RENFORCEMENT DE SOL COMPRESSIBLE PAR INCLUSIONS RIGIDES SOUS DALLAGE : MODELISATION EN CENTRIFUGEUSE

SOFT SOIL REINFORCEMENT BY STIFF PILES UNDER FLOOR SLAB : CENTRIFUGE MODELLING

Gaëlle BAUDOUIN[1], Gérard RAULT[2], Luc THOREL[3],
1 LCPC, Nantes, France
2 LCPC, Nantes, France
3 LCPC, Nantes, France

RÉSUMÉ – Dans le cadre du projet national ASIRI, une série d'essais sur modèle réduit 3D en centrifugeuse a été réalisée pour étudier le renforcement de sol compressible par inclusions rigides sous dallage. Une étude paramétrique a permis d'observer l'effet de la hauteur de matelas, du taux de couverture d'un groupe élémentaire et du niveau de chargement sur l'efficacité du renforcement.

ABSTRACT – Within the framework of the French national project, ASIRI, a series of experiments on 3D reduced-scale centrifuge models aimed at studying the reinforcement of soft soils by stiff vertical piles under floor slab. A parametric study allows observing the effects of the load transfer mattress height, the area ratio of en elementary mesh and the load level on the efficiency of the reinforcement.

1. Introduction

Le renforcement de sol compressible par inclusions rigides verticales est de plus en plus utilisé en France comme système de fondation pour des structures industrielles de grande surface, comme des dallages, des réservoirs (fig. 1).

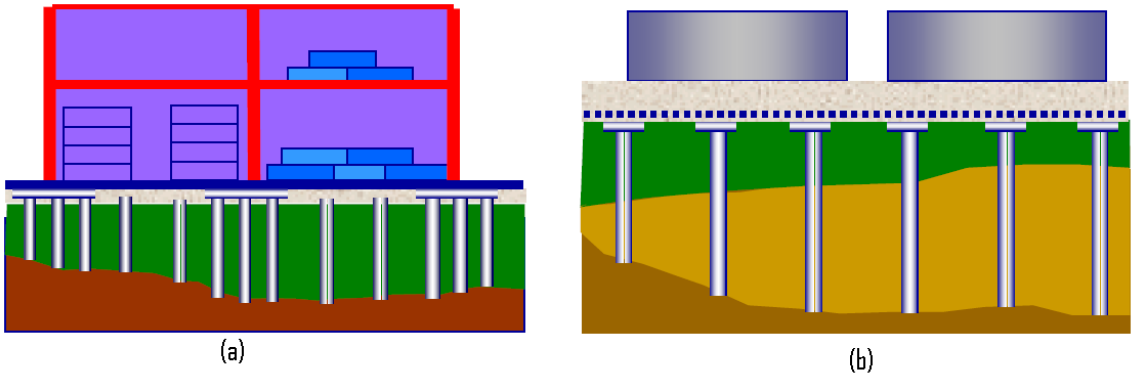

Figure 1. Renforcement sous dallage (a) ou réservoirs (b) d'après Jenck (2005).

Le projet national ASIRI a pour but d'établir des recommandations sur ce type de fondations composites, tant sur le calcul que sur leur mise en œuvre. Des expérimentations en centrifugeuse sur modèle réduit ont été réalisées au LCPC. Une étude paramétrique est menée pour identifier le comportement d'un groupe élémentaire et l'influence de paramètres géométriques sur l'efficacité du système.

2. Modèle réduit

Le modèle au 1/27,8ème est composé d'un massif de sol compressible renforcé sur deux zones par un groupe de maille carrée de neuf inclusions rigides verticales. Il est surmonté d'un matelas de transfert de charge de hauteur variable (H_M). Le chargement est appliqué par un réservoir souple en caoutchouc remplie d'eau pour simuler la surcharge. Une interface rigide peut être placée entre le réservoir et le matelas pour simuler le dallage.

