



Amélioration des Sols par Inclusions Rigides
Opération du Réseau Génie Civil et Urbain



PROJET NATIONAL ASIRI

Tranche 4

Modélisation continue des essais en centrifugeuse
dits de plateau mobile

U.S. OKYAY¹, D. DIAS²

1 - Entreprise PINTO, Fougères

2 - Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie de l'Environnement, INSA de Lyon

06 Août 2010

A.S.I.RI / FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : A.S.I.RI. – TRANCHE 4 – THEME 4 : RAPPORT FINAL
RAPPORT N° :
DATE D'ÉTABLISSEMENT : MARS 2010
AUTEURS : OKYAY, DIAS
ORGANISMES CHARGES DE L'ACTION : INSA DE LYON
THEME DE RATTACHEMENT : 4
LETTRE DE COMMANDE : LC10 ASI 101

SOMMAIRE

1.1	Introduction	4
1.2	Caractéristiques des modèles numériques	4
1.2.1	Présentation du modèle	4
1.3	Propriétés des matériaux.....	5
1.3.1	Caractéristiques du matelas pulvérulents.....	5
1.3.2	Caractéristiques des matelas cohérents	6
1.3.3	Caractéristiques de l'inclusion rigide, du plateau mobile et du dallage.....	7
1.3.4	Caractéristiques des interfaces	8
1.4	Phasage des calculs.....	8
1.5	Comparaison des résultats expérimentaux et numériques.....	8
1.5.1	Matelas pulvérulents – cas du remblai	8
1.5.2	Matelas pulvérulents – cas du dallage.....	11
1.5.3	Matelas cohérents	13
1.5.4	Cas du sol compressible.....	14
1.5.5	Passage du modèle au prototype	15
1.6	Conclusions	17

1 ESSAIS EN CENTRIFUGEUSE AVEC UN PLATEAU MOBILE

1.1 Introduction

Dans le domaine de la géotechnique, la modélisation physique en centrifugeuse et la modélisation numérique sont des outils très intéressants. La confrontation entre les modèles physiques et numériques permet de mieux comprendre et de mieux visualiser les mécanismes en jeu. Les modèles numériques peuvent être validés par les essais physiques et permettre une extension paramétrique des essais physiques.

Les essais en centrifugeuse ont permis d'étudier les mécanismes de transfert des charges dans des matelas pulvérulents et cohérents. L'influence des paramètres géométriques et physiques sur ces mécanismes de transfert des charges ont été mis en évidence.

Dans cette partie de l'étude, des modèles numériques ont été développés afin de représenter les modèles physiques et d'approfondir cette étude avec une simulation à l'échelle du prototype. Des modélisations numériques bidimensionnelles axisymétriques en milieu continu ont été effectuées à l'aide du logiciel de calcul Plaxis^{2D}. Une modélisation s'appuyant sur une caractérisation a permis de déterminer les paramètres géomécaniques des différents matériaux en jeu à partir d'essais triaxiaux. Ensuite les résultats numériques et expérimentaux ont été comparés en termes d'efforts en tête de l'inclusion rigide.

1.2 Caractéristiques des modèles numériques

1.2.1 Présentation du modèle

Le modèle numérique mis en œuvre est un modèle bidimensionnel axisymétrique centré autour d'une inclusion. Compte tenu de la géométrie et du chargement appliqué, une cellule élémentaire axisymétrique avec un rayon équivalent à la maille carrée est utilisée. Le rayon du modèle varie en fonction de différents taux de recouvrement. Les déplacements horizontaux au niveau des faces latérales sont bloqués horizontalement de même que les déplacements verticaux à la base de l'inclusion rigide.

Le matelas, la tête de l'inclusion rigide et le dallage sont représentés par des éléments volumiques. Le plateau mobile, constitué d'un élément plaque, supporte le matelas. Les interfaces de type Mohr-Coulomb sont placés sur les éléments qui sont en contact avec le matelas. La charge surfacique est appliquée directement sur le matelas (cas du remblai) ou sur le dallage (cas du dallage). Le tassement du sol est représenté par le déplacement vertical du plateau mobile. De ce fait, le plateau mobile est soumis à des déplacements imposés. La Figure 1 présente les éléments qui constituent les modèles numériques.

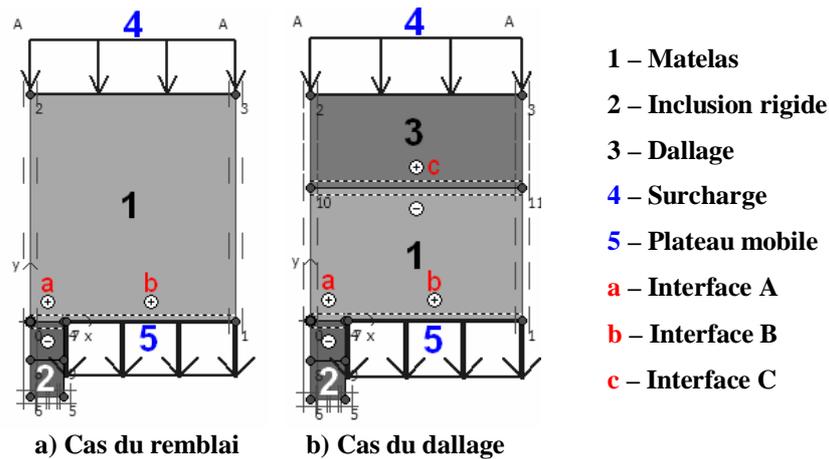


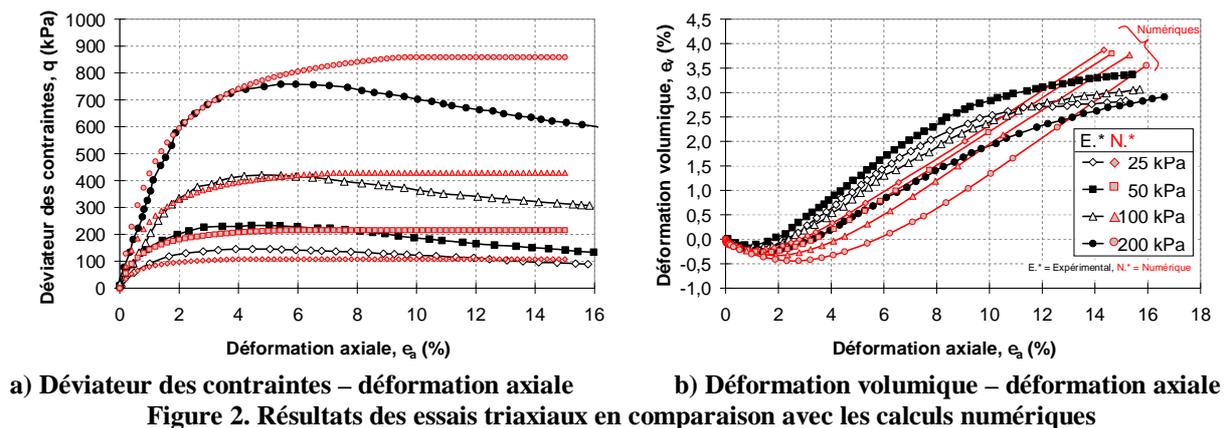
Figure 1. Schéma représentative des modèles numériques

Les modèles numériques simulent les modèles physiques en centrifugeuse pour un niveau d'accélération égal à 12xg et 20xg.

