Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique

Association régie par la loi du 1.07.1901

Le renforcement par inclusions rigides étudié sur modèles physiques

(thème 3 du PN ASIRI)

L. Thorel

J.C. Dupla, D. Dias,
J. Canou, G. Rault, B. Simon, O. Jenck,
A.Q. Dinh, G. Baudouin, U.S. Okyay

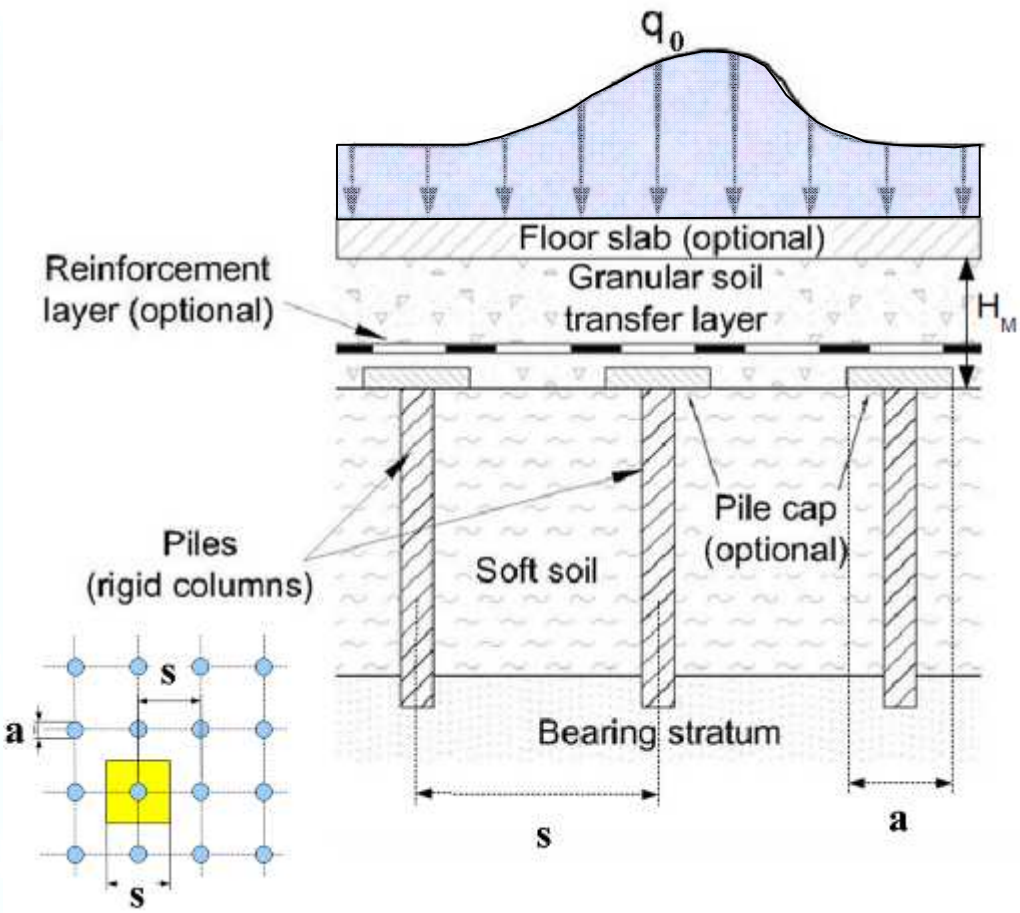
A.S.I.RI

Projet National

Amélioration des Sols par Inclusions Rigides

Opération du Réseau Génie Civil et Urbain

Introduction



[Simon & Schlosser, 2005]

Introduction : objectifs

Comportement des matériaux

+ expérimentations en vraie grandeur (thèmes 1&2)

Calage des modèles numériques (thème 4)

Exploration de problèmes spécifiques :

- Développement de **l' «effet de voûte»** dans le matelas granulaire
- Comportement d'un **groupe élémentaire**
- **Report des efforts** sur les inclusions (et sur le sol compressible)
- Réduction des **tassements**

Nécessité d'**études paramétriques**
(essais multiples sous conditions contrôlées)

Sol type choisi, homogène
Reproductibilité
Contrôle des conditions aux limites
Etat de contrainte
Instrumentation

Introduction : méthodologie

Données In Situ : Plots d'essais & Chantiers

Comportement : Matériaux du matelas granulaire (Navier)
Sol traité (IFSTTAR-Nantes)
Interface matelas-géosynthétique (INSA-Lyon)

Modélisation physique : Rouleaux de Schneebeli (INSA-Lyon)
Chambre d'étalonnage (Navier)
Centrifugeuse (IFSTTAR-Nantes)

Modèles numériques

→ Méthodes de dimensionnement pratiques

Introduction : modèle physique

Modèle réduit :

Représentation physique simplifiée
Simple changement d'échelle des longueurs

Modèle Physique *Géotechnique* :

*« C'est une représentation physique simplifiée d'un problème à frontières finies pour lequel la **similitude** est recherchée dans le contexte des **lois d'échelle** adaptées. Un aspect clef de la modélisation physique est le processus d'idéalisation adopté pour représenter le comportement du sol, les effets géométriques, les charges, les effets de construction et de l'environnement menant au dimensionnement du modèle. Le modèle sera alors construit principalement avec un sol (ou un sol analogique), qui a été reconstitué artificiellement ou transporté depuis son lieu de dépôt naturel vers le laboratoire. »*

[extrait du site What qualifies as 'physical modelling' for the purposes of the International Conference on Physical Modelling in Geotechnics Zurich 2010?]

Appareillages

Paramètres étudiés

Perspectives

Appareillages

3 approches expérimentales sur modèles physiques :

Modèle 2D : Rouleaux de Schneebeli
2 inclusions 2D (éch.~ 1/3)
(INSA de Lyon)

Modèle axisymétrique : ~chambre d'étalonnage
1 inclusion axisymétrique (éch.~ 1/5)
(Laboratoire Navier Equipe Géotechnique)

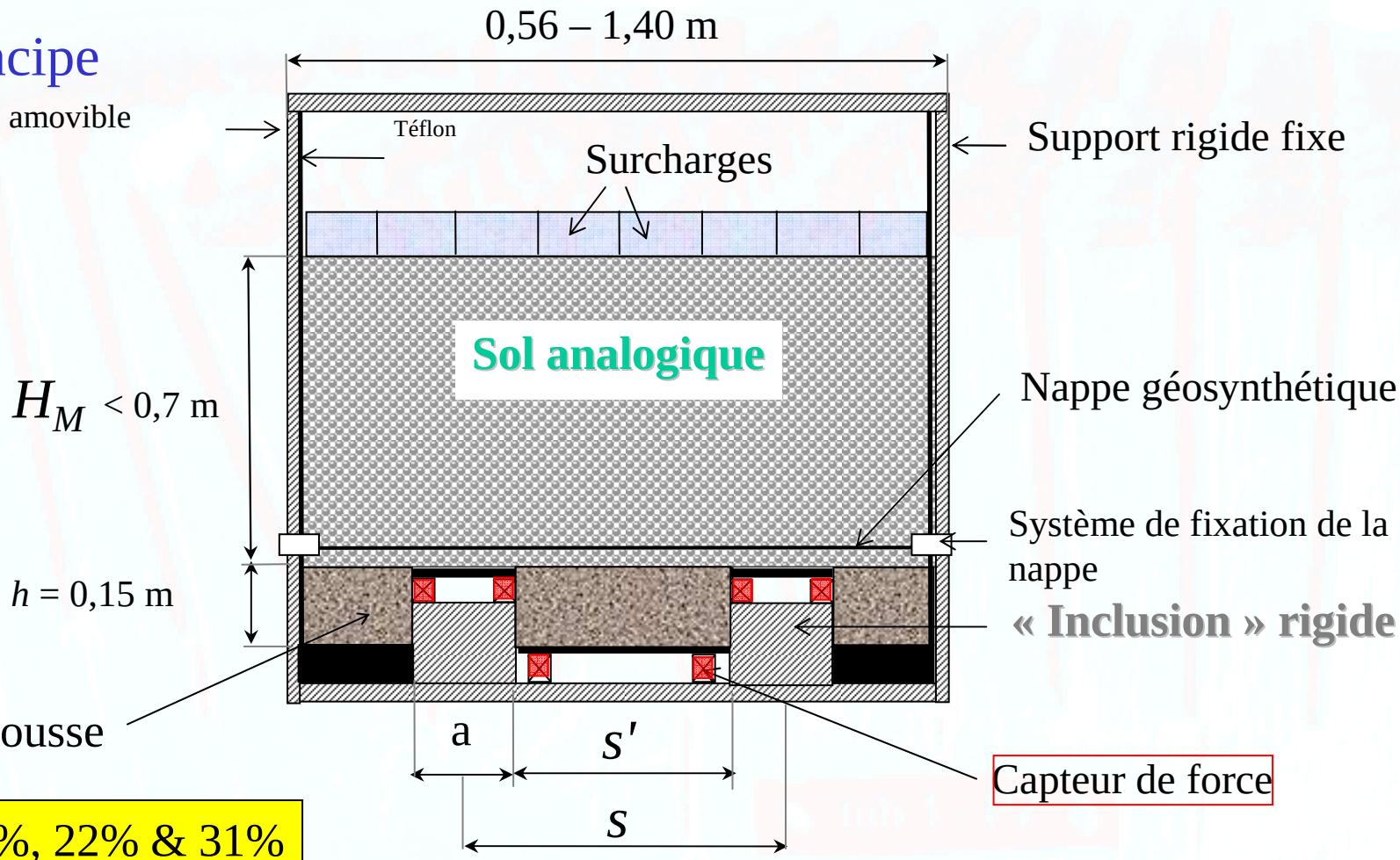
Modèles 3D : Centrifugeuse géotechnique
3×3 inclusions 3D (éch.~1/28) & 13 à 61 inclusions (éch.~1/12 & 1/20)
(IFSTTAR-Centre de Nantes)

