

# MODELISATION PHYSIQUE EN GEOTECHNIQUE

Comportement d'une fondation superficielle sur sol renforcé  
par colonnes mixtes : étude expérimentale

# Plan de la présentation

- INTRODUCTION
- MODÉLISATION PHYSIQUE A ÉCHELLE RÉDUITE
  - Dispositif expérimental et modèles physiques, Instrumentation,
  - Types d'essais réalisés
  - Traitement des résultats expérimentaux
  - Résultats expérimentaux (chargement statique, dynamique, ...)
- CONCLUSIONS

# 1. Introduction

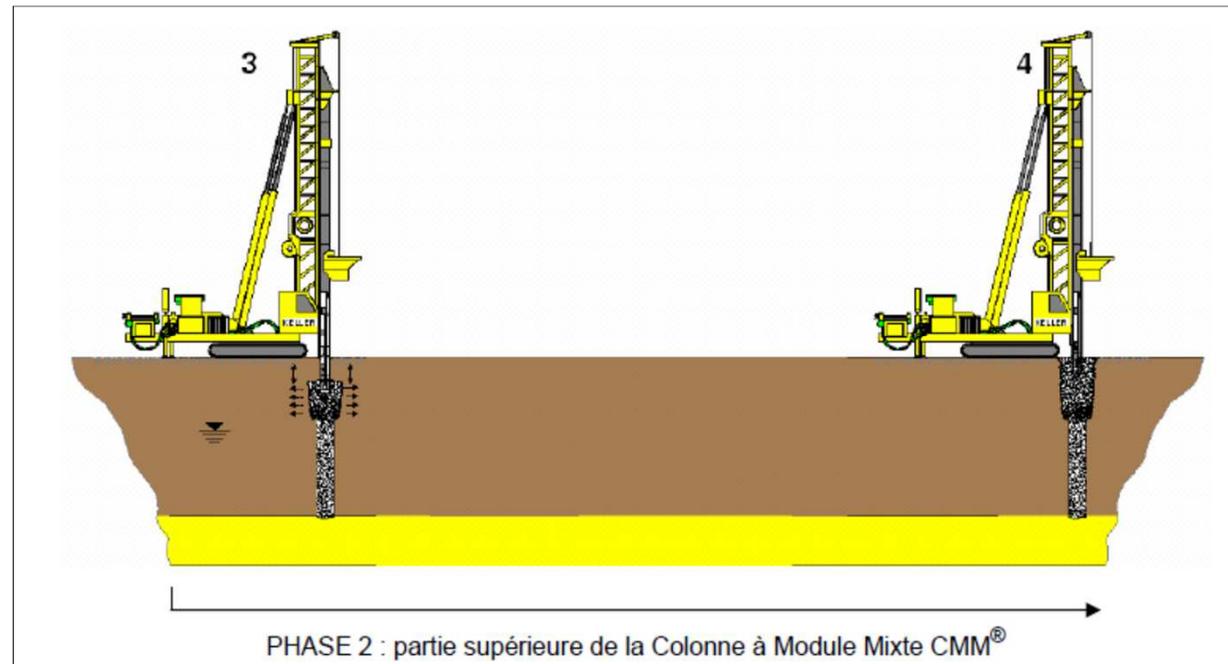
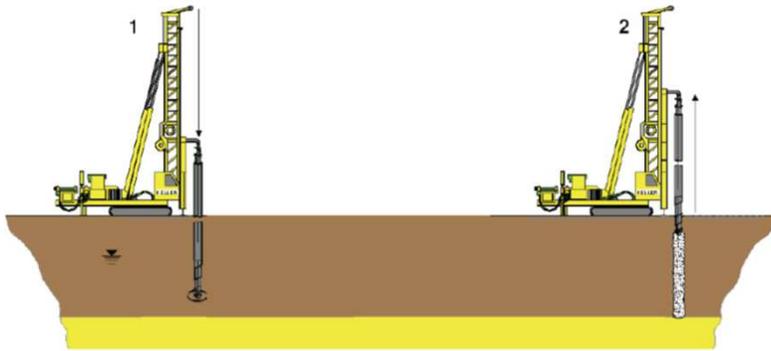
Thèse de . H. Santruckova (2012)

Thèse dirigée par: Pierre FORAY Laboratoire 3S Grenoble  
Co encadrée par Stéphane GRANGE et Philippe GOTTELAND