1.3 Propriétés des matériaux

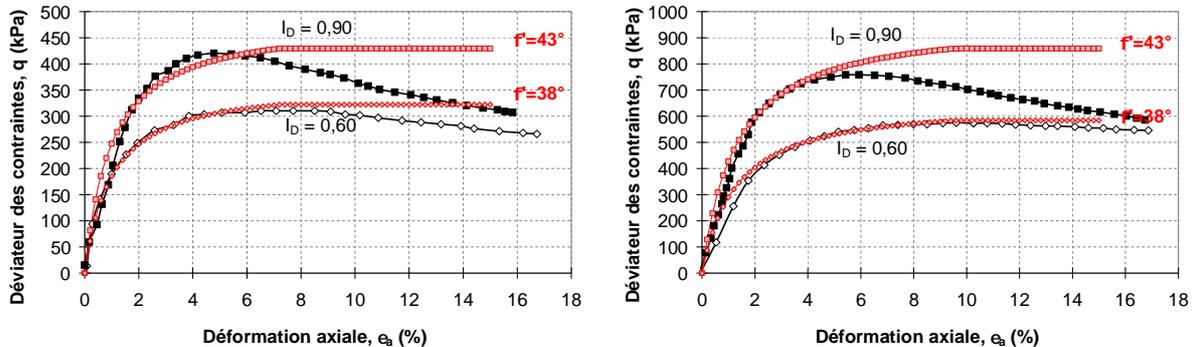
1.3.1 Caractéristiques du matelas pulvérulents

Le matelas de transfert des charges utilisé dans les essais en centrifugeuse est constitué d'un mélange de sables d'Hostun. Une étude paramétrique sur les caractéristiques des matériaux utilisés pour les essais en centrifugeuse a été effectuée afin de définir le jeu de paramètres approprié à ces matériaux. Les paramètres obtenus sont par la suite utilisés pour modéliser numériquement ces essais avec le modèle Hardening Soil (HS). La Figure 2 compare les résultats des essais triaxiaux avec les calculs numériques pour un indice de densité égal à 0,90. Les matelas testés en centrifugeuse ont un indice de densité égal à 0,85.



En dessous de 4% de déformation axiale, on observe une bonne concordance entre les essais en laboratoire et leurs simulations numériques. Au-delà de ce niveau de déformation, les modèles numériques ont tendance à surestimer la résistance mécanique du matériau. Le calage des paramètres a été effectué au pic du déviateur des contraintes. L'angle de frottement au pic a une valeur de 43°. En conséquence on observe un comportement représentatif sur la gamme de déformations 0-4% et moins représentatif pour des déformations plus importantes.

L'influence de l'indice de densité sur la résistance mécanique du mélange du sable est présentée à la Figure 3. L'angle de frottement du mélange dense est égal à 43° . Les calculs numériques représentent le comportement du sable dense pour un niveau de déformation inférieur à 4%. Pour le même sable moyennement dense ($I_D = 0,6$) l'angle de frottement critique est égal à 38° . Pour tous les niveaux de déformation, les modèles numériques représentent correctement le comportement mécanique du sable moyennement dense.



a) Déviateur des contraintes – déformation axiale ($\sigma'_3=100$ kPa) b) Déviateur des contraintes – déformation axiale ($\sigma'_3=200$ kPa)
Figure 3. Confrontation des résultats numériques avec des résultats expérimentaux – Influence de l'indice de densité du mélange

Les caractéristiques mécaniques retenues pour les modèles numériques sont fortement sensibles à la densité du mélange et au niveau de déformations.

Dans les essais en centrifugeuse, la descente verticale du plateau mobile provoque un relâchement du matériau et l'indice de densité diminue. Au cours d'un essai en centrifugeuse, les caractéristiques mécaniques du mélange de sable évoluent. Les calculs numériques ont été menés avec des caractéristiques mécaniques obtenues d'après les essais triaxiaux pour le sable ayant un indice de densité égal à 0,90. Ces valeurs correspondent parfaitement au comportement initial du matelas pour la gamme de déformation étudiée. Les paramètres utilisés pour les calculs numériques sont présentés ci-dessous (Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques du mélange de sable utilisé pour le matelas ($I_D = 0,90$)

Paramètres de rupture de type Mohr-Coulomb		Sable de Hostun	
Cohésion effective	C'	kPa	0,1
Angle de frottement	ϕ'	$^\circ$	43
Angle de dilatance	ψ	$^\circ$	9
Paramètres de rigidité			
Module sécant	E_{50}^{ref}	MPa	28
Module tangent	E_{oed}^{ref}	MPa	31,2
Module chargement/déchargement	E_{ur}^{ref}	MPa	162,5
Puissance du niveau de contrainte	m		0,6
Coefficient de Poisson	ν		0,3
Niveau de contrainte référence	p^{ref}	kPa	100

1.3.2 Caractéristiques des matelas cohérents

Suite à une campagne d'essai de caractérisation sur les limons traités à la chaux ou/et au ciment, 2 formules de traitement ont été retenues pour les essais en centrifugeuse. Des essais

triaxiaux ont été effectués pour les éprouvettes des sols traités qui sont fabriquées suivant la même procédure que les galettes de sol traité.

On observe un comportement linéaire dans la partie élastique des courbes de contrainte – déformation. L'écart entre le module tangent et sécant de chaque éprouvette est inférieur à 5%. Une loi de comportement élastique parfaitement plastique avec un critère de rupture de type Mohr-Coulomb a été retenue. On notera cependant qu'au delà de 4% de déformation pour le limon traité à la chaux et 1,5% pour le limon traité au ciment que cette loi n'est plus adéquate.

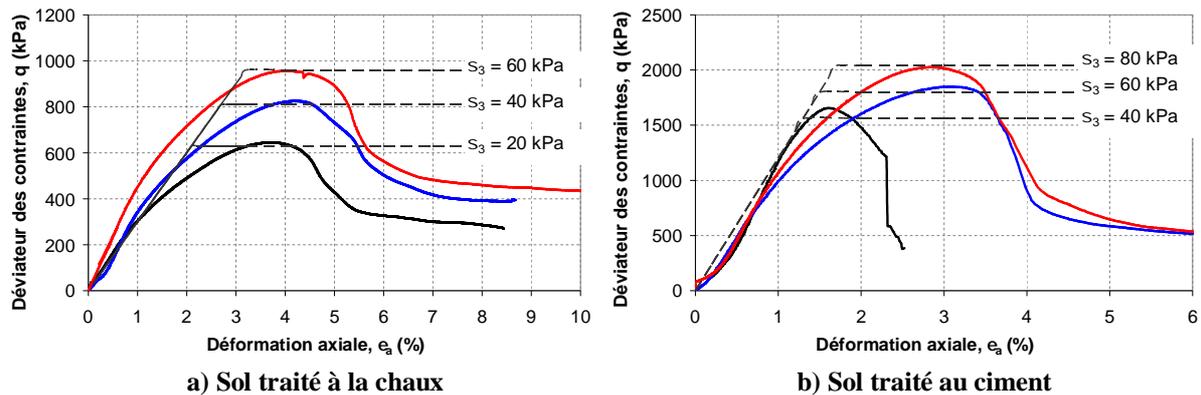


Figure 4. Résultats des essais triaxiaux en comparaison avec les calculs numériques

Les caractéristiques mécaniques obtenues d'après les essais triaxiaux pour les 2 formules de traitement sont présentées ci-dessous (Tableau 2).