Le modèle permet d'étudier simultanément deux taux de couverture, α_1 = 3,14 % et α_2 = 4,91 %. Le taux de couverture est défini comme le rapport entre la surface occupée par l'inclusion sur la surface totale de son aire d'influence (fig. 2).

$$\alpha = \frac{Ap}{A} \tag{1}$$

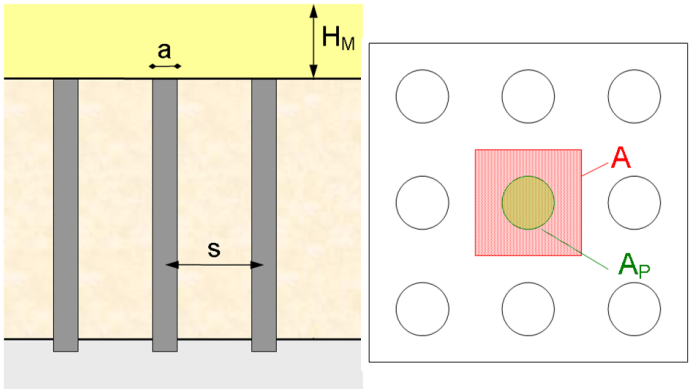

Figure 2. Géométrie.

2.1. Le massif de sol

Le massif de sol est reconstitué dans un conteneur circulaire de 894 mm de diamètre et de 360 mm de haut. Il est fabriqué à partir d'une boue d'argile de type kaolin Speswhite et de sable de Fontainebleau (coloré pour contrôler son homogénéité).

Le mélange est composé de 80 % d'argile et de 20 % de sable à une teneur en eau de 90 %. Les caractéristiques oedométriques ont été déterminées : $C_C/(1+e_0) = 0.13$ (Baudouin et al., 2008b).

Le massif est consolidé en trois couches à 1×g. La contrainte de consolidation de chaque couche correspond au profil de contrainte atteint en centrifugeuse (27,8×g) pour que le massif soit normalement consolidé.

2.2. Le matelas de transfert de charge et le dallage

Le matelas de transfert de charge est composé pour l'ensemble des essais d'un mélange de cinq fractions de sable d'Hostun. Ce matériau modèle doit représenter un matériau à granulométrie étalée et de diamètre maximum 30 mm. L'échelle du modèle impose donc un d_{max} de 1 mm. La fraction HN 0,6/1,6 est écrêtée à 1 mm. Les autres fractions utilisées sont les fractions HN38, HN34, HN31 et HN04/08. Les

caractéristiques mécaniques ont été déterminées pour ce mélange (Dupla et al. 2008, Baudouin et al., 2008a).

Tableau I. Caractéristiques du matelas granulaire

d_{max}, diam. maximum	C_U, coef. d'uniformité	ρ_d, masse vol. du sol sec	Φ'_{max}, angle de frottement effectif
1 mm	3,5	1,64 Mg/m^3	42°

Le dallage en béton de 0,19m d'épaisseur est simulé par une interface rigide simplement posée sur le matelas de sable. Elle est composée d'une plaque de mousse polymère rigide et légère de 55 mm d'épaisseur, (Divinycell type H), choisie pour respecter le facteur d'échelle sur la rigidité en flexion. Ainsi, la surcharge appliquée avant chargement est limitée. Les caractéristiques issues des données du fabriquant sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau II. Caractéristiques du dallage

ρ, masse volumique	K, module de compression	E, module de traction	G, module de cisaillement	EI
48 - 60 kg/m^3	50 – 70 MPa	55 – 75 MPa	15 – 20 MPa	11*10^4 kN.m^2

2.3. Le dispositif de chargement et l'instrumentation

L'application de la surcharge s'effectue grâce au remplissage par de l'eau du réservoir souple placé au-dessus du matelas de transfert de charge. Le dispositif offre la particularité d'embarquer un pénétromètre électrique qui permet d'effectuer des profils de reconnaissance au travers d'une fenêtre spécialement aménagée dans le réservoir en vue de caractériser le massif d'argile à différentes étapes d'avancement de l'essai de chargement (fig. 3).

