

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Expérimentations en vraie grandeur et sur modèles réduits du renforcement des sols par inclusions rigides

Full-scale and small-scale experiments of ground improvement by pile-supported earth platform

L. Briançon, C. Plumelle

Conservatoire national des arts et métiers, Paris, France

J. Canou, A.Q. Dinh, J.C. Dupla

Université Paris-Est, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, UR Navier-CERMES, Marne-la-Vallée, France

G. Baudouin, L. Thorel, G. Rault

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes, France

RÉSUMÉ

Le renforcement des sols par inclusions rigides est une technique intéressante qui apporte une solution efficace en termes de réduction de tassement, de temps de construction et de coût. La combinaison d'inclusions verticales rigides et d'une plateforme granulaire améliore le transfert de charge de l'ouvrage vers le substratum. Le projet national français A.S.I.R.I. a été initié pour améliorer les connaissances dans ce domaine et proposer des règles de mise en œuvre et de dimensionnement. Dans le cadre de ce projet, des modélisations physiques, numériques et des expérimentations en vraie grandeur ont été réalisées. Cette communication présente les différentes approches expérimentales mises en œuvre pour mieux cerner les divers aspects du fonctionnement de ces renforcements par inclusions verticales.

Mots clés : inclusions rigides, expérimentations in situ, centrifugeuse, chambre d'étalonnage, remblai renforcé

ABSTRACT

Ground improvement by pile-supported earth platform is an interesting technique to provide an effective solution which reduces settlements, construction time and cost. The combination of an earth platform and a pile group could provide the load transfer mechanism from a slab foundation to a deep bearing stratum.

The French national project (ASIRI) was launched to promote a design and construction guideline of piled embankment. Physical and numerical modelling and full-scale experiment were carried out in this frame. This paper presents many experimental approaches developed to appreciate the behaviour of piled supported embankment.

Keywords: Piled-supported embankment, full-scale experiment, *centrifuge*, physical 1g axisymmetrical model

1 INTRODUCTION

Le renforcement des sols par inclusions rigides verticales constitue une alternative particulièrement intéressante pour les fondations sur sols moyennement ou fortement compressibles. Cette technique est utilisée dans trois situations principales : renforcement des sols sous des dallages ou fondations de bâtiments industriels, sous des remblais, sous des réservoirs de stockage ou bassins et ouvrages des stations d'épuration (Briançon, 2002).

La technique des inclusions rigides consiste à transférer la charge due à l'ouvrage renforcé vers une couche de sol plus résistante. Ce transfert se fait par la combinaison d'inclusions rigides traversant le sol compressible et d'une plate-forme granulaire ou en sol traité, renforcé ou non par géosynthétiques et disposée entre le réseau d'inclusions et l'ouvrage. Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement et même deux normes (une britannique et une allemande), mais elles sont basées sur des modèles empiriques et sont très conservatrices.

A partir de ce constat, un projet national français A.S.I.R.I. (Amélioration des Sols par Inclusions Rigides, www.irex-asiri.fr) a été initié pour améliorer les connaissances sur le renforcement par inclusions rigides verticales et proposer des règles de mise en œuvre et de dimensionnement. Cette étude repose d'une part sur des études expérimentales et d'autre part sur le développement de modèles numériques visant à simuler le comportement des sols et des éléments de renforcement avec leurs interactions. Ces modèles, validés sur les divers résultats expérimentaux, permettront ensuite de conduire des études paramétriques en vue d'explorer des cas non couverts par

l'expérimentation et de proposer des méthodes de dimensionnement pratiques.

Nous présenterons dans cette communication l'approche expérimentale développée dans le cadre du projet national A.S.I.R.I pour le renforcement de remblai. Mises en œuvre afin de mieux cerner les divers aspects du fonctionnement de ces renforcements par inclusions verticales, les expérimentations ont été conduites à plusieurs niveaux :

- Les expérimentations en vraie grandeur, destinées à cerner le comportement global en conditions réelles. Référence ultime et obligée pour la qualification des diverses approches de calcul, elles ne peuvent cependant répondre à toutes les questions en raison de leurs limites habituelles liées notamment aux problèmes de mesure in situ ainsi qu'aux hétérogénéités des sols naturels.

- Ces expérimentations en vraie grandeur ont été ainsi complétées par diverses approches expérimentales sur modèles réduits, dont les conditions aux limites sont connues, visant à explorer certains aspects particuliers. Les dimensions de ces modèles permettent de multiplier les essais dans de bonnes conditions de reproductibilité et autorisent ainsi plus facilement les études paramétriques.

2 EXPERIMENTATION EN VRAIE GRANDEUR SOUS REMBLAI

L'expérimentation en vraie grandeur de renforcement de remblais sur sol compressible par inclusions rigides a été conduite par la chaire de géotechnique du Cnam qui a coordonné les ac-

tions, assuré l'instrumentation et le suivi du chantier avec les partenaires du projet national A.S.I.R.I.

2.1 Site expérimental

Cette expérimentation s'est déroulée de juillet 2007 à janvier 2008 sur un terrain situé en région parisienne et mis à la disposition du projet par le Conseil général de Seine & Marne en attente de l'aménagement de la liaison sud de Chelles.

Différents sondages ont été réalisés pour caractériser la couche compressible : 8 essais pénétrométriques statiques et 2 sondages carottés. Le sol prélevé à partir des deux sondages carottés a été utilisé pour des essais de caractérisation et des essais de compressibilité. Le sol en place est homogène et présente une compressibilité moyenne ($Cc/(1+e_0)$ variant de 0,1 à 0,25). Des essais de laboratoire ont permis d'identifier une argile peu plastique plus ou moins sableuse. La hauteur de la nappe a été contrôlée à l'aide d'un piézomètre et se situe à -2 m. L'épaisseur de la couche compressible varie entre 8 m et 10,5 m sous la zone expérimentale (Figure 1).

2.2 Description des plots

Quatre remblais expérimentaux de 5 m de hauteur ont été mis en œuvre sur ce site (Figure 1) :

- plot 1R de référence non renforcé par inclusions rigides,
- plot 2R renforcé par inclusions rigides,
- plot 3R renforcé par inclusions rigides et par une nappe géotextile (TenCate Rock Pec 75/75) à la base du remblai,
- plot 4R renforcé par inclusions rigides et par deux géogrids (Miragrid 55/55) à la base du remblai.

Chaque plot est constitué du corps du remblai de 64 m² et de deux talus de pente 3/2. Les quatre plots sont alignés dans un axe NE-SW. Les plots sont distants de 2 m. Les plots 1R et 2R disposent d'un troisième talus dans l'axe NE-SW de pente 3/2. Seuls les talus NW des plots sont renforcés par inclusions rigides. L'instrumentation a été particulièrement installée sous le corps du remblai et les talus NW.

Les trois plots renforcés par inclusions rigides contiennent 16 inclusions chacun sous le corps de remblai et 16 inclusions sous le talus renforcé. Les inclusions en béton, de 38 cm de diamètre, forment un maillage carré de 2 m de côté ; elles sont refoulantes et ancrées de 50 cm dans le substratum. La plateforme, d'une épaisseur variant entre 40 et 50 cm selon le plot, est constituée d'une grave industrielle primaire 0/31,5 recyclée mixte (déconstruction chaussée et béton) compactée. Le remblai est constitué d'un marno-calcaire de classification GTR A1-B5.