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques du limon traité à la chaux et au ciment

Paramètres de rupture de type Mohr-Coulomb			Chaux	Ciment
Cohésion effective	c'	kPa	90	280
Angle de frottement	ϕ'	°	45	49
Angle de dilataance	ψ	°	-	-
Paramètres de rigidité				
Module d'Young	E	MPa	30	120
Coefficient de Poisson	ν		0,27	0,22

1.3.3 Caractéristiques de l'inclusion rigide, du plateau mobile et du dallage

Seule la tête de l'inclusion rigide est simulée dans les modèles numériques. Elle mesure 40 mm en hauteur et 25 mm en diamètre. Le plateau mobile est représenté par un élément de type plaque. Ce dernier est en acier et les paramètres du plateau mobile sont la rigidité de flexion EI et la raideur axiale EA avec E est le module d'élasticité du matériau, I est le moment d'inertie (moment quadratique) d'une section rectangulaire et A l'aire de la section. Le module d'élasticité des éléments en acier est égal à 210 GPa avec un coefficient de Poisson de 0,2.

Le dallage est représenté par des éléments volumiques. Il est composé d'une mousse polymère rigide. Les caractéristiques issues des données du fabricant sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 3. Caractéristiques du dallage

Masse volumique, ρ	50 kg/m ³
Module de compression, K	50 MPa
Module de traction, E	55 MPa
Module de cisaillement, G	20 MPa

1.3.4 Caractéristiques des interfaces

Les interfaces de type Mohr-Coulomb sont placées sur tous les éléments qui sont en contact avec le matelas. L'angle de frottement du matelas est réduit de 50% pour toutes les interfaces. Concernant l'interface entre le matelas et le plateau mobile, un module de Young faible (10 kPa) est attribué à l'interface. Cette réduction est nécessaire afin d'empêcher un développement des contraintes de traction qui peuvent être induites dans le matelas par le déplacement du plateau mobile.

1.4 Phasage des calculs

Les calculs numériques ont été effectués avec le même phasage que les essais physiques. Les calculs numériques ont été menés avec le phasage suivant ;

- **Phase 1** Mise en place des divers éléments, des interfaces et initialisation des contraintes
- **Phase 2** Augmentation de l'accélération verticale
- **Phase 3** Application de la charge surfacique
- **Phase 4** Descente du plateau mobile

1.5 Comparaison des résultats expérimentaux et numériques

1.5.1 Matelas pulvérulents – cas du remblai

Certains essais représentatifs ont été étudiés dans le cas du remblai. Les résultats des essais expérimentaux ont été comparés avec les résultats numériques. Les résultats sont présentés en termes d'effort moyen en tête des inclusions rigides et de déplacement vertical du plateau mobile. Afin de faciliter la confrontation entre les modèles physiques et numériques, les résultats sont présentés à l'échelle des modèles. La Figure 5 présente la confrontation entre le calcul numérique et les résultats expérimentaux pour des taux de recouvrement de 4,91% et 2,45%. Les résultats numériques sont en parfaite concordance avec les résultats expérimentaux. Les calculs numériques reproduisent avec précision l'évolution des efforts en tête des inclusions rigides en fonction du déplacement vertical du plateau mobile.

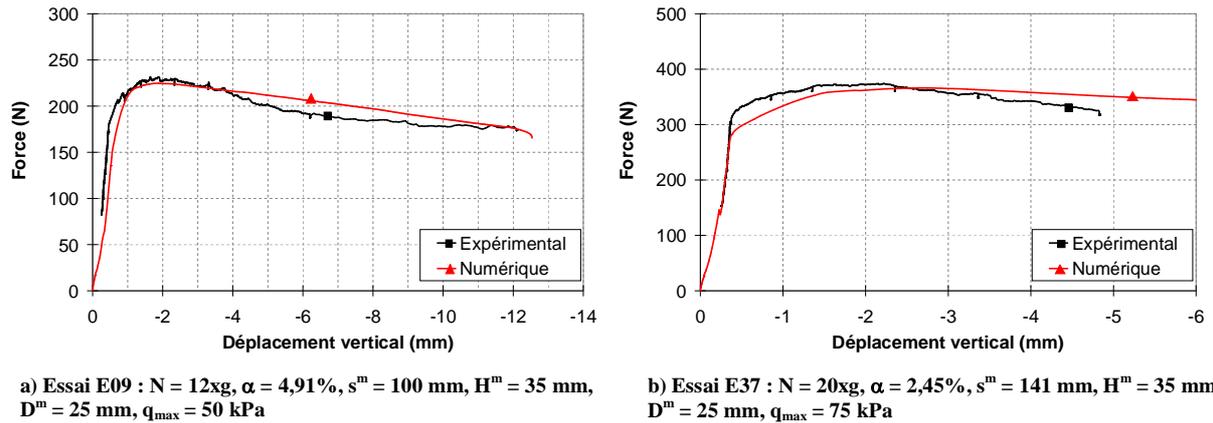
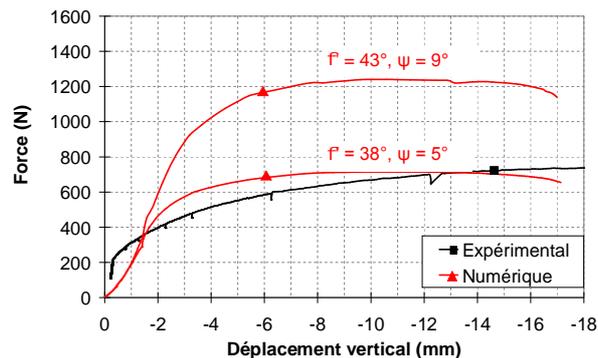


Figure 5. Confrontation entre les résultats numériques et expérimentaux – cas du remblai

Les calculs numériques ont été effectués pour de nombreuses configurations testées en centrifugeuse. Les résultats confirment que le modèle numérique retenu, le modèle de comportement et les paramètres mécaniques du matelas permettent de valider le processus mis en œuvre pour simuler les essais en centrifugeuse. Bien que les modèles numériques permettent d'obtenir des résultats cohérents pour des taux de recouvrements élevés (4,91% et 2,45%), ils surestiment les valeurs d'effort en tête des inclusions rigides pour un taux de recouvrement faible (1,23%).

