plus uniforme.



**Figure 1.11** Approximation de la répartition de charge résultant de l'effet de voûte (Van Eekelen et al 2021)

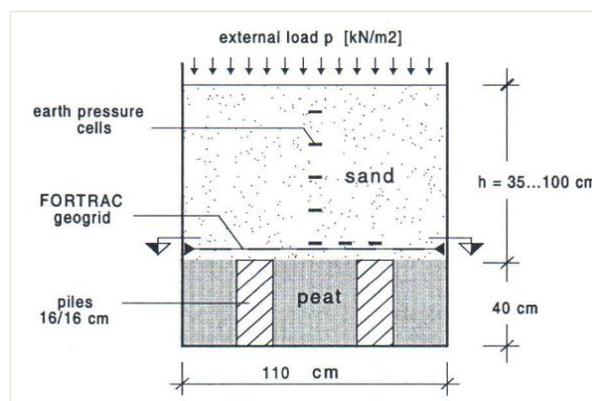
Van Eekelen et al. (2012b) présentent une amélioration importante de l'étape (2) de calcul. Les auteurs ont pris en compte la résistance du sous-sol sous toute la zone entre les inclusions, ce qui diffère de l'approche de la recommandation Allemande EBGEO (2010), qui ne prend en compte que le sous-sol sous les bandes de renforcement entre les inclusions adjacentes.

Pham (2020) prend en compte le frottement d'interface entre le géosynthétique et le sol environnant dans le calcul de déflexion du renforcement, et il a montré que ce frottement conduit à une réduction de la déflexion de 2% pour les remblais à faible frottement à 5% pour les remblais à frottement élevés.

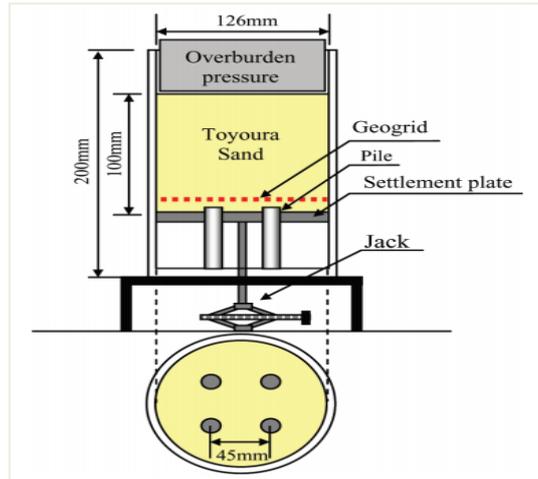
## 1.6. Brève bibliographie sur les modèles physiques tridimensionnels

Afin de comprendre le mécanisme de transfert de charge dans les remblais réalisés sur des inclusions rigides verticales, de nombreuses investigations sur des modèles réduits de laboratoire impliquant des inclusions avec ou non des renforts géosynthétiques ont été menées. Le transfert de charge par les inclusions et l'apport du géosynthétique ont été particulièrement étudiés. Ces modèles sont généralement composés de deux boîtes superposées, un caisson inférieur réservé au sous-sol renforcé par des inclusions rigides et un caisson supérieur pour la mise en place du remblai. Une nappe géosynthétique peut être placée à l'interface sol renforcé-remblai.

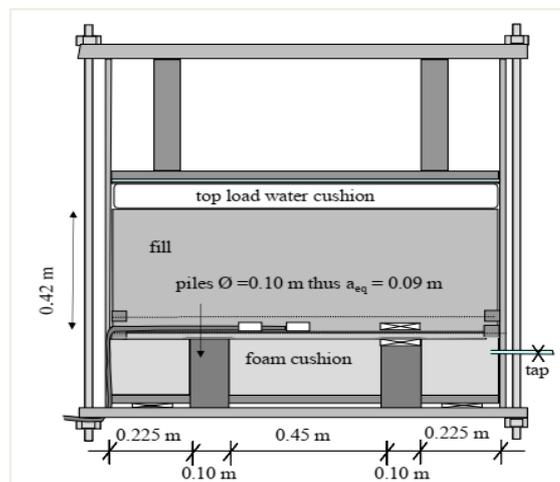
La plupart des études ont utilisé des modèles à quatre inclusions tel que (Kempfert et al., 1999 ; Hironaka et al., 2006 ; Van Eekelen, 2015). (Figure 1.12, 1.13 et 1.14).



**Figure 1.12** Modèle de Kempfert et al., (1999)



**Figure 1.13** Modèle de Hironaka et al., (2006)

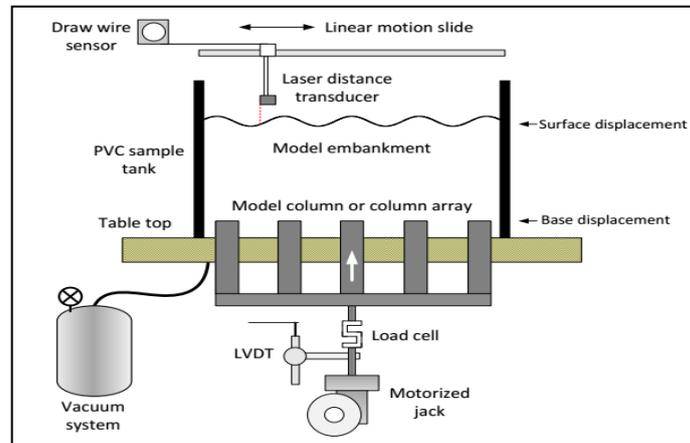


**Figure 1.14** Modèle de Van Eekelen, (2015)

Bien que ces études aient conduit à des améliorations considérables des méthodes de conception, leur inconvénient principal est le manque de contrôle sur les effets des bords du modèle sur le transfert de charge. De ce fait, d'autres modèles physiques avec plus d'inclusions ont été proposés.

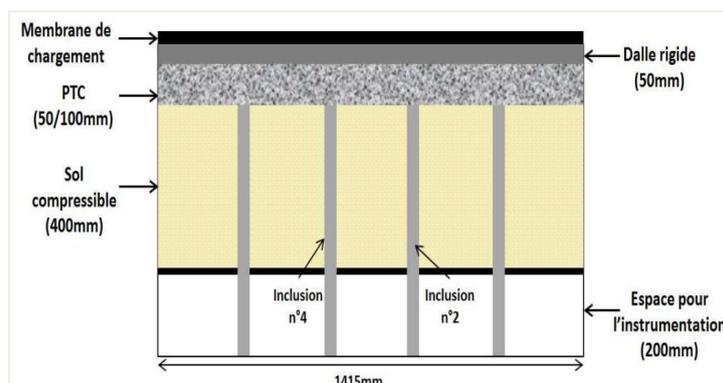
Mac\_Guire (2011) a utilisé un modèle contenant 25 inclusions (Figure 1.15); l'auteur a étudié la déformation de la surface supérieure du remblai et la hauteur critique du remblai en fonction de nombreux paramètres. Dans son dispositif expérimental, le sous-sol est remplacé par une plaque rigide, afin de simuler le tassement du sol compressible, les inclusions sont déplacées vers le haut à travers la plaque qui est maintenue fixe. Des résultats intéressants ont été obtenus sur la hauteur critique du remblai (définie comme la hauteur du remblai au-dessus de laquelle les tassements différentiels à la base du remblai ne produisent plus de tassement

différentiel significatif à sa surface). Ainsi, une nouvelle formule empirique a été proposée pour évaluer la hauteur critique. Dans ce dispositif, il faut noter que le sol compressible n'est pas correctement modélisé, ce qui pourrait affecter la représentativité des résultats expérimentaux par rapport à la réalité.



**Figure 1.15** Modèle de Mac\_Guire (2011)

Houda (2016) a étudié l'influence du chargement statique et cyclique sur l'évolution du transfert de charge et le tassement du sol compressible avec et sans dalle. Le modèle utilisé contient 16 inclusions disposées dans un sol compressible modélisé par un mélange de sable et de billes de polystyrène (Figure 1.16). Ce sol ainsi constitué a des propriétés de compressibilité proches de celles d'un sol compressible réel (Houda 2016). Pour réaliser ces essais, la mise en place du mélange de sol est une tâche délicate pouvant conduire à un problème de répétitivité des conditions initiales en densité, et donc en compressibilité, d'un essai à l'autre.



**Figure 1.16** Modèle de Houda (2016)

Lee et al., (2019) ont réalisé une expérimentation à grande échelle en laboratoire (Figure 1.17). Les essais ont été menés avec 16 inclusions. Le sol compressible a été modélisé par une mousse de polyuréthane et un remblai de sable a été mis en place par compactage pour simuler sa construction. L'étude a porté sur l'évolution de l'efficacité des inclusions et les déplacements verticaux à la base du remblai en fonction de la hauteur de ce dernier. Quatre conditions de renforcement ont été simulées à savoir sans et avec géotextile, avec une et deux géogrilles. Les auteurs ont divisé la formation de la voûte en trois phases. Ils ont montré que le géosynthétique améliore l'efficacité de l'inclusion et diminue le tassement du sol compressible. Ce modèle présente des résultats importants, malgré qu'il manque de surveillance sur les autres grilles du maillage.



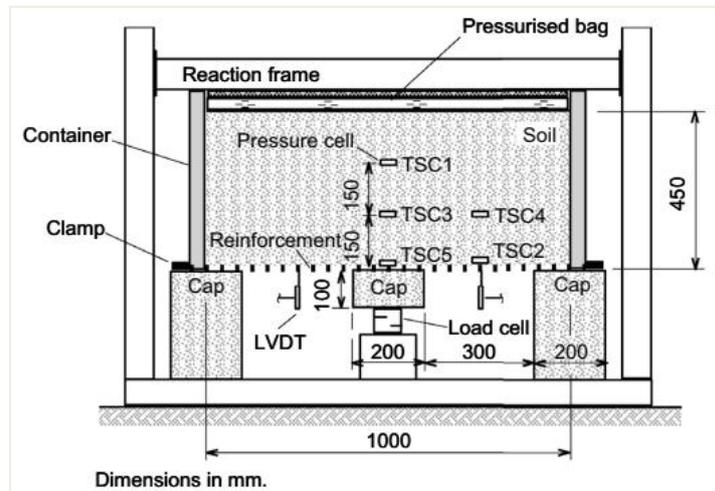
**Figure 1.17** Modèle de Lee et al., (2019)

Il est à noter que pour les deux derniers modèles contenant 16 inclusions avec un maillage carré, seuls quatre inclusions sont placées sur chaque ligne. De ce fait, l'effet des bords sur la maille centrale des inclusions, où le transfert de charge est évalué, reste toujours difficile à contrôler.

D'autres modèles ont simulé la compressibilité du sol par une plaque rigide à déplacement vertical contrôlé (Demerdash, 1996 ; Hironaka et al., 2006 ; Rui et al., 2019). L'utilisation d'une plaque se déplaçant à la fin de la construction du remblai permet de bien observer les déformations à la surface supérieure du remblai. Cependant, les récentes investigations expérimentales à grande échelle de Briançon et Simon (2012, 2017), ont montré que la grande partie des transferts de charge se produisent lors de la mise en place du remblai. Ainsi, la

présence d'une base rigide immobile pendant l'étape de construction ne peut reproduire l'état initial d'un cas réel et dont le mécanisme de transfert de charge en dépend.

Pour certains modèles réduits comme Ewerton et al., (2018), le géosynthétique est mis en place directement sur les têtes des inclusions. Dans ce cas de figure ces dernières supportent le poids du remblai.



**Figure 1.18** Modèle d'Ewerton et al., (2018)

Dans ces modèles, le comportement du remblai sur des inclusions n'est pas vraiment simulé, car l'effet de la compressibilité du sol sur le mécanisme de transfert de charge n'est pas pris correctement en compte, alors que cette compressibilité a une importance non négligeable comme cela a été montré par différents auteurs (Chen et al., (2008), Van Eekelen (2013) et Rui et al., (2019)).

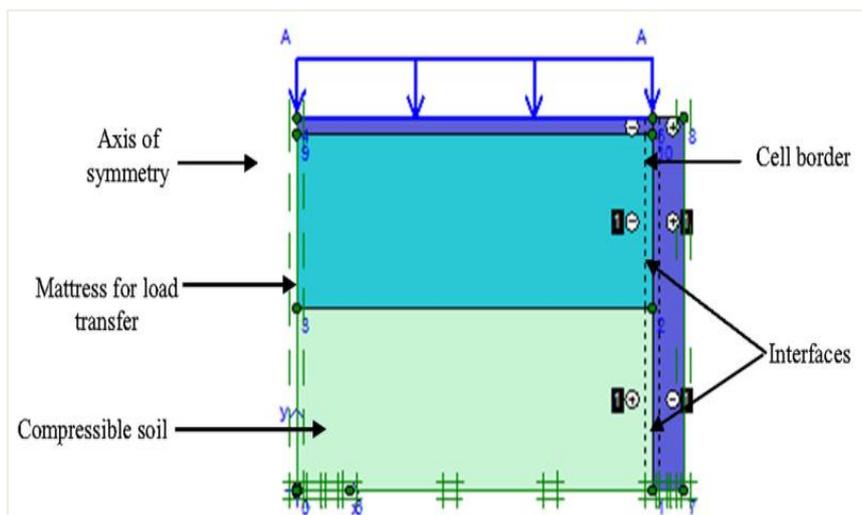
Compte tenu des remarques soulignées précédemment, nous pouvons considérer qu'une simulation physique en modèle réduit proche du comportement du remblai réalisé sur un sol renforcé par des inclusions rigides, doit obéir aux conditions suivantes :

- Le suivi et le contrôle du transfert de charge doit porter sur une grille centrale du modèle.
- La grille centrale ne doit pas être affectée par les conditions des bords du modèle.
- Le choix des matériaux simulant le sol compressible ou géosynthétique doit permettre de représenter le plus fidèlement possible le comportement réel.

## 1.7. Brève bibliographie sur des études numériques

Au cours des dernières années, de nombreuses modélisations numériques ont été réalisées sur des remblais renforcé par inclusions rigides et ce par différentes approches. Ce type d'investigation représente un moyen très utile dans le domaine de la géotechnique.

De nombreuses études se sont penchées sur l'effet de certains paramètres tels que le taux de couverture, la rigidité du sol compressible et l'épaisseur du remblai sur le transfert de charge et les tassements du sol compressible. Une modélisation axisymétrique d'un modèle physique 1g de sol renforcé par une seule inclusion a été réalisée par Boussetta et al., (2016) (Figure 1.19). La comparaison entre le tassement et l'efficacité d'inclusion calculés d'une part, et ceux mesurés expérimentalement d'autre part, montre qu'il y a un bon accord.

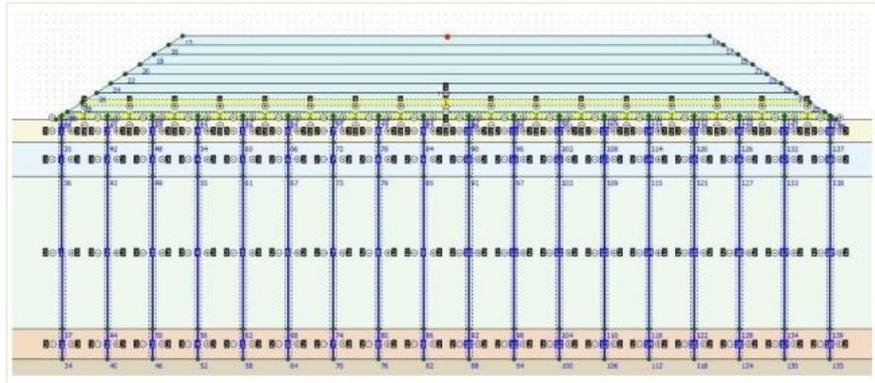


**Figure 1.19** Modèle numérique de Boussetta et al., (2016)

Le matelas de transfert de charge a été modélisé par la loi de comportement appelé Hardening Soil Model (HSM), le sol compressible par Soft Soil Model (SSM) et l'inclusion rigide par le modèle de Mohr–Coulomb. Les interfaces a ce modèle ont été caractérisés par  $R_{inter}$ .

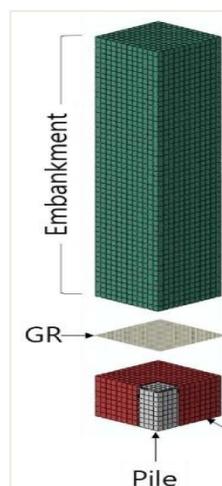
À l'aide d'un modèle de calcul par éléments finis à 2D (Figure 1.20), validé par des essais physiques à grande échelle, Balaban et Onur (2018) ont étudié l'effet du nombre et de l'emplacement des renforts géosynthétiques sur le tassement du sol compressible, la répartition des contraintes, les pressions interstitielles et les déplacements latéraux du remblai. Le remblai a été modélisé par le modèle de Mohr–Coulomb, le sol compressible par Soft Soil Model (SSM) et l'inclusion rigide par le modèle élastique linéaire. Les interfaces entre

l'inclusion et le sol compressible et entre le GSY et le remblai ont été caractérisés aussi par  $R_{inter}$ .



**Figure 1.20** Modèle numérique de Balaban et Onur (2018)

Lee et al., (2019) ont modélisé un dispositif physique à grande échelle de remblai réalisé sur un sol renforcé par des inclusions rigides à l'aide d'un calcul par éléments finis en 3D d'une maille élémentaire. Le but dans cette étude est d'appréhender l'effet de la rigidité du sous-sol et des paramètres géométriques sur le transfert des charges et les déformations du renfort géosynthétique. Cette investigation numérique permet de vérifier l'applicabilité et les limites du modèle des voutes concentriques proposé par ailleurs. Le sol compressible, l'inclusion et le GSY ont été modélisés par la loi élastique linéaire et le remblai avec le modèle Mohr–Coulomb. L'interaction entre l'inclusion et le sol compressible a été considéré comme lisse.



