

# APPORT DES GÉOSYNTHÉTIQUES DANS LE RENFORCEMENT PAR INCLUSIONS RIGIDES DES SOLS COMPRESSIBLES

## IMPACT OF GEOSYNTHETICS FOR IMPROVEMENT OF SOFT SOILS BY RIGID PILES

Romain GIROUT<sup>1</sup>, Matthieu BLANC<sup>1</sup>, Luc THOREL<sup>1</sup>, Daniel DIAS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UNALM, IFSTTAR, Dépt. GERS, Laboratoire Terrassements et Centrifugeuse, Bouguenais, France.

<sup>2</sup> LTHE, Polytech'Grenoble Université Joseph-Fourier, Grenoble, France

**RÉSUMÉ** – Le renforcement de sols compressible par inclusions rigides est simulé sur modèle réduit centrifugé en étudiant le rôle d'une nappe de géosynthétique de renforcement horizontal insérée entre le matelas granulaire et le sol renforcé. Une modélisation numérique par éléments finis a été développée.

Mots-clés : renforcement - centrifugeuse - géosynthétique - modélisation numérique

**ABSTRACT** – The improvement of soft soil by rigid piles is simulated on centrifuged small scale model to study the role of a horizontal geosynthetic sheet reinforcement installed between the granular mattress and the reinforced soil. A numerical model by finite element has been developed.

Keywords: reinforcement - centrifuge modelling - geosynthetic - numerical modelling

### 1. Introduction

La technique du renforcement par inclusions rigides de sols compressibles (Figure ) est aujourd'hui en plein essor (IREX, 2012) à travers le monde. Dans le cas le plus courant, un matelas granulaire de transfert de charge est placé au-dessus du sol (compressible) renforcé par des inclusions rigides ; il a pour but de répartir les charges vers les inclusions par des mécanismes d'effet voûte et de cisaillement afin de décharger le sol compressible et donc de réduire les tassements de ce dernier. Afin d'accroître la raideur d'ensemble de cette fondation composite, une variante consiste à déposer une nappe de géosynthétique à la surface du sol compressible afin de constituer un renforcement horizontal. L'effet membrane (Le Hello et Villard, 2009) traduit la capacité des géosynthétiques à transmettre davantage de charge vers les inclusions. Le géosynthétique se déforme et se met en tension pour transmettre le poids du matelas vers les inclusions. Des études analytiques et expérimentales non centrifugées ont été réalisées (Low et al., 1994 ; Demerdash, 1996 ; Abusharar et al., 2009). Un processus expérimental sur un modèle réduit 3D en centrifugeuse (Rault et al., 2010 ; Okyay, 2010 ; Blanc et al., 2012) a été utilisé pour mener une étude paramétrique sur la hauteur de matelas  $H$  et l'espacement  $s$  entre les inclusions.

### 2. Modélisation physique

#### 2.1. Similitude

La modélisation physique en centrifugeuse consiste à appliquer aux modèles réduits à l'échelle  $1/N$  une macro-gravité de  $N$  fois la gravité terrestre. La transposition des résultats obtenus sur les modèles à l'ouvrage réel, le prototype, nécessite le respect de similitudes entre la grandeur physique à l'échelle du modèle réduit et celle du prototype. Ces facteurs de similitude sont donnés par le Tableau 1. Le plateau mobile est un modèle réduit au  $1/20^{\text{ième}}$  testé sous  $20g$  ( $N = 20$ ).

#### 2.2. Plateau mobile

Le tassement  $\Delta\omega$  du sol compressible est simulé par la descente d'un plateau perforé au droit d'inclusions fixes rigide (Figure ). Préalablement, un matelas granulaire de sable d'Hostun est déposé sur le plateau. Cet ensemble est surmonté d'un réservoir muni d'un fond souple appliquant par remplissage en vol une surcharge hydraulique sur le matelas granulaire. Le plateau a un diamètre interne  $\Phi = 894$  mm et est perforé par 61 trous au droit des inclusions de diamètre  $a = 25$  mm espacées suivant un maillage carré de côté  $s = 100$  mm (Figure ).

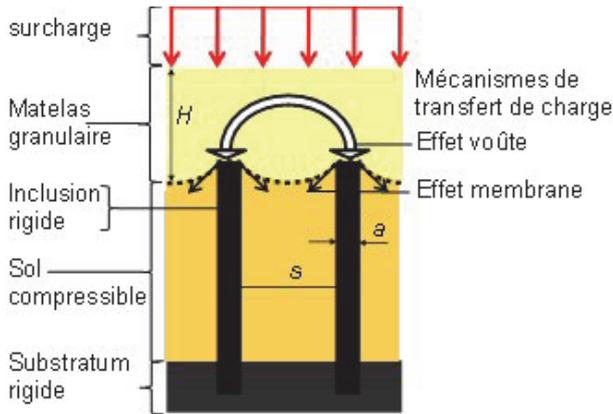
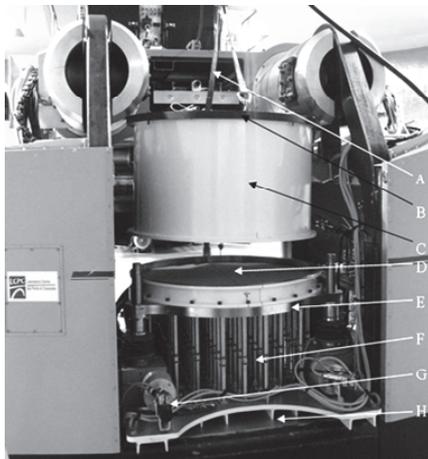


