



UFRJ

**Université Fédérale
de Rio de Janeiro**



13^{ me} Conférence Coulomb
15 juin 2015, C.F.M.S. - Paris

**Amélioration des sols compressibles:
 tudes en vraie grandeur,
modèles physiques et numériques**

M rcio Almeida

Professeur des Universités

Ecole d'ingénieur (COPPE)

Université Fédérale de Rio de Janeiro (UFRJ)

almeida@coc.ufrj.br

OBJECTIFS DE CETTE CONFÉRENCE COULOMB

Vous présenter mes 40 ans d'expérience dans le traitement des argiles molles, avec une attention particulière sur les 10 dernières années portant principalement sur les remblais sur inclusions, rigides ou semi-rigides.

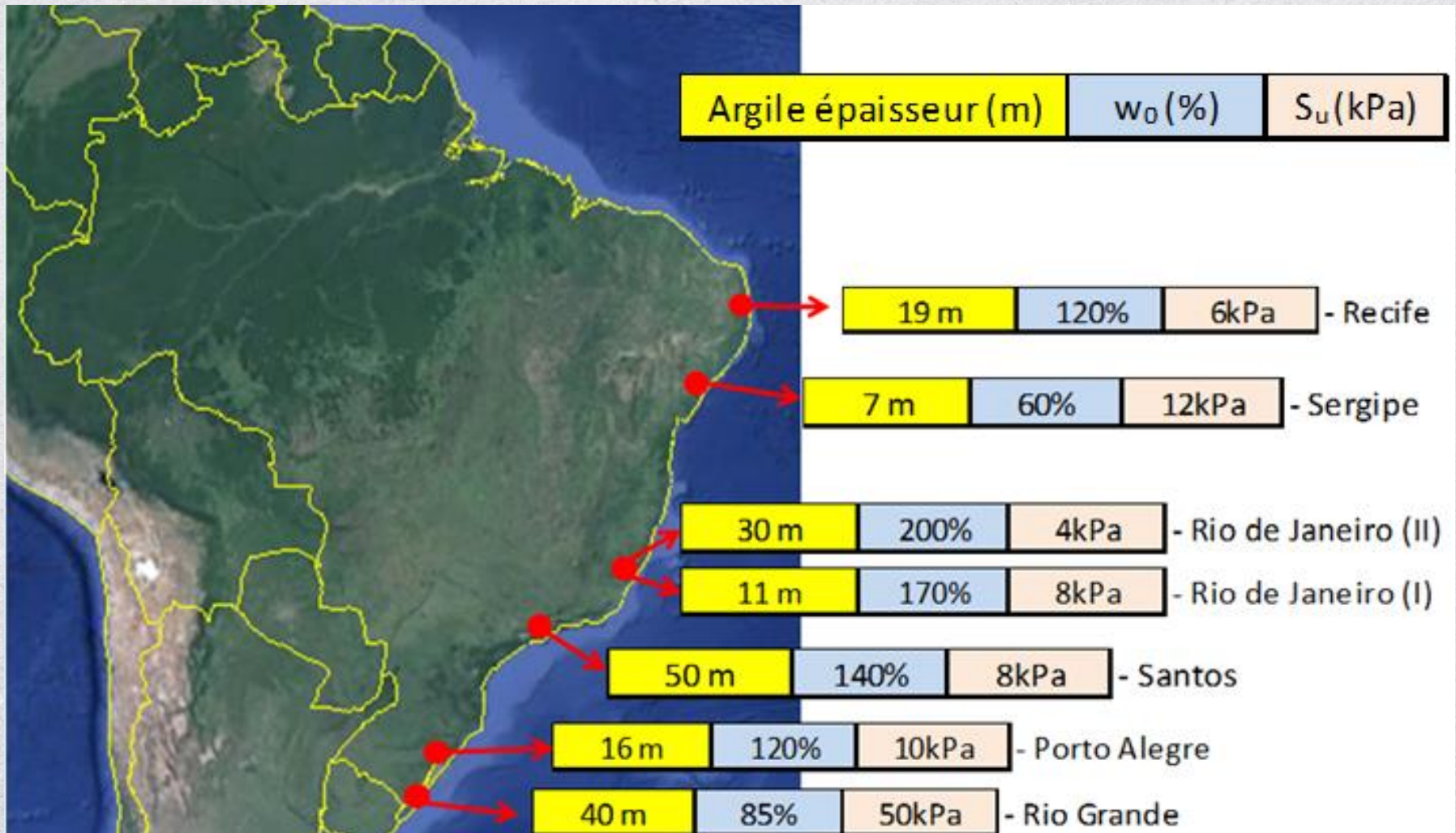
- Almeida, M. , et Marques, M. *Design and Performance of Embankments on Very Soft Soils*. CRC Press, 2013.

SOMMAIRE

- Sols extrêmement compressibles: principales caractéristiques
- Techniques de constructions récentes
- Essais en vraie grandeur, modélisations physiques et numériques

PRINCIPALES ZONES D'ÉTUDES AU BRÉSIL EN GÉNÉRAL

Les argiles des plaines côtières brésiliennes datent presque toutes du Quaternaire et existent depuis 6000 ans, après le (dernier) épisode glaciaire.



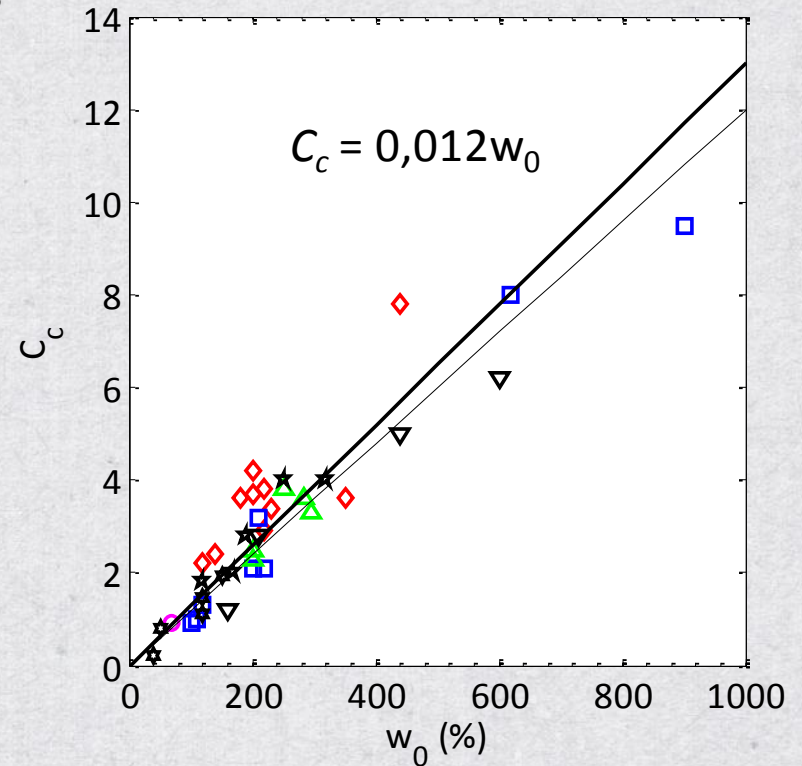
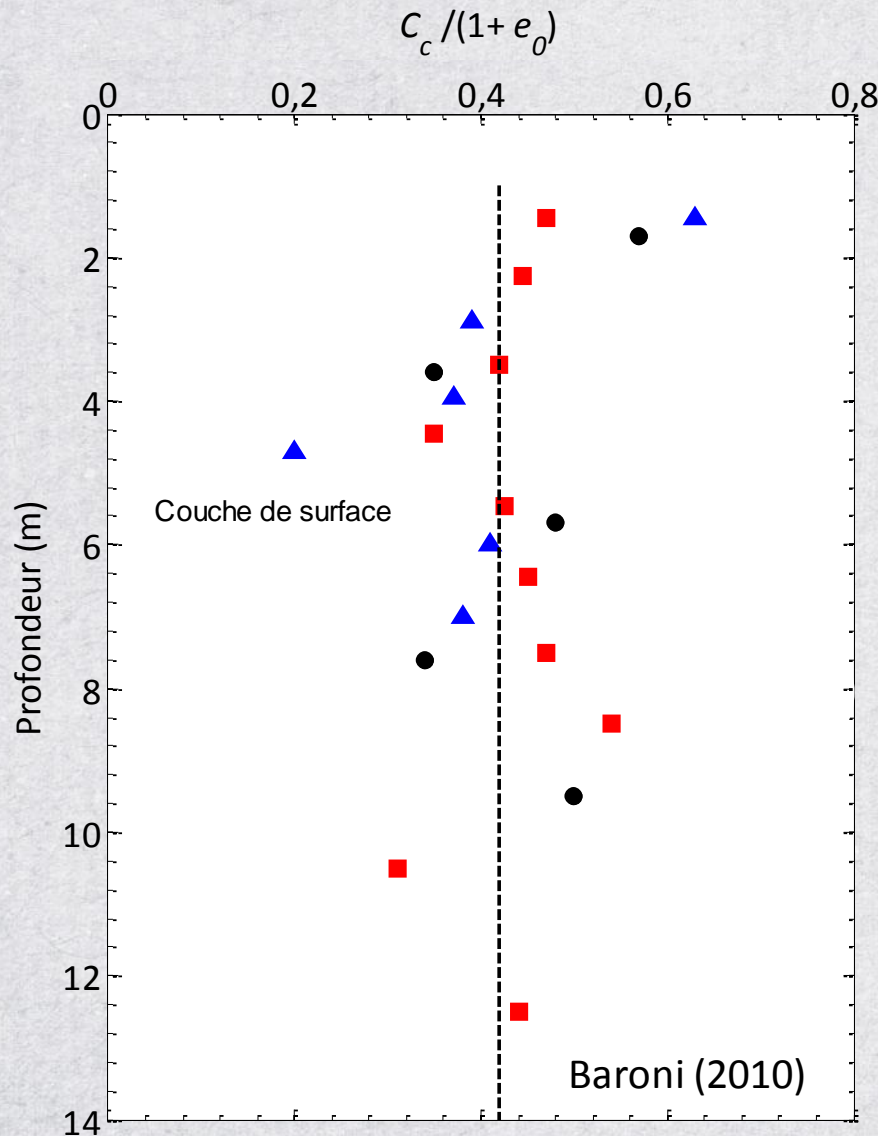
PRINCIPES TECHNIQUES D'INVESTIGATIONS POUR LES SOLS EXTRÊMEMENT COMPRESSIBLES

- Tests in situ:
 - SPT: disposition des couches et teneur en eau
 - Scissomètre (*vane borer*): S_u
 - CPTu: profil du sol, S_u , c_h , (OCR,...)
 - Tests en laboratoire*:
 - Consolidation oedométrique: paramètre pour la compression et la consolidation
 - Triaxial (CAU): S_u (pour le cas d'échantillons disponibles)
 - Caractérisation du sol et teneur en matière organique
- * Piston stationnaire (échantillon $\phi = 100\text{mm}$) – Temps d'attente long mais l'échantillon est conservé

SOLS MOUS À RIO DE JANEIRO, AU BRÉSIL



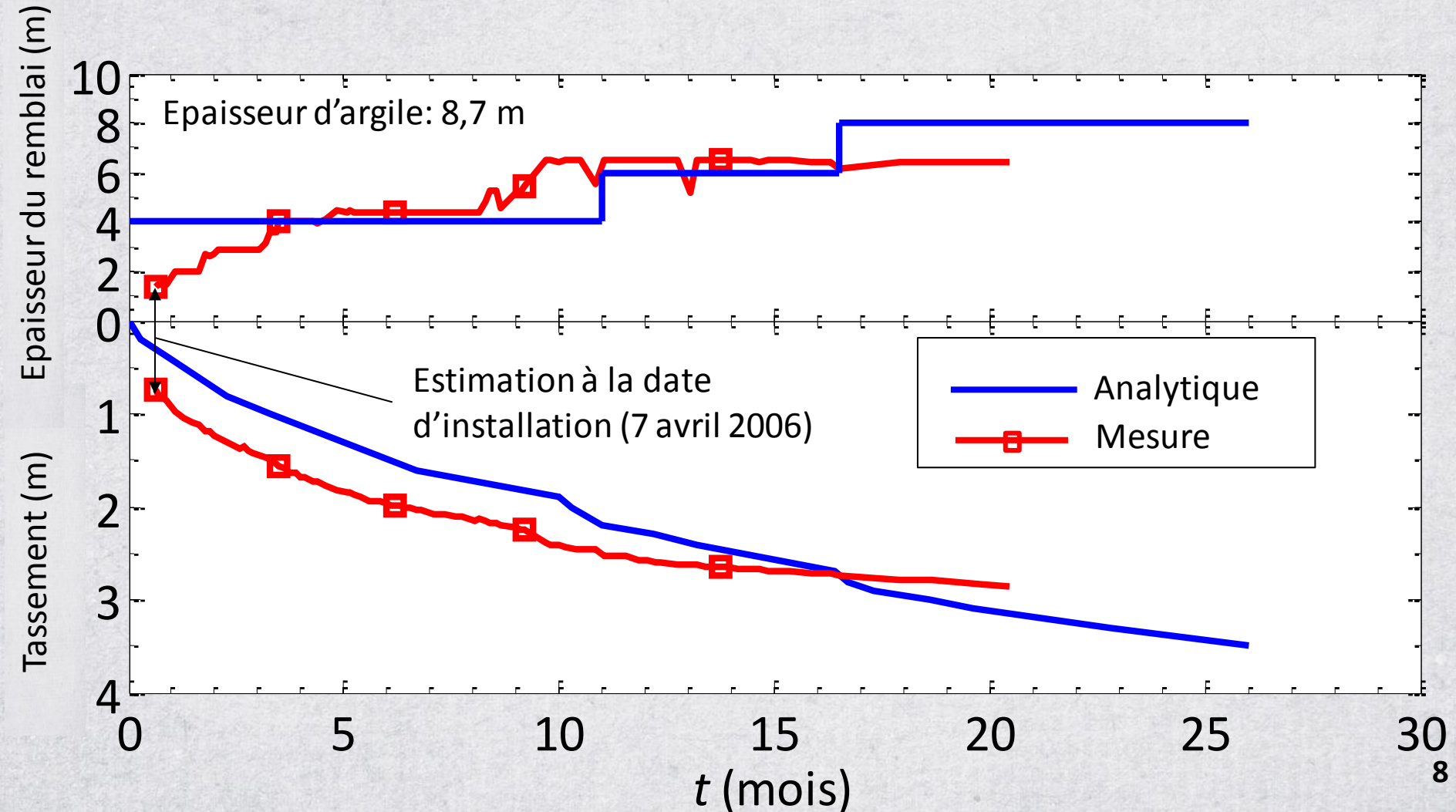
SOLS COMPRESSIBLES



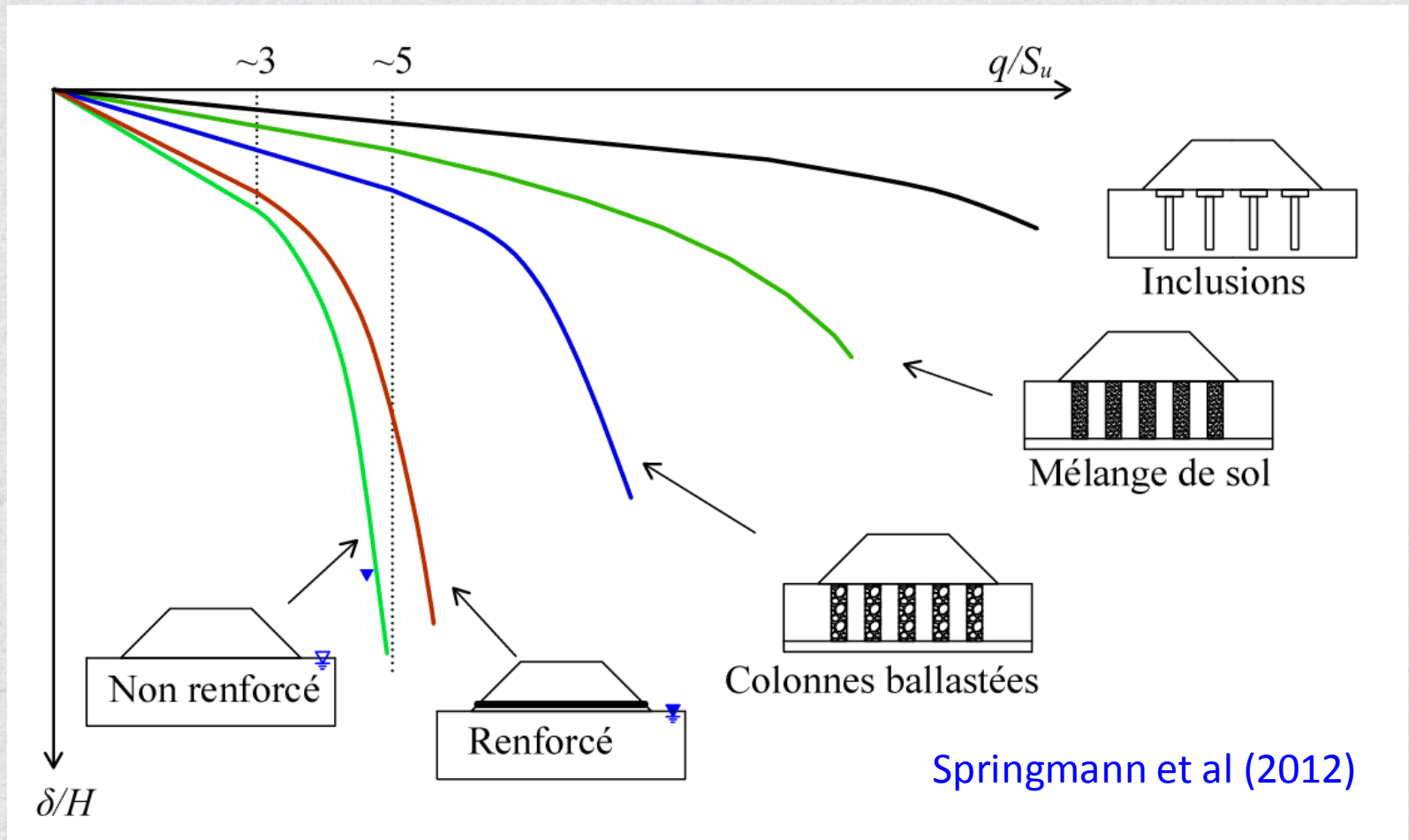
Données issues de différents sites

Argile légèrement sur-consolidée

CONSTRUCTION EN ÉTAPES D'UN REMBLAI AUX ÉTAPES, AVEC DRAINS ET RENFORCEMENT



COMPARAISON DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES ÉVOQUÉES



q/S_u : contrainte normalisée par la résistance en cisaillement non drainée
 δ/H : tassements verticaux normalisés par l'épaisseur

EN RÉSUMÉ LES ARGILES BRÉSILIENNES PEUVENT PRÉSENTER

- Très forte teneur en eau
- Résistance très faible
- Fortement compressible (montrant aussi un tassement secondaire important)

En conséquence, les solutions pour la construction de remblais favorisent les réseaux d'inclusions rigides ou semi-rigides pour permettre d'atteindre les performances souhaitées dans le délai imparti.

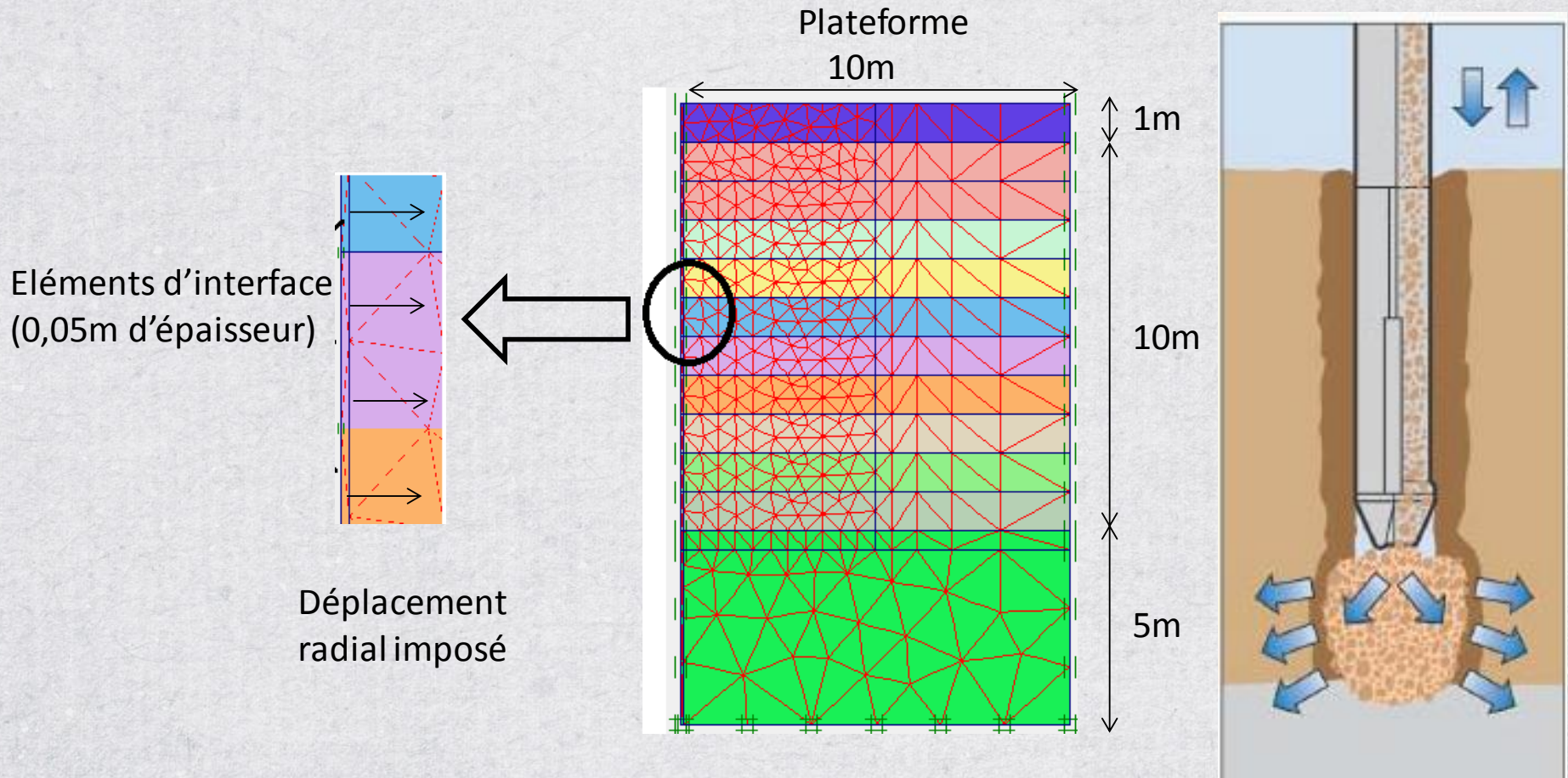
COLONNES BALLASTÉES

1. Introduction
2. Etudes numériques: installation des colonnes
3. Essais en vraie grandeur; validation du modèle numérique

- Almeida, M., Lima, B.L, Riccio, M., Jud, H., Cascao, M. et Roza, F. « Stone column field test: Monitoring data and numerical analyses ». ***Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*** 45, n° 1 (2014): 1-10.
- Almeida, M.S.S., Lima, B. T., Baroni, M., Riccio, M., Almeida, M.C.F. Numerical Studies of Stone Columns Installation in Very Soft Soils. 15th Panamerican Conference On Soil Mechanics And Geotechnical Engineering, Buenos Alres, Argentina from 15 to 18 November. 2015.

