

# **OPERATION DU RESEAU GENIE CIVIL & URBAIN**

# Essais de chargement à pression contrôlée sur le modèle physique 1g – Etude paramétrique

Octobre 2009

A.Q. DINH, J. CANOU, J.-C. DUPLA

UR Navier - CERMES (ENPC/LCPC)

Octobre 2009

# A.S.I.RI/FICHE SIGNALETIQUE

TITRE : Essais de chargement à pression contrôlée sur le modèle physique 1g – Etude paramétrique.

RAPPORT N°:

DATE D'ETABLISSEMENT : octobre 2009

AUTEUR(S) : Anh Quan DINH, Jean CANOU et Jean-Claude DUPLA

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : UR Navier-CERMES (ENPC/LCPC)

THEME DE RATTACHEMENT : Thème 3 : Essais de laboratoire

LETTRE DE COMMANDE : LC/08/ASI/63 (tranche 3)

Mots-clé : modèle physique, inclusion rigide, sol analogique, coefficient d'efficacité, matelas de transfert, sol compressible, modèle réduit.

#### **RESUME SYNTHETIQUE**

On présente dans ce rapport les résultats obtenus dans les essais à pression contrôlée réalisés sur le modèle physique 1g. Ces résultats ont permis, d'une part, de mettre en évidence les mécanismes de transfert de charge développés au sein du matelas et, d'autre part, d'étudier l'influence des principaux paramètres significatifs du problème : épaisseur du matelas, taux de recouvrement, diamètre moyen, granulométrie, rigidité du matériau constitutif du matelas, compressibilité et épaisseur du sol compressible.

L'influence des paramètres est étudiée sur les trois grandeurs suivantes : coefficient d'efficacité, tassement moyen et tassement différentiel de l'interface sol-matelas

#### ABSTRACT

This report presents the results of the pressure-controlled tests carried out on the 1g physical model. These results permit, on one hand, to understand the load transfer mechanisms occurring in a granular earth platform and on the second hand, to study the influence of key model parameters : thickness of the earth platform, percentage coverage of pile caps, mean diameter, size and rigidity of the materials of the earth platform, compressibility and thickness of the compressible soil.

The influence of these parameters is presented in terms of the three following points : efficacy coefficient, average settlement and differential settlement of the soil-matress interface.

# SOMMAIRE

INTRODUCTION	6
1 - MATERIAU CONSTITUTIF DU MATELAS	6
1.1 - Choix du matériau de référence	6
1.2 - Choix des trois autres matériaux	8
1.3 - Caractéristiques physiques des différents matériaux	9
1.3.1 - Matériau de référence M1	9
1.3.2 - Matériaux MB5/8 et MB10/16	9
1.3.3 - Matériau étalé M2	9
1.3.3.1 - Méthodologie	9
1.3.3.2 - Procédure de mélange	11
1.4 - Caractéristiques mécaniques	12
2 - RESULTATS D'ESSAIS TYPIQUES	13
2.1 - Cas du massif non renforcé	13
2.2 - Massif renforcé par une inclusion rigide : cas de référence	17
2.2.1 - Reprise de l'effort par l'inclusion rigide	18
2.2.2 - Tassements de l'interface sol/matelas	20
2.2.3 - Tassement de la surface du matelas	26
2.3 - Conclusions et remarques	28
3 - ETUDE DES PARAMETRES D'INFLUENCE	28
3.1 - Influence des paramètres géométriques	31
3.1.1 - Influence de l'épaisseur du matelas, $h_m$	31
3.1.1.1 - Influence de l'épaisseur du matelas sur le coeffic	cient
d'efficacité maximal $E_{e\!f\!f}^{\max}$	31
3.1.1.2 - Influence de l'épaisseur du matelas sur les tassements l'interface sol/matelas	35 de

<b>3.1.1.3</b> - Influence de $h_m$ sur le tassement de la surface du matelas	40
3.1.2 - Influence du taux de recouvrement, $\alpha$	42
3.1.2.1 - Influence de $\alpha$ sur le cœfficient d'efficacité $E_{e\!f\!f}^{\max}$	43
3.1.2.2 - Influence de $\alpha$ sur le tassement de l'interface sol/matelas	45
3.1.3 - Conclusions partielles	55
3.2 - Influence des paramètres liés au matelas	55
3.2.1 - Influence du diamètre des grains du matelas	55
3.2.2 - Influence de l'étalement granulométrique du matériau constit	utif
du matelas	57
3.2.3 - Influence de la rigidité	60
3.3 - Influence du sol analogique	65
3.3.1 - Influence de la compressibilité du sol analogique	66
3.3.2 - Influence de l'épaisseur du sol analogique, $h_s$	69
3.3.3 - Conclusions partielles	73
3.4 - Evolution du coefficient d'efficacité lors de phases de décharg	е –
recharge	73
CONCLUSIONS	75
REFERENCES	77

#### INTRODUCTION

Suite au programme d'essais de validation du dispositif, une campagne d'essais à pression contrôlée a été réalisée sur ce dispositif. L'objectif de ce programme est, d'une part, de mettre en évidence les mécanismes de transfert de charge qui se produisent au sein du matelas et, d'autre part, d'étudier l'influence des paramètres de base sur les comportements observés. Dans cette partie, on va, en particulier, présenter l'influence des paramètres suivants sur les résultats obtenus :

- Paramètres géométriques :
  - épaisseur du matelas,  $h_m$ ;
  - taux de recouvrement,  $\alpha$ .
- Paramètres caractérisant le matériau constitutif du matelas :
  - diamètre moyen du matériau constitutif du matelas,  $d_{50}$ ;
  - granulométrie du matériau constitutif du matelas ;
  - rigidité du matériau constitutif du matelas.
- Paramètres liés au sol analogique
  - compressibilité du sol analogique ;
  - épaisseur du sol analogique.

L'influence de ces paramètres sera évaluée à travers le coefficient d'efficacité  $E_{eff}$  et les tassements de l'interface sol analogique - matelas.

#### 1 - MATERIAU CONSTITUTIF DU MATELAS

On a retenu quatre types de matelas : gravier d'Hostun HN2/4 (M1), micro-ballast de coupure 5-8 mm (MB5/8), micro-ballast de coupure 10 - 16 mm (MB10/16), matériau mélangé (M2), dont un matériau de référence et trois autres matelas pour l'étude paramétrique.

## 1.1 - Choix du matériau de référence

Comme on l'a vu précédemment, le mécanisme de transfert de charge qui se produit au sein du matelas dépend non seulement de la géométrie, de la nature physico-chimique mais aussi de la structure et des paramètres d'état du matériau (état de compacité, etc). Afin de favoriser les mécanismes de transfert de charges, on a choisi un gravier uniforme d'Hostun (HN2/4), noté M1, comme matériau de référence du modèle physique

La Figure 1 présente les courbes granulométriques de la grave utilisée sur le site expérimental de Saint-Ouen-l'Aumône et du gravier d'Hostun HN2/4. Les principales caractéristiques de ces matériaux sont données dans le Tableau 1.



Figure 1 - Courbes granulométriques de la grave du site expérimental de Saint-Ouenl'Aumône et du matériau de référence M1

	$d_{\max}$	$d_{\min}$	$d_{50}$	$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{_{60}}$	$C_U = d_{60} / d_{10}$	$C_{C} = d_{30}^{2} / (d_{10} \cdot d_{60})$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
Gravier	50	0,001	12	0,003	1,5	15	10	50
HN2/4 (M1)	6,3	1,0	2,6	2,1	2,4	2,9	1,38	0,95

Tableau 1 - Caractéristiques granulométriques de la grave utilisée sur le site expérimental de Saint-Ouen l'Aumône et du matériau de référence du modèle physique (Hostun HN2/4)

## 1.2 - Choix des trois autres matériaux

Pour l'étude paramétrique, à côté du matériau de référence M1, trois autres types de matériau ont été étudiés : le micro ballast de coupure 5-8 mm (MB5/8), le micro ballast de coupure 10-16 mm (MB10/16) et le dernier matériau est un mélange des différents matériaux afin d'obtenir un matériau de granulométrie étalée (M2). La Figure 2 présente différentes vues des quatre matériaux utilisés.



(a)





Figure 2 - Matériaux constitutifs du matelas utilisés pour le modèle physique 1g : a) Gravier d'Hostun 2/4 (M1) ; b) Micro-ballast MB 5/8 ; c) Micro-ballast MB 10/16; d) Matériau étalé M2

#### 1.3 - Caractéristiques physiques des différents matériaux

#### 1.3.1 - Matériau de référence M1

On détermine les indices de vide maximal et minimal  $e_{max}$ ,  $e_{min}$  du matériau M1, qui nous permettent de calculer l'indice de densité  $I_D$  selon la formule suivante :

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

La procédure de l'essai correspond à la norme NF – P94 059 et le résultat est présenté dans le Tableau 2 suivant :

	$e_{\max}$	$e_{\min}$
M1	0,717	0,615

#### Tableau 2 - Indice des vides maximal et minimal pour le matériau M1

#### 1.3.2 - Matériaux MB5/8 et MB10/16

Les matériaux uniformes MB5/8 et MB10/16, ont un diamètre moyen des grains multiplié respectivement par 2 et 4 par rapport au matériau de référence M1, tout en gardant le même étalement  $(d_{\min}/d_{\max})$ . On étudie ainsi l'influence de la taille du matériau.

#### 1.3.3 - Matériau étalé M2

Sachant que les matériaux utilisés sur les chantiers, en général, sont des graves à granulométrie étalée, on a décidé, au laboratoire, de reconstituer un matériau étalé, qui a le même  $d_{50} = 2,5mm$  que le matériau uniforme M1, en vue d'étudier l'influence de l'étalement granulométrique sur les résultats obtenus.

#### 1.3.3.1 - Méthodologie

Comme on vient de le voir, on devait respecter les conditions suivantes :

- le diamètre maximal du matériau  $d_{max} = 10 mm$  (l'échelle 1/5e par rapport au site de Saint-Ouen-l'Aumône);

- le diamètre moyen du matériau  $d_{50} = 2,5 mm$ ;
- le coefficient uniformité,  $C_U$  doit être supérieur à 2 (J.P. Magnan 2004).

La procédure de mélange consiste à mélanger des sables de granulométries différentes avec des graviers selon un rapport massique donné (Tableau 3). Afin d'assurer l'homogénéité du mélange, on ajoute 5% d'eau en masse.

Les matériaux utilisés sont :

- sables d'Hostun : HN 31 ; HN 0,4/0,8 ; HN 0,6/1,6 ; HN 1/2,5 ; HN2/4 ;
- sable de Fontainebleau NE 34 ;
- gravier à maçonner 4/12 mm écrêté à 10mm.