Appareillages : Modèle 2D

Rouleaux de Schneebeli (INSA Lyon)

Principe

Support rigide amovible



α=15%, 22% & 31%

[Thèse Orianne Jenck, 2005]

Appareillages : Modèle 2D

Rouleaux de Schneebeli (INSA Lyon)

Lois d'échelle

	Prototype (vraie grandeur)	**Modèle réduit**	**Modèle / proto**
s	*2 – 2,5 m*	0,28 – 0,70 m	1/9 – 1/3
a	*0,3 – 0,5 m*	0,06 – 0,15 m	1/8 – 1/2
$\mathbf{H_M}$	*> 0,4 m*	0,28 – 0,70 m	1/14 – 1/6
$\boldsymbol{\rho_{dM}}$	*~2000 kg/m³*	6320 kg/m³	3,1
g	*9.81m/s²*	9.81m/s²	1
$\mathbf{H_M\,\gamma_{dM}}$	*> 8 kPa*	17-43 kPa	> 2,1 – 5,4
$\mathbf{q_0}$	*~ 100 kPa*	0 – 4 kPa	1/25

Pas de respect strict des similitudes (hormis échelle ~1/3)

=> Etude **qualitative** des phénomènes

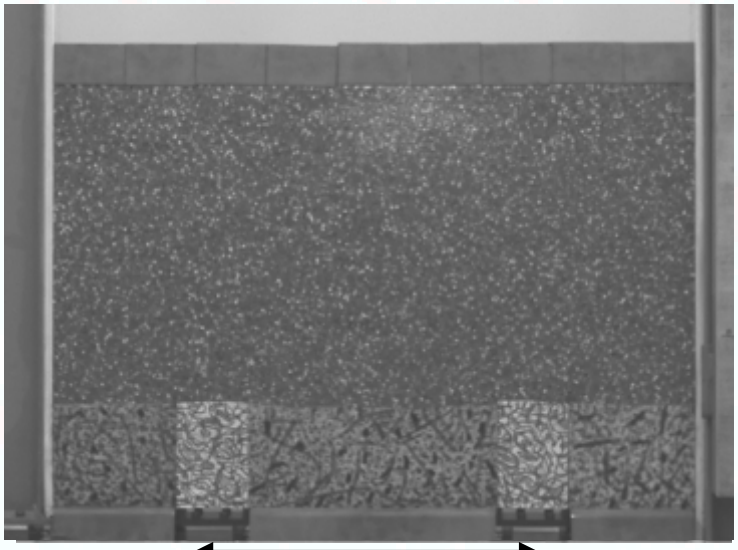
Données pour modélisation numérique

[ASIRI-1.06.3.01, 2006]

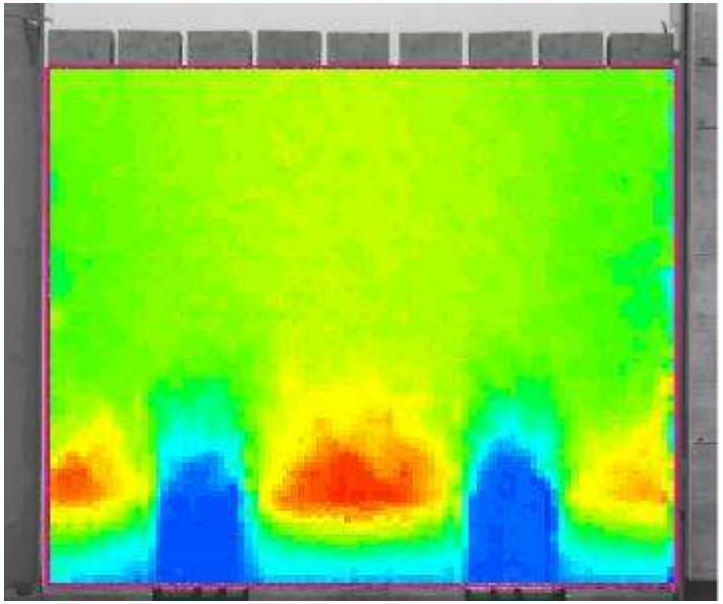
Appareillages : Modèle 2D

Rouleaux de Schneebeli (INSA Lyon)

Analyse d'image



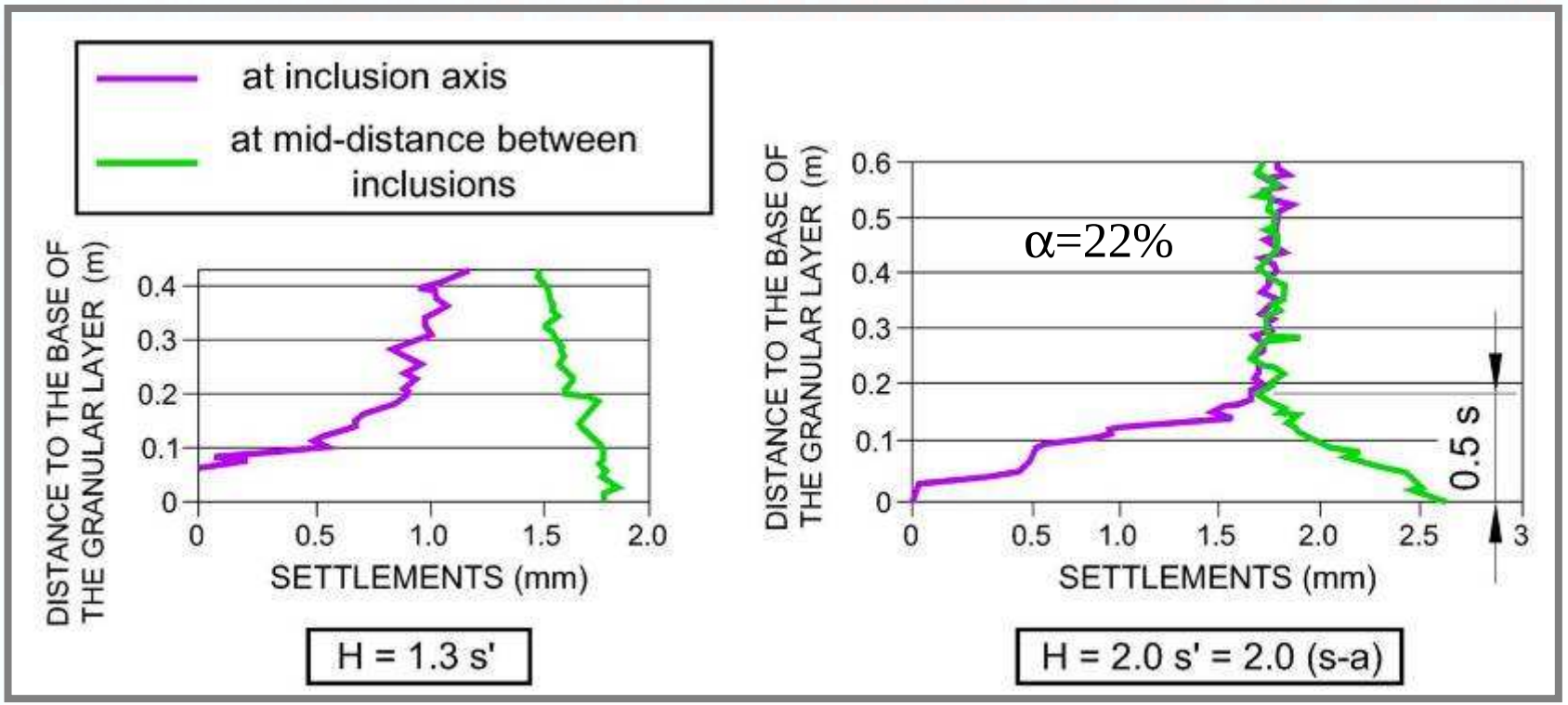
S



[Thèse Orianne Jenck, 2005]

Exemple de Résultat Modèle 2D : tassements

Le tassement différentiel diminue lorsque H_M augmente



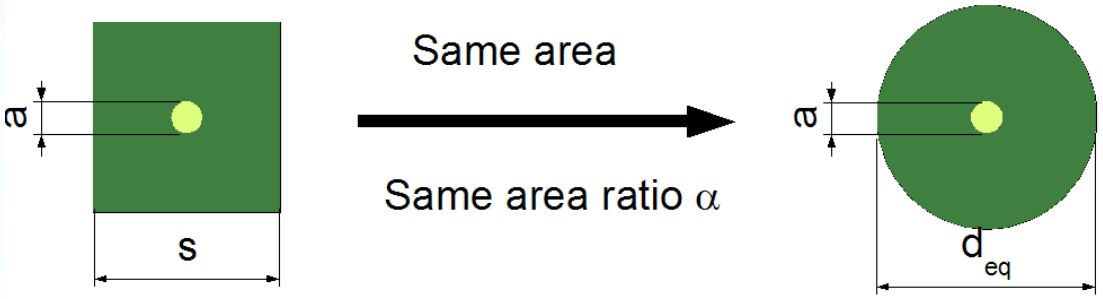
Si $H_M < H_C$:
« incomplete arching »

Si $H_M > H_C$:
« full arching »

Appareillages : Modèle Axisymétrique

Chambre d'étalonnage (Navier-Géotechnique)