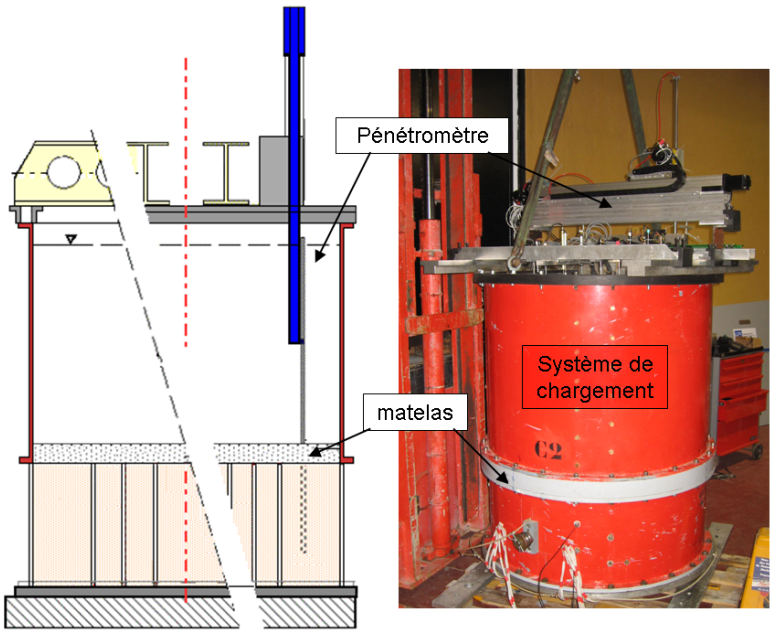

Figure 3. Conteneur d'essai.

Chaque groupe renforcé compte neuf inclusions dont trois sont instrumentées : il s'agit de l'inclusion centrale (C), d'une inclusion de bord (B) et d'une inclusion d'angle (A). La figure 4 présente un schéma en coupe des deux zones renforcées où sont repérées les inclusions instrumentées. Ces deux groupes sont espacés de 216 mm, soit à l'échelle prototype de 6 m, pour éviter les interactions.

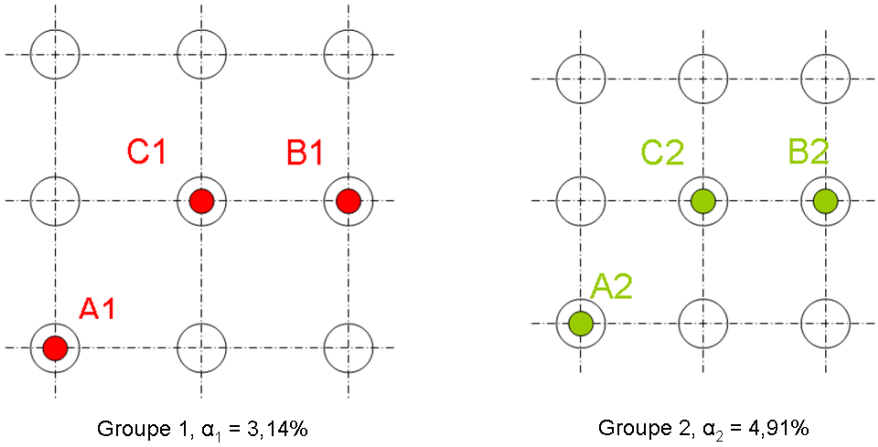

Figure 4. Position des inclusions instrumentées

Chaque inclusion instrumentée est équipée de quatre capteurs d'effort vertical. Le premier capteur est placé en pied, le second est positionné au niveau du tiers inférieur, le troisième au niveau du tiers supérieur et le quatrième en tête d'inclusion ; cette répartition permet de déterminer les efforts induits dans les tronçons qui leurs sont directement supérieurs. Les passages de câbles sont assurés dans l'axe de l'inclusion pour éviter tout drainage parasite autour de l'inclusion. Chaque inclusion est munie à sa base d'un bouchon étanche au travers duquel toutes les liaisons filaires sont assurées Les inclusions sont ancrées à la base du conteneur par l'intermédiaire des bouchons.