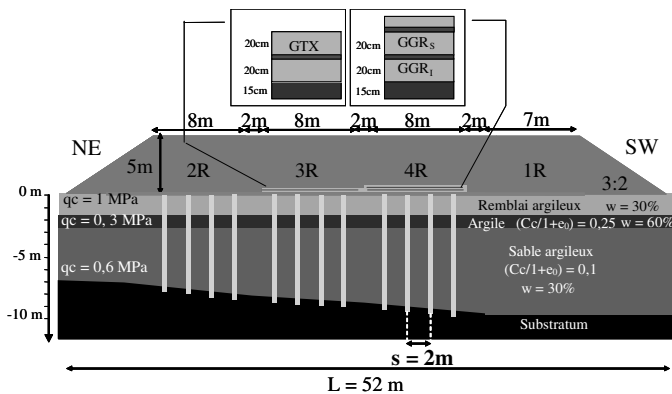


Figure 1. Descriptions des quatre plots expérimentaux

2.3 Instrumentation

Plus de 70 capteurs ont été mis en place dans les quatre plots expérimentaux, nous présenterons dans cette communication uniquement les capteurs positionnés sous le corps de remblai. Des capteurs de pression totale (EPC) positionnés au niveau des

têtes d'inclusions et au-dessus de la plate-forme granulaire mesurent les reports de charge. Le tassement du sol compressible est mesuré à l'aide de tassomètres magnétiques en forage (TM). Le tassement des têtes d'inclusions, du sol à la base du remblai et dans la plate-forme de transfert de charge des plots renforcés par géosynthétiques est mesuré à l'aide de transmetteur de pression pour mesure de niveau (T). A la base du remblai, dans les plots renforcés, ces capteurs sont positionnés de telle sorte que l'on puisse mesurer le tassement différentiel sur la diagonale et sur un côté de la maille centrale. Les déformations des nappes géosynthétiques sont mesurées à l'aide de capteurs de déformation à fibres optiques intégrées dans une bande de nappe géosynthétique. Ce dispositif, le Geodetect, permet de mesurer avec une grande précision des déformations locales.

2.4 Mesure du transfert de charge

Le transfert de charge vers les têtes d'inclusions se fait en grande partie pendant la mise en œuvre du remblai puisque 97 % de la charge finale est appliquée sur les têtes à la fin du chargement.

Dans le plot 2R, au niveau de la tête d'inclusion, la contrainte mesurée (= 590 kPa) est très inférieure à la valeur représentant un report total de la charge de la maille (= 3350 kPa) sur l'inclusion. Cette contrainte augmente rapidement en profondeur (= 920 kPa à 50 cm de la tête d'inclusions). Cette augmentation de contrainte dans l'inclusion est due à un transfert de charge qui se fait par frottement dans la couche superficielle (remblai argileux et plate-forme de trafic) dont les caractéristiques mécaniques semblent permettre une bonne participation du sol support aux mécanismes de transfert de charge.

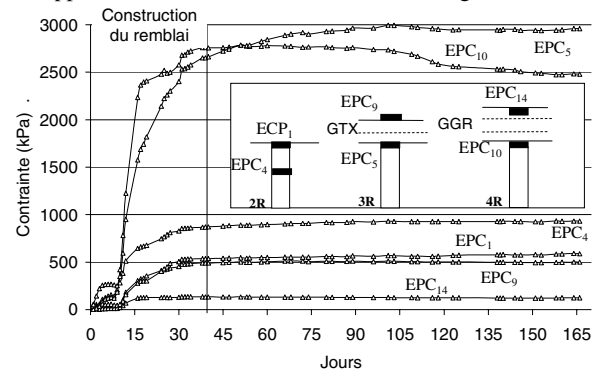


Figure 2. Transfert de charge

Le transfert de charge vers les têtes d'inclusions est significativement plus grand dans les plots disposant d'une plate-forme granulaire renforcée par des nappes géosynthétiques puisque la contrainte mesurée sur les têtes d'inclusions atteint des valeurs de l'ordre de 3000 kPa (Figure 2, EPC₅) dans le plot 3R et 2500 kPa (Figure 2, EPC₁₀) dans le plot 4R (Figure 2). Pour ces deux plots, la contrainte mesurée sur le sol est inférieure à 50 kPa. On note que les plateformes de transfert de charge se comportent différemment selon la nature du renforcement géosynthétique. En effet, la contrainte mesurée au droit des têtes d'inclusions au dessus de la plateforme de transfert de charge est plus grande dans le plot 3R ($\sigma_{EPC9} = 510$ kPa) que dans le plot 4R ($\sigma_{EPC14} = 130$ kPa). Il est à noter que la valeur mesurée à la base du remblai au droit des inclusions rigides dans le plot 2R ($\sigma_{EPC1} = 590$ kPa) est comparable à celle mesurée à la base du remblai au droit des inclusions rigides dans le plot 3R ($\sigma_{EPC9} = 510$ kPa). Dans le plot 3R, la contrainte directement mesurée sur les têtes d'inclusion atteint sa valeur maximum quelques jours après la construction du remblai puis se stabilise. Dans le plot 4R, il y a redistribution de la contrainte vers le sol puisque la contrainte mesurée par le capteur EPC₁₀ décroît après avoir atteint sa valeur maximum. L'efficacité E,

rapport entre la charge mesurée sur une tête d'inclusion et la charge appliquée sur une maille, varie ainsi entre 18% pour le plot 2R, 75% pour le plot 4R et 96% pour le plot 3R.

2.5 Mesure du tassement

Les mesures du tassement, au niveau du terrain naturel, par les transmetteurs de pression pour mesure de niveau (T) et la première bague magnétique des deux tassomètres (TM) mettent en évidence une très bonne concordance des mesures. Le plot non renforcé (1R) atteint un tassement de 24 à 26 cm. Le tassement du plot renforcé (2R) est significativement réduit de près de 60 % à la base du remblai. Cette réduction de tassement est aussi observée en profondeur : 70 % à -2 m et 80 % à -5 m (Tableau I). Le renforcement n'accélère pas, dans le cas présent, le temps de tassement qui est déjà très court pour le plot non renforcé.

Tableau I. Mesure du tassement dans le sol compressible

Plot	TN		-2m (TM)	-5m (TM)	-8m (TM)
	TM	T			
1R	266 mm	247 mm 240 mm	169 mm	73 mm	2 mm
2R	109 mm	105 mm	50 mm	17 mm	0 mm

Les figures 3, 4 et 5 présentent respectivement le profil du tassement sur la diagonale d'une maille et sur le côté d'une maille dans les plots 2R, 3R et 4R à différentes dates (28 août, 04 septembre 2007, 11 septembre 2007, 19 septembre 2007 (fin de la construction du remblai), 08 octobre 2007, 22 novembre 2007 et 4 janvier 2008).