**Figure 1.21** Modèle numérique de Lee et al., (2019)

A l'issue d'autres travaux, des mécanismes difficiles à appréhender ont pu être mis en évidence. Une illustration claire du développement de la voûte du sol lors de la construction du remblai, ainsi que durant son chargement a été représentée par Zhou et al., (2016). Ce résultat a été obtenu grâce à une modélisation numérique en 3D, validée par des mesures expérimentaux d'un cas d'étude réelle des contraintes dans le remblai, au niveau des têtes des inclusions, et sur le sol compressible. Le cas d'étude a été modélisé complètement, le remblai est caractérisé par le modèle de Mohr–Coulomb, les dalles et le sol compressible par la loi élastique linéaire. Le GSY (geographe) a été modélisé comme un élément coque encastré dans le remblai et qui ne peut supporter qu'une force axiale.

Un modèle numérique en 3D validé par des essais réalisés en centrifugeuse a été utilisé par Almeida et al., (2020) pour compléter les données expérimentales, telles que l'évolution des forces de traction dans le géosynthétique, l'effet de la hauteur du remblai, la surcharge en surface et la rigidité du géosynthétique. Les valeurs des forces de traction obtenues dans le géosynthétique ont été confrontées aux recommandations européennes. Une maille élémentaire a été prise à cette modélisation à cause de double symétrie, le GSY a été simulé par un élément géosynthétique qui travaille juste en traction. Ce dernier avec l'inclusion ont été caractérisés par la loi élastique linéaire, par contre, le modèle Hardening Soil (HS) a été utilisé pour modéliser le matériau granulaire simulé le remblai. Chacune des interfaces ont été caractérisés par des matériaux elastoplastiques.

Les comparaisons entre des différentes modélisations du comportement du sol, entre le type de symétrie et les approches adoptées, ont également, été étudiées. L'impact de la modélisation du comportement du sol de remblai par deux lois différentes (le modèle élastique parfaitement plastique et le modèle élasto-plastique avec écrouissage) dans l'estimation du transfert de charge et du tassement dans le remblai a été étudié par Jenck et al., (2006). Le modèle représente une maille élémentaire.

Certains chercheurs ont préféré les modèles axisymétriques pour leur simplicité. Ils permettent de donner des résultats aussi satisfaisants qu'un modèle en 3D. Selon Dias et al., (2007), l'erreur entre les modèles axisymétriques et 3D est inférieure à 9%.

Le mécanisme de transfert de charge a été étudié aussi par Tran et al., (2020) et qui porte sur la rigidité du géosynthétique ainsi que les paramètres géotechniques et géométriques. Cette étude a été réalisée avec deux méthodes de calculs différentes, la méthode des éléments

discrets et la méthode des différences finies. Les avantages et les limites de ces méthodes de calcul numérique ont été mis en évidence. Le modèle représente toujours un quart de la maille élémentaire, le sol compressible, le GSY et l'inclusion rigide ont été modélisés par la loi élastique linéaire avec la méthode de calcul des différences finies, par contre, le remblai avec le modèle hardning soil.

Finalement, on remarque que les modèles numériques permettent d'étudier l'effet de nombreux paramètres, de comprendre les phénomènes mis en jeux, de prendre des mesures complémentaires, d'évaluer la précision des méthodes analytiques et des approches numériques. Néanmoins, un modèle numérique capable de reproduire les mécanismes réels, doit répondre aux points essentiels suivants :

- Un type de symétrie compatible avec la configuration étudié,
- La modélisation du sol compressible, le GSY et le remblai doit être fait avec des lois de comportements et des approches représentatifs, suivant le problème posé. Et ce aussi, pour les interfaces qui caractérisent les différentes interactions a cette technique,
- Le modèle numérique doit être calibré à partir des résultats expérimentaux fiables.

## 1.8. Conclusion

Après une brève introduction sur la technique de confortement d'un sol compressible par l'introduction d'inclusions rigides et les approches utilisées pour appréhender le comportement du massif de sol ainsi constitué, ce chapitre a permis de présenter différents points.

Plusieurs méthodes analytiques ont été développées. Ces méthodes malgré, qu'elles soient couramment utilisées pour le dimensionnement des ouvrages réalisés sur un sol renforcé par des inclusions rigides, aboutissent à des résultats parfois divergeant et ne prennent pas en compte toute la complexité de cette technique de renforcement.

Les essais réalisés en laboratoire sous différentes configurations permettent de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu mais demeurent toujours simplifiés. Les tests à grande échelle sont les plus proches de la réalité, elles permettent de valider les méthodes analytiques utilisées dans la conception ou encore de calibrer des modèles de simulation numérique complexe. Cependant, ces expérimentations ne permettent pas de tester de nombreuses configurations sur un même site.

La modélisation numérique est un outil efficace pour tester de multiples configurations et paramètres difficiles à maîtrisées dans un temps réduit, mais cela nécessite, au préalable, une étude paramétrique basée sur des résultats expérimentaux fiables.

# **Chapitre 2**

## **Présentation du dispositif expérimental et analyse des résultats**

## 2.1. Introduction

Plusieurs essais expérimentaux ont été réalisés sur des modèles réduits, pour étudier la technique de renforcement des sols par des inclusions rigides verticales. Ces études ont abouti à des résultats importants, permettant de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu lors du transfert de charge. Cependant, la majorité des outils utilisés ne respectent pas toutes les conditions de simulation citées dans le chapitre précédent. Dans ce travail, une série d'essais a été réalisée sur un modèle physique réduit instrumenté, conçu au sein du laboratoire GEOMAS à l'INSA de LYON. Le but est d'étudier les mécanismes de report de charge se produisant dans un remblai mis en place sur un sol compressible renforcé par inclusions rigides. Le modèle contient 36 inclusions verticales disposées aux nœuds d'une grille carrée régulière (6x6). Dans ce cas, le maillage central formé par les quatre inclusions où le transfert de charge est évalué est couvert par deux lignes d'inclusions. Cette façon d'agir permet d'une part de minimiser l'effet des bords sur la grille centrale des inclusions, d'autre part, elle rend possible le contrôle de cette influence par la mesure des charges à la base des inclusions appartenant à la même ligne (six inclusions). Le sol compressible est modélisé par des plaques de mousse de compressibilité équivalente. Le nombre de plaques à poser dépend de l'épaisseur souhaitée du sous-sol à simuler. Ce modèle a l'avantage de reproduire sensiblement les mêmes conditions initiales pour les différents tests (Briançon et Abdelouhab, 2018). Dans ce chapitre, le modèle sera présenté en termes de géométrie, de matériaux et d'instrumentation. Le programme d'essais expérimentaux, le protocole suivi, les résultats obtenus ainsi que leurs analyses seront décrits.

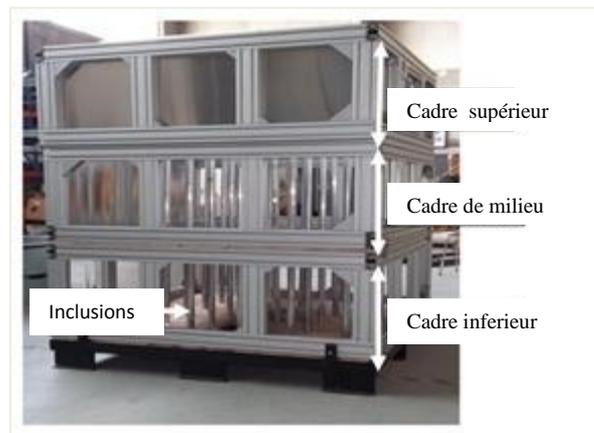
## 2.2. Le modèle physique

### 2.2.1. Description

L'outil utilisé représente un modèle physique tridimensionnel (1g) à l'échelle 1:10. Ce dispositif est composé de trois cadres rigides empilés, avec une section horizontale carrée de 1,2 par 1,2 m et une hauteur de 0,5 m chacun. La hauteur totale est donc de 1,5 m (Figure 2.1).

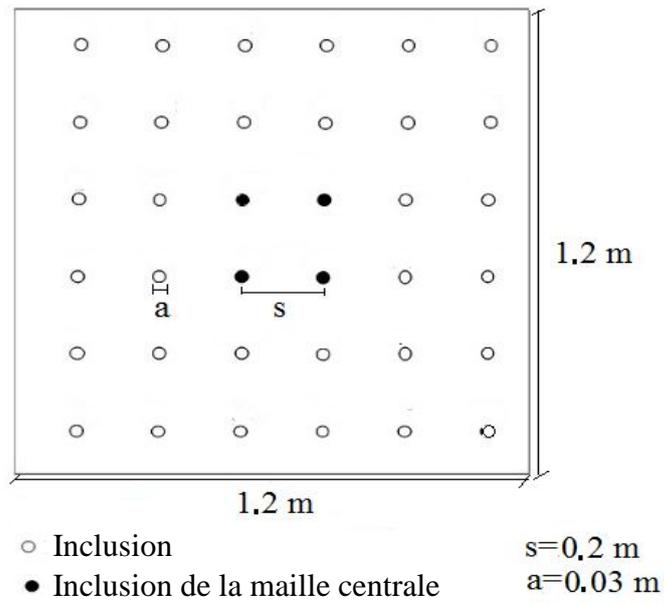
Les inclusions rigides métalliques traversent les deux cadres inférieurs et sont posées sur une plaque rigide. Entre cette plaque et les inclusions centrales, des capteurs de force sont installés et permettent le suivi de l'évolution de la charge à la base de chacune des inclusions. Le cadre central renferme la partie supérieure des inclusions rigides et plusieurs plaques de mousse de

10 cm d'épaisseur chacune, qui modélisent le sol compressible et donc la compressibilité souhaitée. Les plaques sont percées pour assurer le passage des 36 inclusions. De cette façon, le sol compressible peut être simulé par une à cinq plaques superposées de mousse sur un support en bois rigide et fixe. Ce dernier peut être fixé à différents niveaux pour obtenir l'épaisseur de sol souhaitée. Le cadre supérieur est réservé au matériau de remblai. Dans ce cadre, cinq repères sont mentionnées et qui correspondent à cinq niveaux permettant la mise en place du remblai en couches de 0,1 m chacune, pour atteindre une hauteur maximale de 0,5 m.

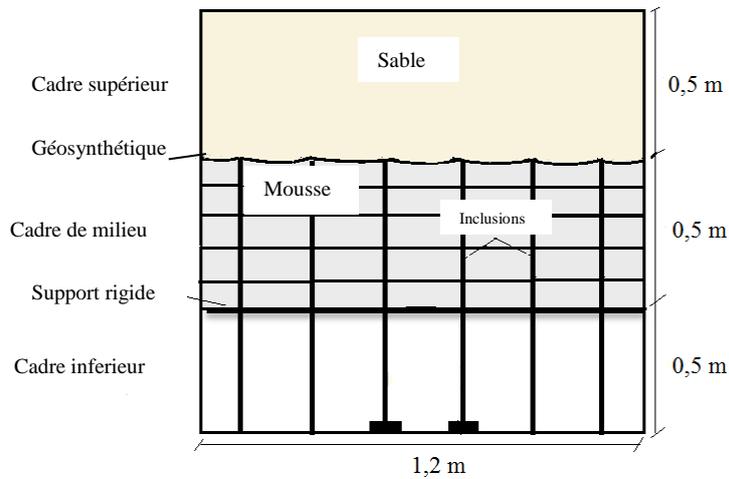


**Figure 2.1** Le modèle physique

Le dispositif peut contenir jusqu'à 36 inclusions métalliques de 0,03 m de diamètre. Ces dernières sont inscrites dans un maillage carré de 0,2 m de côté (Figure 2.2). Une nappe géosynthétique peut être placée à l'interface remblai-mousse (Figure 2.3).



**Figure 2.2** Section horizontale du model physique



**Figure 2.3** Section verticale du modèle physique

Des disques en bois d'un diamètre de 0,07 m et d'une épaisseur de 0,015 m peuvent être placés sur les têtes des inclusions, pour simuler le cas d'un renforcement par inclusions rigides coiffées de dallettes.

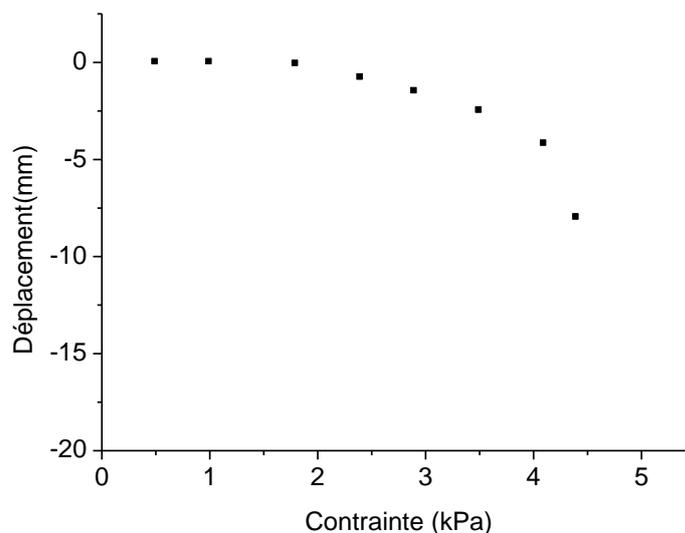
### 2.2.2. Matériaux

Le remblai est constitué d'un sable fin non calibré d'un poids volumique moyen de 14 kN/m<sup>3</sup>. Les propriétés physiques et mécaniques de ce sable sont présentées dans le tableau 2.1.

**Table 2.1** Résumé des propriétés du sable (Propriétés de la courbe granulométrique, propriétés physiques et mécaniques obtenues à partir d'essais triaxiaux)

Classification	D <sub>max</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	Cu	Cc	γ (kN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
	1	0.36	1.82	0.89	14	26.4
SP	e <sub>min</sub>	e <sub>max</sub>	φ' (°)	c' (kPa)		
	0.59	0.98	36.0	0		

Pour sélectionner la mousse qui simule le sol compressible, Briançon et Abdelouhab, (2018) ont mené une série de tests sur huit types de mousse pour choisir la plus appropriée. Des mousses présentant une homogénéité acceptable ont été soumises à des essais œdométriques. Un seul type de mousse a été sélectionné sur la base de sa compressibilité considérée comme représentative de celle des sols compressibles (Figure 2.4).



**Figure 2.4** Courbe contrainte-déplacement de la mousse utilisée.

Les caractéristiques du géosynthétique utilisé pour certains essais sont présentées dans le tableau 2.2.

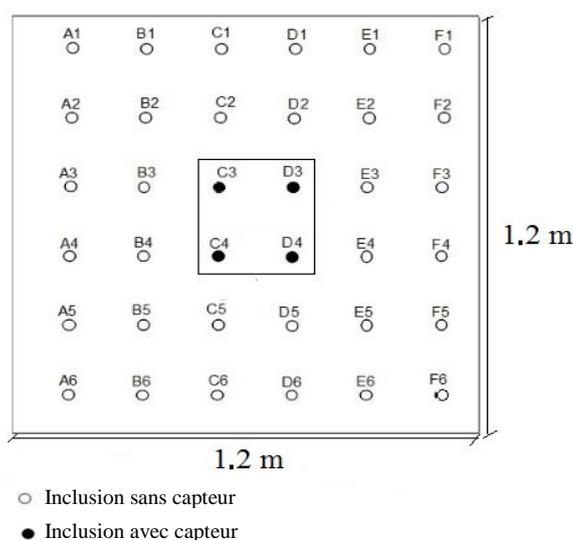
**Table 2.2** Les propriétés du géosynthétique

La direction de la machine			Direction transversal		
$\varepsilon$ (%)	T (kN/m)	J (kN/m)	$\varepsilon$ (%)	T (kN/m)	J (kN/m)
2	4	200	2	4	200
5	8	160	5	8	160
12	15	125	12	15	125

### 2.2.3. Instrumentation

#### 2.2.3.1. Mesure du transfert de charge

Les inclusions sont désignées selon leurs colonnes (identifiées par les lettres A à F) et leurs lignes (numérotées de 1 à 6) (Figure 2.5). Des capteurs de force sont placés aux bases des quatre inclusions de la grille centrale (Figure 2.6). Ils sont désignés selon les inclusions correspondantes C3, D3, C4 et D4 (Figure 2.5). Ces capteurs permettent de suivre l'évolution des charges aux pieds des inclusions lors des essais.



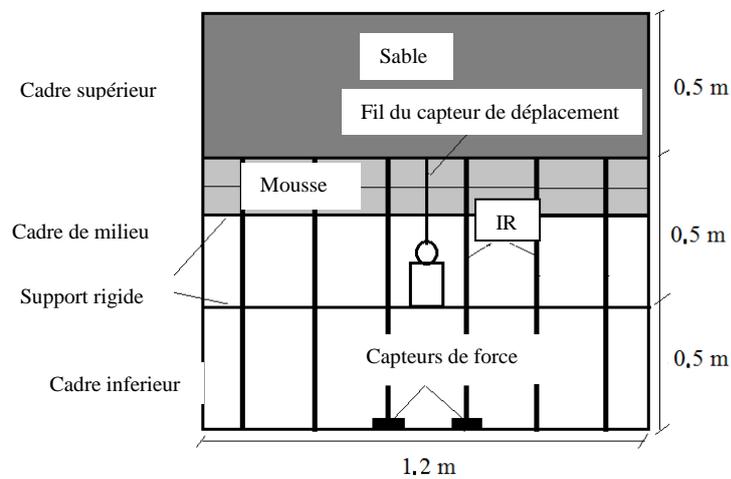
**Figure 2.5** La position des capteurs de force



**Figure 2.6** Les capteurs de force

### 2.2.3.2. Mesure du tassement

Un capteur de déplacement potentiométrique a été placé à mi-distance entre les inclusions de la grille centrale (Figure 2.7). Ce capteur permet de mesurer le tassement de la mousse (Figure 2.8).