MODÈLE DE L'INSTALLATION DE COLONNE BALLASTÉE

Modèle pour une inclusion isolée

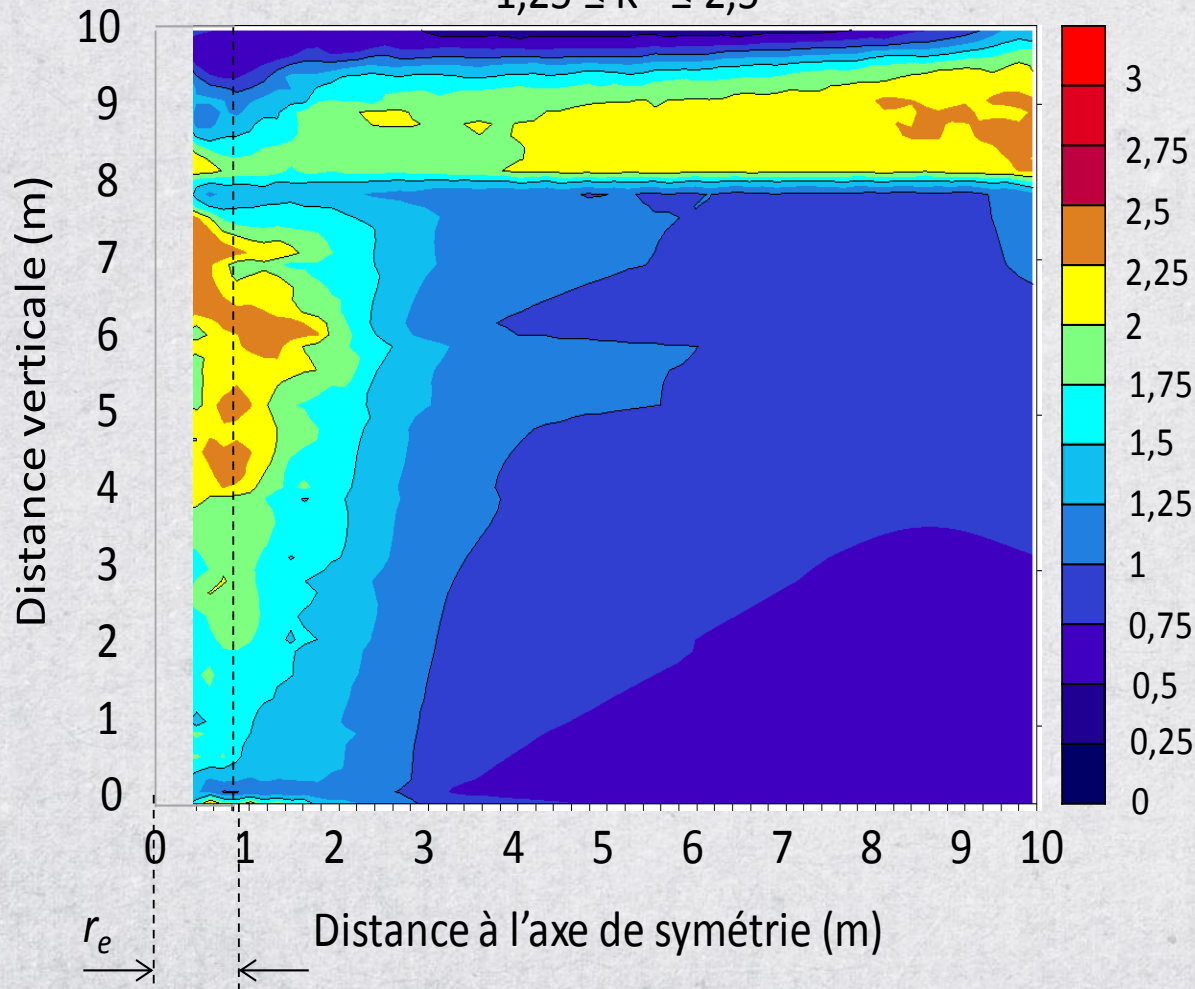


VALEUR DE K^* APRÈS L'INSTALLATION

Valeur de K^*

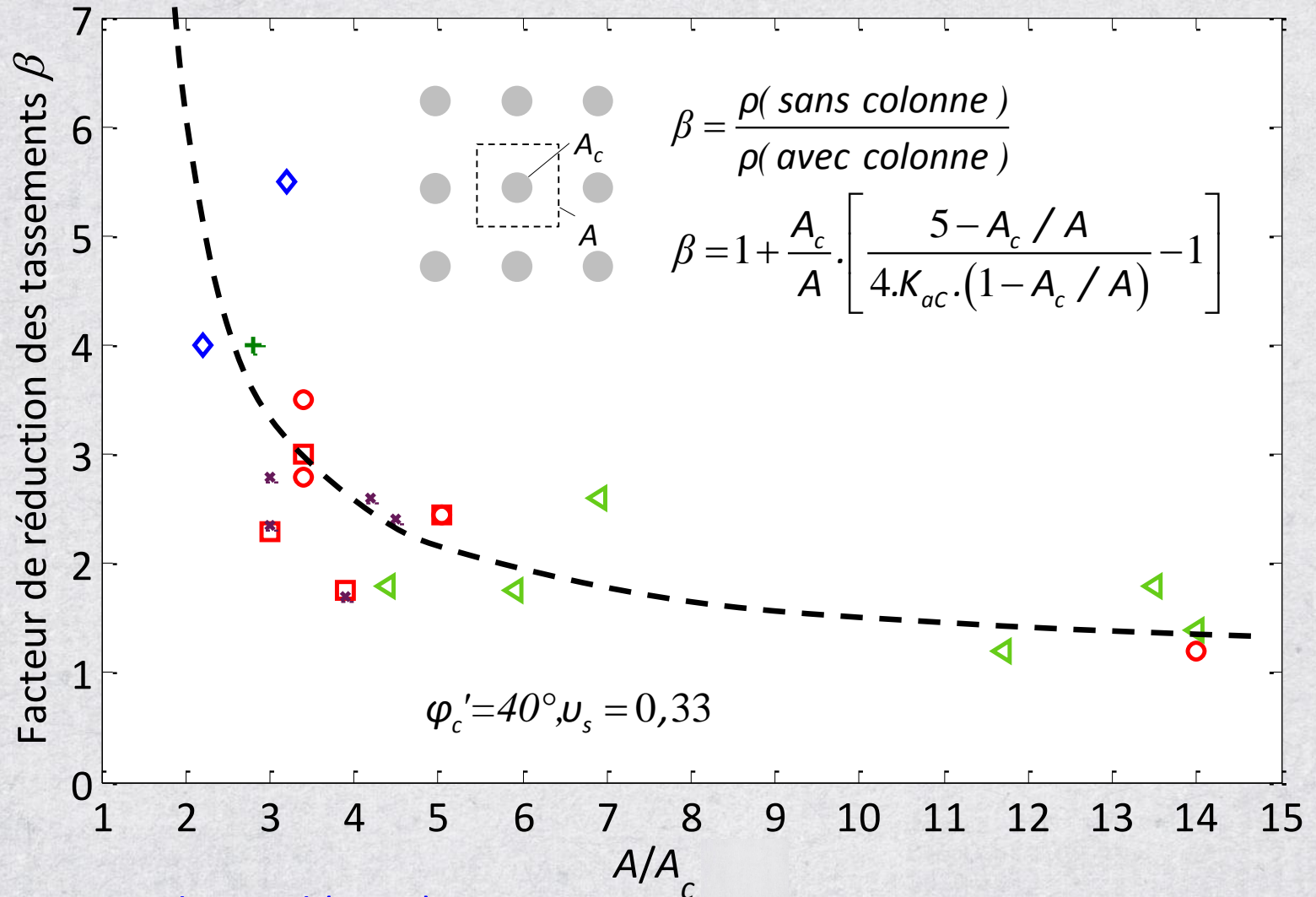
(Modèle 2D configuration axisymétrique)

$$1,25 \leq K^* \leq 2,5$$

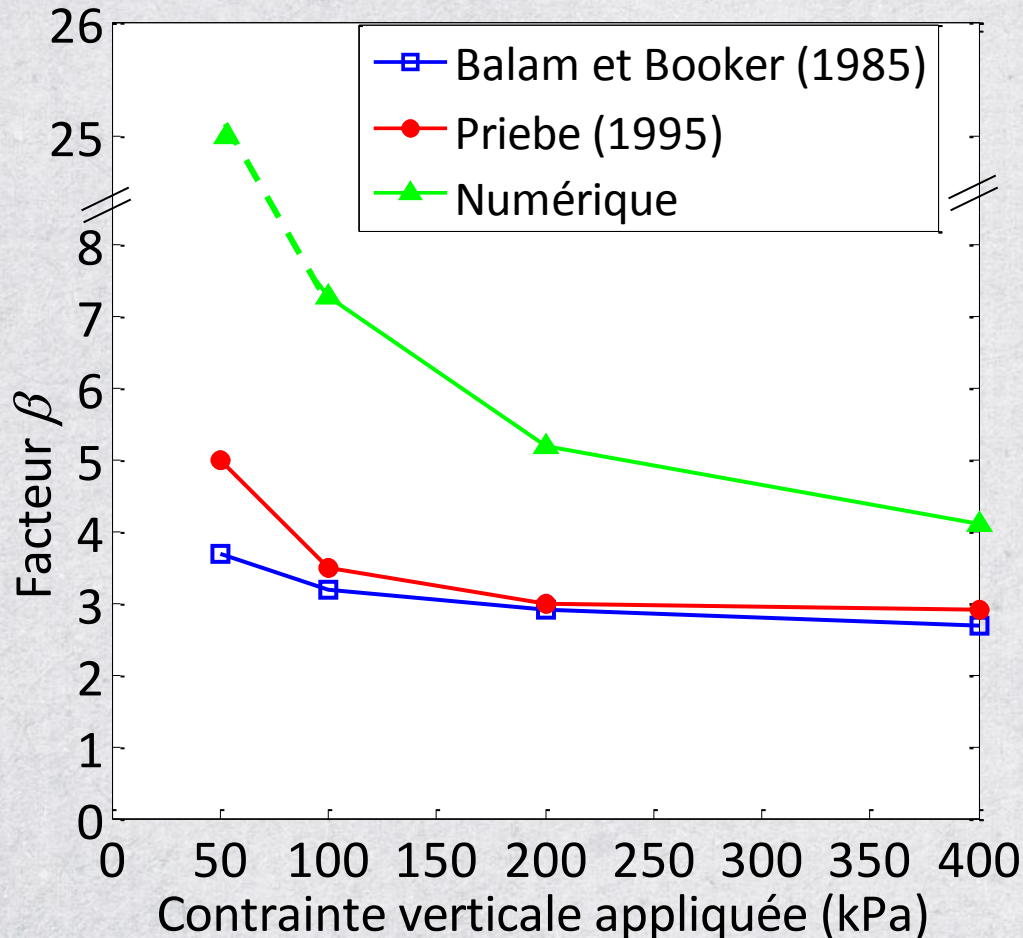


Site à Barra da Tijuca

RÉSULTAT D'ESSAIS vs MÉTHODE DE PRIEBE'S



MÉTHODES ANALYTIQUES vs NUMÉRIQUES - SITE 1

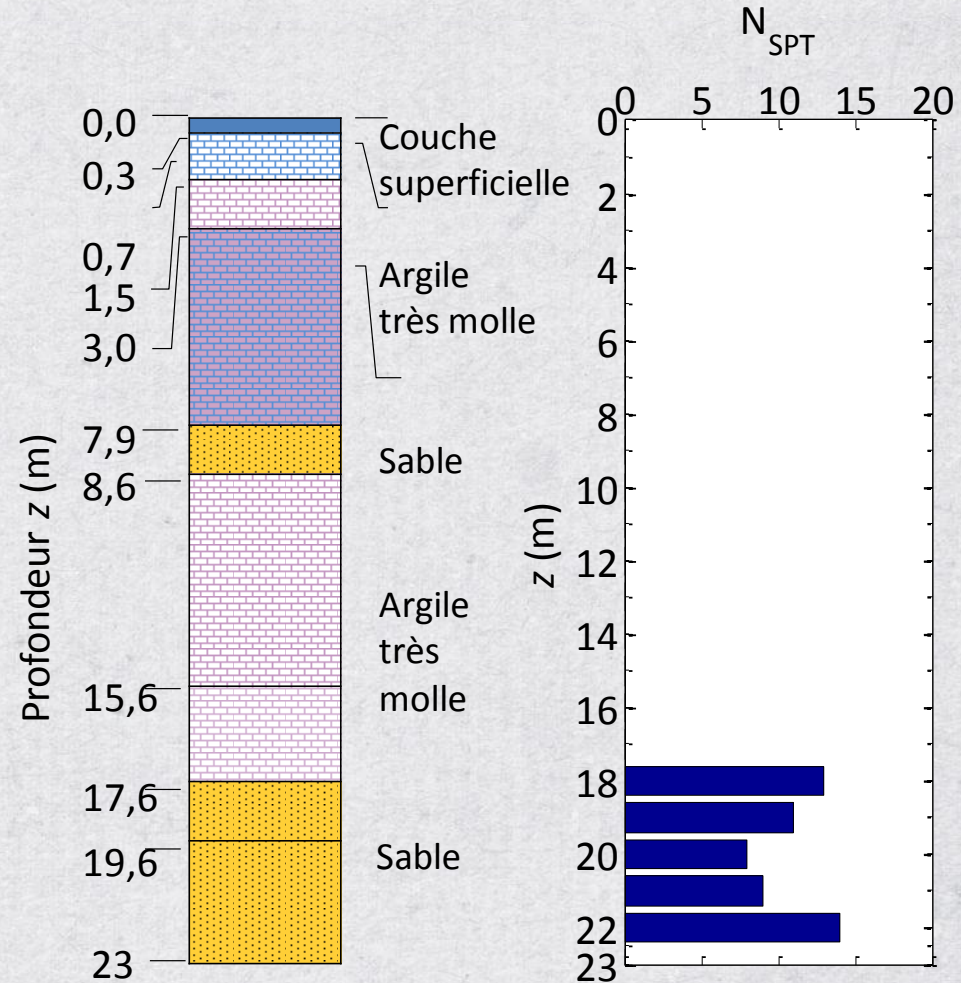


- Les modèles numérique et analytique sont utilisés seulement pour la couche d'argile molle supérieure améliorée par des colonnes ballastées.
- La simulation du tassement du sol compressible (sans colonnes) est menée en conditions oedométriques

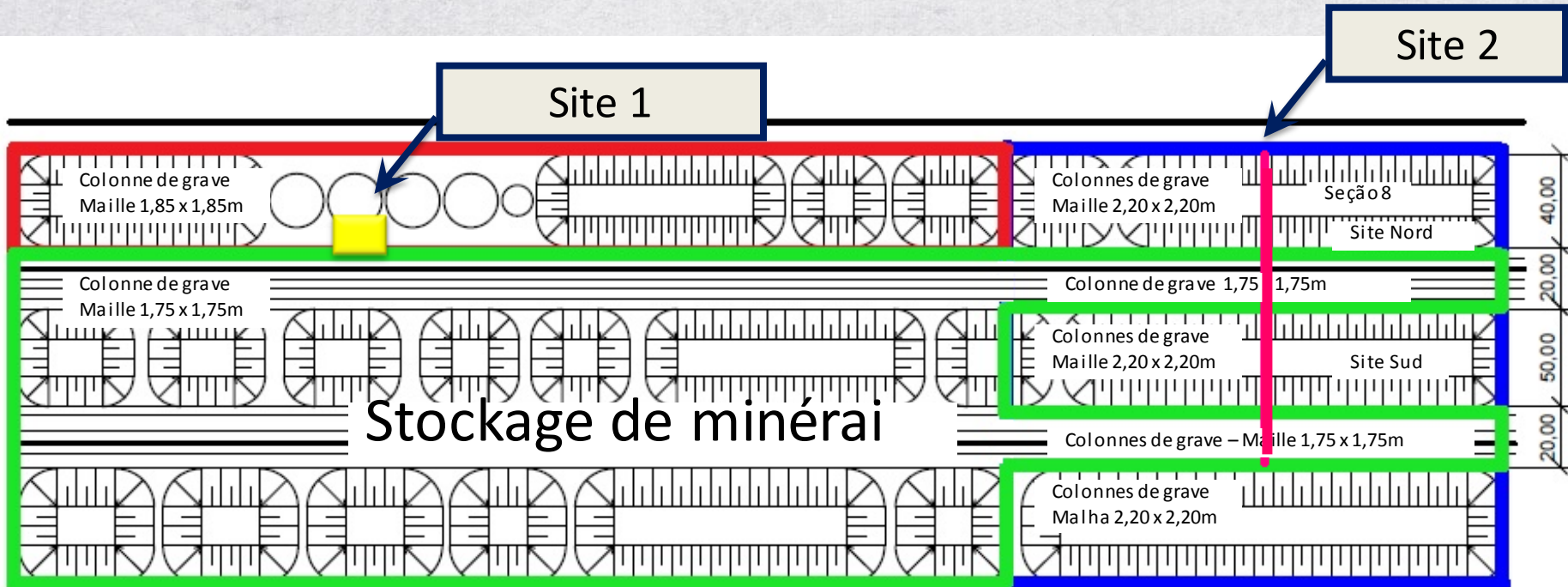
STOCKYARD À SANTA CRUZ, RJ



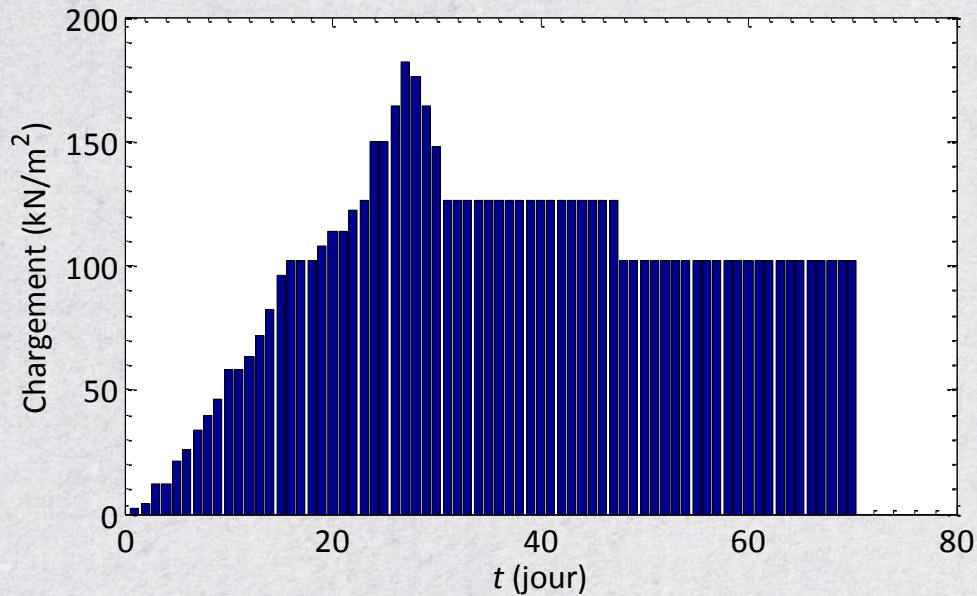
Zone de stockage
(minéraux/charbon)



EMPLACEMENT DES SITES



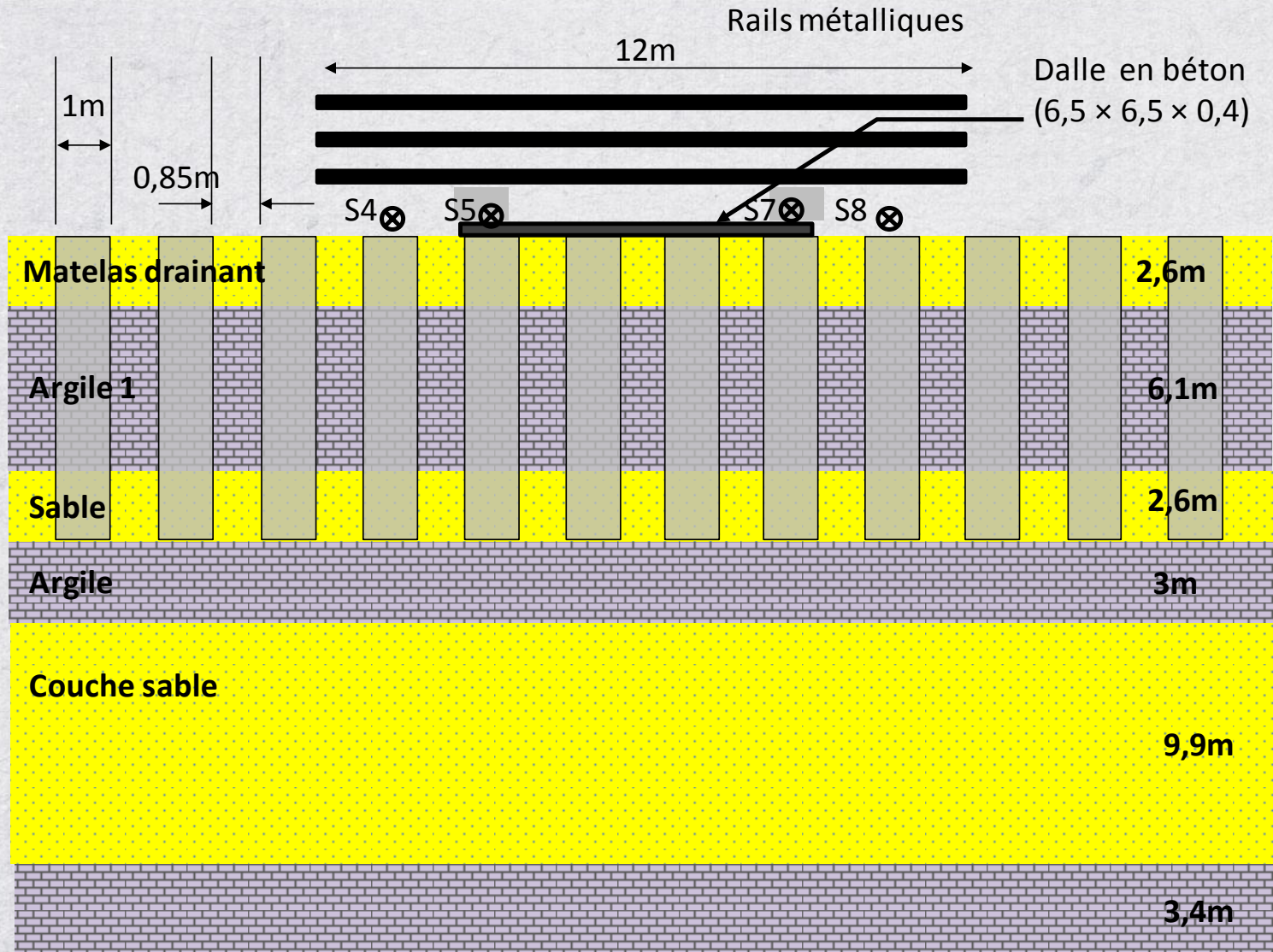
SITE 1 - ESSAI EN VRAIE GRANDEUR



180 kN/m² appliquée au maximum
Consolidation sous chargement croissant
Test en déchargement

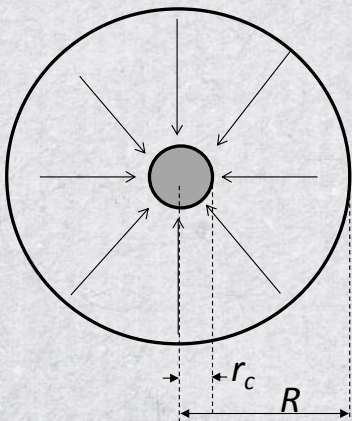
Almeida et al. (2014)

SITE 1- ESSAI EN VRAI GRANDEUR

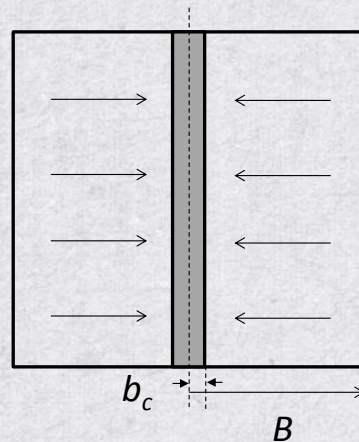


CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DU MODÈLE NUMÉRIQUE

- Modèles élasto-plastiques pour les sols compressibles et granulaires.
- Augmentation de K_0 dû à la mise en place des colonnes ballastées. La valeur de $K^* = 2$ provient d'essais de terrain et permet d'obtenir de meilleurs résultats.
- Hypothèse: Consolidation 2D
- Conversion 3D \rightarrow 2D pour analyse en déformation plane.



(a) Axi-symétrique

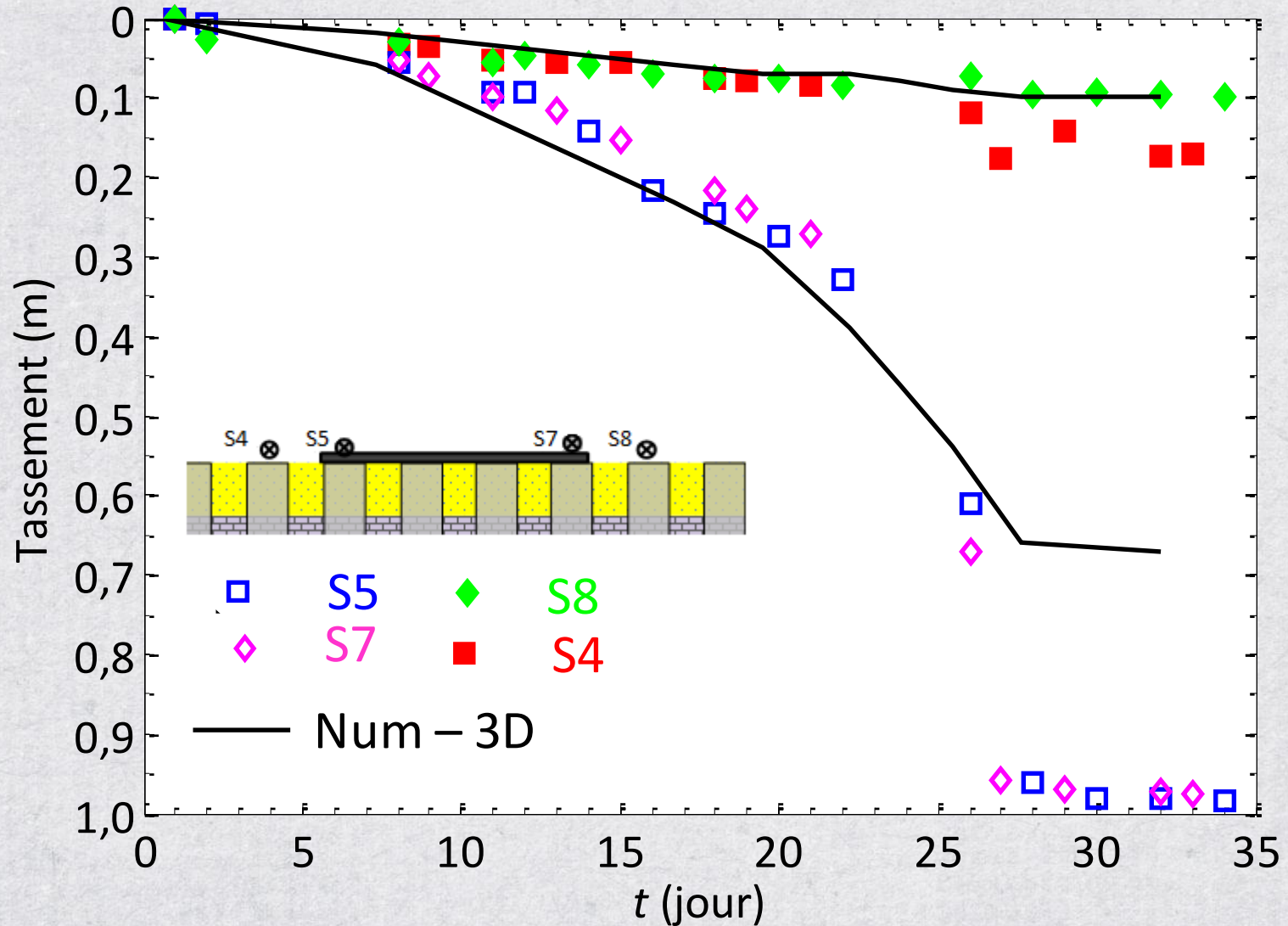


(b) Déformation plane

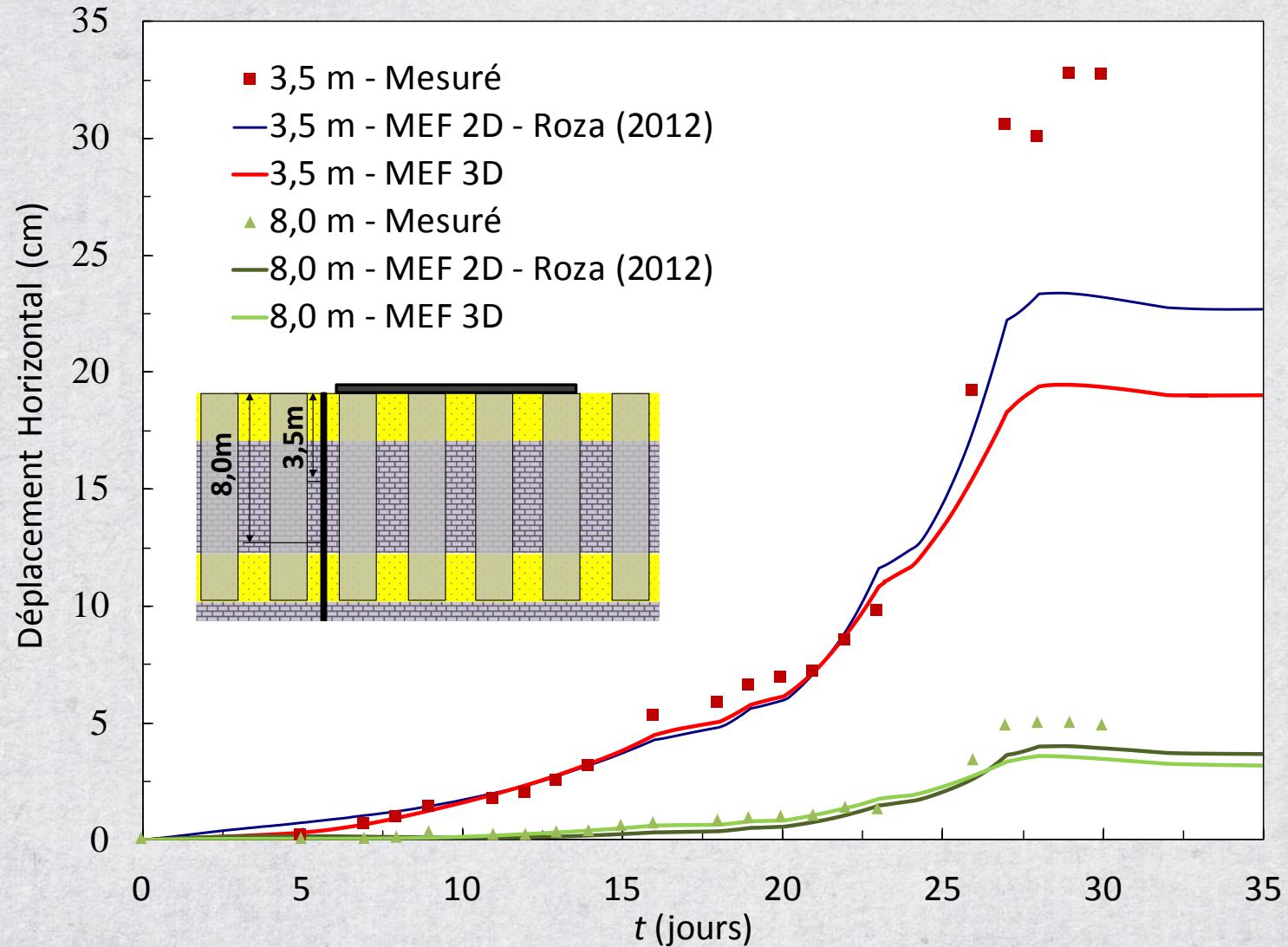
$$b_c = B \frac{r_c^2}{R^2}$$

Tan et al. (2008)