Les courbes granulométriques des sables utilisés et du mélange M2 sont présentées sur la Figure 3



Figure 3 - Courbe granulométrique théorique du matériau étalé, M2 et de M1

Туре	Masse	Fraction massique
	(kg)	(%)
NE 34	12	9,4
HN 31	4	3,2
HN 0,4/0,8	4	3,2
HN 0,6/1,6	8	6,3
HN 1/2,5	10	7,9
HN 2/4	50	39,3
Gravier écrêté	39,1	34,6
masse totale	127,1	
m eau (5%)	6,4	

## Tableau 3 – Composition du mélange pour le matériau M2

Les caractéristiques granulométriques du matériau M2 sont précisées dans le Tableau 4.

	$d_{\max}$	$d_{\min}$	$d_{50}^{-1}$	$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{_{60}}$	$C_U \ = \ d_{60} \ /$	$C_{\rm C} = d_{30}^2$	/
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	d <sub>10</sub>	$(d_{10}.d_{60})$	
M2	10	0,1	2,5	0,32	2	3,2	10	3,9	

# Tableau 4 - Caractéristiques granulométriques du matériau M2

### 1.3.3.2 - Procédure de mélange

Le mélange est réalisé en trois phases successives (Figure 4) :

- on pèse les matériaux selon la fraction massique nécessaire ;
- on réalise un premier mélange manuel à sec ;
- on ajoute l'eau et on mélange de nouveau.



Figure 4 - Procédure de mélange pour le matériau étalé a) préparation ; b) mélange à sec ; c) mélange à 5 % de teneur en eau

#### 1.4 - Caractéristiques mécaniques

Une campagne d'essais triaxiaux ( $\phi$ 100) a été réalisée sur les matériaux M1, M2, MB5/8, MB10/16. Ces essais triaxiaux nous permettent de déterminer les droites de rupture qui sont associées à la cohésion et à l'angle de frottement (c,  $\varphi$ ). Les résultats de ces essais ont servi, d'une part, à comprendre les comportements mécaniques des matériaux choisis, d'autre part, à fournir des données pour la modélisation numérique.

Le programme d'essai comprend une série de 3 essais pour chaque type de matériau à trois niveaux de contrainte de consolidation isotrope ( $\sigma_c = 50$ , 100, 200 kPa ). Les essais ont été réalisés à déplacement contrôlé, à une vitesse de l'ordre de 0,1 % de déformation axiale par minute (0,200mm/min). On a également réalisé des phases de décharge/recharge à quatre niveaux de déformation axiale,  $\varepsilon_a = 0,1 - 0,3 - 0,5 - \text{et } 1$  %. Ces phases nous permettrent de déterminer le module d'Young E. Les résultats détaillés de cette campagne d'essai sont présentés dans l'Annexe 1.

Le Tableau 5 résume des principaux résultats de critères de ruptures c,  $\varphi$  pour les matériaux constitutifs du matelas.

	E (0,1%)	φ	c	I <sub>D</sub>
	(MPa)	(°)	(kPa)	
Matériau uniforme M1	114	36	1	0,79
Matériau étalé M2 ( $\rho_d = 1,62 t/m^3$ )	<10	32	2	0,71
Matériau étalé M2 ( $\rho_d = 1,67 t/m^3$ )	≈50	35	1	0,91
MB5/8		38	4	
MB10/16	130	40	5	

Tableau 5 - Récapitulatif des paramètres de rupture de Mohr-Coulomb pour les 4matériaux étudiés

### 2 - RESULTATS D'ESSAIS TYPIQUES

### 2.1 - Cas du massif non renforcé

Le comportement mécanique du sol analogique a déjà été étudié, à partir d'essais œdométriques (cf. rapport 3.09.3.13). L'objectif, ici, est d'obtenir des résultats de référence concernant le cas non renforcé par inclusion rigide. On réalise donc un essai de chargement du massif de sol analogique sans renforcement. On remplit le module-réservoir intermédiaire par le sol analogique SP30 sur une hauteur de 10,5 cm. Une couche de matelas M1 de 10 cm est mise en place sur le massif du sol analogique. Le tassement de l'interface sol/matelas est mesuré par les tassomètres disposés sur le rayon. La procédure de chargement est identique à celle de l'essai de validation. Le tassement du sol analogique sert en particulier à mettre en évidence l'avantage de la technique de renforcement par inclusion rigide par comparaison aux résultats obtenus lors des essais renforcés par inclusion rigide. Des essais de répétabilité seront également réalisés. Le tassement à la fin des paliers de charge, à l'interface sol/matelas, mesuré sur les 5 capteurs LVDT, est illustré sur la Figure 5. On a également tracé sur cette figure le tassement après la phase de mise en place.



Figure 5 - Evolution du tassement de l'interface sol/matelas à chaque palier de chargement

Le tassement de l'interface sol/matelas augmente sous les paliers de charge successifs, et la forme des courbes est similaire pour tous les paliers de charge. Les tassements sont relativement uniformes. Cependant, il semble que les frottements au bord influencent les tassements (diminution), en particulier pour les derniers paliers. Sous la pression de 100 kPa à la surface du matelas, le sol analogique tasse, en moyenne, d'environ 13,18 mm (12,6 % de déformation axiale) et de 12,74 mm au bord de la cellule (12,1 % de déformation axiale). Pour l'étude paramétrique, on évalue l'influence des paramètres du modèle sur le tassement

de l'interface sol/matelas en étudiant les deux indices suivants :

- tassement moyen,  $s_{mov}$ ;

différence entre le tassement maximal et le tassement moyen  $\Delta s_{max} = s_{max}$ -

S<sub>moy</sub>

Le tassement moyen est calculé par la formule suivante :

$$s_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{5} s_i A_i}{\sum_{i=1}^{5} A_i}$$
(3. 1)

avec :

- $s_i$  : tassement mesuré sur le tassomètre i ;
- $A_i$  : surface de la zone de mesure du tassomètre i.

On suppose que, dans cette zone, le tassement est identique à la valeur mesurée par le tassomètre correspondant. La limite de ces zones est déterminée par le point central entre les tassements ou par le bord de la cellule. La Figure 6 présente les zones de mesure pour les cinq tassomètres pour le cas non renforcé et le cas renforcé.



Figure 6 - Zone de mesure des tassomètres a) Cas non renforcé ; b) Cas renforcé

Le tassement maximal  $s_{\max}$  est la valeur maximale mesurée par les tassomètres :

$$s_{\max} = \max\left(s_i\right) \tag{3.2}$$

Le tassement moyen,  $s_{moy}$ , caractérise l'amplitude de tassement tandis que le  $\Delta s_{max}$  caractérise l'homogénéité des tassements à l'interface sol/matelas. Si  $\Delta s_{max}$  est petit, le tassement est plus homogène.

Le Tableau 6 présente les valeurs mesurées par chaque tassomètre et ces deux indices pour le cas de référence non renforcé.

Palier	LVDT	LVDT	LVDT	LVDT	LVDT	S <sub>moy, nr</sub>	S <sub>max, nr</sub>	$\Delta s_{ m max, nr}$
	1	2	3	4	5			
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			
10 kPa	1,72	1,31	1,78	1,83	1,64	1,62	1,83	0,21
20 kPa	5,00	4,49	5,07	4,93	4,56	4,82	5,07	0,25
30 kPa	7,35	6,86	7,39	7,18	6,83	7,15	7,39	0,24
40 kPa	8,89	8,44	8,94	8,69	8,30	8,69	8,94	0,25
50 kPa	9,94	9,58	10,07	9,80	9,36	9,78	10,07	0,28
60 kPa	10,87	10,51	10,98	10,69	10,26	10,70	10,98	0,28
70 kPa	11,61	11,28	11,77	11,45	11,00	11,46	11,77	0,30
80 kPa	12,32	12,02	12,53	12,19	11,71	12,19	12,53	0,33
90 kPa	12,84	12,57	13,10	12,76	12,26	12,74	13,10	0,36
100								
kPa	13,28	13,03	13,60	13,26	12,74	13,20	13,60	0,39

# Tableau 6 - Tassements finaux de l'interface sol/matelas pour les différents paliers dechargement

La Figure 7 présente le tassement moyen et  $\Delta s_{max}$  en fonction de la pression de baudruche. On observe que le tassement moyen  $s_{moy}$  augmente très rapidement aux premiers paliers de charge et moins rapidement lorsque la charge devient importante (50 kPa). D'un autre côté,

l'évolution de la valeur de  $\Delta s_{max}$  confirme que, plus la charge est importante et plus le tassement différentiel est important.



Figure 7 - Tassement moyen,  $s_{mov}$  et  $\Delta s_{max}$  en fonction de la pression de baudruche

Au dernier palier de charge (100 kPa), le tassement moyen est de 13,2 mm et la valeur de  $\Delta s_{max}$  est de l'ordre de 0,40. On prend ces deux valeurs comme les références à comparer, sur l'amplitude et l'homogénéité des tassements à l'interface sol/matelas, avec les résultats obtenus pour les cas renforcés.

#### 2.2 - Massif renforcé par une inclusion rigide : cas de référence

On présente dans cette partie les résultats d'un essai typique (Tableau 7) obtenu pour un matelas composé de gravier d'Hostun HN2/4 (matelas M1), de 10 cm d'épaisseur ( $h_m = 10$  cm), un sol analogique composé d'un mélange de 70% de sable de Fontainebleau et 30% de billes de polystyrène (mélange SP30) de 10,5 cm d'épaisseur ( $h_s = 10,5$  cm) et une tête d'inclusion de 82 mm de diamètre ( $\alpha = 2,22$  %).

Matelas	Sol an	alogique	Inclusion rigide		
Туре	$h_m$	Туре	$h_{s}$	а	α
M1 (Hostun HN2/4)	10 cm	SP30	10,5 cm	82 mm	2,22 %

Tableau 7 - Caractéristiques de l'essai typique présenté

### 2.2.1 - Reprise de l'effort par l'inclusion rigide

La Figure 8 présente la sollicitation appliquée, sous la forme de la pression de baudruche mesurée en fonction du temps.



Figure 8 - Pression de baudruche en fonction du temps

La Figure 9 présente la force reprise par l'inclusion rigide en fonction du temps et un zoom sur le palier de 30 kPa. On observe que la force augmente rapidement au début du palier de charge et atteint la phase de stabilisation.



Figure 9 - Force reprise par l'inclusion rigide en fonction du temps

La Figure 10 présente respectivement l'effort repris par la tête d'inclusion et l'évolution du coefficient d'efficacité,  $E_{eff}$  calculé par la formule (3. 3), en fonction de la pression appliquée par la baudruche.

$$E_{eff} = \frac{F_{inc}}{F_{tot}} \times 100\%$$
(3.3)

avec :

- $F_{inc}$ : force sur l'inclusion rigide ;
- $F_{tot} = p_b \mathbf{X} A_b + \rho \mathbf{X} A_{mas} \mathbf{X} h_m$
- $p_b$  : pression de baudruche ;
- $A_b$  : surface de baudruche ;
- $A_{mas}$  : aire du massif.