Figure 1. Schéma du renforcement de sols par inclusions rigides

Tableau 1. Facteurs d'échelle en centrifugeuse

Quantité	Unité	Prototype	Modèle Ng
Longueur	m	1	1/N
Déformation	%	1	1
Force	kN	1	1/N <sup>2</sup>
Contrainte	kPa	1	1
Densité du matelas	kN/m <sup>3</sup>	1	1
Masse	kg	1	1/N <sup>3</sup>
Taux de couverture	%	1	1
Raideur sécante	kN/m	1	1/N



- A – Treuil
- B – Membrane
- C – Réservoir d'eau
- D – Matelas granulaire
- E – Plateau mobile
- F – Inclusion rigide
- G – Moteur
- H – Support

Figure 2. Vue d'ensemble du dispositif

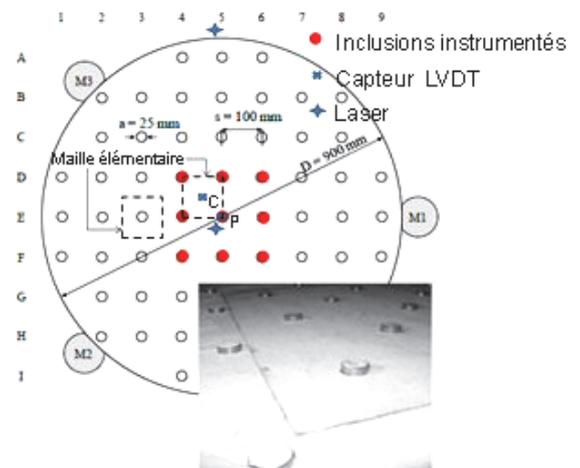


Figure 3. Représentation du plateau. Photographie de l'interface rugueuse

Le taux de couverture  $\alpha$ , ou densité du maillage, correspond au rapport de la surface d'une tête d'inclusions  $\pi.a^2/4$  sur celle d'une maille élémentaire de sol compressible  $s^2$  (Figure 3).  $\alpha$  est modifiable en retirant des inclusions (i.e. en augmentant la distance  $s$  entre deux inclusions). Ainsi  $\alpha = 4,91\%$  correspond à  $s = 100$  mm et  $\alpha = 1,23\%$  à  $s = 200$  mm. L'interface entre le sol compressible (ici le plateau mobile) et le matelas est modélisée par une couche de sable collée sur le plateau (photographie sur la Figure 3). L'épaisseur  $H$  de la rehausse métallique correspond à celle du matelas valant 35 mm ou 90 mm. L'instrumentation consiste en la mesure :

- des efforts verticaux  $F$  transmis dans les 9 inclusions centrales (Figure 3) par des capteurs de force,
- de la surcharge hydraulique  $q_0$  par 2 capteurs de pression interstitielle,
- du déplacement du plateau en son centre  $\Delta\omega$  et en un point de son périmètre au moyen de 2 capteurs lasers (Figure 4). La différence entre ces mesures donne le fléchissement du plateau. Le déplacement au centre du plateau  $\Delta\omega$  représente le tassement simulé du sol compressible (fictif),
- des tassements à la surface du matelas granulaire par des capteurs LVDT fixés sur une poutre au sommet du réservoir et situés à l'intérieur du réservoir, au droit d'une inclusion  $\Delta\omega_P$  et du centre d'une maille  $\Delta\omega_C$  (Figures 3 et 4). La différence  $\Delta\omega_C - \Delta\omega_P$  définit le tassement différentiel au centre d'une maille.

### 2.3. Matelas de transfert de charge

Le matelas de transfert de charge est simulé par le mélange de 5 fractions granulaire (HN38, HN34, HN31, HN04/08 et HN06/16, où cette dernière fraction est écrêtée à 1 mm) de sable d'Hostun (Bauduin et al., 2008). En centrifugeuse il faut employer des matériaux ayant un comportement similaire à ceux du prototype. D'autre part, il faut éviter les effets d'échelle et respecter un rapport entre le diamètre de l'inclusion et la taille maximale du grain de 25 (Franke et Muth, 1985). Les graves B3 (Glandy et Frossart, 2002) utilisées in situ sont substituées par du sable d'Hostun dont les plus gros éléments sont de diamètre 1 mm pour respecter cette condition. De plus, le matelas a une granulométrie étalée et uniforme proche de celle du prototype. Le Tableau 1 en donne les caractéristiques granulométriques.

Tableau 1 Caractéristiques du mélange de sable d'Hostun

$d_{10}$ (mm)	$d_{50}$ (mm)	$d_{90}$ (mm)	$C_U$ (-)	$C_C$ (-)	$\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_{min}$ (-)	$e_{max}$ (-)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
0,125	0,320	0,880	3,52	0,88	1,40	1,73	0,532	0,893	2,65

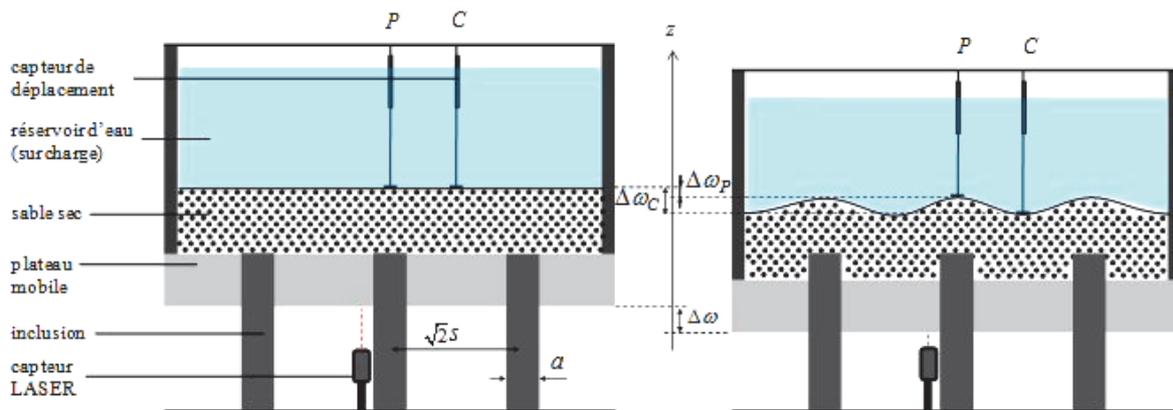


Figure 4. Représentation de  $\Delta\omega$ ,  $\Delta\omega_p$  et  $\Delta\omega_c$