Une confrontation pour le taux de recouvrement 1,23% est présentée à la Figure 6. Dans un premier temps, la simulation numérique est effectuée avec les caractéristiques mécaniques du mélange de sable très dense. L'angle de frottement est de 43° et l'angle de dilatance est de 9° . L'effort maximal récupéré par la tête de l'inclusion rigide est environ 2 fois plus important que celui mesuré pendant l'essai. Un nouveau calcul utilisant les caractéristiques mécaniques du mélange moyennement dense a été réalisé. Dans ce cas, une bonne concordance entre les résultats numériques et expérimentaux a été obtenue. Ce phénomène est dû au changement d'état (passage d'un état dense à moyennement dense) lors de la descente du plateau mobile et confirme l'importance de la prise en compte de l'angle de frottement critique dans les simulations (notamment lorsque le taux de recouvrement est faible).



Essai E23 : $N = 12xg$, $\alpha = 1,23\%$, $s^m = 200$ mm, $H^m = 105$ mm, $D^m = 25$ mm, $q_{max} = 49$ kPa

Figure 6. Influence des paramètres à la rupture du matelas sur le transfert des charges - $\alpha = 1,23\%$

Les confrontations entre les essais expérimentaux et les calculs numériques ont été effectuées pour de nombreux cas. Le Tableau 4 présente les valeurs des efforts maximaux obtenues lors de la descente du plateau mobile. Les valeurs expérimentales et numériques sont comparées et

l'écart entre les résultats est indiqué. L'écart entre les résultats est inférieur à 10% pour tous les calculs avec des taux de recouvrement de 4,91% et de 2,45%.

Pour un taux de recouvrement de 1,23%, l'écart entre les résultats des calculs numériques et des essais expérimentaux est supérieur à 45% (E23 et E24). L'ajustement de ces modèles avec les caractéristiques mécaniques du mélange ayant un indice de densité égal à 0,60, permet de réduire cet écart en dessous de 10% (E23* et E24*).

Tableau 4. Résumé des calculs numériques en confrontation avec les résultats expérimentaux

	Expérimental kN	Numérique kN	Ecart %	Caractéristiques du modèle
E01	680	645	-5	N = 20xg, $\alpha = 4,91\%$, $s^m = 100$ mm, $H^m = 90$ mm, $q_{max} = 50$ kPa
E02	500	538	8	N = 12xg, $\alpha = 4,91\%$, $s^m = 100$ mm, $H^m = 90$ mm, $q_{max} = 50$ kPa
E09	240	238	-1	N = 12xg, $\alpha = 4,91\%$, $s^m = 100$ mm, $H^m = 35$ mm, $q_{max} = 50$ kPa
E36	521	539	3	N = 20xg, $\alpha = 2,45\%$, $s^m = 141$ mm, $H^m = 50$ mm, $q_{max} = 80$ kPa
E37	376	372	-1	N = 20xg, $\alpha = 2,45\%$, $s^m = 141$ mm, $H^m = 35$ mm, $q_{max} = 75$ kPa
E23	720	1210	68	N = 12xg, $\alpha = 1,23\%$, $s^m = 200$ mm, $H^m = 105$ mm, $q_{max} = 49$ kPa
E24	1110	1623	46	N = 20xg, $\alpha = 1,23\%$, $s^m = 200$ mm, $H^m = 105$ mm, $q_{max} = 85$ kPa
E23*	720	768	5	E23 ajusté
E24*	1110	1208	9	E24 ajusté

Les résultats des calculs numériques sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Le processus de simulation numérique est donc validé par les résultats provenant du modèle physique.

- Transfert des charges et comportement à la rupture du matelas

La Figure 7 permet de comparer l'influence de la hauteur du matelas sur les mécanismes de transfert des charges dans le cas du remblai. Les essais à 12xg sont présentés. La surcharge est de 50 kPa. Pour un taux de recouvrement de 4,91%, on compare deux hauteurs du matelas. Pour le rapport H/s supérieur à la moitié de l'espacement entre les inclusions rigides, les zones plastifiées disparaissent à partir de la moitié de la hauteur du matelas. En dessous de cette hauteur, on observe une plastification importante dans le matelas. La contrainte principale en tête de l'inclusion rigide est égale à 2 MPa.

Pour une hauteur de matelas faible ($H/s = 0,35$), les zones plastifiées sont concentrées au droit de la tête de l'inclusion rigide. Le matelas est moins plastifié car la contrainte principale en tête de l'inclusion rigide ne dépasse pas 0,8 MPa. Dans la partie courante, à l'inter-maille, aucune zone plastique n'apparaît.

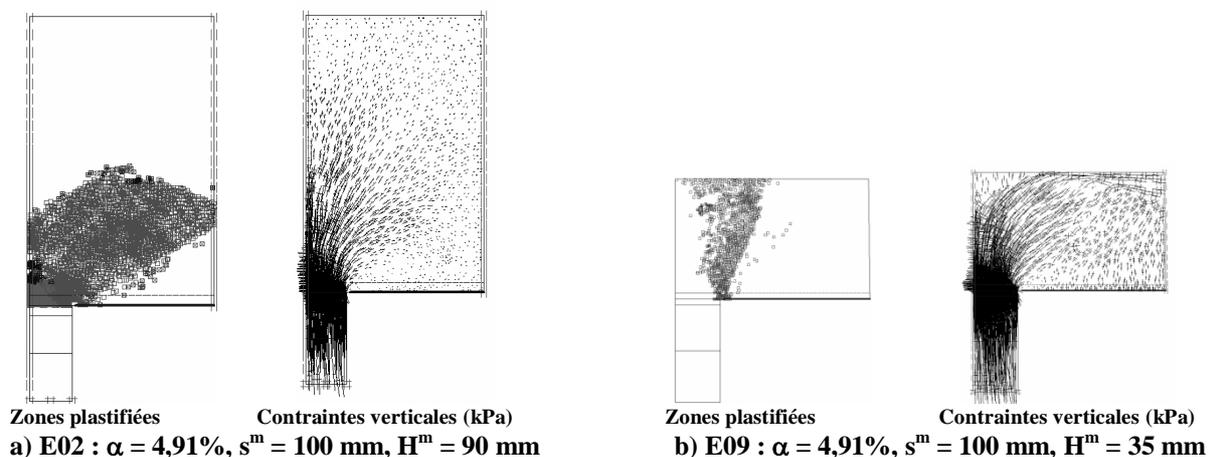
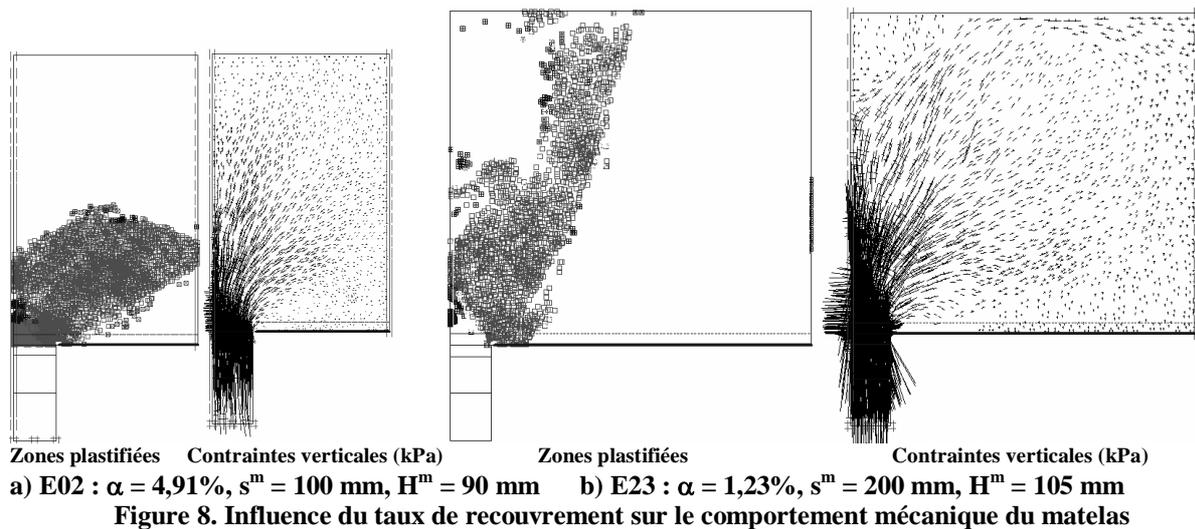