**Figure 2.7** Localisation des capteurs



**Figure 2.8** Le capteur de déplacement

## **2.3. Programme expérimental**

### **2.3.1. Configuration des essais**

En comparaison à des essais in situ, la réalisation des essais sur des modèles physiques réduits en laboratoire permet de mieux contrôler les conditions expérimentales, cependant ces essais ne peuvent pas être utilisés pour dimensionner des solutions de renforcement. Un ensemble de 8 essais a été réalisé au sein du laboratoire GEOMAS, le tableau 2.3 présente les tests réalisés avec le type de configuration adoptée pour chaque essai. A travers ces tests, il s'agit d'étudier l'efficacité de la technique du renforcement d'un sol compressible par des inclusions rigides seules ou encore avec association d'éléments additifs tels qu'une nappe de géosynthétique ou des dalles disposées en tête des inclusions. L'effet de la compressibilité du sol support sur l'évolution de l'efficacité du transfert de charge lors de la construction du remblai a aussi été étudié. La répétabilité des résultats d'essais et la qualité appréciable des mesures acquises peuvent servir à la validation de l'approche numérique de notre modèle.

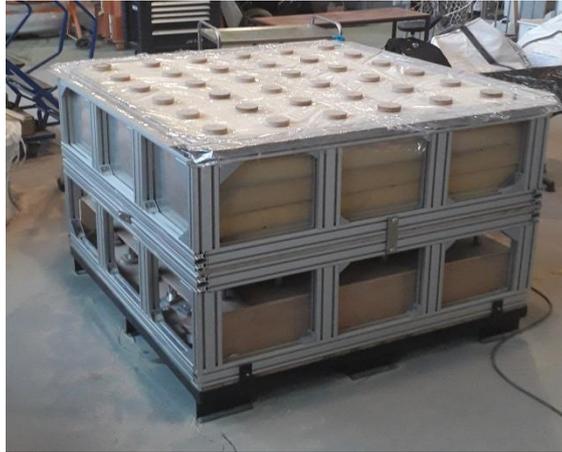
**Tableau 2.3** Le programme des tests réalisé

Tests	Epaisseur de la mousse (m)	Géosynthétique	Dallettes
<b>T1</b>	0.5		
<b>T2</b>	0.5		*
<b>T2'</b>	0.5		*
<b>T3</b>	0.5	*	
<b>T3'</b>	0.5	*	
<b>T4</b>	0.2		
<b>T5</b>	0.2	*	
<b>T5'</b>	0.2	*	

### **2.3.2. Protocole suivi**

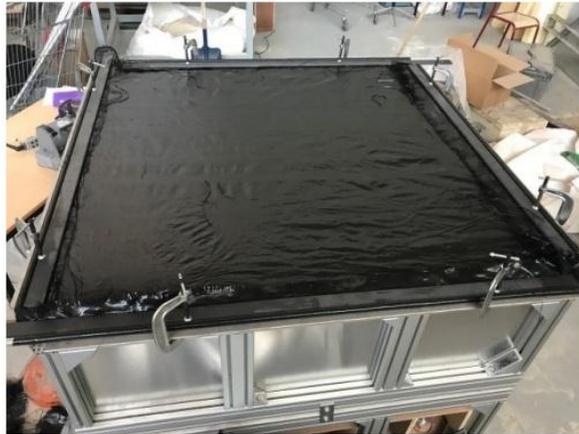
Avant chaque essai, et dans le but de limiter l'influence de la mise en place sur les résultats, la même procédure a été appliquée. Le protocole expérimental qui définit les étapes du montage et la mise en place des matériaux et des capteurs dans le modèle est présenté comme suit :

- Mise en place des plaques de mousse de 0.1 m, sont superposées dans le cadre du milieu sur un support fixe et rigide, jusqu'à atteindre l'épaisseur totale désirée.
- Installation des 36 inclusions rigides, traversant la mousse par des trous de même diamètre jusqu'à la base du cadre inférieur. Vérification de la verticalité et l'espacement des inclusions.
- Connexion à la centrale de mesures des capteurs de force, positionnés au pied des inclusions de la grille centrale, et le capteur de déplacement positionnés à l'interface mousse remblai.
- Mise en place des dalles sur les têtes des inclusions pour les essais T2 et T'2, représentées par des disques en bois (Figure 2.9).



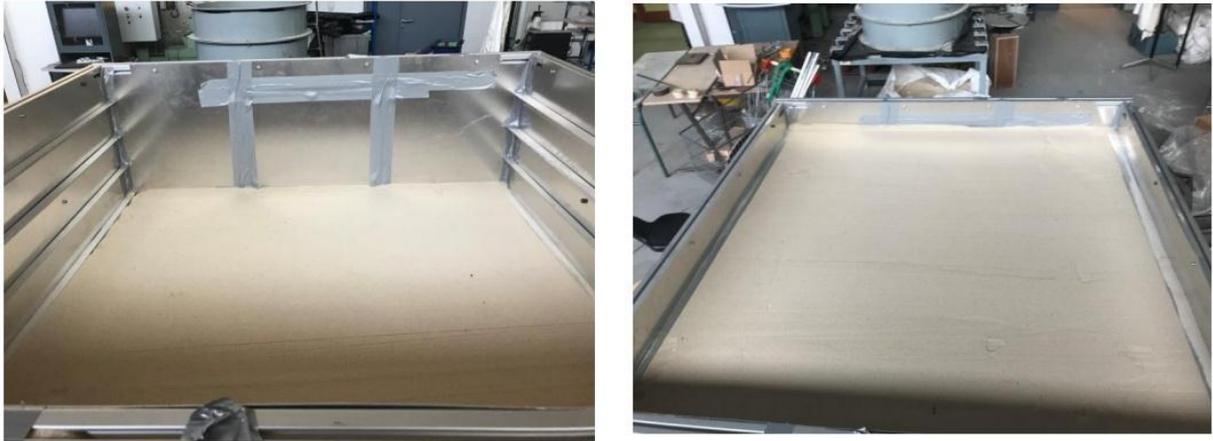
**Figure 2.9** Configuration avec dallettes

- Mise en place du géosynthétique pour les essais T3, T'3, T5 et T'5 sur les têtes d'inclusions, ce dernier est fixé aux quatre côtés du cadre central (Figure 2.10).



**Figure 2.10** Géosynthétique de renforcement

Remplissage du cadre supérieur par quatre couches de sable de 0.1 m d'épaisseur chacune atteignant, ainsi, une hauteur totale de 0.4 m et un poids approximatif de 8 kN (Figure 2.11). Notons que le poids de chaque couche de sable est mesuré pour évaluer la densité et apprécier l'homogénéité du remblai.



**Figure 2.11** Mise en place du remblai par couche

- Acquisition et enregistrement des valeurs de forces et des déplacements après la mise en place de chaque couche de sable et une heure après la réalisation du remblai. Les valeurs des mesures utilisées pour l'analyse sont la moyenne de ces deux mesures.

## 2.4. Analyse des résultats

### 2.4.1. Forces en pied d'inclusions

Les tableaux 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 et 2.8 présentent les forces enregistrés par les capteurs situés au niveau des pieds des inclusions de la grille centrale (C3, C4, D3 et D4) pour l'ensemble des tests réalisés.

**Tableau 2.4** Configuration réalisée avec 5 couches de mousse renforcé par des inclusions

<b>T1</b>				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	2,1	1,2	1,4	1,6
0.20	5	4,4	5,3	5,8
0.30	9	8	10,3	8,3
0.40	12,1	13	14,1	12

**Tableau 2.5** Configuration réalisée avec 5 couches de mousse renforcée par des inclusions coiffées par des dalletes

<b>T2</b>					<b>T2'</b>				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)	H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	5,1	5,2	5,6	5,5	0.10	5,5	4,1	5,4	*
0.20	10,6	11,4	10,8	10,9	0.20	10,7	9,7	11,2	*
0.30	15,1	15,9	16,2	15	0.30	14,2	15,1	15,8	*
0.40	19,1	19,9	18,1	19,2	0.40	19,5	18,5	21,5	*

**Tableau 2.6** Configuration réalisée avec 5 couches de mousse renforcée par des inclusions surmontée par une nappe géosynthétique

<b>T3</b>					<b>T3'</b>				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)	H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	2,1	3,32	2,4	2,86	0.10	2,8	3,2	3,4	3,4
0.20	6,5	6,7	7,1	7,4	0.20	6,6	6,7	7,2	6,7
0.30	10,2	9,95	10,6	10,73	0.30	10,3	10,7	10,2	9,8
0.40	13,4	14,75	13,5	15,3	0.40	13,3	14,5	14,1	13,8

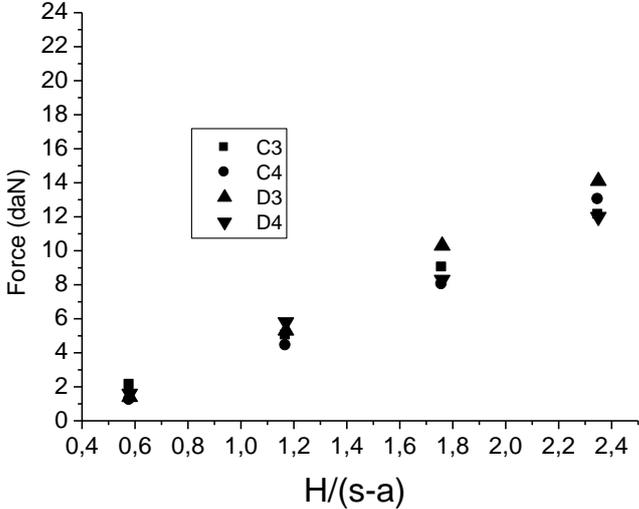
**Tableau 2.7** Configuration réalisé avec 2 couches de mousse renforcé par les inclusions

<b>T4</b>				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	1,8	2,1	1,75	2,2
0.20	5,4	5,8	6,5	6,15
0.30	10,75	11,15	10,75	9,55
0.40	15,25	14,6	14,15	13,65

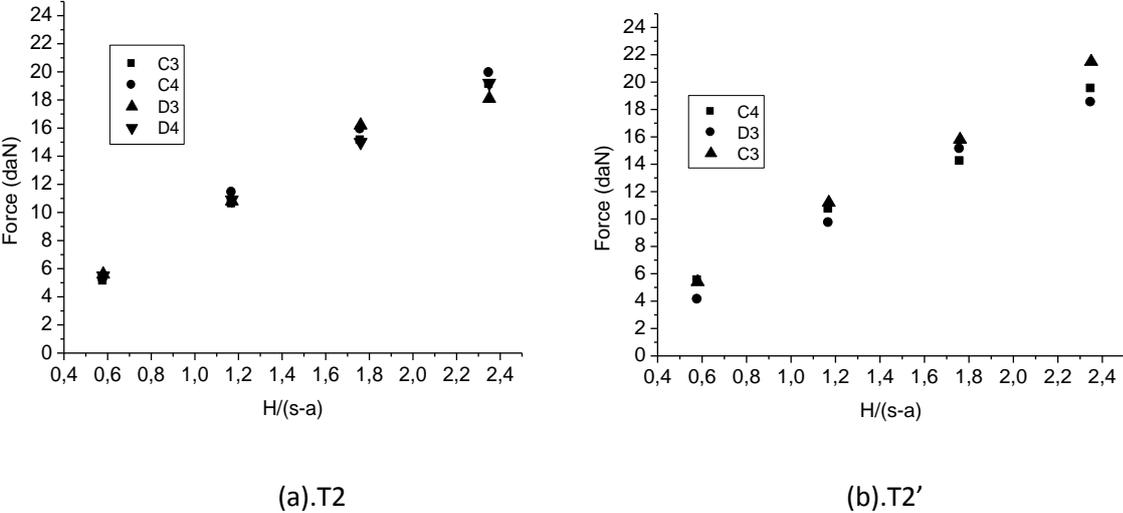
**Tableau 2.8** Configuration réalisée avec 2 couches de mousse renforcée par des inclusions surmontée par une nappe géosynthétique

<b>T5</b>					<b>T5'</b>				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)	H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	2,1	3,8	2,7	2,7	0.10	3,5	2,3	2,53	3,3
0.20	7,5	8,6	7,5	6,96	0.20	7,02	8,2	7,27	6,8
0.30	12,8	12,32	10,9	12,06	0.30	11,12	10,5	11,77	12,2
0.40	15	17,42	16,9	16,63	0.40	16	15,7	17,07	15,1

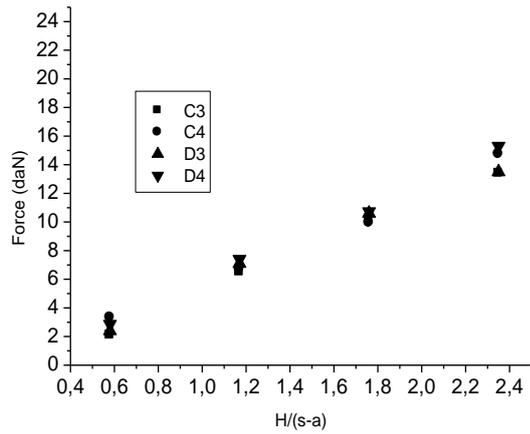
Les figures 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 et 2.16 présentent les forces enregistrées par les capteurs situés au niveau des pieds des inclusions de la grille centrale (C3, C4, D3 et D4) pour tous les tests réalisés.



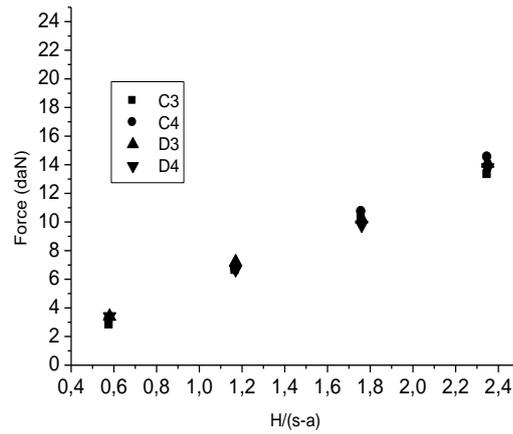
**Figure 2.12** Mesures des forces à la base des inclusions de la grille centrale de l'essai T1



**Figure 2.13** Mesures des forces à la base des inclusions de la grille centrale des essais T2 et T2'

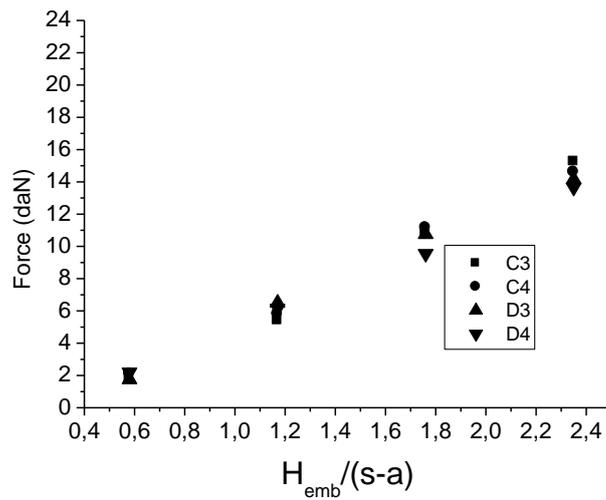


(a).T3

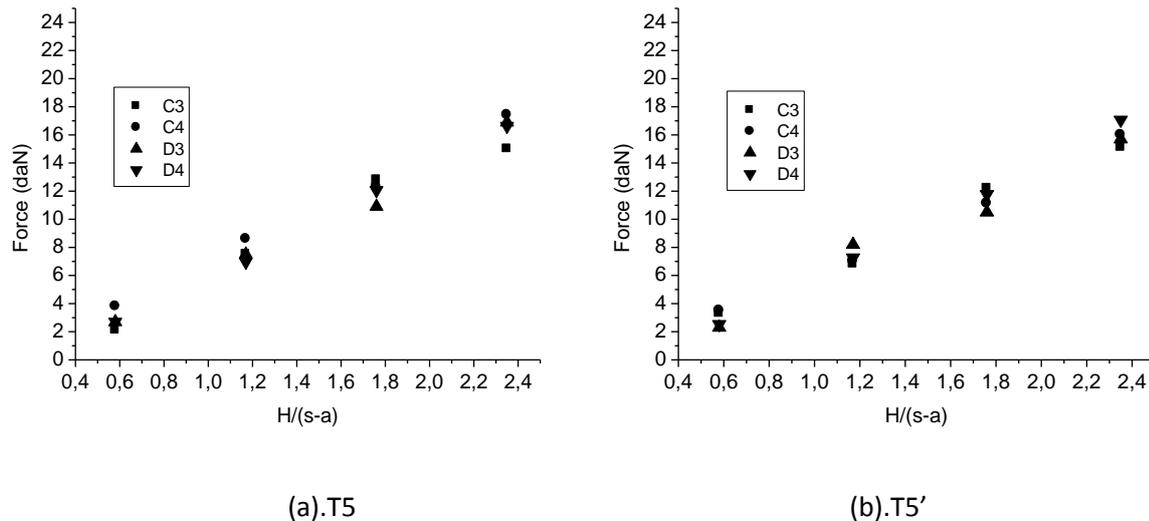


(b).T3'

**Figure 2.14** Mesures des forces à la base des inclusions de la grille centrale des essais T3 et T3'



**Figure 2.15** Mesures des forces à la base des inclusions de la grille centrale de l'essai T4



**Figure 2.16** Mesures des forces à la base des inclusions de la grille centrale des essais T5 et T5'

Les résultats montrent une bonne convergence des quatre valeurs de force mesurées à la base des inclusions de la grille centrale. Cette remarque est plus accentuée pour les cas qui contiennent des dalles ou bien une nappe géosynthétique. Les graphes montrent également que les essais qui ont la même configuration (T2 et T2', T3 et T3', T5 et T5') présentent une bonne répétabilité. Ces observations justifient l'intérêt d'utiliser 36 inclusions pour isoler la maille centrale, d'une part et donner à ce dispositif sa cohérence grâce aux résultats expérimentaux obtenus, d'autre part.