### 2.4. Géosynthétique

Le Tableau donne les propriétés du géosynthétique utilisé. Il est constitué de fibres de polypropylène tissées. Il est déposé à la surface du plateau. Sa raideur sécante  $J$  correspond à la pente de la courbe  $T = f(\varepsilon)$  où  $T$  est la résistance à la traction par unité de longueur. Les valeurs de  $J$  et de  $T$  pour notre modèle sont à multiplier par  $N$  afin d'obtenir celles à l'échelle prototype.

Tableau 3. Caractéristiques du géosynthétique

	Unité	Modèle		Prototype	
		Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
Force de tension maximale $T_{max}$	kN/m	24,5	23,9	490	478
Déformation $\varepsilon_{max}$ à $T_{max}$	%	19,3	12,9	19,3	12,9
Raideur sécante $J$ à $\varepsilon = 5\%$	kN/m	148	238	2960	4760

### 3. Campagne expérimentale

La campagne expérimentale comporte 8 essais (Tableau 4). Un essai est identifié par l'épaisseur du matelas  $H$ , l'entre-axe de de deux inclusions  $s$  en grandeur modèle et la présence et/ou l'absence de géosynthétique. Ainsi l'essai " H35S100L1" correspond à une épaisseur  $H = 35$  mm et une distance  $s = 100$  mm. Les caractères "L1" indique que le matelas est renforcé par une nappe de géosynthétique. Les épaisseurs testées sont  $H = 35$  mm et  $H = 90$  mm. Les distances entre inclusions testées sont  $s = 100$  mm et  $s = 200$  mm (respectivement  $\alpha = 4,91$  % et  $\alpha = 1,23$  %).

Tableau 4. Liste des essais réalisés (données modèle et prototype [ ])

N° Essai	Nom	Hauteur H (mm)	Distance s (mm)	Nappe
1	H35S100L0	35 [700]	100	-
2	H35S100L1		[2000]	✓
3	H35S200L0		200	-
4	H35S200L1		[4000]	✓
5	H90S100L0	90 [1800]	100	-
6	H90S100L1		[2000]	✓
7	H90S200L0		200	-
8	H90S200L1		[4000]	✓

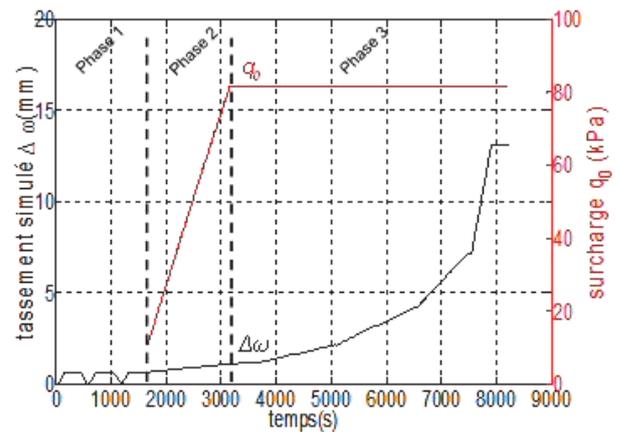


Figure 5. Essai type en 3 phases

### 3.1. Déroulement d'un essai

Le matelas est déposé avec précaution à la surface du plateau. La masse du matelas est pesée avant et après essai. Sur les 8 essais considérés la masse volumique des matelas est comprise dans l'intervalle  $\gamma_d = 16,5 \pm 0,5 \text{ kN/m}^3$ .

Un essai se déroule en 3 phases distinctes (Figure 5) :

- la phase 1 correspond à des cycles de montée - descente en  $g$  : elle permet d'optimiser la répétabilité des conditions initiales. Le plateau fléchit durant cette phase sous son propre poids et celui du matelas d'environ 0,5 mm en son centre,
- lors de la phase 2 la surcharge  $q_0$  est appliquée par remplissage du réservoir jusqu'à 80 kPa (équivalent au poids d'un remblai de 5 m environ). Le fléchissement du plateau dû à cette surcharge s'accroît d'environ 0,5 mm, pour atteindre au total 1 mm à la fin du remplissage du réservoir,
- la phase 3 simule le tassement du sol compressible par la descente  $\Delta\omega$  du plateau mobile à vitesse, contrôlée, initialement faible (0,05 mm/min), pour permettre une bonne restitution des mécanismes de transfert de charge dans le massif, elle atteint une valeur plus élevée (1 mm/min) afin de limiter la durée de l'essai. Les changements de pente de la courbe  $\Delta\omega$  correspondent à des changements de vitesse.

### 3.2. Résultats d'un essai type

Dans ce paragraphe, illustré par la Figure 6, sont présentés les résultats de l'essai "H35S100L1". La figure 6(a) représente les mesures des 9 capteurs de forces. Elles ne s'écartent pas de plus de 10 % de la valeur moyenne. En effet les 9 inclusions centrales sont entourées par le même nombre d'inclusions. Il n'y a pas d'hétérogénéité au voisinage des inclusions considérées. La force moyenne  $F$  est retenue pour la suite de l'étude. Lors de la phase 1, les forces mesurées dans l'inclusion suivent les cycles de montée - descente en  $g$ . Dans la phase 2, les forces augmentent en partie à cause de la surcharge appliquée sur le matelas et en partie en raison du fléchissement du plateau. Ce déplacement induit un transfert de charge au sein du matelas et contribue à l'augmentation des forces durant ces deux phases. Les forces augmentent durant la phase 3 avec le tassement simulé du sol compressible  $\Delta\omega$ .