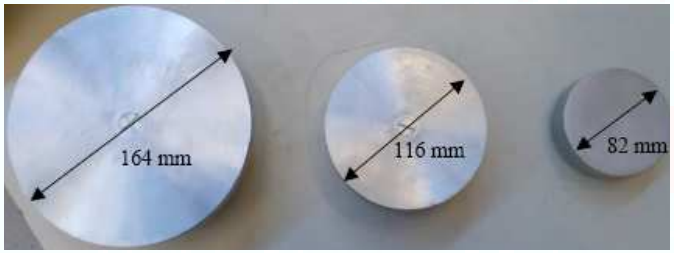
Principe



d_{eq} = 550mm

Nouveau dispositif inspiré de la chambre d'étalonnage

3 têtes d'inclusion interchangeable



α=2.22%, 4.44% & 8.88%

[Thèse Anh Quan Dinh, 2009]

Appareillages : Modèle Axisymétrique

Chambre d'étalonnage (Navier-Géotechnique)

Lois d'échelle

	Prototype (vraie grandeur)	**Modèle réduit**	**Modèle / proto**
s	*2 – 2,5 m*	0,49 m	1/5 – 1/4
a	*0,3 – 0,5 m*	0,082 – 0,164 m	1/6 – 1/1,8
$\mathbf{H_M}$	*> 0,4 m*	0,1 – 0,3 m	1/4 – 1/1,3
$\boldsymbol{\rho_{dM}}$	*~2000 kg/m³*	1630 kg/m³	0,8
g	*9.81m/s²*	9.81m/s²	1
$\mathbf{H_M\,\gamma_{dM}}$	*> 8 kPa*	2-5 kPa	> 1/4 – 1/1,6
$\mathbf{q_0}$	*~ 100 kPa*	0 – 100 kPa	1

Pas de respect strict des similitudes (hormis échelle ~1/5)

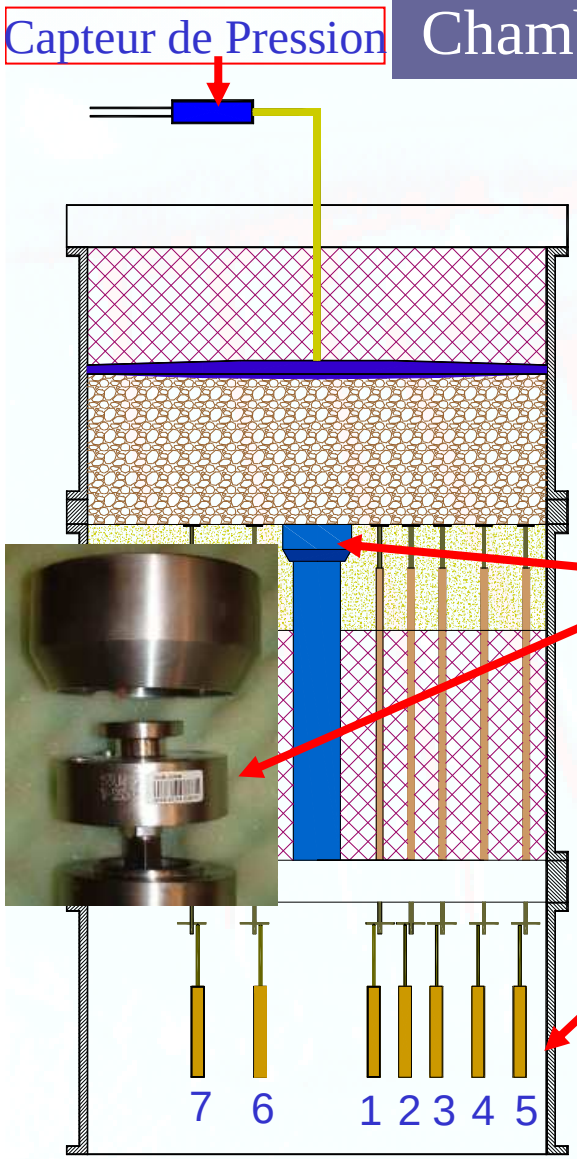
=> Etude **qualitative** des phénomènes

Données pour modélisation numérique

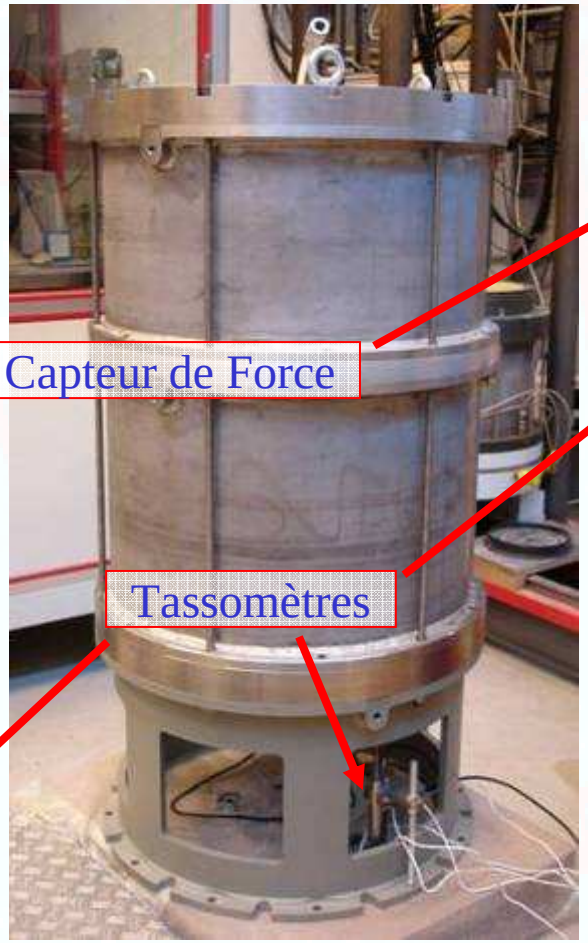
[ASIRI 3.09.3.15, 2010]

Appareillages : Modèle Axisymétrique

Chambre d'étalonnage (Navier-Géotechnique)



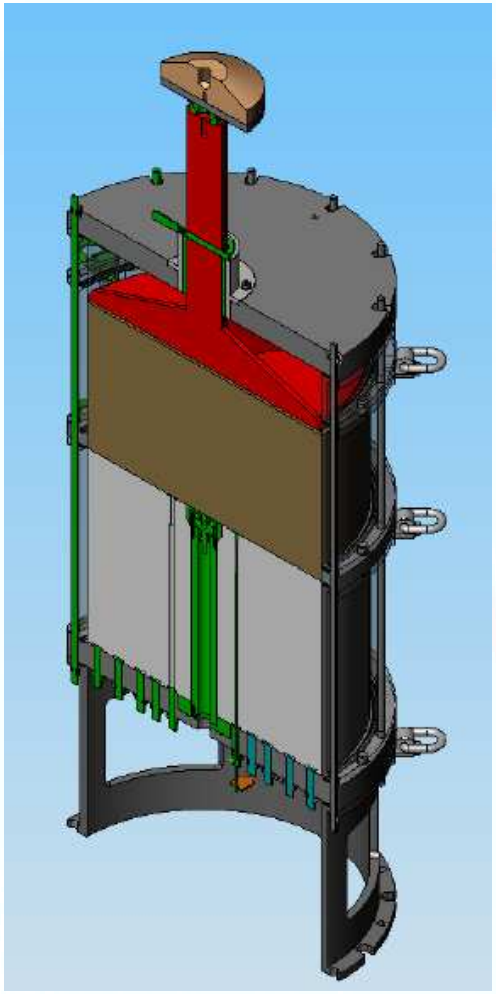
Simulation d'un remblai



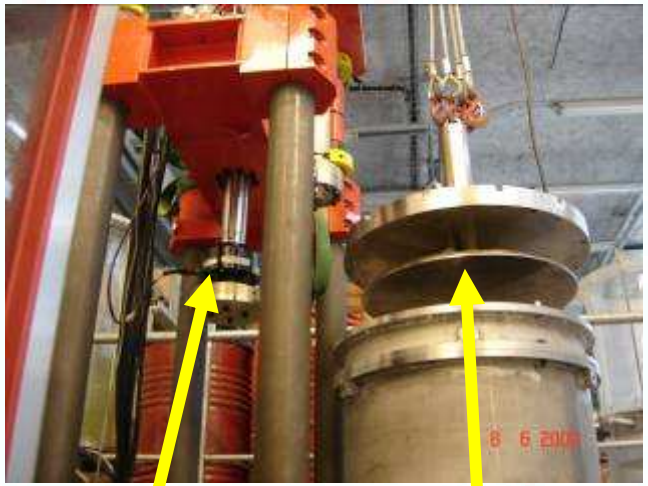
[Thèse Anh Quan Dinh, 2009]

Appareillages : Modèle Axisymétrique

Chambre d'étalonnage (Navier-Géotechnique)



Simulation d'un dallage



Embase de chargement

Servo vérin hydraulique

[ASIRI 3.09.3.15, 2010]

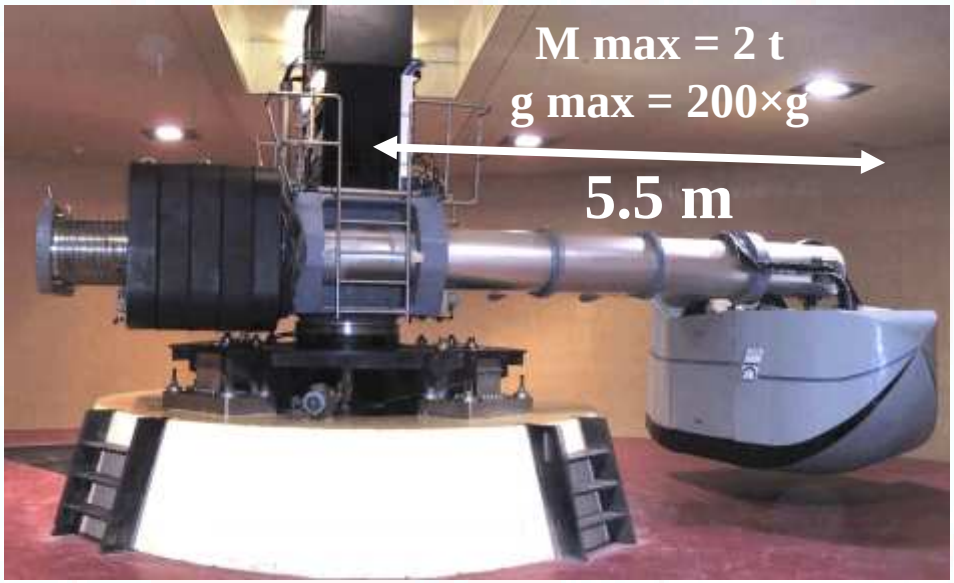
Appareillages : Modèle 3D

Centrifugeuse géotechnique (IFSTTAR-Nantes)