On met, en particulier, en évidence une augmentation rapide du coefficient d'efficacité lors des premiers paliers de chargement, puis  $E_{eff}$  tend vers une valeur stabilisée voisine de 11,5%.



Figure 10 - Résultats typiques en terme de force reprise par l'inclusion rigide
a) Force concentrée sur l'inclusion rigide ;
b) Coefficient d'efficacité E<sub>eff</sub> en fonction de la pression p<sub>b</sub>

#### 2.2.2 - Tassements de l'interface sol/matelas

Les tassements de l'interface sol/matelas sont mesurés à partir de la phase de « mise en place » de l'essai jusqu'à la fin d'essai, par les sept tassomètres, dont cinq distribués sur un rayon et les deux autres sur le rayon opposé qui ont pour objectif de vérifier l'axisymétrie du modèle physique. Sur la Figure11, on présente le tassement de l'interface sol/matelas mesuré par le LVDT1 en fonction du temps. Les valeurs de tassement à la fin des paliers de charge sont considérées comme le tassement de l'interface sol/matelas au palier de charge correspondant.



Figure 11 – Tassement de l'interface sol/matelas mesuré par LVDT1 en fonction du temps

On présente sur la Figure 12 l'évolution des tassements de l'interface sol/matelas, mesurés sur les sept tassomètres, à chaque palier de chargement. Le LVDT 1 est lié au tassomètre disposé le plus proche de l'inclusion rigide et les LVDT 2, 3, 4, 5 sont liés aux tassomètres disposés de plus en plus loin de l'inclusion rigide. Les LVDT 6, 7 sont disposés symétriquement par rapport aux LVDT 1 et 3 à l'axe de l'inclusion rigide.



Figure 12 – Tassements de l'interface sol/matelas à la fin de chaque palier de chargement

On observe une augmentation progressive du tassement aux points mesurés avec l'accroissement de la pression exercée. En traçant les valeurs des tassements finaux pour les 10 paliers de chargement appliquée en fonction de la distance du tassomètre à l'axe de la cellule (Figure 13), on obtient la déformée de l'interface sol/matelas. Celle-ci nous permet d'imaginer la répartition des contraintes résiduelles exercées sur le sol analogique. Ces résultats montrent que la contrainte résiduelle est répartie de manière non uniforme.

De plus, on voit clairement l'effet d'accrochage du pieu, qui correspond à un tassement croissant plus on s'éloigne de l'inclusion rigide. Cet effet a également été observé lors des essais sur le site expérimental de Saint-Ouen-l'Aumône (Figure14), le site expérimental de Chelles et dans les travaux de Combarieu (1974). On retrouve le léger effet accrochage au bord de la cellule (LVDT5), qui se traduit par une petite réduction du tassement.

On présente également sur la Figure 13 les valeurs mesurées par les deux tassomètres disposés sur le rayon opposé afin de montrer la symétrie du modèle. Le léger décalage entre les valeurs mesurées par deux tassomètres symétriques est de l'ordre 0,5 à 1 mm (pour 100 kPa de chargement). Ce décalage peut être en partie attribué à une légère hétérogénéité du sol analogique et de la couche de matelas de transfert créée lors de leur mise en place. Cependant, cela ne change pas la forme de la déformée de l'interface sol/matelas. Afin de simplifier les figures, dans les parties qui suivent, on ne présente que les valeurs mesurées sur les cinq tassomètres disposés sur le rayon pour les cinq paliers de charge (20 *kPa*, 40 *kPa*, 60 *kPa*, 80 *kPa*, 100 *kPa*).



Figure 13 - Tassements finaux de l'interface sol/matelas pour les 10 paliers de chargements



Figure 14 - Tassements mesurés à différentes dates sur le plot 2R du chantier Chelles (Briançon, 2007)

Palier	LVDT1	LVDT2	LVDT3	LVDT4	LVDT5	S <sub>moy</sub>	$\Delta s_{\rm max}$
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
10 kPa	0,68	1,19	2,42	2,86	2,87	2,38	0,48
20 kPa	2,67	3,43	4,83	5,17	4,86	4,56	0,61
30 kPa	3,88	4,75	6,30	6,64	6,28	5,98	0,66
40 kPa	4,90	5,85	7,49	7,82	7,44	7,13	0,69
50 kPa	5,70	6,69	8,39	8,70	8,29	7,99	0,71
60 kPa	6,41	7,43	9,15	9,44	8,98	8,71	0,73
70 kPa	6,98	8,03	9,78	10,06	9,56	9,31	0,75
80 kPa	7,53	8,61	10,38	10,64	10,09	9,87	0,76
90 kPa	8,09	9,19	10,98	11,22	10,63	10,44	0,78
100							
kPa	8,52	9,64	11,44	11,68	11,04	10,88	0,79

On présente dans le Tableau8 les valeurs des tassements des tassomètres, tassement moyen et les valeurs de  $\Delta s_{max}$  à chaque palier de charge.

# Tableau 8 - Récapitulatif des tassements finaux mesurés aux différents paliers dechargement

En vue d'évaluer la réduction de tassement de l'interface sol/matelas, on présente, sur la Figure15, le tassement moyen, normalisé par le tassement moyen pour le cas non renforcé, calculé à partir de la formule (3. 4), en fonction des paliers de chargements.

$$s_{nor} = s_{moy} / s_{moy,nr}$$
(3.4)

avec : -  $s_{nor}$  : tassement normalisé ;

- $s_{mov}$ : tassement moyen pour le cas renforcé ;
- $s_{moy,nr}$ : tassement moyen pour le cas non renforcé.



Figure 15 – Tassement moyen normalisé pour le matelas M1 de 10 cm de hauteur

On observe sur la Figure15 que le tassement moyen normalisé diminue et se stabilise autour de la valeur 0,80. Ceci correspond à une réduction de tassement de l'ordre de 20 % par rapport au cas non renforcé. La Figure 16 présente l'évolution de  $\Delta s_{max}$  pour deux cas de référence avec et sans inclusion rigide en fonction de la pression de baudruche. Ces deux courbes présentent la même tendance mais la valeur  $\Delta s_{max}$  pour le cas renforcé est deux fois plus grande que dans le cas non renforcé au dernier palier de charge (100 kPa). Cela montre que le tassement différentiel est plus important pour le cas renforcé.



Figure 16 – Indice de tassement différentiel de l'interface sol/matelas pour deux cas de référence

Pour une faible épaisseur de matelas, la présence de l'inclusion rigide diminue le tassement absolu, mais augmente le tassement différentiel à la base du matelas.

#### 2.2.3 - Tassement de la surface du matelas

La mesure du tassement de la surface du matelas est effectuée avant la mise en place du dispositif de chargement (baudruche et cales), correspondant à l'état initial. Une nouvelle mesure est faite après le démontage du système de chargement. La différence entre ces deux mesures nous permet d'observer la déformée globale ainsi que le tassement différentiel après le chargement.

Le tassement de la surface du matelas est de l'ordre de 13 mm (Figure 17). Ce tassement est légèrement plus important que celui mesuré à l'interface sol/matelas. Cela montre que le matelas est compacté au cours de chargement. On observe également l'effet de bord qui réduit le tassement du matelas à la paroi.



Figure 17 - Surface du matelas avant et après le chargement

En supposant que le tassement est axisymétrique, on peut tracer une vue 3D du matelas après le chargement (Figure 18). On a pu observer, pour cet essai, la trace de l'inclusion rigide au centre du matelas (la forme boite - a - couf).



Figure 18 - Forme du matelas après le chargement (Matériau uniforme M1 –  $h_m = 10$  cm)

#### 2.3 - Conclusions et remarques

Les résultats de l'essai typique, avec une inclusion rigide, ont permis de mettre en évidence l'influence de la présence de l'inclusion rigide sur la mobilisation de l'effort sur l'inclusion rigide et la mobilisation du tassement de l'interface sol/matelas. Ces deux termes sont évalués par le coefficient d'efficacité  $E_{eff}$  et le tassement moyen normalisé  $s_{nor}$ . Cet essai a montré que, jusqu'à une certaine valeur de la contrainte appliquée, dans ce cas 40 kPa, le mécanisme de transfert de charge a été entièrement mobilisé jusqu'à une « phase stabilisée », indépendante de l'augmentation de la contrainte appliquée. Cependant, cette « phase stabilisée » n'est pas toujours constante, elle va dépendre du tassement de l'interface sol/matelas comme on le verra dans la partie 3.3

Une bonne correspondance est observée entre les allures de tassement des essais réalisés sur le modèle physique 1 g et celles obtenues lors de l'expérimentation en vraie grandeur, en particulier, l'effet d'accrochage du pieu et la distribution non-uniforme de la contrainte résiduelle sur le sol analogique dans le cas du matelas de faible épaisseur. Ces deux effets sont de plus en plus marqués lorsque la contrainte augmente.

La présence de l'inclusion rigide permet une réduction de 20 % de l'amplitude de tassement mais d'une augmentation du tassement différentiel.

### 3 - ETUDE DES PARAMETRES D'INFLUENCE

Dans cette partie, on présente l'interprétation des résultats obtenus à partir d'un programme expérimental de 41 essais sur le modèle physique 1 g (Tableau9). L'objectif de cette étude paramétrique est, d'une part, la mise en évidence des mécanismes de transfert de charge qui se produisent au sein du matelas, et, d'autre part, la quantification de l'influence des paramètres sur le renforcement du sol compressible par l'inclusion rigide. On distingue ici, trois groupes de paramètres :

- Paramètres géométriques :
  - épaisseur du matelas  $h_m$ ;
  - taux de recouvrement,  $\alpha$ .
- Paramètres liés au matelas :
  - diamètre moyen du matériau constitutif du matelas,  $d_{50}$ ;

- granulométrie du matériau constitutif du matelas ;
- rigidité du matériau constitutif du matelas.
- Paramètres liés au sol analogique :
  - compressibilité du sol analogique ;
  - épaisseur du sol analogique.

L'influence de ces paramètres est étudiée à partir du coefficient d'efficacité  $E_{eff}$  du tassement de l'interface sol/matelas (tassement moyen,  $s_{moy}$ , et l'indication de tassement différentiel,  $\Delta s_{max}$ ) et du tassement de la surface du matelas.

