

Renforcement par inclusions rigides : 3 types de modèles physiques

L. Thorel

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



**Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées**



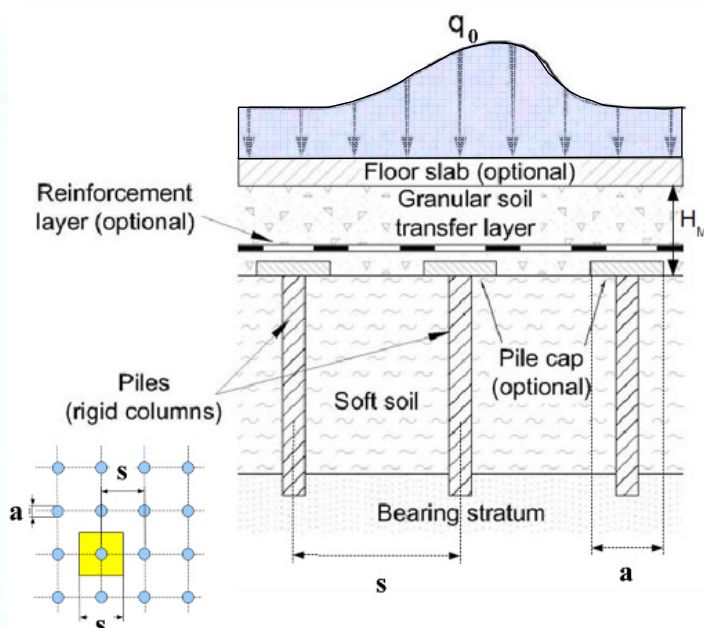
Projet National

Amélioration des Sols par Inclusions Rigides

Opération du Réseau Génie Civil et Urbain



Introduction



Effets de voûtes?

Pont du Gard

[Simon & Schlosser, 2005]

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

Données In Situ : Plots d'essais & Chantiers

Comportement : Matériaux du matelas granulaire

(Navier)

Sol traité

(LCPC-Nantes)

Interface matelas-géosynthétique

(INSA-Lyon)

Modélisation physique : Rouleaux de Schneebeil

(INSA-Lyon)

Chambre d'étalonnage

(Navier)

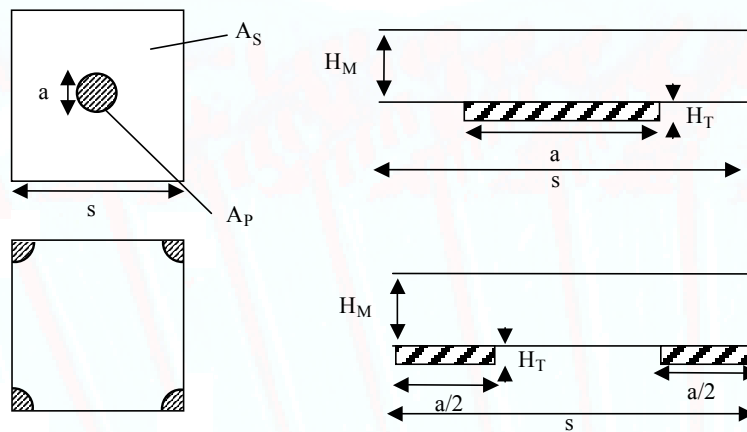
Centrifugeuse

(LCPC-Nantes)

Modèles numériques

Méthodes de dimensionnement pratiques

Geometry



A : Influence surface area of a pile (pile + soil)

Ap : Surface area of pile cap

As : Surface area of the soft soil around the pile

$A = A_p + A_s$ with (circular section)

$$A_p = \pi a^2 / 4$$

$$A_s = s^2$$

Covering area : $\alpha = A_p / A$

$$\alpha \sim qq\%$$

Appareillages

Paramètres étudiés

Résultats : report des efforts

répartition des tassements

dallage

Conclusions & Perspectives

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

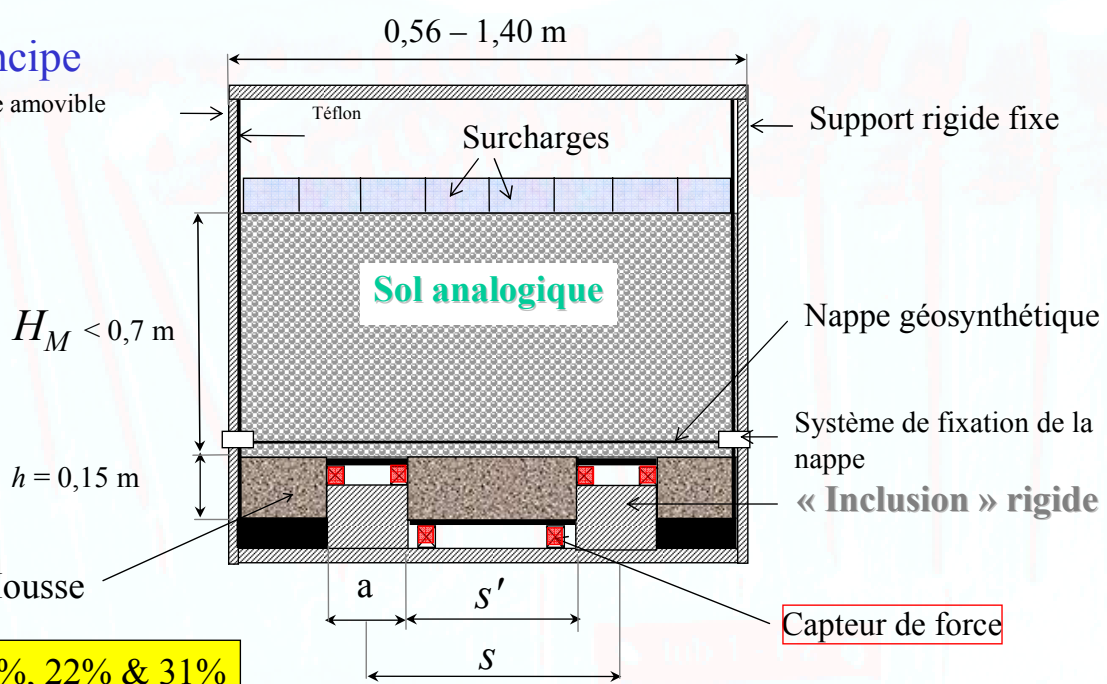
3×3 inclusions 3D (éch.~1/28) & 13 à 61 inclusions (éch.~1/12 & 1/20)

(LCPC-Centre de Nantes)

Appareillages : Modèle 2D Rouleaux de Schneebeli (INSA Lyon)

Principe

Support rigide amovible



[Thèse Orianne Jenck, 2005]

Appareillages : Modèle 2D

Rouleaux de Schneebeli (INSA Lyon)

Lois d'échelle

	<i>Prototype (vraie grandeur)</i>	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
H_M	> 0,4 m	0,28 – 0,70 m	1/14 – 1/6
ρ_{dM}	~2000 kg/m ³	6320 kg/m ³	3,1
g	9.81m/s ²	9.81m/s ²	1
H_M γ_{dM}	> 8 kPa	17-43 kPa	> 2,1 – 5,4
q₀	~ 100 kPa	0 – 4 kPa	1/25

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

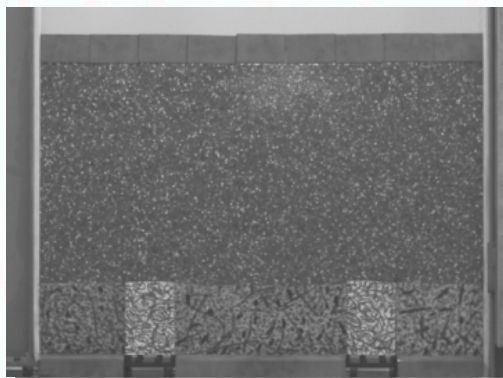
=> Etude **qualitative** des phénomènes
Données pour modélisation numérique

[ASIRI-1.06.3.01, 2006]

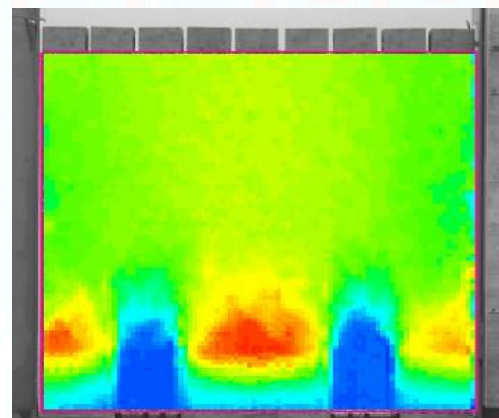
Appareillages : Modèle 2D

Rouleaux de Schneebeli (INSA Lyon)

Analyse d'image



S

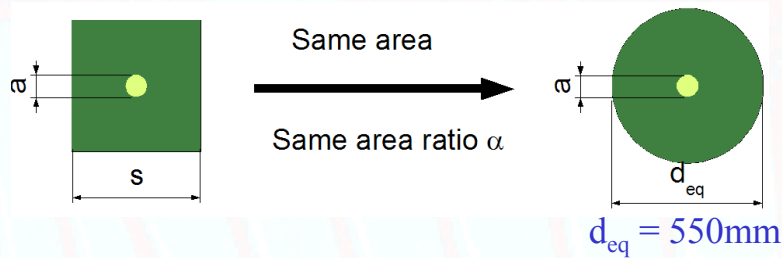


[Thèse Orianne Jenck, 2005]

Appareillages : Modèle Axisymétrique

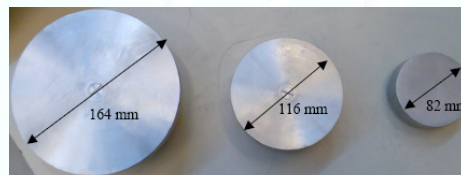
Chambre d'étalonnage (Navier-Géotechnique)

Principe



Nouveau dispositif inspiré de la chambre d'étalonnage

3 têtes d'inclusion interchangeable



$\alpha = 2.22\%, 4.44\% \text{ \& } 8.88\%$

[Thèse Anh Quan Dinh, 2009]

11

Appareillages : Modèle Axisymétrique

Chambre d'étalonnage (Navier-Géotechnique)

Lois d'échelle

	<i>Prototype (vraie grandeur)</i>	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
H_M	> 0,4 m	0,1 – 0,3 m	1/4 – 1/1,3
ρ_{dM}	~2000 kg/m ³	1630 kg/m ³	0,8
g	9.81m/s ²	9.81m/s ²	1
H_M γ_{dM}	> 8 kPa	2-5 kPa	> 1/4 – 1/1,6
q₀	~ 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]

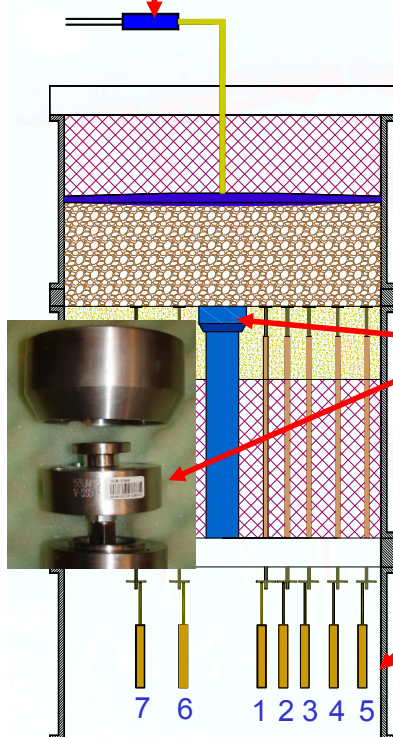
12

Appareillages : Modèle Axisymétrique

Chambre d'étalonnage (Navier-Géotechnique)

Capteur de Pression

Simulation d'un remblai



Capteur de Force

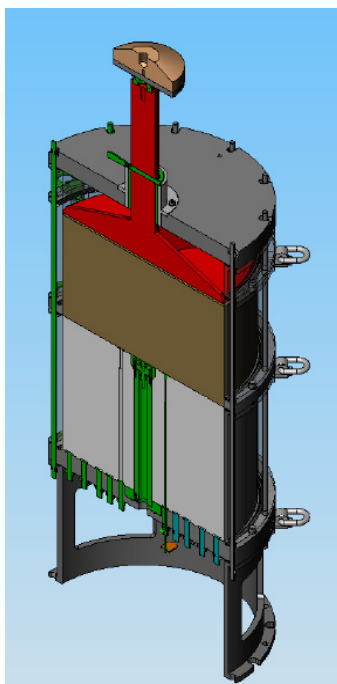
Tassomètres



[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]