TASSEMENTS – MESURES vs NUMÉRIQUE

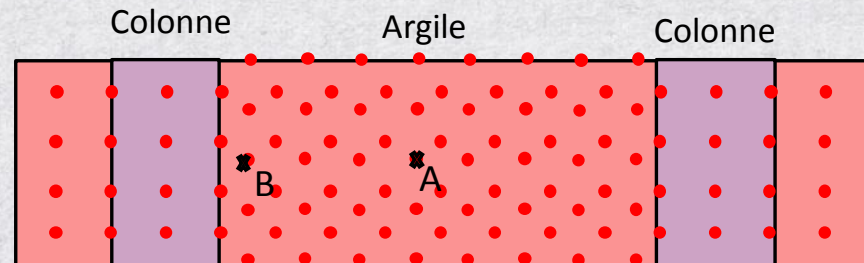
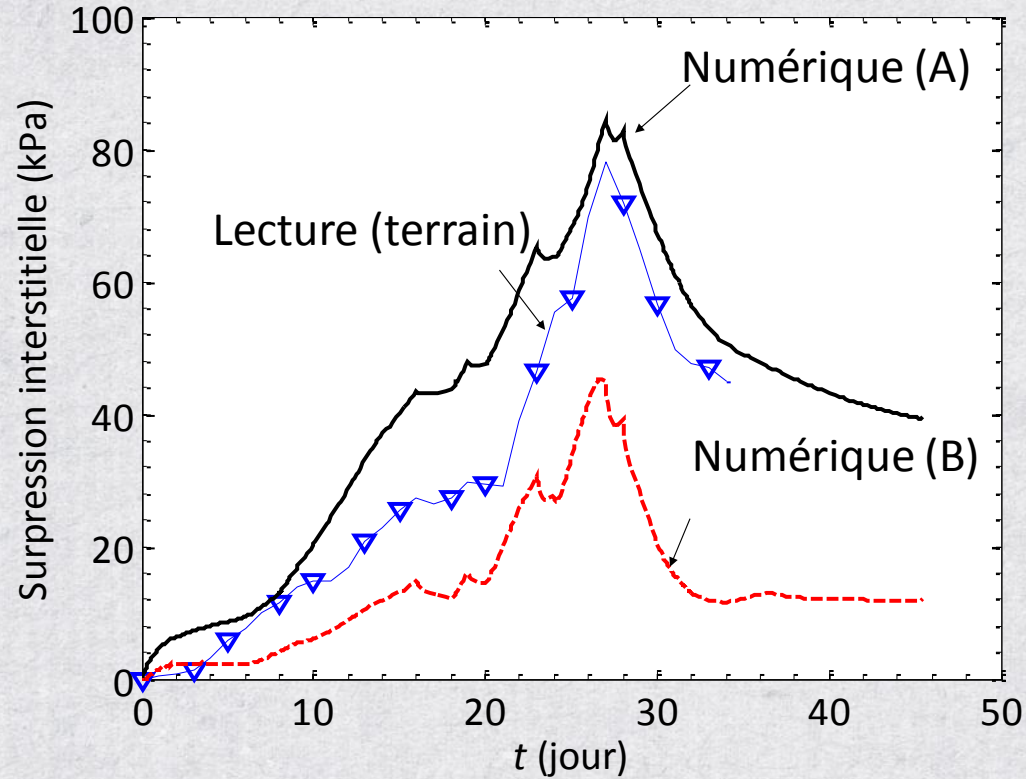


DÉPLACEMENTS HORIZONTAUX – MESURES vs NUMÉRIQUE

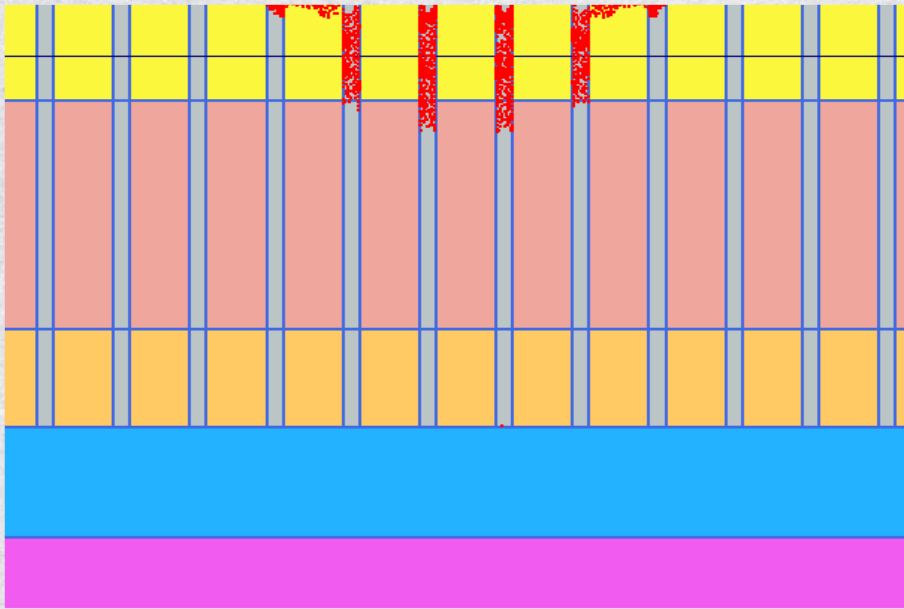


SURPRESSION INTERSTITIELLE – MESURES vs NUMÉRIQUE

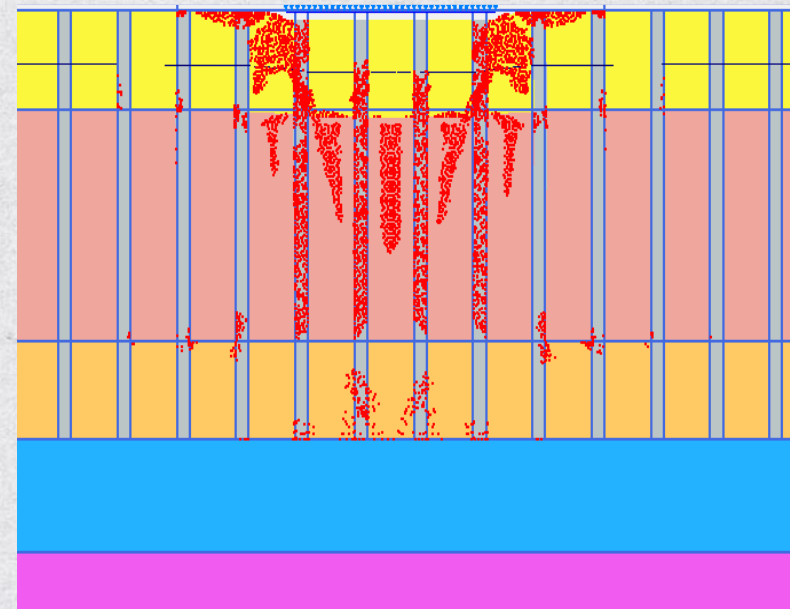
Profondeur = 4 m



PLASTICITÉ AU DÉBUT ET À LA FIN DU CHARGEMENT

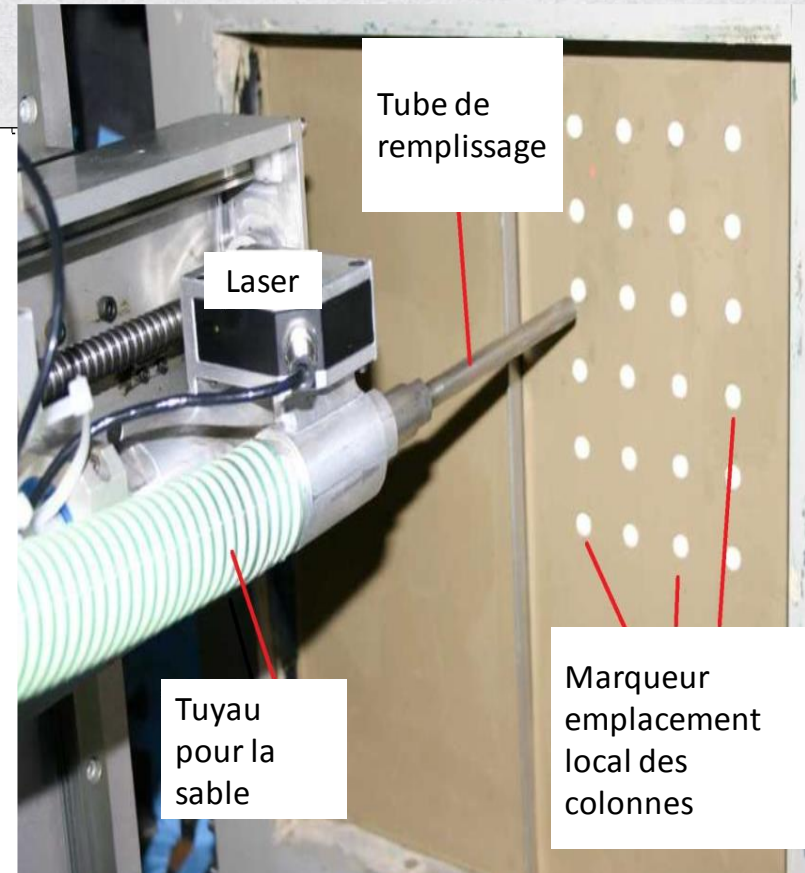
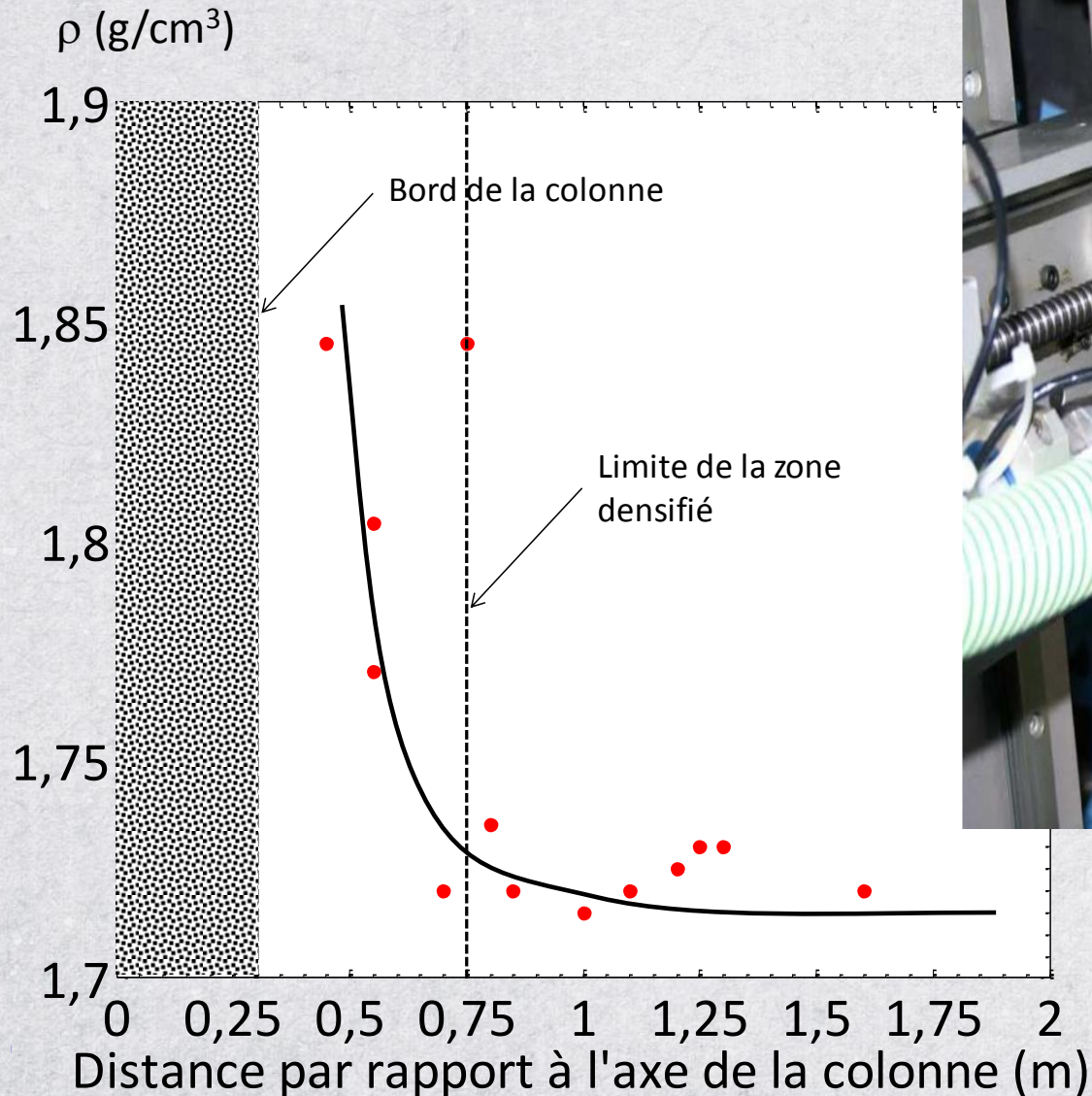


Plastification au début du chargement



Plastification à la fin du chargement

MODÉLISATION EN CENTRIFUGEUSE



Weber et al. (2010)

CONCLUSIONS SUR LES COLONNES BALLASTÉES

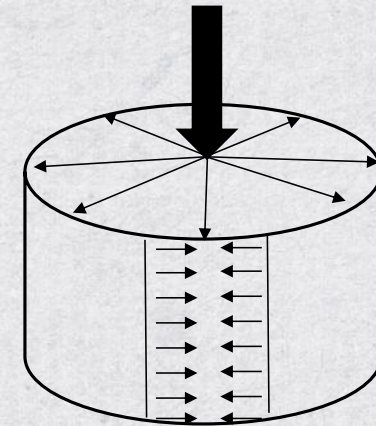
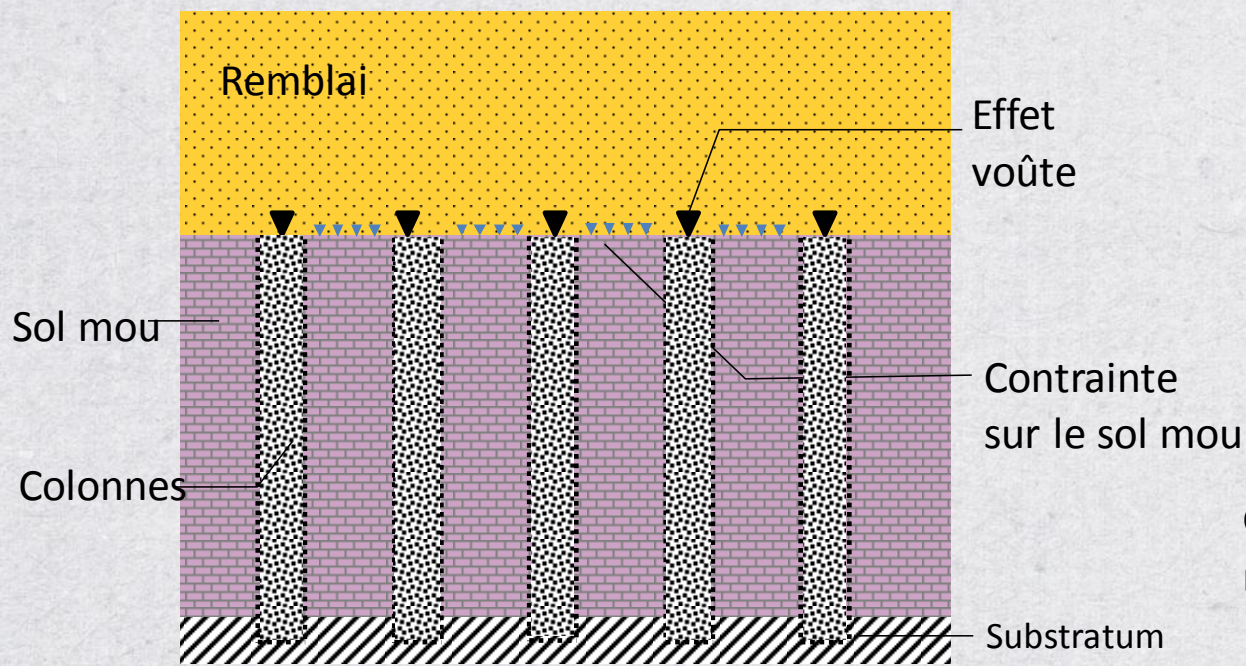
- Densification locale autour des colonnes
- Augmentation du drainage et diminution des tassements
- Validation de modèle numérique sur des sites instrumentés
- Prise en compte du mode d'installation dans les simulations numériques
- Les modèles analytiques présentent un certain nombre de limitations

COLONNES BALLASTÉES CONFINÉES

1. Principes/ Méthodes analytiques
2. Essais en vraie grandeur
3. Modélisations numérique

- Hosseinpour, I., Riccio, M. et Almeida., M. « Numerical evaluation of a granular column reinforced by geosynthetics using encasement and laminated disks ». *Geotextiles and Geomembranes* 42, n° 4 (2014): 363-73.
- Almeida, M, Hosseinpour, I. et Riccio, M. « Performance of a geosynthetic-encased column (GEC) in soft ground: numerical and analytical studies ». *Geosynthetics International* 20, n° 4 (2013): 252-62.
- Almeida, M., Hosseinpour, I., Riccio, M., et Alexiew, D. « Behavior of Geotextile-Encased Granular Columns Supporting Test Embankment on Soft Deposit ». *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015.

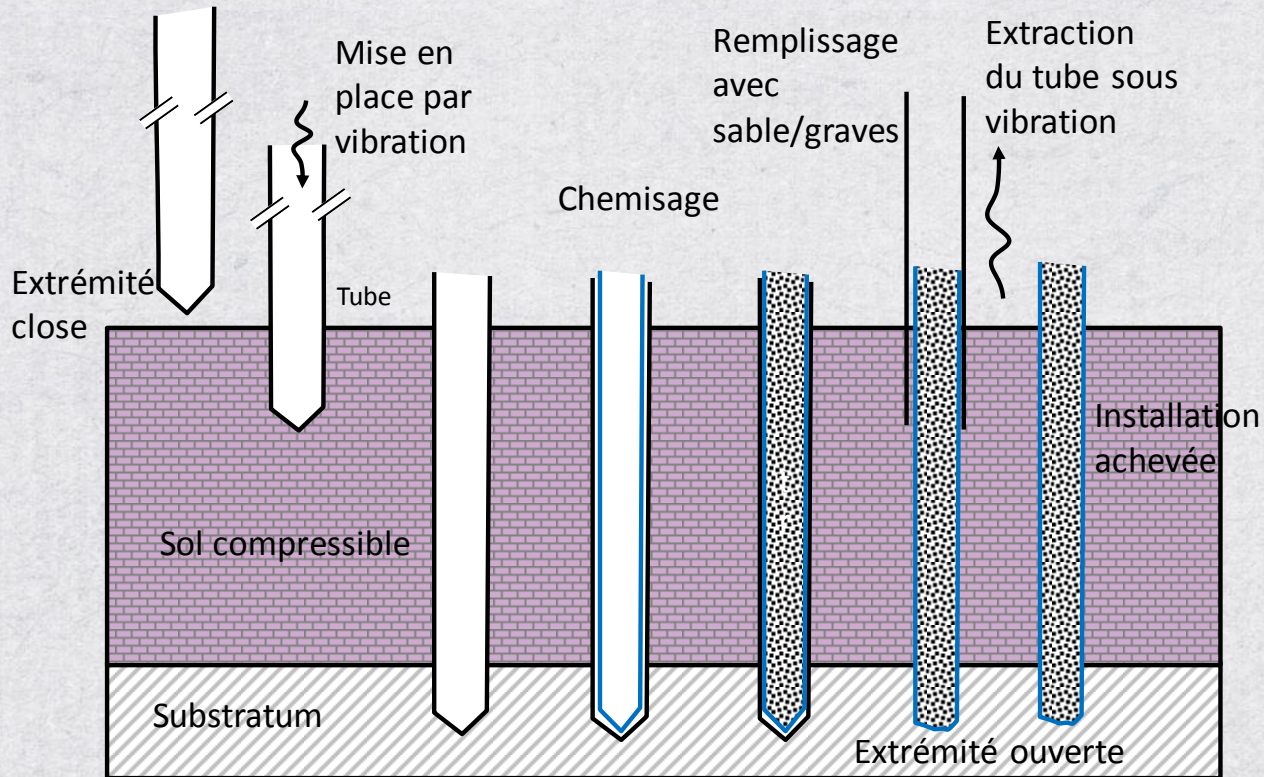
LES COLONNES BALLASTÉES CONFINÉES



Géosynthétique de confinement à module élevé et faible fluage

Le géosynthétique s'oppose au mélange entre la colonne ballastée et l'argile environnante

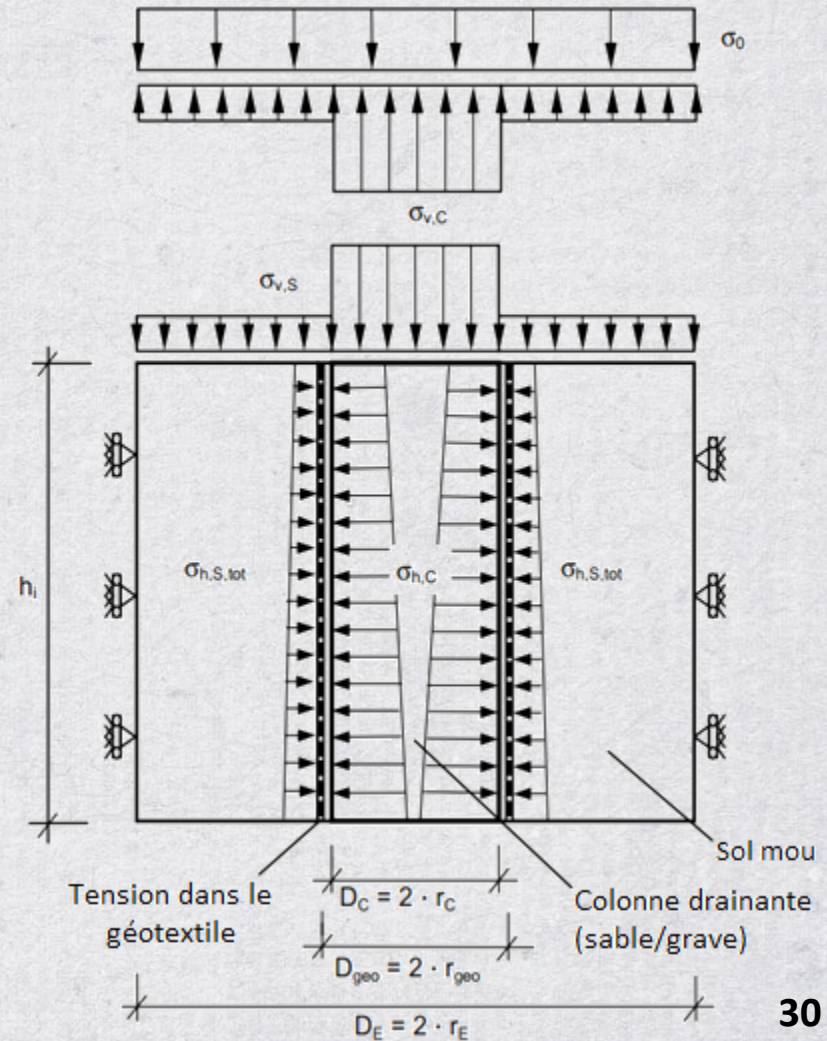
SÉQUENCE D'EXÉCUTION DES COLONNES



MÉTHODE ANALYTIQUE (RAITHEL ET KEMPFERT, 2000)

Hypothèses:

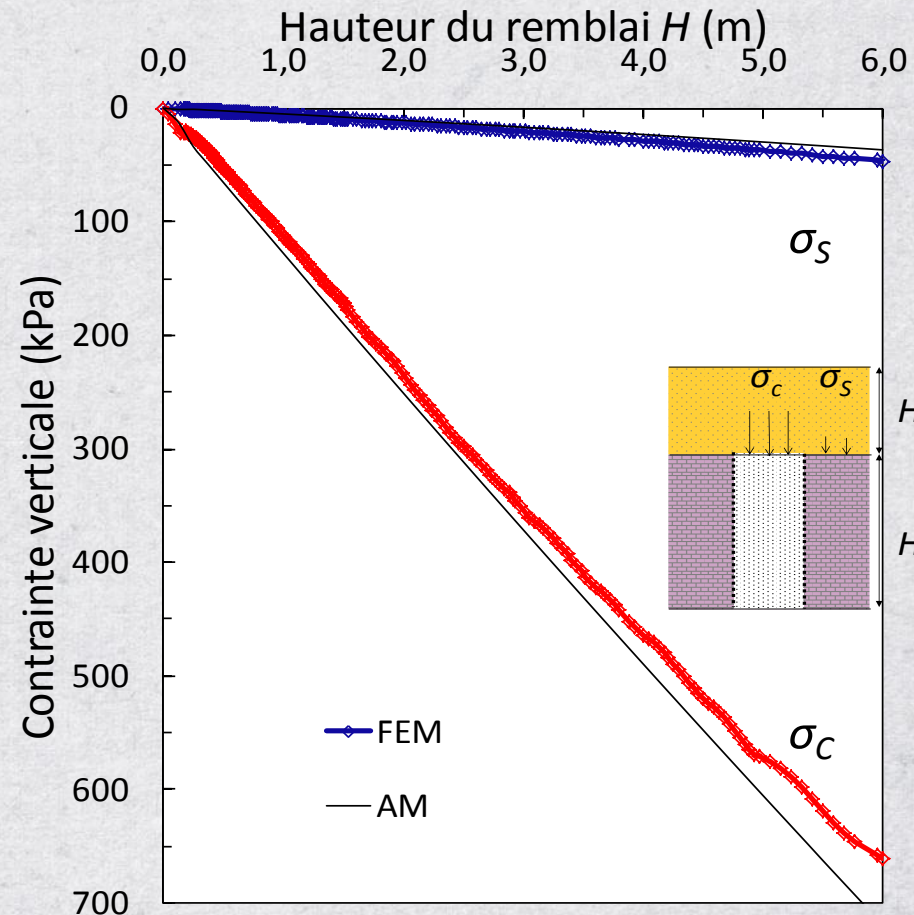
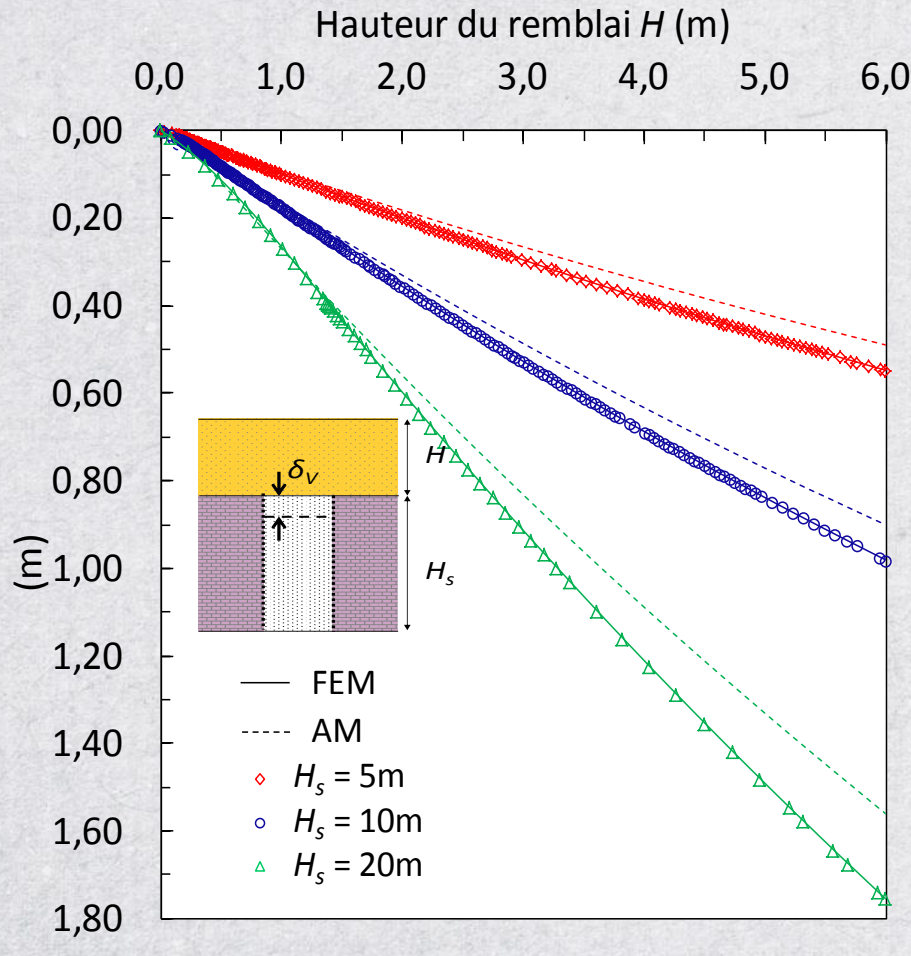
- 1- Les tassements en tête de colonne et de sol compressible sont égaux;
- 2- Les tassements de la couche portante sous les colonnes peuvent être négligés.
- 3- Dans la colonne, on prend en compte le coefficient de poussée.
- 4- Le comportement du géotextile de confinement est du type linéaire élastique.
- 5- Les tassements sont calculés sur le long terme (condition drainée)



ANALYSE NUMÉRIQUE vs MÉTHODE ANALYTIQUE -

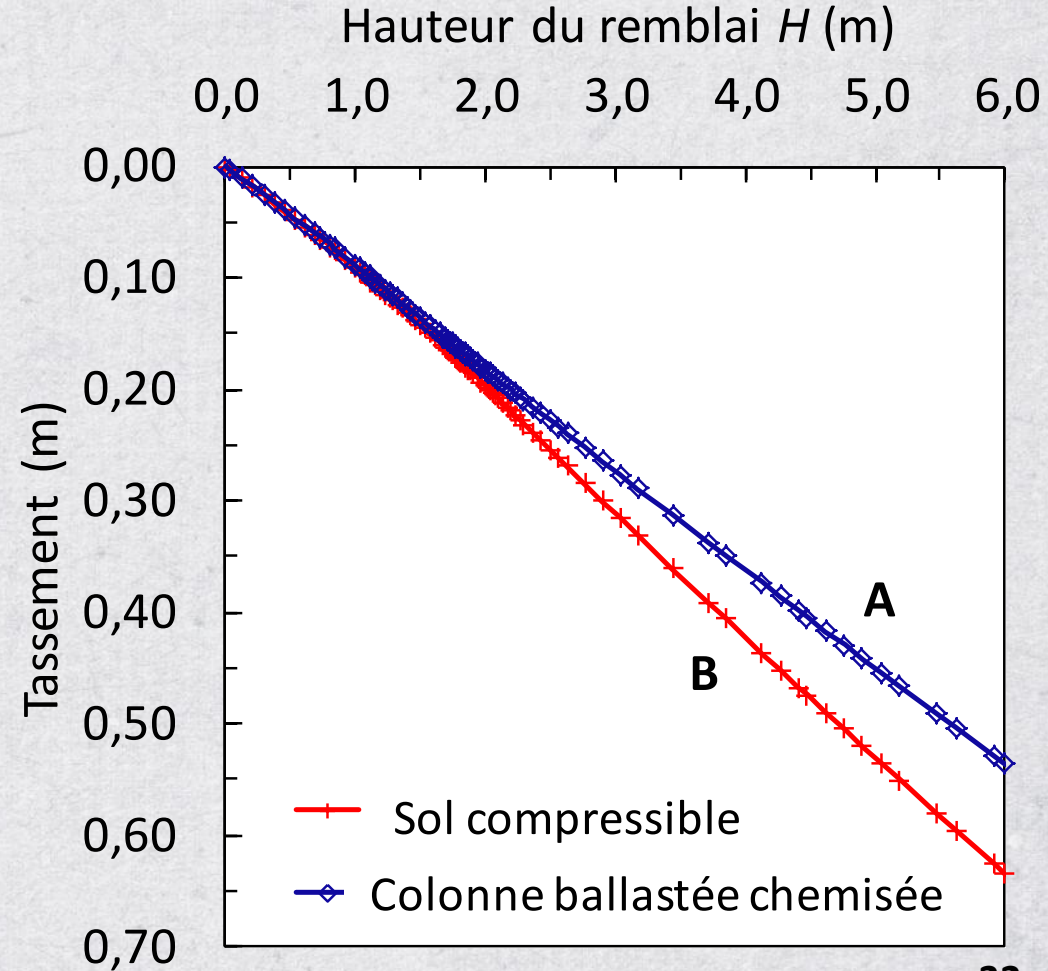
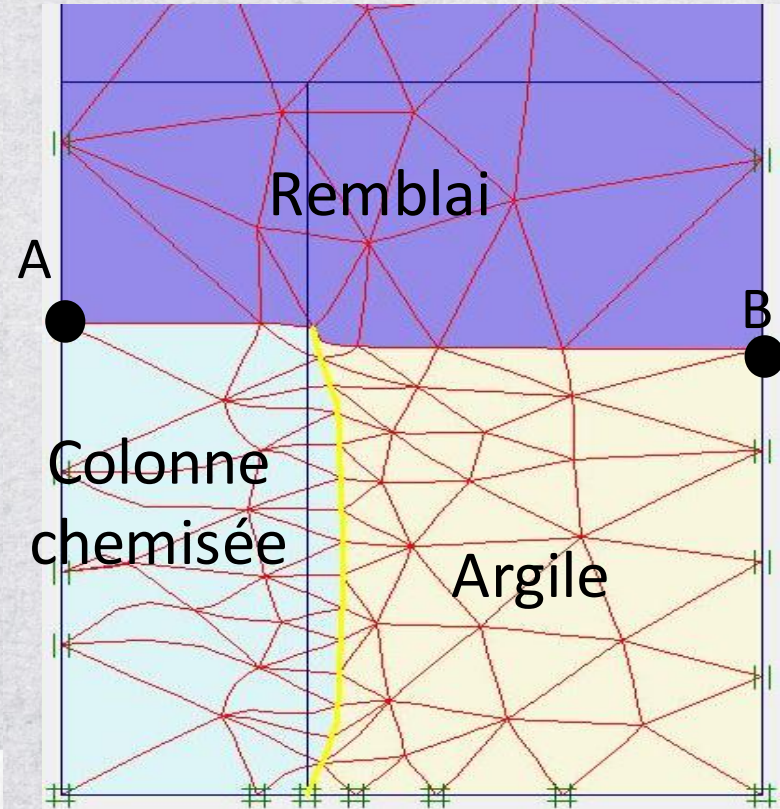
TASSEMENTS

CONTRAINTES



ANALYSE NUMÉRIQUE – TASSEMENTS DIFFÉRENTIELS À LA BASE DU REMBLAI

Maillage déformée



ESSAI EN VRAI GRANDEUR - STOCKYARD À SANTA CRUZ, RJ

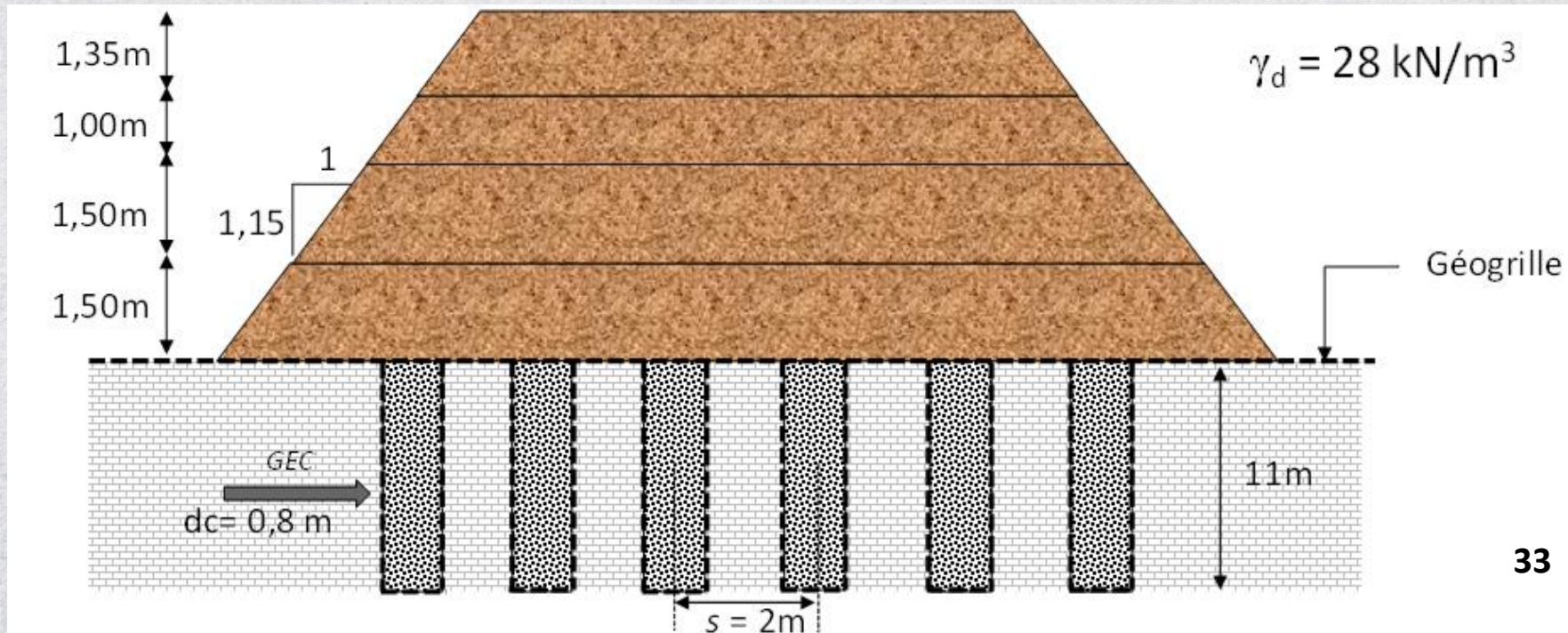


Maillage carré
6 × 6 inclusions

$H = 5,35\text{m}$ (150 kPa)



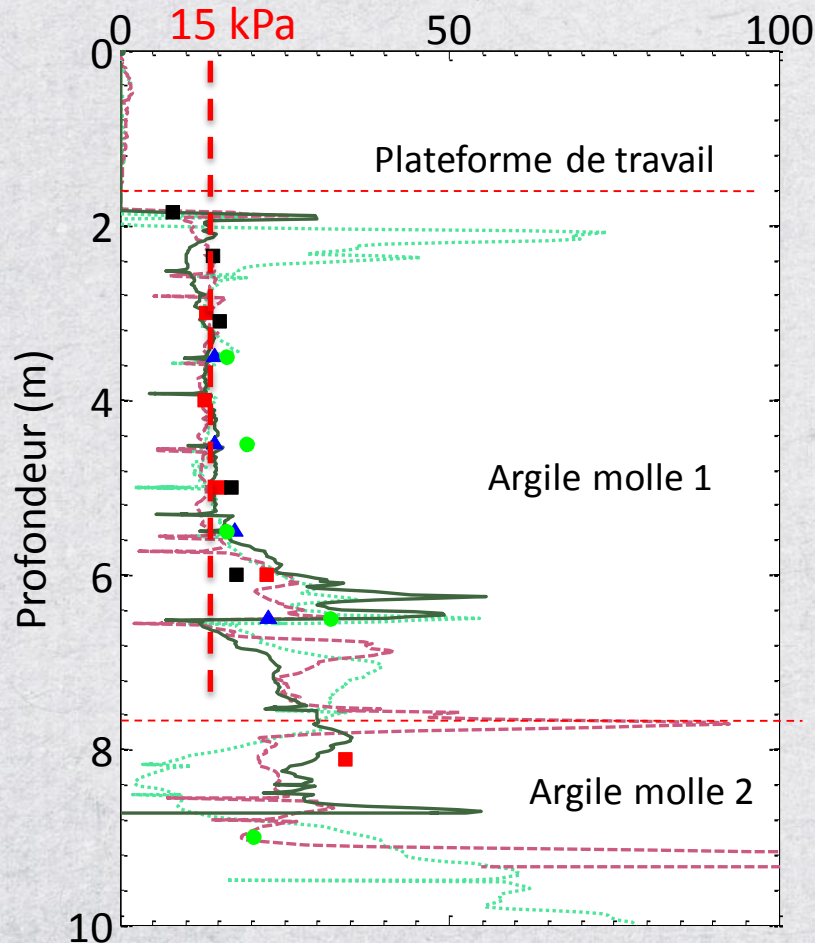
6,5 m



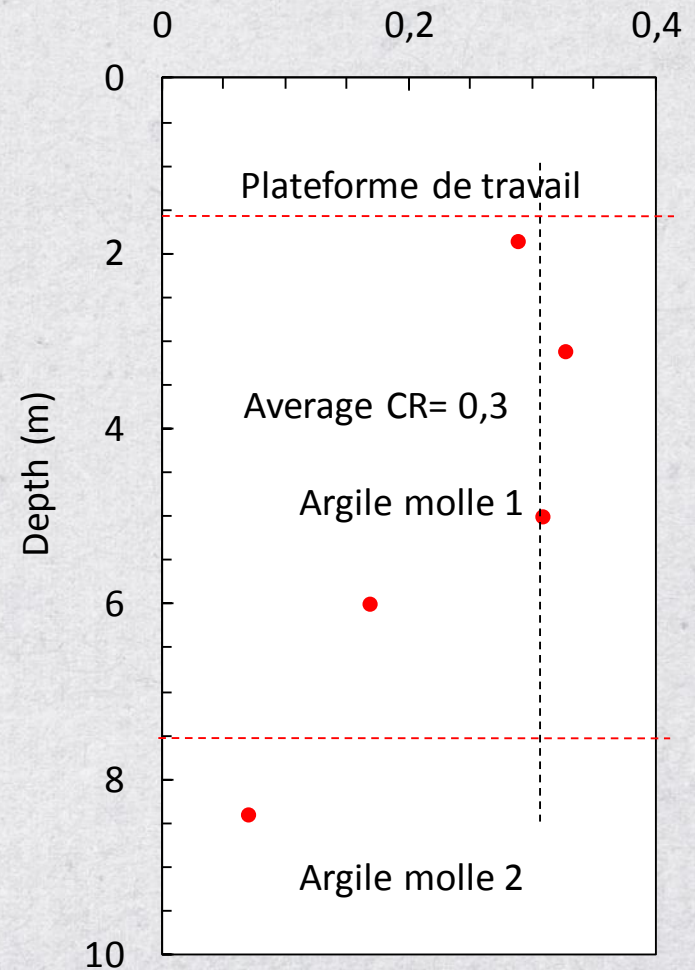
INVESTIGATION SUR SITE

Profil de la résistance non drainée (S_u) et taux de compressibilité (CR) obtenus à partir d'essais sur le terrain et en laboratoire

Résistance en cisaillement non drainé S_u (kPa)

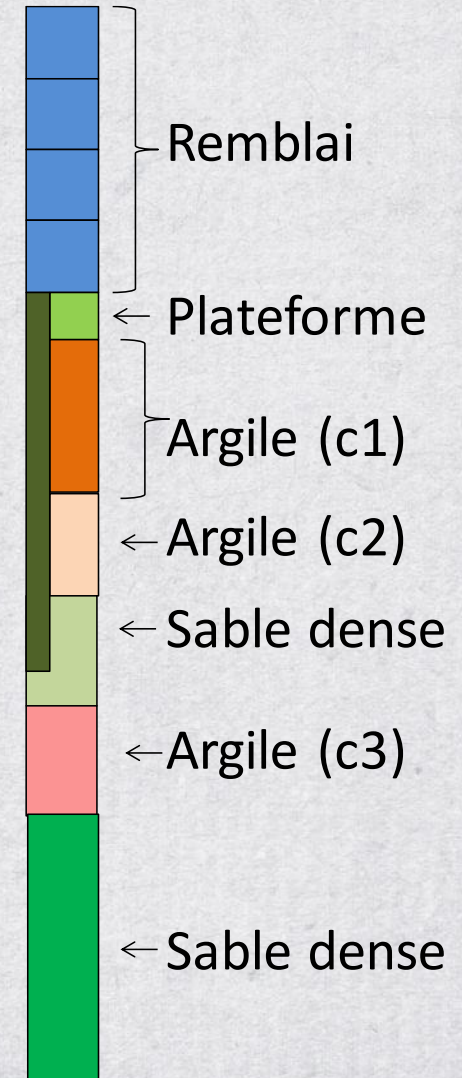


$CR = C_c / (1 + e_0)$



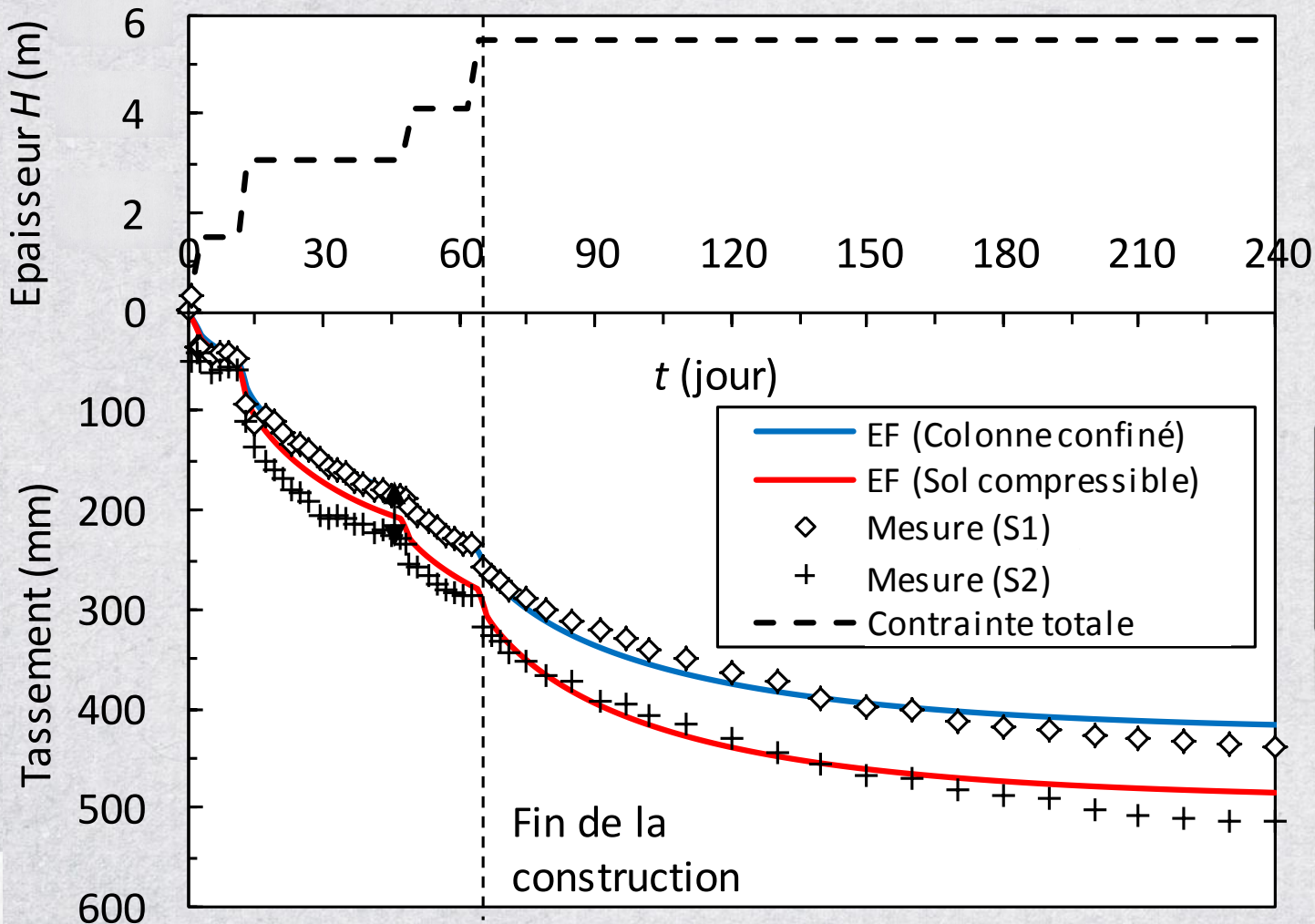
PARAMÈTRES DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE AXISYMÉTRIQUE

- $b_c = 0,8\text{m}$, $\alpha = 12,5\%$, $J = 1750 \text{ kN/m}$
- 4 phases pour la montée du remblai
- Modèle numérique: Remblai + colonne +
plateforme et sable dense (élasto-plastique avec
critère de rupture de Mohr Coulomb)
- Argile (Cam Clay)