Figure 7. Influence de la hauteur du matelas sur le comportement mécanique du matelas

La deuxième comparaison met en évidence l'influence de l'espacement entre les inclusions rigides sur les mécanismes de transfert des charges. La Figure 8 présente 2 cas avec 2 taux de recouvrements. La hauteur du matelas est supérieure à la moitié de l'espacement pour les deux cas. La surcharge totale sur le modèle E23 est 4 fois plus importante que celle du modèle E02. La contrainte maximale est de 2 MPa pour le modèle E02 et de 3,4 MPa pour le modèle E23. Bien que la hauteur du matelas soit supérieure à la moitié de l'espacement, les voûtes ne sont pas formées pour le modèle E23 (Figure 8b). Les zones plastiques sont concentrées au droit de la tête de l'inclusion rigide et se propagent jusqu'à la surface du matelas.



1.5.2 Matelas pulvérulents – cas du dallage

De la même manière que précédemment, on présente une confrontation entre les résultats expérimentaux et numériques dans le cas du dallage. Les résultats numériques ont tendance à surestimer les efforts en tête de l'inclusion rigide. Pour un taux de recouvrement de 4,91%, l'écart entre les résultats numériques et expérimentaux est inférieur à 5% au palier. Par contre, cet écart est plus important lorsque le taux de recouvrement est de 2,45%. Les résultats mettent en évidence que dans le cas du dallage, l'indice de densité du matelas est encore plus sensible aux déplacements du plateau mobile que dans le cas du remblai. Lorsque le plateau mobile se déplace, le dallage ne suit pas les déplacements de ce dernier. Des zones de déchargement apparaissent alors dans le matelas.

Dans le cas du remblai, le chargement imposé est une pression uniforme qui confine le matelas de manière plus régulière. A partir des observations expérimentales et numériques, on peut conclure que pour un même niveau de chargement l'état de densité induit est différent. Le relâchement entre les particules de sable est plus important dans le cas du dallage que dans le cas du remblai.

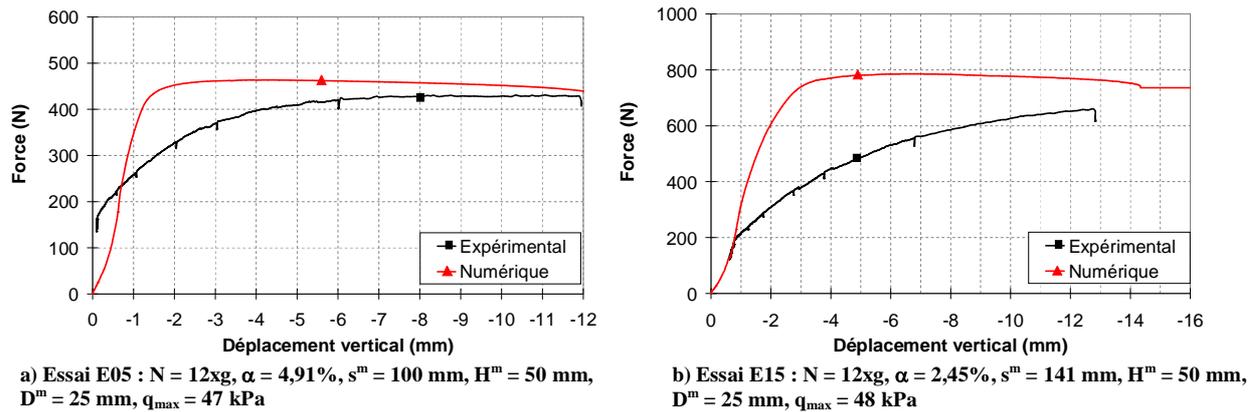


Figure 9. Confrontation entre les résultats numériques et expérimentaux – cas du dallage

Pour un taux de recouvrement de 1,23%, l'influence de l'indice de densité et des caractéristiques mécaniques du matelas sur les mécanismes de transfert des charges est encore plus importante. On observe que si l'on attribue les caractéristiques mécaniques du mélange de sable moyennement dense ($ID = 0,60$), les résultats numériques correspondent convenablement aux résultats expérimentaux. Cependant les caractéristiques mécaniques du sable au début de l'essai correspondent à celles du mélange de sable dense. Cette observation montre qu'il est important de prendre en compte l'état critique des sols afin de simuler avec précision le comportement mécanique du matelas et les transferts de charges.