Contrat: BDI – Keller France, CNRS

# INTRODUCTION SEMELLES SUR SOL RENFORCE PAR CMM<sup>®</sup>

## La COLONNE MIXTE ou la Colonne à Module Mixte (CMM<sup>®</sup>)

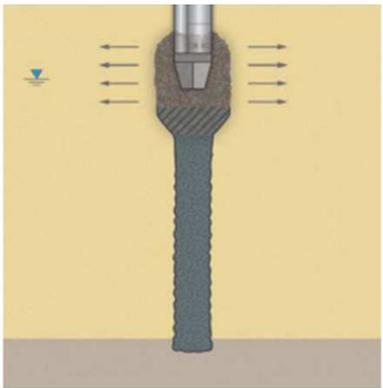


### Avantages des Colonnes Mixtes:

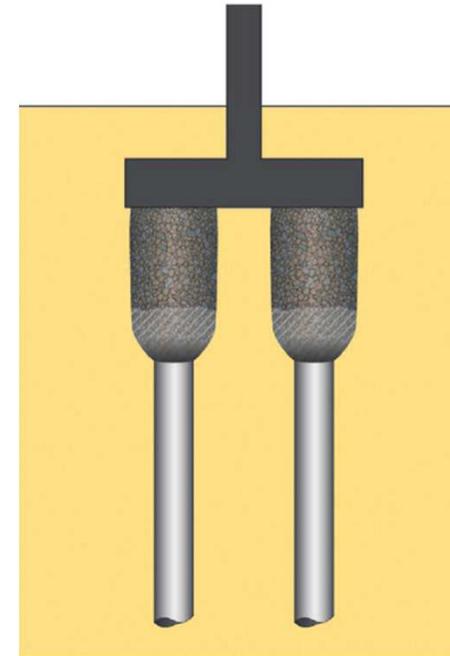
- Avantages des inclusions rigides et des colonnes ballastées sans les inconvénients
- Moins de sollicitations horizontales des inclusions rigides
- Evite de réaliser un matelas en zone sismique
- Pas de recépage
- Pas de points durs

# INTRODUCTION

## OBJECTIFS DE LA MODELISATION PHYSIQUE



- Analyser le comportement du sol renforcé par CMM® sous un chargement statique, mais surtout **cyclique** (très peu de travaux).
- Evaluer le rôle de la zone de transition:
  - Sollicitations sur la partie rigide
  - Dissipation de l'énergie du système (sous sollicitations sismiques)
- Définir l'influence de la hauteur de la tête en colonne ballastée dans la réduction des sollicitations de la partie inclusion rigide non armée

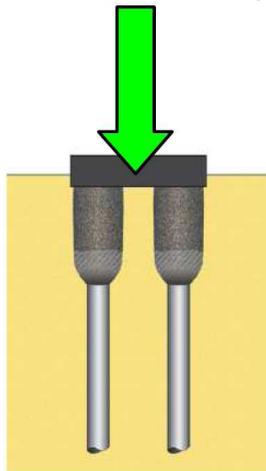


# INTRODUCTION

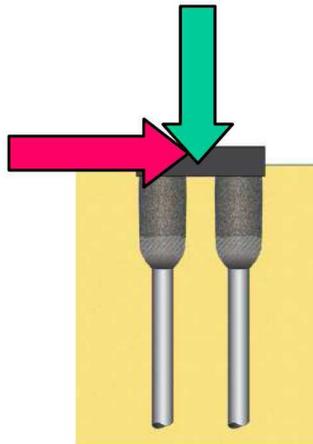
## Déroulement des simulations

### Déroulement des simulations

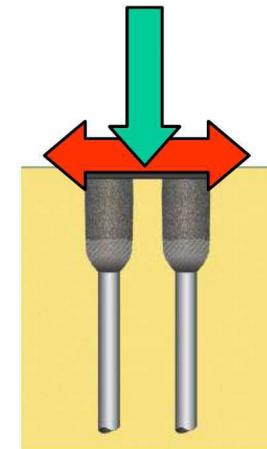
Modélisation en trois étapes



Chargement vertical pour déterminer la capacité portante de la fondation



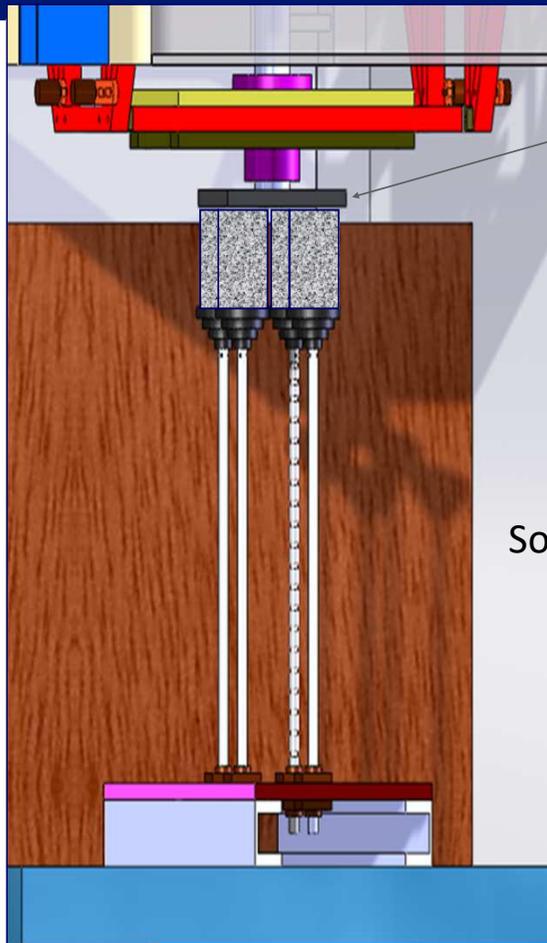
Chargement horizontal avec la charge verticale nominale pour déterminer le chargement horizontal maximal