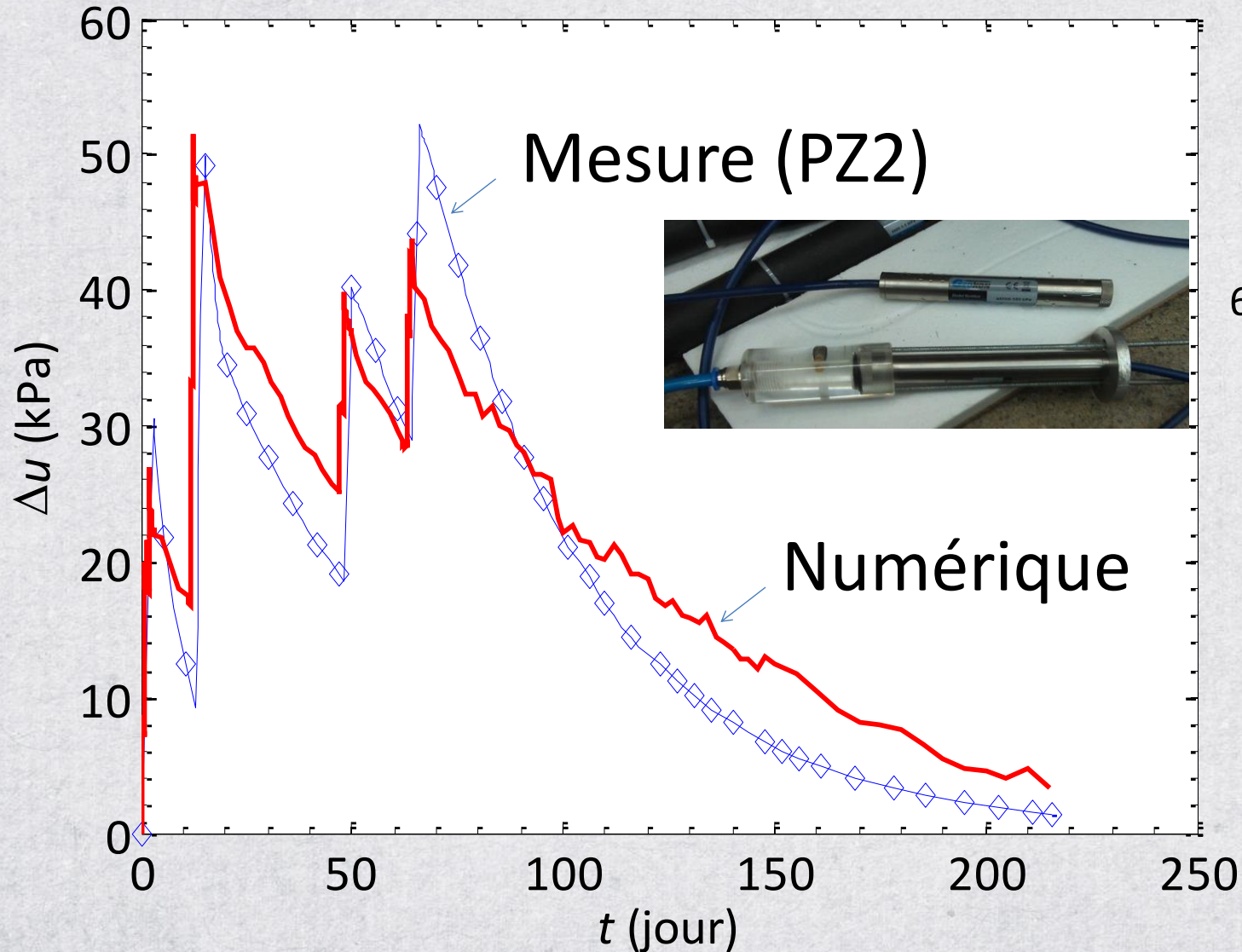


TASSEMENTS – MESURES vs NUMÉRIQUE

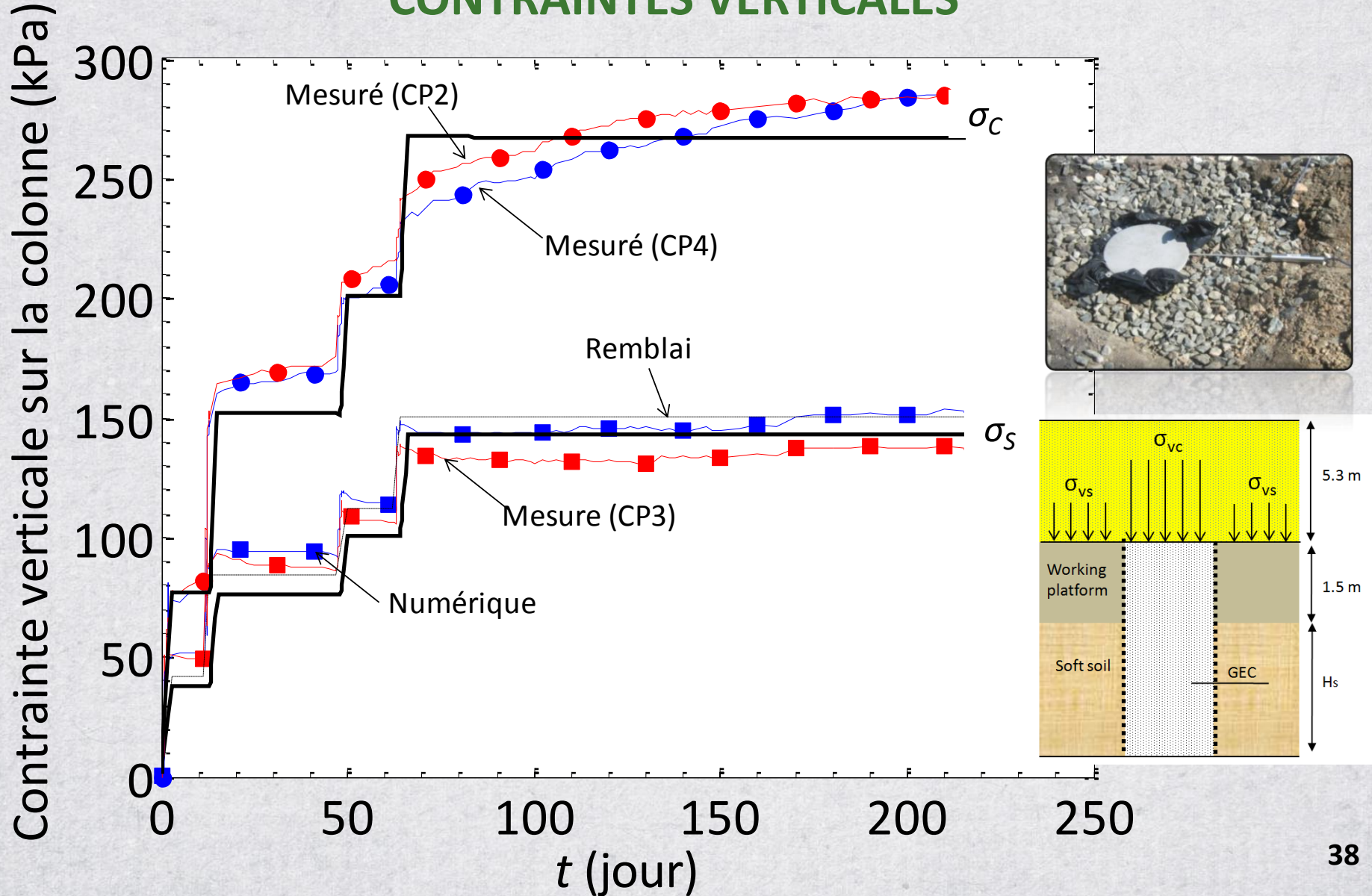
Tassement en fonction de la hauteur du remblai



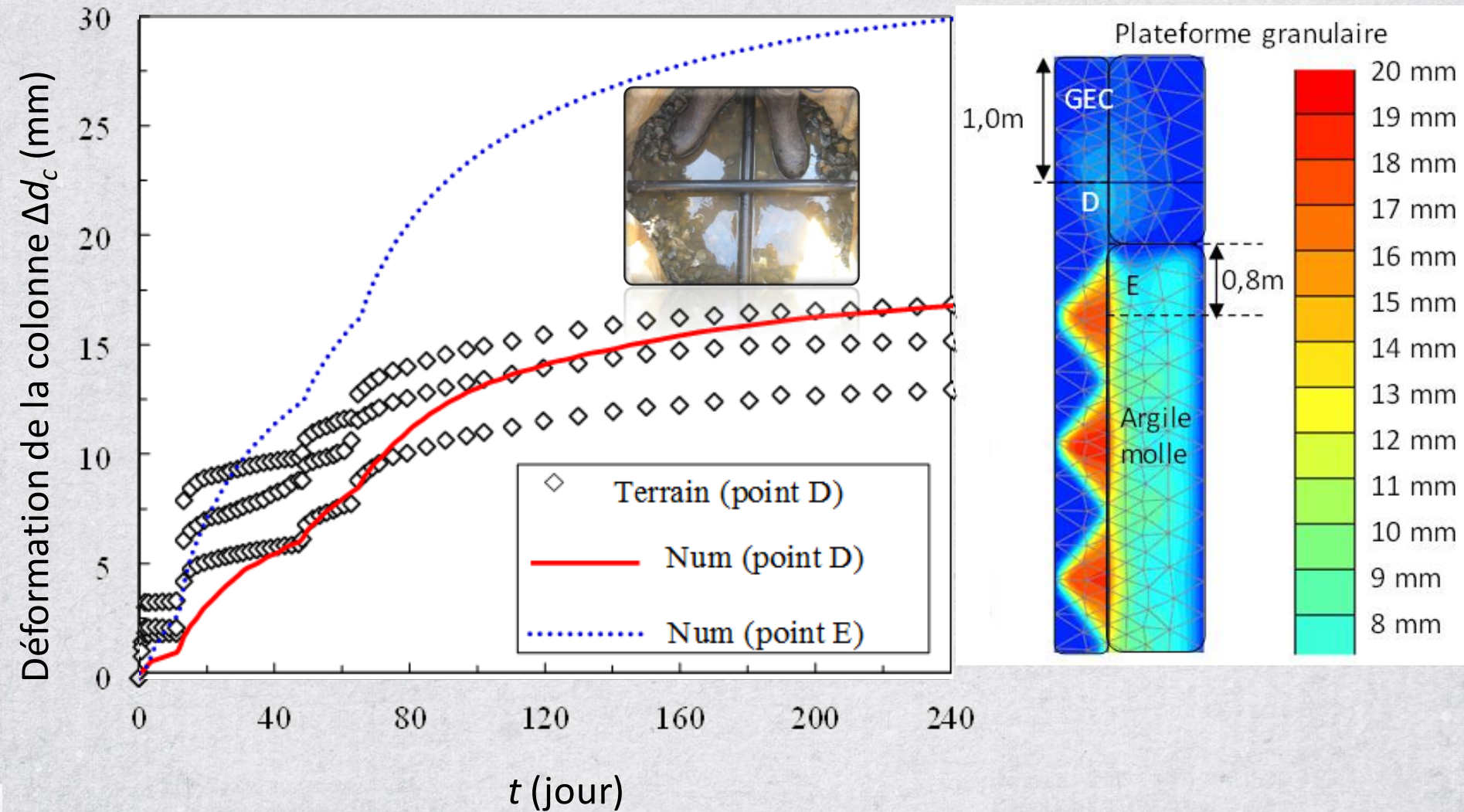
ÉVOLUTION DE LA SURPRESSION INTERSTITIELLE



CONTRAINTES VERTICALES



DÉFORMATION DE LA COLONNE BALLASTÉE



CONCLUSIONS SUR LES COLONNES BALLASTÉES CONFINÉES

Comportement des colonnes ballastées

- Contrainte élevée en tête
- Faible tassements
- Réduction des déformations/ remblais renforcés

Modélisations numériques

- Utilisation recommandée des modèles 2D à configuration axisymétrique

Concordance entre les résultats numériques et analytiques (qui sont cependant limités).

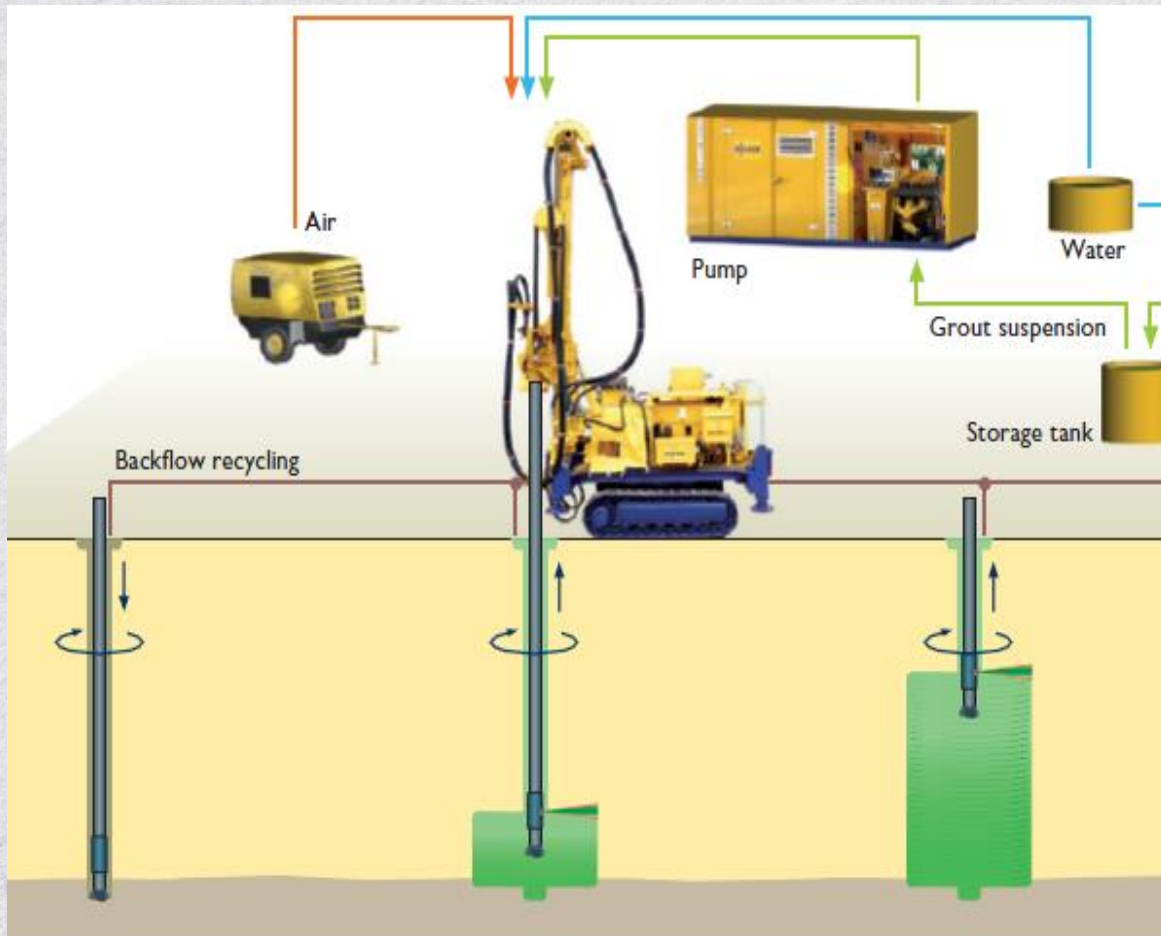
Deep Soil Mixing

1. Résultats d'essais en vraie grandeur
2. Modèle numérique

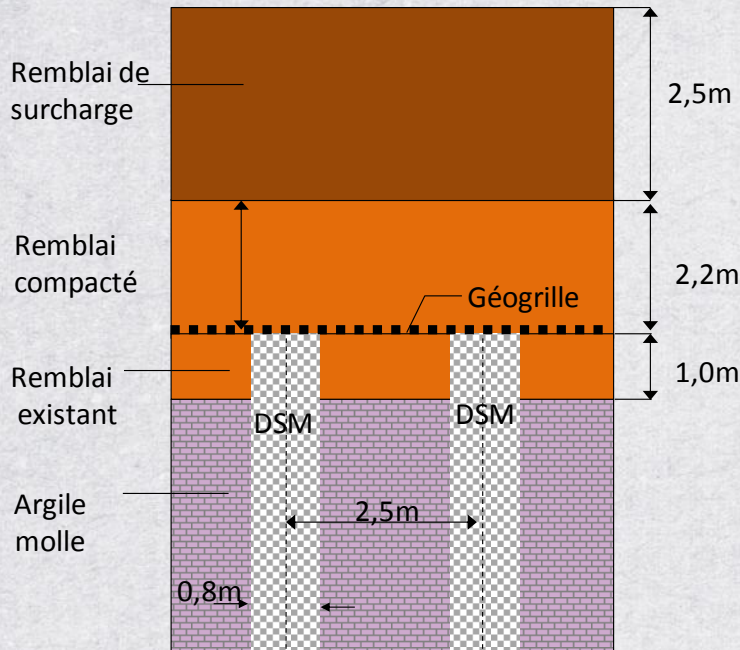
➤ Falk, E., M. Felix, et T. Koehler. « Deep Soil Mixing trials at Porto Alegre airport, Brazil », 2015, 10.

DSM – MÉTHODE D'EXÉCUTION

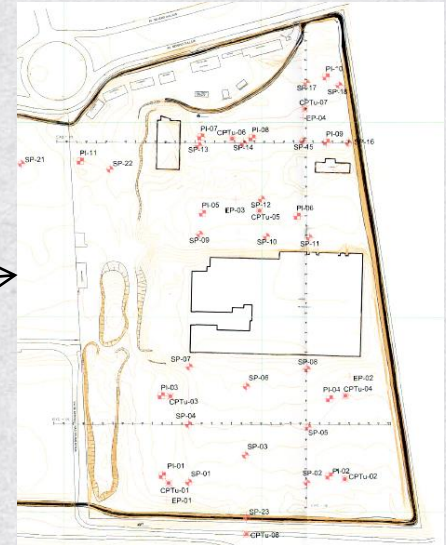
Méthode humide



AÉROPORT INTERNATIONAL – PORTO ALEGRE



Terminal de Fret

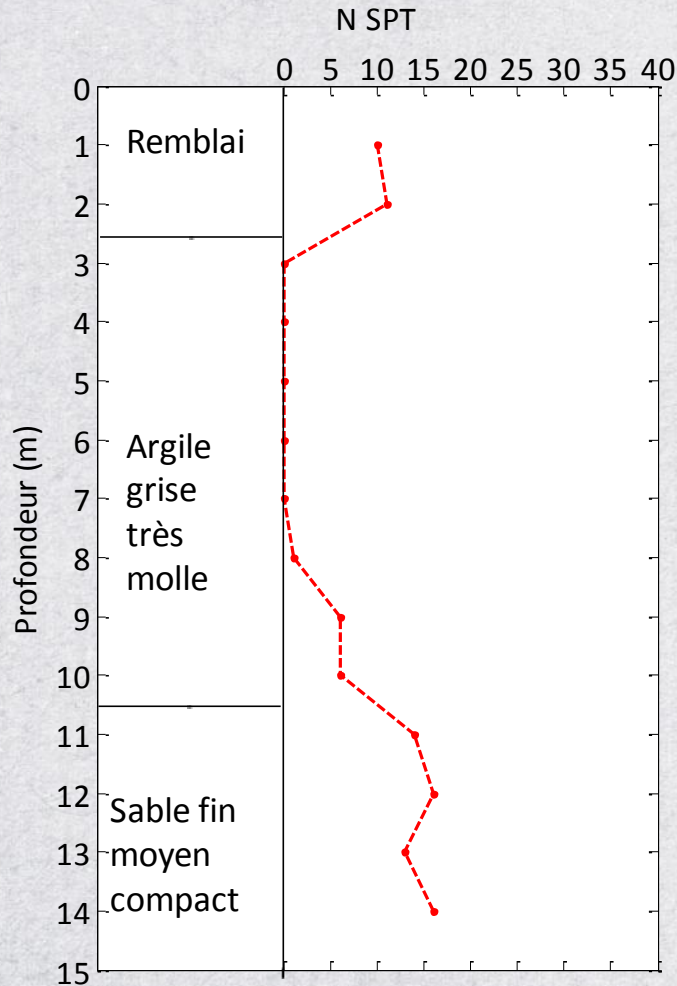


8480 colonnes
Taux de
couverture = 8%

CARACTÉRISTIQUES DU SOL COMPRESSIBLE

Epaisseur moyenne de remblai: 2,5 m

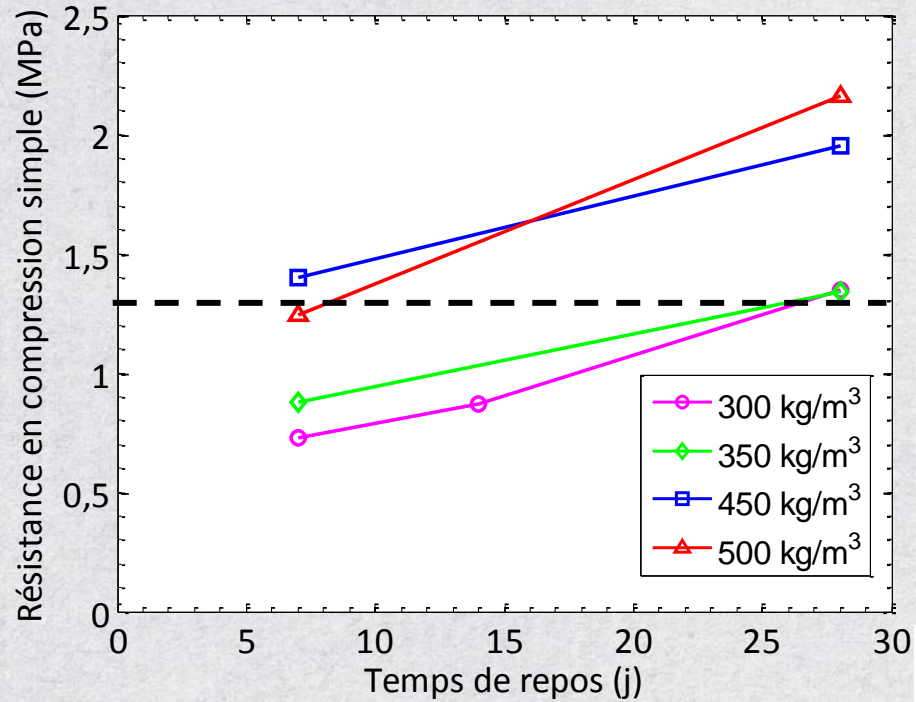
Epaisseur moyenne d'argile à SPT < 4: 8 m



Prof 5-7 m	
$C_c/(1+e_0)$	0,43
γ (kN/m ³)	13,5
C_v (m ² /s)	$6,5 \times 10^{-7}$
S_u (kPa)	7,7
ω (%)	94
I_p (%)	34,8

Profil géotechnique typique

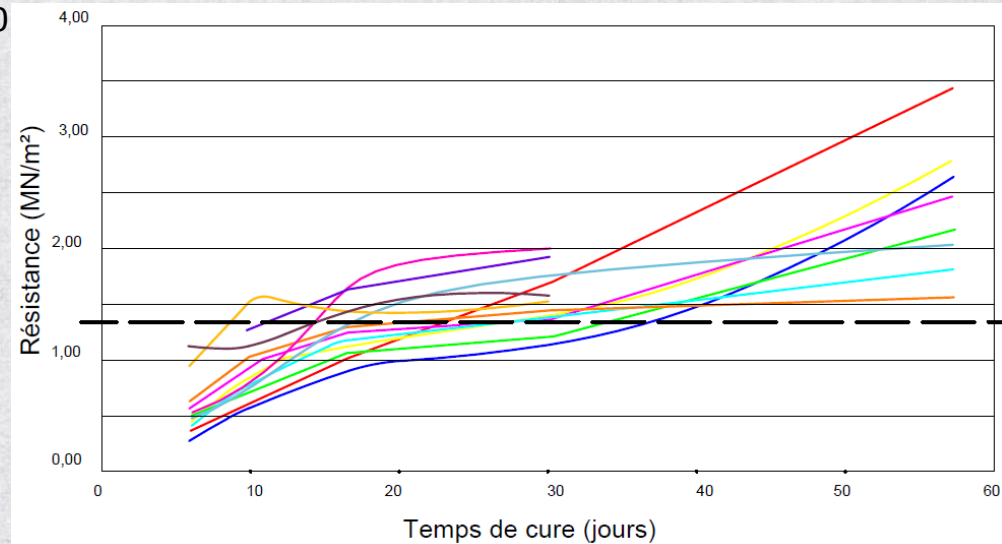
TEST DE LABORATOIRE SELON LA TENEUR EN CIMENT



teneur de matière organique 9%-13%

CONTRÔLE DE LA QUALITÉ IN SITU

Compression simple après leurs exécutions



MÉTHODES D'EXÉCUTION



(a) Etape finale de l'exécution d'une colonne DSM



(b) Nettoyage après la mise en place des colonnes

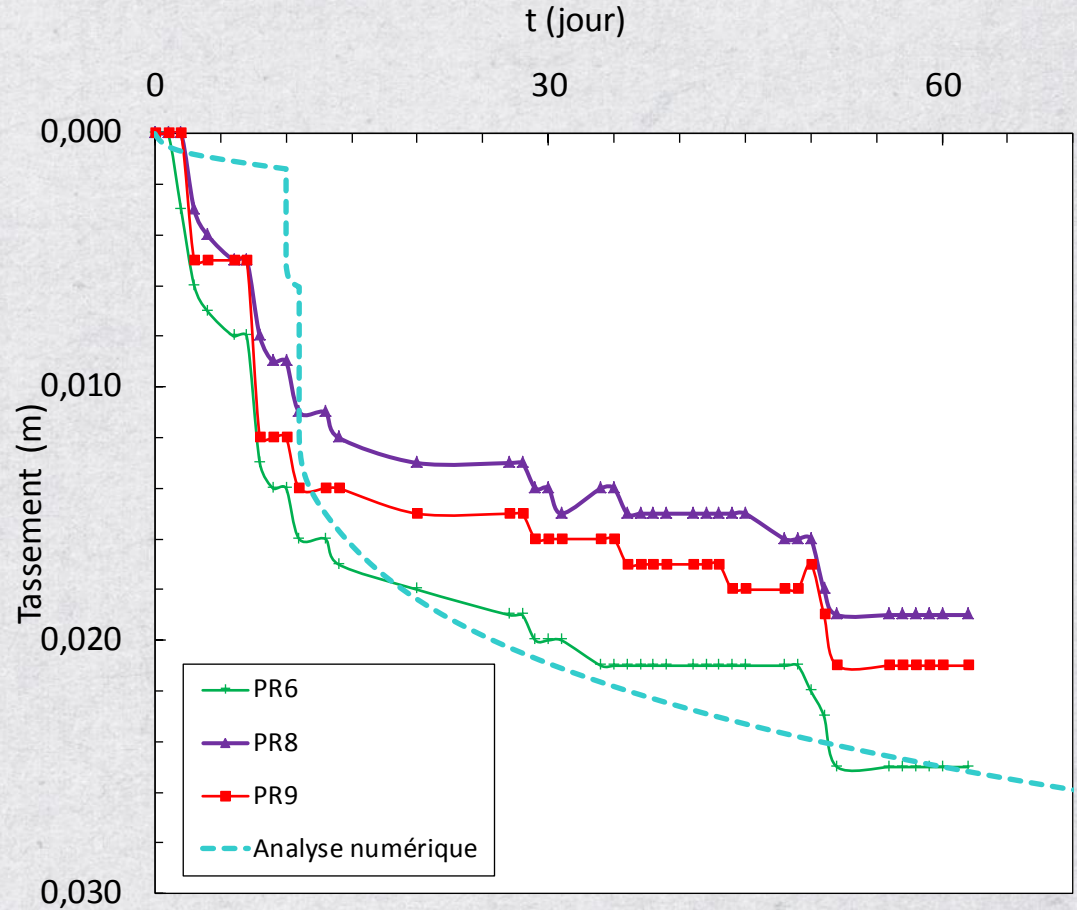
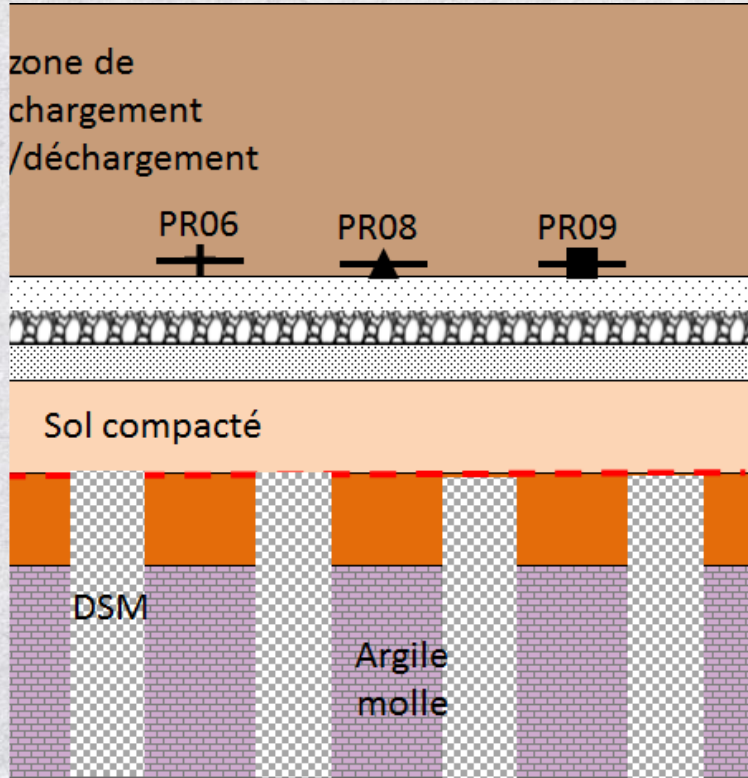