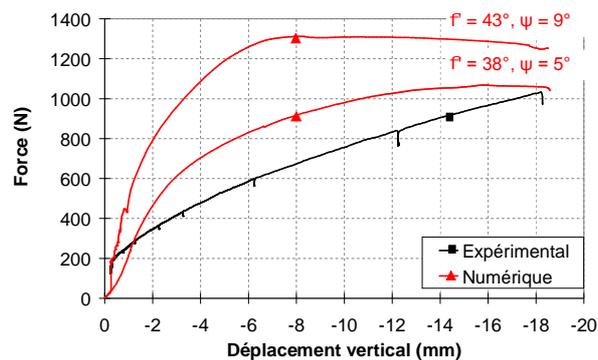


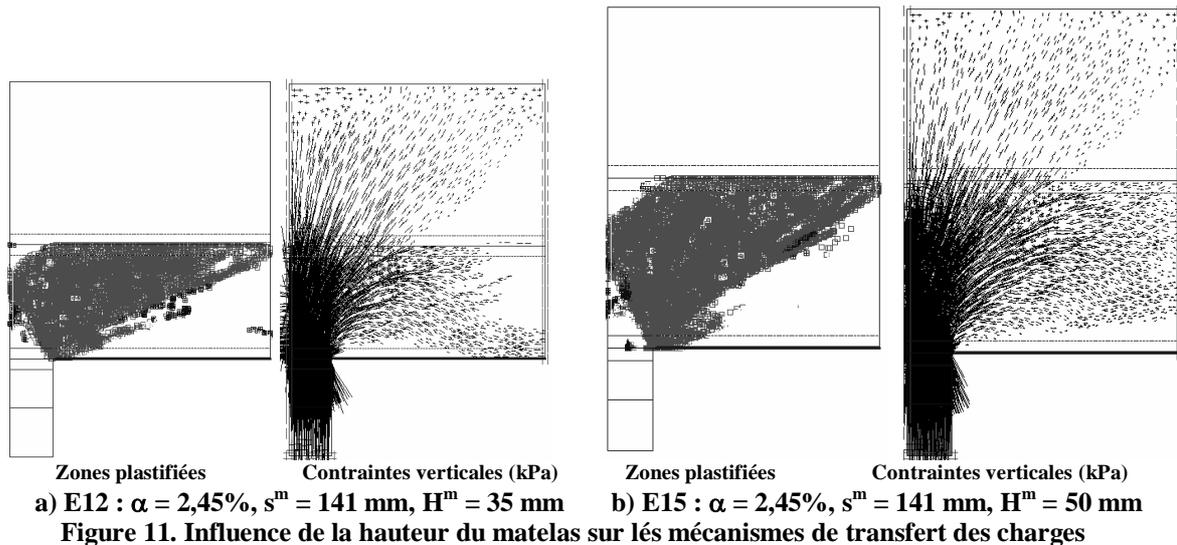
Figure 10. Influence des paramètres à la rupture du matelas sur le transfert des charges - $\alpha = 1,23\%$

Les efforts maximaux en tête de l'inclusion rigide sont comparés au Tableau 5. Pour les taux de recouvrements 4,91% et de 2,45%, les calculs numériques permettent d'estimer l'effort maximal en tête d'inclusion rigide avec un écart inférieur à 14%. Cet écart est plus important pour le taux de recouvrement 1,23%. Les calculs numériques surestiment les efforts dans ce dernier cas. Cette observation est conforme à ce qui est observé dans le cas du remblai.

Tableau 5. Résumé des calculs numériques en confrontation avec les résultats expérimentaux

	Expérimental	Numérique	Ecart	Caractéristiques du modèle
	kN	kN	%	
E03	452	448	-1	$N = 12xg$, $\alpha = 4,91\%$, $s^m = 100$ mm, $H^m = 35$ mm, $q_{max} = 50$ kPa
E05	432	443	3	$N = 12xg$, $\alpha = 4,91\%$, $s^m = 100$ mm, $H^m = 50$ mm, $q_{max} = 47$ kPa
E12	782	721	-8	$N = 12xg$, $\alpha = 2,45\%$, $s^m = 141$ mm, $H^m = 35$ mm, $q_{max} = 47$ kPa
E15	680	774	14	$N = 12xg$, $\alpha = 2,45\%$, $s^m = 141$ mm, $H^m = 50$ mm, $q_{max} = 48$ kPa
E25	621	1080	74	$N = 12xg$, $\alpha = 1,23\%$, $s^m = 200$ mm, $H^m = 35$ mm, $q_{max} = 47$ kPa
E27	1025	1260	23	$N = 12xg$, $\alpha = 1,23\%$, $s^m = 200$ mm, $H^m = 50$ mm, $q_{max} = 47$ kPa

La Figure 11 compare 2 essais afin de montrer l'influence de la hauteur du matelas sur les mécanismes de transfert des charges dans le cas du dallage. Les zones plastifiées ainsi que les diagrammes des contraintes principales sont présentés. Deux hauteurs de matelas ont été comparées avec les modèles numériques. On obtient une contrainte maximale de 4,2 MPa pour le modèle E12. Elle est de 3,4 MPa pour le modèle E15. Si la hauteur du matelas augmente, la contrainte maximale sur la tête de l'inclusion rigide diminue. Ce phénomène est lié à la participation du dallage sur les mécanismes de transfert des charges. Sa participation est plus importante lorsque la hauteur du matelas est faible. Le dallage permet de concentrer les contraintes au droit de la tête de l'inclusion rigide. Les contraintes se transmettent dans le matelas par compression.



Les zones plastiques sont concentrées entre la tête de l'inclusion rigide et le dallage. Leur évolution est identique pour les 2 modèles étudiés.

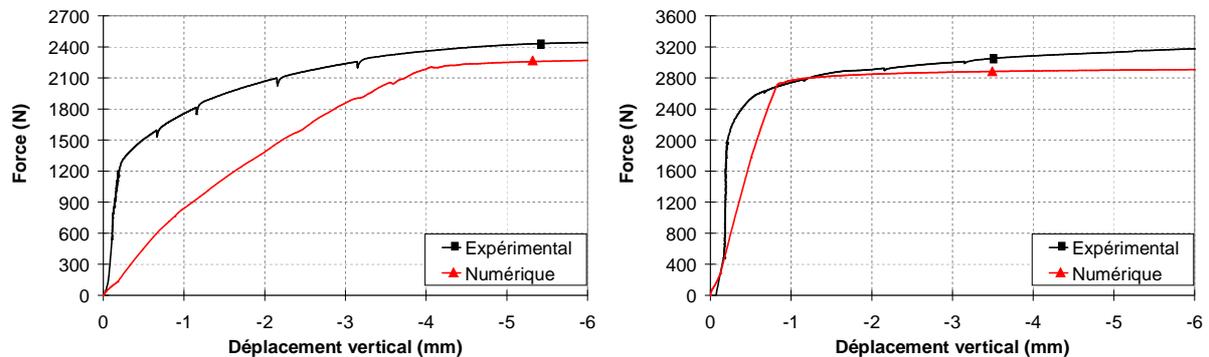
1.5.3 Matelas cohérents

Les matelas cohérents ont été étudiés numériquement de la même manière que les matelas pulvérulents. Les résultats numériques sont comparés avec les résultats expérimentaux. Le comportement mécanique des 2 types de traitement pour 2 taux de recouvrements et 2 hauteurs de matelas est étudié. Les résultats numériques sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Ci-après on présente deux essais classiques qui permettent de distinguer le comportement mécanique des 2 types de matelas. La différence de comportement entre un matelas traité à la chaux et un matelas traité au ciment est mise en évidence grâce à la modélisation numérique (Figure 12).

Pour le matelas traité à la chaux, la force maximale en tête de l'inclusion rigide est atteinte progressivement avec la descente du plateau mobile. En fonction de la configuration géométrique de la cellule élémentaire, le déplacement vertical du plateau mobile peut varier entre 1 et 4 mm pour obtenir l'effort maximal sur la tête de l'inclusion rigide. Le traitement du sol uniquement à la chaux génère un comportement souple pour le matelas de transfert des charges. Cette souplesse permet de transférer une partie de la charge sur le sol compressible.

Quant aux matelas constitués de limon traité au ciment, la force maximale en tête de l'inclusion rigide est atteinte assez rapidement lorsque le plateau descend (déplacement inférieur à 1 mm à l'échelle du modèle). Cette force reste constante pour des niveaux de

tassement élevés. L'ajout du ciment dans le sol permet d'avoir un matériau rigide et résistant. Lorsque les charges sont dans les limites admissibles (inférieures à la résistance mécanique du matelas) le matelas se comporte comme une dalle posée sur les têtes des inclusions rigides.



a) Essai E31 – matelas traité à la chaux

b) Essai E34 – matelas traité au ciment

Figure 12. $N = 12xg$, $\alpha = 1,23\%$, $s^m = 200$ mm, $H^m = 50$ mm, $D^m = 25$ mm, $q_{max} = 47$ kPa

Avec les modèles numériques, l'écart entre l'effort maximal numérique et la valeur expérimentale est d'environ 10%.