Dans le plot 2R, le tassement de l'inclusion est de l'ordre de 8 mm (Figure 3). Le tassement du sol présente un profil très plat jusqu'à 30 cm de la périphérie de l'inclusion (Figure 3). Dans cette zone proche de l'inclusion, nous ne pouvons pas définir le profil exact du tassement car il n'y a qu'un capteur positionné à 10 cm de la périphérie de l'inclusion. Cependant le tassement différentiel de deux capteurs consécutifs met en évidence un phénomène d'accrochage du sol au moins sur les 10 premiers centimètres voisins de la périphérie de l'inclusion.

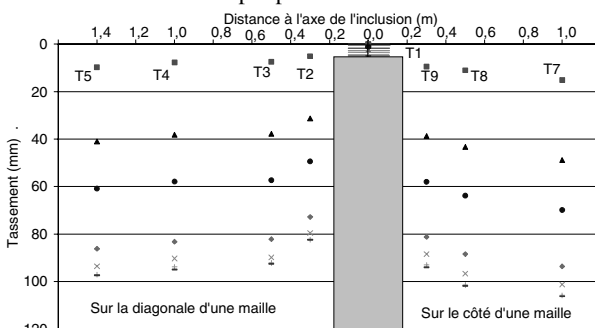


Figure 3. Tassement dans le plot 2R

Les plots renforcés par une plateforme granulaire (3R & 4R) présentent des profils de tassements un peu différents de ceux observés sur le plot 2R. Pour les plots avec plateforme, on observe un plus grand tassement des inclusions (31 mm pour 3R et 28 mm pour 4R) en adéquation avec les niveaux de contrainte appliquée sur les inclusions (Figures 4 & 5). Dans les deux cas, le tassement mesuré à proximité de l'inclusion rigide est légèrement supérieur à celui mesuré par les capteurs plus éloignés des inclusions rigides. Cette différence peut être attribuée à un confinement du sol à la périphérie de l'inclusion dû à la mise en tension des nappes géosynthétique dans cette zone. Le tassement différentiel entre le sol et les inclusions se produit pendant la mise en œuvre du remblai, ensuite ce tassement différentiel se stabilise et le sol tasse comme l'inclusion rigide.

Les plots renforcés réduisent nettement le tassement compté à partir du début de la construction du remblai ou à partir de la

fin de la mise en œuvre du remblai. La comparaison entre le tassement mesuré dans le plot 2R et ceux des plots 3R et 4R montre toute l'importance du rôle jouée par une plateforme de transfert de charge. La combinaison de cette plateforme (qui transfère la charge vers les inclusions) et d'un faible ancrage des inclusions permet d'obtenir un tassement différentiel moindre au niveau des têtes d'inclusions. Ce tassement différentiel est un paramètre dimensionnant, notamment lorsque le remblai est de faible épaisseur. Il est à noter que bien que l'efficacité E du plot 3R soit supérieure à celle du plot 4R, le tassement différentiel est plus faible dans le plot 4R.

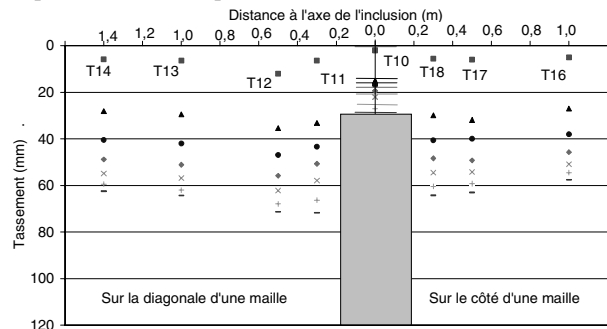


Figure 4. Tassement dans le plot 3R

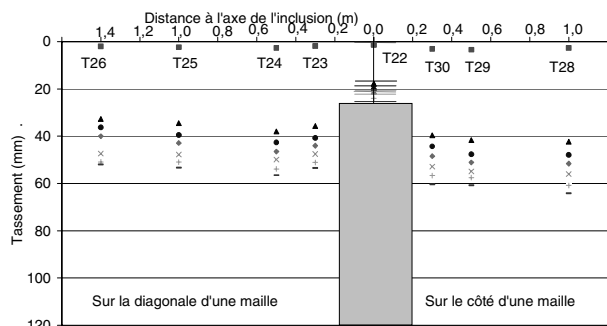


Figure 5. Tassement dans le plot 4R

2.6 Déformation des nappes géosynthétiques

Les mesures de déformation de la nappe géotextile du plot 3R sont effectuées en 5 points sur la diagonale d'une maille (Figure 6a) et sur le côté d'une maille (Figure 6b). De par la symétrie des mesures, on constate que l'instrumentation est adaptée à la mesure (Figure 6) ; toutefois on peut supposer que des glissements entre la bande de Géodetect et la nappe géotextile sont possibles et ainsi la mesure peut être inférieure à la déformation réelle de la nappe. On observe que la nappe géotextile est très peu sollicitée lors du compactage de la plate-forme. A la suite de la mise en œuvre du remblai, la nappe géotextile se déforme principalement au niveau des inclusions rigides, elle est beaucoup moins sollicitée au droit du sol compressible. Enfin on note que les déformations sont plus importantes dans le sens des renforts, c'est-à-dire sur le côté de la maille.

La figure 7 présente les mesures de déformation dans le plot 4R des deux géogrilles après la mise en œuvre de la plateforme de transfert de charge et après la mise en œuvre du remblai. Ces mesures sont effectuées en 5 points sur la diagonale d'une maille de la géogrille inférieure (Figure 7a) et supérieure (Figure 7b). Comme pour les mesures réalisées dans le plot 3R, l'instrumentation semble bien adaptée à la mesure. Les géogrilles semblent plus sensibles au compactage que le géotextile. La géogrille inférieure se déforme plus lors de la mise en œuvre de la plateforme granulaire puisqu'elle subit plus de passes de compactage. Lors de la mise en œuvre du remblai, on constate que les géogrilles se déforment principalement vers les inclu-

sions bien que cette déformation reste faible, et qu'elles ne sont pas de tout sollicitées au droit du sol.

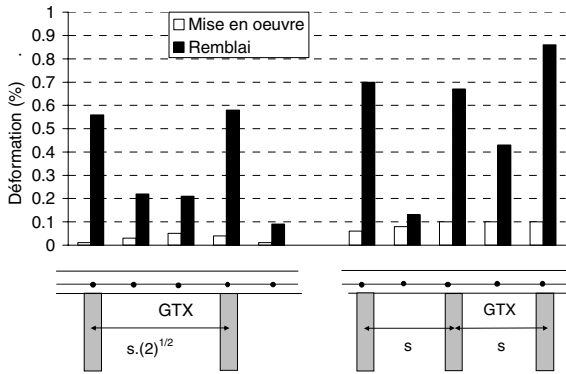


Figure 6. Déformation de la nappe géotextile

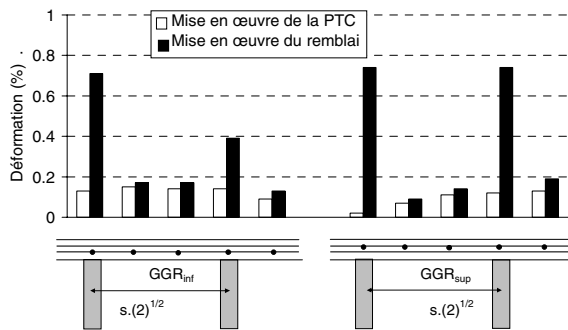


Figure 7. Déformation des géogrilles

2.7 Analyse

Le transfert de charge se fait par une combinaison de mécanismes dépendant de la présence ou non de certains éléments de renforcement.