Chargement horizontal dynamique cyclique avec la même charge verticale nominale

## 2. Modélisation physique à échelle réduite

# Modèles physiques à échelle réduite



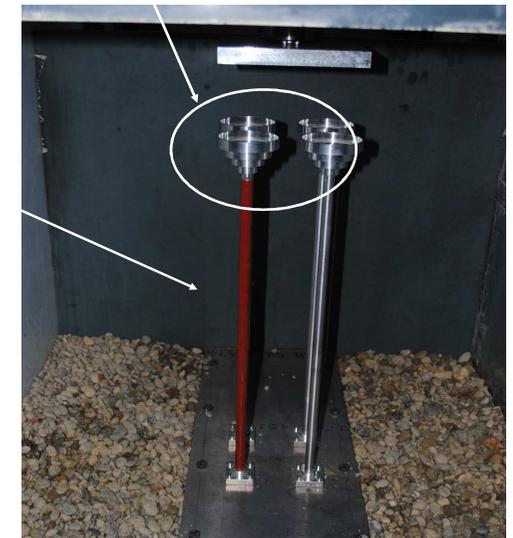
Semelle:  
24cm x 24cm x 2cm

Colonne ballastées h = 5 à 10 cm  
9 cm de diamètre (gravier)

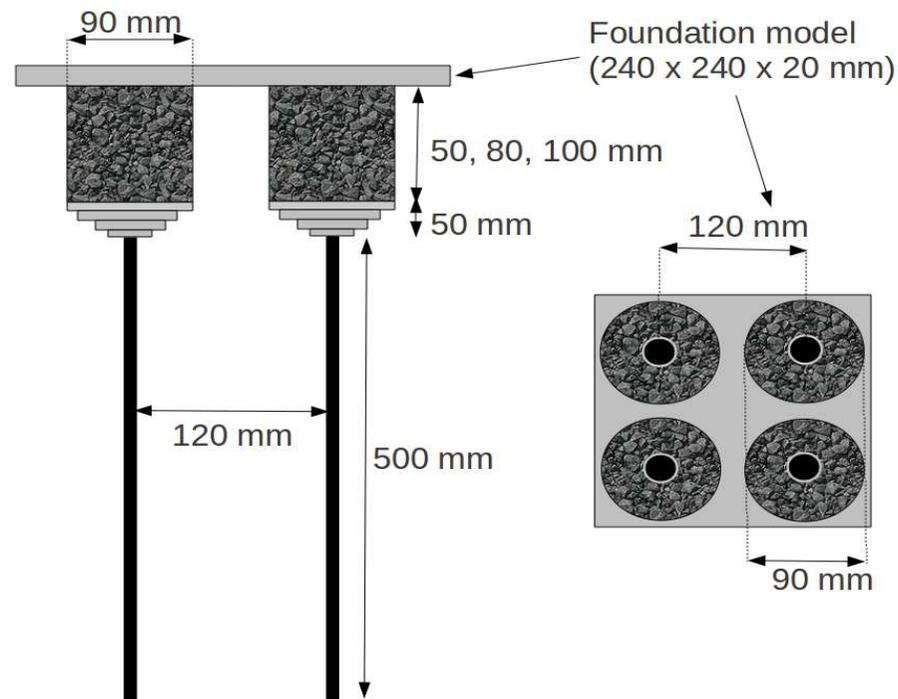
Zone de transition:  
Entonnoirs remplis de gravier;  
5 cm

Sol – Argile

Partie rigide:  
tube alu AU4G;  
 $\Phi_{int} = 8\text{mm}$ ;  
 $\Phi_{ext} = 16\text{mm}$ ;  
50 cm long