L'efficacité  $E$  du transfert de charge vers les inclusions (Hewlett et Randolph, 1988) est définie pour une maille élémentaire par le rapport de la force dans l'inclusion  $F$  sur le poids du matelas  $W$  auquel on ajoute la surcharge  $Q_0$  par :

$$E = \frac{F}{W + Q_0} = \frac{F}{(\gamma N H + q_0) s^2} \quad (1)$$

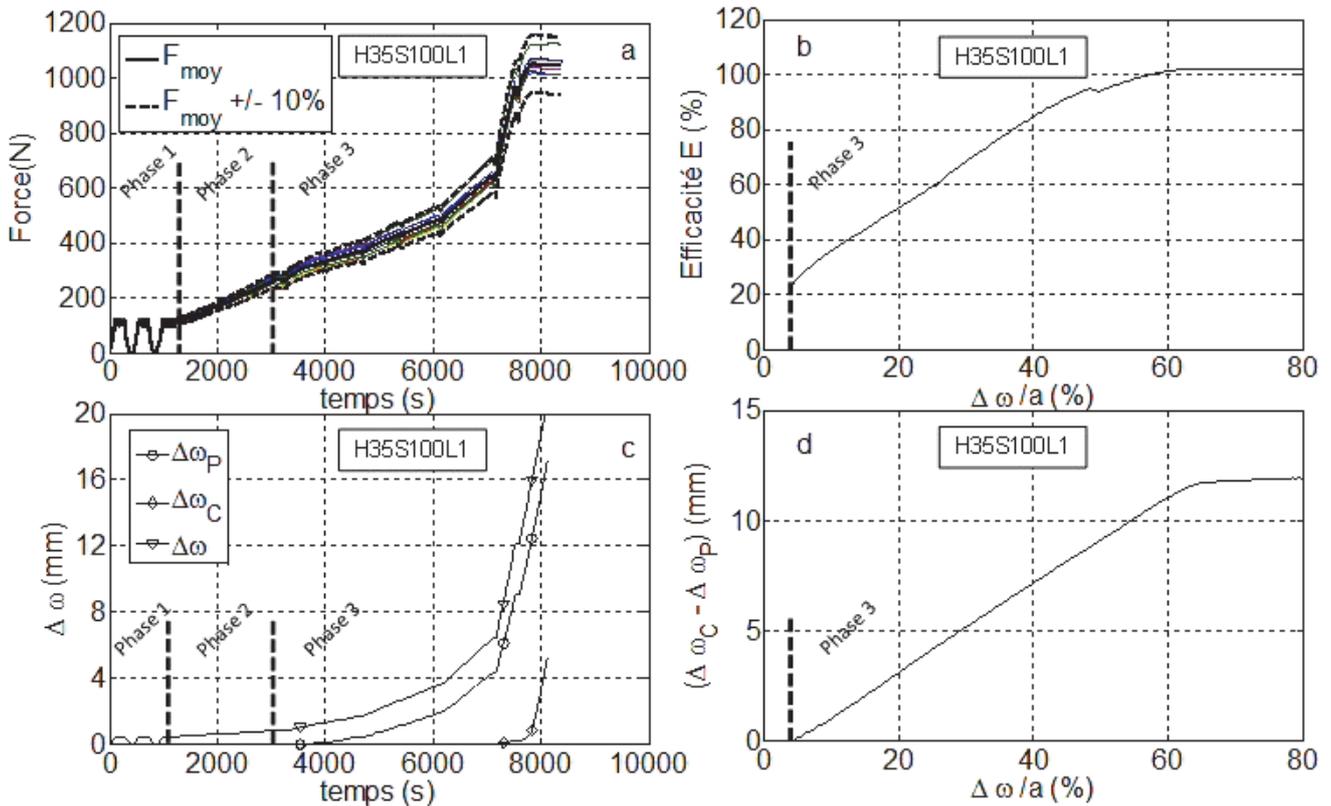


Figure 6. Résultats d'un essai type :(a) forces mesurées dans les 9 inclusions centrales, moyenne des forces  $F_{moy}$  et écart à +/- 10% en fonction du temps  $t$  (b)  $E$  en fonction de  $\Delta\omega/a$  (c)  $\Delta\omega$ ,  $\Delta\omega_C$  et  $\Delta\omega_P$  en fonction du temps (d)  $(\Delta\omega_C - \Delta\omega_P)$  en fonction de  $\Delta\omega/a$

La Figure 6(b) représente l'évolution de  $E$  en fonction du déplacement adimensionnalisé du plateau  $\Delta\omega/a$ . A la fin de la phase de remplissage, la force  $F$  devrait être égale à  $\alpha \cdot ((W + Q) \cdot s^2)$  et donc on devrait avoir  $E = \alpha$  si le transfert de charge n'avait pas commencé. Or le plateau ayant fléchi durant les deux premières phases, ce transfert est déjà en œuvre et ainsi  $E$  a déjà augmenté. Ensuite  $E$  augmente quasi-linéairement jusqu'à atteindre un palier de 100 % à  $\Delta\omega/a = 60$  % (pour cet essai). Pour ce « tassement » la nappe de géosynthétique se décolle du plateau. Tous les efforts sont dès lors transmis vers les inclusions.