(c) Installation de géogrilles (avec une protection de géotextiles au niveau des colonnes)

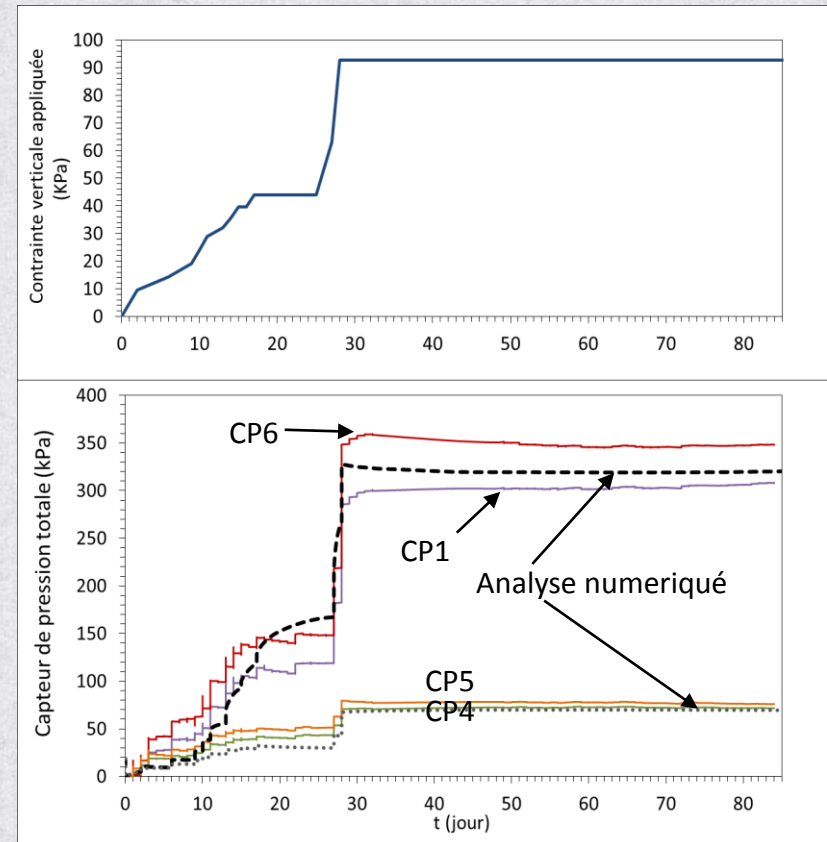
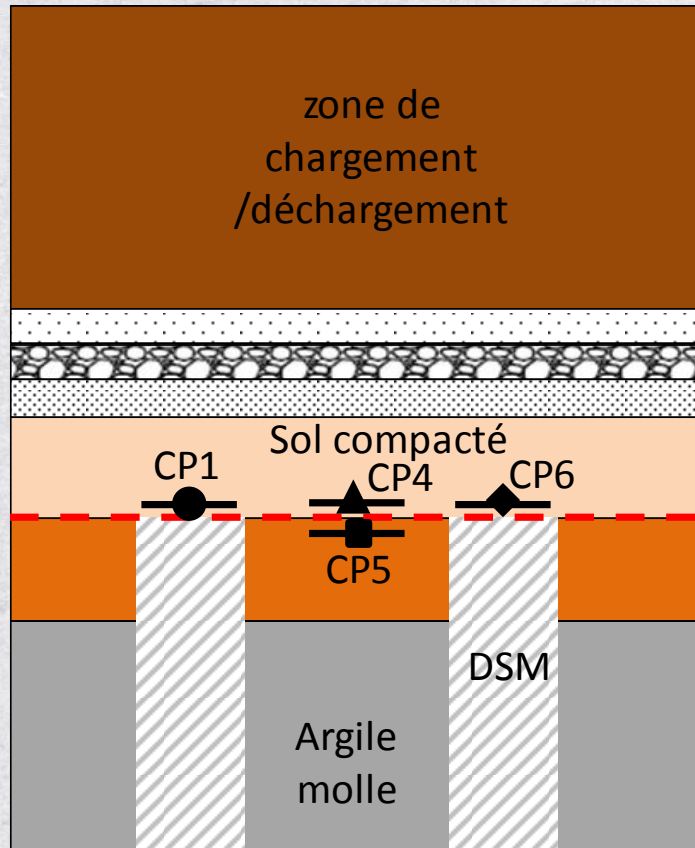


(d) Mise en place de la géogrille

TASSEMENTS – SITE INSTRUMENTÉ



CONTRAINTES VERTICALES



L'instrumentation du chantier a permis de mettre en évidence l'augmentation significative des contraintes sur des colonnes pour un rapport de 3,5 en moyenne.

CONCLUSIONS SUR DEEP SOIL MIXING

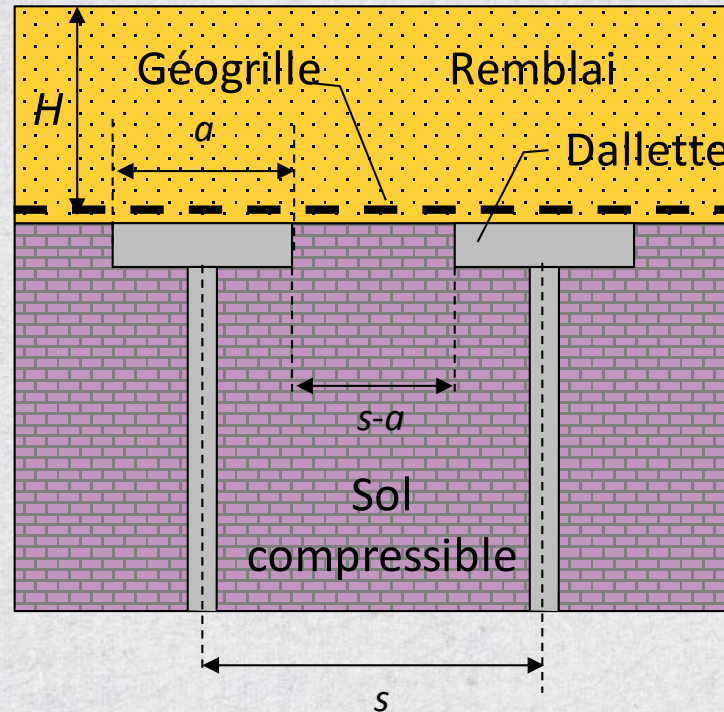
- Méthode récente au Brésil
- Résultats satisfaisants, même pour des argiles à forte teneur de matière organique
- Validation en cours d'un modèle numérique

Remblai sur pieux

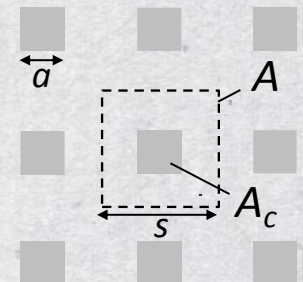
1. Essai en vraie grandeur
2. Modélisation physique
3. Modèles analytiques et numériques

- Blanc, M., Rault, G., Thorel, L. et Almeida, M. « Centrifuge investigation of load transfer mechanisms in a granular mattress above a rigid inclusions network ». ***Geotextiles and Geomembranes*** 36 (2013): 92-105.
- Blanc, M., Thorel, L., Girout, R. et Almeida, M. « Geosynthetic reinforcement of a granular load transfer platform above rigid inclusions: comparison between centrifuge testing and analytical modelling ». ***Geosynthetics International*** 21, n° 1 (2014): 37-52.
- Fagundes, D., Almeida, M., Girout, R., Blanc, M. et Thorel, L. « Centrifuge modelling of unreinforced piled embankments ». ***Geotechnical Engineering***, 2015.
- Girout, R., Blanc, M., Dias, D. et Thorel, L. « Numerical analysis of a geosynthetic-reinforced piled load transfer platform – Validation on centrifuge test ». ***Geotextiles and Geomembranes*** 42, n° 5 (2014): 525-539

DISPOSITION GÉNÉRALE DES REMBLAIS SUR INCLUSIONS RIGIDES RENFORCÉS PAR GÉOSYNTHÉTIQUE



Epaisseur du remblai H (m)	Entre-axe s des inclusions (m)	Largeur des dalles a (m)	Taux de couverture $\alpha = A_c/A$ (%)
1,0 – 9,0	1,7 – 2,8	0,5 – 1,2	6,3 – 31,9



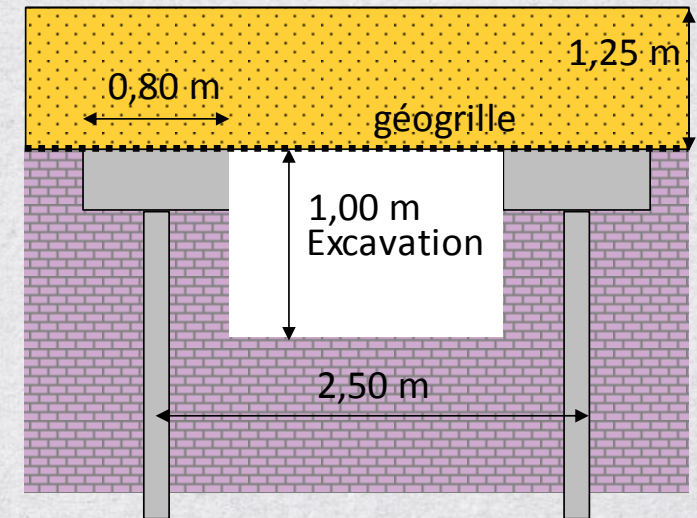
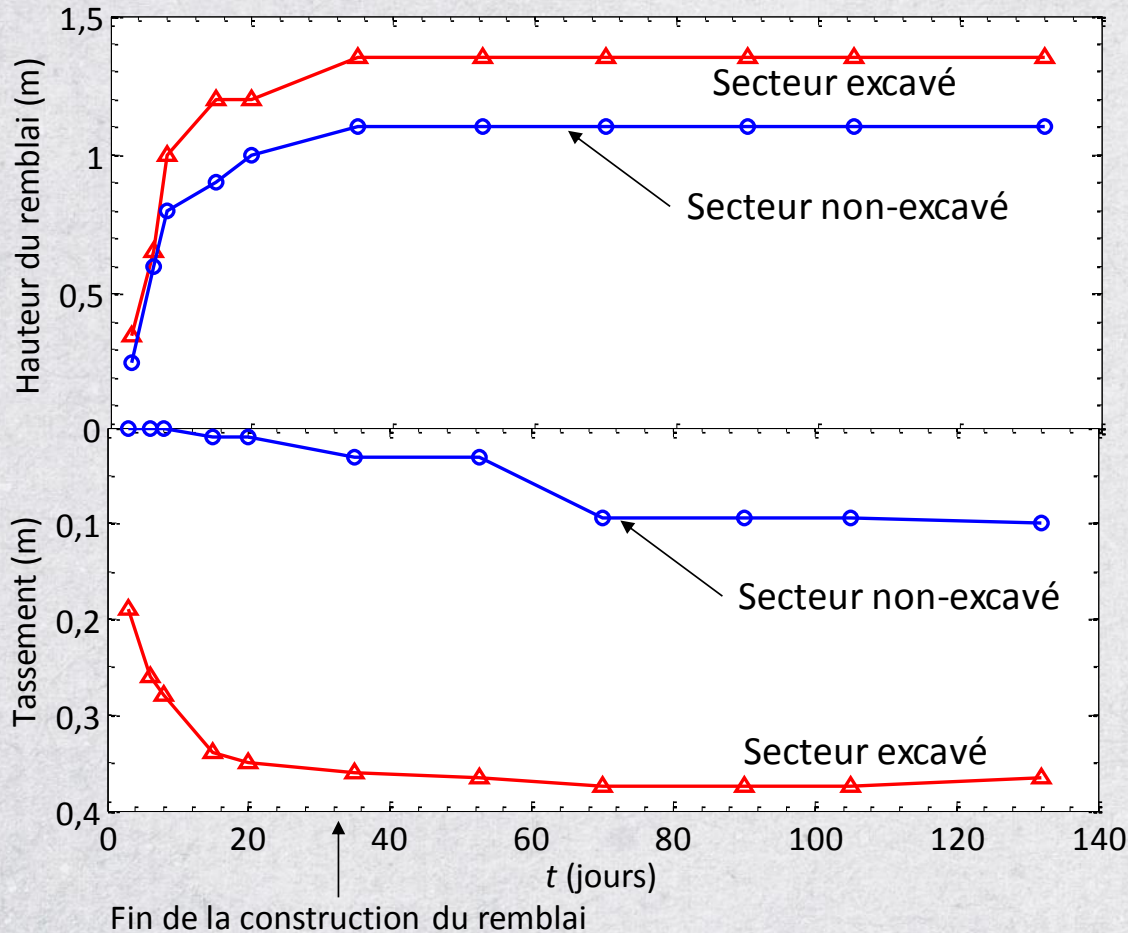
REMBLAIS SUR INCLUSIONS RIGIDES

Site 1 (2000 inclusions)

Site 2 (10000 inclusions)

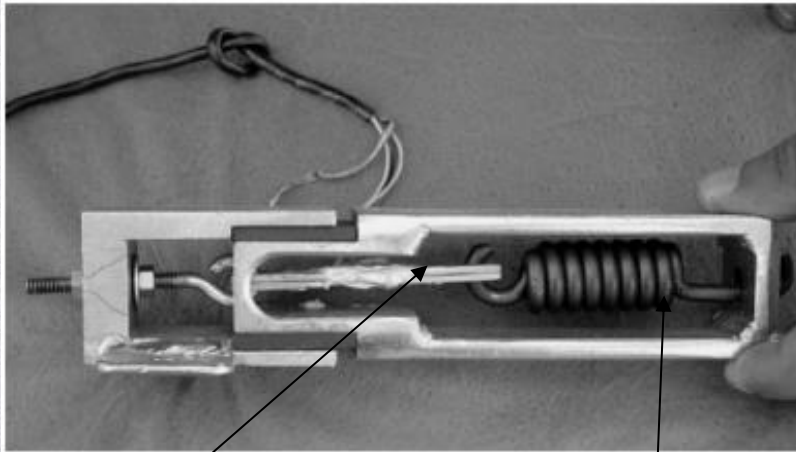


TASSEMENTS MESURÉS – SECTEURS EXCAVÉS ET NON-EXCAVÉS (SITE1)



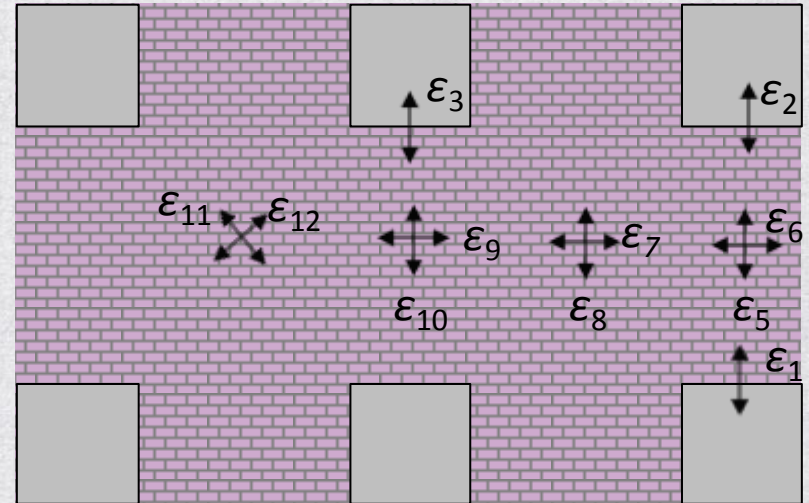
INSTRUMENTATION SUR LE SITE 1

Bord des dalles			Bandelette		Centre de la maille	
ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_6	ϵ_{10}	ϵ_7	ϵ_8
2,05%	1,73%	1,50%	1,50%	1,36%	1,14%	0,97%



Jauge de
déformation

Ressort



CONSIDÉRATIONS ANALYTIQUES

Etape 1: Calcul des efforts transmis directement sur les inclusions

Plusieurs auteurs peuvent être cités, parmi lesquels

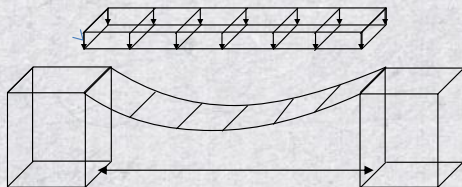
Hewlett et Randolph (1988)

Zaeske (2001)

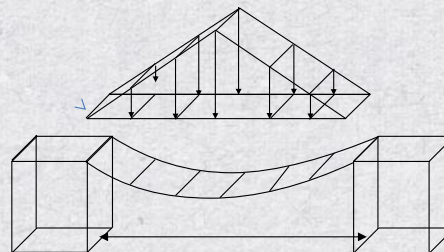
Van Eekelen et al (2013)

Etape 2: Déformation du géosynthétique

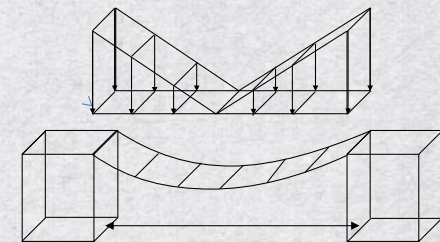
Distribution uniforme des contraintes verticales (uni)



Distribution triangulaire des contraintes verticales (tri)

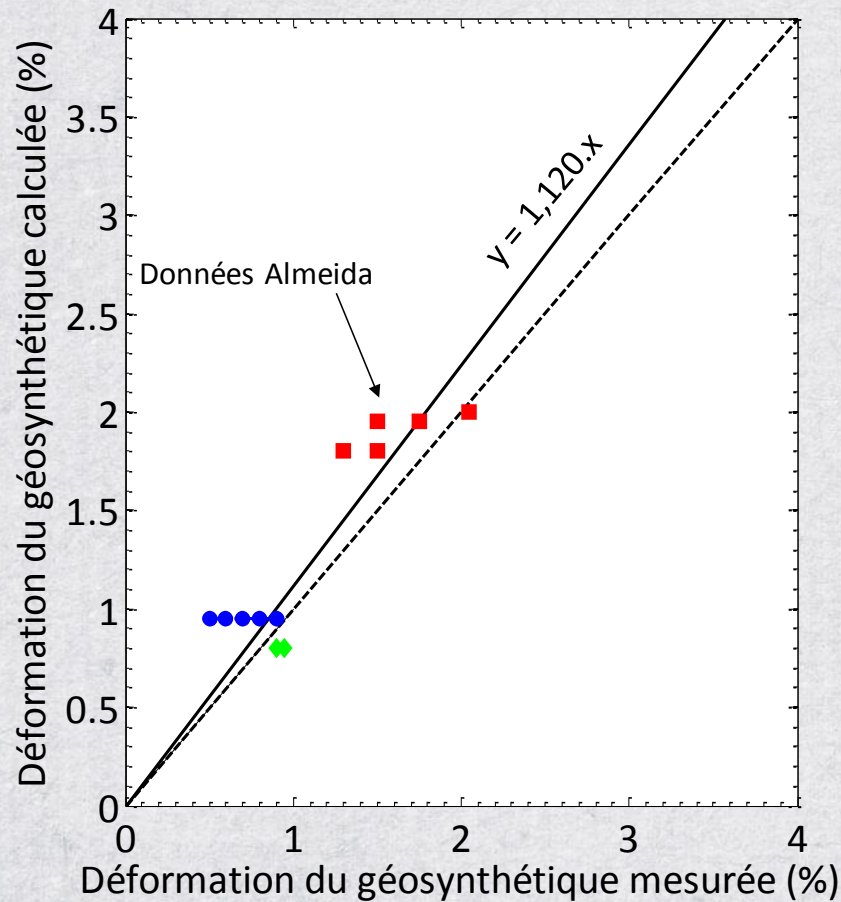


Distribution triangulaire inversée des contraintes verticales (inv)



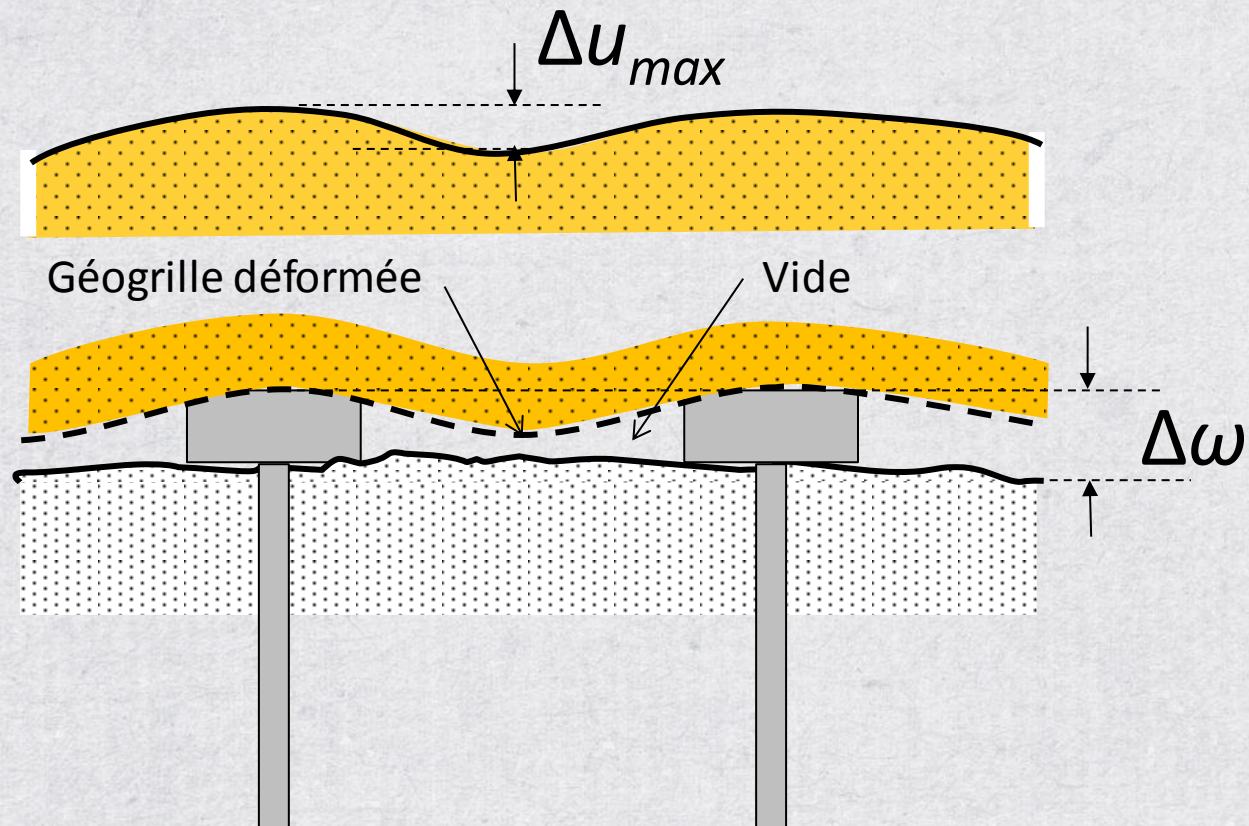
UTILISATION DANS LES MODÈLES ANALYTIQUES

Modèle CA , distribution triangulaire
inversée des contraintes



- Almeida et al (2007)
Rio de Janeiro
- van Eekelen et al. (2012c) –
Site de Woerden
- ◆ Huang et al (2009) Finlande

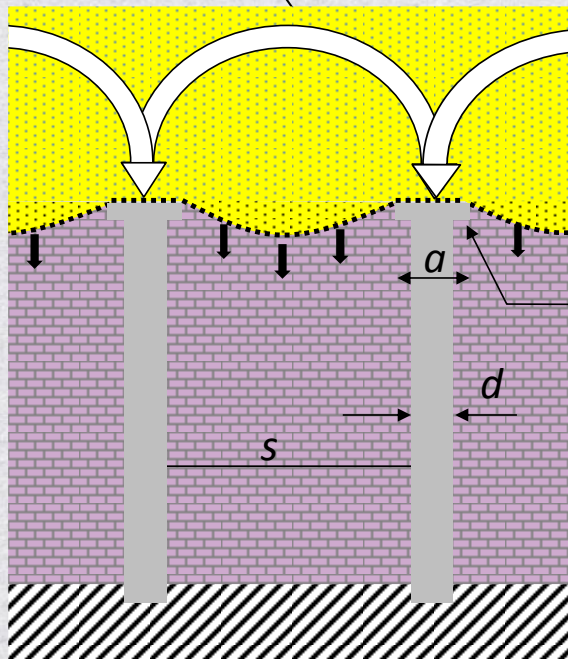
TASSEMENTS AU SOMMET ET À LA BASE DU REMBLAI



MODÈLES RÉDUITS

Essais sur modèles réduits centrifugés ($N = 20$) (avec l'IFSTTAR - GERS
Géomatériaux et Modèles Géotechnique) $\varnothing 0,9\text{m}$

Effet voûte



Matelas granulaire

Daliette

Réseau d'inclusion



(1)

(2)

Division des efforts en 3 termes

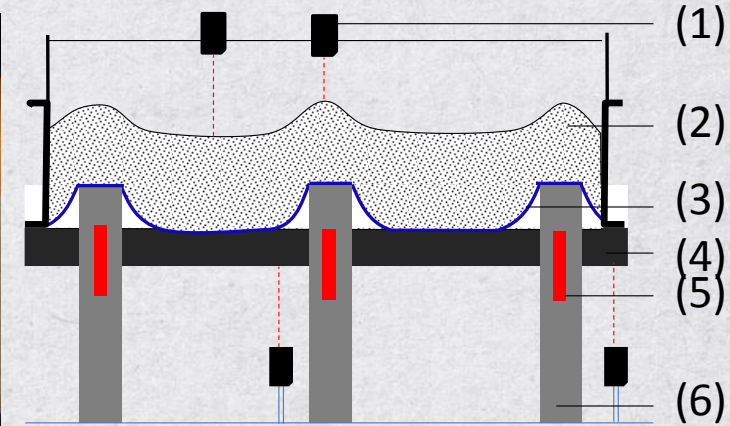
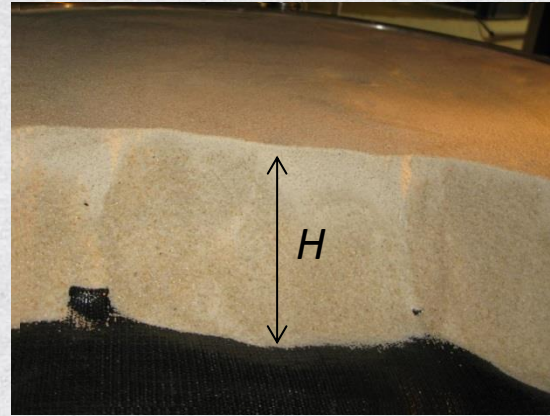
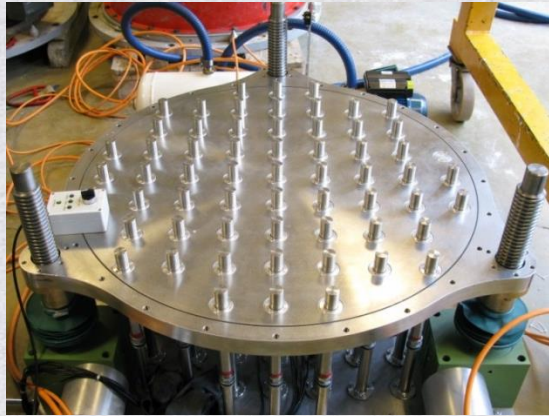
- Effet voûte
- Mobilisé par l'effet membrane
- Transmis au sol compressible