Principe

Augmenter les forces de masse => reproduire les états de contrainte dans le modèle réduit

Grandeur	Facteur d'échelle
Longueur, déplacement	$\ell^*=1/N$
Masse volumique	$\rho^*=1$
Forces de masse	$g^*=N$
Contrainte	$\sigma^*=1$
Force	$F^*=1/N^2$
Déformation	$\varepsilon^*=1$



$$\ell^* = \ell^M / \ell^P = 1/N$$

[Garnier et al., 2007]

Appareillages : Modèle 3D

Centrifugeuse géotechnique (IFSTTAR-Nantes)

Lois d'échelle

	Prototype (vraie grandeur)	Modèle réduit (groupe élém.)	Modèle / proto
s	*2 – 2,5 m*	0,072 – 0,090 m	1/27,8
a	*0,3 – 0,5 m*	0,018 m	1/27,8
$\mathbf{H_M}$	*> 0,4 m*	0,021-0,054 m	1,45 – 3,8
$\boldsymbol{\rho_{dM}}$	*~2000 kg/m³*	1669 kg/m³	0,8
g	*9,81m/s²*	27,8×9.81m/s²	27,8
$\mathbf{H_M\,\gamma_{dM}}$	*> 8 kPa*	9-25 kPa	> 1 – 3
$\mathbf{q_0}$	*~ 100 kPa*	0 – 160 kPa	1

Respect strict des similitudes

=> Etude **quantitative** des phénomènes

Transposition à l'ouvrage en vraie grandeur

Données pour modélisation numérique

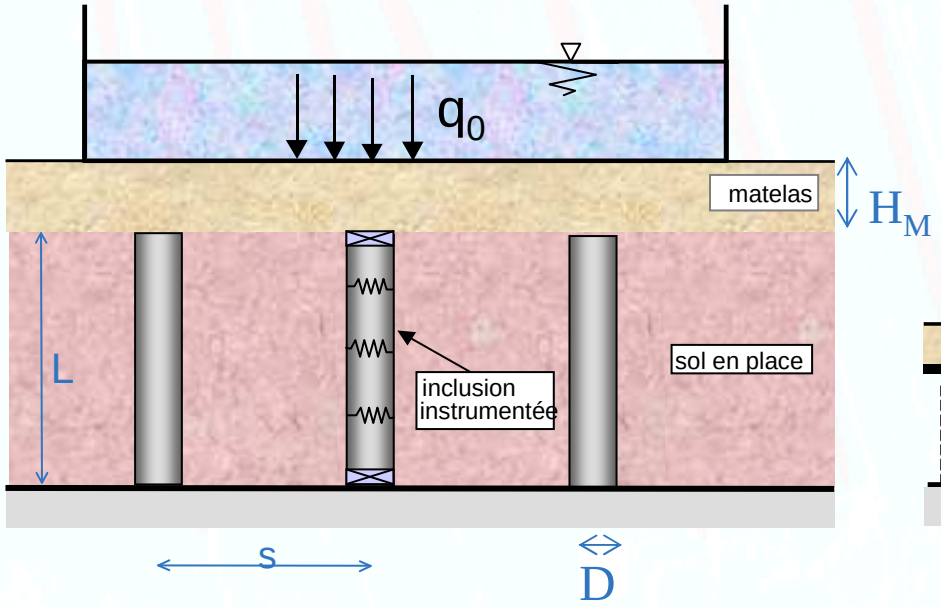
[ASIRI 2.08.3.08, 2008]

Appareillages : Modèle 3D

Centrifugeuse géotechnique (IFSTTAR-Nantes)

Groupe élémentaire 3×3
inclusions de maille carrée

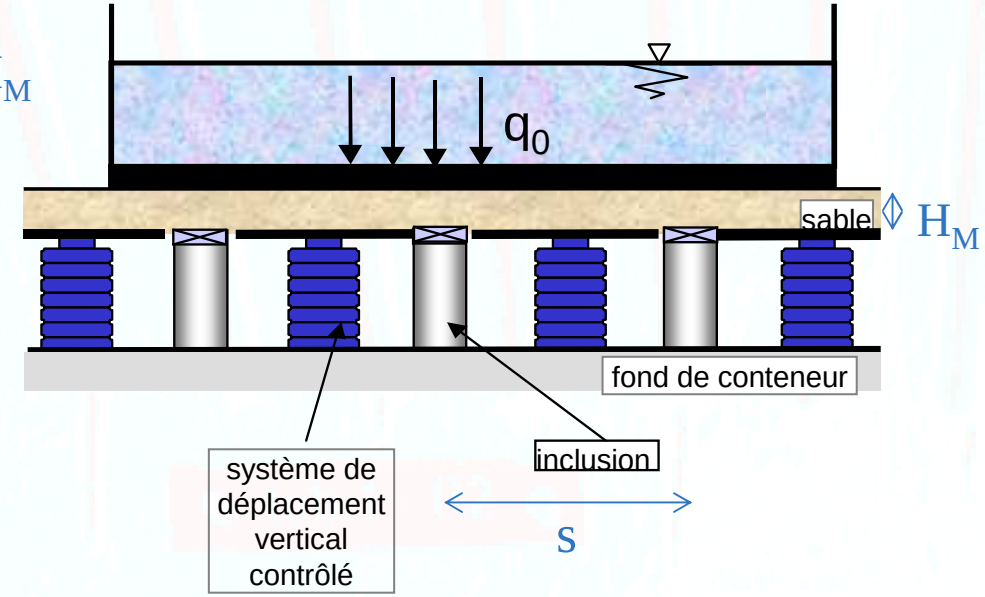
Sol compressible = kaolin + sable



[Thèse Gaëlle Baudouin, 2010]

Développement des voûtes dans le matelas 13 à 61 inclusions

Sol compressible = plateau mobile perforé

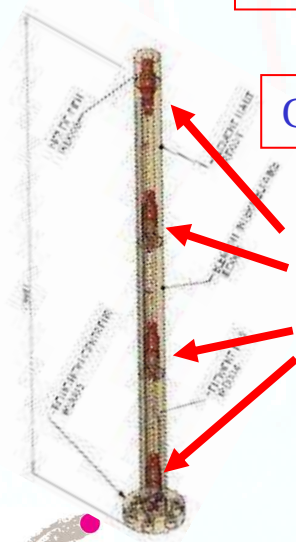


[Thèse Umur Salih Okyay, 2010]

Appareillages : Modèle 3D

Centrifugeuse géotechnique (IFSTTAR-Nantes)
Groupes élémentaires

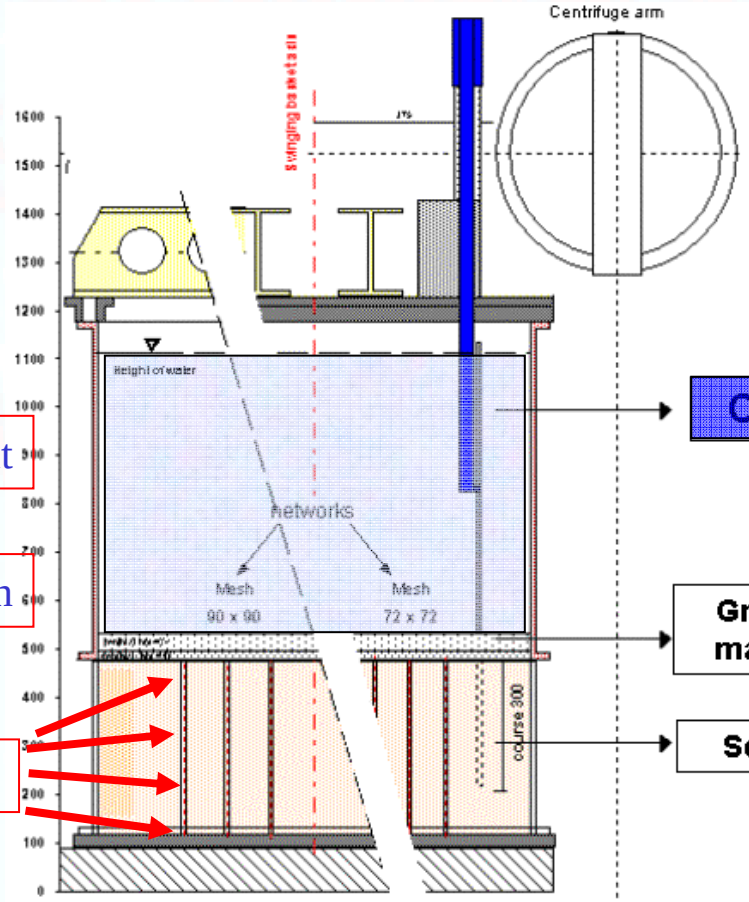
2 groupes par conteneur
Tassements en surface du matelas
3 inclusions instrumentées / groupe