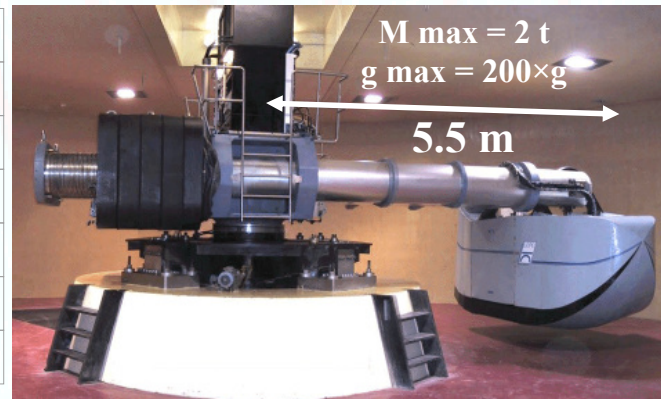
Appareillages : Modèle 3D

Centrifugeuse géotechnique (LCPC-Nantes)

Principe

Augmenter les forces de masse $\Rightarrow$ 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	$\epsilon^*=1$



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

[Garnier et al., 2007]

Appareillages : Modèle 3D

Centrifugeuse géotechnique (LCPC-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
H_M	> 0,4 m	0,021-0,054 m	1,45 – 3,8
ρ_{dM}	$\sim 2000 \text{ kg/m}^3$	1669 kg/m ³	0,8
g	9,81m/s ²	27,8×9.81m/s ²	27,8
H_M γ_{dM}	> 8 kPa	9-25 kPa	> 1 – 3
q₀	$\sim 100 \text{ kPa}$	0 – 160 kPa	1

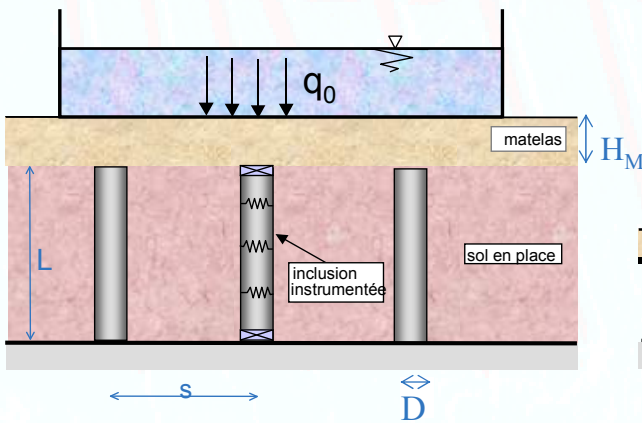
Respect strict des similitudes

$\Rightarrow$ Etude **quantitative** des phénomènes
Transposition à l'ouvrage en vraie grandeur
Données pour modélisation numérique

[ASIRI 2.08.3.08, 2008]

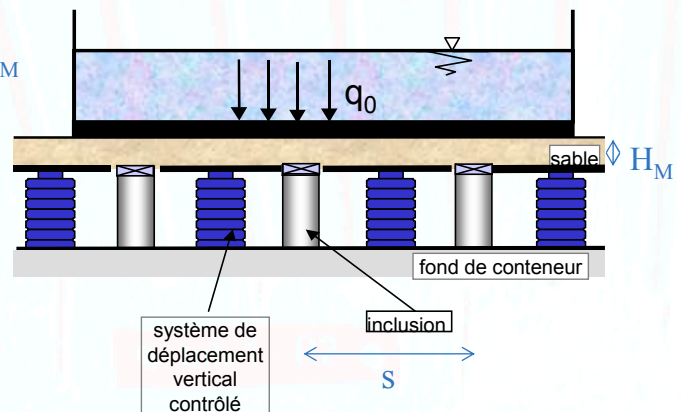
Groupe élémentaire 3×3
inclusions de maille carrée

Sol compressible = kaolin + sable

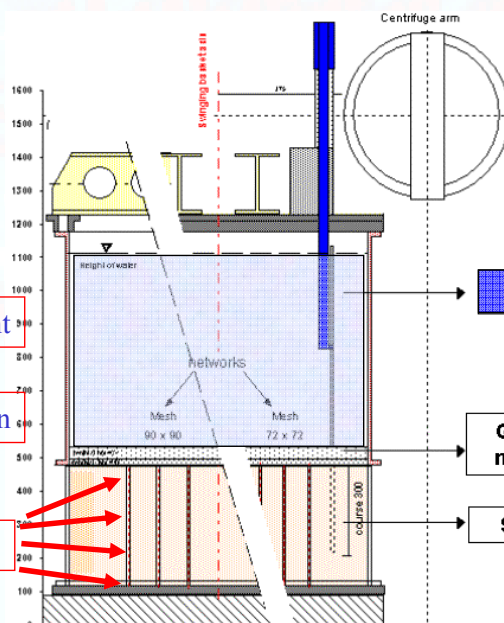
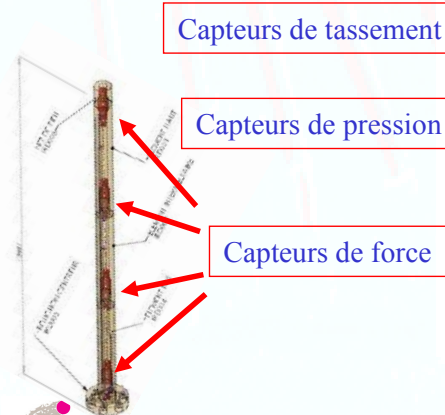


Développement des voûtes dans le
matelas 13 à 61 inclusions

Sol compressible = plateau mobile
perforé



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

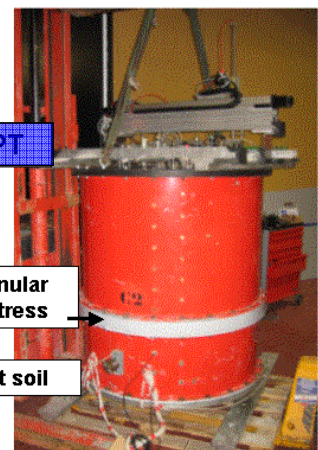


$\alpha = 3.14\% \text{ \& } 4.91\%$

CPT

Granular
mattress

Soft soil



[Thèse Gaëlle Baudouin, 2010]

Appareillages : Modèle 3D

Centrifugeuse géotechnique (LCPC-Nantes)

Plateau mobile

Contrôle du tassement
Tassements en surface du matelas
9 inclusions instrumentées

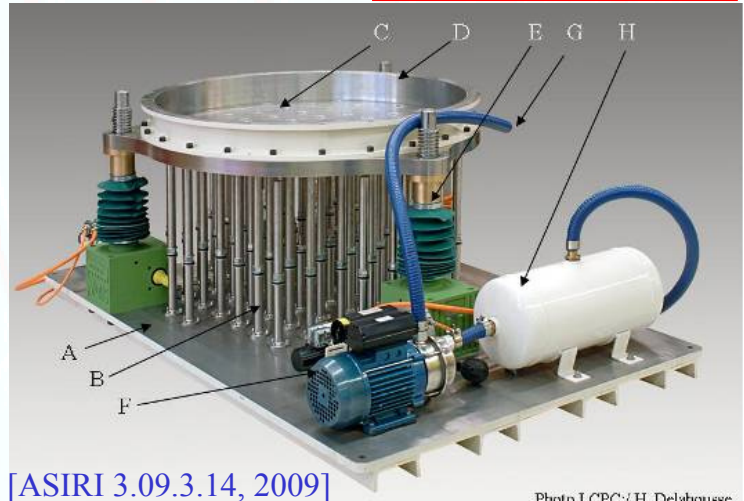
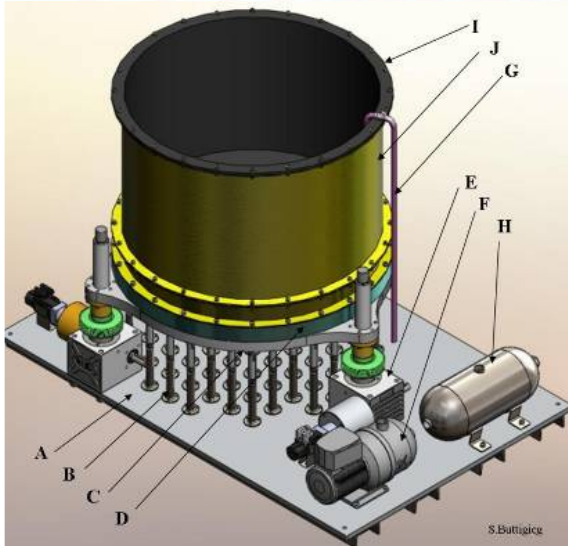
$\alpha=1.23\%, 2.47\% \text{ \& } 4.91\%$

Capteurs de pression

Capteurs de force

Capteurs de tassement

Capteurs de pression totale



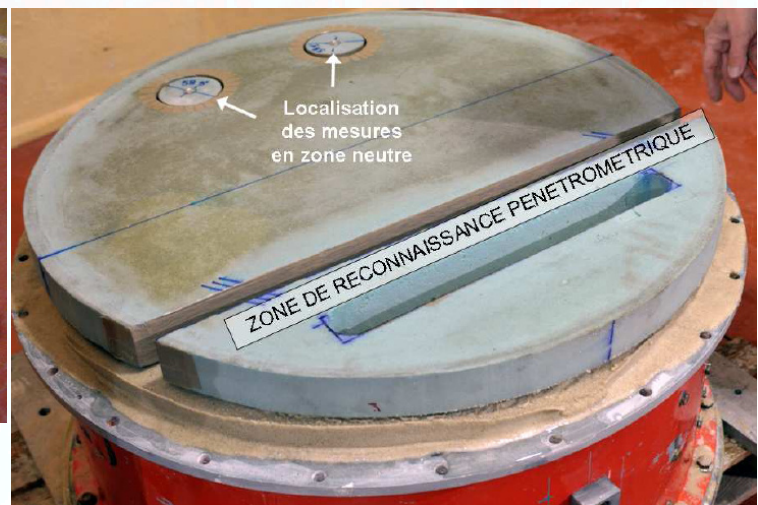
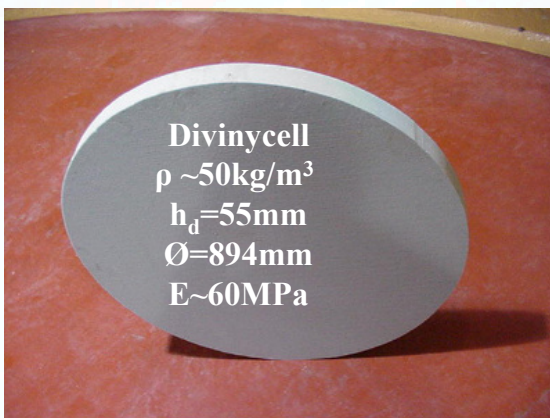
[ASIRI 3.09.3.14, 2009]

Photo LCPC/H. Delahousse

Appareillages : Modèle 3D

Centrifugeuse géotechnique (LCPC-Nantes)