Le déplacement du plateau  $\Delta\omega$  ainsi que les tassements à la surface du matelas au centre  $\Delta\omega_C$  d'une maille élémentaire et au droit d'une inclusion  $\Delta\omega_P$  sont reportés sur la Figure 6(c). Les tassements à la surface du matelas sont remis à zéro à la fin de la phase de remplissage (phase 2). Cela est fait pour ne pas prendre en compte les déplacements dus au fléchissement de la poutre supportant les capteurs de déplacements LVDT. Le tassement différentiel en centre de maille pris positivement  $\Delta\omega_C - \Delta\omega_P$  augmente jusqu'à une valeur de 12 mm (pour cet essai) atteinte lorsque le géosynthétique se décolle du plateau.

La contrainte sur le sol compressible  $\sigma_{SS}$  est définie comme la différence entre la contrainte totale  $\sigma_{tot} = (W + Q)/s^2$  et la contrainte dans une inclusion.  $\sigma_{SS}$  peut aussi s'exprimer en fonction de  $E$ ,  $\alpha$  et de la contrainte totale  $\sigma_{tot}$ .

$$\sigma_{ss} = \frac{1 - E}{1 - \alpha} \cdot \sigma_{tot} \quad (2)$$

À la fin de la phase de remplissage,  $E$  aurait été égal à  $\alpha$  si le plateau ne fléchissait pas.  $\sigma_{tot}$  dépend de  $H$ .  $\sigma_{SS}$  dépend de  $\alpha$  et décroît lorsque  $E$  croît.  $\sigma_{SS}$  donne une indication de la qualité de la réduction de contrainte sur le sol compressible.

## 4. Analyse des résultats expérimentaux

### 4.1. Sans géosynthétique

L'efficacité  $E$  (Figure 7(a)) du transfert de charge augmente, selon l'épaisseur du matelas, avec le déplacement du plateau directement jusqu'à un palier ( $H = 90$  mm) ou en passant par un pic ( $H = 35$  mm). Cette évolution est observée pour  $s = 100$  mm et 200 mm. Les valeurs finales atteintes par  $E$  sont élevées quand l'espacement entre les inclusions  $s$  est faible ( $s = 100$  mm) et quand  $H$  est élevé ( $H = 90$  mm). Les mécanismes de transfert de charge (i.e. le frottement entre les grains) se mettent en place avec le déplacement du plateau et sont magnifiés quand  $s$  est faible et quand  $H$  est élevé.

Les tassements différentiels  $\Delta\omega_C - \Delta\omega_P$  (Figure 7(b)) augmentent linéairement avec le déplacement du plateau. Ils sont élevés quand  $H$  est faible. En effet, les réarrangements sont facilités lorsque  $H$  est élevé et seul une faible part des déplacements générés à la base du matelas par poinçonnement se propage jusqu'à la surface. Les tassements dépendent peu de l'espacement  $s$  entre les inclusions car le poinçonnement  $\Delta\omega$  est petit devant l'espacement  $s$  entre les inclusions.

La valeur initiale théorique de  $\sigma_{SS}$  est de 92 kPa si  $H = 35$  mm et de 110 kPa si  $H = 90$  mm. Pour  $s = 100$  mm,  $\sigma_{SS}$  reste supérieure à 60 kPa si  $H = 35$  mm et à 20 kPa si  $H = 90$  mm (Figure 7(c)). Pour  $s = 200$  mm, les valeurs restent supérieures à 80 kPa.

### 4.2. Avec géosynthétique

$E$  augmente avec  $\Delta\omega$  quels que soient  $H$  et  $s$  considéré. Pour  $s$  faible,  $E$  atteint un palier de 100 %. Le palier est atteint pour un déplacement  $\Delta\omega$  à partir duquel le géosynthétique se décolle du plateau. Toutes les forces sont dès lors transmises vers les inclusions. Pour  $s$  élevé,  $E$  augmente linéairement mais sans atteindre un palier et jusqu'à des valeurs plus faibles que pour  $s = 100$  mm. Cela vient du fait que le géosynthétique ne se décolle pas pour un déplacement  $\Delta\omega$  inférieur à 20 mm. Comme les mécanismes d'effet voûte sont moins développés pour  $s$  élevé, le géosynthétique est soumis à une contrainte plus élevée. Pour un matelas de même épaisseur, le géosynthétique se déforme plus si l'espacement entre les inclusions est plus élevé. Pour  $s$  petit, l'efficacité finale est atteinte pour un  $\Delta\omega$  plus petit si  $H$  est élevé ( $\Delta\omega = 12$  mm si  $H = 90$  mm et  $\Delta\omega = 15$  mm si  $H = 35$  mm). Les cisaillements entre les particules sont plus importants dans un matelas de forte épaisseur par rapport à un matelas de faible épaisseur. La contrainte sur le géosynthétique est réduite et le décollement survient donc pour  $\Delta\omega$  plus faible.

Les tassements différentiels augmentent linéairement avec  $\Delta\omega$  jusqu'au décollement du géosynthétique. Les tassements différentiels sont élevés si  $H$  est faible.

$\sigma_{SS}$  atteint un minimum de 0 kPa lorsque le géosynthétique est décollé du plateau.

### 4.3. Impact du renforcement

En l'absence du géosynthétique,  $E$  est inférieure à 100 % pour les épaisseurs testées : les charges ne sont que partiellement transmises dans le matelas vers les inclusions par effet voûte. Par l'ajout d'un géosynthétique, quels que soient  $H$  et  $s$ , l'efficacité  $E$  est plus élevée du fait de l'effet membrane (figure 7(a)). Cet effort supplémentaire que reprend le géosynthétique augmente avec  $\Delta\omega$  jusqu'au décollement.

In situ, le dimensionnement est aussi réalisé sur l'estimation des tassements différentiels. Afin de comparer ce paramètre pour différentes configurations ( $s$  et  $H$ ) avec et sans géosynthétique, il est nécessaire de se placer à la même valeur  $\sigma_{SS}$ . En effet le « tassement » du plateau est contrôlé en déplacement et non en contrainte comme c'est le cas in situ. Pour  $s = 100$  mm et  $H = 35$  mm, la valeur  $\sigma_{SS} = 70$  kPa est atteinte pour  $\Delta\omega = 1$  mm avec renforcement et pour  $\Delta\omega = 4$  mm sans renforcement. Les tassements différentiels correspondant sont de 1 mm avec renforcement et de 2 mm sans renforcement.