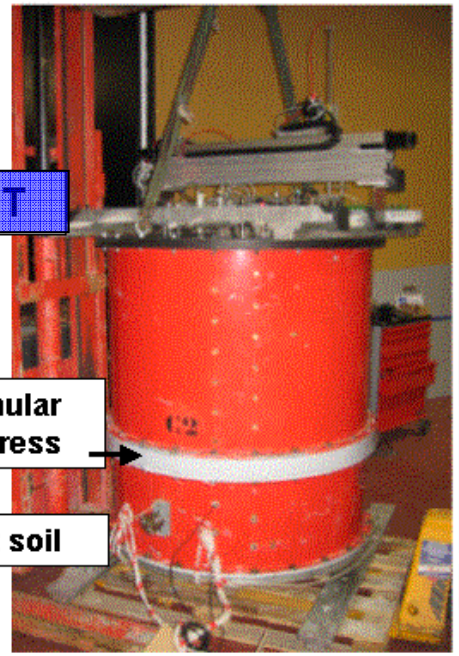
Capteurs de tassement

Capteurs de pression

Capteurs de force



α=3.14% & 4.91%



[Thèse Gaëlle Baudouin, 2010]

A.S.I.RI

Appareillages : Modèle 3D

Centrifugeuse géotechnique (IFSTTAR-Nantes)
Plateau mobile

Contrôle du tassement
Tassements en surface du matelas
9 inclusions instrumentées

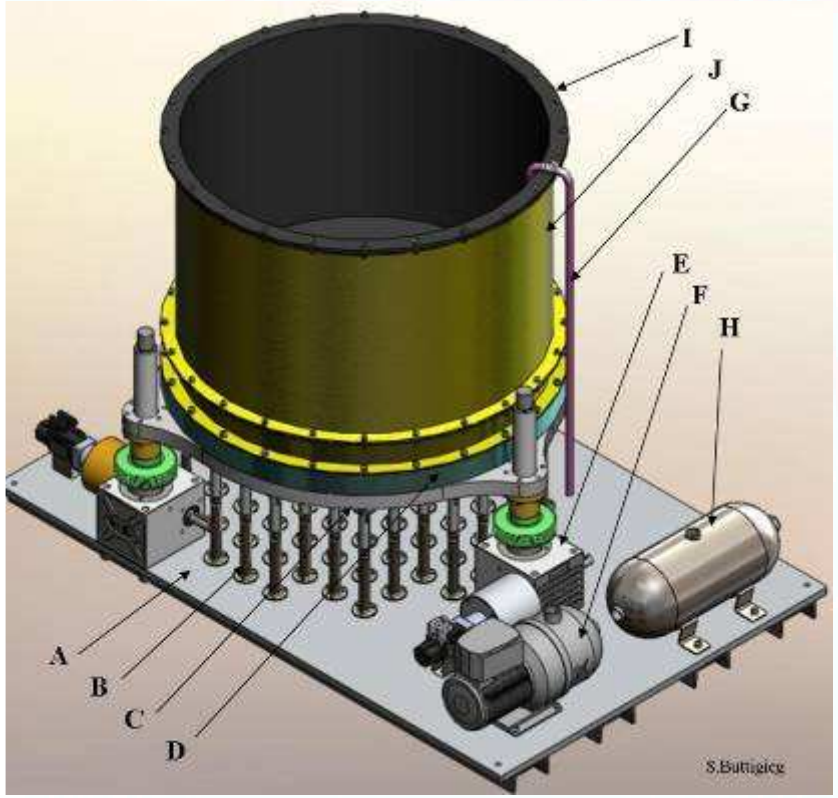
α=1.23%, 2.47% & 4.91%

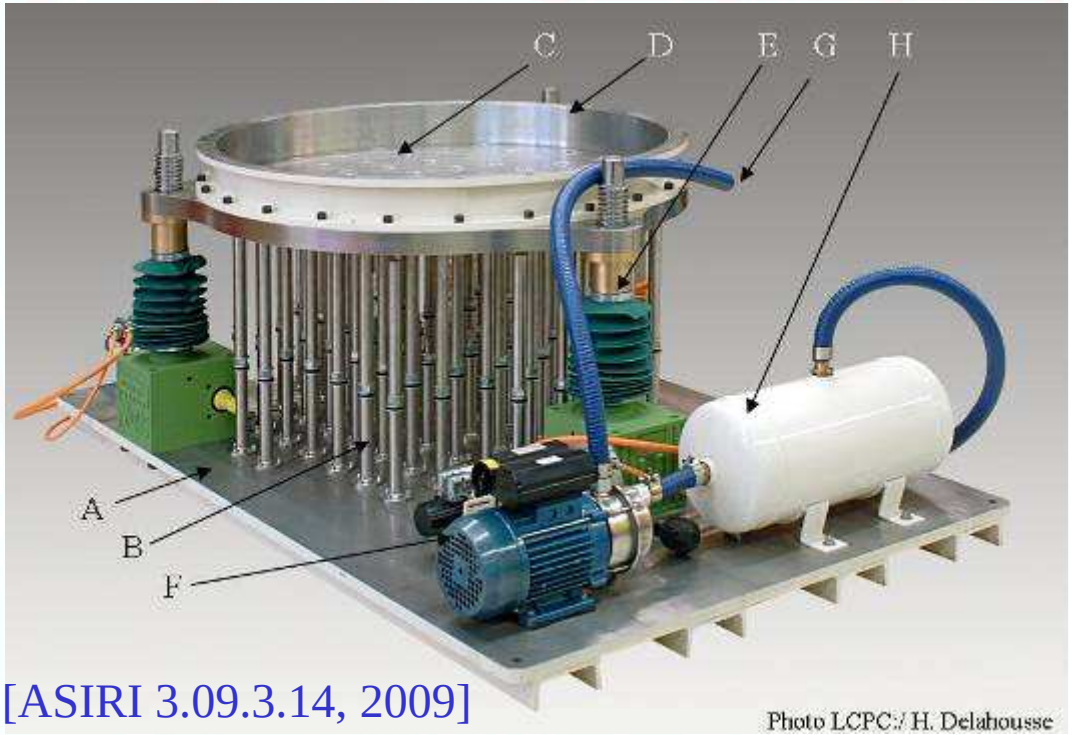
Capteurs de pression

Capteurs de force

Capteurs de tassement

Capteurs de pression totale





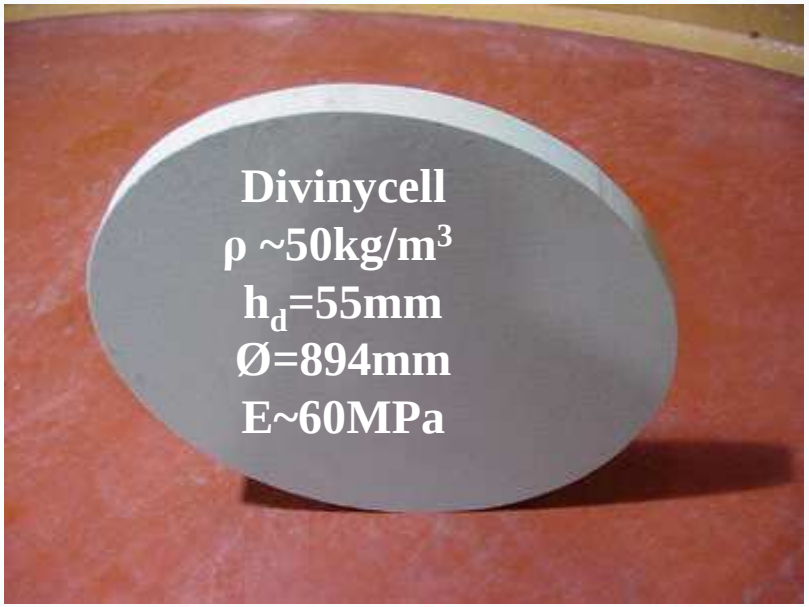
[ASIRI 3.09.3.14, 2009]

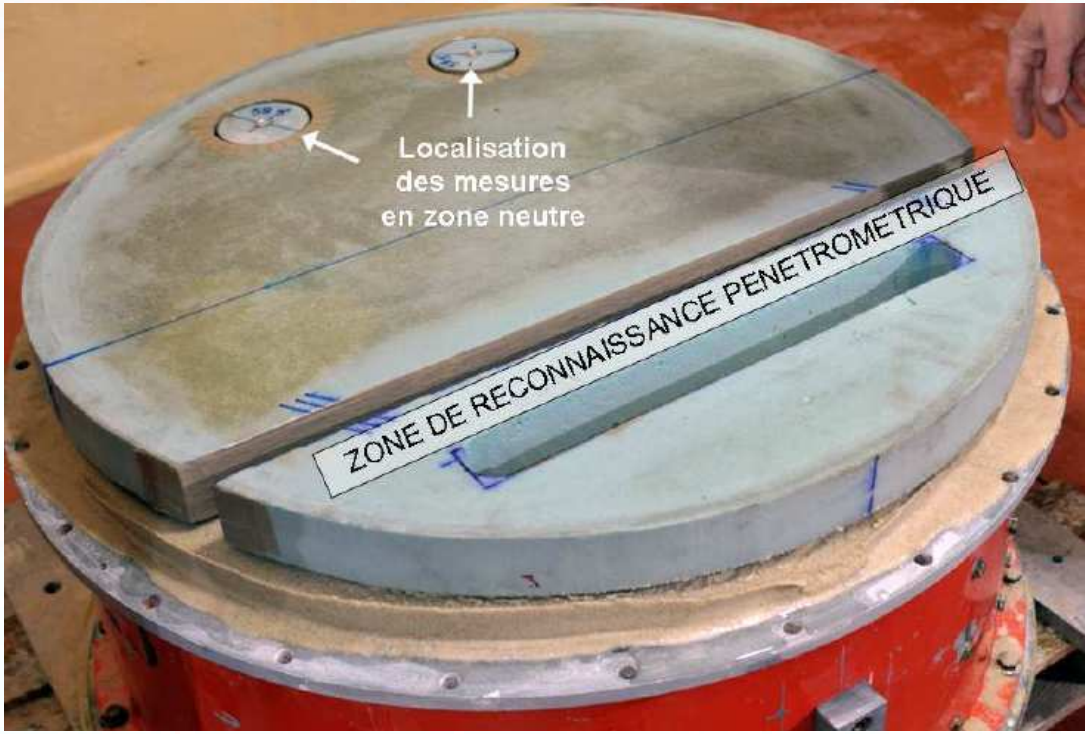
[Thèse Umur Salih Okyay, 2010]