Simulation d'un dallage

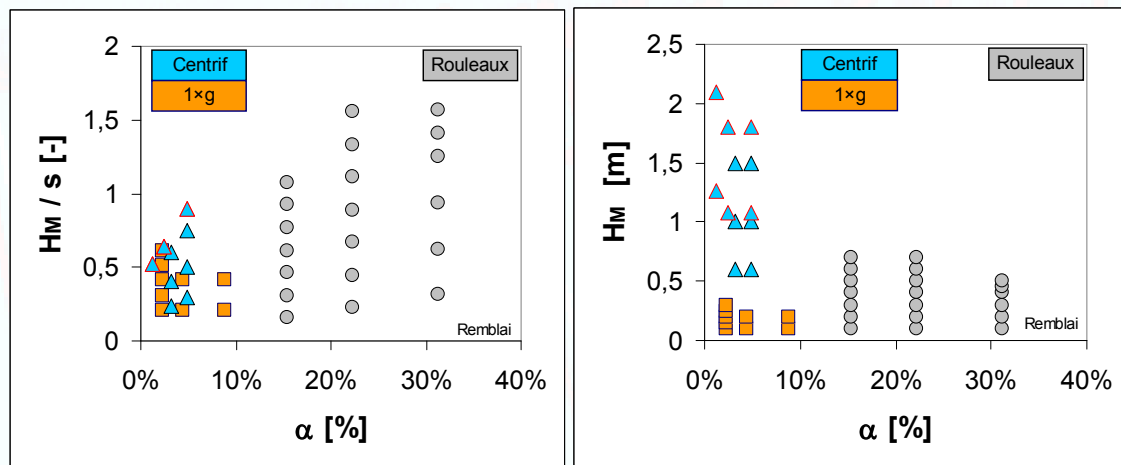


$$(EI)^M/(EI)^P = 1/N^4$$

Prototype épaisseur 18-21 cm
béton fibré
E~10 GPa

Paramètres étudiés

Géométrie



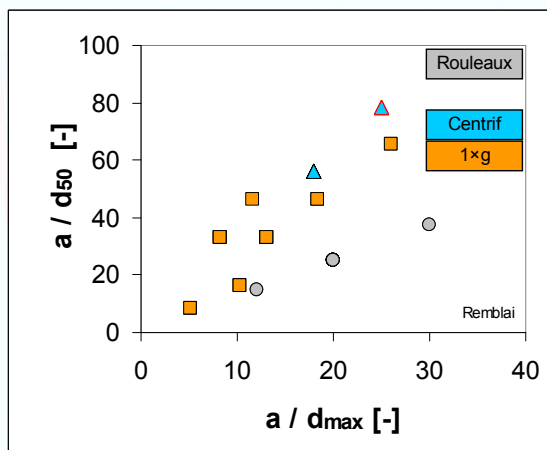
$\alpha = (\text{Aire inclusions}) / (\text{Aire sol renforcé})$

H_M = hauteur du matras

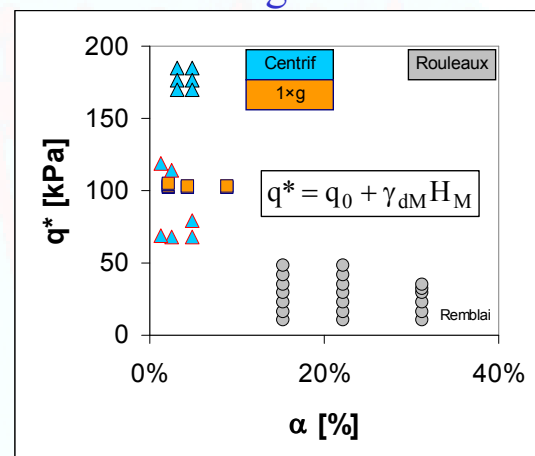
s = entre-axe entre inclusions

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

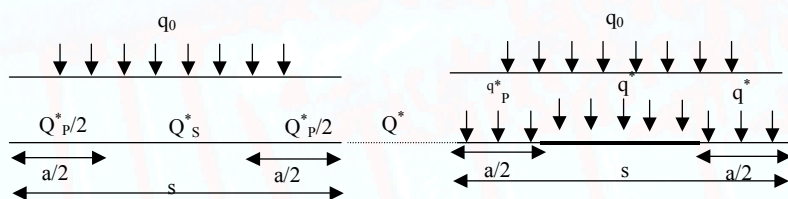
Nature des sols

	<i>Sol compressible</i>	<i>Matelas</i>
2D 	2 mousses : $\rho=80\text{kg/m}^3$ $E=59$ puis 277 kPa $\rho=120\text{kg/m}^3$ $E=277$ puis 134 kPa	rouleaux en acier inox $\varphi=21^\circ$, $E\sim 35$ MPa Géosynthétiques : Typar $J=20\text{kN/m}$, RP75 $J=140\text{kN/m}$, RP200 $J=200\text{kN/m}$
Axisymétrique 	Mélange : Billes polystyrène (1-3mm) + sable Hostun HN31 + eau ($w\sim 10\%$) $C_c/(1+e_0) = 0,09$ à $0,16$	Mélange ($d_{50}=2,5\text{mm}$, $C_u=10$, $C_c=3,9$) $\varphi=32^\circ$ & 35° $I_D=0,71$ & $0,95$ Gravier Hostun HN2/4 ($d_{50}=2,5\text{mm}$, $C_u=2$, $C_c=0,9$) $\varphi=36^\circ$ $I_D=0,79$ Microballast 5-8mm ($d_{50}=5\text{mm}$) $\varphi=38^\circ$ Micro-ballast 10-16mm ($d_{50}=10\text{mm}$) $\varphi=40^\circ$ $\rho_d=1,62\text{t/m}^3$
3D Groupe 	80% Kaolin+20% Sable Fontainebleau $C_c/(1+e_0) \sim 0,13$	Mélange de sable d'Hostun ($d_{50}=0,32\text{mm}$, $C_u=3,5$, $C_c=0,9$) $\varphi=38^\circ$ - 42° , $E=175$ - 325MPa (Compr.) 100 - 130MPa (Ext.)
3D Plateau 	Plateau Mobile	Mélange de sable d'Hostun Limon de Goderville traité : 3% CaCO_3 : $\varphi'=18^\circ$, $c'=35$ kPa, $E=50\text{MPa}$ 6% Ciment : $\varphi'=22^\circ$, $c'=85$ kPa, $E=105\text{MPa}$
Saint-Ouen	$C_c/(1+e_0) = 0,18$ à $0,44$	Grave Silico-Calcaire ($d_{50}=10\text{mm}$, $C_u=4629$) $\varphi'\sim 48^\circ$, $c'=10$ - 50 kPa

23

A.S.I.R.I

Cas non renforcé



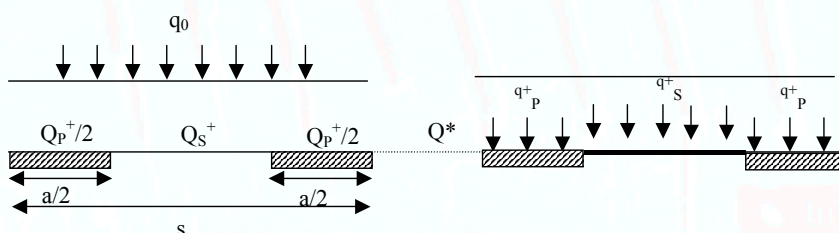
$$Q^* = (\gamma H_M + q_0) \cdot A = q^* \cdot A$$

$$Q_P^* = (\gamma H_M + q_0) \cdot A_p = q_P^* \cdot A_p$$

$$Q_S^* = (\gamma H_M + q_0) \cdot A_s = q_S^* \cdot A_s$$

$$Q^* = Q_S^* + Q_P^* = Q_S^+ + Q_P^+$$

Cas renforcé



$$Q_P^+ = q_P^+ \cdot A_p$$

$$Q_S^+ = q_S^+ \cdot A_s$$

24

A.S.I.R.I

Indicateurs de transfert de charge

Efficacy (Hewlett et Randolph, 1988) : $E = \frac{Q_P^+}{Q^*}$

Stress Reduction Ratio (Low et al, 1994) : $SRR = \frac{Q_S^+}{Q_S^*}$

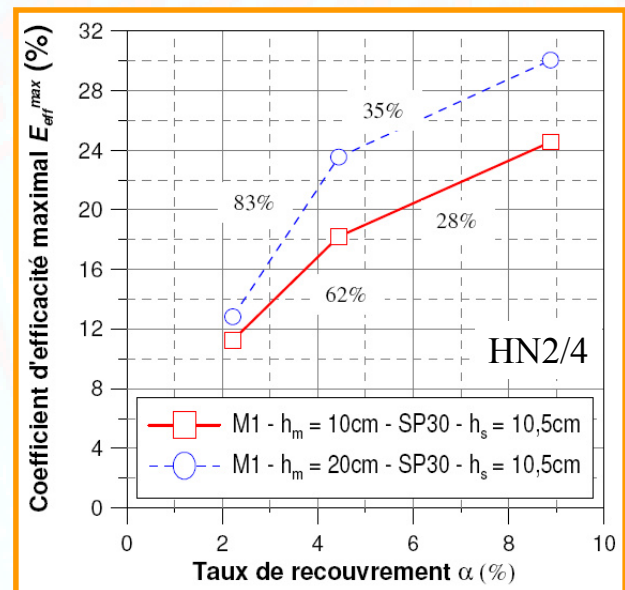
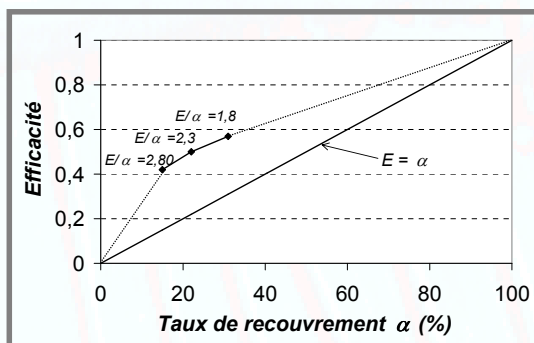
Stress concentration factor (Han, 1999) : $n = \frac{q_P^+}{q_S^+}$

Capacity (Low et al., 1994) : $C = Q_P^+ / (A_P \cdot q^*)$

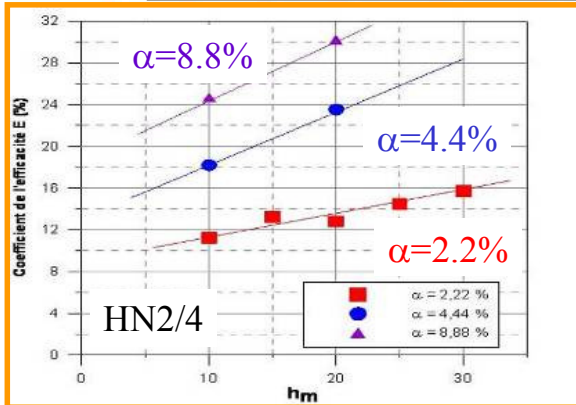
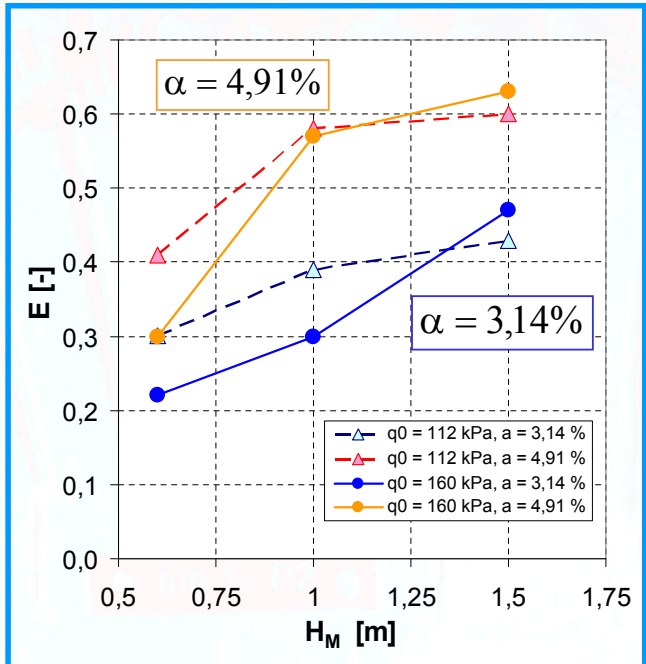
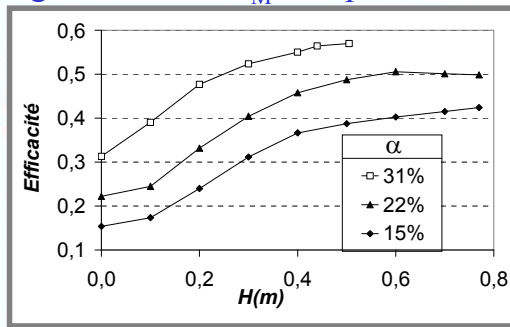
$$SRR = \frac{1-E}{1-\alpha} \quad E = 1 - (1-\alpha) \cdot SRR \quad n = \frac{E(1-\alpha)}{\alpha(1-E)} \quad C = \frac{E}{\alpha}$$