#### 2.4.2. *Evaluation du transfert de charge*

Comme il a été défini dans le premier chapitre, l'efficacité est le rapport de la valeur de l'effort transmis sur la tête (mesurée en pointe dans notre expérimentation) à la charge verticale appliquée à la surface affectée à l'inclusion. Dans cette étude, l'efficacité a été calculée comme le rapport de la valeur moyenne des forces enregistrées à la pointe des inclusions de la grille centrale à la charge verticale appliquée à la surface attribuée à une inclusion. Les tableaux 2.9, 2.10, 2.11, 2.12 et 2.13 présentent les résultats des efficacités pour l'ensemble des tests réalisés.

**Tableau 2.9** Configuration réalisé avec 5 couches de mousse renforcées par les inclusions

<b>T1</b>		
H (m)	Force moyenne (daN)	$E_p$ (%)
0.10	1,575	28,2
0.20	5,125	45
0.30	8,9	52,2
0.40	12,8	56,9

**Tableau 2.10** Configuration réalisé avec 5 couches de mousse renforcées par des inclusions coiffées par des dalles

<b>T2</b>			<b>T2'</b>		
H (m)	Force moyenne (daN)	$E_p$ (%)	H (m)	Force moyenne (daN)	$E_p$ (%)
0.10	5,35	98,1	0.10	5	89,2
0.20	10,92	92,47	0.20	10,53	94
0.30	15,55	91,38	0.30	15,03	89,5
0.40	19,07	83,99	0.40	19,83	87,34

**Tableau 2.11** Configuration réalisé avec 5 couches de mousse renforcées par des inclusions surmontée par une nappe géosynthétique

<b>T3</b>			<b>T3'</b>		
H (m)	Force moyenne (daN)	E <sub>p</sub> (%)	H (m)	Force moyenne (daN)	E <sub>p</sub> (%)
0.10	2,67	47,6	0.10	3,2	53
0.20	6,93	61	0.20	6,8	60,7
0.30	10,37	61,7	0.30	10,25	61,01
0.40	14,24	62,76	0.40	13,93	61,26

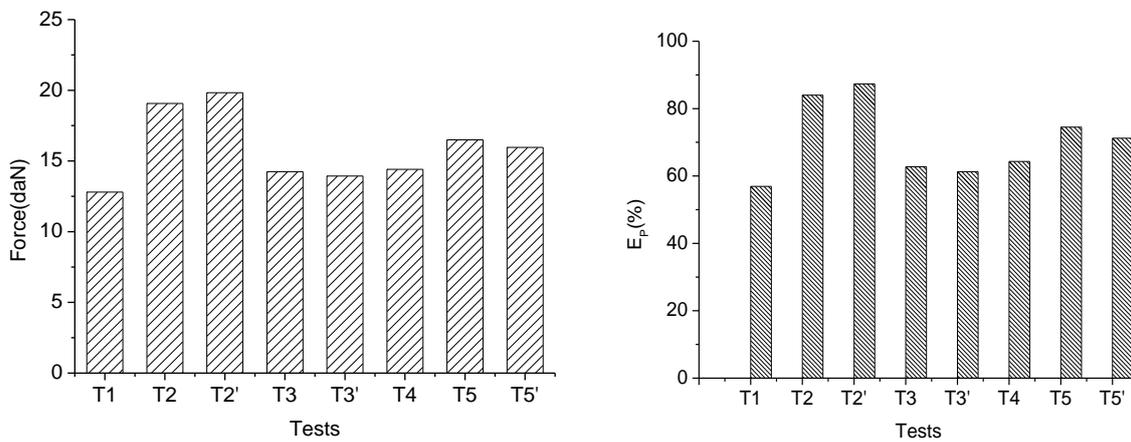
**Tableau 2.12** Configuration réalisée avec 2 couches de mousse renforcées par des inclusions

<b>T4</b>		
H (m)	Force moyenne (daN)	E <sub>p</sub> (%)
0.10	1,9625	35
0.20	5,9625	53,6
0.30	10,55	62,8
0.40	14,4125	64,3

**Tableau 2.13** Configuration réalisé avec 2 couches de mousse renforcé par des inclusions surmonté par une nappe de géosynthétique

<b>T5</b>			<b>T5'</b>		
H (m)	Force moyenne (daN)	$E_p$ (%)	H (m)	Force moyenne (daN)	$E_p$ (%)
0.10	2,83	50,5	0.10	2,9	51,7
0.20	7,64	68,2	0.20	7,32	65,35
0.30	12,02	71,5	0.30	11,39	67,8
0.40	16,49	74,5	0.40	15,96	71,2

La figure 2.17 présente l'efficacité (%) mesurée pour l'ensemble des tests réalisés, pour une hauteur de remblai égale à 0,40 m.



**Figure 2.17** Efforts et efficacités moyennes mesurés au niveau des pieds des inclusions de la grille centrale.

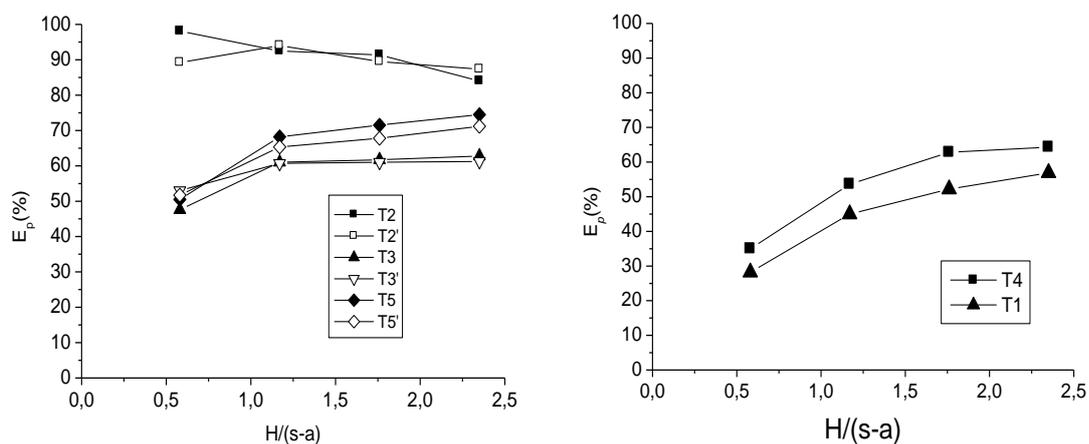
La figure 2.17 montre que la plus grande efficacité mesurée correspond à la configuration incluant des dalles, soit le test T2. La comparaison entre les tests T1 et T3, réalisés chacun avec une épaisseur de 0,5 m de mousse, indique clairement une amélioration dans le transfert

de charge d'environ 6% d'efficacité grâce à l'effet du geosynthétique. La même remarque est relevée pour les tests T4 et T5 avec une épaisseur de mousse de 0,2 m où l'efficacité a augmenté de plus de 8% suite à la présence de la nappe geosynthétique. Ces résultats montrent qu'en plus de l'effet voute, l'effet membrane mobilisé par le geosynthétique participe au transfert de charge.

La comparaison entre les tests T1, T4 d'une part, et T3, T5 d'autre part, montre que l'épaisseur du sol compressible a une influence non négligeable sur le transfert de charge. En effet, pour les épaisseurs considérées dans ces tests, soit 0,5 m et 0,2 m, une épaisseur plus grande propose une réaction du sol plus importante et donc un report de charge moindre sur les inclusions. Ce résultat a été cité par plusieurs auteurs, qui ont noté que l'efficacité ne demeure pas constante avec la variation de la compressibilité du sol (Boussetta et al. 2012, Lee et al. 2019). Dans le dispositif utilisé, la variation de la compressibilité est simulée par le changement de l'épaisseur de la mousse.

### 2.4.3. Effet de la hauteur du remblai sur l'efficacité

Il est également intéressant d'observer l'évolution de l'efficacité avec la hauteur du remblai pour toutes les configurations de tests considérées. La figure 2.18 montre la variation d'efficacité avec la hauteur du remblai pour l'ensemble des tests réalisés.



**Figure 2.18** Variation de l'efficacité durant la construction du remblai pour l'ensemble des tests.

Dans les cas des inclusions non coiffées de dalletes, les courbes de la figure 2.18 montrent que l'efficacité augmente avec l'accroissement de la hauteur du remblai (T1, T3, T4, T5). Cette tendance continue jusqu'à ce que le rapport entre la hauteur du remblai et la distance inter-inclusions ( $H/(s-a)$ ) soit égal à 1,18. Au-delà de cette dernière valeur, la variation de l'efficacité devient très faible. Cette valeur est en bon accord avec celle donnée par Lee et al (Lee et al., 2019). Cette constatation fait suite à une étude expérimentale et dont la valeur du rapport ( $H/(s-a)$ ) a été évalué à 1,19. Pour le cas de la configuration avec dalletes, on constate l'effet inverse. En effet, l'efficacité diminue avec la hauteur du remblai. Cette diminution d'efficacité se poursuit avec le temps. Une valeur de 74 % a été mesurée après 48 heures par rapport à 84 % mesurée à la fin de la réalisation du remblai.

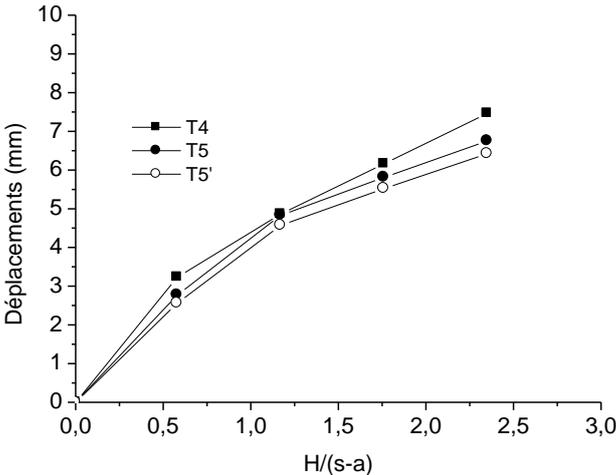
#### 2.4.4. Déplacements à l'interface mousse-remblais

Pour des raisons de limitation de la longueur du fil appartenant au capteur de déplacement potentiométrique, le déplacement de la surface supérieure de la mousse n'a pu être suivi pendant la construction du remblai que pour une épaisseur de 0,2 m de la mousse (tests T4 et T5). Le tableau 2.14 résume les résultats mesurés par le capteur de déplacements, en fonction de la hauteur du remblai.

**Tableau 2.14** Les déplacements mesurés à l'interface mousse-remblai (T4, T5 et T5')

T4		T5		T5'	
H(m)	Déplacement (mm)	H(m)	Déplacement (mm)	H(m)	Déplacement (mm)
0	0	0	0	0	0
0,1	3.23	0,1	2.77	0,1	2.56
0,2	4.86	0,2	4.83	0,2	4.57
0,3	6.16	0,3	5.81	0,3	5.52
0,4	7.46	0,4	6.75	0,4	6.42

La figure 2.19 montre que les déplacements les plus importants sont enregistrés au début de la mise en place du remblai, et ce, pour les deux tests considérés (avec et sans géosynthétique). Cela est dû à la hauteur nécessaire que doit prendre la formation d'un arc. Aussi, Les résultats montrent le rôle du geosynthétique dans la diminution des déplacements du sol compressible simulé dans ce dispositif par la mousse. Cela est plus clair pour la dernière couche du remblai.



**Figure 2.19** Déplacements mesurés à l'interface mousse-remblai

## 2.5. Conclusion

Une série d'essais expérimentaux a été menée avec un remblai réalisé sur un groupe d'inclusions rigides verticales, et ce à l'aide d'un dispositif de laboratoire conçu à l'échelle 1/10. Une mousse a été sélectionnée pour simuler le comportement du sol compressible. Le transfert des charges a été étudié pour différentes configurations (avec dalles, avec et sans géosynthétique pour différentes épaisseurs de sol compressible). A cet effet, une instrumentation spécifique a permis de mesurer les charges en pointe des inclusions de la grille centrale et les déplacements à l'interface mousse-remblai. Les tests réalisés confirment la capacité de ce dispositif à reproduire le comportement d'un remblai sur inclusions renforcé par un géosynthétique avec une répétabilité appréciable. A l'échelle du modèle considéré ce dispositif met en évidence l'importance d'utiliser 36 inclusions pour isoler la grille centrale. Les principaux résultats de ces tests physiques sont :

- Les dalles mises au-dessus des têtes des inclusions fournissent une grande efficacité par rapport au reste des configurations étudiés. Cette efficacité diminue avec la hauteur du remblai et le temps.
- Le géosynthétique (GSY) transfère la charge vers les têtes des inclusions par effet de membrane en plus de l'effet de voûte qu'offre le remblai de sable.
- Le géosynthétique et les dalles aident à mieux homogénéiser le transfert de charge vers les têtes des inclusions. Des valeurs de forces plus proches sont enregistrées à la grille centrale pour les cas avec GSY et avec dalles.
- L'épaisseur du sol compressible influence le transfert des charges vers les inclusions.

# **Chapitre 3**

## **Simulation numérique**

### **3.1. Introduction**

Dans le chapitre précédent, des essais physiques sur un modèle réduit ont été réalisés et les résultats obtenus ont été présentés. Ces derniers montrent l'effet de plusieurs paramètres sur l'efficacité du transfert de charges et les déplacements induits dans le sol compressible simulé par une mousse. Cependant, ces résultats nécessitent plus d'interprétations afin de mieux comprendre les mécanismes mis en place dans cette technique d'amélioration de la portance des sols compressibles. Pour cela, une modélisation numérique a été calibrée sur les essais pour être ensuite utilisée pour des études paramétriques. L'analyse numérique permet en plus de mettre en évidence l'effet de certains paramètres, difficilement quantifiables, sur le mécanisme de transfert de charge.

### **3.2. L'outil numérique utilisé et les modèles de comportement**

#### ***3.2.1. Présentation du code de calcul PLAXIS***

Conçu par des géotechniciens, le code de calcul par éléments finis PLAXIS est d'un intérêt certain sur les plans scientifiques et pratiques en analyse à deux dimensions avec un sol de comportement élasto-plastique et tenant compte de la pression interstitielle. Ce code comprend des méthodes de résolution approuvées ainsi que des procédures de sélection automatiques facilitant certains des choix parfois délicats. Le code fait appel à des éléments de hautes précisions (triangulaires à 15 nœuds) ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents. Sur le plan pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend son utilisation souple. Le recours aux manuels devenant rares, ceux-ci sont de volumes réduits et faciles à consulter. L'ensemble des options sont simplifiées à savoir l'initialisation des contraintes et pressions interstitielles qui permettent de démarrer un calcul et prévoir le comportement de l'ouvrage considéré. Aussi, il est possible, à tout instant, de refaire un calcul avec un maillage plus raffiné sur la base des mêmes données.

Le logiciel "PLAXIS" réalise des calculs par éléments finis sur des modèles qui peuvent être supposés en déformations planes ou en axisymétrie de révolution. L'insertion des différentes couches de sol, le niveau de la nappe phréatique, les structures, le système de chargement et les conditions aux limites se font grâce à un dessin réalisé sur écran qui doit traduire la coupe transversale du modèle à deux dimensions considéré. Pour les problèmes axisymétriques, le dessin doit représenter la coupe axiale du modèle supposé. Le maillage est généré de façon

globale et locale par des éléments triangulaires de 6 nœuds ou bien de 4<sup>ème</sup> ordre de 15 nœuds avec option de raffinement selon la finalité visée.

### **3.2.2. Interfaces**

Plaxis possède des éléments d'interface. Ces derniers modélisent l'interaction sol-structure. Chaque interface est représentée par une épaisseur désignée et des propriétés du matériau constitutif bien définies. Les caractéristiques d'interface sont calculées à partir des propriétés du sol associé et du facteur de réduction de la résistance selon les expressions suivantes :

$$C_{inter} = R_{inter} C_{sol}$$

$$\tan\varphi_{inter} = R_{inter} \tan\varphi_{sol}$$

$$\psi_{inter} = 0 \text{ pour } R_{inter} < 1 \text{ si non } \psi_{inter} = \psi_{sol}$$

### **3.2.3. Géogrilles**

Plaxis utilise des éléments élancés possédant une rigidité à la traction mais aucune rigidité à la compression ni à la flexion, c'est le cas d'un renfort géosynthétique. Ces éléments ne peuvent résister qu'à des efforts de traction. La seule propriété d'un géosynthétique est sa rigidité axiale élastique "EA" entrée en unité de force par mètre linéaire. La rigidité axiale EA est usuellement fournie par le fabricant du géosynthétique et peut être déterminée à partir de diagrammes d'essais de traction dans laquelle l'élongation est tracée en fonction de la force appliquée dans la direction longitudinale. La raideur axiale est le rapport de l'effort axial par unité de largeur rapportée à la déformation axiale " $\Delta l/l$ " où " $\Delta l$ " est l'allongement et " $l$ " la longueur initiale du géosynthétique.

### **3.2.4. Les modèles de comportement utilisés dans PLAXIS**

Un modèle de comportement d'un matériau est un ensemble d'équations mathématiques décrivant la relation entre la contrainte et la déformation. Elaborer un modèle de comportement pour un matériau, consiste à construire une relation fonctionnelle permettant d'exprimer les efforts internes, représentés par les contraintes, en fonction des grandeurs cinématiques décrivant la déformation du milieu étudié (Stutz.1987).