Appareillages : Modèle 3D

Centrifugeuse géotechnique (IFSTTAR-Nantes)

Simulation d'un dallage





$(EI)^M/(EI)^P = 1/N^4$

Prototype épaisseur 18-21 cm

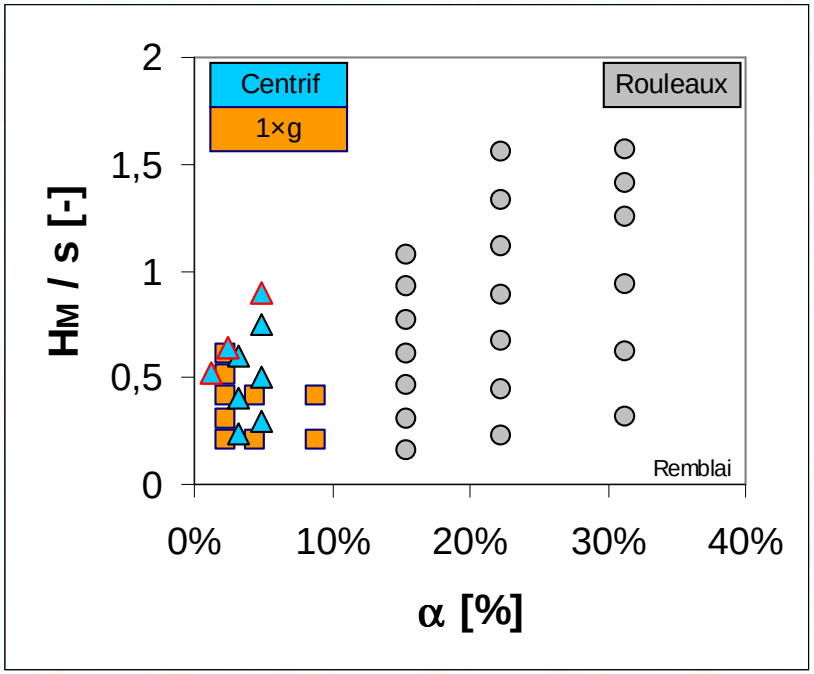
béton fibré

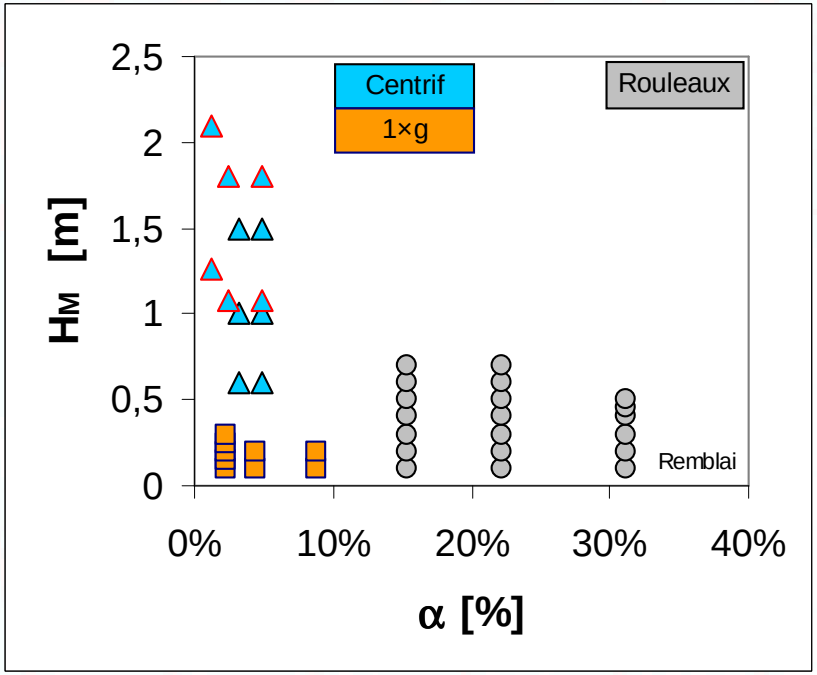
E~10 GPa

[Thèses Baudouin, 2010 et Okyay, 2010]

Paramètres étudiés

Géométrie

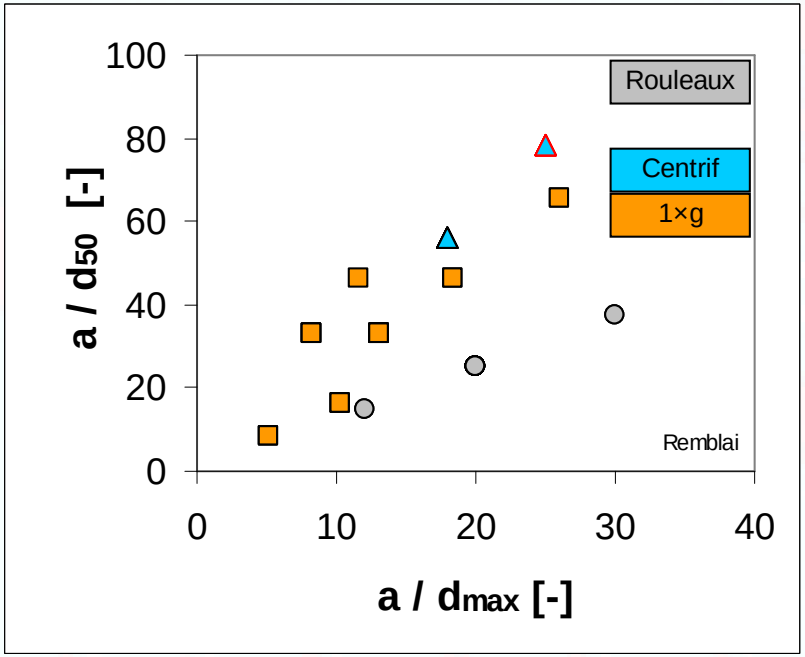




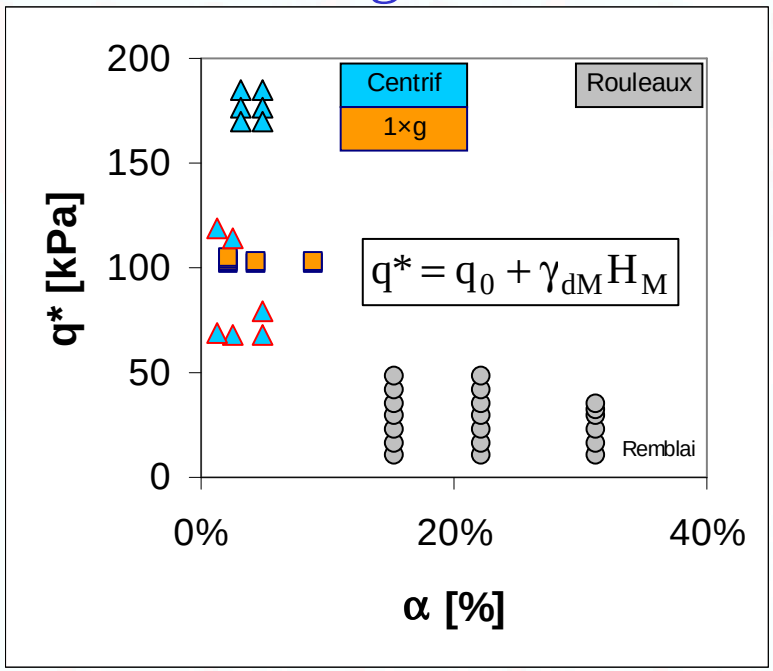
α= (Aire inclusions) / (Aire sol renforcé)
H_M = hauteur du matelas
s = entre-axe entre inclusions

Paramètres étudiés

Granulométrie



Chargement



a = diamètre d'une inclusion

	Remblai	***Dallage***
2D ■	« Terrassement »	Blocs
Axisymétrique ■	Baudruche	Piston
3D ■	Réservoir à fond souple	Réservoir à fond rigide

Paramètres étudiés

Nature des sols

	Sol compressible	*Matelas*
2D	2 mousses : ρ=80kg/m^3 E=59 puis 277 kPa ρ=120kg/m^3 E=277 puis 134 kPa	rouleaux en acier inox φ=21°, E~35 MPa Géosynthétiques : Typar J=20kN/m, RP75 J=140kN/m, RP200 J= 200kN/m
Axisymétrique	Mélange : Billes polystyrène (1-3mm) + sable Hostun HN31 + eau (w~10%) $C_c/(1+e_0)$ = 0,09 à 0,16	Mélange (d_{50}=2.5mm, C_U=10, C_C=3,9) φ=32 & 35° I_D=0.71 & 0.95 *Gravier Hostun HN2/4 (d_{50}=2.5mm, C_U=2, C_C=0,9) φ=36° I_D=0.79* *Microballast 5-8mm (d_{50}=5mm) φ=38°* *Micro-ballast 10-16mm (d_{50}=10mm) φ=40°* ρ_d=1.62t/m^3
3D Groupe	80% Kaolin+20% Sable Fontainebleau $C_c/(1+e_0)$ ~ 0,13	Mélange de sable d'Hostun (d_{50}=0,32mm, C_U=3,5, C_C=0,9) φ=38°-42°, E=175-325MPa (Compr.) 100-130MPa (Ext.)
3D Plateau	Plateau Mobile	Mélange de sable d'Hostun Limon de Goderville traité : 3% CaCO : φ'=18°, c'=35 kPa, E=50MPa 6% Ciment : φ'=22°, c'=85 kPa, E=105MPa
Saint-Ouen	$C_c/(1+e_0)$ = 0,18 à 0,44	Grave Silico-Calcaire (d_{50}=10mm, C_U=4629) φ'~48°, c'=10-50 kPa