Dans le cas de l'absence d'une plateforme de transfert de charge, la répartition de la charge vers les têtes d'inclusions se fait à la base du remblai. Ces mécanismes de transfert de charge ne permettent pas d'obtenir une efficacité importante au niveau des têtes puisque seulement 1/6^e du poids de la maille est repris par l'inclusion ; le sol support est donc assez fortement chargé. Un second transfert de charge vers les inclusions est fait par frottement. Ce transfert est d'autant plus important que la couche superficielle du sol est de bonne qualité. Ce transfert de charge nécessite un déplacement important du sol au niveau des têtes et donc un tassement différentiel sol / inclusion inacceptable dans le cas d'un remblai de faible épaisseur. Dans le cas traité (remblai d'une épaisseur de 5 m), on peut estimer qu'un plan d'égal tassement se situe dans le remblai même si nous n'avons malheureusement pas installé les moyens pour le mesurer.

La présence d'une plateforme de transfert de charge améliore très nettement le transfert vers les inclusions. N'ayant pas réalisé de plot avec plateforme granulaire sans géosynthétique, il n'est pas possible d'identifier la part du rôle des nappes géosynthétiques.

On peut d'ores et déjà remettre en question la pertinence du paramètre E pour évaluer l'efficacité de ces dispositifs. En effet, ce paramètre a été (historiquement) défini à la suite d'essais en laboratoire pour lesquels le sol sous-jacent n'était pas pris en compte. Or s'il existe une couche de sol de bonne qualité en tête du profil permettant un transfert complémentaire de la charge, l'efficacité sera moindre mais le tassement différentiel sera diminué, ce qui a priori est le but recherché.

Le site expérimental présente un tassement après mise en œuvre du remblai relativement faible ; il est nécessaire, lors du dimensionnement, d'imposer un critère de tassement après mise

en œuvre du remblai afin de tirer bénéfice du renforcement. Le renforcement doit permettre d'obtenir un tassement maîtrisé et stabilisé à la fin de la mise en œuvre du remblai et doit être suffisamment « souple » pour éviter des tassements différentiels trop importants au niveau des têtes d'inclusions.

Cette expérimentation en vraie grandeur a permis d'identifier certains mécanismes du transfert de charge en fonction des éléments du renforcement. L'influence des paramètres géométriques (maillages, épaisseur de la plateforme granulaire...) ne peut pas être vérifiée sur une expérimentation en vraie grandeur pour des raisons économiques entre autre. Il est donc nécessaire de tester ces différentes configurations en laboratoire.

3 MODELISATION EN CENTRIFUGEUSE

Les modèles réduits permettent, en suivant certaines règles de similitude, de reproduire à une échelle réduite certains aspects du comportement des ouvrages géotechniques en vraie grandeur. Si le modèle est à l'échelle 1/N, il doit être sous une accélération N fois supérieure à la pesanteur terrestre. Entre le modèle réduit et le prototype (en vraie grandeur), les déplacements (et les longueurs) sont réduits en 1/N, tandis que les pressions (et les contraintes) sont identiques et que les forces sont réduites d'un facteur 1/N² (e.g. Corté, 1989).

Le modèle réduit comporte un sol compressible renforcé par un groupe, de maille carrée, de neuf inclusions rigides ancrées en pointe, et surmonté d'un matelas granulaire en sable d'Hostun, le tout coiffé d'un réservoir à fond souple permettant la surcharge appliquée à la surface du matelas (Figure 8).

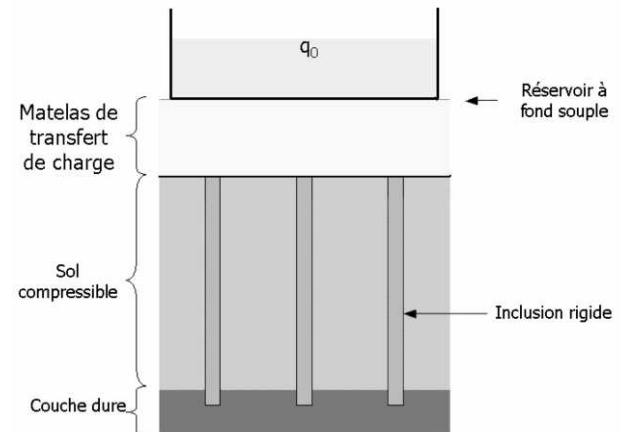


Figure 8. Schéma de principe

3.1 Géométrie

Le modèle physique, d'un encombrement total de 1,5 m, est reconstitué dans un conteneur cylindrique de 0,9 m de diamètre. Ses dimensions (Tableau II) ont été établies en tenant compte des cas courants (Briançon, 2002) et de l'espace disponible dans la nacelle de la centrifugeuse.

Tableau II. Dimensions de l'ouvrage en prototype et en modèle réduit

	Prototype	Modèle
Diam. inclusion	0,50 m	18 mm
Dist. entre inclusion	2 et 2,50 m	72 et 90 mm
Taux de recouvrement, α^*	3,14 et 4,91 %	
Long. d'inclusion	10 m	360 mm
Haut. de matelas	$0,5 < H_M < 1,5$ m	$18 < H_M < 54$ mm
Haut. de surcharge (remblai)	$5 < H_R < 10$ m	$180 < H_R < 360$ mm

* α : rapport de la section cumulée des inclusions sur la surface de sol renforcé

Le fond du conteneur est perforé de 18 trous permettant l'installation de 2 groupes d'inclusions rigides dont le taux de recouvrement est respectivement $\alpha = 3,14\%$ et $\alpha = 4,91\%$. Les deux groupes sont espacés et éloignés des parois du conteneur, afin de minimiser les effets de bords. Le modèle est réalisé à l'échelle 1/27,8. La hauteur du matelas granulaire est, en prototype de 0,5 m, 1 m et 1,5 m. La surcharge (160 kPa au maximum) est appliquée en remplissant d'eau une baudruche en caoutchouc plaquée sur la paroi intérieure du conteneur.

3.2 Sols modèles

Le sol compressible est modélisé par un mélange de 80 % d'argile kaolin Speswhite et de 20 % sable de Fontainebleau, pour lequel on a : $C_c / (1 + e_0) = 0,13$

Le matelas granulaire de transfert de charge est constitué d'un mélange de 5 fractions granulaires de sable d'Hostun (HN38, HN34, HN31, HN04/08, HN06/1). Le matériau a pour caractéristiques principales un $d_{max} = 1$ mm, une granulométrie telle que $C_U = 3,52$ et des grains anguleux.