Le logiciel PLAXIS intègre de nombreux modèles rhéologiques adaptables à un grand nombre de matériaux, on peut citer le modèle élastique, modèle de Mohr-Coulomb, modèle pour les roches fracturées, modèle de sol avec écrouissage, modèle pour les sols mous et

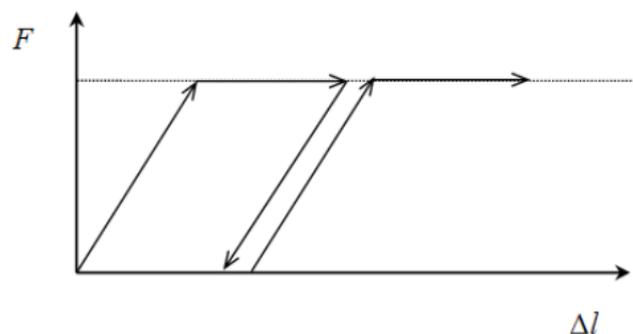
modèle pour les sols mous avec fluage. Le logiciel permet même aux utilisateurs d'introduire de nouvelles lois de comportement. Dans ce qui suit, seuls les modèles de comportement utilisés, dans ce travail, seront présentés, à savoir le modèle élastique et le modèle Mohr-Coulomb.

#### 3.2.4.1. *Model élastique linéaire*

Ce modèle de comportement a été utilisé pour modéliser l'inclusion rigide, la dalle, la mousse et le géosynthétique de renforcement. Le modèle élastique linéaire est basé sur la loi de Hook en déformations planes. Les déformations résultant d'un chargement quelconque sont totalement réversibles. Ce comportement s'exprime à l'aide de deux caractéristiques mécaniques du matériau considéré et qui sont : le module de Young "E" et le coefficient de Poisson "ν".

#### 3.2.4.2. *Le modèle de Mohr-Coulomb (élastique parfaitement plastique)*

Généralement, un modèle élastique linéaire n'est utilisé qu'en première approximation. Le comportement de la majorité des matériaux sont caractérisés par l'apparition de déformations irréversibles. Un modèle élasto-plastique est donc nécessaire pour mieux approcher le comportement réel. La figure 3.1 présente le modèle Mohr-Coulomb qui est dit aussi modèle élastique parfaitement plastique sans écrouissage où "F" est la force d'écoulement plastique donnée par la condition connue sous le nom de "critère de Coulomb".



**Figure 3.1** Comportement élastique-parfaitement plastique. (Boulon et al, 2004)

Ce modèle est fréquemment exploité dans le domaine de la géotechnique. Aussi, On a utilisé ce modèle pour simuler le comportement du remblai qui est constitué d'un matériau granulaire frottant. C'est un modèle à cinq paramètres dont deux paramètres définissent la

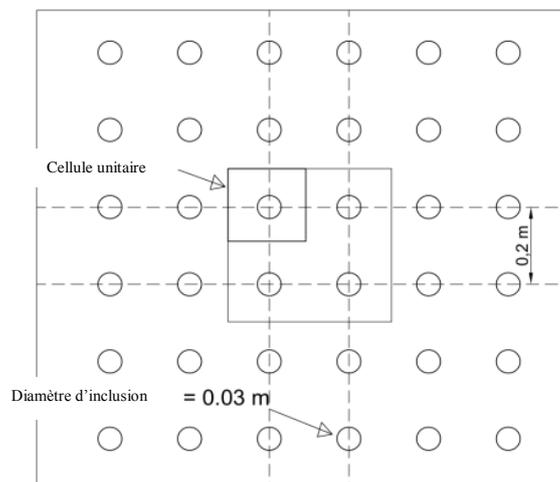
partie élastique (ou linéaire) soit  $E$  et  $\nu$  et trois paramètres relatifs à la plasticité parfaite (ou le palier) et qui sont : la cohésion " $C$ ", l'angle de frottement " $\varphi$ " et l'angle de dilatance " $\psi$ ".

### 3.3. Modélisation du problème

La modélisation numérique qui sera proposée, vise à mieux approcher l'effet de certains facteurs qui ont été mis en évidence par les résultats expérimentaux présentés dans le deuxième chapitre, où nous remarquons clairement l'effet de la compressibilité du sous-sol, de la présence des dalles ainsi que de la présence de nappe géosynthétique sur le transfert des charges. La déflexion du GSY et les forces de tractions engendrées par ce dernier seront exposées.

#### 3.3.1. Simulation numérique proposée

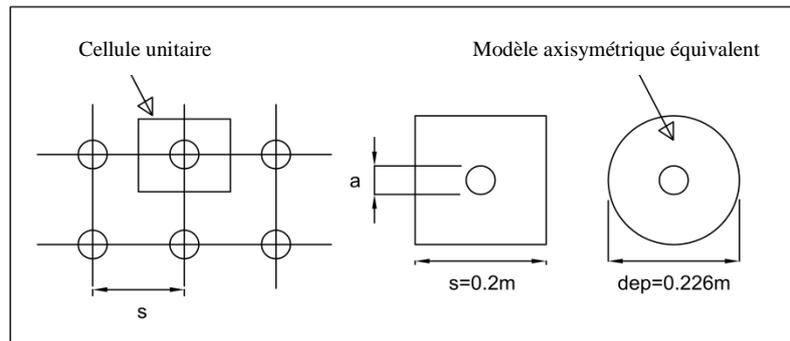
Le modèle numérique simulé est le dispositif expérimental décrit au deuxième chapitre. Dans ce qui suit, on tiendra compte de la symétrie du modèle physique et on négligera l'influence des bords sur les inclusions de la grille centrale. Seule une cellule contenant une inclusion au centre est modélisée en un quart de la zone formée par les quatre inclusions centrales (Figure 3.2).



**Figure 3.2** La cellule unitaire simulée

Aussi, il a été démontré que la géométrie tridimensionnelle de la maille élémentaire peut être simplifiée en un modèle axisymétrique (Boussetta et al., 2012 ; Dias et Gripon, 2017). La zone d'influence de ce dernier est caractérisée par un diamètre équivalent noté " $d_{eq}$ ". D'après Bouassida (2016), le diamètre du modèle axisymétrique équivalent est  $d_{eq}=1,13s$  où " $s$ " est le

côté de la maille élémentaire. Ainsi, la maille carrée de 0,20 m de côté est remplacée par une maille circulaire de diamètre 0,226 m (Figure 3.3).



**Figure 3.3** Equivalence entre la géométrie 3D et la géométrie axisymétrique.

Le modèle numérique axisymétrique du système est établi à l'aide du code de calcul par éléments finis Plaxis. On note que pour les problèmes axisymétriques de révolution, un point est représenté par la coordonnée  $X$  qui est portée par l'axe confondu avec le rayon et la coordonnée  $Y$  portée par l'axe de symétrie qui représente la distance au plan de projection contenant ce même rayon. Les déplacements horizontaux aux frontières latérales sont immobiles et les déplacements verticaux à la limite inférieure sont également empêchés aussi bien pour l'inclusion que pour la mousse simulant le sol compressible. Le comportement du remblai est modélisé par la loi élasto-plastique parfaite de Mohr-Coulomb, ce modèle a été utilisé avec succès par plusieurs auteurs (Dias et Gripon 2017, Zhou et al., 2016, Zhang et al., 2021).

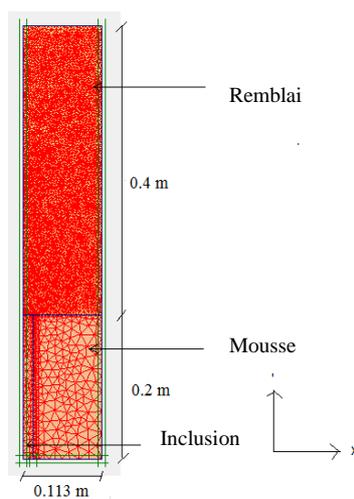
Au regard de l'intensité des charges issues du remblai, la mousse peut être modélisée par un modèle linéaire élastique avec un coefficient de Poisson négligeable en raison des grands vides contenus rendant, ainsi, la déformation latérale insignifiante. Quant au module élastique, celui-ci a été calibré par rapport aux déplacements expérimentaux mesurés. Par souci de simplicité, plusieurs auteurs ont considéré, dans leurs études, le sol compressible comme un matériau linéaire élastique (Tran et al., 2019, Lee et al., 2019). Aussi, Le matériau composant l'inclusion est considéré comme linéaire élastique. Le tableau 3.1 résume les propriétés des matériaux utilisés. Aussi, Le matériau composant l'inclusion est considéré comme linéaire élastique.

**Tableau 3.1** Propriétés des matériaux

Matériaux	E (kPa)	$\nu$	C (kPa)	$\phi$ (°)	$\Psi$	Modèle de comportement	$\gamma$ (kN/ m <sup>3</sup> )
Remblai	1.1*10 <sup>4</sup>	0.33	0	36	6	MC	14
Mousse	70	0.00001	*	*	*	Elastique linéaire	0.65
Inclusion	7*10 <sup>7</sup>	0.33	*	*	*	Elastique linéaire	27

Etant donné que la mousse est un matériau élastique linéaire, l'interface mousse-inclusion est modélisée par un matériau de comportement élasto-plastique parfait. Afin de simuler un comportement d'interface lisse, des propriétés de résistance au cisaillement négligeables sont introduites pour ce matériau (cohésion=0,07 kPa, angle de frottement interne= 0,05°). La modélisation des interfaces avec des matériaux a été également utilisée par Almeida et al., (2019). Pour caractériser l'interface mousse-inclusion, Lee et al., (2019) ont considéré un frottement négligeable.

Dans notre cas, le paramètre  $R_{inter}$  à l'interface tête d'inclusion-remblai est pris :  $R_{inter}=0.6$ . La Figure 3.4 montre le maillage du modèle numérique comprenant le sol compressible (mousse), le remblai et un quart de l'inclusion.

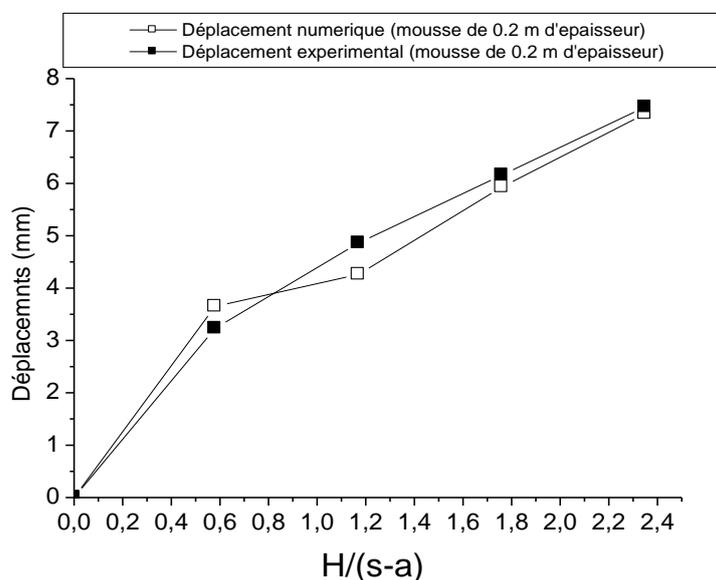


**Figure 3.4** Maillage du modèle numérique

Le raffinement du maillage a été arrêté après avoir vérifié que les résultats ne changent pas d'un cas à l'autre. Dans un second temps, le maillage du remblai et le matériau d'interaction entre la mousse et l'inclusion ont été délibérément affinés. Cette façon d'agir est due au fait que de grandes déformations plastiques sont attendues dans ces zones.

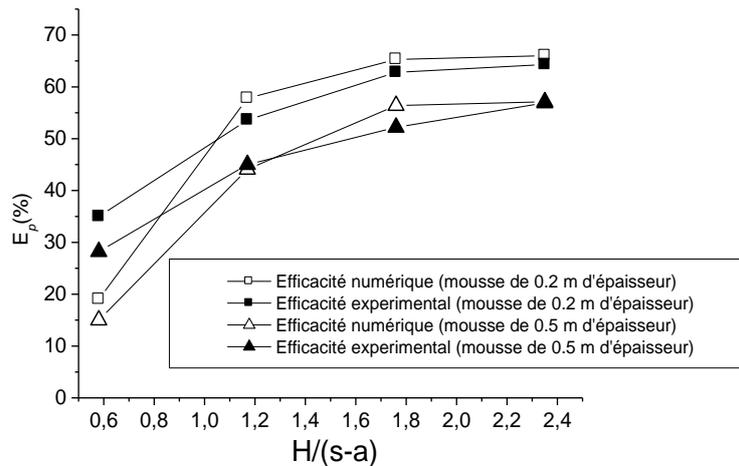
### 3.3.2. Analyse de l'effet de la compressibilité du sous-sol sur le transfert de charge

Afin de calibrer le modèle, une simulation numérique avec une épaisseur de mousse de 0,2 m est effectuée. Le module d'élasticité de la mousse dans le modèle numérique est choisi de façon à ce que le déplacement calculé à l'interface remblai-mousse soit égal au déplacement mesuré expérimentalement, et ce, pour une hauteur de remblai de 0,40 m. Un autre modèle avec une épaisseur de mousse de 0,5 m a été conçu. L'efficacité d'inclusion a été calculée pour les deux cas cités (épaisseurs de 0,2 m et 0,5 m). La force transmise à la pointe de l'inclusion a été obtenue par intégration de la contrainte verticale calculée au niveau considéré. La figure 3.5 présente l'évolution des déplacements à l'interface remblai-mousse lors de la construction du remblai.



**Figure 3.5** Evolution des déplacements à l'interface remblai-mousse durant la construction du remblai.

Mis à part le dernier point utilisé dans la calibration du modèle numérique, le graphe de la figure 3.5 montre que l'évolution globale des déplacements calculés est en bon accord avec celle déterminée par les essais physiques. La différence observée entre les deux résultats est relativement faible (moins de 15 %), ce qui justifie le choix du module d'élasticité de la mousse. Sur la figure 3.6 est indiquée la variation de l'efficacité de l'inclusion avec l'évolution de la hauteur normalisée du remblai, et ce, pour deux épaisseurs de couches compressibles.



**Figure 3.6** Evolution de l'efficacité durant la construction du remblai

On remarque que les efficacités des inclusions calculées et mesurées sont globalement proches pour les deux cas d'épaisseur de mousse considérés. Pour le cas d'une épaisseur de remblai de 0,1 m, les efficacités mesurées physiquement sont supérieures à celles calculées. Cela pourrait être attribué au manque de précision des capteurs de force utilisés, et ce, dans le domaine des faibles valeurs de mesure. En dehors de cela, les calculs numériques montrent, également, que l'efficacité de l'inclusion pour une épaisseur du sous-sol de 0,2 m est supérieure à celle de 0,5 m. Ce résultat confirme le fait que l'efficacité décroît avec la diminution de la rigidité du sol compressible.

Dans ce qui suit, nous analysons l'effet de la compressibilité du sous-sol sur l'efficacité des inclusions pour un remblai à hauteur constante de 0,4 m. Dans ce cas, nous adoptons le rapport " $E_{\text{cod}}/h_s$ " comme paramètre de compressibilité. Où  $h_s$  et  $E_{\text{cod}}$  désignent respectivement l'épaisseur du sol compressible (mousse) et le module œdométrique. Les modules œdométrique et élastique sont corrélés par la relation suivante:

$$E_{\text{cod}} = \frac{E}{\beta}$$

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu}$$

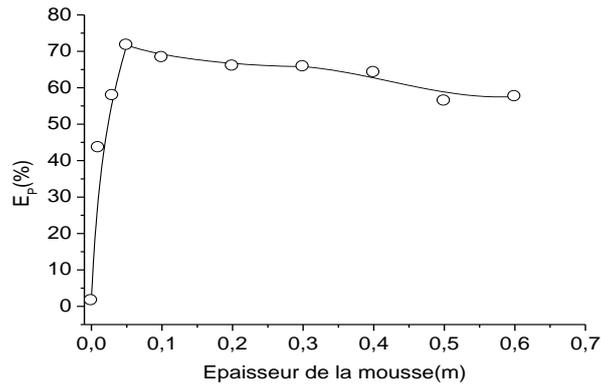
En raison de la faible valeur du coefficient de Poisson " $\nu$ " de la mousse, le module œdométrique devient très proche du module d'Young ( $E_{\text{cod}} \approx E_s$ ) et le coefficient de rigidité devient " $E_s/h_s$ " où  $E_s$  est le module d'Young du sol compressible (mousse). Afin de simplifier l'analyse pour les simulations suivantes, l'épaisseur du sol compressible a été fixée à 0,2 m et le module d'Young a été attribué pour chaque calcul de manière à simuler des épaisseurs définies. Les valeurs du module d'Young équivalent ( $E_{\text{eqv}}$ ) utilisées pour simuler les différentes épaisseurs du sol compressibles dans le modèle sont résumées dans le tableau 3.2.

**Table 3.2** Les valeurs du module d'élasticités utilisées dans les modèles équivalents.

$h_s(\text{m})$ : épaisseurs simulées	0.01	0.03	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$E_{\text{eqv}}(\text{kPa}) = 0.2 \times \frac{E_s}{h_s}$	1400	466.66	280	140	70	46.67	35	28	23.33

$E_s = 70 \text{ kPa}$

La Figure 3.7 représente l'évolution de l'efficacité de l'inclusion en fonction des différentes épaisseurs du sous-sol considérées (mousse).