Aux mesures de force déterminées dans le fût des inclusions, sont associées des mesures de tassement de sol au droit des têtes d'inclusions instrumentées et en milieu de maille. Cette instrumentation est étendue à une zone non renforcée afin d'appréhender les tassements relatifs induits par l'effet des surcharges.

3. Expérimentation

L'expérimentation comprend l'étude du comportement de deux groupes de renforcement avec trois hauteurs de matelas prototype : 0,6 m, 1 m et 1,5 m (tableau III). La première phase de l'essai est la consolidation en centrifugeuse du massif compressible. Le chargement commence lorsque le degré de consolidation suivi par la méthode d'Asaoka (Asaoka, 1978) atteint 85%. Les trois paliers de charge sont ensuite appliqués successivement. Les deux premiers paliers sont maintenus une heure et le dernier deux heures et demie (temps du modèle). Les niveaux de paliers retenus sont 50 kPa qui correspond à un chargement habituellement rencontré dans ce type de fondation composite, 112 et 164 kPa qui correspondent aux paliers étudiés dans le cas d'une structure de type remblai (Briançon et al., 2009) et permettent donc une étude comparative.

Enfin, un dernier essai est réalisé avec un matelas de transfert de charge de 0,3 m à l'échelle prototype.

Tableau III. Caractéristiques des essais

Ref.	Hauteur de matelas		consolidation	q_0 palier 0	Durée P0	q_1 palier 1	Durée P1	q_2 palier 2	Durée P2
	Modèle [mm]	Prototype [m]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]	[kPa]	[min]
C06	21	0,6	351	50,3	62	115,1	73	163,5	123
C07	36	1	308	49,5	64	115,5	68	163,8	122
C08	54	1,5	303	50,4	65	115,0	62	fuite	fuite
C09	11	0,3	347	50,0	63	111,0	125	152,0	15

4. Résultats

4.1. Efforts en tête d'inclusion

Les efforts en tête d'inclusion, mesurés pour différentes positions de l'inclusion dans le groupe 1, varient pendant les phases de chargement, qui incluent une phase de mise en charge et une phase plus longue de maintien de palier.

Pour l'ensemble des matelas testés, l'effort en tête de l'inclusion placée en périphérie du groupe de renforcement est plus important que celui de l'inclusion placée au centre du groupe, jusqu'à 70% pour le matelas de 1m. La zone d'influence des inclusions périphériques est donc plus grande. Ces résultats montrent donc qu'il y a un effet de la position de l'inclusion pour la zone renforcée.