Des essais de caractérisation mécanique (essai triaxial, boîte de cisaillement direct) ont permis de déterminer l'angle de frottement interne $\phi'_{max} = 42^\circ$ pour une masse volumique sèche $\rho_d = 1,69$ Mg/m³.

3.3 Instrumentation

Le modèle réduit est instrumenté dans les zones renforcées par les groupes d'inclusions rigides, et dans le secteur neutre (non renforcé) : capteurs de pression interstitielle, capteurs de force dans les inclusions (sur 4 niveaux) et capteurs LVDT. Ces derniers, placés dans le réservoir de surcharge mesurent le tassement à la surface du matelas de transfert de charge. Ils sont positionnés, d'une part dans le secteur neutre, afin d'obtenir le tassement du sol non renforcé, et d'autre part sur les groupes : au droit de 3 inclusions (Angle, Bord et Centre) et entre les inclusions (Figure 9).

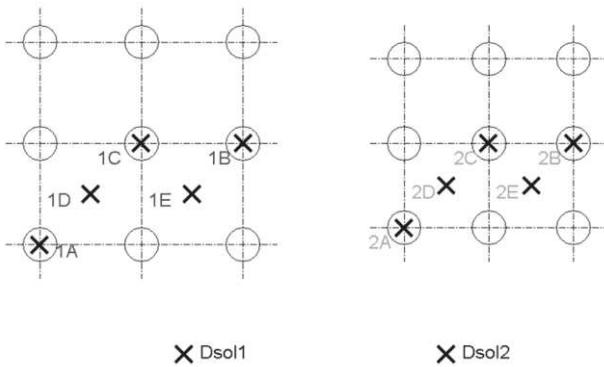


Figure 9. Instrumentation des groupes d'inclusions (implantation des LVDT en surface du matelas de transfert)

3.4 Programme de chargement

Pour chaque hauteur de matelas, après une phase de consolidation sous poids propre en centrifugeuse, deux paliers de surcharge ont été appliqués successivement (112 kPa et 160 kPa).

3.4.1 Consolidation en centrifugeuse

Pour l'ensemble des essais, le massif est consolidé au niveau de G (27,8) pendant une période de 5 heures en moyenne. Durant cette période, la consolidation est suivie par la méthode d'Asaoka (Asaoka, 1978) dans le secteur neutre. Pour l'ensemble des massifs, un degré de consolidation $U = 85\%$ est obtenu à la fin de la période de consolidation.

3.4.2 Chargement dû au remblai

Un premier palier de surcharge est maintenu pendant 1h30. Il correspond à une contrainte appliquée sur le matelas de 112 kPa soit 70 % de la surcharge maximum. Ensuite, un deuxième palier est appliqué de 160 kPa, ce qui correspond à une hauteur de remblai « prototype » de 8 à 10 m. On suit l'évolution des tassements dans le secteur neutre afin de conserver ce palier jusqu'à obtenir un degré de consolidation de 80 %, obtenu au bout de 2 h en moyenne. C'est donc la durée du palier n°2.

3.4.3 Reconnaissance au pénétromètre

La reconnaissance pénétrométrique est réalisée en vol, dans le secteur neutre, à différents moments : fin de consolidation, milieu de palier de chargement, fin de palier de chargement. On peut donc suivre l'évolution des caractéristiques mécaniques (q_c , résistance de pointe) du massif de sol compressible, lesquelles sont principalement affectées par l'effet de la surcharge appliquée.

3.5 Résultats

Les efforts mesurés pendant l'essai ne sont pas présentés ici. La mesure des tassements à la surface du matelas est réalisée grâce au dispositif présenté précédemment. On peut donc connaître les tassements pour chaque groupe ainsi que les tassements relatifs par rapport aux tassements dans le secteur neutre. Les premiers nous permettent d'apprécier l'effet du taux de recouvrement α et de la hauteur de matelas H_M , sur les tassements différentiels sur la surface renforcée, les seconds nous donnent une information de l'effet de α et H_M sur la réduction des tassements en surface par rapport à ceux mesurés en secteur neutre. Les tassements sont représentés pour chaque palier de chargement sur un même plan. Les tassements sont représentés à l'échelle prototype.

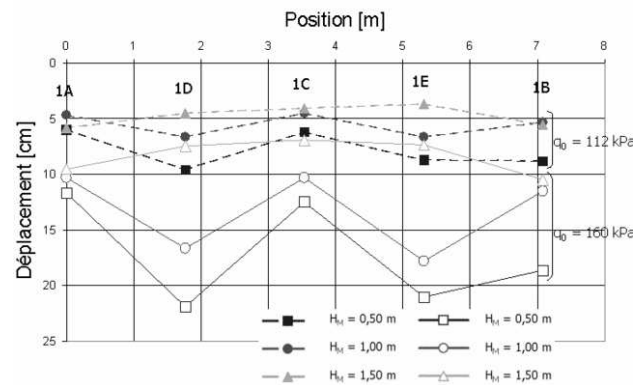


Figure 10. Tassements en fin de paliers, $\alpha_1 = 3,14\%$

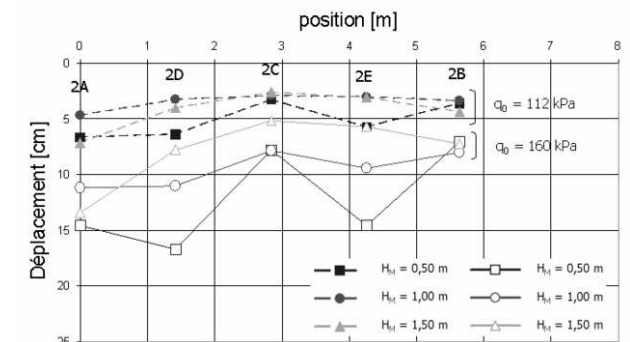


Figure 11. Tassements en fin de paliers, $\alpha_2 = 4,91\%$

Les figures 10 et 11 nous montrent la variation des tassements mesurés en fonction de H_M et de q_0 . On voit que si H_M est inférieur à 1,50 m des tassements différentiels entre la surface au droit des inclusions et la surface entre les inclusions apparaissent. On peut donc penser que la position du plan d'égal tas-

sement pour les deux cas étudiés se situe entre 1,00 m et 1,50 m au-dessus de la surface du massif compressible.

Pour $H_M = 1,50$ m, les tassements à la périphérie de la zone renforcée sont plus importants que ceux au milieu du groupe. Il y a peu de tassement différentiel dans le groupe quel que soit α . Pour H_M inférieur à 1,50 m, le phénomène « boîte à œuf » apparaît. Son amplitude pour une même valeur de q_0 est d'autant plus grande que la hauteur de matelas est faible. Les figures 12 et 13 présentent le tassement relatif pour une surcharge $q_0 = 160$ kPa. Le tassement relatif est égal au rapport du tassement mesuré pour chaque capteur des deux groupes sur la moyenne des tassements relevés dans le secteur neutre en fin de palier.