# Modèles physiques à échelle réduite

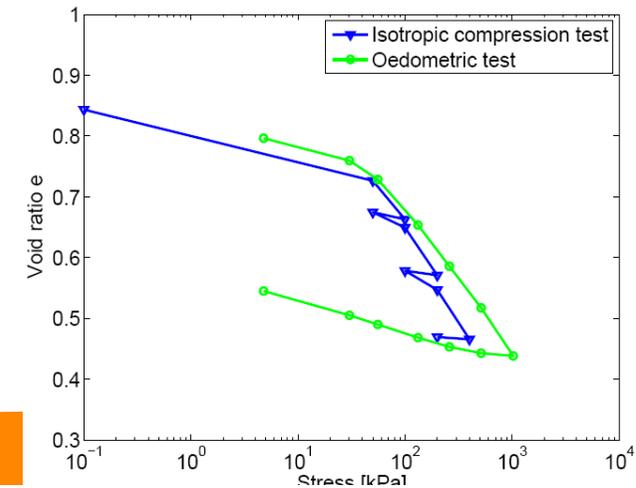


# Modèles physiques à échelle réduite

## Caractérisation du sol par des essais en laboratoire



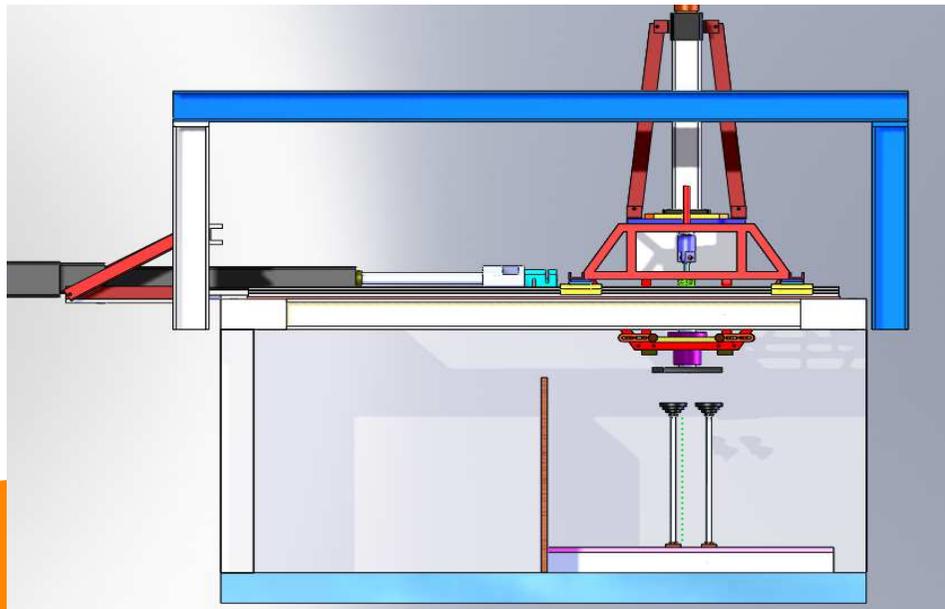
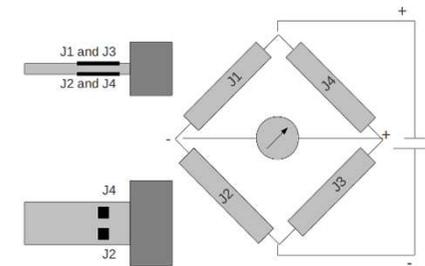
	Clay	Gravel
Peak friction angle	-	56°
Residual friction angle	-	37°
Cohesion	18 kPa	-
Water content	0.3	-
C <sub>c</sub>	0.27	-
C <sub>s</sub>	0.06	-
$\lambda$	0.12	-
$\kappa$	0.03	-
p <sub>c</sub>	50 kPa	-
G at 0 confining pressure	12 MPa	-
G at 50 kPa confining pressure	21 MPa	-
G at 100 kPa confining pressure	42 MPa	-
Young's modulus	0.5 MPa	-



# Modèles physiques à échelle réduite

## Instrumentation capteurs utilisés

- Force et déplacement au niveau de la fondation - capteur de force H, V
- Déformation du pieu - jauges de déformation (20 niveaux; déformation en flexion)



# Modèles physiques à échelle réduite

**Procédure de mise en place de l'argile:**



# Modèles physiques à échelle réduite

## Procédure de mise en place de la tête en gravier

LTC:

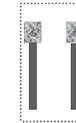
Gabarit en PVC

Carottier avec diamètre 75 mm

Compactage en retirant le carottier

Diamètre final de 90mm

Masse volumique finale 1.7-2 g/cm<sup>3</sup>



# Modèles physiques à échelle réduite

## Types d'essais réalisés

### Différentes configurations de charges:

- V statique +  $H=0$ ,
- V + H statique (Swipe test)
- V statique + H cyclique/dynamique

### Analyse de:

- Tassement du sol
- Comportement latéral de la partie rigide
- Dissipation d'énergie

# Modèles physiques à échelle réduite

## Types d'essais réalisés

Procédure d'essai:

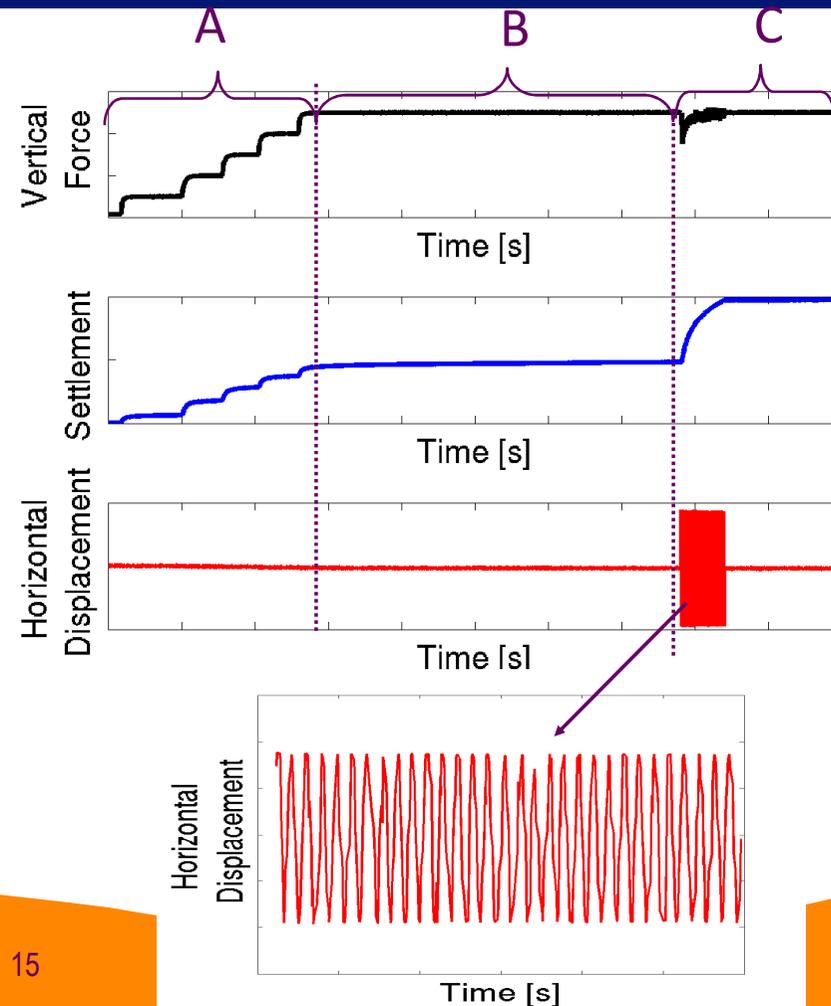
**A. Chargement vertical**  
*par paliers jusqu'à 5000N*