En bref

3 modèles physiques de géométrie différente

- 2D, axisymétrique, 3D
- adaptation et développement de matériels nouveaux

Effet sur l'efficacité et la réduction des tassements de :

- la géométrie (H_M, α),
- la granulométrie du matelas (étalement, taille des grains)
- la nature du matelas (granulaire, sol traité)
- l'intensité du chargement
- la nature du chargement (remblai ou dallage, monotone ou cyclique)
- la présence de géosynthétique
- la compressibilité du sol

Perspectives

Chargement ponctuel
Semelle carrée sur 4 inclusions, chargement incliné

Géosynthétiques

Effet de la taille des grains (effets d'échelle), de la granulométrie

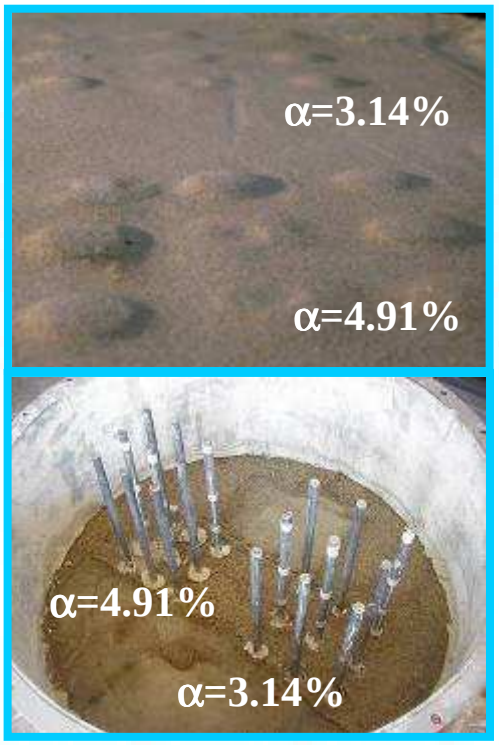
Position des joints de dallage

Sollicitation sismique?

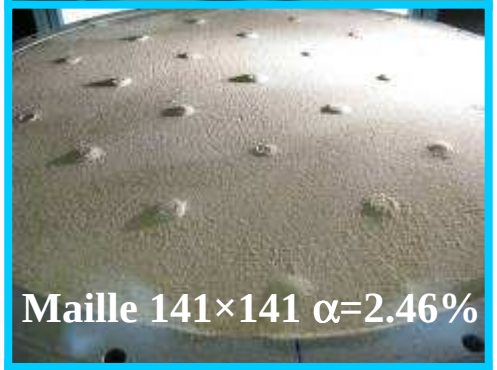
Merci de votre attention

Fondations du pont Rion-Antirion
sur inclusions rigides
Essais sur modèles réduits centrifugés

Quelques images



Quelques images



Quelques images

Bibliographie

Les références **en gras** sont liées au PN ASIRI

Asaoka, A. 1978. Observational procedure of settlement prediction, Soil and Foundations, Vol. 18, No. 4.

Barchard J. 2002. Centrifuge modelling of piled embankments on soft soils. *Master of Science of Engineering Thesis, University New Brunswick, 221p*

Baudouin G. 2010. *Sols renforcés par inclusion rigides : modélisation physique en centrifugeuse de remblais et de dallage*. Thèse de Doctorat Univ. Nantes.

Baudouin G., 2009. *Caractérisation des sols utilisés en centrifugeuse pour simuler un groupe élémentaire (3*3 inclusions)*. Rapport PN ASIRI n°3.09.3.09.

Baudouin G., Rault G., Thorel L. 2010 Renforcement de sol compressible par inclusions rigides sous dallage : modelisation en centrifugeuse. JNGG10 Grenoble. (soumis)

Baudouin G., Rault G., Thorel L. 2010. Analyse des efforts dans les inclusions rigides d'un groupe élémentaire (3*3 inclusions) : simulation en centrifugeuse du chargement d'un remblai et d'un dallage. Rapport PN ASIRI n°3.09.3.17.

Baudouin G., Rosquoêt F., Canou J., Dupla J.C., Thorel L, Rault G. & Andria-Ntoanina I. 2008. Caractérisation mécanique de sables d'Hostun. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nantes 18-19 juin JNGG08, ISBN 9782720825204, pp491-498*.

Baudouin G., Thorel L. & Rault G. 2010. 3D load transfer in pile-supported earth platforms over soft-soils: centrifuge modelling, *7th international Conference on Physical Modelling in Geotechnics* June 28th- july 1st, Zurich.

Baudouin G., Thorel L., Rault G., Garnier J., 2007. Renforcement de sols compressibles par inclusions rigides : dispositif pour la modélisation en centrifugeuse d'une maille élémentaire. XXVèmes rencontres universitaire de Génie Civil, Conception et vie des ouvrages, Bordeaux 23-25 mai 2007, 8p

Baudouin G., Thorel L., Rault G., Garnier J., Derkx F. & Buttigieg S., 2008. Centrifuge modelling of 3D load transfer in pile-supported earth platforms over soft-soils : experimental devices**. *2nd BGA Int. Conf. on Foundations, ICOF2008.* Brown M. J., Bransby M. F., Brennan A. J. & Knappett J. A. (Ed.). IHS BRE Press, EP93, ISBN 978-1-84806-044-9. Dundee, 24-27 june 2008. pp 1303-1313**

Bergdahl U., Lingfors R. & Nordstrand P. 1979. *The mechanics of piled embankments*. Swedish Geotechnical Institute, vol. SG3-79, pp.310-320.

Bibliographie

Briançon L. 2002. Renforcement des sols par inclusions rigides. Etat de l'art en France et à l'étranger. Rapport de l'IREX, 171p
Briançon L., Kastner R., Simon B. & Dias D. 2004 Etat des connaisssances. Amélioration des sols par inclusions rigides. *Int Symp. On Ground Improvement, presses ENPC, pp15-44*
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, pp.2032-2039.
Chen Y.M., Cao W.P. & Chen R.P. 2008. An experimental investigation of soil arching within basal reinforced and unreinforced piled embankments. *Geotextiles and Geomembranes.* vol.2: pp.164-174.
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.
Dinh A.Q. 2009. *Etude sur modèle physique des mécanismes de transfert de charge dans les sols renforcés par inclusions rigides.* Application au dimensionnement. Thèse ENPC.229p.
Dinh A.Q., Canou J. & Dupla J.C. 2009. *Eléments de caractérisation des matériaux utilisés dans le modèle physique 1g développé au CERMES*. Rapport PN ASIRI n°3.09.3.13.
Dinh A.Q., Canou J. & Dupla J.C. 2009. *Réalisation d'un programme d'essais sur le modèle physique 1g – Etude paramétrique. Simulation du chargement d'un remblai.* Rapport PN ASIRI n°3.09.3.12.
Dinh A.Q., Canou J. & Dupla J.C. 2010. *Réalisation d'un programme d'essais sur le modèle physique 1g – Etude paramétrique. Simulation du chargement d'un dallage.* Rapport PN ASIRI n°3.09.3.15.
Dupla J.-C., Andria-Ntoanina I., Canou J. 2008. *Caractérisation mécanique à l'appareil triaxial du mélange de sable d'Hostun utilisé en centrifugeuse en tant que matelas de transfert de charge*. Rapport PN ASIRI n°2.08.3.07.46p.
Dupla J.-C., Canou J. & Dinh A.Q. 2007. *Développement d'équipements spécifiques pour le modèle physique 1g en chambre d'étalonnage*. Rapport PN ASIRI n°2.07.3.03. 10p.
Dupla J.-C., Canou J. & Dinh A.Q. 2007. *Programme d'essais de qualification du modèle physique 1g et étude paramétrique préliminaire*. Rapport PN ASIRI n°2.07.3.04. 13p.
Dupla J.-C., Canou J. & Dinh A.Q. 2008. *Caractérisation des graves utilisées sur les plots expérimentaux de St-Ouen l'Aumône et de Chelles*. Rapport PN ASIRI n°1.07.3.02. 104p.
Ellis E. & Aslam R. 2009. Arching in pile embankments : cmparison of centrifuge tests and predictive methods. *Ground Engineering*, june, 28-38.

Bibliographie

Garnier J. & Pecker A. 1999. Use of centrifuge tests for the validation of innovative concept in foundation engineering. 2nd *Int. Conf. on Earthquake geotech. Engng, Lisbon, 7p*

Garnier J., Derkx F., Cottineau L.-M. & Rault G. 1999. Etudes géotechniques sur modèles centrifugés. Evolution des matériels et des techniques expérimentales. *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées.* 223. 27-50.

Garnier J., Gaudin C., Springman S.M., Culligan P.J., Goodings D., Konig D., Kutter B., Phillips R., Randolph M.F. & Thorel L. 2007. Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modeling. *Int. J. Physical Modelling in Geotechnics* ISSN 1346-213X, vol7, n°3, pp 1-24.

Hewlett W. J. & Randolph M. F. 1988. Analysis of piled embankment. *Ground Engineering*, vol.21, issue 3, pp.12-18.