Paramètres adimensionnels

E augmente quand α augmente

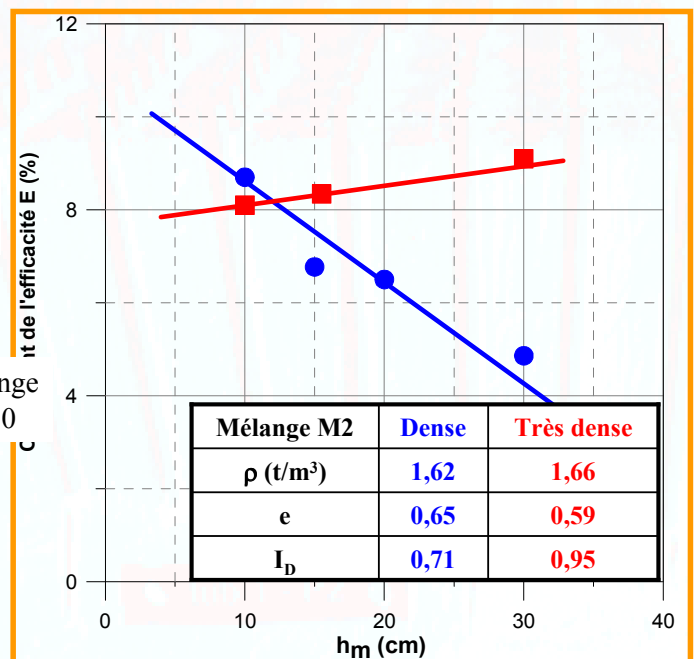
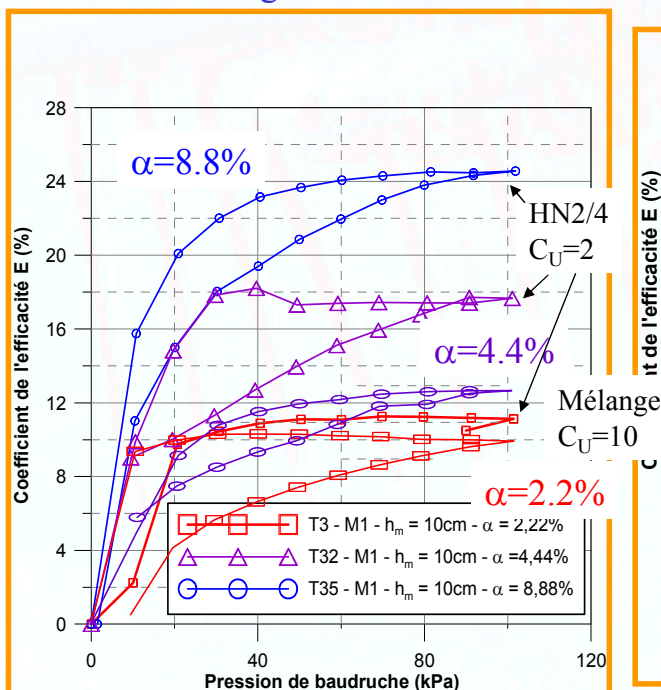


E augmente avec H_M pour atteindre un palier (hauteur critique)

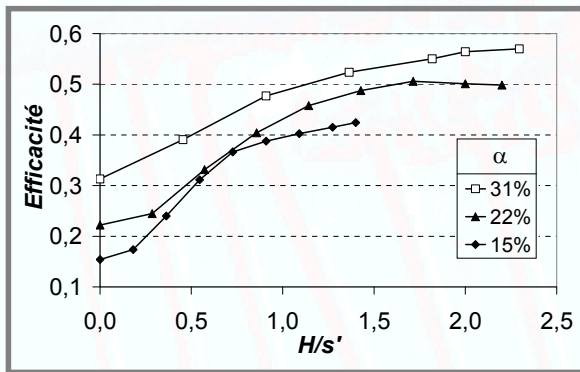


L'évolution de E avec H_M dépend de :
la granulométrie

la compacité du matelas



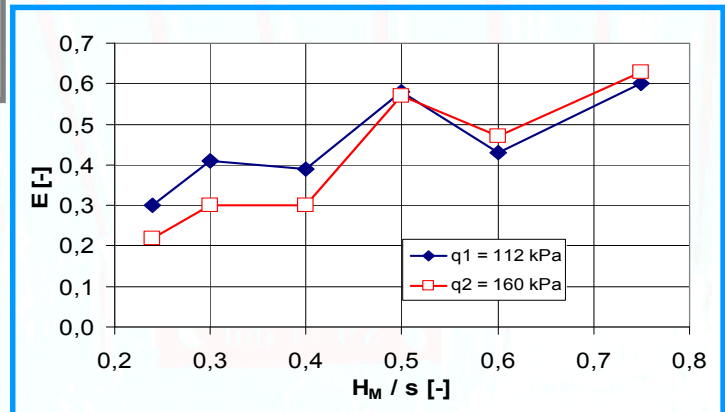
E augmente quand H_M/s augmente



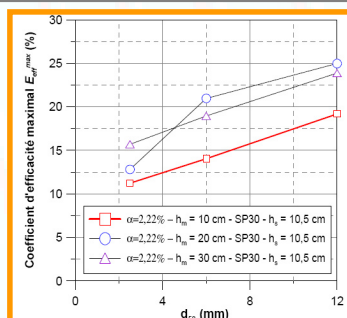
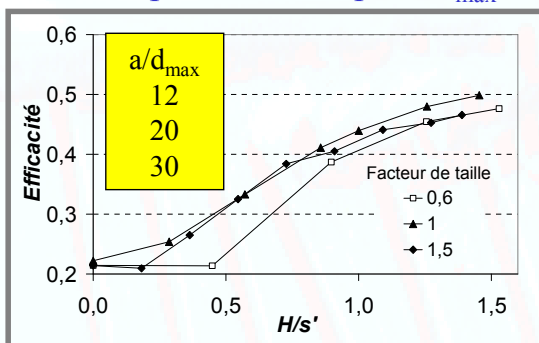
$$s' = s - a$$

$H_c \sim 2 (s-a) ??$

$$\alpha = \pi a^2 / s^2$$

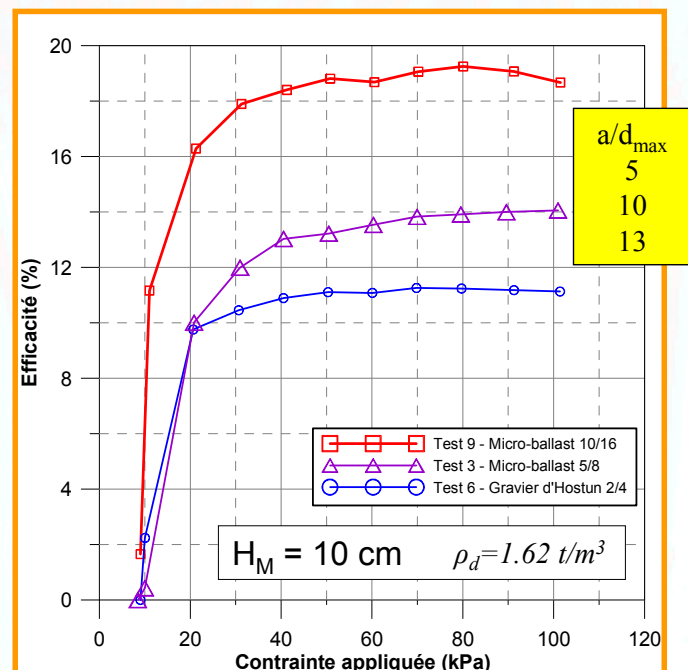


E n'est pas influencé par $a/d_{\max}$



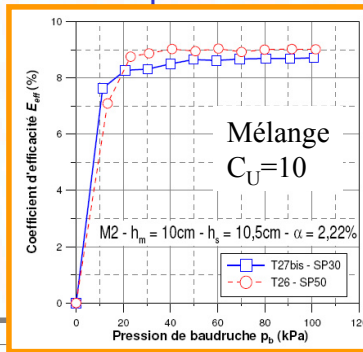
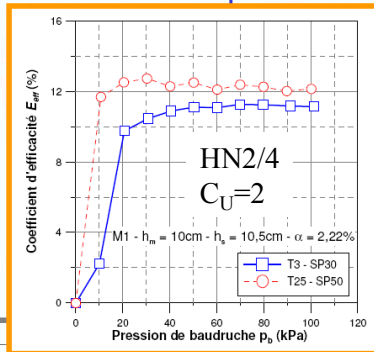
a/d_{50} : 33 ... 7

VRAI si les grains sont « petits »



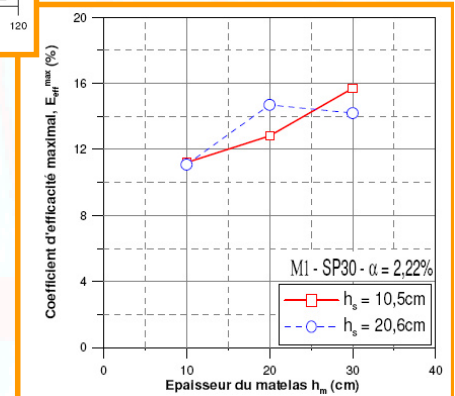
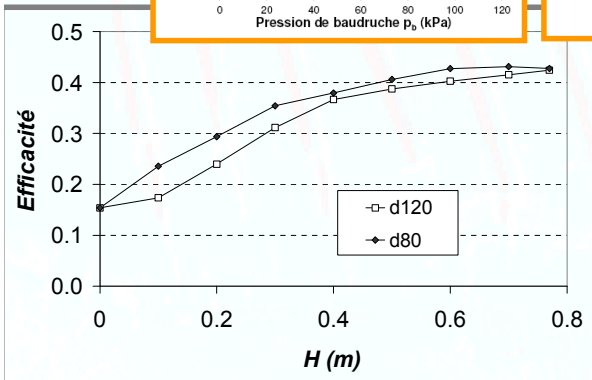
Sans géosynthétique :

La nature et la puissance du sol compressible n'ont pas d'influence sur E



$$C_c = (1+e_0) \sim 0.14$$

$$C_c = (1+e_0) \sim 0.10$$

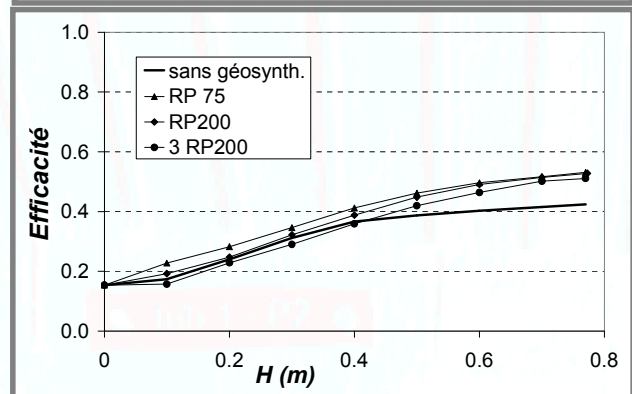
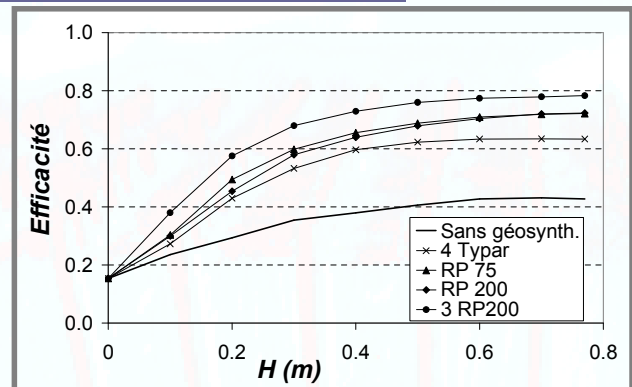


Avec Géosynthétique :

E augmente avec J si sol
« très » compressible

$$\alpha = 15\%$$

pas d'effet de J sur E si sol
« peu » compressible



E augmente quand α augmente ■ ■ ■

E augmente avec H_M ... pour atteindre un palier (hauteur critique) ■ (■) ■

L'évolution de E avec H_M dépend de : ■

1) la granulométrie, 2) la compacité du matelas

E augmente quand H_M/s augmente ■ ■ $\Rightarrow H_c \sim 2 (s-a) ??$

E n'est pas influencé par a/d_{max} : vrai pour de « petits grains de sol » ■ ■

Sans géosynthétique :