**Figure 3.7** Evolution de l'efficacité en fonction de l'épaisseur du sous-sol

De cette courbe on peut noter que l'efficacité déterminée avec le modèle équivalent pour une épaisseur de 0,5 m ( $E_p = 56,4\%$ ) est proche de celle évaluée à partir du modèle avec une épaisseur réelle de 0,5 m ( $E_p = 57,1\%$ ). La faible différence relevée entre les deux valeurs peut être attribuée à la force mobilisée par le frottement à l'interface mousse-inclusion qui est plus faible pour le modèle équivalent (0,2 m d'épaisseur de mousse) que pour le modèle à épaisseur certaine.

Le graphe indique que l'efficacité augmente rapidement au départ pour les faibles épaisseurs de mousse pour atteindre un pic correspondant à une épaisseur de 0,05m au-delà une tendance à la stabilisation est remarquée avec une diminution progressive de l'efficacité atteignant environ 15% pour les épaisseurs importantes. Lee et al., (2019) ont obtenu une variation similaire grâce à une modélisation numérique à grande échelle avec un sous-sol ayant une épaisseur constante et un module de déformation variable.

Le tableau 3.3 présente la confrontation des valeurs des efficacités maximales et les rapports de rigidité du sous-sol correspondants ( $E_s/h_s$ ) obtenus avec notre modélisation d'une part, et celle de Lee et al., (2019) d'autre part, et ce, pour un angle de frottement interne du remblai de  $36^\circ$ .

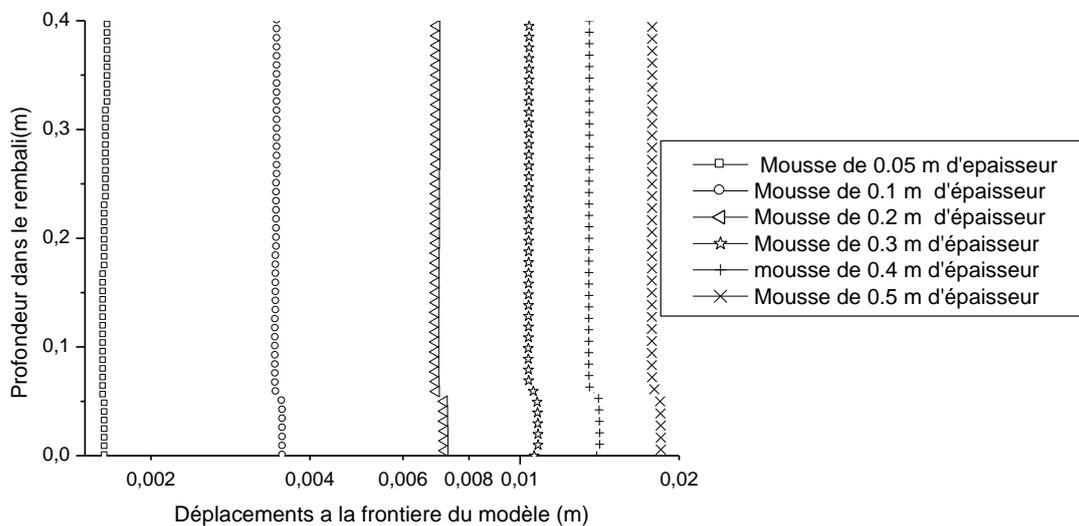
Le tableau 3.3 présente la confrontation des valeurs des efficacités maximales et les rapports de rigidité du sous-sol correspondants ( $E_s/h_s$ ) obtenus avec notre modélisation d'une part, et celle de Lee et al., (2019) d'autre part.

**Tableau 3.3** Confrontation des efficacités maximales.

	Efficacité maximale	Coefficient de rigidité correspondant ( $\frac{E_s}{h_s}$ )
<b>La modélisation actuelle</b>	71.7%	$\approx (70/0.05)=1400$ kPa/m
<b>Lee et al., 2019</b>	75%	$\approx (500/0.4)=1250$ kPa/m

La comparaison des résultats montre que l'efficacité maximale obtenue par Lee et al., (2019) est légèrement supérieure à celle obtenue par notre modélisation. Cette différence peut être attribuée au fait que le rapport de distance relative entre les inclusions (a/s) est plus grand dans notre modèle. Aussi, il est intéressant de noter que les efficacités maximales sont obtenues pour des rapports de rigidité du sous-sol relativement proches.

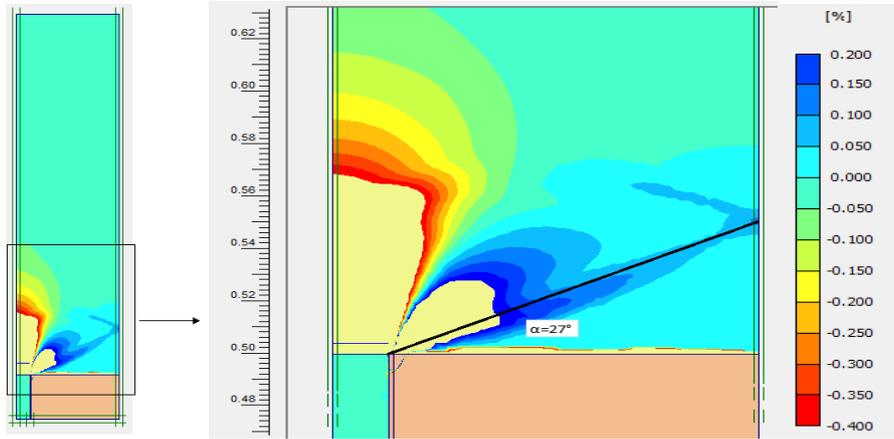
Afin de justifier le changement d'efficacité de l'inclusion avec la compressibilité du sol, nous nous sommes intéressés à l'analyse des déplacements verticaux, des déformations et des contraintes dans le remblai. Sur la Figure 3.8, les déplacements verticaux sont représentés à la frontière du modèle en fonction de la profondeur dans le remblai.



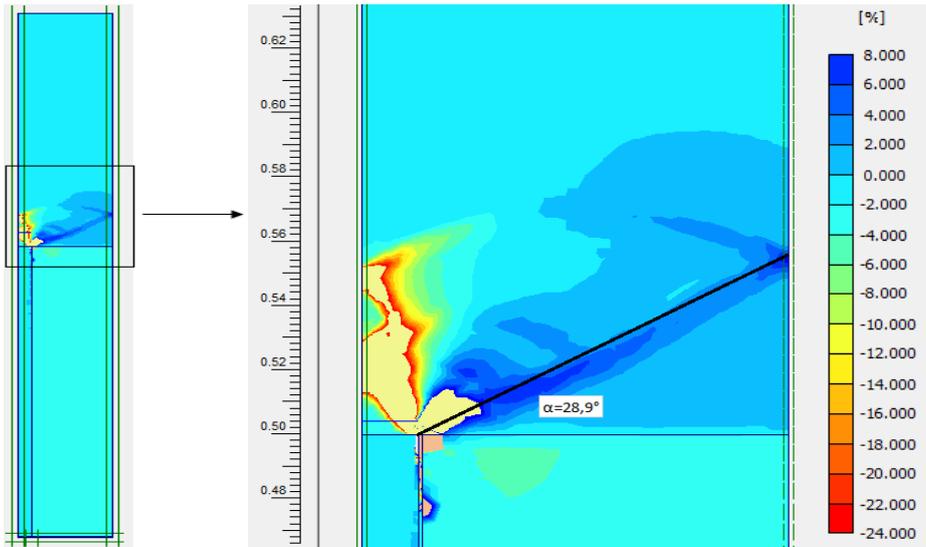
**Figure 3.8** Déplacements verticaux dans le remblai à la frontière du modèle, en fonction de la profondeur dans le remblai.

On peut noter que les déplacements sont plus importants pour les grandes épaisseurs de sous-sol, c'est un résultat attendu. En effet, le tassement sera d'autant plus important que la couche compressible est épaisse. Les graphes montrent, également, l'apparition d'une zone de

déplacement plus importante au bas du remblai. Ce comportement fait suite à la formation d'une voûte de transfert de charge. La zone située au pied du remblai sous cette voûte se déplace avec le sous-sol. La figure 3.9 montre une cartographie des déformations verticales ( $\epsilon_{yy}$ ) du modèle pour deux cas d'épaisseurs de sol compressibles (0,05 m et 0,50 m).



(a)



(b)

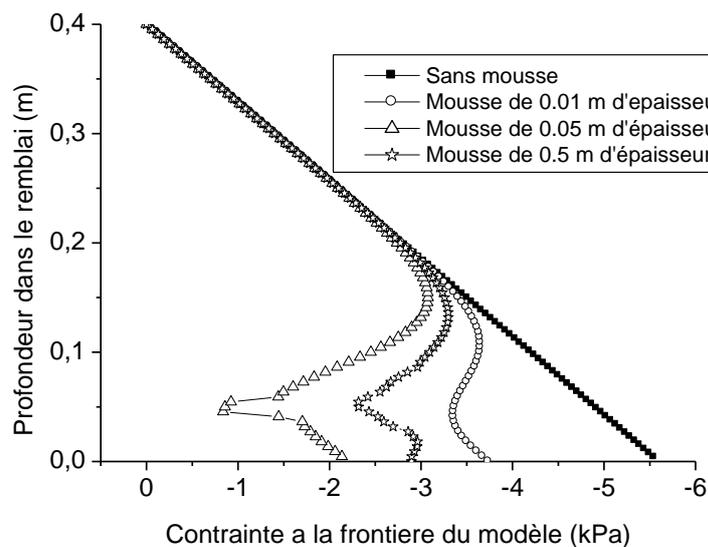
**Figure 3.9** Déformations verticales calculées ( $\epsilon_{yy}$ ), (a) Epaisseur de mousse : 0.05 m, (b) Epaisseur de mousse : 0.5 m

Ces cartes montrent clairement que les déformations sont beaucoup plus importantes dans le cas de 0,5 m d'épaisseur. De plus, les cartes indiquent pour les deux cas des zones tendues (déformations positives) au bas du remblai, dont la taille est plus grande pour le sous-sol qui est plus compressible. A l'intérieur de ces zones, des bandes droites sont apparues dans

lesquelles les tensions sont plus accentuées. En référence à la figure 3.8, on peut voir que l'extrémité droite de cette bande correspond bien au point de changement brusque du déplacement vertical. Ces bandes sont appelées "bandes d'extension" dans ce qui suit.

Les pentes des bandes d'extension indiquées sont estimées géométriquement. Cet angle s'est bien reproduit pour le cas d'une épaisseur de 0,05 m. Cependant, pour 0,5 m d'épaisseur, cet angle est plus élevé (28,9°). En effet, le tassement excessif du sous-sol conduit à une diminution de la contrainte de confinement à la base du remblai ce qui entraîne une augmentation de la taille de la zone de tassement avec le sous-sol.

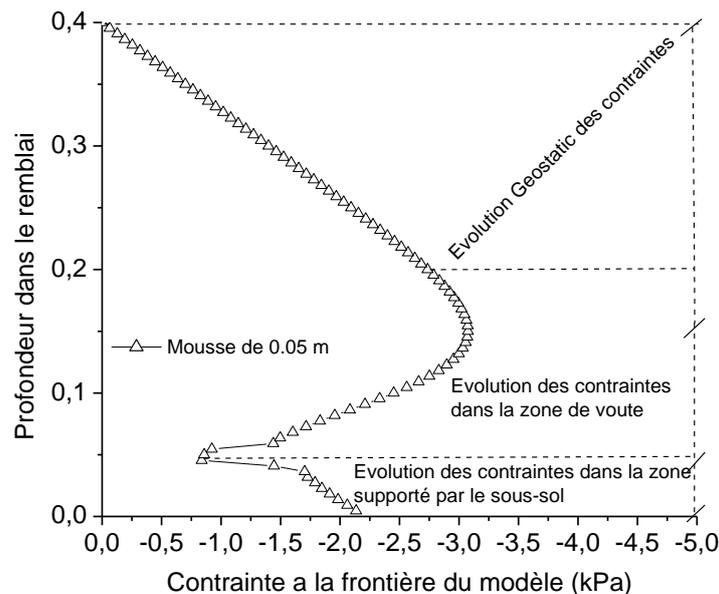
En plus des déplacements et des déformations verticaux, la contrainte verticale est un autre élément pour comprendre le mécanisme qui se produit. La figure 3.10 montre la variation de la contrainte verticale à la frontière du modèle, en fonction de la profondeur dans le remblai. Pour ne pas alourdir la représentation graphique, nous avons retenu quatre épaisseurs significatives de sous-sol à savoir : 0 ; 0,01 ; 0,05 et 0,50 m.



**Figure 3.10** Contrainte verticale à la frontière du modèle en fonction de la profondeur dans le remblai, pour 4 épaisseurs de sous-sol

Pour une épaisseur nulle, le sous-sol à une rigidité comparable à celle des inclusions, donc les contraintes augmentent linéairement soit une évolution du type hydrostatique. Cela explique la faible valeur de l'efficacité dans ce cas (Figure 3.7). En effet, l'inclusion ne supporte que le poids de la colonne de sol située au-dessus. Pour les valeurs non nulles de

l'épaisseur de la mousse, la contrainte verticale débute sa diminution à partir de 20 cm, approximativement, de profondeur du remblai jusqu'à une valeur minimale, au-delà, celle-ci augmente à nouveau jusqu'au niveau de l'interface avec la mousse. Cette évolution marque la zone de la voûte de transfert de charge. Dans cette partie du remblai, les charges verticales sont transférées vers les inclusions produisant, ainsi, une chute importante des contraintes verticales au voisinage de la couche de sol compressible.



**Figure 3.11** Les différentes phases d'évolution de la contrainte verticale

L'évolution des contraintes verticales au voisinage de la surface du sous-sol, présentées par les figures 3.10 et 3.11, montre que la contrainte minimale (en valeur absolue) correspond à une épaisseur de 0,05 m, ce qui révèle que les performances des inclusions sont maximales, comme le montre la figure 3.7. Pour des épaisseurs plus grandes ( $h_s > 0,05$  m) comme pour l'épaisseur de 0,5 m, la contrainte supportée par le sous-sol augmente, donc l'efficacité de l'inclusion diminue. Pour une épaisseur de 0,01m, le sol compressible n'est pas suffisamment mou, il participe dans la reprise de la charge du remblai, ce qui explique la faible valeur de l'efficacité de l'inclusion dans ce cas.

Enfin, on peut déduire que le toit de la voûte de transfert de charge est situé à environ 0,2 m de l'interface remblai-sol compressible. Cela explique la faible variation de l'efficacité avant cette profondeur du remblai, remarque déjà mentionnée au chapitre 2. Ce résultat

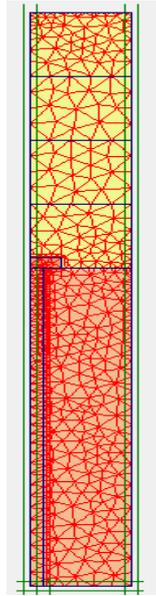
conduit à une valeur du rapport critique entre l'entraxe des inclusions et la hauteur du remblai  $H/(s-a)=1.18$ . Cette valeur est en bon accord avec celle obtenue par Lee et al., (2019) à l'issue d'une étude expérimentale sur un modèle à grande échelle. La valeur obtenue du rapport :  $H/(s-a)=1,19$ . De plus, la figure 3.10 montre que ce rapport est peu influencé par la rigidité du sol compressible, puisque la courbure marquant la limite supérieure de l'arc de transfert de charge apparaît, approximativement, au même niveau pour toutes les épaisseurs de mousse supérieures à 0,05 m.

### ***3.3.3. L'effet de la rigidité des dalles sur le transfert des charges***

Au regard des résultats expérimentaux réalisés avec la configuration contenant des dalles (T2 et T2') présentés dans le 2eme chapitre, on a remarqué que l'efficacité du transfert des charges diminue avec l'augmentation de la hauteur du remblai, ce qui est en contradiction par rapport aux résultats numériques et expérimentaux présentés par plusieurs auteurs tel que Lee et al., (2019). Ces derniers ont constaté que l'efficacité augmente avec l'accroissement de la hauteur du remblai, et ce, pour des dalles en acier. Ce résultat nous a amené à étudier, numériquement, l'effet de la rigidité des dalles sur l'efficacité du transfert des charges.

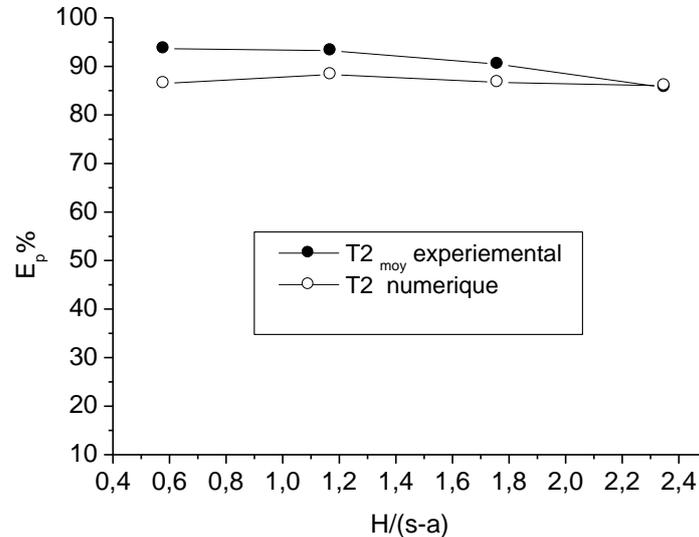
Ainsi, un quart de la dalle a été rajouté au-dessus de la tête de l'inclusion du modèle numérique ayant déjà servi pour l'analyse de l'effet de la compressibilité du sol. Le matériau des dalles utilisés (bois artificiel) est considéré comme élastique linéaire. Tous les côtés de la dalle sont entourés par des éléments d'interface caractérisé par  $R_{inter}= 0,7$ .