**B. Consolidation**

**C. Chargement horizontal** ( $A=2\text{mm}$ ;  $f = 2.7\text{Hz}$ , 30 cycles) en déplacement contrôlé

21 essais avec une étude paramétrique –  
hauteur de CB:

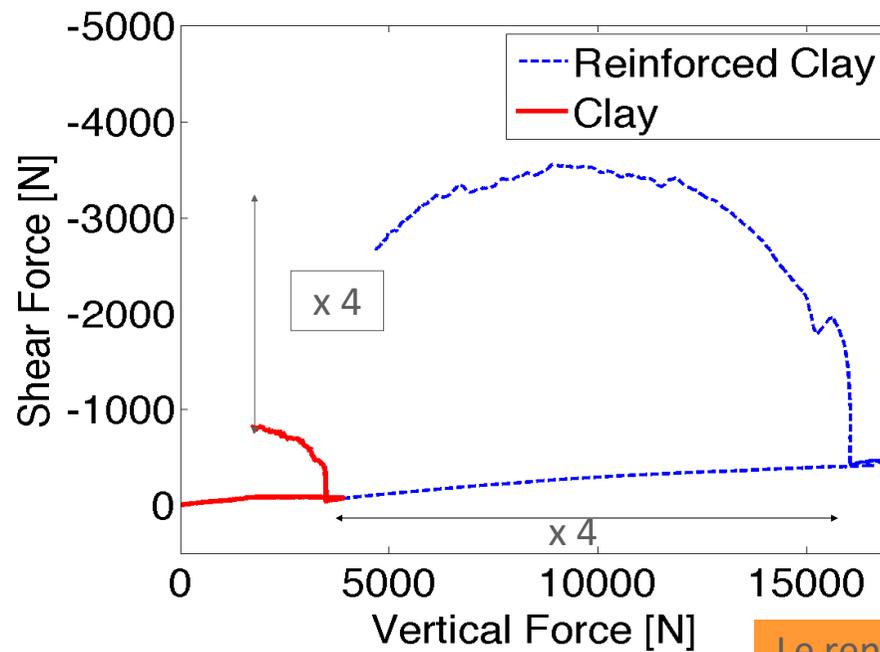
- 10 cm
- 8 cm
- 5 cm



### **3. Modélisation physique à échelle réduite: Résultats expérimentaux**

# Résultats expérimentaux

## Chargement vertical et horizontal statique (Swipe Test)



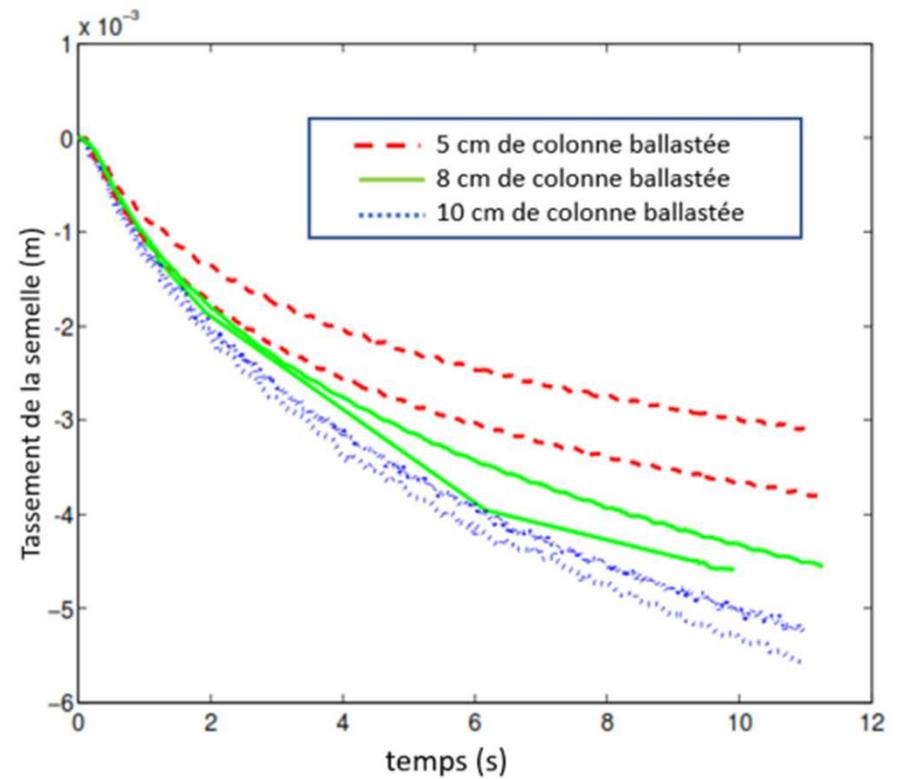
L'essai de type « Swipe test » permet de déterminer la surface de rupture dans le plan V-H

Le renforcement par Colonnes Mixtes sous semelle a augmenté la portance dans un rapport de 4 !