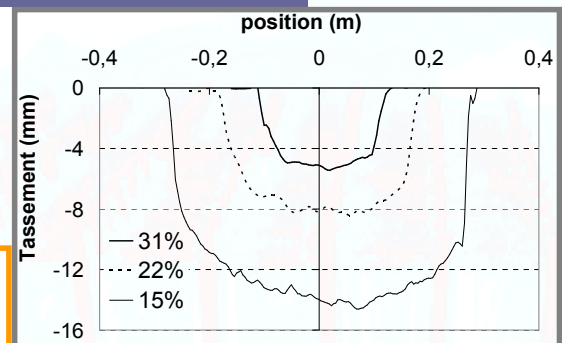
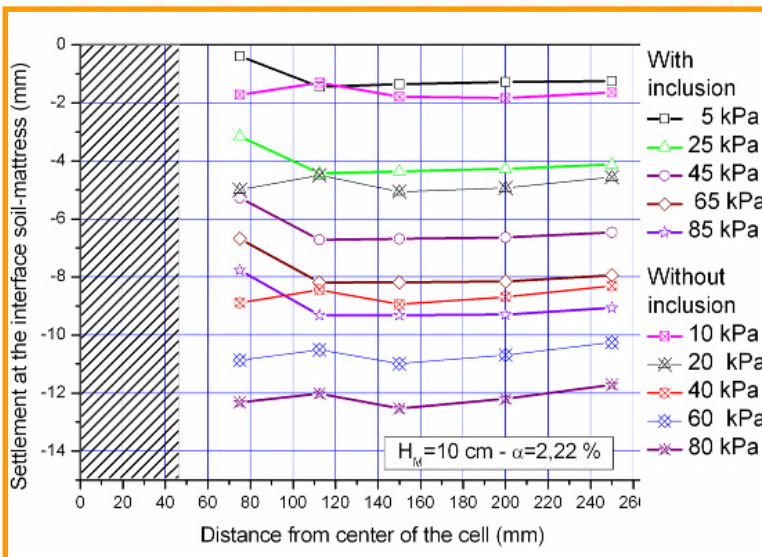
La nature et la puissance du sol compressible n'ont pas d'influence sur E ■ ■

Avec Géosynthétique :

E augmente avec J si sol « très » compressible ■

pas d'effet de J sur E si sol « peu » compressible ■

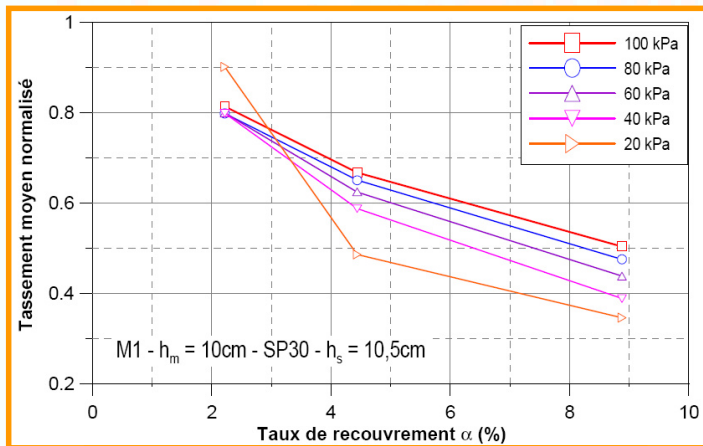
Le profil de tassement à l'interface sol-matelas a une « forme en U »



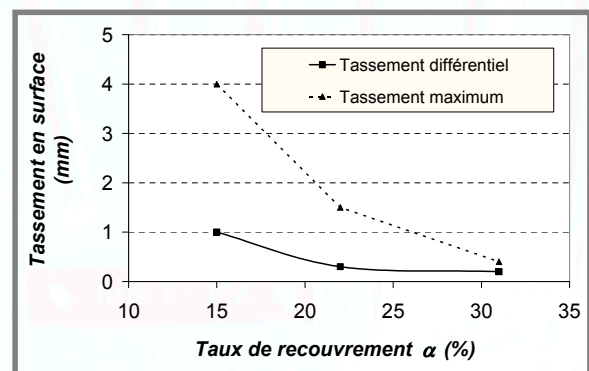
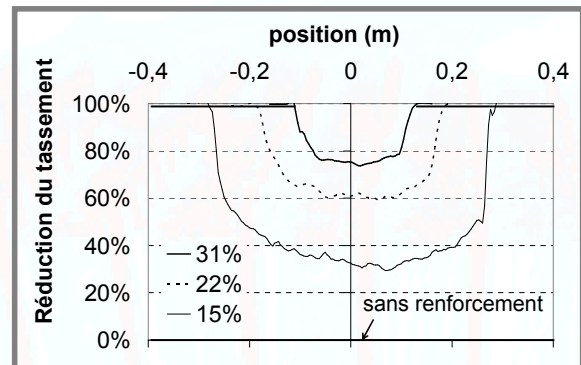
$\alpha = 2.2\%$

$\alpha = 0$

Les tassements diminuent quand α augmente (1)

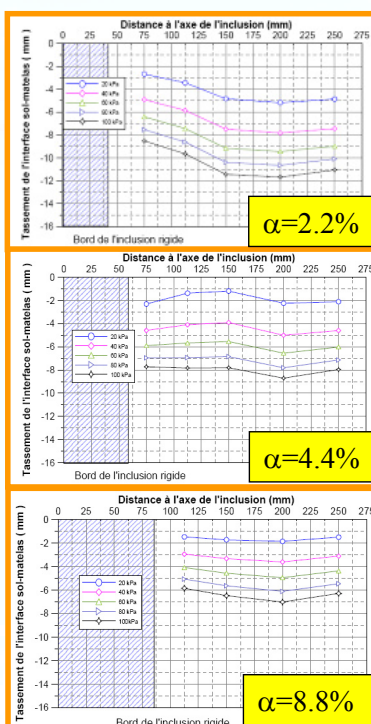


Interface matelas / sol compressible



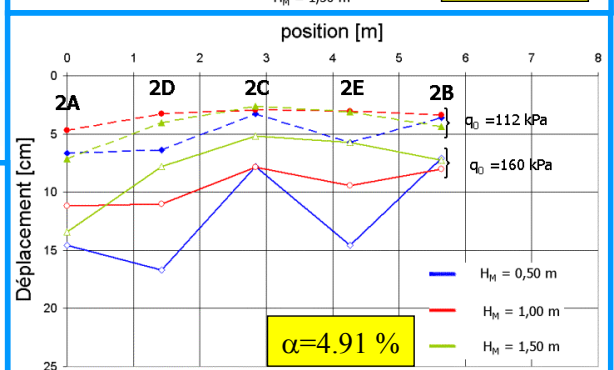
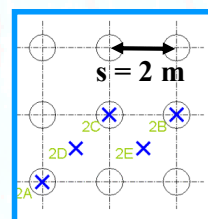
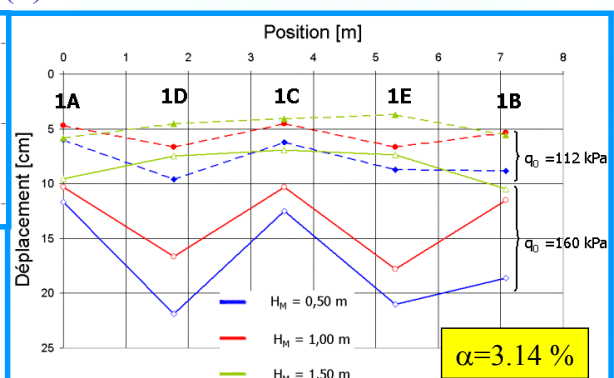
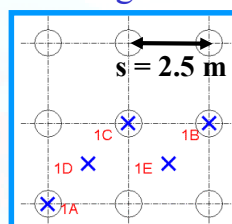
35

Les tassements diminuent quand α augmente (2)



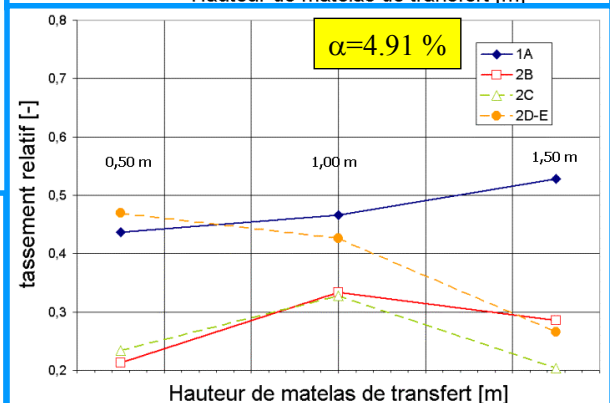
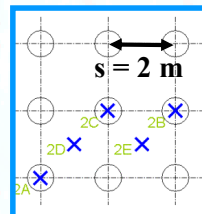
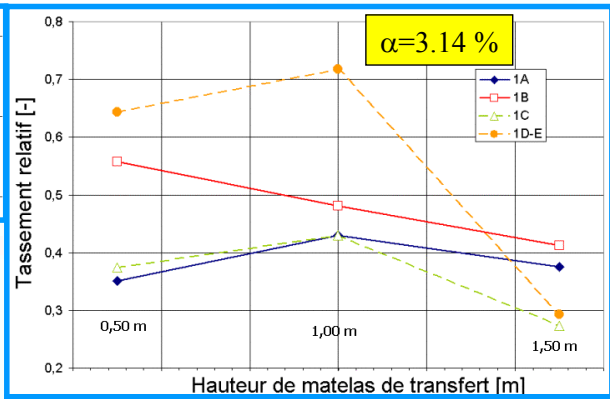
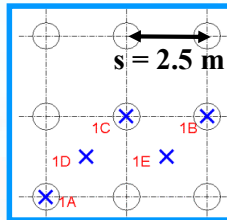
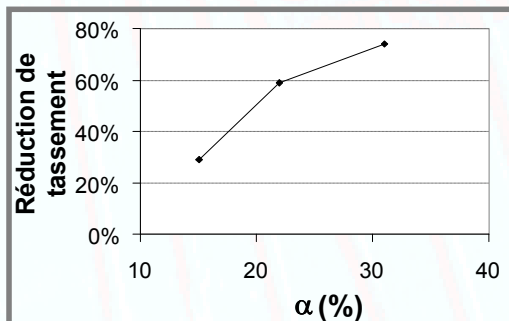
$H_M = 0.1\text{m}$

[Thèse A.Q. Dinh, 2009]



[Thèse G. Baudouin, 2010] 36

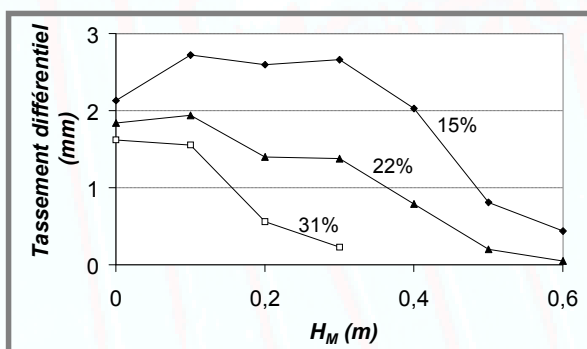
Les tassements
diminuent quand
 α augmente (3)



37

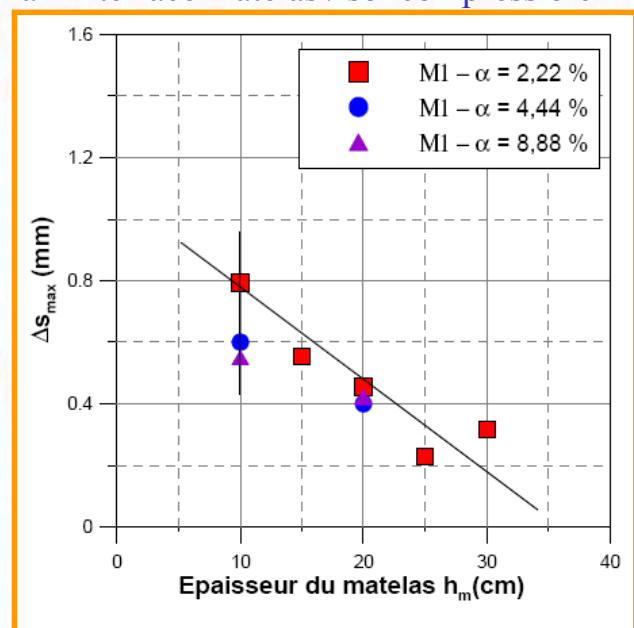
Le tassement différentiel diminue lorsque H_M augmente (1)

en surface



Tendance confirmée sur modèles 3D

à l'interface matelas / sol compressible



38

Le tassement différentiel diminue lorsque H_M augmente (2)

H_C : H_M critique existe-t-elle?