Le module d'élasticité attribué à la dalle est de :  $E=1000$  kPa. Ce choix a été fait de façon que les efficacités calculées pendant la construction du remblai soient proche aux efficacités mesurées expérimentalement. Le maillage du modèle représentant la configuration avec dalles est indiquée sur la figure 3.12.



**Figure 3.12** Le maillage du modèle numérique représentant la configuration avec dalle

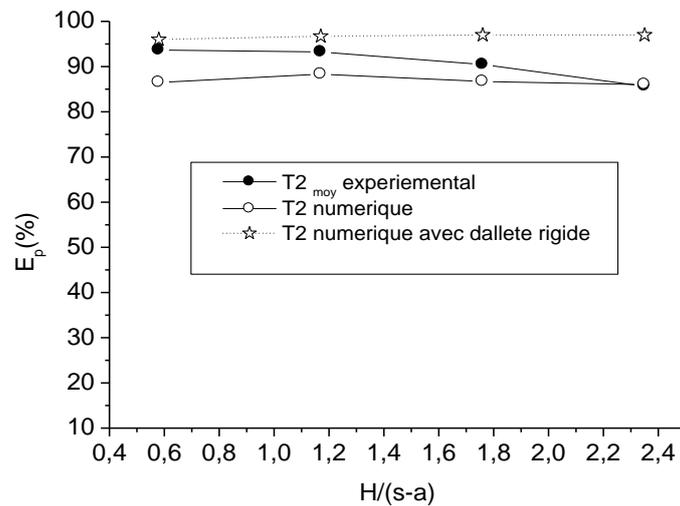
La figure 3.13 montre l'évolution des efficacités calculées par Plaxis et mesurées expérimentalement, et ce, en fonction de la hauteur relative du remblai. En dehors du point correspondant à la première couche de remblai, les deux courbes sont en bon accord.



**Figure 3.13** Evolution de l'efficacité du transfert des charges avec la hauteur du remblai

Si on augmente la valeur du module d'élasticité de la dalle jusqu'à ce qu'elle devienne suffisamment rigide ( $E=10$  GPa), on remarque une amélioration de l'efficacité par rapport à la première rigidité. Cette évolution demeure presque constante durant la mise en place du remblai. La Figure 3.14 présente cette variation. Ce fait laisse penser que si les dalles

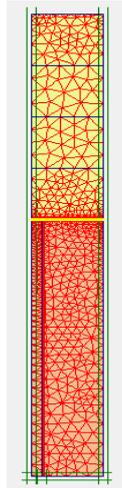
placés sur les têtes des inclusions ne sont pas suffisamment rigides, elles fléchissent progressivement sous l'accroissement de la charge qui lui revient, une détérioration de la voute de transfert de charge peut être engendré, résulte en suit une diminution, non négligeable, de l'efficacité du transfert des charges. La présence des dalles a amélioré l'efficacité de l'inclusion en moyenne de 30% en fin de construction du remblai.



**Figure 3.14** La variation de l'efficacité pendant la construction du remblai avec la présence des dalles (T2)

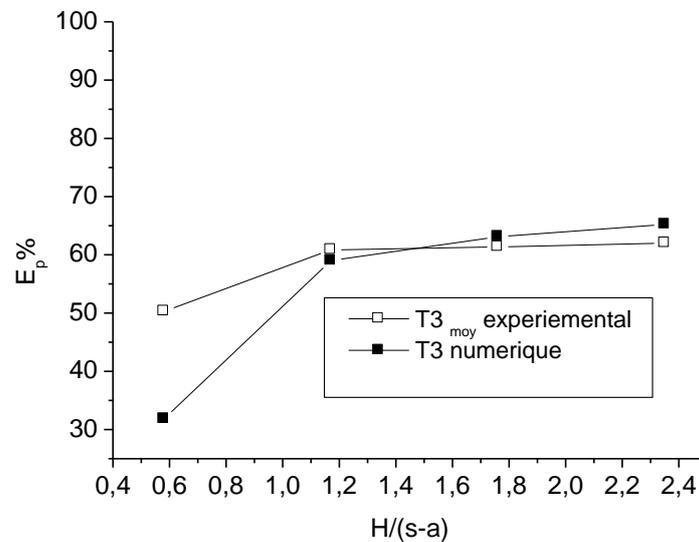
### 3.3.4. Renforcement avec géosynthétique (GSY)

La configuration avec géosynthétique a été aussi modélisée (T3). Avec le logiciel "PLAXIS", le géosynthétique est représenté à l'aide d'un élément de tension. Dans cette analyse, la rigidité à la traction "EA" est prise égale à 200 kN/ml. Valeur mesurée à partir d'essais de traction réalisés sur ce type de renforcement. L'interaction entre le géosynthétique et le remblai a été modélisé au moyen d'éléments d'interface. Les propriétés de cette dernière sont liées au sol frottant environnant par  $R_{inter}=2/3$ , valeur recommandée par plusieurs auteurs entre autres Berrabah et al., (2015). Le modèle numérique utilisé pour ce cas est présenté dans la figure 3.15.



**Figure 3.15** Le maillage du model numérique qui représente la configuration avec GSY

La figure 3.16 présente la variation de l'efficacité calculée et mesurée au cours de la construction du remblai, En dehors de la valeur enregistrée pour la première couche de sable, le reste des points montrent un bon accord entre les résultats de la simulation physique et numérique réalisées.

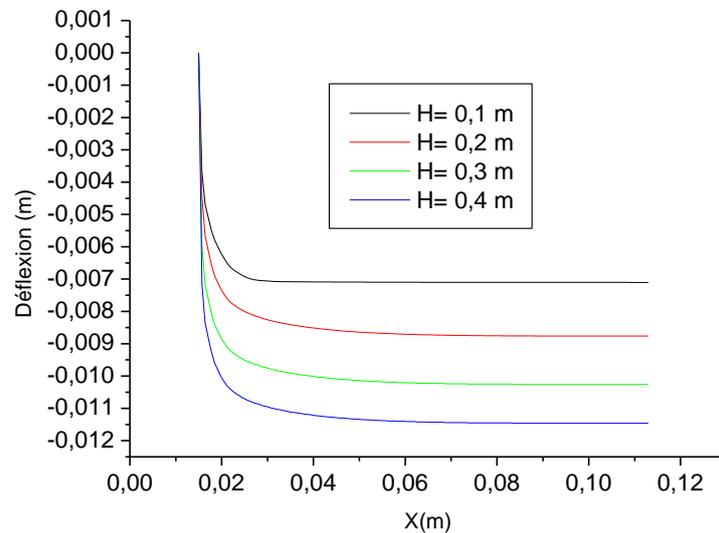


**Figure 3.16** La variation de l'efficacité pendant la construction du remblai avec présence du GSY (T3)

### 3.3.4.1. Déflexion du géosynthétique

Comme il a été indiqué dans le premier chapitre, au sujet des méthodes analytiques, la deuxième étape de calcul décrit le comportement charge-déflexion du renforcement du

géosynthétique. Dans cette étape, la charge excédentaire dérivant de la première étape est, en partie, appliquée au renforcement entre les inclusions voisines, permettant, ainsi, de calculer la déformation du géosynthétique. La figure 3.17 représente la déflexion du géosynthétique durant la construction du remblai avec la variation de la distance à l'inclusion.



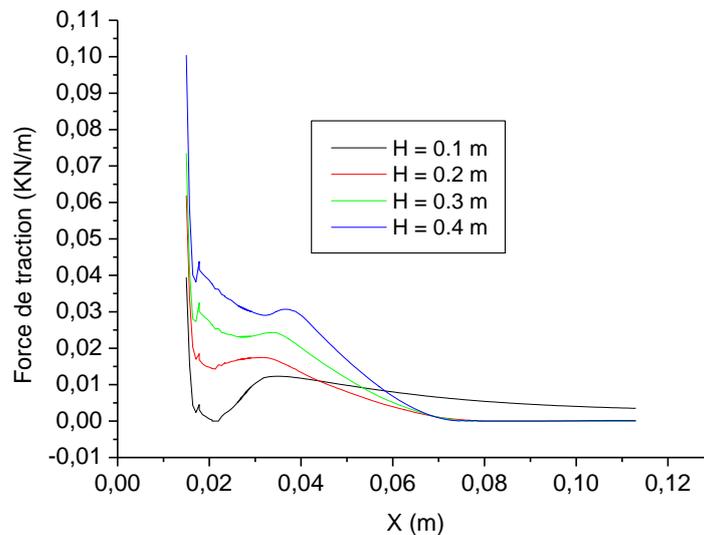
**Figure 3.17** La déflexion du géosynthétique au cours de la construction du remblai en fonction de la distance à l'inclusion..

Les graphes montrent que la déflexion au niveau du géosynthétique augmente pendant la construction du remblai. Le plus grand écart des déflexions est causé par la mise en place de la première couche.

### 3.3.4.2. *La force de traction dans le géosynthétique*

Le suivi des forces de traction au niveau du géosynthétique, permet de donner un aperçu sur les déformations enregistrées au niveau de ce dernier. Les résultats numériques (Figure 3.18) montrent que la force de traction augmente au cours de la construction du remblai. Les plus grandes valeurs sont enregistrées au voisinage immédiat de la tête d'inclusion. En effet, cette position peut être considérée comme un appui au géosynthétique. L'évolution des courbes se poursuit avec une chute importante des tensions traduisant l'interaction avec le remblai. Cette force de traction remonte, notamment, pour la première couche du remblai. Cette augmentation ne peut se justifier que par la rencontre du géosynthétique avec une zone de contraintes de compression supérieures dues à la présence de la voûte. Le prolongement de l'axe des distances vers l'inclusion voisine indiquera, évidemment, des courbes de tensions

symétriques par rapport à celles de la figure 3.18 et qui se joindront dans la zone médiane du géosynthétique.



**Figure 3.18** La force de traction dans le géosynthétique au cours de la construction du remblai en fonction de la distance à l'inclusion.

### 3.4. Conclusion

Dans ce chapitre, des simulations numériques ont été effectuées pour mieux analyser les résultats expérimentaux. Dans ces simulations, le remblai est modélisé par un matériau élastique parfaitement plastique, alors que le sol compressible (mousse) et l'inclusion sont modélisés par des matériaux élastiques linéaires. Après la calibration du modèle numérique, les simulations numériques reproduisent bien les résultats expérimentaux. Des simulations numériques avec différentes rigidités du sol compressible et des dalles et à la présence du géosynthétique ont été effectuées. L'analyse des résultats obtenus a permis de souligner les remarques suivantes :

- L'efficacité de l'inclusion change avec la rigidité du sol compressible liée à ses propriétés de déformation et à son épaisseur. Elle évolue à partir de valeurs faibles pour des rigidités élevées, atteint une valeur optimale pour une rigidité spécifique, puis diminue progressivement en fonction de l'augmentation de la compressibilité étendant vers une valeur limite.

- La rigidité du sol compressible correspondant à l'efficacité optimale de l'inclusion obtenue à partir de la simulation numérique de notre modèle réduit est proche de celle évaluée à partir d'un modèle à grande échelle. De ce fait, il semble que cette rigidité est indépendante de la taille du modèle ;
- Dans l'intervalle des valeurs de rigidité du sol compressible simulées, la différence entre la valeur d'efficacité maximale et les valeurs correspondantes aux grandes épaisseurs n'excède pas 15 % du sol compressible.
- La valeur du rapport  $H/(s-a)$  au-delà duquel l'efficacité de l'inclusion devient presque constante est en accord avec celle déterminée par ailleurs. D'autre part, ce rapport semble être peu influencé par la rigidité du sol compressible.
- Si les dalles placées sur les têtes des inclusions ne sont pas suffisamment rigides, celles-ci fléchissent sous les charges qui leur seront appliquées. Cet état de fait entraîne une détérioration du mécanisme de l'effet de voûte ayant pour conséquence une diminution de l'efficacité du transfert de charges à travers l'inclusion. C'est la configuration qui a donnée l'efficacité la plus performante avec une valeur proche de 90%.
- Pour la configuration associant une nappe de géosynthétique. Cette dernière n'a pas apporté une amélioration significative pour l'efficacité de transfert de charge émanant du remblai. Toutefois, on note une réduction non négligeable du déplacement à la base du remblai.

# **Conclusion générale et Perspectives**

Les travaux effectués dans le cadre de cette thèse consistent à étudier les mécanismes de transfert de charge dans un remblai reposant sur un sol compressible renforcé par des inclusions rigides verticales. Des essais expérimentaux en laboratoire et des simulations numériques ont été effectués. Le tassement du sol compressible et l'efficacité du système de renforcement étaient particulièrement concernés. Un modèle physique réduit tridimensionnel sous gravité a été utilisé pour réaliser une campagne d'essais expérimentaux. Les données obtenues ont été exploitées pour valider une approche numérique. La modélisation numérique a permis d'interpréter l'influence de certains paramètres constatés en simulation physique.

Les résultats de ces travaux nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Différentes approches sont utilisées pour étudier la technique de renforcement des sols par des inclusions rigides verticales tels que les méthodes analytiques, les modèles numériques et les modèles physiques réduits. Ces approches représentent un avancé appréciable pour le dimensionnement. Pour ce qui est de l'utilisation des modèles physiques réduits, réputés plus proches de la réalité, la simulation doit répondre aux conditions suivantes :
- Le suivi et le contrôle du transfert de charge doit porter sur une grille centrale du modèle.
- La grille centrale ne doit pas être affectée par les conditions des bords du modèle.
- Le choix du sol compressible et du géosynthétique doivent être représentatifs.

Dans ce travail l'outil de simulation physique exploité tient compte des dispositions mentionnées ci-dessus.

- Le géosynthétique et les dalles aident à mieux homogénéiser le transfert de charge vers les têtes des inclusions d'un groupe.
- L'efficacité de l'inclusion change avec la rigidité du sol compressible qui est liée à ses propriétés de déformation et à son épaisseur.
- La valeur du rapport  $H/(s-a)$  au-delà duquel l'efficacité de l'inclusion devient presque constante est peu influencé par la rigidité du sol compressible.
- La rigidité du sol compressible correspondant à l'efficacité optimale de l'inclusion est indépendante de la taille du modèle.
- Les dalles placés sur les têtes des inclusions doivent être suffisamment rigides. C'est la configuration qui a donnée l'efficacité la plus performante.
- Pour la configuration associant une nappe de géosynthétique, on note que celle-ci n'a pas apporté une amélioration significative pour l'efficacité du transfert de charges émanant du

remblai. Toutefois, on constate une réduction non négligeable du déplacement à la base du remblai.

## **Perspectives**

L'originalité du modèle réduit utilisé dans ce travail réside dans sa modularité en termes de géométrie et de matériaux utilisés. Ce type de conception permet d'étudier d'autres configurations avec ou sans surcharge en surface. Il est aussi possible de réaliser des essais avec différents matériaux de remblaiement, et ce, dans le but de déterminer l'influence de l'angle de frottement et de la granularité sur le comportement du système constitué de sol compressible avec ses renforcements. Pour plus d'informations, une instrumentation complémentaire sera, certainement, utile avec des capteurs tels que le TPS (Tactile Pressure Sensor) pour appréhender la répartition des contraintes dans le remblai et la fibre optique pour suivre les déformations engendrées dans le géosynthétiques lorsque ce dernier est associé au système de renforcement. Ces données physiques pourront améliorer l'approche numérique du comportement de modèles similaires à grandeur réelle.

## **Les références bibliographiques**

ASIRi (2012). Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales (Recommandations Projet National ASIRi), Presses des Ponts. IREX, Paris.

Almeida, M. S. S., Ehrlich, M., Spotti, A. P. & Marques, M. E. S. (2007). Embankment supported on piles with biaxial geogrids. *Geotechnical Engineering*, 160, No. GE4, 185–192.

Almeida, M. S. S., Fagundes, D. F., Thorel, L. & Blanc, M. (2020). Geosynthetic-reinforced pile-embankments: numerical, analytical and centrifuge modelling. *Geosynthetics International*, Special Issue on Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported Embankments <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00011>.

Brinkgreve R.B.J., Swolfs W.M., Engin E. PLAXIS finite element code. Delft University of Technology & PLAXIS bv, The Netherlands, 2011.

Bouassida M (2016). Design of Column-Reinforced Foundations. J. Ross Publishing (FL, USA), September. 224 pages.

- Boussetta, S., Bouassida, M., and Zouabi, M. (2016). Assessment of observed behavior of soil reinforced by rigid inclusions. *Innov. Infrastruct. Solut.* 1: 27. Doi: 10.1007/s41062-016-0027-6.
- Briançon, L., Kastner, R., Simon, S., Dias, D (2004). Le renforcement des sols par inclusions rigides. Symposium International ASEP-GI 2004.
- Briançon, L., Simon, B., Auray, G. (2014). Remblai expérimental sur inclusions rigides. Présenté aux Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 8-10 Juillet, Beauvais.
- Briançon, L., Simon, B., (2012). Performance of Pile-Supported Embankment over Compressible soil: Full-Scale Experiment. *J. Geotech. Geoenviron.* 138 (4):551-561.
- Briançon, L., Simon, B., (2017). Pile-supported embankment over compressible soil for a high-speed line. *Geosynth. Int.* 24(3):293-305.
- Briançon L, Abdelouhab A (2018) A laboratory device to analyze the behavior of pile supported embankment reinforced by geosynthetics. Proceedings of 11th ICG, 16-21 Sept
- Briançon, L., Dias, D. and Simon, C. (2015) 'Monitoring and numerical investigation of a rigid inclusions-reinforced industrial building', *Canadian Geotechnical Journal*, 52(10), pp. 1592–1604.
- Chen Y.M., Cao W.P., Chen R.P., 2008. An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments. *Geotext Geomembr* 26:164–174.
- Collin, J. G. (2004). Column supported embankment design considerations', in 52nd Annual Geotechnical Engineering Conference. University of Minnesota.
- Carlsson B. (1987). Armerad jord – beräkningsprinciper för bankar på palar, Linköping, Terratema AB.
- Demerdash, M. 1996. An experimental study of piled embankments incorporating geosynthetic basal Reinforcement. Master Thesis.
- Daniel Dias and Jérôme Gripon, (2007). Numerical modelling of a pile-supported embankment using variable inertia piles. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 61, No. 2 (2017).