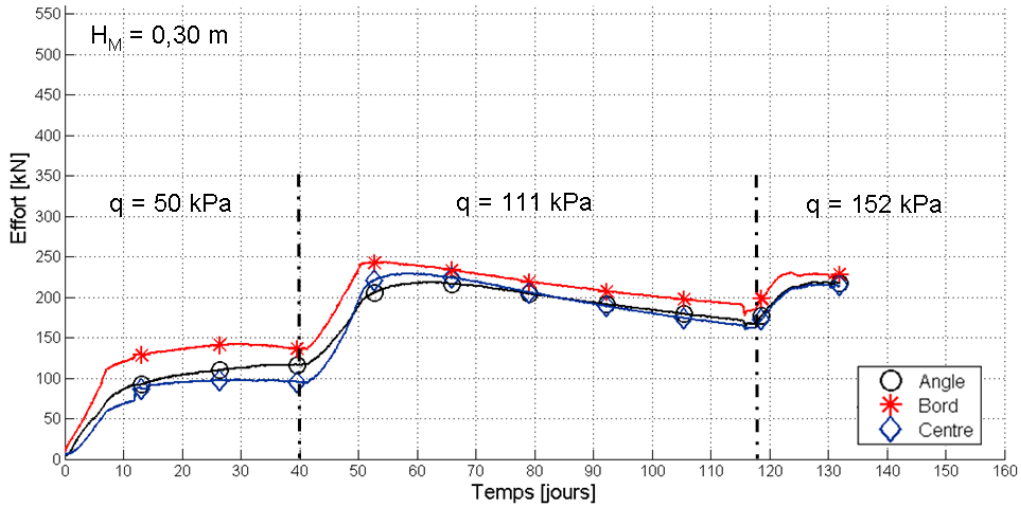

Figure 5. Efforts en tête d'inclusion, H_M = 0,3m

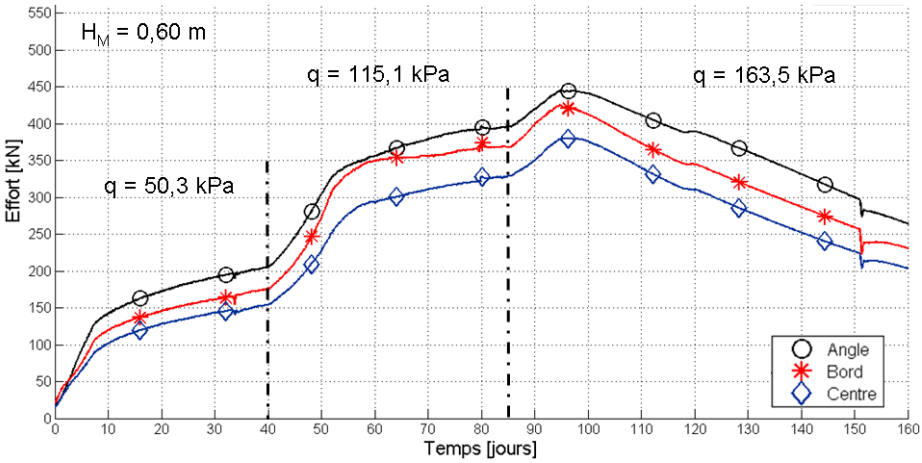

Figure 6. Efforts en tête d'inclusion, H_M = 0,6m

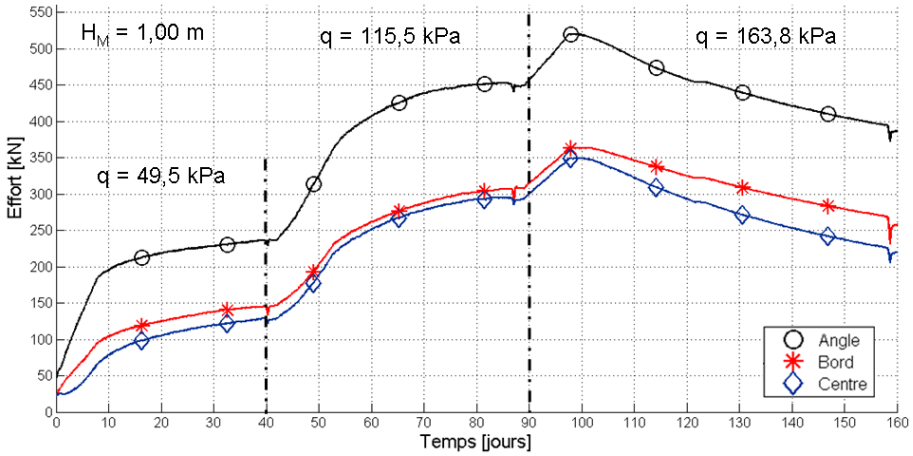

Figure 7. Efforts en tête d'inclusion, H_M = 1m

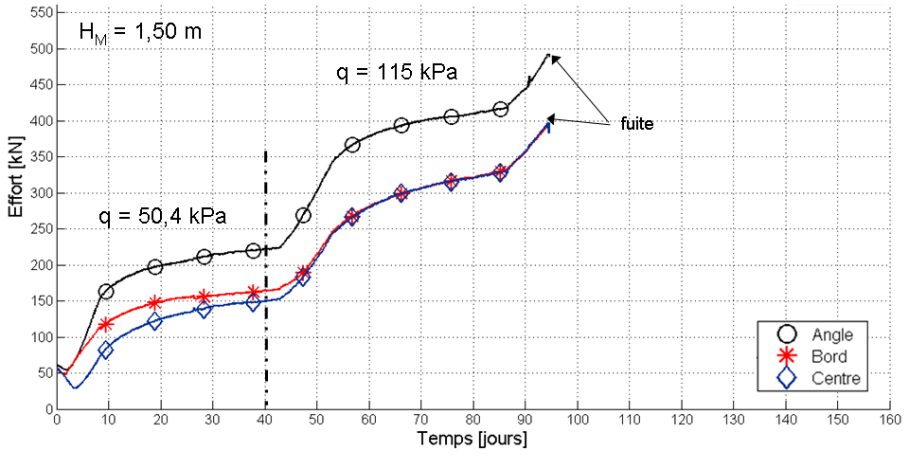

Figure 8. Efforts en tête d'inclusion, H_M = 1,5m

4.2. Efficacité

Les résultats de cette expérimentation sont présentés grâce à l'évaluation de l'efficacité définie par Hewlett et Randolph (1988). L'efficacité, E est le rapport de la

charge reprise par la tête de l'inclusion, Q_P^+ sur la charge appliquée par la structure et le matelas de transfert de charge sur l'aire d'influence de l'inclusion, $Q*$.