Réf.	Roman Arch	Gothic Arch	Carlson (1987)	McKelvey (1994)	British standard (1995)	Svano et al. (2000)	Zaeske (2002)
H_C	$s/2$	$s/\sqrt{2}$	$1.87(s-a)$	$3(s-a)$	$1.4(s-a)$	$0.5(s-a) \tan a_s$	$s/\sqrt{2}$

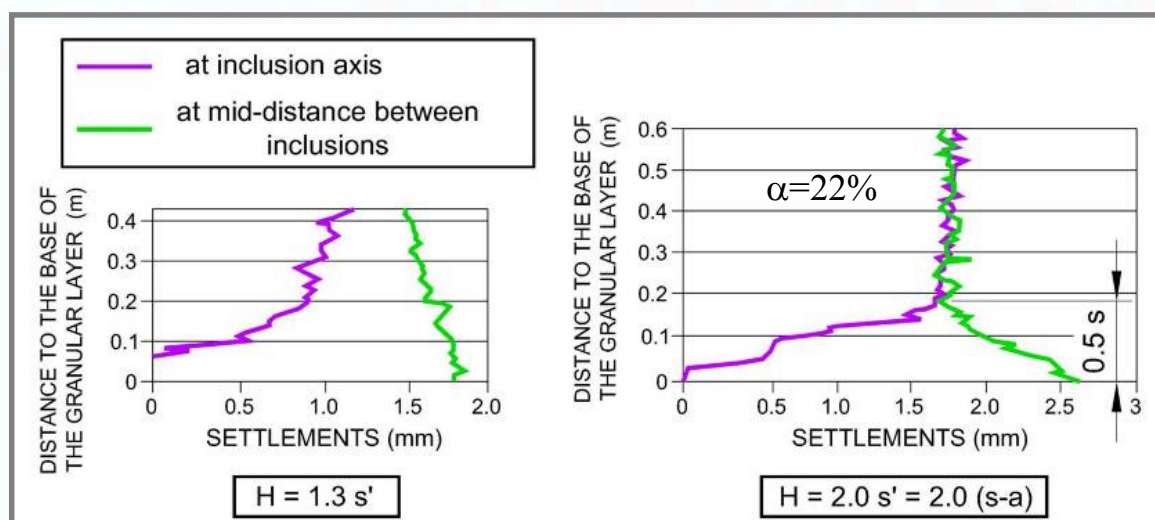
Si $H_M > H_C$: « full arching »
la surcharge est totalement transmise aux inclusions verticales
pas de tassement différentiel en surface

Si $H_M < H_C$: « incomplete arching »

cas typique : $s = 2 \text{ m}$
 $a = 0,3$

$\Rightarrow 1 \text{ m} < H_M \text{ min} < 5.1 \text{ m}$
!!!!!!

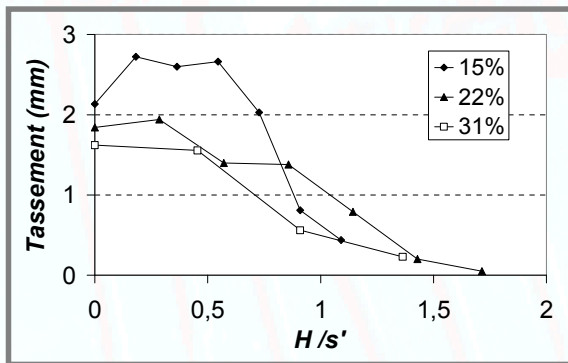
Le tassement différentiel diminue lorsque H_M augmente (3)



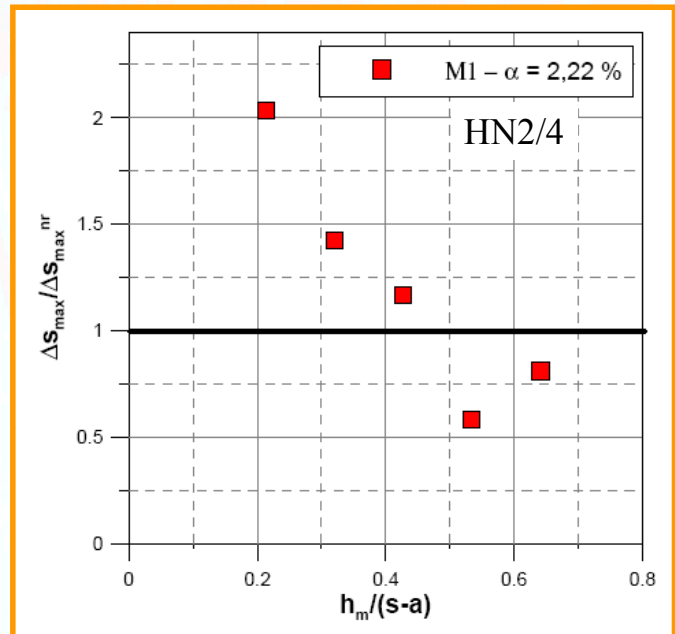
Si $H_M < H_C$:
« incomplete arching »

Si $H_M > H_C$:
« full arching »

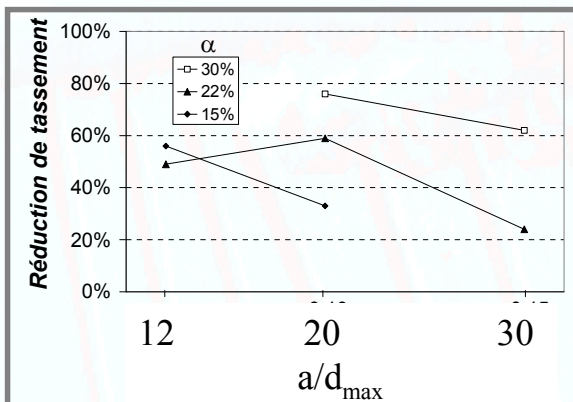
Le tassement différentiel en surface est nul si $H_M > 2$ (s-a)



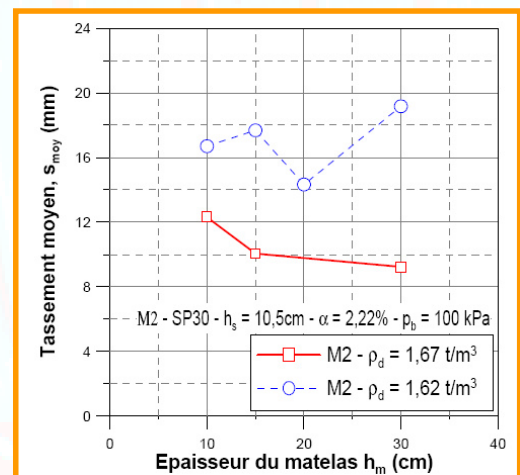
Le tassement différentiel à l'interface est semblable au cas non renforcé si $H_M > 0.5$ (s-a)



Plus les rouleaux sont gros, moins les tassements sont forts

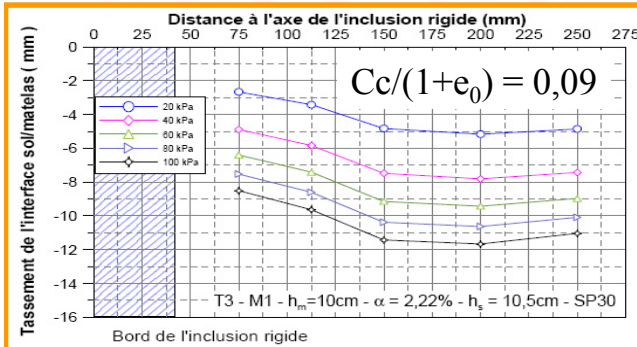
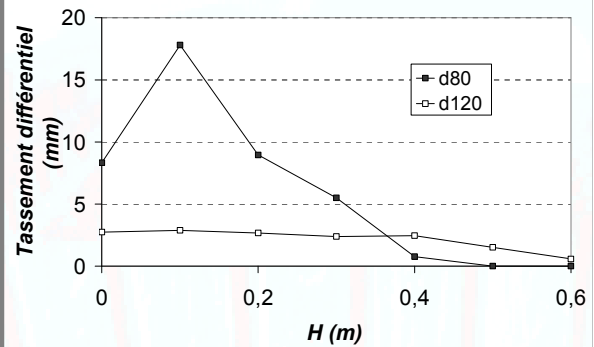


Effet combiné de la densité

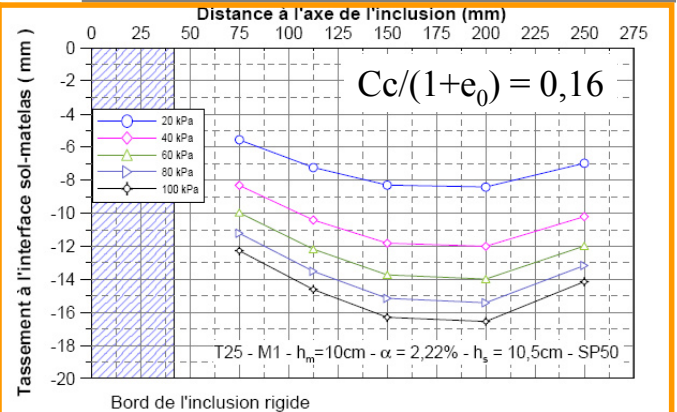


Pas d'effet du sol compressible sur les tassements différentiels si H_M est « grand »

Tassement différentiel en surface plus grand pour un sol plus compressible si H_M « petit »



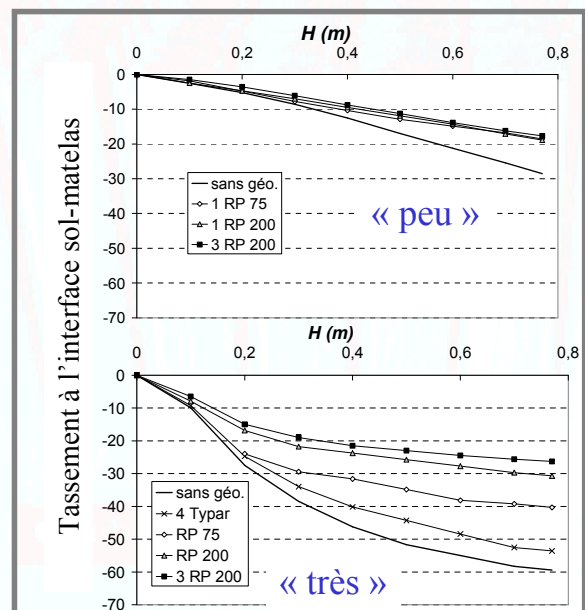
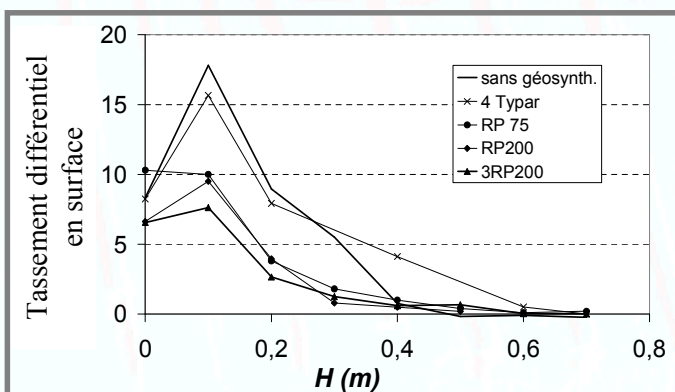
HN2/4, $H_M = 0,1\text{m}$



Avec Géosynthétique :

Les tassements sont réduits lorsque J augmente si le sol est « très » compressible

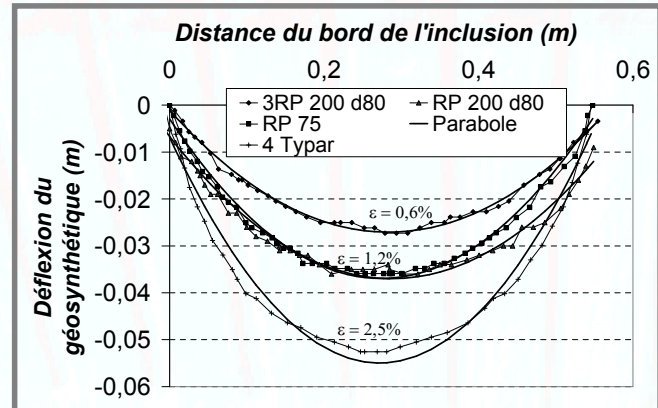
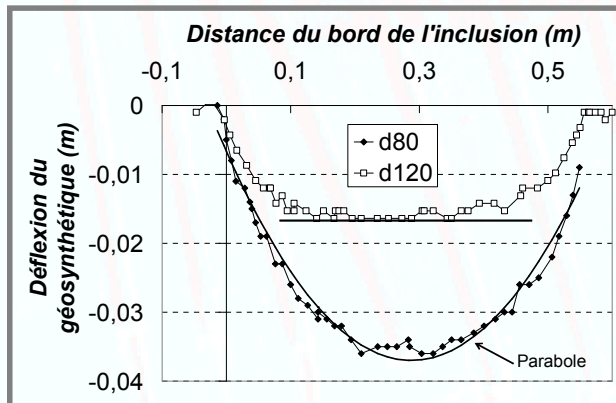
pas d'effet de J sur le tassement si le sol est « peu » compressible