In situ, il convient également de s'intéresser à la valeur de  $\sigma_{SS}$  admissible. Dans le cas d'un matelas renforcé, pour  $s = 100$  mm, la valeur minimale atteinte en palier par  $\sigma_{SS}$  est de 0 kPa. Le géosynthétique permet ainsi de diminuer les tassements différentiels en surface du matelas et de réduire très sensiblement la contrainte sur le sol compressible.

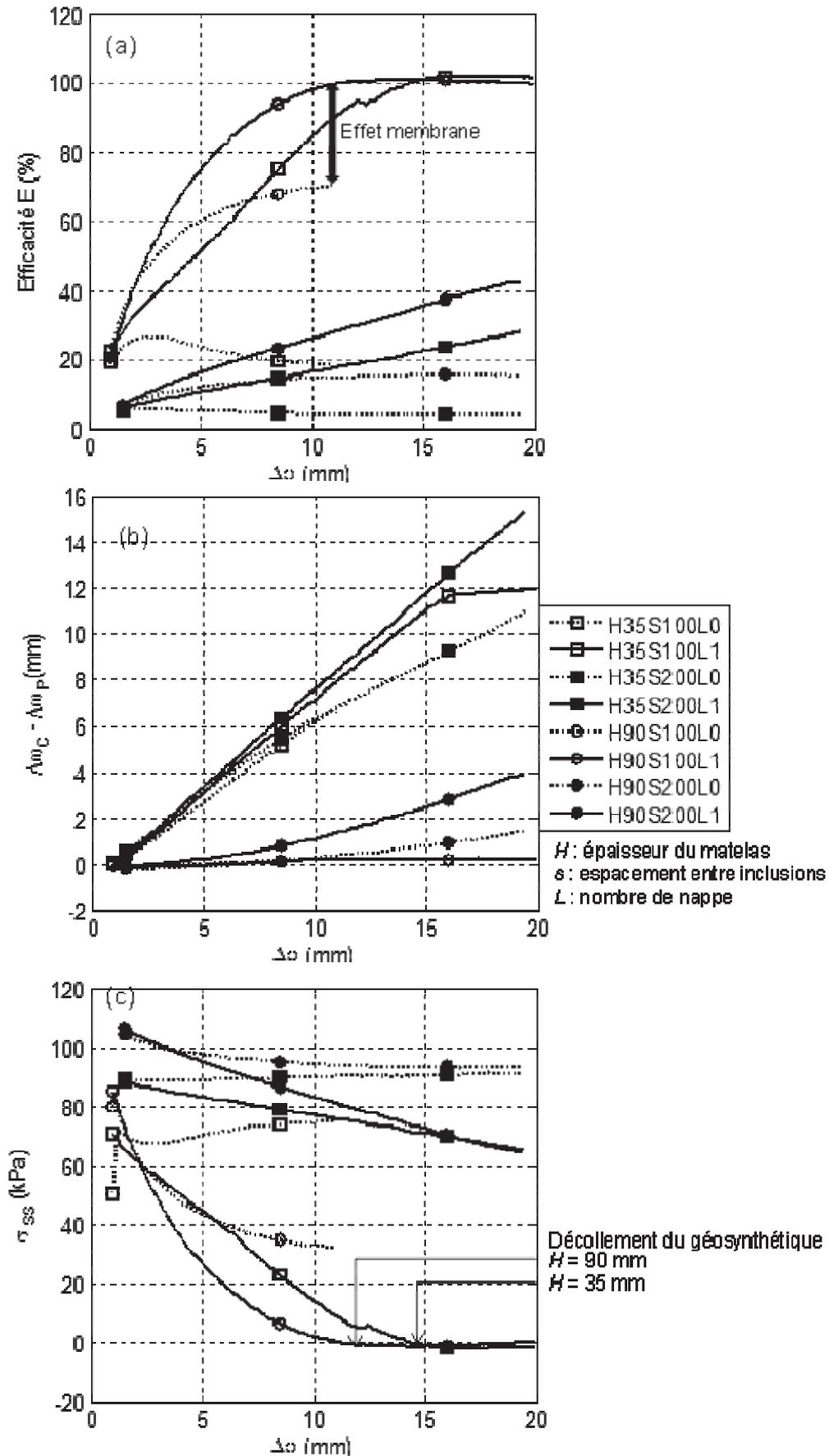


Figure 7 (a) Évolution de  $E$  en fonction du rapport  $\Delta\omega$  (b) Évolution de  $\Delta\omega_C - \Delta\omega_P$  en fonction de  $\Delta\omega$  (c) Évolution de la contrainte sur le sol compressible  $\sigma_{SS}$  en fonction de  $\Delta\omega$

## 5. Modélisation numérique

### 5.1. Présentation du modèle numérique

Une modélisation numérique de type éléments finis en configuration axisymétrique a été mise en œuvre pour effectuer une comparaison avec les résultats expérimentaux et compléter les informations sur les mécanismes de transfert de charge dans le matelas et sur l'effet membrane. Les éléments du modèle représentés sont une inclusion en acier de 40 mm de haut et de diamètre  $a = 25$  mm et un matelas granulaire (Figure 8).

Une nappe de géosynthétique est positionnée à la base du matelas. À la surface supérieure du matelas est appliquée une charge uniforme  $q_0$ .

Le processus de simulation consiste, en partant d'une inclusion et d'un géosynthétique dont les déplacements sont bloqués, à activer le matelas, la macro-gravité puis la surcharge et à libérer les déplacements initialement bloqués de la nappe de géosynthétique.