Horgan G. J. & Sarsby R. W. 2002. The arching effect of soils over voids incorporating geosynthetic reinforcement. In: Delmas S., Gourc J.P. Eds. *Proc. of the 7th Int. Conf. on Geosynthetics*, 22-27 septembre 2002, Nice. Lisse, Pays-Bas : Swets & Zeitlinger, 2002, pp. 373-378.

Jenck O. (2005). Modélisation physique et numérique du renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales. Concours des Jeunes Chercheurs, 23èmes rencontres de l'AUGC, Grenoble, 3-4 juin 2005. 8 p.

Jenck O., Dias D. & Kastner R. 2006. *Expérimentations sur modèle réduit bidimensionnel en laboratoire. Modélisation physique de la plate-forme de transfert de charge*. Rapport ASIRI 1.06.3.01, 79p.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2003). Le renforcement des sols par inclusions rigides verticales. 4ème rencontre du RDGC, Aussois, 16-19 mars 2003.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2004). Analyse du fonctionnement d'un massif de fondation renforcé par des inclusions rigides verticales - modélisation physique. In Shahrour et al. (eds), proc. of the International Conference on Geotechnical Engineering, Beyrouth, 19-22 mai 2004. pp 317-322.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2004). Modélisation physique bidimensionnelle du renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales. In Dhouib et al. (eds), proc. of ASEP-GI, Paris, 9-10 septembre 2004. Presses de l'ENPC : pp 175-182.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2004). Modélisation physique bidimensionnelle du renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales. AUGC 2004, Marne la Vallée, 3-4 juin 2004.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2004). Physical modelling of a rigid pile supported earth platform. In Walraven et al. (eds), proc. of the 5th PhD Symposium, Delft, Pays-Bas, 16-19 juin 2004. Balkema : Vol. 1, pp 33-40.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2005). "Renforcement des massifs de fondation par inclusions rigides verticales - modélisation physique bidimensionnelle et confrontation à des méthodes de dimensionnement." Annales du BTP, n°1 de 2005 : 23-37.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2005). "Soft Ground improvement by vertical rigid piles – Two-dimensional physical modelling and comparison with current design methods". Soils & Foundations 45(6) : 15-30.

Bibliographie

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2005). Arching in piled embankment - Two-dimensional physical and numerical modelling. In Barla G., Barla M. (eds), proc. of the 11th International Conference IACMAG, Turin, 19-24 juin 2005. Bologne : Pràtron Editore : Vol. 2, pp 333-340.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2005). Construction sur sol compressible : renforcement par inclusions rigides verticales, modélisation physique et numérique bidimensionnelle. In proc. of the International Symposium on Urban Geotechnics (GeoCityNet 2005), Lille, 10-11 octobre 2005.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2005). Etude expérimentale sur modèle réduit d'un remblai sur sol renforcé par inclusions rigides verticales. In proc. of the 16th International Symposium on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), Osaka, Japon, 12-16 septembre 2005.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2005). Physical and numerical modelling of soft ground improvement by vertical rigid piles. In De Gennaro, Pereira & Delage (eds) proc. of the 2nd International Workshop of Young Doctors in Geomechanics, Champs-sur-Marne, 23-25 novembre 2005. pp 71-73.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2005). Soft ground improvement by vertical rigid piles - Two-dimensional physical and numerical modelling. In Bilsel H., Nalbantoglu Z. (eds), proc. of the International Conference on Geotechnical Engineering GeoProb 2005, Chypre, 25-27 mai 2005. Vol.2, pp 857-864

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2006) "Small scale model test and numerical modelling of soft ground improvement by vertical rigid piles." 1st Euro Mediterranean Symp. on Advances in Geomaterials and Structures, Hammamet, Tunisie, 3-5 mai 2006.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2006) "Soft ground improvement by vertical rigid piles and basal geosynthetic reinforcement - physical modelling." 8th Int. Conf. on Geosynthetics 8ICG, Yokohama, Japon, 18-22 septembre 2006.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2006) "Two-dimensional physical modelling of soft ground improvement by vertical rigid piles." Int. Conf. of Physical modelling in Geotechnics, Hong Kong, 4-6 août 2006.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2007). "Two-Dimensional Physical and Numerical Modeling of a Pile-Supported Earth Platform over Soft Soil". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 133 (3) : 295-305.

Jenck O., Dias D., Kastner R. (2008) "Physical model and discrete element method analysis of a granular platform supported by piles in soft soil." ASCE GeoCongress 2008, La Nouvelle-Orléans, mars 2008. Geotechnical Special Publ. n°179, pp. 982-989.

Jenck, O. 2005. *Le renforcement des sols compressibles par inclusions rigides verticales. Modélisation physique et numérique*, PhD Thesis, INSA de Lyon, Villeurbanne.

Bibliographie

Kempfert H. G., Zaeske D. & Alexiew D. 1999. Interactions in reinforced bearing layers over partially supported underground. In: *Proc. of the 12th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (12th ECSMGE)*, 7-10 juin 1999, Amsterdam, Pays-Bas. Rotterdam: Balkema, 1999, vol. 3, pp. 1527-1532.

Laboratoire Central de Ponts et Chaussées, 1992a, *Réalisation des Remblais et des Couches de Forme*, France.

Laboratoire Central de Ponts et Chaussées, 2003, Practical Manual for the Use of Soils and Rocky Materials in Embankment Construction, Technical Guide 60p.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1992b, *Réalisation des Remblais et des Couches de Forme*, France, Fascicules I 98p et II 102p.

Lajevardi S.H., Dias D., Briançon, L. 2010 Essais d'extraction au banc d'ancrage. Caractérisation de l'interface sol/nappe géosynthétique. Rapport ASIRI n°3.10.3.18. 42p.

Low, B. K., Tang, S. K. & Choa, V. 1994. Arching in piled embankments, *J. Geotech. Engrg.*, Vol.120, N°11, pp. 1917–1937.

Okyay U. Dias D., David J.P.& Auriol J.C. 2009. *Essais de caractérisation du limon de Goderville traité.* Rapport ASIRI n°2.09.3.10. 38p.

Okyay U.S. 2010 Etude expérimentale et numérique des transferts de charge dans un massif renforcé par inclusions rigides.

Application à des cas de chargements statiques et dynamiques Thèse de Doctorat, INSA de Lyon.

Pecker, A. 2000. Pont de Rion – Antirion : fiabilité et conception parasismique des fondations. La sécurité des grands ouvrages. Presses ENPC, pp 21-51.

Rault G., Baudouin G., Thorel L. 2007. *Comportement d'un groupe élémentaire (3*3 inclusions) : conception des montages*. Rapport ASIRI n°2.07.3.05. 27p.

Rault G., Baudouin G., Thorel L. 2007. *Comportement d'un groupe élémentaire (3*3 inclusions) : réalisation des montages*. Rapport ASIRI n°2.07.3.06. 35p.

Rault G., Baudouin G., Thorel L. 2010. *Comportement d'un groupe élémentaire (3×3 inclusions) : simulation en centrifugeuse du chargement d'un dallage.* Rapport ASIRI 2-07-3-11,

Rault G., Buttigieg S., Thorel L., Derkx F., Okyay U. Six G. & Néel A. 2010. *Mobile tray for simulation of 3D load transfer in pile-supported earth platforms in a centrifuge. 7th international Conference on Physical Modelling in Geotechnics* June 28th- july 1st, Zurich.

Rault G., Buttigieg S., Thorel L., Derkx F., Okyay U., Sic G., Néel A. 2010 inclusions rigides en centrifugeuse : developpement d'un dispositif experimental a plateau mobile. JNGG10 Grenoble.(soumis)

Rault G., Okyay U., Thorel L. 2010. *Etude du transfert de charge par cisaillement. Dispositif de plateau mobile. Matelas granulaire et matelas en limon traité*. Rapport ASIRI 2-07-3-16.

Rault G., Thorel L. & Garnier J. 2006. Modélisation physique de fondations et d'ouvrages maritimes. *Mécanique et Industries , ISSN1296-2139, vol7, pp 223-230*

Bibliographie

Simon B. & Schlosser F. 2005 Soil reinforcement by vertical stiff inclusions in France *Symp Rigid Inclusion in difficult conditions, 11-12 mayo, Mexico,22p.*

Thorel L., Baudouin G., Rault G., Derkx F., Buttigieg S., Garnier J., 2008 Dispositif d'étude du transfert de charge dans un système de sol compressible renforcé par inclusions rigides sur modèle réduit centrifugé. Studia Geotechnica et Mechanica, vol.XXX, n° 1-2, pp257-268.

Thorel L., Dupla J.C., Rault G., Canou J., Baudouin G., Dinh A.Q. & Simon B. 2010. Pile-supported earth platfomrs : two approaches with physical models. *7th international Conference on Physical Modelling in Geotechnics* June 28th- july 1st, Zurich.

Thorel L., Rault G. & Baudouin G. 2008. *Comportement d'un groupe élémentaire (3×3 inclusions) : simulation en centrifugeuse du chargement d'un remblai.* Rapport ASIRI 2-07-3-08, 66p+78p.

Thorel L., Rault G., Garnier J., Murillo C., Gaudicheau P., Néel A. & Favraud C. 2008. Macro-gravity measurements on reduced-scale models of geotechnical structures. *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées* ISSN 1269-1496, n° 272-273 spécial Métrologie pp93-131. **Thorel, L; Baudouin, G., Rault, G., Derkx, F., Buttigieg, S., Garnier, J. 2007. Modélisation en centrifugeuse du renforcement de sols compressibles par inclusions rigides : dispositifs du transfert de charge par cisaillement. 18ème Congrès Français de mécanique, Grenoble, 6p.**

Van Eekelen D. J. M., Bezuijen A. & Oung O. 2003. Arching in piled embankments experiment and design calculation. *Foundations : Innovations, observations, design and practice*, Thomas Telford, London, 2003, pp 885-894.