	Sol ana	logique	Matelas		Type de	Nombre	$a_{inc}$		
N°Essai	Туре	$h_s(\text{cm})$	Туре	$h_m(\mathrm{cm})$	$ ho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	chargement*	LVDT	(mm)	α (%)
T1	PS 30	10,5	GH 2/4	10	1,62	PC	5	0	
T2	PS 30	10,5	MB 5/8	10	1,62	PC	5	82	2,22
Т3	PS 30	10,5	GH 2/4	10	1,62	PC	5	82	2,22
T4	PS 30	10,5	MB 10/16	10	1,62	PC	5	82	2,22
T5	PS 30	10,5	GH 2/4	20	1,62	PC	5	82	2,22
T6	PS 30	10,5	GH 2/4	30	1,62	PC	7	82	2,22
T7	PS 30	10,5	GH 2/4	30	1,62	PC	7	82	2,22
T8	PS 30	10,5	GH 2/4	30	1,62	PC	7	82	2,22
Т9	PS 30	10,5	MB 10/16	20	1,62	PC	7	82	2,22
T10	PS 30	10,5	MB 10/16	30	1,62	PC	7	82	2,22
T11	PS 30	10,5	MB 5/8	20	1,62	PC	7	82	2,22
T12	PS 30	10,5	MB 5/8	30	1,62	PC	7	82	2,22
T13	PS 30	10,5	GH 2/4	10	1,62	PC	7	0	
T14	PS 30	20,6	GH 2/4	10	1,62	PC	7	0	
T15	PS 30	20,6	GH 2/4	10	1,62	PC	7	0	
T16	PS 30	20,6	GH 2/4	10	1,62	PC	7	82	2,22
T17	PS 30	20,6	GH 2/4	20	1,62	PC	7	82	2,22
T18	PS 30	20,6	GH 2/4	30	1,62	PC	7	82	2,22
T19	PS 30	20,6	GH 2/4	20	1,62	PC	7	82	2,22
T20	PS 30	10,5	GH 2/4	25	1,62	PC	7	82	2,22
T21	PS 30	10,5	GH 2/4	25	1,62	PC	7	82	2,22
T22	PS 30	10,5	M1	25	1,62	PC	7	82	2,22
T23	PS 30	10,5	M1	15	1,62	PC	7	82	2,22
T24	PS 30	10,5	M1	20	1,62	PC	7	82	2,22
T25	PS 50	10,5	M1	10	1,62	PC	7	82	2,22
T26	PS 50	10,5	M2	10	1,62	PC	7	82	2,22
T27	PS 30	10,5	M2	10	1,62	PC	7	82	2,22
T27bis	PS 30	10,5	M2	10	1,62	PC	7	82	2,22
T28	PS 30	10,5	M2	20	1,62	PC	7	82	2,22
T28bis	PS 30	10,5	M2	20	1,62	PC	7	82	2,22
T29	PS 30	10,5	M2	15	1,62	PC	7	82	2,22
T30	PS 30	10,5	M2	30	1,62	PC	7	82	2,22
T31	SP30	10,5	M2	10	1,62	PC	7	0	
T32	PS 30	10,5	M1	10	1,62	PC	7	116	4,44
T33	PS 30	10,5	M2	10	1,62	PC	7	116	4,44
T34	PS 30	10,5	M1	20	1,62	PC	7	116	4,44
T35	PS 30	10,5	M1	10	1,62	PC	7	164	8,88
T36	PS 30	10,5	M1	20	1,62	PC	7	164	8,88
T37	PS 30	10,5	M2	10	1,67	PC	6	82	2,22
T38	PS 30	10,5	M2	15	1,67	PC	6	82	2,22
T39	PS30	10,5	M2	30	1,67	PC	6	82	2,22

\*PC : pression contrôlée

# Tableau 9 – Caractéristiques des essais réalisés sur le modèle physique

#### 3.1 - Influence des paramètres géométriques

En pratique, dans les ouvrages réalisés en France, l'épaisseur du matelas,  $h_m$ , varie de 0,40 à 0,90 m et l'entraxe entre inclusions, s, est de l'ordre de 1,50 m à 3,50 m (Briançon *et al.*, 2004). Cela donne une gamme d'épaisseurs relatives,  $h_m/(s-a)$ , qui varie entre 0,15 et 0,90. Sur le modèle physique 1 g à l'échelle 1/5, on a réalisé des essais avec une épaisseur de matelas qui varie entre 10 cm et 30 cm. En supposant que le diamètre du module-réservoir correspond à l'entraxe des inclusions rigides, la distance entre inclusions est donc toujours constante, égale à 55 cm. L'utilisation des trois diamètres de la tête de l'inclusion rigide (8,2 cm ;11,6 cm ;16,4 cm) permet de faire varier l'épaisseur relative du matelas de 0,21 à 0,77 (Tableau 10).

	$h_{m}$	S	а	$h_m/(s-a)$
Chantiers français	0,40m - 0,90m	1,50m – 3,50m	0,30 m – 0,70 m	0,15 - 0,90
Modèle physique 1 g	10cm - 30cm	55cm	8,20cm ;11,60cm ;16,40cm	0,21 – 0,77

# Tableau 10 - Gamme d'épaisseurs et d'épaisseurs relatives du matelas étudiée sur lemodèle physique 1g

#### 3.1.1 - Influence de l'épaisseur du matelas, $h_m$

3.1.1.1 - Influence de l'épaisseur du matelas sur le coefficient d'efficacité maximal  $E_{eff}^{max}$ 

L'influence de l'épaisseur du matelas,  $h_m$ , sur le coefficient d'efficacité est étudiée, tout d'abord, pour le matelas uniforme M1. Les résultats pour les trois autres types de matelas (MB5/8, MB10/16, M2) seront présentés par la suite. Pour chaque type de matériau, les paramètres géométriques ( $a = 8, 2 \ cm$ ,  $\alpha = 2,22\%$ ), les paramètres du matelas ( $\rho = 1,620 \ t/m^3$ ), et les paramètres du sol analogique (type du sol analogique SP30,  $h_s = 10,5 \ cm$ ) sont fixés (Tableau 11). Le Tableau 12 présente les essais réalisés sur différents matelas.

Masse	Sol analogique		Inclusion rigide	
volumique du	type	épaisseur	diamètres	taux de recouvrement
matelas				
$1,620 \text{ t/m}^3$	SP30	10,5 cm	82 cm	2,22 %

Tableau 11 - Paramètres fixés pour l'étude de l'influence de l'épaisseur du matelas

$h_m$ (cm)	Gravier	Micro-ballast	Micro-ballast	Matériau étalé
	d'Hostun M1	MB5/8	MB10/16	M2
10	Х	Х	Х	Х
15	Х	-	-	х
20	Х	Х	Х	X
25	Х	-	-	-
30	Х	Х	Х	Х

#### Tableau 12 - Configurations pour l'étude de l'influence de l'épaisseur du matelas, h<sub>m</sub>

L'évolution du coefficient d'efficacité en fonction de la pression de baudruche pour le matériau uniforme M1 pour les cinq épaisseurs de matelas est présentée sur la Figure 19. Les coefficients d'efficacité augmentent rapidement et se stabilisent autour de valeurs qui dépendent de l'épaisseur du matelas. Ces valeurs stabilisées sont d'autant plus élevées que l'épaisseur du matelas est grande.



Figure 19 - Evolution des coefficients d'efficacité en fonction de la pression de baudruche pour le matelas M1

En termes de coefficient d'efficacité maximal,  $E_{eff}^{\max}$ , on présente sur la Figure 20 les résultats obtenus pour les essais réalisés sur le matériau uniforme M1. On observe une augmentation quasi-linéaire du coefficient d'efficacité maximal de 11 % à 15,3 % quand l'épaisseur du matelas  $h_m$  augmente de 10 cm à 30 cm.



Figure 20 - Influence de l'épaisseur du matelas sur le coefficient d'efficacité maximal pour le matériau uniforme M1

Cette tendance est confirmée par les résultats expérimentaux obtenus sur les autres matelas uniformes du type micro-ballast MB5/8 et MB10/16 (Figure 21). Pour ces deux types de matelas, les coefficients d'efficacité maximaux sont plus importants que ceux obtenus pour le matelas M1. Cependant, on observe que le coefficient d'efficacité maximal,  $E_{eff}^{max}$  semble se stabiliser à partir de  $h_m = 20$  cm. La limite de la hauteur du dispositif n'a pas permis d'augmenter  $h_m$  pour vérifier s'il existe une valeur seuil de  $E_{eff}^{max}$  pour chaque type de matelas.



Figure 21 - Influence de l'épaisseur du matelas sur le coefficient d'efficacité maximal pour les matelas MB5/8 et MB10/16

Par contre, dans le cas du matériau étalé M2 (Figure 22), on a observé une tendance inverse. Le coefficient d'efficacité  $E_{eff}^{max}$  est décroissant avec l'épaisseur du matelas  $h_m$ . Cela pourrait être dû soit au comportement mécanique médiocre de ce type de matelas, en comparant avec les autres matériaux utilisés pour la même valeur de masse volumique  $\rho_d = 1,62 \text{ t/m}^3$  soit à la granulométrie. Dans ce contexte, on a réalisé d'autres essais pour ce type de matelas, mais avec une masse volumique plus importante. Les résultats seront présentés dans la partie 3.3.2.3.



Figure 22 - Influence de l'épaisseur du matelas sur le coefficient d'efficacité maximal pour le matériau étalé M2

3.1.1.2 - Influence de l'épaisseur du matelas sur les tassements de l'interface sol/matelas

Tout d'abord, on interprète les résultats pour le matelas uniforme, M1. L'influence de l'épaisseur du matelas sera examinée à partir de la distribution radiale du tassement de l'interface ainsi que du tassement moyen évalué selon la pondération présenté en 2.1.

La Figure 23 présente, sur des graphes à l'échelle, la répartition des tassements à l'interface sol/matelas, mesurés à la fin des paliers de charge (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa, 80 kPa, 100 kPa), en fonction de la distance des tassomètres par rapport à l'axe de l'inclusion rigide, pour les différentes épaisseurs de matelas ( $h_m = 10$  cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm).



Figure 23- Répartition des tassements de l'interface sol/matelas pour le matelas M1 pour différentes épaisseurs du matelas.

a) Test 3 -  $h_m$  = 10 cm ; b) Test 23 -  $h_m$  = 15 cm; c) Test 24 -  $h_m$  = 20 cm;

d) Test 22 -  $h_m$  = 25 cm ; e) Test 6 -  $h_m$  = 30 cm
On observe que l'effet d'accrochage diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du matelas et à partir d'une épaisseur de matelas de 20 cm, on n'observe plus l'effet d'accrochage.

De manière quantitative, on récapitule dans le Tableau 13 les valeurs de tassement moyen à la fin des paliers de charge (20 kPa, 40 kPa, 60 kPa, 80 kPa, 100 kPa) pour les cinq épaisseurs de matelas étudiés ainsi que pour les deux rapports adimensionnels  $h_m/(s-a)$ ,  $h_m/s$  déterminés à partir de l'épaisseur de matelas correspondant.