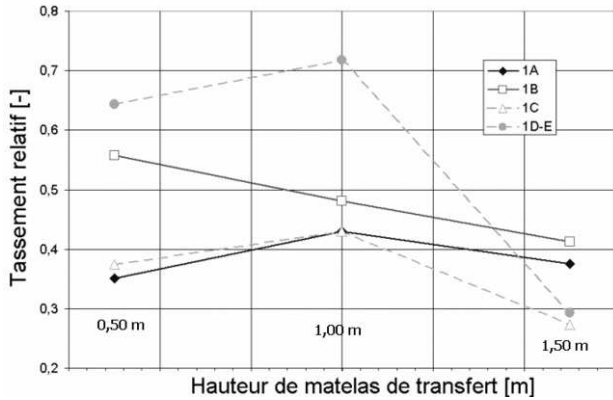


Figure 12. Tassements relatifs (α_1) à la zone neutre, $q_0 = 160$ kPa

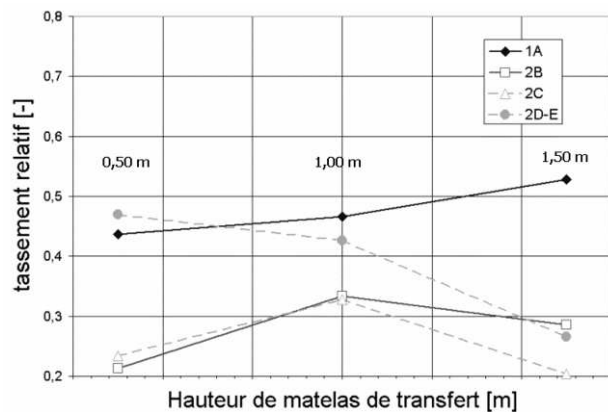


Figure 13. Tassements relatifs (α_2) à la zone neutre, $q_0 = 160$ kPa

Lorsque α augmente, la réduction des tassements est plus importante pour l'ensemble du groupe. L'augmentation de la hauteur du matelas de transfert tend à réduire les tassements relatifs, son influence est plus importante pour un taux de recouvrement plus petit. L'étude des tassements en surface de deux groupes élémentaires d'inclusions rigides avec différents niveaux de surcharge nous a permis de mettre en évidence d'une part l'effet de la hauteur du matelas de transfert de charge sur les tassements différentiels, si H_M augmente, les tassements différentiels diminuent, d'autre part l'effet positif du renforcement de sol sur la réduction des tassements en surface par rapport à un massif compressible non renforcé.

4 MODELE PHYSIQUE 1G DE TRANSFERT DE CHARGE

En vue d'étudier les mécanismes de transfert de charge à l'intérieur du matelas de répartition, un modèle physique 1G a été développé au Cermes. Ce modèle, réalisé à une échelle réduite, a pour objectif de réaliser des essais permettant de mettre en évidence les paramètres les plus significatifs contrôlant les mécanismes de transfert des efforts à travers le matelas, en vue

de mieux comprendre ces mécanismes. Le modèle physique 1G est un dispositif expérimental complémentaire de la centrifugeuse, dans la mesure où l'on ne cherche pas, ici, à réaliser un modèle réduit complet d'un système d'inclusions rigides mais que l'accent est mis sur les mécanismes de transfert dans le matelas, moyennant une simplification de la géométrie axisymétrique et l'utilisation d'un matériau analogique pour simuler le sol compressible (mélange de sable et de billes de polystyrène). L'idée est d'étudier le comportement d'une « cellule élémentaire », prise au sein du maillage d'inclusions rigides. La cellule de référence est constituée, ici, d'une seule inclusion, prise au sein du maillage. Les dimensions de base du modèle ont été choisies de manière à avoir un rapport de réduction de 5 par rapport à l'essai de référence réalisé sur site expérimental.

4.1 Dispositif expérimental et procédure d'essai

Le dispositif expérimental, dont un schéma de principe est présenté sur la figure 14, se compose de trois modules circulaires superposés : un module support, un module réservoir intermédiaire contenant l'inclusion centrale (configuration axisymétrique à une seule inclusion) et un module réservoir supérieur contenant le matelas. Le diamètre intérieur des réservoirs est de 550 mm. Un couvercle vient fermer le réservoir supérieur, afin d'appliquer les chargements, grâce à une membrane gonflable à l'eau (baudruche) et un système de cales dans le cas des essais à pression contrôlée. Le dispositif est conçu de manière à être facilement monté et démonté, module par module. L'inclusion, fixée sur la base du réservoir intermédiaire (Figure 15), peut être équipée de têtes de différents diamètres, permettant d'étudier l'influence du taux de recouvrement sur les comportements observés.

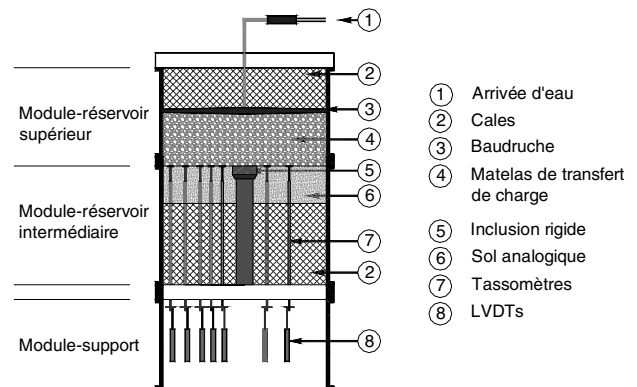


Figure 14. Schéma d'ensemble du dispositif d'essai

Un capteur d'effort situé au-dessous de la tête permet de mesurer l'effort repris par celle-ci au cours d'un essai de chargement. Le reste de l'instrumentation comprend un ensemble de sept tassomètres (tiges coulissantes) situés sur un diamètre (Figure 15c), permettant de suivre le déplacement vertical de l'interface entre le sol analogique et le matelas, grâce à des capteurs de déplacement de type LVDT situés au niveau du module support.

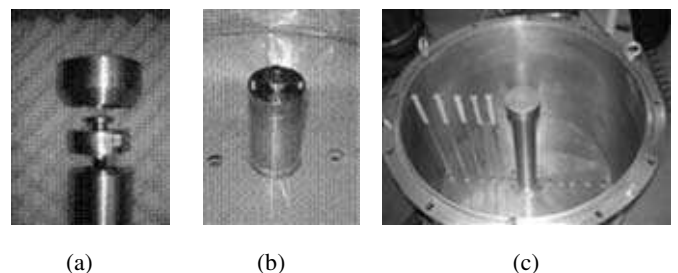


Figure 15. Instrumentation du modèle physique : inclusion rigide et tassomètres

La procédure d'essai consiste à charger le matelas par paliers croissants de pression, en augmentant la pression p_b dans la baudruche, suivant un programme sélectionné au préalable (généralement paliers de 10 kPa, appliqués pendant 15 à 20 minutes), jusqu'à la valeur maximale retenue. Le modèle est ensuite déchargé, là aussi par paliers. Le pilotage de l'essai et l'acquisition des données sont réalisés sous Labview, qui permet, grâce à une servovalve, d'exécuter le programme de chargement à pression contrôlée et de réaliser l'acquisition des données sur les différents capteurs (pression de baudruche, force sur l'inclusion, déplacements des tassomètres).