$$E = \frac{Q_P^+}{Q*} \tag{2}$$

Dans ces essais le premier terme est évalué grâce au capteur de force en tête de l'inclusion centrale dans chaque groupe et le deuxième est calculé à partir de la hauteur et du poids volumique du matelas utilisé et de la valeur de la charge appliquée.

4.3. Effet de la hauteur de matelas sur l'efficacité

La figure 9 présente l'évolution de l'efficacité en fonction de la hauteur de matelas pour l'ensemble des cas de taux de couverture et de chargement, et pour l'ensemble des hauteurs de matelas étudiées, en fin de palier.

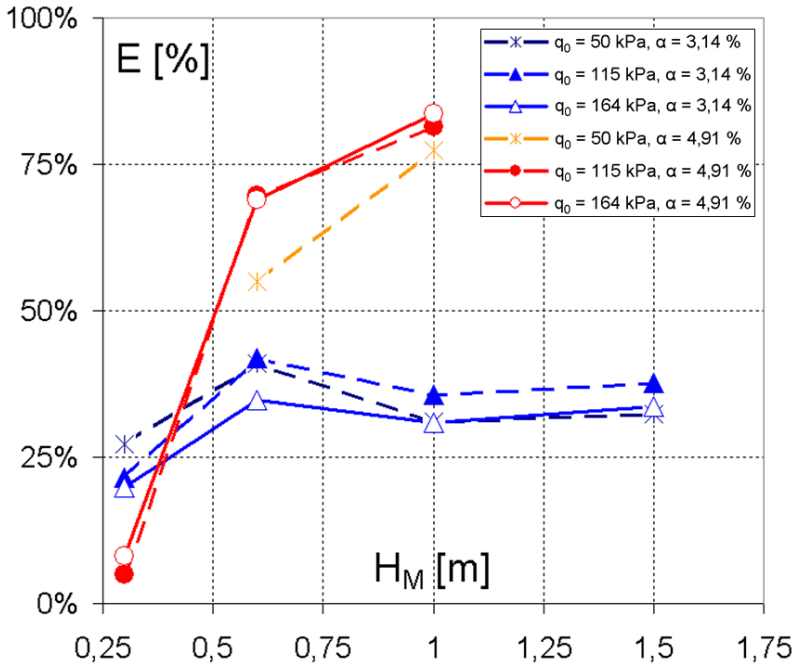

Figure 9. Evolution de l'efficacité en fonction de la hauteur de matelas.