	S <sub>moy</sub>								
	Test 3	Test 23	Test 24	Test 22	Test 6				
$h_{_m}$	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm				
$h_m/(s-a)$	0,21	0,32	0,43	0,53	0,64				
$h_m/s$	0,18	0,27	0,36	0,45	0,55				
20 kPa	4,56	1,03	2,62	3,63	1,42				
40 kPa	7,13	3,93	4,84	5,71	2,48				
60 kPa	8,71	6,19	6,17	7,08	3,35				
80 kPa	9,87	7,65	7,37	8,14	4,18				
100 kPa	10,88	8,76	8,42	9,02	4,90				

# Tableau 13 - Valeurs du tassement moyen, s<sub>moy</sub>, de l'interface sol/matelas en fonctionde l'épaisseur du matelas

On observe une réduction de l'amplitude du tassement de l'interface sol/matelas avec l'augmentation de l'épaisseur de matelas, quel que soit le niveau de pression de baudruche. Pour le dernier palier de charge (100 kPa), le tassement moyen a diminué à 50 % lorsque l'épaisseur de matelas passe de 10 cm à 30 cm. Cette tendance est également observée pour les autres types de matériau constitutifs du matelas (MB5/8, MB10/16).

La Figure24 présente quantitativement les tassements finaux moyens, à 100 kPa de chargement, pour les matelas MB5/8 et MB10/16. Quand l'épaisseur du matelas augmente de 10 cm à 30 cm, les valeurs de tassement moyen diminuent de 9,8 mm à 5,3 mm pour MB5/8, et de 10,9 mm à 4,99 mm pour MB10/16. Ce résultat est logique, car plus la contrainte est concentrée vers l'inclusion rigide, pour une charge donnée, et plus la contrainte résiduelle sur le sol analogique est réduite.



Figure 24 - Influence de l'épaisseur du matelas sur le tassement de l'interface sol/matelas pour les matériaux MB5/8 et MB10/16

La Figure 25 présente le tassement moyen normalisé ( $s_{nor} = s_{moy}/s_{moy,nr}$ ) au dernier palier de charge ( $p_b = 100$  kPa) en fonction respectivement de l'épaisseur du matelas  $h_m$  et des deux rapports adimensionnels  $h_m/(s-a)$ ,  $h_m/s$ , pour le matelas du type M1. Le premier rapport adimensionnel,  $h_m/(s-a)$ , tient compte de l'influence du taux de recouvrement tandis que le deuxième n'en tient pas compte.

L'augmentation de l'épaisseur du matelas fait diminuer le tassement moyen de l'interface sol/matelas. La valeur du tassement moyen normalisé,  $s_{nor}$ , est décroissante avec l'épaisseur du matelas,  $h_m$ , et les rapports adimensionnels  $h_m/(s-a)$ ,  $h_m/s$ .



Figure 25 – Tassement moyen normalisé de l'interface sol/matelas

# au palier de charge de 100 kPa

Quant à l'homogénéité des tassements de l'interface sol/matelas, on résume dans le Tableau14 les valeurs de  $\Delta s_{max}$ , dans un format analogue à celui utilisé dans le Tableau 13.

$\Delta s_{\rm max}$								
	Test 3	Test 23	Test 24	Test 22	Test 6			
$h_m$	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm			
$h_m/(s-a)$	0,21	0,32	0,43	0,53	0,64			
$h_m/s$	0,18	0,27	0,36	0,45	0,55			
20 kPa	0,61	0,41	0,35	0,10	0,24			
40 kPa	0,69	0,49	0,38	0,13	0,24			
60 kPa	0,73	0,53	0,38	0,15	0,27			
80 kPa	0,76	0,54	0,42	0,20	0,30			
100 kPa	0,79	0,55	0,45	0,23	0,32			

Tableau 14 - Valeurs de  $\Delta s_{max}$  pour les tassements de l'interface sol/matelas

On observe que la valeur de  $\Delta s_{max}$  diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de matelas pour tous les paliers de charge. Cela montre que le tassement différentiel diminue avec

l'augmentation de l'épaisseur du matelas ainsi de des deux rapports adimensionnels  $h_m/(s-a)$  et  $h_m/s$ .

On compare ci-dessous les valeurs de  $\Delta s_{\max}$ , obtenues pour le cas renforcé avec celles obtenues pour le cas non renforcé. La Figure 26 présente le rapport  $\Delta s_{\max} / \Delta s_{\max,nr}$  fonction respectivement de  $h_m, h_m/(s-a)$  et  $h_m/s$ .



Figure 26 - Comparaison des valeurs de  $\Delta s_{max}$  obtenus pour le cas renforcé par rapport au cas renforcé

On observe que, pour des épaisseurs de matelas supérieures à 20 cm  $(h_m/s \ge 0,4;$  $h_m/(s-a) \ge 0,5)$  le tassement de l'interface sol/matelas est plus uniforme que celui du cas non renforcé. L'effet d'accrochage est minimisé. L'augmentation de l'épaisseur du matelas permet donc d'homogénéiser le tassement de l'interface sol/matelas et de diminuer l'amplitude du tassement. Pour le matelas du type M1, le tassement de l'interface sol/matelas devient uniforme lorsque le rapport  $h_m/(s-a)$  est supérieur à 0,50.

## 3.1.1.3 - Influence de $h_m$ sur le tassement de la surface du matelas

La mesure du tassement de la surface du matelas, effectuée après le chargement, permet d'observer et de mesurer le tassement de la surface du matelas.

La Figure 27 présente l'évolution, vue en 3D, de la surface du matelas avec l'augmentation de l'épaisseur de matelas.



Figure 27 - Vue en 3D de la surface du matelas après le chargement

**a)** 
$$h_m = 10 \text{ cm}$$
; **b)**  $h_m = 20 \text{ cm}$ ; **c)**  $h_m = 25 \text{ cm}$ ; **d)**  $h_m = 30 \text{ cm}$ 

Pour des épaisseurs de matelas supérieures à 25 cm, correspondant à un rapport adimensionnel  $h_m/(s-a)$  supérieur à 0,50, on n'observe plus de trace de l'inclusion rigide à la surface du matelas.

## 3.1.2 - Influence du taux de recouvrement, $\alpha$

Le taux de recouvrement,  $\alpha$ , s'exprime comme le rapport entre la surface des inclusions rigides et celle du sol renforcé. Selon l'étude bibliographique de Briançon *et al.* (2004), le taux de recouvrement courant sur les chantiers varie de 2 % à 24 %. Le choix de ce paramètre influence, d'une part l'efficacité de cette technique de renforcement, et autre part le coût et le temps de réalisation du traitement.

Dans le cadre de ce travail, on a étudié influence de ce paramètre sur le mécanisme de transfert de charge pour trois valeurs de  $\alpha$  : 2,22 %, 4,44 % et 8,88 % (Figure 28). L'augmentation du taux de recouvrement est obtenue par l'accroissement du diamètre de la tête de l'inclusion rigide, sans changer les autres dimensions du modèle physique (Tableau 15).



Figure 28 - Têtes d'inclusion de différents diamètres utilisées

	Masse volumique $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	h	a	α (%)	Sol analogique	
Matériau		(cm)	(mm)		Туре	$h_s$
M1	1,620	10	82	2,22	SP30	10,50 cm
		20	116	4,44		
			164	8,88		

# Tableau 15 - Paramètres du modèle physique utilisés pour l'étude du l'influence de taux de recouvrement $\alpha$

# 3.1.2.1 - Influence de $\alpha$ sur le cœfficient d'efficacité $E_{eff}^{\max}$

On présente l'évolution du coefficient d'efficacité  $E_{eff}^{\max}$  en fonction de la pression de baudruche pour le matériau uniforme M1, et deux épaisseurs du matelas  $h_m = 10 cm$  (Figure 29) et  $h_m = 20 cm$  (Figure 30). Le sol analogique est du type SP30, avec une épaisseur de 10,5 cm.

On voit que, pour les deux épaisseurs du matelas, l'augmentation du taux de recouvrement entraîne un accroissement du coefficient d'efficacité maximal. Cette valeur maximale est atteinte pour une pression de baudruche d'autant plus importante que le taux de recouvrement augmente.



Figure 29 - Influence de  $\alpha$  sur  $E_{\rm eff}$  pour  $h_{\rm m}$  = 10 cm



Figure 30 - Influence de  $\alpha$  sur  $E_{\rm eff}$  pour  $h_{\rm m}$  = 20 cm

La Figure 31 résume les valeurs du coefficient d'efficacité maximal obtenues pour les trois taux de recouvrement. Le doublement du taux de recouvrement permet d'augmenter le coefficient d'efficacité maximal,  $E_{eff}^{max}$  d'environ 28 %.



Figure 31 - Synthèse des valeurs obtenues pour  $E_{\it eff}^{\rm max}$ 

### 3.1.2.2 - Influence de $\alpha$ sur le tassement de l'interface sol/matelas

On présente successivement sur la Figure 32 et la Figure 33, les tassements finaux mesurés sur les tassomètres pour les trois valeurs du taux de recouvrement, et les cinq paliers de charge (20 kPa, 40kPa, 60 kPa, 80 kPa, 100 kPa).







Figure 32 - Synthèse des tassements finaux observés ( $h_m = 10 \text{ cm}$ )









Distance à l'axe de l'inclusion (mm)







c) T36 -  $h_m = 20 \, cm$ ,  $\alpha = 8,88 \, \%$ 

Figure 33 - Synthèse des tassements finaux observés ( $h_m = 20 \text{ cm}$ )

En observant l'allure des déformées de l'interface sol/matelas pour chaque palier de chargement, on peut faire les remarques qualitatives suivantes :

- les tassements de l'interface sol/matelas augmentent toujours avec la pression de baudruche ;
- l'effet d'accrochage diminue légèrement avec l'augmentation du taux de recouvrement;
- l'effet de bord est observé pour les trois valeurs du taux de recouvrement.

On évalue l'influence du taux de recouvrement sur le tassement de l'interface sol/matelas de manière quantitative, en calculant les valeurs du tassement moyen à la fin des paliers de charge pour les configurations étudiées (Tableau 16).

			S <sub>moy</sub>			
Essai	Т3	T32	T35	T24	T34	T36
$h_m$	10 cm	10 cm	10 cm	20 cm	20 cm	20 cm
а	8,2 cm	11,6 cm	16,4 cm	8,2 cm	11,6 cm	16,4 cm
$h_m/s$	0,18	0,18	0,18	0,36	0,36	0,36
$h_m/(s-a)$	0,21	0,23	0,26	0,43	0,46	0,52
20 kPa	4,56	1,91	1,66	2,62	2,28	1,31
40 kPa	7,13	4,53	3,28	4,84	3,04	2,64
60 kPa	8,71	6,03	4,54	6,17	4,24	3,72
80 kPa	9,87	7,23	5,63	7,37	5,28	4,72
100 kPa	10,88	8,10	6,48	8,42	6,11	5,57

#### Tableau 16 – Tassement moyen de l'interface sol/matelas

On observe que, quelle que soit l'épaisseur de matelas et la pression de baudruche, l'augmentation du taux de recouvrement diminue le tassement moyen de l'interface sol/matelas.