Eskişar, T., Otani, J. and Hironaka, J. (2012). Visualization of soil arching on reinforced embankment with rigid pile foundation using X-ray CT'. *Geotextiles and Geomembranes*. 32, pp. 44–54.

EBGEO (2010). Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen – EBGEO, German Geotechnical Society. Berlin. Germany.

Ewerton C. A. Fonseca · Ennio M. Palmeira · Michael V. Barrantes. (2018). Load and Deformation Mechanisms in Geosynthetic-Reinforced Piled Embankments. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*.

Eren, B., Mehmet, İ, O., (2018) . A numerical model on geosynthetic reinforced pile supported embankments. *Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering*.

Fagundes, D. F., Almeida, M. S. S., Thorel, L. & Blanc, M. (2017). Load transfer mechanism and deformation of reinforced piled embankments. *Geotextiles and Geomembranes*, 45, No. 2, 1–10.

Girout, R. et al. (2014) 'Numerical analysis of a geosynthetic-reinforced piled load transfer platform - Validation on centrifuge test', *Geotextiles and Geomembranes*. Elsevier Ltd, 42(5), pp. 525–539.

Houda M (2016). Comportement sous chargement cyclique des massifs de sol renforcés par inclusions rigides: expérimentations en laboratoire et modélisation numérique. <http://www.theses.fr>.

Hewlett, W. J. and Randolph, M. F. (1988) . Analysis of piled embankments. *Ground Engineering*.

Hironaka, J., Hirai, T., Gu, S., Otani, J. (2006). Visualization of load transfer mechanisms of reinforced soil on pile element using X-ray CT method. *Proc. of 8ICG*. Yokohama. Japan. 18 - 22 Sept. 2006, 985-988.

Jenck, O. 2005. Le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales. Modélisation physique et numérique. Thèse génie civil. Lyon : INSA Lyon, 384p.

Jun, Z., Ziyang, Z ., and Zhijie Sun., (2021) . Study on Long-Term Performance of Geogrid-

Reinforced and Pile-Supported Embankment at Bridge Approach. *Advances in Materials Science and Engineering* Volume 2021, Article ID 5567391, 11 pages.

Kempfert, HG., Raithel, M., Jaup A. (1999). Model tests for analysis of the bearing and deformation behaviour of column foundations. *Proc. of the 12<sup>th</sup> EC SMGE*. Amsterdam Netherland. 9-10 June 1999. Vol. 3, 1521-1526.

Lee T, Lee SH, Lee IW, Jung YH (2019). Full-Scale Experiments on Geosynthetic-reinforced Piled Embankment in Four Different Conditions of Geosynthetic Reinforcement. *Geosynth. Int.* DOI:10.1680/jgein.19.00017.

McKelvey III J. A. (1994). The anatomy of soil arching. *Geotextiles and Geomembranes*, 13(5), pp 317-329.

Mac-Guire MP (2011) Critical height and surface deformation of column-supported embankments. *Diss. Virginia Polytech. Inst. State Univ.*

Nunez, M. A., Briançon, L. and Dias, D. (2013) 'Analyses of a pile-supported embankment over soft clay: Full-scale experiment, analytical and numerical approaches', *Engineering Geology*, 153, pp. 53–67.

Pham, H. V., Dias, D. & Dudchenko, A. (2020). 3D Modeling of geosynthetic-reinforced pile-supported embankment under cyclic loading. *Geosynthetics International, Special Issue on Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported Embankments*, <https://doi.org/10.1680/jgein.18.00039>.

Russell D and Pierpoint N. (1997). An assessment of design methods for piled embankments. *Ground Engineering* 30(10), pp 39-44.

Rogbeck, Y., Gustavson, S., Södergren I. & Lindquist D. (1998). Reinforced piled embankments in Sweden, design aspect. *ROWE, Proc of the 6th IntConf on Geosynthetics*, Atlanta, pp 755-762.

Rui, R., Han, JF., Eekelen, SJM and Wan, Y. (2019). Experimental Investigation of Soil Arching Development in Unreinforced and Geosynthetic-Reinforced Pile-Supported Embankments. *J. Geotech. Geoenviron.* 145(1).

Terzaghi, K. (1943) *Theoretical Soil Mechanics*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons.

Tran, Q.A ., Villard P, Dias, D., (2019). Discrete and continuum numerical modeling of soil arching between piles.Int. J. GeoMech. 19 (2), 04018195.

Van Hung Pham. 3D modelling of Soft soil Improvement by Rigid Inclusions - Complex and Cyclic loading.Mechanics of materials [physics.class-ph].Université Grenoble Alpes, 2018.

Van Eekelen, S. J. M., Bezuijen, A. and Van Tol, A. F. (2013) .An analytical model for arching in piled embankments. Geotextiles and Geomembranes. Elsevier Ltd, 39, pp. 78–102.

Van Eekelen, S. J. M., Bezuijen, A., Lodder H.J and Van Tol, A. F. (2012) .Model experiments on piled embankments. Part II, Geotextiles and Geomembranes 32 (2012) 82-94.

Van Eekelen, S. J. M., Bezuijen, A. & van Tol, A. F. (2015). Validation of analytical models for the design of basal reinforced piled embankments. Geotextiles and Geomembranes, 43, No. 1, 56–81.

Van Eekelen, S. J. M., Bezuijen, A., Lodder, H. J. & Van Tol, A. F. (2012b). Model experiments on piled embankments. Part II, Geotextiles and Geomembranes, 32, 82–94, including its Corrigendum in Geotextiles and Geomembranes, 35: 119.

Wan-Huan, Z., Jun-Yuan L., Yisheng, H., and Renpeng, C., (2016).Three Dimensional Finite Element Modelling of Soil Arching in Pile-Supported Geogrid-Reinforced Embankments. Procedia Engineering Volume 143, 2016, Pages 607–614.

Zaeske D. (2001).Zur Wirkungsweise von unbewehrten undbewehrten mineralischen Tragschichten überpfahlartigen Gründungs-Elementen. Schriftenreihe Geotechnik. Uni Kassel. Heft 10.

Zhou W-H, Lao J-Y, Huang Y, Chen R (2016) Three-Dimensional Finite Element Modelling of Soil Arching in Pile-Supported Geogrid-Reinforced Embankments.Procedia Engineering Volume 143, 2016, Pages 607–614.

Zhang J, Zhao Z, Sun Z (2021). Study on Long-Term Performance of Geogrid-Reinforced and Pile-Supported Embankment at Bridge Approach. Advances in Materials Science and Engineering.

## Annexe1 Les forces mesurés aux pieds des inclusions

**Tableau 1** Configuration réalisée avec 5 couches de mousse renforcées par des inclusions

<b>T1 (mesures instantanés)</b>				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	2,2	1,3	1,5	1,7
0.20	5,2	4,6	5,5	6
0.30	9,3	8,3	10,6	8,6
0.40	12,5	13,4	14,5	12,4

**Tableau 2** Configuration réalisée avec 5 couches de mousse renforcé par des inclusions

<b>T1 (mesures après une heure)</b>				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	2	1,1	1,3	1,5
0.20	4,8	4,2	5,1	5,6
0.30	8,7	7,7	10	8
0.40	11,3	12,6	13,7	11,6

**Tableau 3** Configuration réalisée avec 5 couches de mousse renforcée par des inclusions coiffées par des dalletes

T2 (mesures instantanés)					T2' (mesures instantanés)				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)	H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	5,2	5,3	5,7	5,6	0.10	5,6	4,2	5,5	*
0.20	10,8	11,6	11	11,1	0.20	10,9	9,9	11,4	*
0.30	15,4	16,2	16,5	15,3	0.30	14,5	15,4	16,1	*
0.40	19,5	20,3	18,5	19,6	0.40	19,9	18,9	21,9	*

**Tableau 4** Configuration réalisée avec 5 couches de mousse renforcée par des inclusions coiffées par des dalletes

T2 (mesures après une heure)					T2' (mesures après une heure)				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)	H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	5	5,1	5,5	5,4	0.10	5,4	4	5,3	*
0.20	10,4	11,2	10,6	10,7	0.20	10,5	9,5	11	*
0.30	14,8	15,6	15,9	14,7	0.30	13,9	14,8	15,5	*
0.40	18,7	19,5	17,7	18,8	0.40	19,1	18,1	21,1	*

**Tableau 5** Configuration réalisée avec 5 couches de mousse renforcée par des inclusions surmontée par une nappe géosynthétique

<b>T3</b> (mesures instantanés)					<b>T3'</b> (mesures instantanés)				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)	H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	2,2	3,42	2,5	2,96	0.10	2,9	3,3	3,5	3,5
0.20	6,7	6,9	7,3	7,6	0.20	6,8	6,9	7,4	6,9
0.30	10,5	10,25	10,9	11,03	0.30	10,6	11	10,5	10,1
0.40	13,8	15,15	13,9	15,7	0.40	13,7	14,9	14,5	14,2

**Tableau 6** Configuration réalisée avec 5 couches de mousse renforcée par des inclusions surmontée par une nappe géosynthétique

<b>T3</b> (mesures après une heure)					<b>T3'</b> (mesures après une heure)				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)	H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	2	3,22	2,3	2,76	0.10	2,7	3,1	3,3	3,3
0.20	6,3	6,5	6,9	7,2	0.20	6,4	6,5	7	6,5
0.30	9,9	9,65	10,3	10,43	0.30	10	10,4	9,9	9,5
0.40	13	14,35	13,1	14,9	0.40	12,9	14,1	13,7	13,4

**Tableau 7** Configuration réalisé avec 2 couches de mousse renforcé par les inclusions

<b>T4 (mesures instantanés)</b>				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	1,9	2,2	1,85	2,3
0.20	5,6	6	6,7	6,35
0.30	11,05	11,45	11,05	9,85
0.40	15,65	15	14,55	14,05

**Tableau 8** Configuration réalisé avec 2 couches de mousse renforcé par les inclusions

<b>T4 (mesures après une heure)</b>				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	1,7	2	1,65	2,1
0.20	5,2	5,6	6,3	5,95
0.30	10,45	10,85	10,45	9,25
0.40	14,85	14,2	13,75	13,25

**Tableau 9** Configuration réalisée avec 2 couches de mousse renforcée par des inclusions surmontée par une nappe géosynthétique

T5 (mesures instantanés)					T5' (mesures instantanés)				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)	H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	2,2	3,9	2,8	2,8	0,1	3,6	2,4	2,63	3,4
0.20	7,7	8,8	7,7	7,16	0,2	7,22	8,4	7,47	7
0.30	13,1	12,62	11,2	12,36	0,3	11,42	10,8	12,07	12,5
0.40	15,4	17,82	17,3	17,03	0,4	16,4	16,1	17,47	15,5

**Tableau 10** Configuration réalisée avec 2 couches de mousse renforcée par des inclusions surmontée par une nappe géosynthétique

T5 (mesures après une heure)					T5' (mesures après une heure)				
H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)	H (m)	C3 (daN)	C4 (daN)	D3 (daN)	D4 (daN)
0.10	2	3,7	2,6	2,6	0,1	3,4	2,2	2,43	3,2
0.20	7,3	8,4	7,3	6,76	0,2	6,82	8	7,07	6,6
0.30	12,5	12,02	10,6	11,76	0,3	10,82	10,2	11,47	11,9
0.40	14,6	17,02	16,5	16,23	0,4	15,6	15,3	16,67	14,7

## Annexe 2 Les déplacements mesurés à l'interface mousse-remblai

**Tableau 1** Les déplacements mesurés à l'interface mousse-remblai (T4, T5 et T5')  
(mesures instantanés)

T4		T5		T5'	
H(m)	Déplacement (mm)	H(m)	Déplacement (mm)	H(m)	Déplacement (mm)
0	0	0	0	0	0
0,1	3,11	0,1	2,65	0,1	2,44
0,2	4,71	0,2	4,68	0,2	4,42
0,3	6,06	0,3	5,71	0,3	5,42
0,4	7,28	0,4	6,57	0,4	6,24

**Tableau 2** Les déplacements mesurés à l'interface mousse-remblai (T4, T5 et T5')  
(mesures après une heure)

<b>T4</b>		<b>T5</b>		<b>T5'</b>	
<b>H(m)</b>	<b>Déplacement (mm)</b>	<b>H(m)</b>	<b>Déplacement (mm)</b>	<b>H(m)</b>	<b>Déplacement (mm)</b>
0	0	0	0	0	0
0,1	3,35	0,1	2,89	0,1	2,68
0,2	5,01	0,2	4,98	0,2	4,72
0,3	6,26	0,3	5,91	0,3	5,62
0,4	7,64	0,4	6,93	0,4	6,6

## RESUME

L'amélioration des sols compressibles par des inclusions rigides verticales est l'une des méthodes les plus utilisées ces dernières années. Cette technique constitue une alternative intéressante par rapport à celles traditionnellement choisies au niveau du délai et le coût de réalisation.

Le travail présenté dans ce mémoire constitue une contribution à la compréhension du comportement de ce type d'ouvrages et plus particulièrement les mécanismes qui gouvernent le transfert des charges vers les inclusions. Il est réalisé suivant deux approches complémentaires :

- Expérimentale : à l'aide d'un ensemble d'essais réalisés sur un nouveau modèle physique réduit.
- Numérique : sur la base d'un modèle numérique en axisymétrie de révolution utilisant le logiciel Plaxis.

Dans un premier temps, le travail expérimental effectué nous a permis de comparer l'efficacité du système pour différentes configurations, généralement, adoptées dans le domaine du génie civil. L'effet de certains paramètres sur le transfert des charges, et les déplacements à l'interface sol compressible-remblai, a été mis en évidence. Parmi ces paramètres on peut citer la présence d'une nappe de geosynthétique, la présence des dalles et la compressibilité du sous-sol. Dans un second temps, la validation d'un modèle numérique a été effectuée grâce aux résultats expérimentaux recueillis et qui sont représentés par l'efficacité de transfert des charges et les déplacements enregistrés à l'interface sol compressible-remblai. Le modèle numérique, ainsi adopté, a permis de mener une étude paramétrique dans le but d'approcher et de mieux interpréter l'influence des différents paramètres observés physiquement sur le modèle réduit.

**Mots-clés :** Amélioration des sols, Transfert de charge, Compressibilité, Inclusions rigides, Modélisation.

## ABSTRACT

Improving compressible soils with vertical rigid inclusions is one of the most used methods in recent years. This technique constitutes an interesting alternative compared to those traditionally chosen in terms of time and construction cost.

The work presented in this thesis constitutes a contribution to the understanding of the behavior of this type of structure and more particularly the mechanisms which govern the load transfer towards the inclusions. It is carried out using two complementary approaches:

- Experimental: using a set of tests carried out on a new reduced physical model.
- Numerical: on the basis of a numerical model in axisymmetry of revolution using the Plaxis software.

Initially, the experimental work carried out allowed us to compare the efficiency of the system for different configurations, generally adopted in the field of civil engineering. The effect of some parameters on the load transfer, and displacements at the compressible soil-embankment interface, has been demonstrated. These parameters include the presence of a geosynthetic layer, the presence of caps and the compressibility of the subsoil.

Secondly, the validation of the numerical model was carried out thanks to the experimental results collected, and which are represented by the efficiency of load transfer and the displacements recorded at the compressible soil-embankment interface. The numerical model thus adopted made it possible to carry out a parametric study in order to approach and better interpret the influence of the various parameters physically observed on the reduced model.

**Keywords:** Soil improvement, Load transfer, Compressibility, Rigid inclusions, Modeling.

## ملخص

يعتبر تحسين التربة القابلة للضغط من خلال عمليات تضمين الخوازق الصلبة من أكثر الطرق استخداماً في السنوات الأخيرة. وتعتبر هذه التقنية بديلاً مثيراً للاهتمام عن تلك التي يتم اختيارها تقليدياً من حيث الوقت والتكلفة.

العمل المعروف في هذه الأطروحة هو إسهام في فهم سلوك هذا النوع من العمل، ولا سيما الآليات التي تحكم نقل الأحمال نحو الخوازق الصلبة. وقد تم باستخدام نهجين متكاملين:

- تجريبي: باستخدام مجموعة من الاختبارات التي أجريت على نموذج فيزيائي مصغر جديد
- عددي: على أساس نموذج رقمي محوري باستخدام برنامج بلاكسيس

في البداية، سمح لنا العمل التجريبي بمقارنة كفاءة النظام بالنسبة لتشكيلات مختلفة، تعتمد عموماً في مجال الهندسة المدنية. تم تبسيط الضوء على أثر بعض العوامل على نقل الحمولة و هبوط التربة. وتشمل هذه العوامل وجود طبقة جيوسنتيكية، وجود بلاطات أعلى رؤوس الخوازق، وانظماطية التربة.

ثانياً، تم التحقق من صحة النموذج الرقمي باستخدام النتائج التجريبية التي تم جمعها، والتي تتمثل في كفاءة نقل الحمولة و هبوط التربة. وقد أتاح النموذج العددي، الذي اعتمد بالتالي، إجراء دراسة عددية بهدف تناول تأثير مختلف العوامل التي لوحظت في النموذج المصغر وتفسيرها بشكل أفضل.

**كلمات مفتاحية :** تحسين التربة، نقل الحمولة، قابلية الضغط، الخوازق الصلبة، النمذجة.