Pour les mêmes essais étudiés ci-avant, les diagrammes de contraintes principales et les zones de plastification sont présentées à la Figure 13. Les zones sombres représentent des points plastifiés dans le matelas. On observe une plastification plus importante dans le matelas traité à la chaux que dans le matelas traité au ciment. Avec les simulations numériques, un angle compris entre 40° et 65° peut être mesuré avec le plan horizontal. Cet angle est compris entre 25° et 55° pour les essais expérimentaux.

Les contraintes principales se propagent dans le matelas et dans le dallage. Elles sont concentrées autour des têtes d'inclusion rigide. Cette concentration est plus importante pour le matelas traité au ciment qu'à la chaux. En comparaison avec les matériaux pulvérulents, cette concentration des contraintes au droit de l'inclusion rigide est plus importante dans le cas du sol traité.

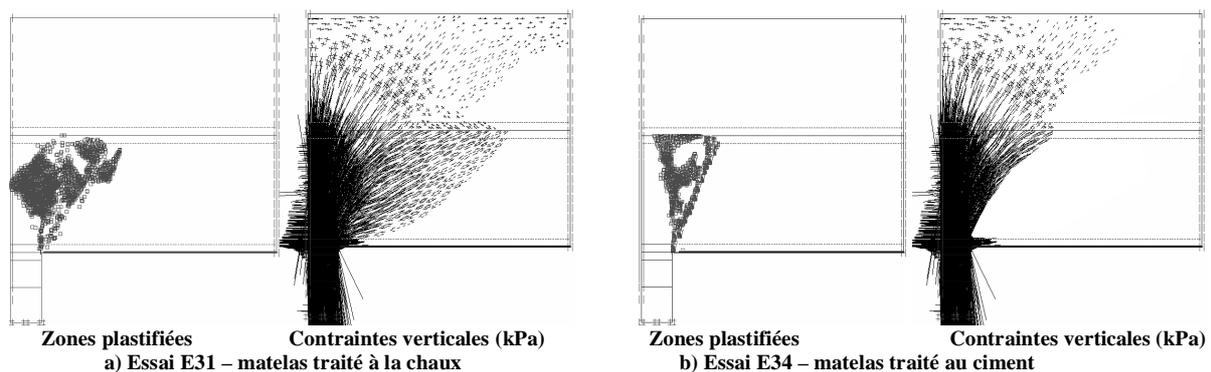


Figure 13. $N = 12xg$, $\alpha = 1,23\%$, $s^m = 200$ mm, $H^m = 50$ mm, $D^m = 25$ mm, $q_{max} = 47$ kPa

1.5.4 Cas du sol compressible

Les essais en centrifugeuse étudient les mécanismes de transfert des charges dans le matelas sans prendre en compte la présence du sol compressible. La surcharge reste constante et les

tassements du sol sont imposés par le déplacement vertical du plateau. Néanmoins dans les conditions réelles, le sol tasse sous l'action de la surcharge. L'essai E05 en centrifugeuse a été simulé avec un sol fictif à la place du plateau mobile. Ce dernier a un comportement élastique linéaire. Des modules d'élasticité fictifs ont été attribués au sol compressible. Ces modules ne représentent pas la réalité mais permettent d'obtenir des tassements afin de déclencher les mécanismes de transfert des charges dans le matelas. La Figure 14 présente un schéma du modèle numérique comportant une couche de sol compressible.

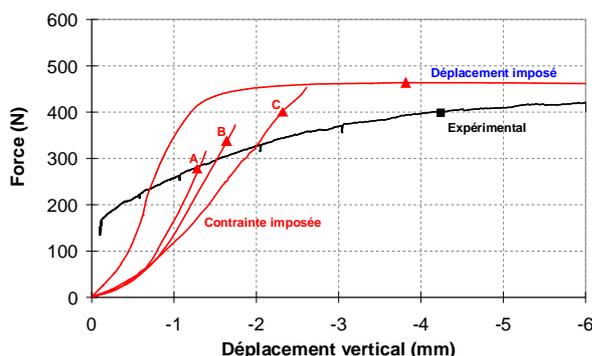


Figure 14. Schéma représentative du modèle avec un sol compressible

Le phasage des simulations est proche de celui adopté dans l'essai expérimental. La seule différence provient des tassements du sol. Au lieu d'appliquer un tassement imposé sous le matelas, la surcharge induit des tassements au sol compressible.

La Figure 15 présente les courbes expérimentales et numériques pour l'essai E05. Les efforts en tête d'inclusion rigide sont présentés en fonction du déplacement vertical à l'inter-maille en dessous du matelas.

Le module d'élasticité du sol compressible représente une raideur statique sous le matelas. Si la raideur est importante (cas A), les contraintes dues à la surcharge diminuent en tête d'inclusion rigide. Si la raideur est faible (cas C) les contraintes se concentrent sur la tête de l'inclusion rigide et l'effort maximal s'approche du cas où le sol compressible est absent (déplacement imposé).

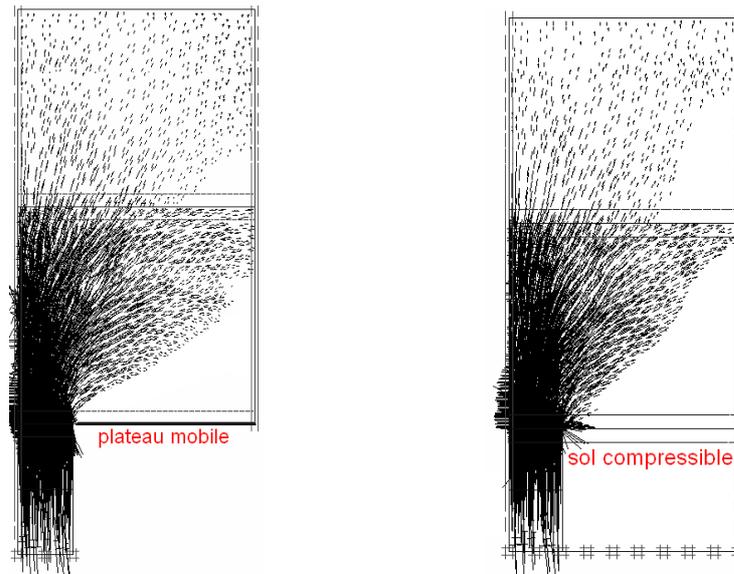


Modèle	Module	Effort
Contrainte imposée		
Cas A	200 MPa	315 N
Cas B	100 MPa	372 N
Cas C	50 MPa	453 N
Déplacement imposé		
Expérimental		421 N
Numérique		460 N

Essai E05 : $N = 12xg$, $\alpha = 4,91\%$, $s^m = 100 \text{ mm}$, $H^m = 50 \text{ mm}$, $D^m = 25 \text{ mm}$, $q_{\max} = 47 \text{ kPa}$

Figure 15. Modélisation numérique de l'essai E05 avec un sol compressible

La confrontation entre les modèles numériques montre que les essais en centrifugeuse correspondent à la réalité où le sol renforcé est très compressible. La Figure 16 présente les flux des contraintes principales pour 2 types de simulation (avec et sans sol compressible). Le mécanisme de transfert des charges dans le matelas est identique pour les deux types de simulation.