La Figure 34 présente, pour différents paliers de charge, les tassements moyens obtenus en fonction du taux de recouvrement, normalisés par le tassement moyen mesuré dans le cas du

sol non renforcé. On met en évidence une réduction significative des tassements, résultant du renforcement par l'inclusion, d'autant plus importante que  $\alpha$  est grand.



Figure 34 - Tassement moyen normalisé de l'interface sol/matelas

			$\Delta s_{ m max}$			
Essai	Т3	T32	T35	T24	T34	T36
$h_m$	10 cm	10 cm	10 cm	20 cm	20 cm	20 cm
а	8,2 cm	11,6 cm	16,4 cm	8,2 cm	11,6 cm	16,4 cm
$h_m/s$	0,18	0,18	0,18	0,36	0,36	0,36
$h_m/(s-a)$	0,21	0,23	0,26	0,43	0,46	0,52
20 kPa	0,61	0,40	0,22	0,35	0,24	0,28
40 kPa	0,69	0,47	0,33	0,38	0,28	0,32
60 kPa	0,73	0,52	0,41	0,38	0,34	0,36
80 kPa	0,76	0,57	0,49	0,42	0,37	0,40
100 kPa	0,79	0,60	0,55	0,45	0,40	0,42

Quant au tassement différentiel, on présente dans le Tableau 17 les valeurs de  $\Delta s_{max}$ .

# Tableau 17 – Valeurs de $\Delta s_{max}$ correspondant aux tassements de l'interface sol/matelas

La Figure 35 présente le rapport entre les valeurs de  $\Delta s_{max}$  (Tableau 17), et celles correspondant au cas non renforcé qui est de l'ordre de  $\Delta s_{max,nr} = 0,39$  (partie 2.1). On observe que l'augmentation du taux de recouvrement entraîne une diminution du tassement différentiel mais pour les deux valeurs de l'épaisseur de matelas ( $h_m = 10 \ cm, \ 20 \ cm$ ), le tassement différentiel de l'interface sol/matelas pour le cas renforcé est toujours plus important que celui correspondant au cas non renforcé. De ce fait, l'influence du taux de recouvrement sur l'homogénéisation du tassement de l'interface sol/matelas n'est pas aussi significative que celle de l'épaisseur du matelas.



Figure 35 – Comparaison de  $\Delta s_{max}$  pour le cas non renforcé et le cas renforcé

D'un autre côté, on observe que le tassement de l'interface sol/matelas est de plus en plus homogène avec l'augmentation du rapport  $h_m/(s-a)$  (Figure 36). Lorsque ce rapport  $h_m/(s-a)$ supérieur à 0,50, le tassement de l'interface sol/matelas est aussi homogène que celui du cas non renforcé.



Figure 36 - Influence du rapport h<sub>m</sub>/(s-a) sur le tassement différentiel de l'interface sol/matelas

En vue d'évaluer le poids relatif de ces deux paramètres géométriques  $(h_m, \alpha)$ , on synthétise respectivement les valeurs maximales du coefficient d'efficacité,  $E_{eff}^{max}$ , les valeurs de tassement moyen,  $s_{moy}$  et les valeurs de  $\Delta s_{max}$ , au dernier palier de charge (100 kPa) pour les configurations présentés dans le Tableau 18, le Tableau 19 et le Tableau 20.

$E_{eff}^{\max}$ (%)	$h_m = 10  cm$	$h_m = 15 \ cm$	$h_m = 20 \ cm$	$h_m = 25 \ cm$	$h_m = 30 \ cm$
$\alpha = 2,22\%$	11,3	13,2	14,1	14,5	15,7
$\alpha = 4,44\%$	18,2	-	23,5	-	-
$\alpha = 8,88\%$	24,6	-	30,1	-	-

Tableau 18 – Synthèse des valeurs du coefficient d'efficacité maximal pour lesconfigurations étudiées sur le matelas de référence M1

S <sub>moy</sub>	$h_m = 10 \ cm$	$h_m = 15 \ cm$	$h_m = 20 \ cm$	$h_m = 25 \ cm$	$h_m = 30  cm$
$\alpha = 2,22\%$	10,9	8,8	8,4	9,0	4,9
$\alpha = 4,44\%$	8,1	-	6,1	-	-
$\alpha = 8,88\%$	6,5	-	5,6	-	-

Tableau 19 – Synthèse des valeurs de tassement moyen pour les configurationsétudiées sur matelas de référence M1

$\Delta s_{ m max}$	$h_m = 10 \ cm$	$h_m = 15 \ cm$	$h_m = 20 \ cm$	$h_m = 25 \ cm$	$h_m = 30 \ cm$
$\alpha = 2,22\%$	0,79	0,55	0,45	0,23	0,32
$\alpha = 4,44\%$	0,6	-	0,4	-	-
$\alpha = 8,88\%$	0,55	-	0,42	-	-

Tableau 20 – Synthèse des valeurs de l'indice de tassement différentiel pour lesconfigurations étudiées sur matelas de référence M1

La Figure 37, qui reprend les données du Tableau 18, montre quantitativement l'influence de l'épaisseur de matelas,  $h_m$  et du taux de recouvrement,  $\alpha$ , sur le coefficient d'efficacité maximal,  $E_{e\!f\!f}^{\max}$ .



Figure 37 - Synthèse des coefficients d'efficacité maximal,  $E_{e\!f\!f}^{\max}$  pour le matériau M1

En comparant avec la configuration de référence ( $h_m = 10$  cm,  $\alpha = 2,22$  %), dans la gamme étudiée, le doublement de l'épaisseur du matelas (de  $h_m = 10$  cm à  $h_m = 20$  cm) entraîne une augmentation du coefficient d'efficacité maximal de l'ordre de 14% pour  $\alpha = 2,22$  %, de 29 % pour  $\alpha = 4,44$  % et de 22 % pour  $\alpha = 8,88$  %.

Tandis que le doublement du taux de recouvrement (de  $\alpha = 2,22$  % à  $\alpha = 4,44$  %) entraîne une augmentation du coefficient d'efficacité maximal de l'ordre de 62 % pour  $h_m = 10$  cm et de 83 % pour  $h_m = 20$  cm. Donc, l'influence du taux de recouvrement  $\alpha$  sur le coefficient d'efficacité maximal,  $E_{eff}^{max}$  est prépondérante par rapport à celle de l'épaisseur du matelas,  $h_m$ . De plus, pour un taux de recouvrement plus important, l'influence de l'épaisseur du matelas,  $h_m$  sur  $E_{eff}^{max}$  est plus significative.

Quant au tassement de l'interface sol/matelas, on présente les donnés du Tableau 19 et du Tableau 20 sur la Figure 38.



Figure 38 – Comparaison de l'influence des paramètres géométriques ( $h_m$ ,  $\alpha$ )

On observe que l'augmentation du taux de recouvrement ou de l'épaisseur du matelas permet de diminuer l'amplitude du tassement de l'interface sol/matelas. Cependant, l'influence de l'épaisseur du matelas sur la réduction de l'amplitude du tassement ainsi que le tassement différentiel à l'interface sol/matelas est plus significative.

#### 3.1.3 - Conclusions partielles

Les résultats expérimentaux présentés ont montré que l'augmentation de l'épaisseur du matelas,  $h_m$ , et du taux de recouvrement,  $\alpha$ , permet de :

- favoriser le mécanisme de transfert de charge vers l'inclusion rigide ;
- diminuer le tassement absolu du sol analogique et d'homogénéiser le tassement différentiel à l'interface sol/matelas.

En terme du coefficient d'efficacité maximal,  $E_{eff}^{\max}$ , pour chaque type de matelas, l'influence de  $h_m$  est différente. Pour le matériau uniforme, plus l'épaisseur du matelas est importante, et plus l'influence est significative. Dans le cas du matériau étalé, l'augmentation de  $h_m$  entraîne une diminution du coefficient d'efficacité. Cependant, ce dernier résultat a été obtenu pour une densité du matelas assez faible, ce qui n'est pas le cas du matériau uniforme.

L'influence du taux de recouvrement,  $\alpha$ , sur le mécanisme de transfert de charge, est plus importante que celle de l'épaisseur du matelas.

Mais ce paramètre joue un rôle moins important en terme l'homogénéisation des tassements à l'interface sol/matelas. Pour des valeurs du rapport  $h_m/(s-a)$  supérieur à 0,50, le tassement de l'interface sol/matelas est quasiment uniforme.

### 3.2 - Influence des paramètres liés au matelas

#### 3.2.1 - Influence du diamètre des grains du matelas

Le choix du matériau de référence M1, dont le diamètre moyen est de l'ordre de 2,5 mm, est lié, à l'échelle 1/5, au matériau utilisé sur le chantier de Saint-Ouen-l'Aumône. Afin d'évaluer l'influence du diamètre des grains du matelas, les deux autres types de matériaux MB5/8 et MB10/16, dont les diamètres moyens, maximal et minimal  $(d_{50}, d_{max}, d_{min})$  sont

respectivement multipliés par 2 et 4 par rapport à ceux de M1, ont été utilisés sur la même configuration du modèle physique : diamètre de l'inclusion rigide de 82 cm, sol analogique du type SP30 de 10,5 cm de l'épaisseur et matelas de différents épaisseurs.

Les caractéristiques des trois types de matelas sont données dans le Tableau 21 . L'influence de la taille du matériau est étudiée pour les trois épaisseurs de matelas :  $h_m = 10$  cm, 20 cm, 30 cm et une masse volumique identique de l'ordre de 1,620 t/m<sup>3</sup> pour les trois types de matelas.

Matalas	$ ho_{d}$	<i>c</i> ′	φ	$d_{\max}$	$d_{\min}$	$d_{50}$	а	Sol ana	logique
Wateras	(t/m <sup>3</sup> )	(kPa)	(°)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	Туре	$h_s$
M1	1,620	1	36	5	1,25	2,5	82	SP30	10,5 cm
MB5/8	1,620	4	38	8	5	6	82	SP30	10,5 cm
MB10/1 6	1,620	5	40	16	10	12	82	SP30	10,5 cm

### Tableau 21 - Identification des caractéristiques des matériaux constitutifs des matelas

On présente, tout d'abord, les valeurs maximales des coefficients d'efficacité obtenues pour chaque type de matériau. (Tableau 22)

Type du matériau	$d_{_{50}}$	$h_m$					
	(mm)	10 cm	20 cm	30 cm			
M1	2,5	11,3	14,1	15,7			
MB5/8	6	14,1	20,5	20,0			
MB10/16	12	19,2	25,0	23,9			

# Tableau 22 - Valeurs des coefficients d'efficacité maximaux obtenues, $E_{eff}^{max}$

La Figure 39 présente les données du Tableau 22. On y observe une croissance quasiment linéaire de  $E_{eff}^{max}$  avec le diamètre moyen du matériau constitutif du matelas, quelle que soit l'épaisseur du matelas. Le coefficient d'efficacité maximal,  $E_{eff}^{max}$ , est multiplié par environ 1,5 lorsque le diamètre moyen varie de 2,5 mm à 12 mm. Ce résultat montre que plus la taille

moyenne des grains du matériau de matelas est grande, et plus le mécanisme de transfert de charge est important.