Bien que les conditions de symétrie cylindrique ne soient pas parfaitement respectées, l'aire d'influence autour d'une inclusion a été transformée en une aire circulaire équivalente de rayon  $R_{eq}$ , soit  $R_{eq} = \sqrt{s^2 / \pi}$  (figure 8). Les conditions aux limites sont le blocage des déplacements horizontaux sur les faces latérales du modèle et celui des déplacements verticaux à la base de l'inclusion.

### 5.2. Modélisation des matériaux

Le comportement du matelas de transfert de charge est pris en compte par un modèle élasto-plastique communément appelé Hardening Soil (Brinkgreve et Vermeer, 2003) dans le logiciel Plaxis. Le modèle HSM est un dérivé du modèle hyperbolique (Duncan et Chang, 1970). La surface de charge est décrite par deux mécanismes (déviatoire et volumique) avec écrouissage isotrope. Le mélange de sable d'Hostun a été caractérisé par des essais triaxiaux (Dupla et al., 2008). Ces essais triaxiaux ont été réalisés à la densité du matelas des essais du plateau mobile. Les résultats de ces essais triaxiaux permettent de calibrer la loi de comportement utilisée (Tableau 2). Une simulation numérique (courbes continues sur les graphiques de la figure 9) des essais triaxiaux (courbes discontinues)  $q=f(\varepsilon_{zz})$  à différentes pressions de confinement  $p_c$  est réalisé (figure 9). Le modèle numérique simule convenablement les essais jusqu'au pic. Le calage des paramètres a été effectué au pic du déviateur des contraintes. Le comportement du sable est particulièrement bien modélisé pour des déformations  $\varepsilon_{zz} < 4\%$ .

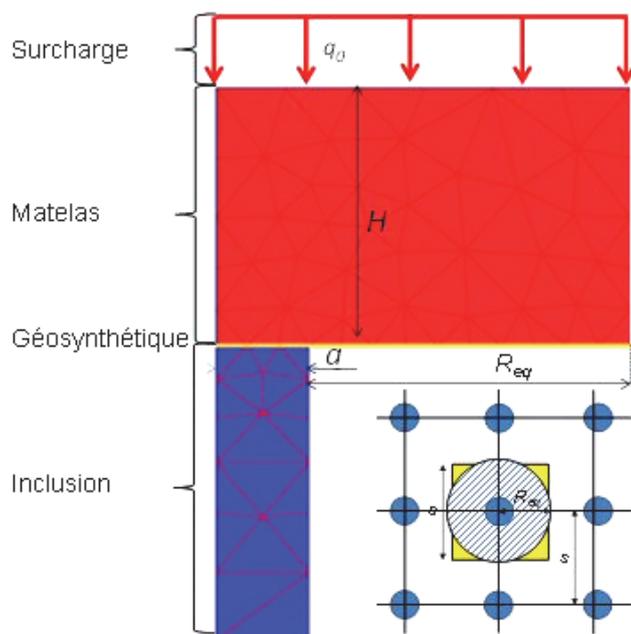


Tableau 2 Paramètres du modèle Hardening Soil

Paramètres		Unités	Valeur
$E_{50}$	Module de déformation plastique déviatoire	MPa	28
$E_{oedo}$	Module de déformation plastique en compression oedométrique		31,2
$E_{ur}$	Module de déformation cycle chargement/déchargement		156
$\varphi$	Angle de frottement interne	deg	43
$\psi$	Angle de dilatance		9
$m$	Dépendance contrainte/rigidité	-	0,6

Figure 8. Modèle numérique de la mise en traction du géosynthétique

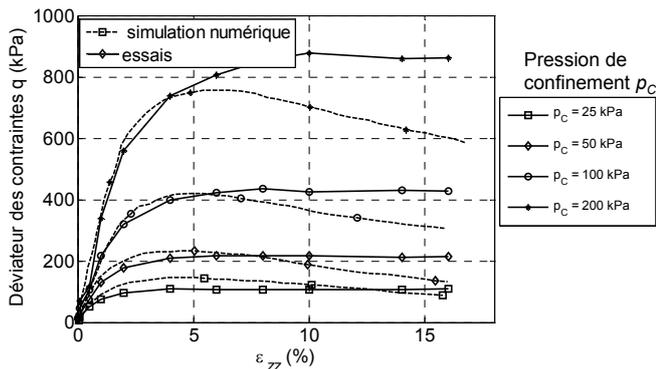


Figure 9. Comparaison des essais et des simulations numériques sur les courbes  $q = f(\varepsilon_{zz})$

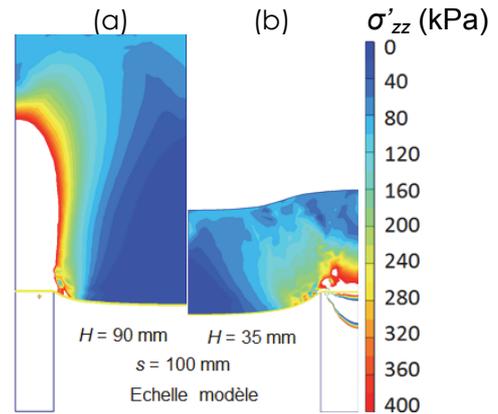


Figure 10. Contraintes dans le matras, géosynthétique décollé : H = 90 mm(a) 35 mm (b)

### 5.3. Contraintes

La figure 10 illustre la répartition des contraintes verticales  $\sigma'_{zz}$  en présence d'une nappe de géosynthétique pour les deux épaisseurs H et pour  $s = 100$  mm. La force dans l'inclusion est calculée à partir des valeurs de contraintes en chaque nœud de l'inclusion à une côte donnée (tel que le champ de contrainte y soit homogène):  $F = 900$  N pour  $H = 35$  mm et  $F = 1100$  N pour  $H = 90$  mm. L'efficacité correspondante est de 100 %. Le modèle numérique est donc cohérent par rapport aux résultats expérimentaux.