# Résultats expérimentaux

## Tassement sous chargement de 5 000 kN (1/3 de la charge de rupture)

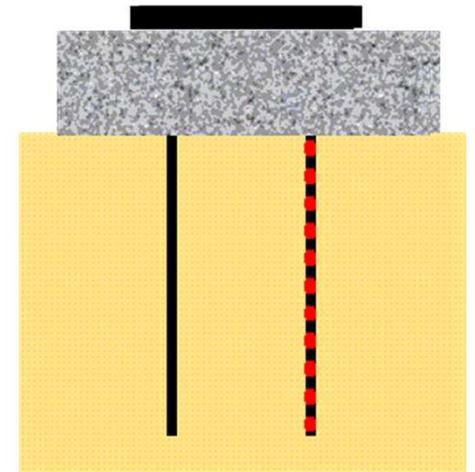
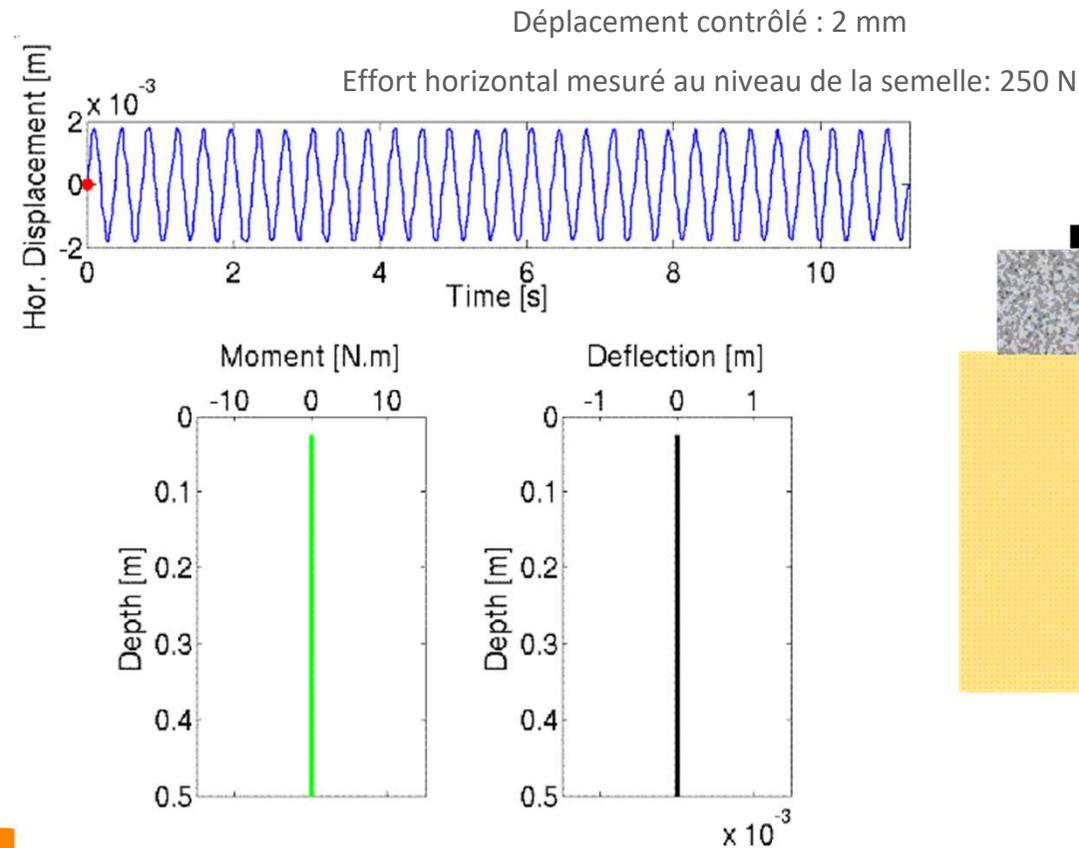
Les tassements de la semelle augmentent avec la hauteur de la colonne ballastée