Figure 39 - Influence de la taille du matériau constitutif du matelas sur le coefficient d'efficacité maximal,  $E_{eff}^{max}$ 

L'influence de ce paramètre est rarement abordée dans la littérature, notamment lors des études sur des modèles tridimensionnels. Par contre, en modèle bidimensionnel, Jenck (2005), a étudié l'influence de la taille relative du matériau de matelas par rapport à celle du modèle en variant uniquement la taille du modèle. Ses résultats, en terme du mécanisme de transfert de charge, ne montrent pas de différences remarquables lorsqu'on diminue la taille du modèle.

#### 3.2.2 - Influence de l'étalement granulométrique du matériau constitutif du matelas

L'influence de la granulométrie du matériau constitutif du matelas a été étudiée à partir des deux types de matelas M1 et M2. Ces deux matériaux M1 et M2 ont le même diamètre moyen  $d_{50}$ , de l'ordre de 2,5 mm, mais ont des étalements granulométriques différents, comme illustré sur la Figure 40.



Figure 40 - Courbes granulométriques des deux types de matériaux constitutifs du matelas M1 et M2

Le matériau M2 est un matériau très étalé dont le  $C_c$  est égal à 10 (c.f. 1.3.3). La masse volumique sèche des matériaux de matelas utilisée est constante, de l'ordre de 1,62  $t/m^3$ .

Sur la Figure 41, on présente l'évolution du coefficient d'efficacité en fonction de la pression de baudruche pour les matelas M1 et M2 (épaisseur 10 cm),. La valeur du coefficient d'efficacité maximal passe de 8,8 % pour M2 à 11,2 % pour M1.



Figure 41 – Evolution du coefficient d'efficacité en fonction de la pression de baudruche, pour les matelas M1 et M2 et  $h_m = 10 \ cm$ 

On obtient les mêmes évolutions pour les autres valeurs de l'épaisseur du matelas (Figure 42) quelle que soit l'épaisseur du matelas étudié, le matelas étalé (M2) induisant un coefficient d'efficacité maximal plus petit que celui obtenu pour le matériau uniforme (M1).



Figure 42 - Valeurs de  $E_{eff}^{max}$  obtenues pour les matériaux M1 et M2 pour différentes

épaisseurs du matelas

Le matériau uniforme favorise le mécanisme de transfert de charge vers l'inclusion rigide. Quant au tassement de l'interface sol/matelas, la Figure 43 synthétise les résultats du tassement moyen et du paramètre  $\Delta s_{max}$  pour les deux types de matelas en fonction de l'épaisseur de celui-ci. Dans tous les cas, le tassement moyen et le tassement différentiel pour

le matelas M2 sont toujours plus importants que ceux observés pour le matelas M1.



Figure 43 - Tassement moyen et  $\Delta s_{max}$  en fonction de l'épaisseur du matelas

### 3.2.3 - Influence de la rigidité

Comme on l'a abordé dans la partie 3.1.1 et 3.2.2, on observe, pour le matelas M2, que l'augmentation de l'épaisseur de matelas provoque une diminution des coefficients d'efficacité maximaux. Pour expliquer ce phénomène, il faut revenir aux comportements mécaniques. Les résultats des essais triaxiaux ont montré que, pour la même valeur de  $\rho_d = 1,62 \ t/m^3$ , la résistance au cisaillement du matériau M2 est plus faible que celle de M1 (voir Tableau 5).

De plus, des essais complémentaires afin de déterminer l'indice de densité des matelas M1 et M2 ont été effectués. Les résultats trouvés donnent  $I_D = 0,71$  pour M2 et 0,79 pour le

matériau M1. La procédure de ces essais est présentée en détail dans la norme NF P 94-061. Cette diminution de l'indice de densité du matelas M2 est une des raisons qui peut expliquer ce phénomène.

Afin de vérifier cette hypothèse, on a augmenté indice de densité du matériau M2. On a utilisé une dame de 10 cm de diamètre pour compacter légèrement tous les 5cm d'épaisseur de matelas selon une distribution circulaire, comme illustré sur la Figure 44.



Figure 44 – Technique de compactage utilisé pour la mise en place du matériau étalé M2

Le compactage est effectué tout en observant les tassements de l'interface sol/matelas. La Figure 45 présente le tassement moyen de l'interface sol/matelas mesuré au cours du compactage, pour le matelas du type M2 de 10 cm d'épaisseur. Le tassement moyen après le compactage est de l'ordre de 1 mm qui est assez proche du cas du matériau non compacté. De cette manière, l'indice de densité du matelas a été augmenté à  $I_D = 0.91$  ( $\rho_d = 1.67 t/m^3$ ) sans modifier l'état initial des essais.



Figure 45 - Tassement moyen de l'interface sol/matelas pendant et après le compactage

En terme de comportement mécanique, trois essais triaxiaux  $\phi 100 \, mm$  complémentaires ont été réalisés sur le matériau M2 à cet indice de densité ( $I_D = 0.91$ ;  $\rho_d = 1.67 \, t/m^3$ ). Les résultats des essais ont montré que le compactage change la rigidité, caractérisée par le module d'Young E du matériau (Figure 46) et augmente légèrement l'angle de frottement interne (Tableau 23).

	M2 ( $\rho_d = 1,62 t/m^3$ )	M2 ( $\rho_d = 1,67 t/m^3$ )
С	2	1
φ	32	35

Tableau 23 – Valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement interne pour le matelasM2 à deux indices de densité différents.



Figure 46 - Evolution du module d'Young E en fonction de déformation axiale a) M2 -  $\rho_d = 1,62 \ t/m^3$ ; b) M2 -  $\rho_d = 1,67 \ t/m^3$ 

La Figure 47 résume les valeurs des coefficient d'efficacité maximaux obtenues pour le matelas M2 compacté et non compacté en fonction de l'épaisseur du matelas. On observe un changement de la tendance d'évolution du coefficient d'efficacité en fonction de l'épaisseur de matelas. En effet, pour le matelas compacté, le coefficient d'efficacité maximal,  $E_{eff}^{max}$ , est croissant avec l'épaisseur du matelas. De manière logique, avec l'augmentation de la densité, le tassement de l'interface sol/matelas diminue (Figure 48).



Figure 47 - Synthèse des coefficients d'efficacité maximaux obtenus pour le matelas M2 compacté et non compacté en fonction de l'épaisseur du matelas.



Figure 48 - Tassements moyens de l'interface sol/matelas pour le matelas M2 compacté et non compacté en fonction de l'épaisseur de matelas

## 3.3 - Influence du sol analogique

L'effet de transfert de charge se produit lorsqu'il apparaît un tassement différentiel de l'interface entre le matelas situé au dessus de l'inclusion rigide et le sol compressible. Le tassement du sol compressible est donc un des paramètres importants qui interviennent sur les mécanismes de transfert de charge au sein du matelas. Plusieurs travaux de différents auteurs ont montré que le tassement de l'interface sol/matelas constitue un facteur majeur pour développer l'effet de voûte au sein du matelas (Demerdash, 1996 ; Horgan & Sarsby, 2002 ; Chevalier, 2008).

Avec l'objectif d'étudier l'influence du sol compressible, on a utilisé un type de sol analogique dont les caractéristiques mécaniques sont présentées dans l'Annexe 1.

La présence du sol compressible pourrait donc avoir des influences sur les mécanismes de transfert de charge. On a étudié l'influence du sol analogique sur les mécanismes de transfert de charge du matelas, à partir des deux termes : le coefficient d'efficacité et le tassement de l'interface sol/matelas ; des essais sur la configuration géométrique de base (a = 8,2 cm ; s = 55 cm ;  $\alpha = 2,2$  %) pour le matériau du matelas du type M1 et M2, ont été réalisés, sachant que le tassement du sol compressible dépend de sa compressibilité ainsi que son épaisseur. Le rôle du sol analogique est donc mis en évidence en changeant, soit le type du sol analogique (SP30 et/ou SP50), soit l'épaisseur du sol analogique  $h_s$ . Les caractéristiques des essais à réalisés dans cette partie sont présentés dans le Tableau 24.

N0 5	Sol analogique Matelas						α
N° Essai	Туре	$h_s(\mathbf{cm})$	Туре	$h_m$ (cm)	$\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	(mm)	(%)
T1	PS 30	10,5	M1	0	1,62	0	0
T3	PS 30	10,5	M1	10	1,62	82	2,22
T5	PS 30	10,5	M1	20	1,62	82	2,22
T6	PS 30	10,5	M1	30	1,62	82	2,22
T13	PS 30	10,5	M1	10	1,62	0	0
T14	PS 30	20,6	M1	10	1,62	0	0
T16	PS 30	20,6	M1	10	1,62	82	2,22
T17	PS 30	20,6	M1	20	1,62	82	2,22
T18	PS 30	20,6	M1	30	1,62	82	2,22
T25	PS 50	10,5	M1	10	1,62	82	2,22
T26	PS 50	10,5	M2	10	1,67	82	2,22
T27	PS 30	10,5	M2	10	1,67	82	2,22
T27bis	PS 30	10,5	M2	10	1,67	82	2,22

# Tableau 24 - Caractéristiques des essais réalisés pour l'étude de l'influence du solanalogique

#### 3.3.1 - Influence de la compressibilité du sol analogique

L'étude bibliographique de Briançon *et al.* (2004) montre que la compressibilité du sol compressible, caractérisée par le rapport  $\frac{C_c}{1+e_0}$ , sur les chantiers français, varie entre 0,18 et

0,3. L'étude du comportement du sol analogique (Annexe1) montre que la fraction volumique des billes de polystyrène influence principalement la compressibilité du sol analogique. Afin d'évaluer l'influence de la compressibilité du sol analogique, la configuration de référence (matelas du type M1, 10 cm d'épaisseur et inclusion rigide de 82 mm) est utilisée pour deux types de sol analogique SP30 et SP50, qui correspondent à 30 % et 50 % de fraction volumique de billes de polystyrène. La Figure 49 présente l'évolution du coefficient d'efficacité et le tassement moyen de l'interface sol/matelas en fonction de la pression de baudruche pour les deux types de sol analogique.

L'évolution du coefficient d'efficacité pour les deux types de sol analogique est classique. On observe que la phase stabilisée pour le sol analogique SP50 est atteinte plus tôt que pour le sol

analogique SP30. Le coefficient d'efficacité maximal pour le sol analogique SP50 est de l'ordre de 12,5 % contre 11,2 % pour SP30. En revanche, le sol analogique SP50 entraîne des tassements moyens de l'interface sol/matelas plus importants. A 100 kPa de chargement, le tassement moyen de l'interface sol/matelas pour le sol analogique SP50 est de l'ordre de 14,1 mm, contre 10,5 mm pour le sol analogique SP30.