Avec Géosynthétique :

déflexion plus importante si sol
plus compressible

déflexion plus importante si J
diminue



Interaction sur les mécanismes de report de charge :
compressibilité du sol & raideur du géosynthétique

Profil de tassement à l'interface sol compressible / matelas en « forme en U » ■ ■

Les tassements diminuent quand α augmente ■ ■ ■

Le tassement différentiel en surface diminue lorsque H_M augmente ■ ■ ■

Le tassement différentiel en surface est nul si $H_M > 2(s-a)$ ■ ou faible si $H_M > (s-a)/2$ ■

Plus les rouleaux sont gros, moins les tassements sont forts ■

Pas d'effet du sol compressible sur les tassements différentiels si H_M « grand » ■ ■

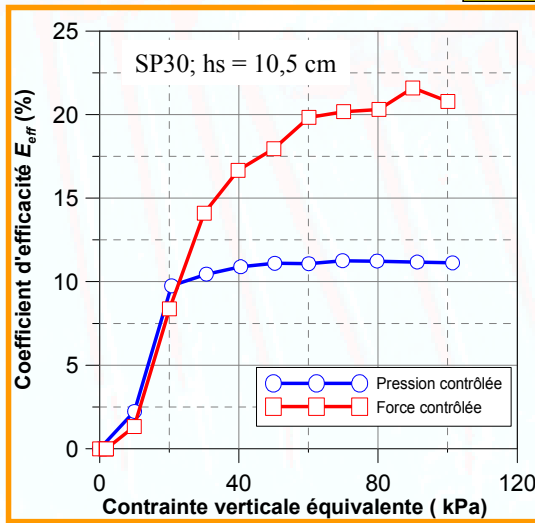
Tassement différentiel en surface plus grand pour un sol plus compressible si H_M
« petit » ■ ■

Avec Géosynthétique : ■

Les tassements sont réduits lorsque J augmente si le sol est « très » compressible
pas d'effet de J sur le tassement si le sol est « peu » compressible
déflexion plus importante si sol plus compressible

Pour une même surcharge, la présence d'un dallage génère une efficacité plus forte (1) et un tassement plus faible

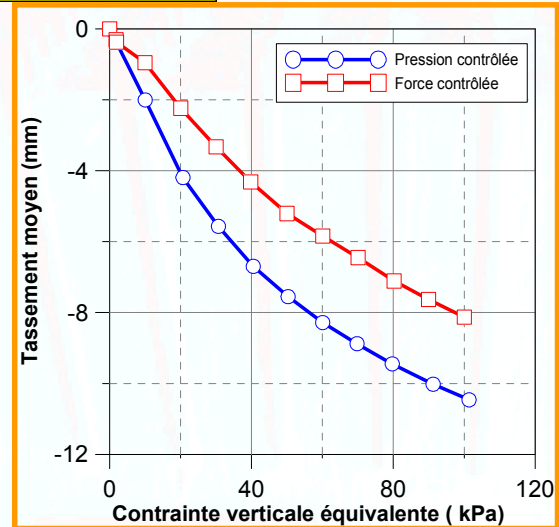
HN2/4; $H_M = 0.1\text{m}$; $\alpha = 2,22\%$



Dallage

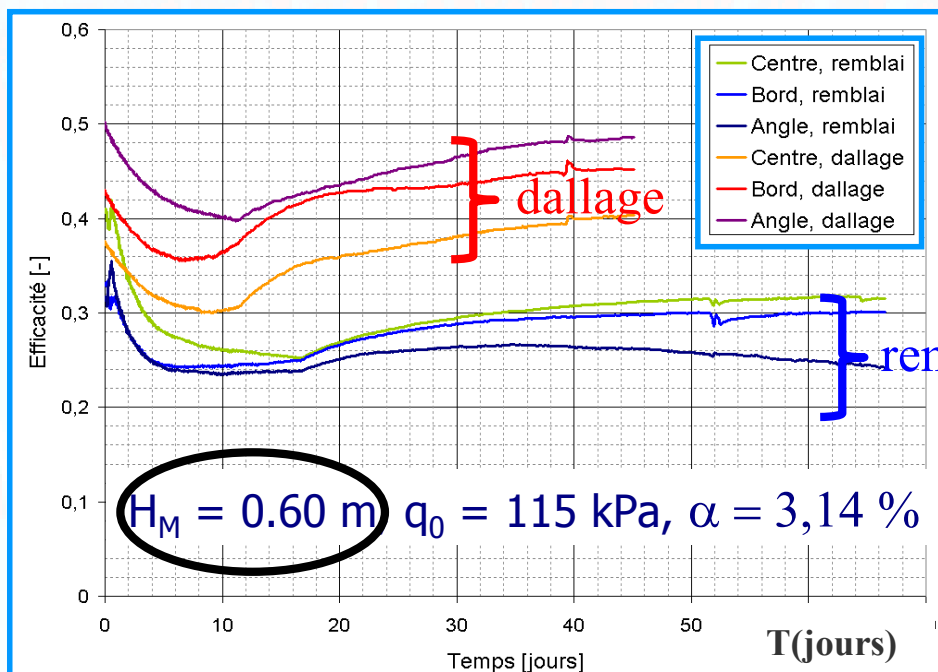
Remblai

E_{eff} augmente de 85%

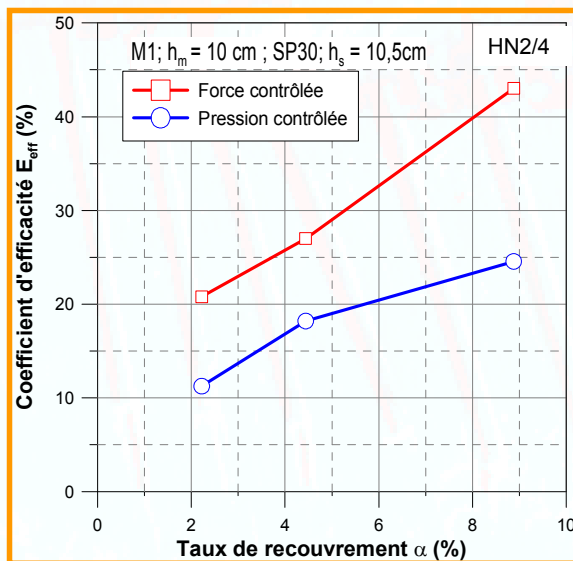


s_{moy} diminue de 25%

Pour une même surcharge, la présence d'un dallage génère une efficacité plus forte (2)



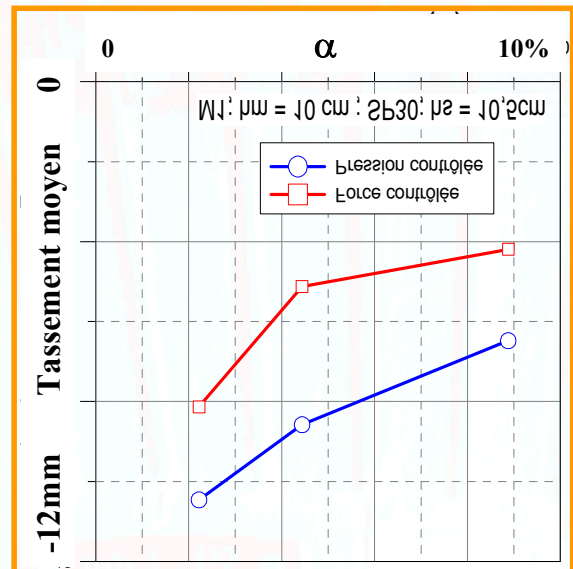
Pour un même α , la présence d'un dallage génère une efficacité plus forte et des tassements plus faibles



Dallage

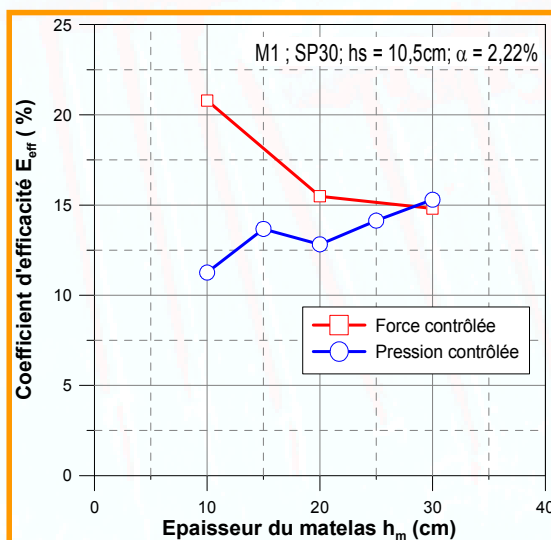
Remblai

E_{eff} augmente de 100 %



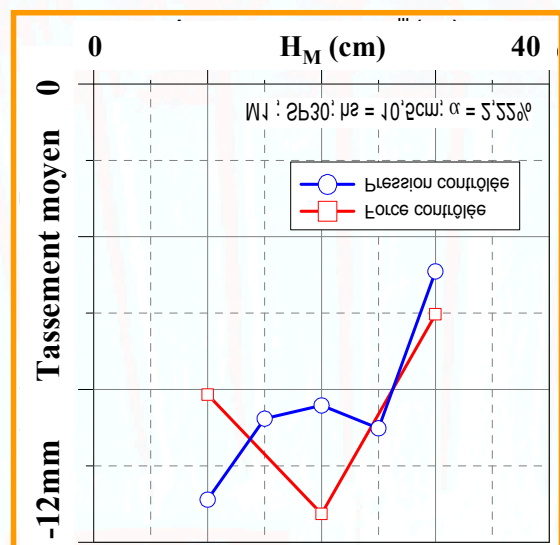
s_{moy} diminue de 18%

Le gain d'efficacité dû à la présence d'un dallage s'estompe pour les « grands » H_M (1)