# Modélisation physique en échelle réduite: Résultats expérimentaux

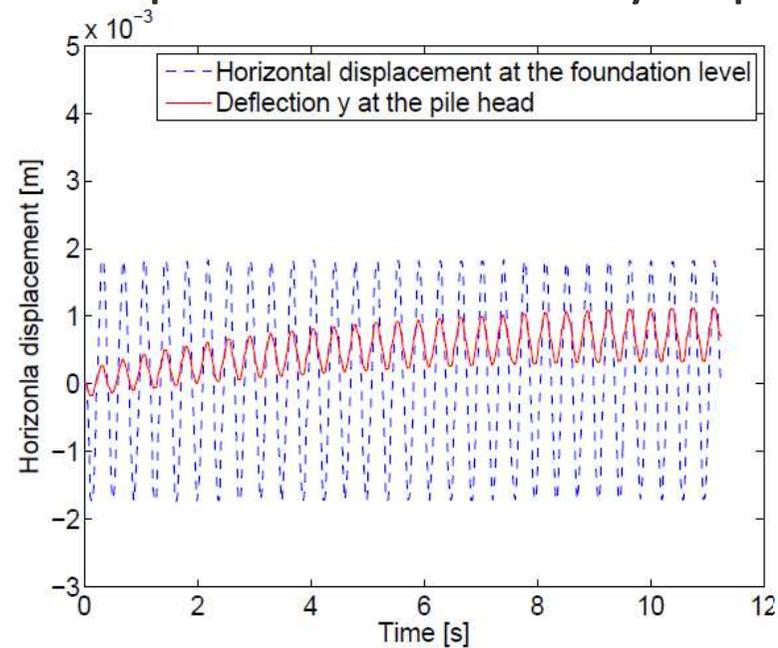
## Chargement horizontal cyclique

Le déplacement réversible au début du chargement horizontal puis montre une accumulation des déplacements vers l'extérieur de la semelle mais avec une tendance à la stabilisation

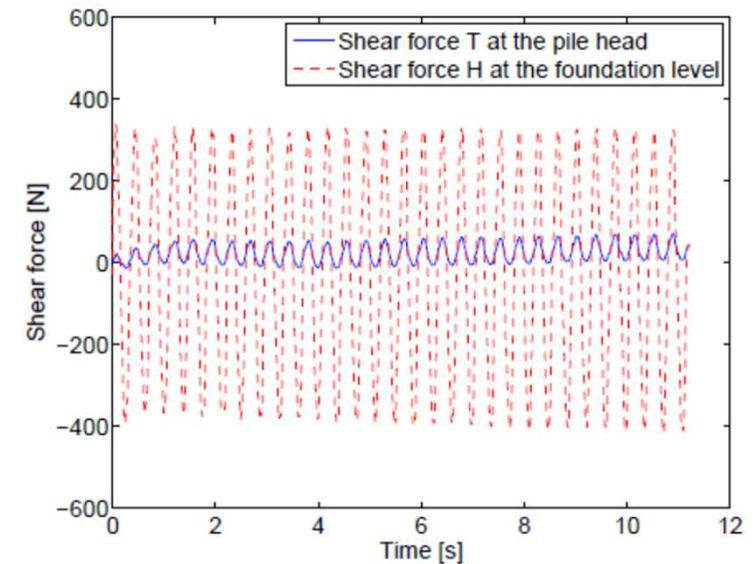


# Résultats expérimentaux

## Chargement vertical statique et horizontal cyclique



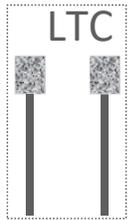
Déplacement horizontal  
semelle/tête IR



Effort tranchant semelle/tête  
IR

# Résultats expérimentaux

## Chargement vertical statique et horizontal cyclique sous 250 kN



Premier cycle

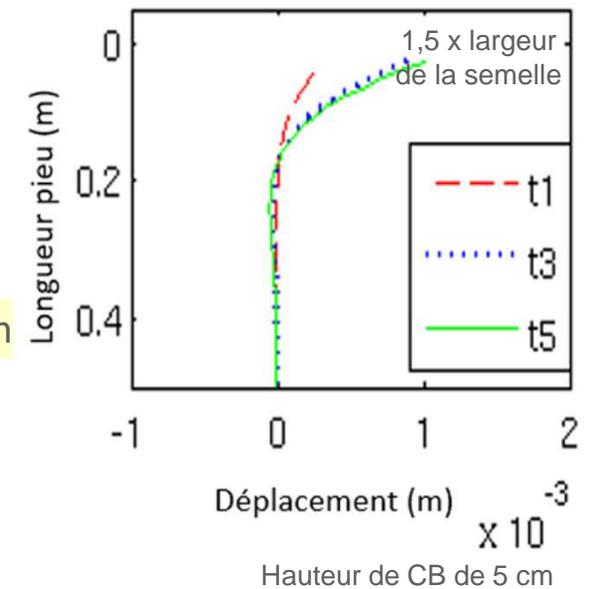
CMM	
y(z) en tête (mm)	Effort tranchant V maxi (N)
0,1 à 0,3	10 à 20