Les contraintes verticales dans le matras sont concentrées au droit de l'inclusion. Des voûtes de répartition des contraintes se forment dans le matras. Dans le cas  $H = 35$  mm, les contraintes sur le géosynthétique sont plus élevées et sont réparties sur une plus grande distance du bord de l'inclusion (Figure 10b) par rapport à la simulation où  $H = 90$  mm. Cela signifie que les mécanismes d'effet voûte concernent un volume moins important du matras. La part des charges transmises par le géosynthétique est donc plus élevée lorsque l'épaisseur du matras est faible.

## 6. Conclusion

L'amélioration des mécanismes de transfert de charge du matras granulaire déposé au-dessus d'un sol compressible renforcé par inclusions rigide a été étudiée. Deux épaisseurs de matras (35 mm et 90 mm) ainsi que deux taux de couverture (1,23% et 4,91%) ont été testés dans la campagne expérimentale utilisant un modèle réduit centrifugé. Cette étude a permis d'estimer les apports du géosynthétique. Il ressort que l'efficacité du transfert de charge est optimale pour des épaisseurs de matras et un taux de couverture élevé. De même, les tassements différentiels sont faibles quand l'épaisseur du matras est élevée. Le renforcement du matras par une nappe de géosynthétique située au contact du sol compressible permet par effet membrane la transmission des efforts verticaux le long du plan du géosynthétique jusqu'aux inclusions. L'insertion d'une nappe a pour effet de diminuer les tassements différentiels en surface et la contrainte sur le sol compressible.

Ces résultats ont été complétés par une modélisation axisymétrique sous un logiciel aux éléments finis. Cette modélisation concerne la déformation d'un géosynthétique sous le poids d'un matras et d'une surcharge. Il apparaît que les contraintes dans le matras sont concentrées au droit de l'inclusion par des mécanismes d'effet voûte. Cette concentration de contrainte est élevée quand H est élevée. Les contraintes sur le géosynthétique sont donc d'autant plus faibles que les mécanismes d'effet voûte sont développés. Les résultats du modèle numérique sont cohérents avec les résultats expérimentaux. Le modèle numérique a permis de visualiser les mécanismes de transfert de charge en termes de répartition des contraintes au sein du matras ainsi que sur le géosynthétique.

Cette étude devrait être prolongée par une étude paramétrique de configurations complémentaires (H, s et J).

## 7. Remerciements

Nous remercions la société Tencate dont M. Alain Nancey d'avoir gracieusement contribué à notre étude par l'approvisionnement d'échantillons de géosynthétiques.

## 8. Références bibliographiques

- Abusharar S.W., Zheng J.J, Yin J.H (2009). A simplified method for analysis of a piled embankment reinforced with geosynthetics. *Geotextiles and Geomembrane* (1), pp. 39–52.
- Baudouin G., Rosquoet F., Canou J., Dupla J.C., Thorel L., Rault G., Andria-Ntoanina I. (2008). Caractérisation mécanique d'un mélange de sables d'Hostun. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie et de l'Ingénieur, 491 - 498.
- Blanc M., Rault G., Thorel L., Almeida M.S.S., Almeida M.C.F. (2012). Centrifuge investigation of the load transfer mechanism above rigid inclusions. The. 2nd European conference on Physical Modelling in Geotechnics. Delft.
- Brinkgreve R.B.J., Vermeer P.A. (2003). Plaxis v8, manuel de référence. Delft University of Technology & Plaxis BV, Delft, Pays-Bas, 200 pages.
- Demerdash M.A. (1996). An experimental study of piled embankments incorporating geosynthetic basal reinforcement. University of Newcastle-upon-Tyne
- Duncan J.M., Chang C.Y. (1970). Non linear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* (5), 1629–1653.
- Dupla J.-C., Andria-Ntoanina I., Canou J. (2008). Caractérisation mécanique à l'appareil triaxial du mélange de sable d'Hostun utilisé en centrifugeuse en tant que matelas de transfert de charge. A.S.I.Ri. Thème 3 : Essais de laboratoire et en centrifugeuse. Marne-La-Vallée: CERMES.
- Franke E., Muth G. (1985). Scale effect in 1 g model tests on horizontally loaded piles. *Proceedings of the 11th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. (2), 1011 - 1014.
- Glandy M., Frossard A. (2002). Justification d'une fondation superficielles sur un sol renforcé d'inclusions. *Annales du bâtiment et des travaux publics*, pp. 53-54.
- Le Hello B., Villard P. (2009). Embankments reinforced by piles and geosynthetics—Numerical and experimental studies dealing with the transfer of load on the soil embankment. *Engineering Geology* (1–2), pp. 78-91.
- Hewlett W.J., Randolph M.F. (1988). Analysis of piled embankments. *Ground Engineering* (21), 12 - 18
- IREX (2012). Recommandations for the design construction and control of rigid inclusion ground improvements. Recommandations Projet National. Paris: IREX. 316 pages
- Low B.K, Tang S.K, Choa V. (1994). Arching in Piled Embankments. *Journal of Geotechnical Engineering* (11), pp.1917 - 1938.
- Okyay U. (2010). Étude expérimentale et numérique des transferts de charge dans un massif renforcé par inclusions rigides. Applications à des cas de chargements statiques et dynamiques. Lyon: INSA.
- Rault G., Buttigie S., Thorel L., Derkx F., Okyay U., Six G., Neel A. (2010). Inclusions rigides en centrifugeuse : développement d'un dispositif expérimental à plateau mobile . In Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 721 -728