4.2 Résultats d'essai typique

La figure 16 présente un résultat d'essai typique obtenu pour un matelas composé de gravier d'Hostun HN2/4 (matelas M1), de 15 cm d'épaisseur et de 1,62 de densité, 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 ($\alpha = 2,22$ %). La figure 16.a présente les paliers de chargement appliqués, les figures 16.b et 16.c présentant respectivement l'effort repris par la tête d'inclusion et l'évolution de l'efficacité en fonction du chargement appliquée par la baudruche. On met, en particulier, en évidence une augmentation rapide de l'efficacité lors des premiers paliers de chargement avec une stabilisation de l'efficacité E à une valeur voisine de 13,5 % à partir d'une charge de l'ordre de 30 kPa. Il est aussi intéressant de noter la forte irréversibilité mise en évidence entre charge et décharge, avec des valeurs de E significativement plus faible à la décharge qu'à la charge.

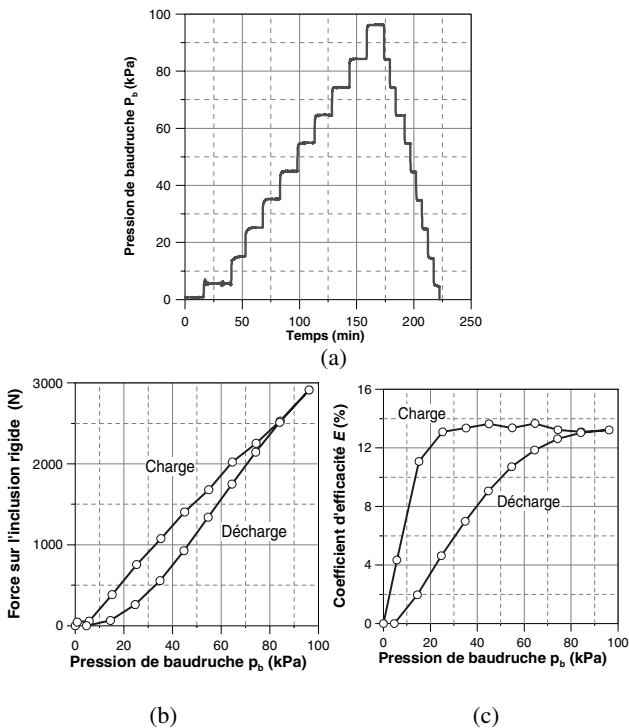


Figure 16. Résultats typiques

En terme des tassements observés lors de cet essai, la figure 17 présente les déformées de l'interface matelas-sol analogique pour les différents paliers de chargement, évaluées à partir des mesures obtenues sur cinq des sept tassomètres, placés sur un rayon. On observe des tassements qui augmentent régulièrement avec l'augmentation de la charge, avec un accroissement qui diminue progressivement, ce qui est cohérent avec les courbes de compressibilité du sol analogique. On constate un effet d'accrochage sur l'inclusion centrale ainsi qu'un effet de frot-

tement à la paroi qui persiste malgré la mise en place d'un dispositif anti-fretage à la paroi (membrane de latex et graisse).

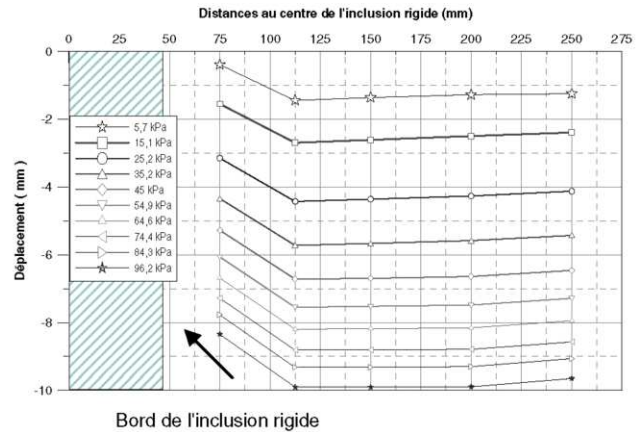


Figure 17. Tassements finaux de l'interface sol-matelas pour chaque palier de chargement

4.3 Influence de l'épaisseur du matelas et du taux de recouvrement

Parmi les paramètres qui peuvent être étudiés à partir du dispositif développé, l'épaisseur du matelas de transfert ainsi que le taux de recouvrement constituent deux paramètres clé du problème, dont nous allons présenter l'influence.

4.3.1 Influence de l'épaisseur du matelas

Différentes hauteurs de matelas (10, 15, 20, 25 et 30 cm) ont été testées, dans le cas d'un matelas uniforme M1 (gravier d'Hostun HN2/4), d'un sol analogique composé du mélange SP30 et d'une inclusion de 82 mm de diamètre ($\alpha = 2,22$ %).

La figure 18 présente les résultats obtenus en termes des coefficients d'efficacité (Figure 18.a) et des tassements moyens observés (Figure 18.b), ceci pour la charge maximale appliquée de 100 kPa. En termes d'efficacité, on met en évidence une augmentation claire de l'efficacité E avec l'augmentation de l'épaisseur du matelas. En termes de tassement moyen, on met en évidence, de manière cohérente avec l'augmentation de l'efficacité, une réduction des tassements observés.

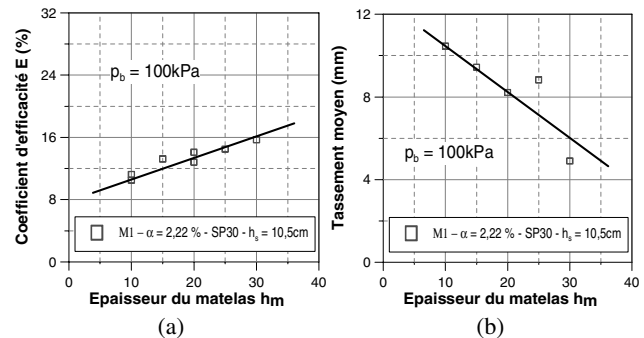


Figure 18. Influence de la hauteur du matelas sur E et sur le tassement moyen de l'interface sol-matelas

4.3.2 Influence du taux de recouvrement

Trois tailles de tête d'inclusion ont été utilisées (82, 116 et 164 mm), correspondant à trois taux de recouvrement : 2,22, 4,44 et 8,88 %, en vue de mettre en évidence l'influence de ce paramètre sur le taux d'efficacité du renforcement et sur les tassements résultants. La figure 19.a présente, pour la charge maximale appliquée de 100 kPa, les résultats obtenus en termes d'efficacité. On met en évidence un net accroissement de E avec l'augmentation de α , dans le cas du matelas HN2/4, pour deux épaisseurs de matelas (10 et 20 cm), ce qui paraît cohérent.

En termes de tassements, on met en évidence (Figure 19.b) une réduction significative des tassements moyens résultants, cohérente avec l'augmentation de l'efficacité.