Pour une hauteur très faible, 0,3 m, l'efficacité ne dépasse pas 0,2. Ensuite, l'efficacité augmente avec l'augmentation de hauteur du matelas. L'efficacité atteint un palier pour un matelas de 60 cm de hauteur pour α=3,14 %. Il semble que ce palier n'est atteint que pour un matelas de 1 m de hauteur pour le cas de α = 4,91 %. Les figures 5, 6, 7 et 8 montrent que l'application du chargement provoque une augmentation de l'effort sur l'inclusion mais ensuite, le maintien du palier engendre une diminution de cet effort. Pour une faible hauteur de matelas, le chargement appliqué est à l'origine d'une rupture dans le matelas qui engendre une diminution de E. Pour des valeurs de H_M plus grandes, ce phénomène n'est plus prépondérant car H_M est suffisante pour limiter le confinement du à la présence du dallage.

L'efficacité pour α = 3,14 % atteint 0,37 et pour α = 4,91 %, l'efficacité maximum est de 0,52. Dans ce cas, la moitié de la charge est donc reprise par l'inclusion.

4.4. Effet du taux de couverture sur l'efficacité

Pour un matelas de 0,3 m, on observe pour l'ensemble des charges appliquées que l'efficacité pour le taux de couverture le plus faible est plus grande que celle pour le taux de couverture le plus grand. Pour des hauteurs plus importantes, cette tendance s'inverse et on observe un résultat plus classique : l'efficacité pour α le plus grand est plus élevée que celui pour α le plus petit. Pour des hauteurs de matelas faibles, le report de charge n'est donc pas influencé par α.

Pour des hauteurs de matelas supérieures à 1m, on peut dire que plus le taux de couverture est grand, plus le report de charge vers les inclusions est important. Low et al. (1994) ont obtenus également ce type de résultat.

5 Conclusion

Une série d'expérimentations en centrifugeuse a été menée dans le cadre du projet ASIRI, sur le renforcement de sol par inclusions rigides. Un massif compressible renforcé d'inclusions et surmonté d'un matelas de transfert de charge a été modélisé. Un chargement de type dallage a été simulé. L'augmentation de l'efficacité avec la hauteur du matelas a été observée jusqu'à un palier maximum. De plus, l'influence du taux de couverture a été mise en évidence.

Ces résultats permettront d'alimenter des modèles numériques dans le cadre du PN ASIRI.

6 Références bibliographiques

Asaoka A. (1978) Observational procedure of settlement prediction. Soils and foundations, 18(4), 87-101.

Baudouin G., Rosquoët F., Canou J., Dupla J.C., Thorel L., Rault G., Andria-Ntoanina I. (2008a) Caractérisation mécanique d'un mélange de sable d'Hostun. Proc. JNGG08, Nantes, France, 18-19 juin. 491-498

Baudouin G., Thorel L., Rault G., Garnier J., Derkx F., Buttigieg S. (2008b) Centrifuge modelling of 3D load transfer in reinforced soft soils. Proc. Int. Conf. on Foundations, ICOF, Dundee. 1303-1313.

Briançon L., Plumelle C., Canou J., Dinh A.Q., Dupla J.-C., Baudouin G., Thorel L., Rault G. (2009) Expérimentations en vraie grandeur et sur modèles réduits du renforcement des sols par inclusions rigides. XVIIth ICSMGE Alexandrie, 5-9 oct. Hamza, Shahhien, El-Mossallamy (eds.). Millpress. Vol.3, 2032-2039.

Dupla J.C., Andria-Ntoanina I., Canou J. (2008) Caractérisation mécanique à l'appareil triaxial du mélange de sable d'Hostun utilise en centrifugeuse en tant que matelas de transfert de charge. Rapport PN ASIRI n°2.08.3.07, 46 pages.

Hewlett W.J., Randolph M.A. (1988) Analysis of piled embankments, Ground Engineering, Avril, 12-18.

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

Low B.K., Tang S.K., Choa V. (1994) Arching in piled embankments. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 120, n°11, 1917-1938.