(1) Anneau

(2) Plateau

Par défaut, X : grandeur prototype ($^{(p)}$)
 $X^{(m)}$: grandeur modèle)

ETUDES PARAMÉTRIQUES SUR MODÈLES RÉDUITS



α : taux de couverture

2 gammes de valeurs

$1,23 \leq \alpha \leq 4,91\%$

$9,88 \leq \alpha \leq 19,963\%$

$\alpha = 0,5 \text{ m et } 1 \text{ m}$

Épaisseurs H:

entre 1m et 7 m

Non renforcé

Renforcé: $J = 4 \text{ MN/m et}$

$16,8 \text{ MN/m}$

(1) Laser (tassement)

(2) Matelas

(3) Géosynthétique

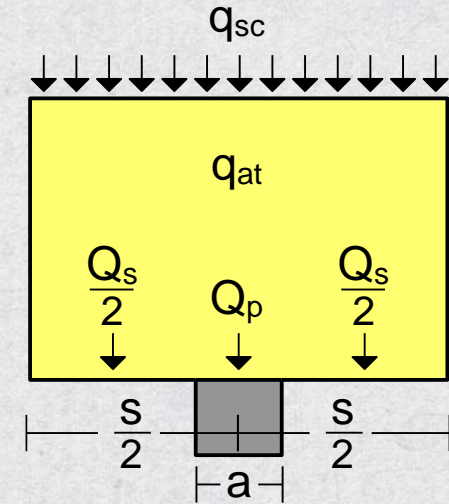
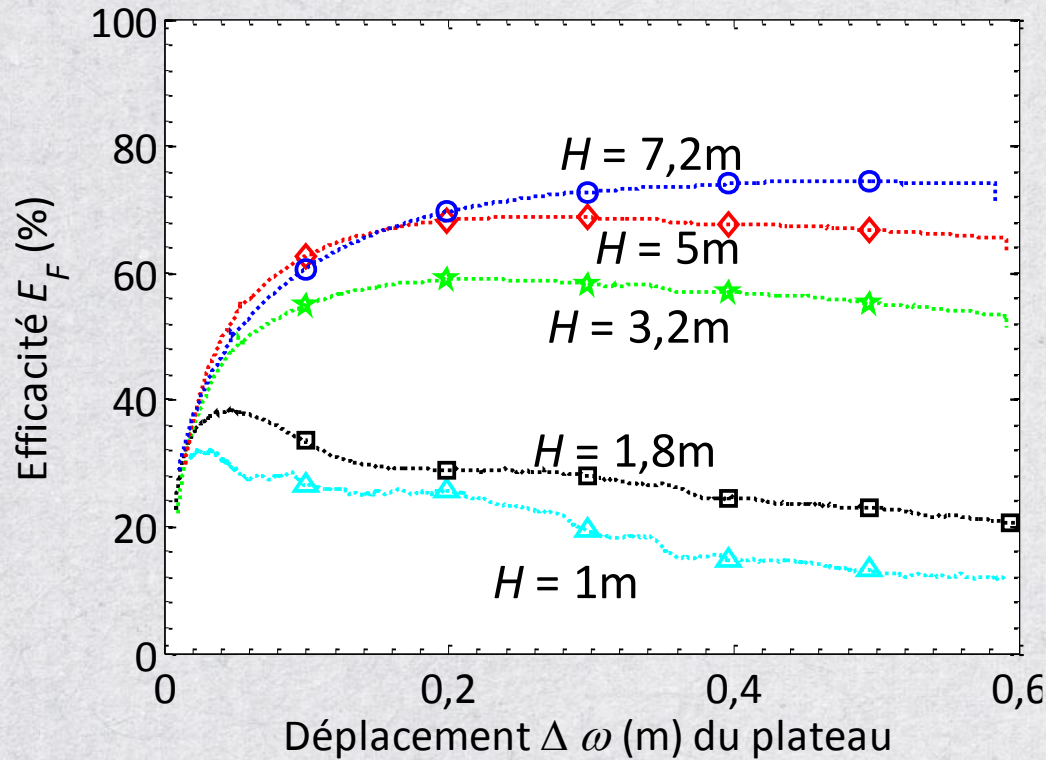
(4) Plateau

(5) Capteur de force

(6) Inclusion

REMBLAIS NON RENFORCÉS – EFFICACITÉ vs HAUTEUR

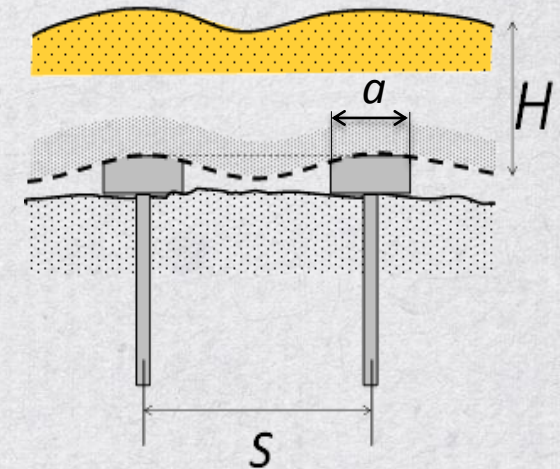
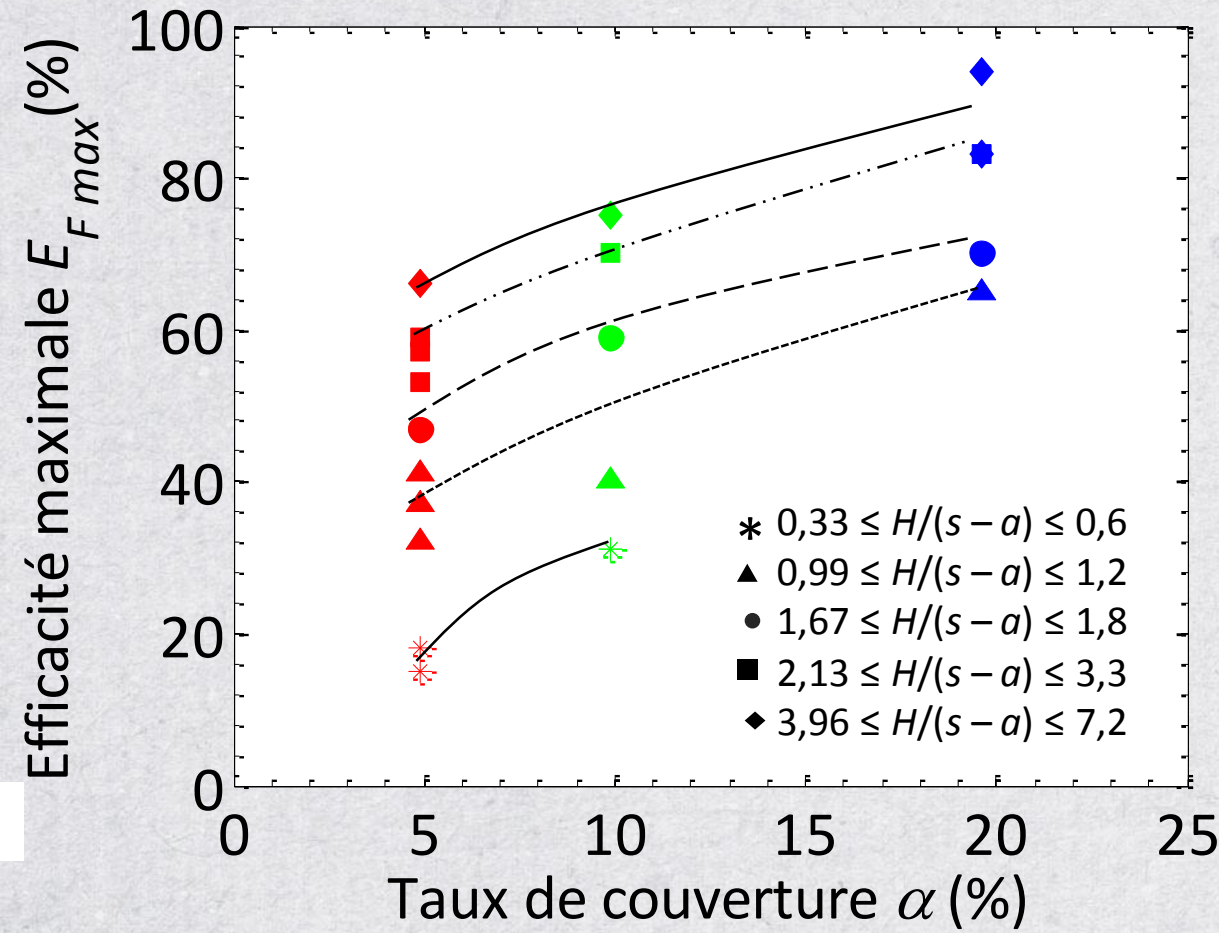
Cas: $\alpha = 9,88\%$ ($s = 2,82\text{ m}$; $a = 1\text{ m}$)



$$E = \frac{Q_p}{Q} = \frac{Q_p}{[q_{sc} + (\gamma \cdot H)] \cdot A}$$

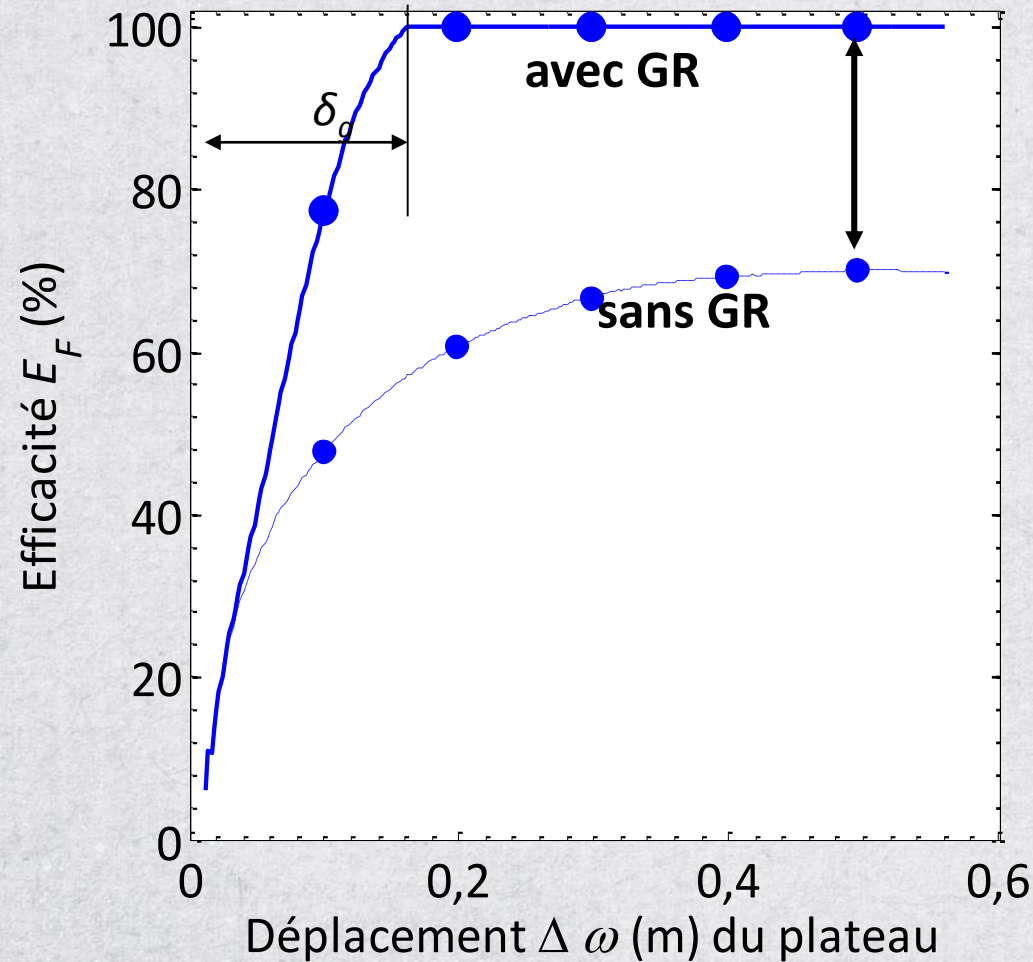
- Augmentation du transfert de charge lors du déplacement du plateau (jusqu'au pic)

REMBLAIS NON RENFORCÉS – EFFICACITÉ MAXIMALE

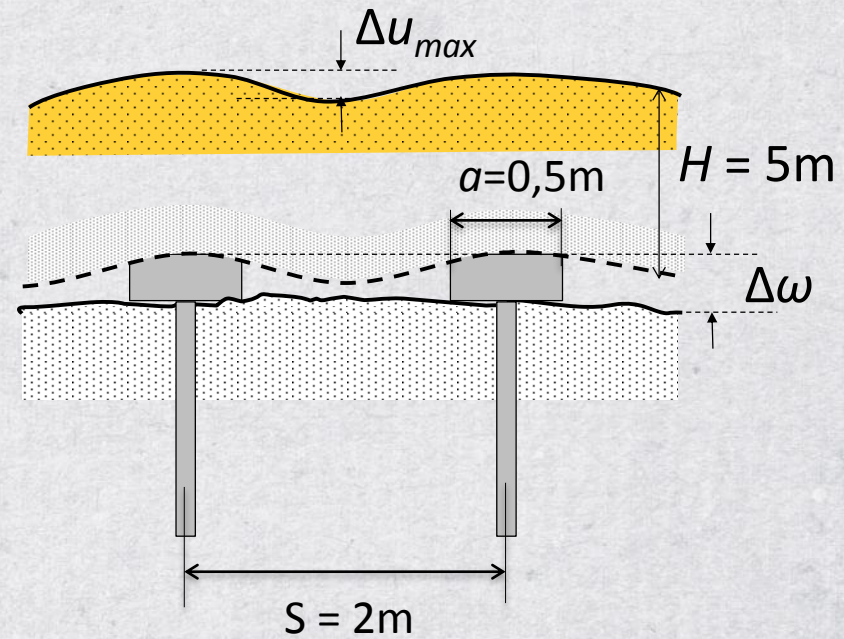


- Influence de l'épaisseur sur le transfert de charge maximum

INFLUENCE DU RENFORCEMENT GÉOSYNTHÉTIQUE

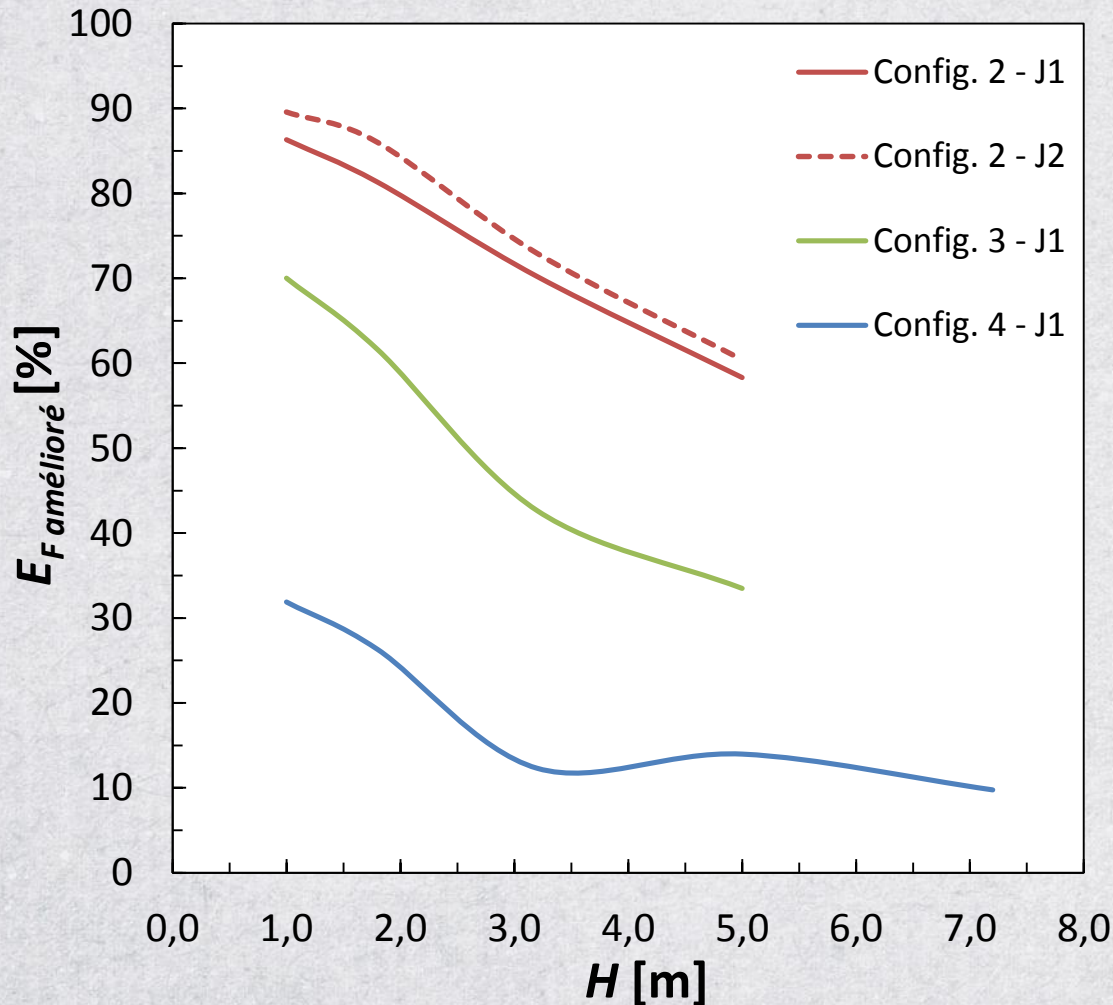


δ_g : Déplacement vertical du géosynthétique (n'étant plus au contact du plateau)



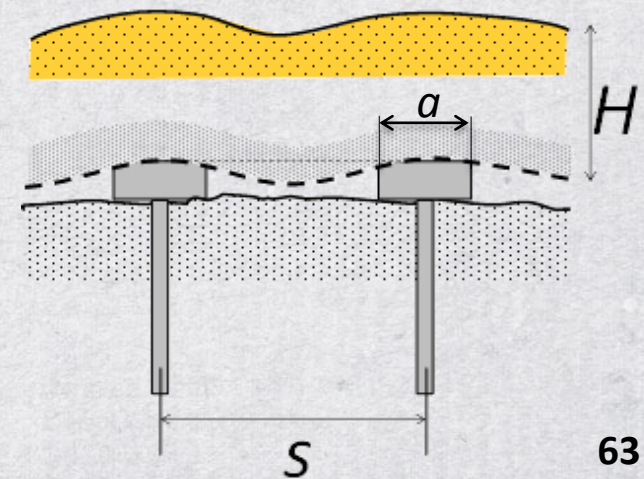
AMÉLIORATION DE L'EFFICACITÉ AVEC RENFORCEMENT

$$E_{F \text{ amélioré}} = E_{F_{\max}} \text{ (AVEC GR)} - E_{F_{\max}} \text{ (SANS GR)}$$

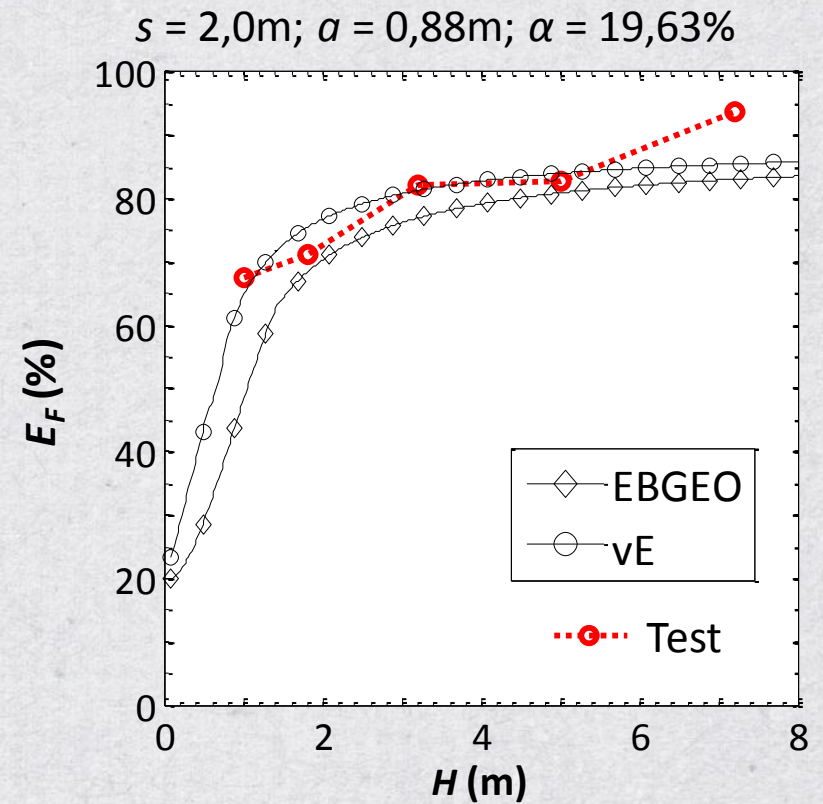
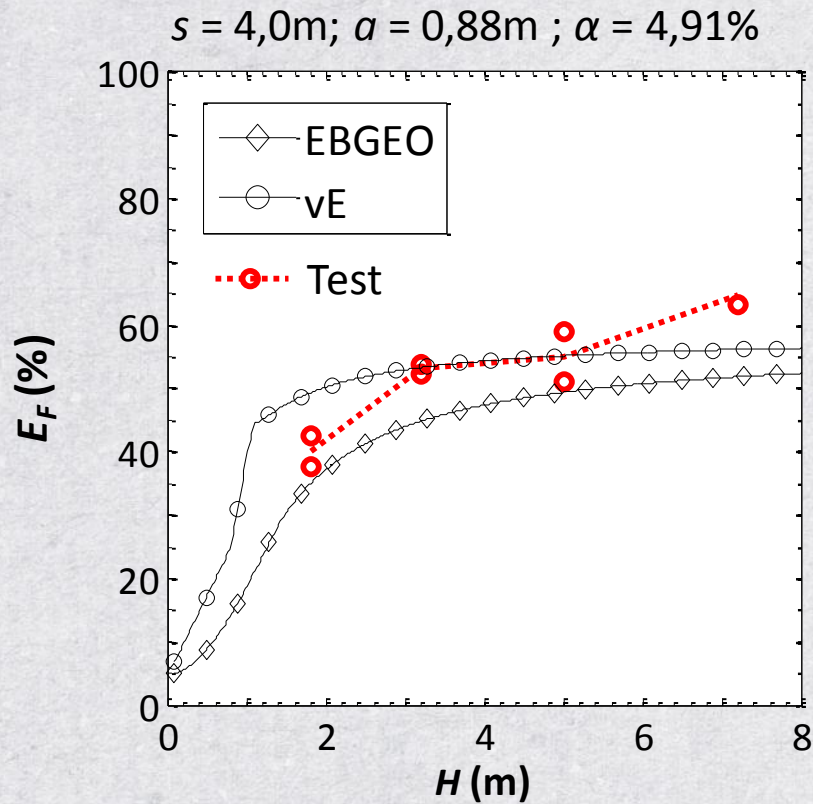


Config.	s (m)	a (m)	s-a (m)
2	4	1	3
3	2,82	1	1,82
4	2	1	1

$J_1 = 4 \text{ MN/m}$ and $J_2 = 16,8 \text{ MN/m}$



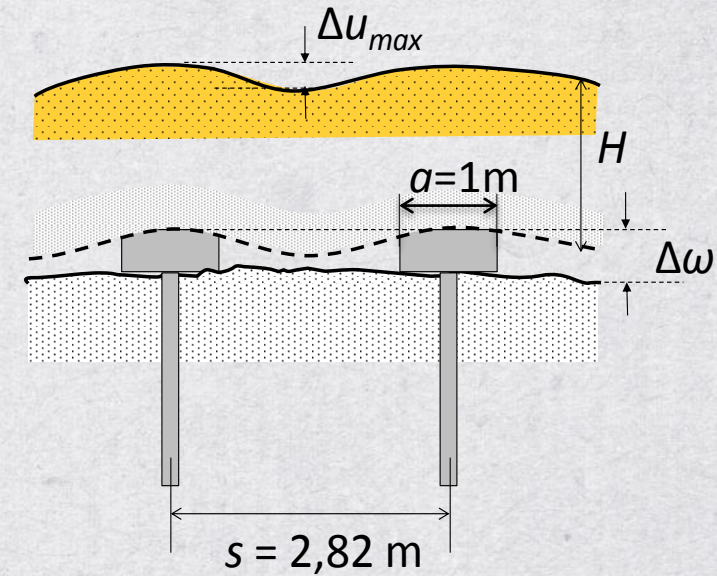
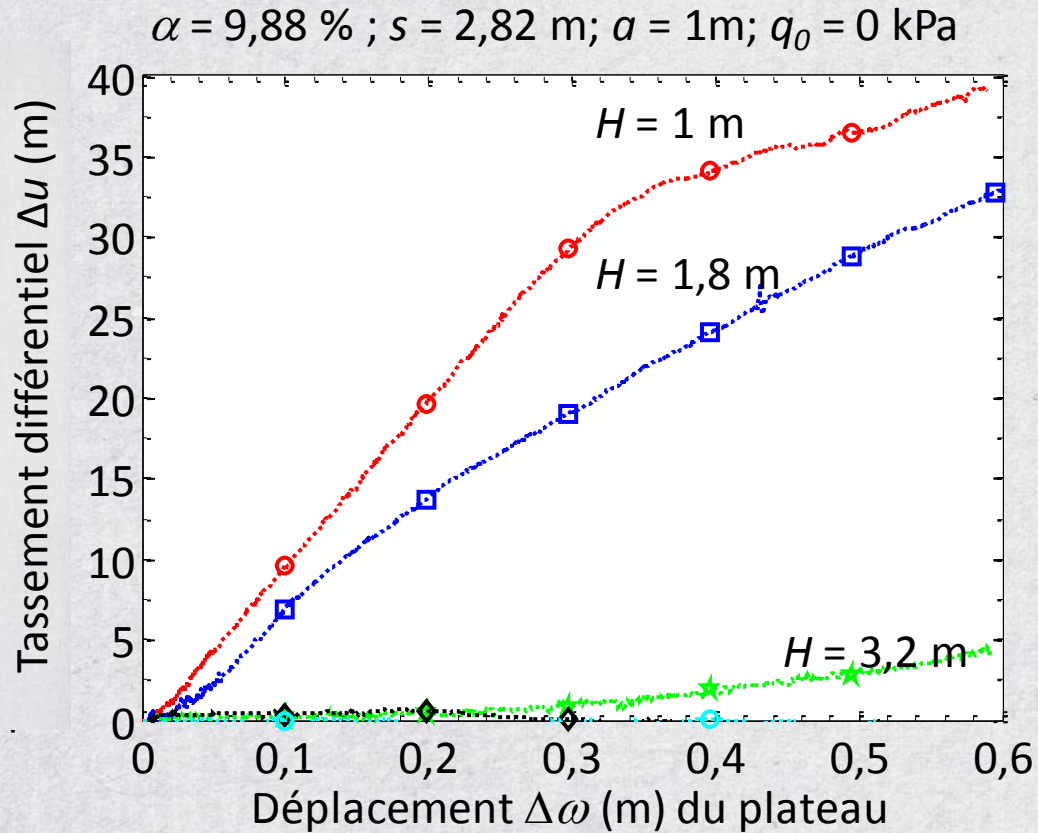
CALCULS ANALYTIQUES vs MODÉLISATION PHYSIQUE - SANS RENFORCEMENT



EBGEO: Norme basé sur les travaux de Zaeske (2001) proposant un transfert de charge par voûtes hémisphériques à surfaces non concentriques

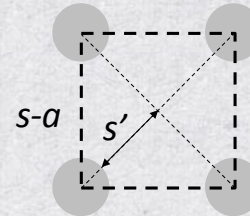
Van Eekelen (VE): Méthode de transfert tridimensionnelle par arches hémisphériques concentriques, distinguant une zone entre les inclusions d'une part, les bandelettes entre deux inclusions d'autre part.