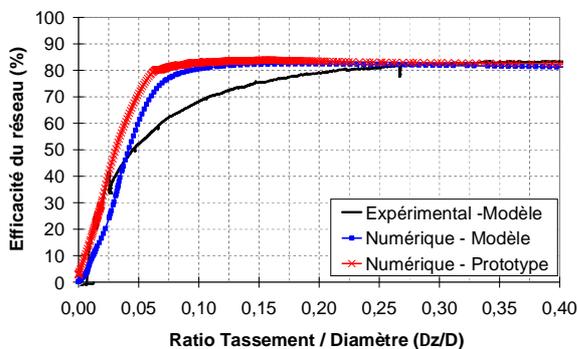


a) Modèle avec le plateau mobile b) Modèle avec le sol compressible (Cas C)
Figure 16. Flux des contraintes principales

La confrontation des mécanismes (plateau mobile et sol compressible) permet de montrer que les mêmes mécanismes de transfert de charge ont lieu au sein du matelas de transfert de charge.

1.5.5 Passage du modèle au prototype

Les résultats des calculs numériques présentés sont issus de la modélisation numérique des modèles réduits. Les valeurs d'accélération verticale correspondent à celles de chaque essai en centrifugeuse. Pour le modèle ou le prototype, si les lois de similitudes sont respectées, les résultats des essais et des calculs doivent être identiques. Avant d'étudier les inclusions rigides à l'échelle du prototype, une confrontation entre le modèle et le prototype est présentée à la Figure 17. L'essai E01 avec un matelas pulvérulent est simulé à l'échelle du modèle réduit et à l'échelle du prototype. Les résultats sont comparés en termes d'efficacité et de tassement adimensionnel. On observe une bonne concordance entre le modèle et le prototype. Les valeurs d'efficacité maximale est de 82% pour les modèles numériques et le modèle réduit en centrifugeuse.



	Modèle	Prototype
H	90 mm	1,80 m
s	100 mm	2 m
D	25 mm	0,5 m
α	4,91%	4,91%
q_{max}	50 kPa	50 kPa

Essai E01 : $N = 20xg$, $\alpha = 4,91\%$, $s^m = 100$ mm, $H^m = 90$ mm, $D^m = 25$ mm, $q_{max} = 50$ kPa

Figure 17. Comparaison entre modèle et prototype

Les confrontations entre les modèles numériques à l'échelle du modèle réduit et du prototype permettent de justifier la validité des paramètres utilisés dans les calculs numériques pour la représentation d'un cas réel à l'échelle du chantier.

1.6 Conclusions

La campagne d'essais triaxiaux menée sur le mélange du sable d'Hostun a permis de caractériser son comportement pour deux indices de densité différents. Une loi de comportement hyperbolique de type élasto-plastique avec un mécanisme d'écrouissage est adoptée pour la simulation du matelas pulvérulent (HSM). Elle permet de simuler le comportement des sables. Une première modélisation s'appuie sur une étude visant à déterminer les paramètres du modèle HSM à partir d'essais triaxiaux. Le modèle reproduit correctement le comportement du mélange de sable pour des niveaux de déformation inférieurs à 4%. Par contre ce modèle n'est pas capable de considérer le phénomène de radoucissement après pic des sables denses (évolution vers l'état critique).

Quant aux matériaux traités, les caractéristiques mécaniques obtenues par les essais triaxiaux, ont été utilisées avec un modèle élastique linéaire parfaitement plastique avec un critère de rupture de type Mohr-Coulomb. Bien que ce modèle ne reproduise pas la non linéarité de la partie élastique de la courbe contrainte – déformation, il est suffisant pour reproduire les mécanismes de transfert des charges dans le matelas traité.

La modélisation numérique des essais expérimentaux comportant un matelas de transfert de charge granulaire fait apparaître un comportement complexe qui dépend du niveau de déformation. L'indice de densité du matelas varie au cours de l'essai avec la descente du plateau mobile. Pour des taux de recouvrements élevés (4,91% et 2,45%) les simulations numériques estiment parfaitement le comportement mécanique du matelas. Néanmoins pour un taux de recouvrement moins important, les calculs numériques surestiment les efforts transmis sur les inclusions numériques. Etant donné que l'indice de densité du matelas est très sensible au niveau de déformation du plateau mobile, le comportement du matelas change très vite pour des taux de recouvrement faible. Les caractéristiques mécaniques diminuent progressivement et s'approchent de celles du sable moyennement dense dans ces conditions.

Une tentative d'ajustement des paramètres du modèle de HSM a été menée pour les essais à faible taux de recouvrement. Elle est basée sur l'utilisation des paramètres du mélange de sable moyennement dense. Cet ajustement permet de simuler le comportement mécanique du matelas pour des taux de recouvrement faibles.

Les simulations numériques des essais en centrifugeuse ont permis de valider le processus de simulation numérique mis en œuvre. L'importance de la prise en compte de la notion d'état critique pour simuler des matelas de transfert de charge granulaires a été montrée. L'utilisation d'un modèle de comportement plus évolué que HSM semble donc nécessaire pour une bonne simulation des transferts de charge dans les matelas granulaires.

Les confrontations entre les calculs numériques et les essais expérimentaux pour les matériaux traités montrent que les efforts obtenus par les calculs numériques sont environ 10% inférieurs à ceux des essais en centrifugeuse. Cet écart provient des limites du modèle de comportement adopté pour le matériau traité (pas de prise en compte des non-linéarités et du radoucissement) ; il reste acceptable pour l'analyse des résultats. Les résultats des calculs numériques mettent en évidence l'importance de la rigidité du matelas sur les mécanismes de

transfert des charges. Un comportement souple est obtenu dans le cas du matériau traité à la chaux. Les contraintes sont transmises vers la tête de l'inclusion rigide par compression et cisaillement. Le matelas se déforme lorsque le plateau mobile descend. Le sol traité au ciment, ayant une rigidité importante, ne se déforme pas lors de la descente du plateau. Le mécanisme de transfert des charges dominant dans le matelas est la compression entre la tête de l'inclusion rigide et le dallage. Pour ces deux types de matelas, la participation du dallage aux mécanismes de transfert des charges est importante.

La confrontation entre les modèles numériques montre que la modélisation avec un plateau mobile correspond à la réalité lorsque le sol renforcé est très compressible. La validité des calculs numériques à l'échelle réduite est justifiée avec une modélisation numérique à l'échelle du modèle. Les résultats montrent que les calculs numériques et les résultats numériques ne sont pas influencés par les règles de similitude.