Figure 49 – Influence de la compressibilité du sol analogique (cas du matelas M1) sur le coefficient d'efficacité (a) et sur tassement moyen de l'interface sol/matelas (b)

On retrouve des évolutions similaires dans le cas de l'utilisation d'un matelas de type M2 (Figure 50).



Figure 50 - Influence de la compressibilité du sol analogique (cas du matelas M2) sur le coefficient d'efficacité (a) et sur tassement moyen de l'interface sol/matelas (b)

En ce qui concerne la répartition du tassement de l'interface sol/matelas, on présente sur la Figure 51 et la Figure 52 les résultats pour les deux types de sol analogique. Pour un matelas de faible l'épaisseur, le tassement différentiel à l'interface sol/matelas est toujours important. Dans le cas du sol analogique SP50, l'effet d'accrochage est bien observé et l'effet de bord est également important.



Figure 51 - Répartition de tassements de l'interface sol/matelas pour le sol analogique SP30



Figure 52 - Répartition des tassements de l'interface sol/matelas pour le sol analogique SP50

Ces résultats nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- la compressibilité n'a pas d'influence significative sur la valeur du coefficient d'efficacité. La différence entre les valeurs du coefficient d'efficacité maximal est de l'ordre de 1 % ;
- pour le sol analogique le plus compressible, la phase stabilisée arrive plus tôt ;
- le tassement différentiel de l'interface sol/matelas est toujours important pour les deux types de sol analogique.

#### 3.3.2 - Influence de l'épaisseur du sol analogique, h.

La formule classique pour calculer le tassement du sol compressible montre que l'amplitude du tassement est proportionnelle à l'épaisseur du sol analogique. Pour cette raison, on a réalisé des essais pour le même sol analogique du type SP30 pour deux épaisseurs différentes (10,5 cm et 20,6 cm). La variation de l'épaisseur du sol analogique ne change pas le comportement mécanique du sol analogique, mais elle va changer l'amplitude des tassements sous une contrainte donnée.

La Figure 53.a présente le tassement moyen final de deux massifs non renforcés de sol analogique du type SP30 et pour deux épaisseurs (10,5 cm et 20,6 cm), en fonction de la pression de baudruche. On observe une augmentation très importante du tassement moyen de l'interface sol/matelas quand l'épaisseur du sol analogique est doublée ( $h_s = 20,6 \text{ cm}$ ).



*Figure 53 - Tassement du massif de sol analogique sans renforcement par inclusion rigide* 

#### a) tassements moyens finaux ; b) courbe contrainte - déformation

Mais si l'on trace les courbes de déformation axiale du sol analogique pour les deux épaisseurs en fonction de pression de baudruche (Figure 53.b), on trouve que les deux courbes sont assez proches jusqu'à 50 kPa de pression de baudruche. Au-delà de cette pression, le cas  $h_s = 20,6 \ cm$ , présente un comportement légèrement plus rigide. En conclusion, la variation de l'épaisseur du sol analogique ne change pas son comportement mécanique, mais elle ne change que l'amplitude des tassements. Les résultats de ces essais nous permettent donc d'évaluer l'influence de l'amplitude du tassement du sol analogique sur les mécanismes de transfert de charge au sein du matelas.

Des essais avec inclusion rigide pour ces deux épaisseurs du sol analogique ont été réalisés. Les paramètres de ces essais sont précisés dans le Tableau24.

La Figure 54 présente l'évolution du coefficient d'efficacité et du tassement moyen de l'interface sol/matelas pour le matelas M1 de 10 cm d'épaisseur.



Figure 54 - Influence de l'épaisseur du sol analogique  $h_s$  (cas du matelas M1,  $h_m = 10 \ cm$ ) sur le coefficient d'efficacité (a) et sur le tassement moyen de l'interface sol/matelas (b)

On observe les mêmes évolutions que celles obtenue lors de l'étude de l'influence de la compressibilité du sol analogique.

- les valeurs maximales du coefficient d'efficacité obtenues pour les deux essais sont quasi identiques, de l'ordre de 11 % pour l'épaisseur du matelas de 10 cm ;
- le tassement moyen de l'interface sol/matelas est plus important pour l'épaisseur du sol analogique de 20,6 cm ;
- la stabilisation de  $E_{eff}$  à sa valeur maximale arrive plus tôt pour le cas  $h_s = 20,6$  cm que pour le cas  $h_s = 10,5$  cm.

La Figure 55 synthèse les valeurs maximales des coefficients d'efficacité obtenues pour les trois épaisseurs du matelas testées.



Figure 55 - Synthèse des valeurs de  $E_{eff}^{max}$  obtenues pour les épaisseurs  $h_s = 10,5 \ cm$  et 20,6 cm

On observe que pour les trois épaisseurs de matelas, la différence entre les valeurs du coefficient d'efficacité maximal obtenues est d'environ 2% pour les deux épaisseurs du sol analogique.

D'une autre part, la Figure 56 présente l'évolution du coefficient d'efficacité en fonction du tassement moyen de l'interface sol/matelas, pour le matelas M1 de  $h_m = 10$  cm, mais pour des caractéristiques du sol analogique différentes. Les trois courbes sont assez proches sauf l'essai T25, notamment elles atteignent la phase stabilisée pour une même valeur de tassement moyen. Donc pour un matelas donné, la phase stabilisée dépend de l'ordre de grandeur du tassement de l'interface sol/matelas.


Figure 56 - Evolution du coefficient d'efficacité en fonction du tassement moyen, pour le matelas M1 d'épaisseur 10 cm

## 3.3.3 - Conclusions partielles

Les résultats de cette étude nous montrent que le changement des caractéristiques géométriques et mécaniques du sol analogique n'a pas d'influence significative sur le mécanisme de transfert de charge, traduit par le coefficient d'efficacité. En revanche, ces changements interviennent sur l'allure de la courbe d'évolution du coefficient d'efficacité en fonction de la pression de baudruche. En effet, l'amplitude du tassement de l'interface sol/matelas peut être reliée au passage à la phase stabilisée du coefficient d'efficacité et ne dépend que des caractéristiques du matelas.

## 3.4 - Evolution du coefficient d'efficacité lors de phases de décharge – recharge

On a réalisé deux cycles de charge/décharge afin d'observer le comportement du matelas sous le charge cyclique. Pour le premier cycle, il est intéressant de noter la forte évolution mise en évidence entre charge et décharge sur les valeurs de  $E_{eff}$ , qui sont significativement plus faibles à la décharge qu'à la charge (Figure 57a). La diminution du coefficient d'efficacité à la phase de décharge montre le comportement irréversible du matelas. Cela est éventuellement

lié au comportement plastique du matelas lorsqu'on charge jusqu'à 100 kPa. D'autre part, le comportement du sol analogique est différent entre les processus charge et décharge. Après le premier cycle, la configuration du modèle est changée, le sol analogique regonfle mais ne revient plus à la position initiale. Le coefficient d'efficacité obtenu au deuxième cycle est légèrement plus faible que ceux obtenus au premier cycle charge/décharge (Figure 57b). Cette remarque est importante pour l'étude du comportement sous un chargement cyclique du matelas. C'est intéressant de continuer à réaliser plusieurs cycle de charge/décharge afin de trouver la stabilité du coefficient d'efficacité sous le chargement cyclique.



Figure 57 - Evolution du coefficient d'efficacité sur une phase charge/décharge/recharge

a) premier cycle ; b) premier et deuxième cycles

## CONCLUSIONS

L'étude paramétrique présentée dans ce chapitre a permis de mettre en évidence les avantages de la technique de renforcement d'un sol compressible par inclusions rigides. Le mécanisme de transfert de charge, qui se produit au sein du matelas, est influencé par les paramètres suivants :

- o épaisseur du matelas ;
- o taux de recouvrement ;
- o caractéristiques du matériau constitutif du matelas : le diamètre moyen, la granulométrie, l'état de compacité;
- o caractéristiques du sol compressible.

Les résultats expérimentaux présentés montrent qu'il peut y avoir une influence « couplée » des paramètres physiques et mécaniques des matériaux constitutifs du matelas

Les expérimentations menées sur le modèle physique 1 g ont permis de mettre en évidence l'influence de ces paramètres. Les principales conclusions sont synthétisées ci-dessous :

- La comparaison entre les cas non renforcé et renforcé par inclusion rigide du massif a montré que la présence de l'inclusion rigide diminue le tassement absolu de l'interface sol/matelas. Toutefois, pour le matelas de faible l'épaisseur, le tassement différentiel de l'interface sol/matelas est plus important.
- L'augmentation de l'épaisseur du matelas et du taux de recouvrement favorise la concentration de charge vers l'inclusion rigide, ce qui est quantifié par le coefficient d'efficacité maximal obtenu au cours de chargement. De plus, elle permet de diminuer le tassement moyen de l'interface sol/matelas ainsi que le tassement différentiel à l'interface sol/matelas.
- En terme du coefficient d'efficacité maximal, l'augmentation du taux de recouvrement est prépondérante par rapport à l'augmentation de l'épaisseur du matelas. En revanche, en terme d'homogénéité des tassements à l'interface sol/matelas, l'augmentation de l'épaisseur du matelas a une influence prépondérante par rapport au taux de recouvrement.

- ✤ Une uniformisation du tassement de l'interface sol/matelas et de la surface du matelas est observée lorsque le rapport  $h_m/(s-a)$  est supérieur à 0,50.
- L'étude de l'influence du diamètre du matériau constitutif du matelas a montré que plus le diamètre moyen du matériau est grand, plus le coefficient d'efficacité est important.
- Le matériau uniforme permet de mieux concentrer la force vers l'inclusion rigide que le matériau étalé.
- Pour un matelas étalé de faible densité, on n'observe pas l'influence de l'épaisseur du matelas sur le coefficient d'efficacité.
- Le changement des caractéristiques géométriques, mécaniques du sol analogique n'a pas d'influence significative sur le coefficient d'efficacité. Par contre, l'augmentation de la compressibilité ainsi que de l'épaisseur du sol analogique provoque un passage plus rapide à la phase stabilisée.
- Une réduction, en terme du coefficient d'efficacité, est observée lorsqu'on réalise des phases de charge et décharge successive.

## REFERENCES

Briançon L., 2007. Rapport final de l'expérimentation de Saint Ouen l'Aumône, 46 p.

Briançon L., Kastner R., Simon B., Dias D., 2004. Etat des connaissances - Amélioration des sols par inclusions rigides. In: Dhouib A., Magnan J.-P., Mestat P. Eds. Proc. of Symp. Int. sur l'Amélioration des Sols en Place. ASEP-GI, 9-10 septembre 2004, Paris. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.

Dinh et al. , 2009. Rapport ASIRI - N° 3.09.3.13, 36p.

Magnan J. P., 1994. Methods to reduce the settlement of embankments on soft clay: a review. In: Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments. ASCE Geotechnical Special Publication, pp. 77-91.