TASSEMENTS DIFFÉRENTIELS – REMBLAIS NON RENFORCÉS

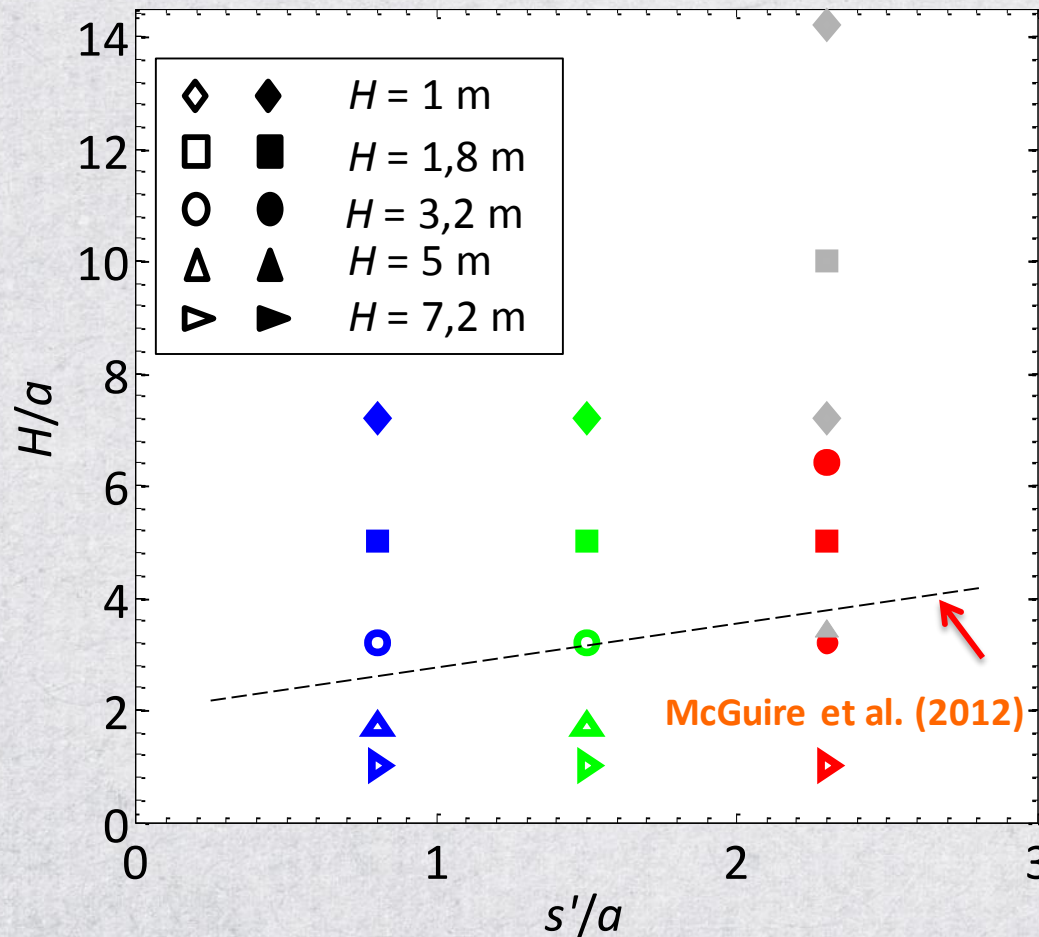


- Influence de l'épaisseur sur les tassements différentiels

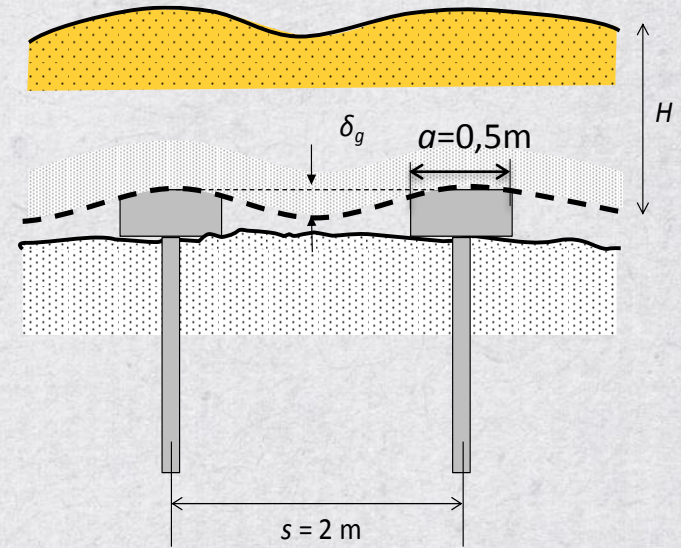
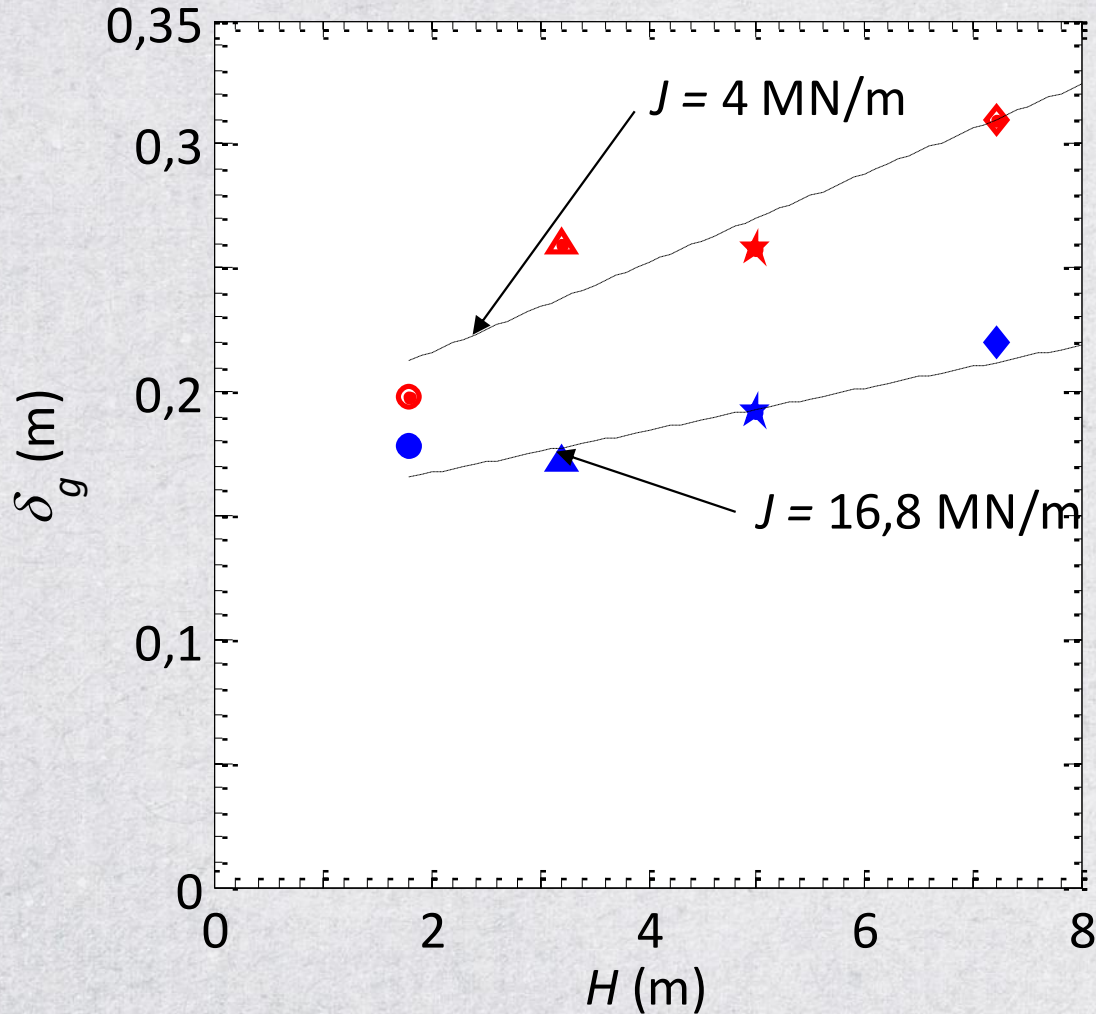
TASSEMENTS DIFFÉRENTIELS - REMBLAIS NON RENFORCÉS



Tass. diff.
 $\neq 0 \rightarrow 0$



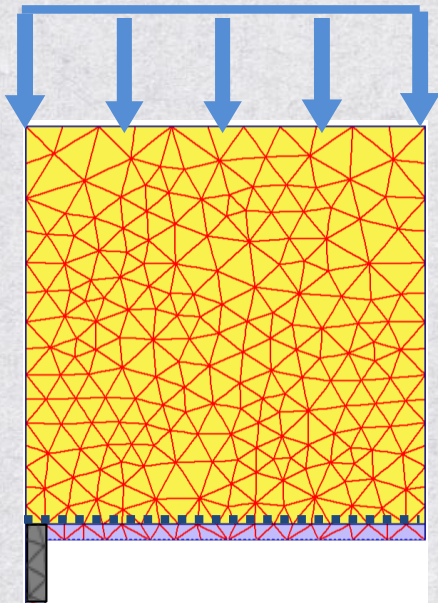
RAIDEUR vs DÉPLACEMENT DU RENFORCEMENT



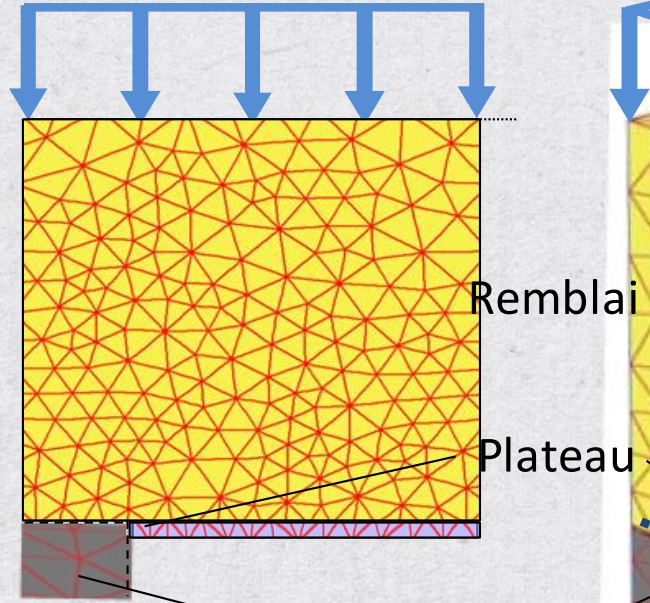
Le déplacement vertical du géosynthétique augmente lorsque la raideur du renforcement diminue.

MODÉLISATION NUMÉRIQUE (EF)

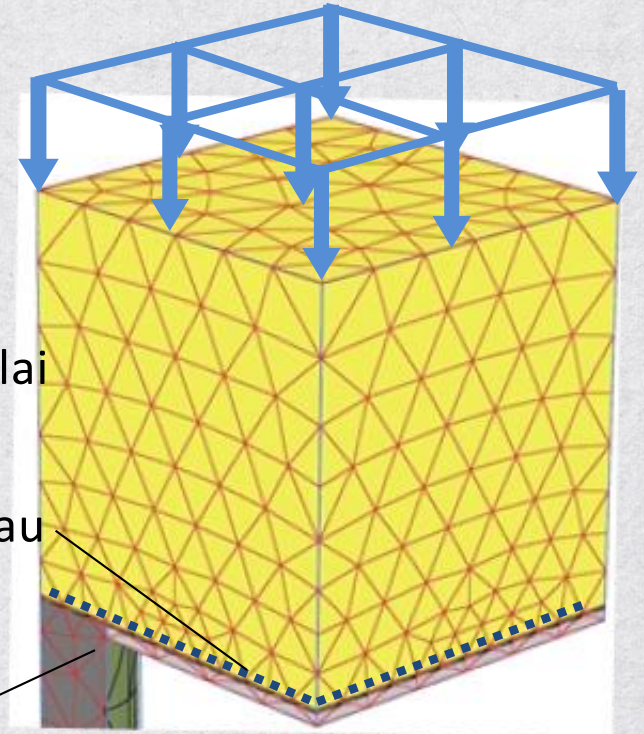
2D déformation plane



2D configuration axisymétrique



3D



Remblai

Plateau

Inclusion

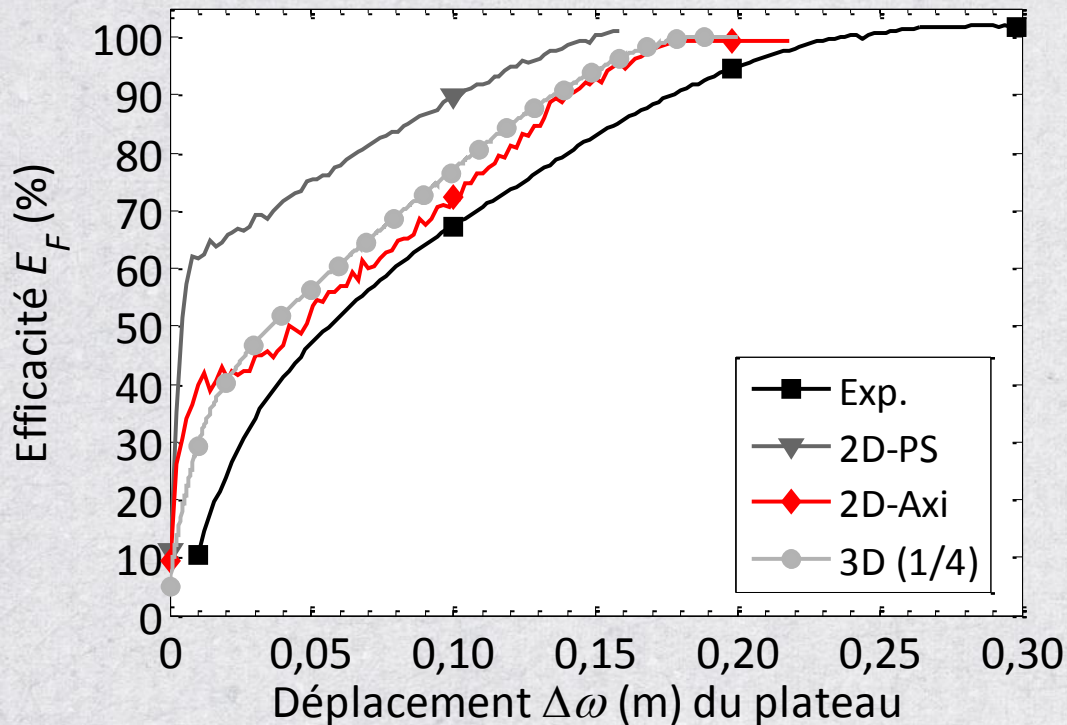
Plateau et Inclusion infiniment rigide

Géosynthétique élastique

Loi de comportement élasto-plastique avec écoulement pour le matelas

VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

$H = 1,0\text{m}; s = 2\text{m}; q = 80\text{kPa}$

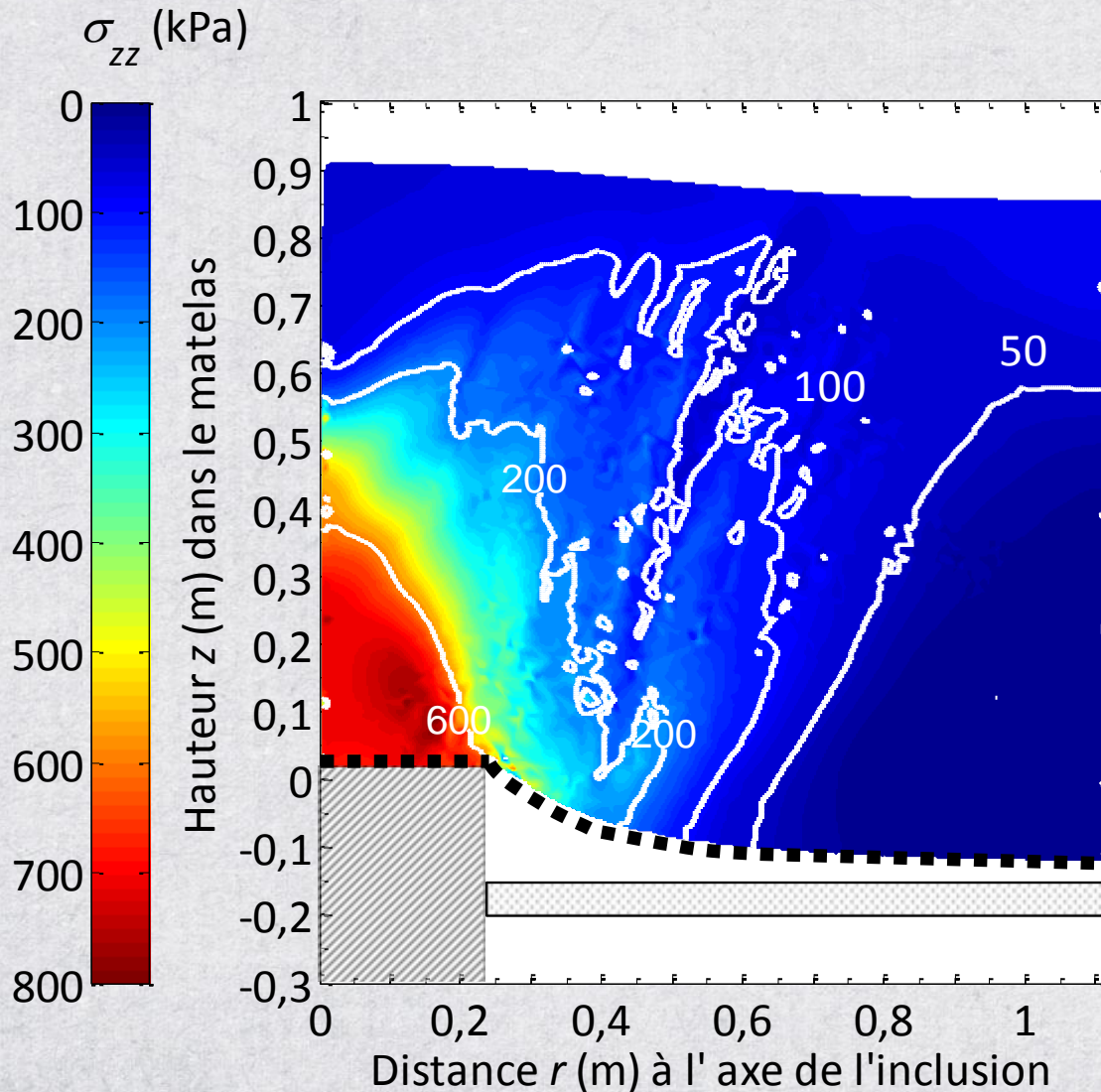


E_{50}	27 MPa
E_{oedo}	31,5 MPa
E_{ur}	160 MPa
c	0°
ϕ	43°
ψ	9°
J_a	4 MN/m

Peu de différence entre des modèles bi-dimensionnels en configurations axisymétriques et tri-dimensionnels **au centre du remblai**

CONTRAINTES VERTICALES

TASSEMENTS DU SOL COMPRESSIBLE IMPOSÉS



$$\sigma_{zz0} = 100 \text{ kPa}$$

$$q_0 = 80 \text{ kPa};$$

$$H = 1 \text{ m};$$

$$s = 2 \text{ m};$$

$$a = 0,5 \text{ m};$$

$$J_a = 4 \text{ MN/m}$$

CONCLUSIONS - REMBLAIS SUR INCLUSIONS RIGIDES

- Transfert de charge à la base du remblai
 - augmente avec l'épaisseur, le taux de couverture
 - diminution des tassements différentiels pour des épaisseurs élevées
 - mobilisation de l'effet membrane pour un remblai renforcé
- Répartition des contraintes verticales à la base du remblai
- Limite des méthodes analytiques basées sur la déformation d'une bandelette

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

- Mécanismes de transfert de charge:
 - effet voûte: hauteur minimum de remblai; taux de concentrations des contraintes mesurées in situ entre 2,3 et 3,5
 - effet membrane: le géosynthétique améliore le transfert de charge
 - support du sol au dessus du remblai: négligeables pour les sols très compressibles
- Dimensionnement analytiques
 - Existant pour la plupart des techniques , sous forme simplificatrice

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

- Colonnes ballastées (conventionnelles/confinées)
 - rôle de drainage radial
 - taux de couverture $12\% \leq \alpha \leq 23\%$
- Inclusions rigides
 - Effort importants repris en tête
 - Hauteur critique de tassement : 4 m
- Calculs numériques complémentaires
 - peuvent être utilisés pour des géométries et chargement particuliers
 - Prise en compte de l'effet d'installation par une augmentation du coefficient de pression des terres

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais remercier les étudiants, les doctorant(e)s et post doctorant(e)s, dont les travaux sont utilisés dans cette présentation.

Cette présentation a été réalisée avec le soutien de Dr. Romain Girout (Post-Doctorant au Brésil)

Je souhaite remercier le CFMS pour cette invitation à la conférence Coulomb, et notamment sa vice-présidente Valérie Bernhard pour le soutien logistique.

Je voudrais également remercier mes collègues et amis : DR Luc Thorel, Prof. Daniel Dias, McF Oriane Jenck, Dr Bruno Simon et McF Laurent Briançon.

Ainsi que les sociétés Keller, Huesker et le groupe Thyssen pour leurs soutiens dans la préparation de cette conférence.

Et aux agences de CNPq, CAPES, FAPERJ pour leur soutien à mes recherches pendant les 40 dernières années.

RÉFÉRENCES

- Colonne ballastées
 - Castro, J. e Karstunen, K. “Numerical simulations of stone column installation.” *Canadian Geotechnical Journal*. 2010; 47 (10):1127–1138.
 - Springman, S.M; Laue, J.; Askarinejad, A.; Gautray, J.N.F. On the Design of Ground Improvement for Embankments on Soft Ground. Proceedings of the International Conference on Ground Improvement & Ground Control:Transport Infrastructure Development and Natural Hazards Mitigation. IV. I, CGI - 2012.
 - Tan, S. A., Tjahyono, S. e Oo, K. K. (2008). “Simplified plane-strain modeling of stone-column reinforced ground.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134, No. 2, 185–194.
 - Weber, T.M., M. PLÖTZE, J. Laue, G. Peschke, et Springman, S. « Smear Zone Identification and Soil Properties around Stone Columns Constructed in-Flight in Centrifuge Model Tests ». *Géotechnique* 60, n° 3 (2010): 197-206.

RÉFÉRENCES

- Colonne ballastées confinées
 - Hosseinpour, I, Almeida, M.S.S., Riccio, M. (2015). Full-scale load test and finite element analysis of soft ground improved by geotextile-encased granular columns. *Geosynthetics International*, (In press).
 - Raithel, M., Henne, J, 2000, "Design and numerical calculation of a dam foundation with geotextile coated sand columns", *Proceeding of the 4th International Conference on Ground Improvement Geosystems*, pp.1-8.
 - Raithel, M., Kempfert, H.G., 2000, "Calculation models for dam foundations with geotextile coated sand columns", *Proceeding of GeoEngineering, Melbourne*, pp. 347.
- Remblais sur inclusions
 - Girout, R., Blanc, M., Dias, D. et Thorel, L. « Numerical analysis of a geosynthetic-reinforced piled load transfer platform – Validation on centrifuge test ». *Geotextiles and Geomembranes* 42, n° 5 (2014): 525-539.

RÉFÉRENCES

- Remblais sur inclusions
 - Hewlett, W.J, et M.A. Randolph. « Analysis of piled embankments ». *Ground Engineering* 21, n° 3 (avril 1988): 12-18.
 - Van Eekelen, S.J.M., A. Bezuijen, et A. F. van Tol. « An analytical model for arching in piled embankments ». *Geotextiles and Geomembranes* 39 (août 2013): 78-102.
 - Van Eekelen, S. J. M., A. Bezuijen, et A. F. van Tol. « Validation of analytical models for the design of basal reinforced piled embankments ». *Geotextiles and Geomembranes* 43, n° 1 (février 2015): 56-81.
 - Zaeske, D. « To see the effect of non-reinforced and proven mineral base courses over pale like Gründungselemnte. » *Geotechnical Engineering*, 2001
 - Zhuang, Y. & Ellis, E. (2014). Finite-element analysis of a piled embankment with reinforcement compared with BS 8006 predictions. *Geotechnique* 64, No. 11, 910–917



Merci de votre attention
almeida@coc.ufrj.br

QUESTIONS