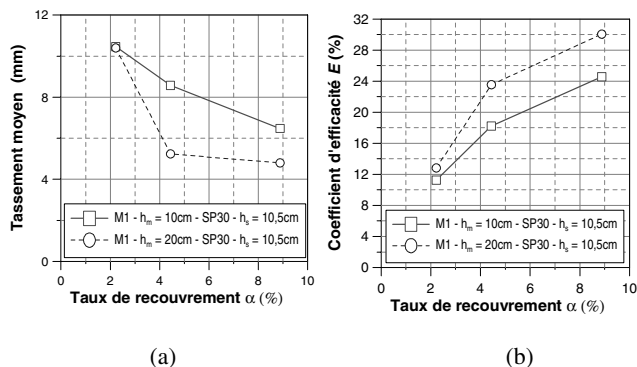


Figure 19. Influence du taux de recouvrement α sur E et sur le tassement moyen de l'interface sol-matelas

Pour une hauteur de matelas de 10 cm, la figure 20 présente, pour différents paliers de charge successifs les tassements moyens obtenus en fonction du taux de recouvrement, normalisés par le tassement moyen mesuré dans le cas du sol non renforcé. Cette figure permet de mettre en évidence une réduction significative des tassements résultant du renforcement par l'inclusion, d'autant plus importante que α est grand.

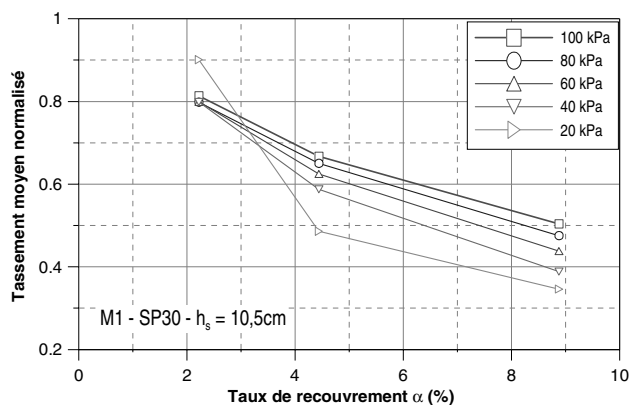


Figure 20. Tassement moyen normalisé de l'interface sol-matelas

5 ANALYSE COMPAREE DES DIFFERENTES APPROCHES EXPERIMENTALES

Les premiers résultats des essais en laboratoire sur modèle 1G sont semblables à ceux que l'on trouve dans la littérature (Low et al., 1994 ; Demerdash, 1996 ; Yun-min, 2007) : l'efficacité augmente et le tassement diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la plate-forme de transfert de charge et du taux de recouvrement. Un des intérêts de l'expérimentation développée dans le cadre de cette étude est la prise en compte du sol compressible par un sol analogue reproduisant son comportement. Les études antérieures se sont concentrées en général sur les mécanismes développés dans la plate-forme de transfert de charge sans forcément modéliser correctement le comportement du sol compressible. Les allures des profils de tassement, mesurés à la chambre d'étalonnage, comparables à celles obtenues dans l'expérimentation en vraie grandeur mettent en évidence une bonne représentation des mécanismes en laboratoire en ce qui concerne le tassement. Il semble cependant que les dimensions de notre appareillage ne permettent pas encore de modéliser fidèlement le transfert de charge.

Les essais à la centrifugeuse ont permis de tester différentes épaisseurs de plate-forme de transfert de charge et d'en déduire la localisation du plan d'égal tassement, qui n'a pas pu être mesuré en vraie grandeur. Comme pour les essais à la chambre d'étalonnage, la réduction du tassement avec l'augmentation de la hauteur de la plate-forme de transfert de charge a aussi été vé-

rifiée. Les essais en vraie grandeur ont mis en évidence que le paramètre E déterminé sur les têtes d'inclusions n'est peut-être pas le plus pertinent pour juger de l'efficacité du dispositif. Il est préférable d'évaluer l'efficacité en termes de tassement et non de report de charge mesuré sur les têtes d'inclusions.

6 CONCLUSIONS

Dans le cadre du projet national A.S.I.R.I., plusieurs études expérimentales très bien instrumentées ont été menées pour mieux comprendre les mécanismes du renforcement des remblais par inclusions rigides. L'importance du rôle de la plate forme de transfert renforcée par des nappes de géosynthétiques a été mise en évidence par les expérimentations en vraie grandeur. Ce rôle primordial de la qualité de la plateforme a été confirmé par les essais en centrifugeuse et en chambre d'étalonnage. En particulier il a été montré qu'il faut une épaisseur minimum de sol au-dessus des têtes d'inclusion par rapport à la maille des inclusions rigides pour que le plan d'égal tassement se situe à l'intérieur de la plateforme ou du remblai afin d'éviter des tassements différentiels au niveau de la surface du terrain (effet boîte à œufs). Parallèlement les essais en centrifugeuse et en chambre d'étalonnage ont confirmé que l'efficacité des inclusions rigides augmente avec le taux de recouvrement, mais sans trouver de maille optimale. L'ensemble des mesures in situ a permis de montrer l'influence de la réaction du sol en place, sous la plate forme, mettant en défaut les hypothèses conservatrices de certaines méthodes de dimensionnement. Pour juger de l'efficacité du renforcement par inclusions rigides, il est préférable de raisonner en terme de tassement, critère généralement dimensionnant, plutôt qu'en efficacité E , rapport entre la charge mesurée sur la tête d'inclusion et la charge appliquée sur la maille. Cette efficacité en réduction de tassement est exprimée par le rapport du tassement du sol avec renforcement sur le tassement du même sol sans renforcement. L'ensemble de ces résultats servira d'étalonnage aux modélisations numériques et à la réflexion menée dans le cadre du projet national ASIRI sur le dimensionnement et la mise en œuvre de ce type de renforcement.

7 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les différents partenaires du projet national A.S.I.R.I., ainsi que le Réseau Génie Civil et Urbain et la DRAST pour leur soutien.

8 REFERENCES

- Asaoka, A. 1978. Observational procedure of settlement prediction, Soil and Foundations, Vol. 18, No. 4.
- Baudouin, G., Rosquoët, F., Canou, J., Dupla, J.C., Thorel, L., Rault, G., Andria-Ntoanina, I. 2008. Caractérisation mécanique d'un mélange de sables d'Hostun. Proceedings of the JNGG08, Nantes, France, 18-19 juin. pp. 491-498.
- Briançon, L. 2002. Renforcement des sols par inclusions rigides. Etat de l'art en France et à l'étranger, Rapport de l'IREX, 171p.
- Corté, J.F. 1989. Model testing-Geotechnical model tests, Proceedings of the XII ICSMFE, Rio, Brazil, 13-18 August, Vol. 4, pp. 2553-2571.
- Demerdash, M.A. 1996. An experimental study of piled embankments incorporating geosynthetic basal reinforcement. Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, Department of civil Engineering, 196p.
- Low, B. K., Tang, S. K. and Choa, V. 1994. Arching in piled embankments, J. Geotech. Engrg., Vol.120, N°11, pp. 1917-1937.
- Yun-min, C., Wei-ping, C. and Ren-Peng, C. 2007. An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and Unreinforced piled embankments, Geotextiles and Geomembranes, Vol.26, N°2, pp. 164-174.