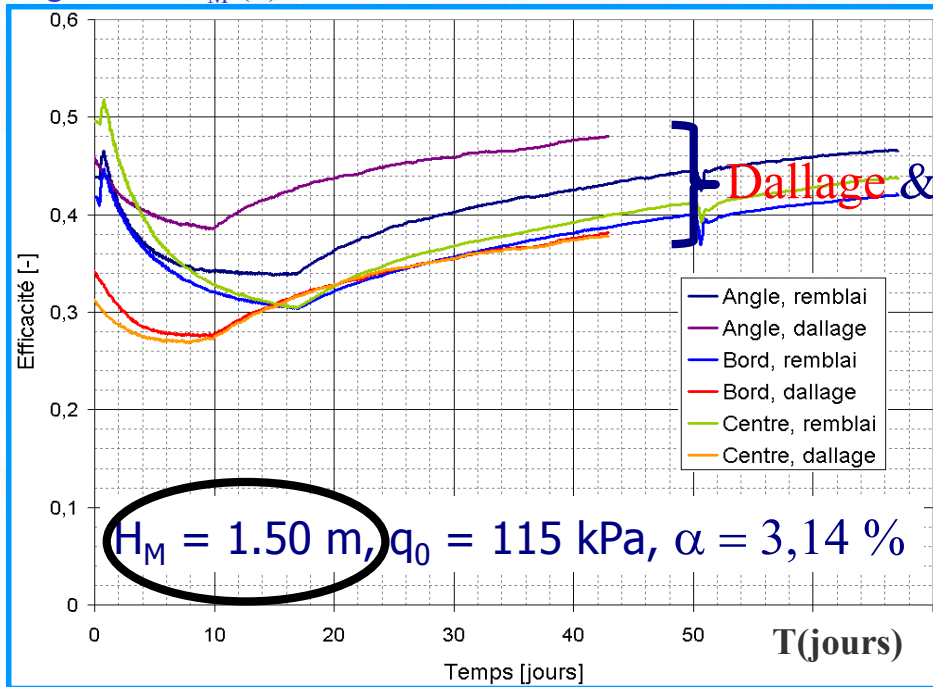


Dallage

Remblai

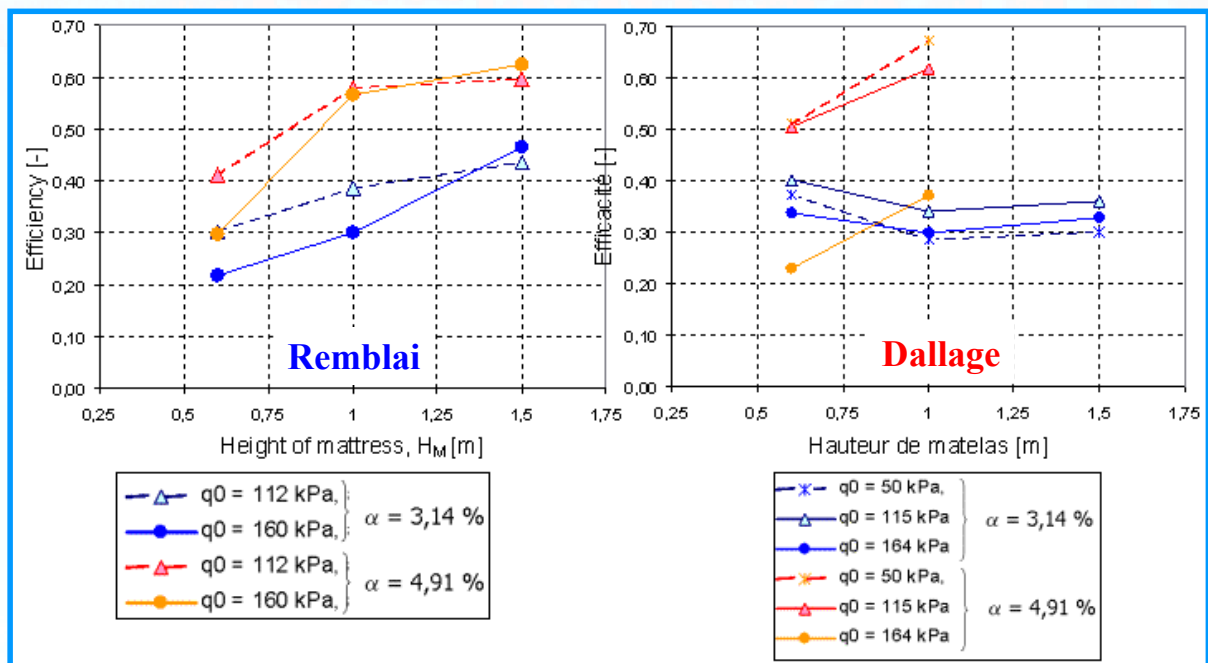


Le gain d'efficacité dû à la présence d'un dallage s'estompe pour les « grands » H_M (2)



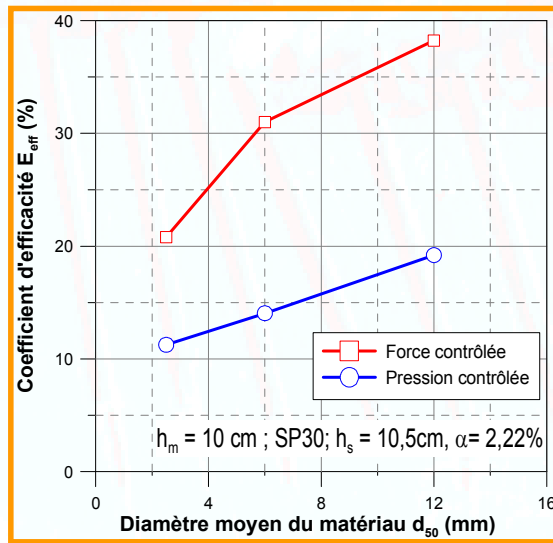
51

Le gain d'efficacité dû à la présence d'un dallage s'estompe pour les « grands » H_M (3)



52

La présence d'un dallage génère une efficacité et une réduction de tassement d'autant meilleures que le matelas est grossier.

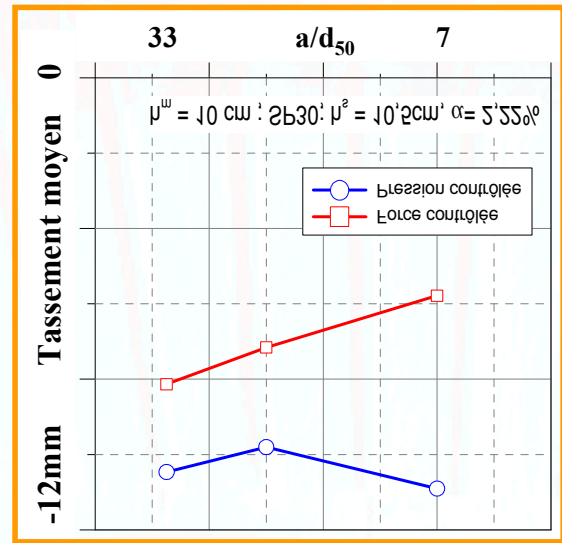


33 a/d₅₀ 7

E_{eff} augmente de 100 %

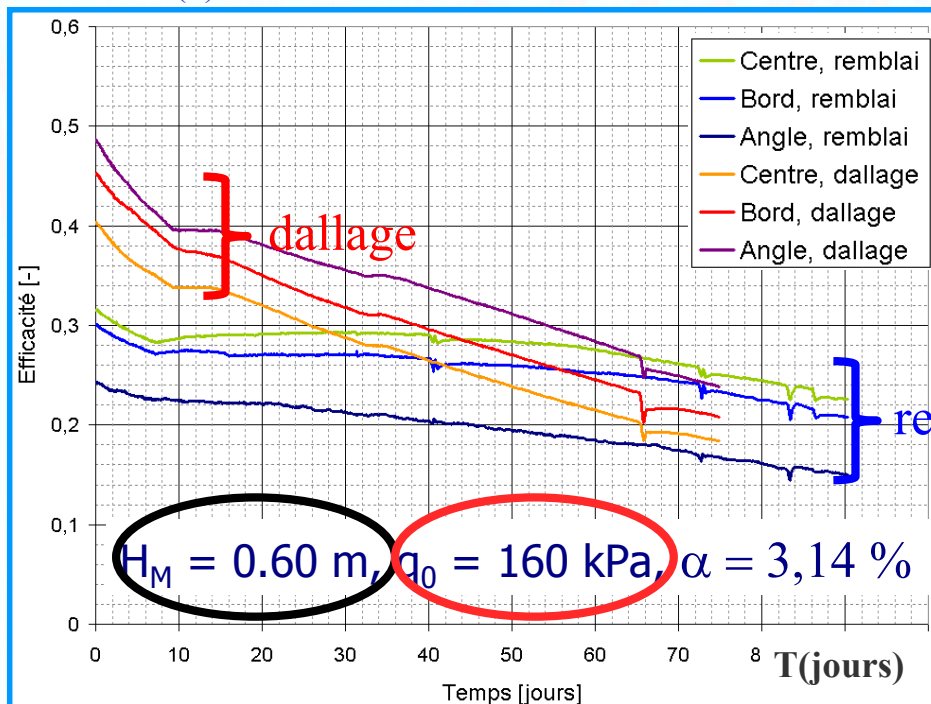
Dallage

Remblai

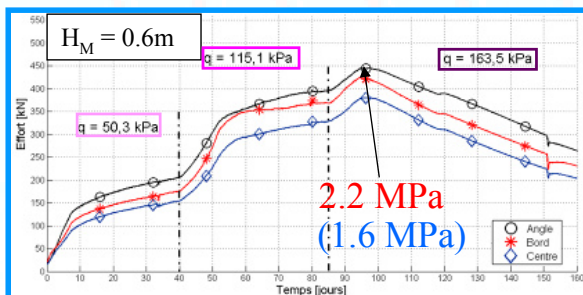
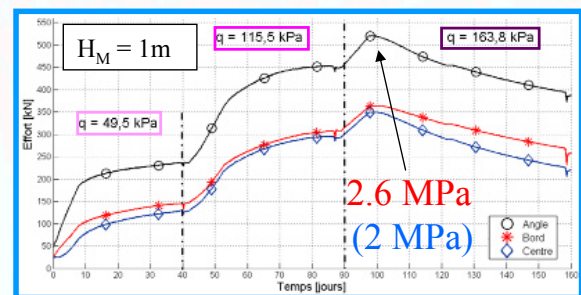
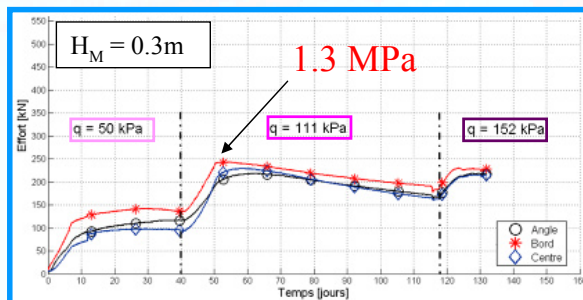


s_{moy} diminue de 25%

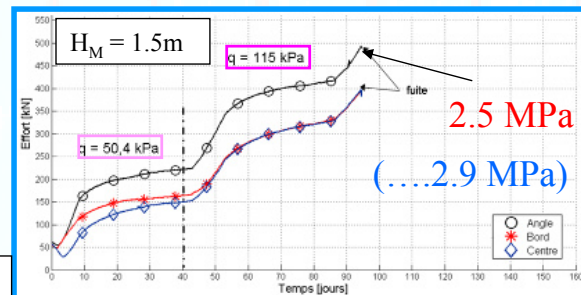
L'application d'une forte surcharge, pour de faibles H_M et α , peut entraîner une perte d'efficacité (1)



L'application d'une forte surcharge, pour de faibles H_M et α , peut entraîner une perte d'efficacité (2)



$\alpha = 3,14\%$



Pour une même surcharge, la présence d'un dallage génère une efficacité plus forte et un tassement plus faible ■ ■

Pour un même α , la présence d'un dallage génère une efficacité plus forte et des tassements plus faibles ■ ■

Le gain d'efficacité dû à la présence d'un dallage s'estompe pour les « grands » H_M ■ ■

La présence d'un dallage génère une efficacité et une réduction de tassement d'autant meilleures que le matelas est grossier ■

L'application d'une forte surcharge, pour de faibles H_M et α , peut entraîner une perte d'efficacité ■

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

101 112

Analyse du frottement le long des inclusions (Thèse Baudouin, 2010)

Analyse des effets du chargement cyclique (stage Morgon, 2010)

Analyse du comportement des matelas en limon traité (Thèse Okyay, 2010)

Publications de recommandations du PN ASIRI (1^{er} semestre 2011)

Chargement ponctuel

Géosynthétiques

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

Position des joints de dallage

Sollicitation inclinée?

Sollicitation sismique?

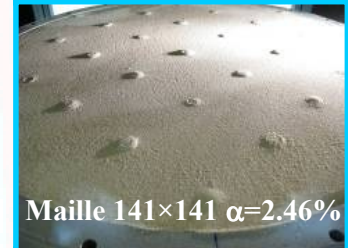
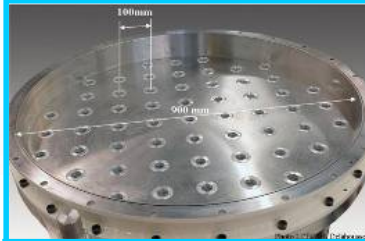
101 112

Merci de votre attention

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

tub 1 - P2





Maille 141×141 $\alpha=2.46\%$

Maille 100×100 $\alpha=4.91\%$



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., Rosquoët 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.

- 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 connaissances. 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, Shakhien, 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 : comparison of centrifuge tests and predictive methods. *Ground Engineering*, June, 28-38.

- 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., Derckx 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., König 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 Dhoubi et al. (eds), *proc. of ASEPGI*, 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.

- 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.

- 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 de 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.
- Okay 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.**
- Okay 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., Okay 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., Okay U., Six G., Néel A. 2010 inclusions rigides en centrifugeuse : développement d'un dispositif expérimental à plateau mobile. JNGG10 Grenoble.(soumis)**
- Rault G., Okay 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

- 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 platforms : 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., Gaudichet 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. (<http://www.lcpc.fr/fr/sources/blpc/visu.php?voir=273>).
- 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.