Divisé par 10 environ

Divisé par 3 à 5 environ

Déplacement de la semelle : 2 mm

H semelle 250 kN/4  
= 62,5 kN

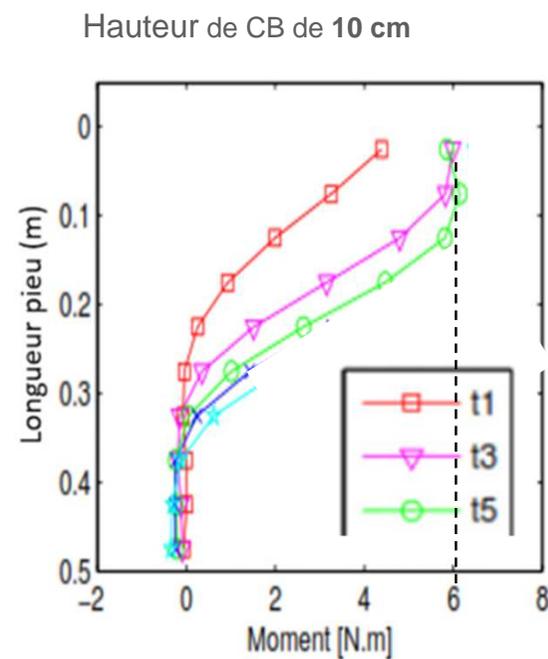
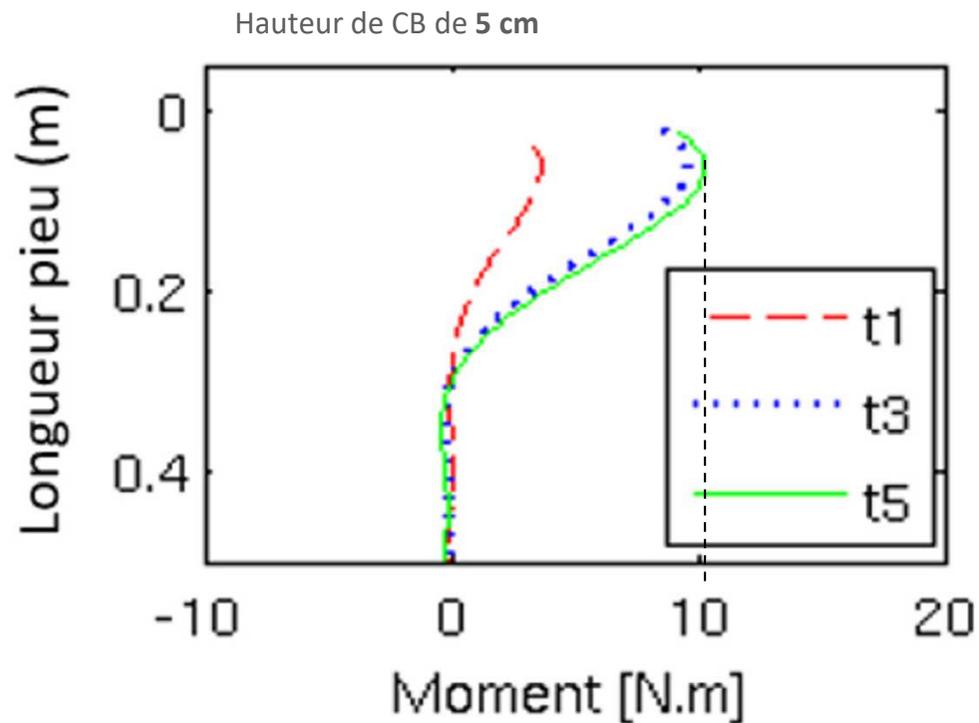


- Réduction importante des sollicitations latérale dans la partie rigide de la Colonne Mixte
- Déplacement augmente avec le nombre de cycle mais avec une stabilisation au 5/6 eme cycle
- Les sollicitations horizontale apparaissent sur environ 1,5 fois la largeur de la semelle

# Résultats expérimentaux

Résultats expérimentaux

## Chargement vertical statique et horizontal dynamique

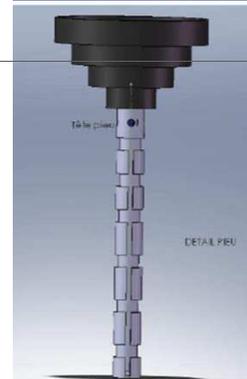
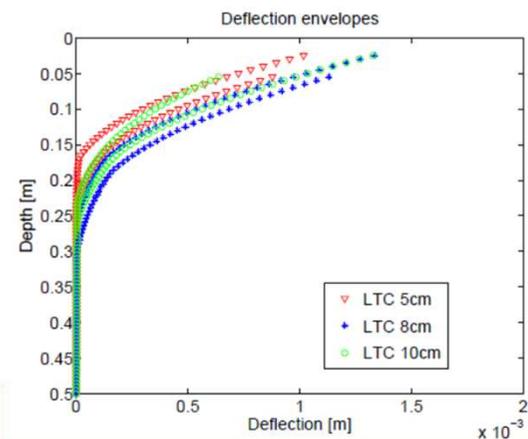
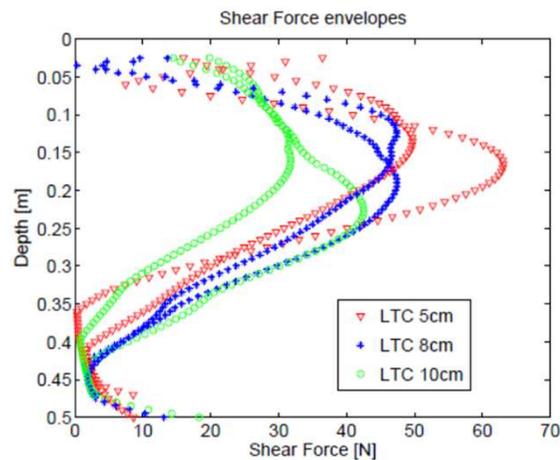
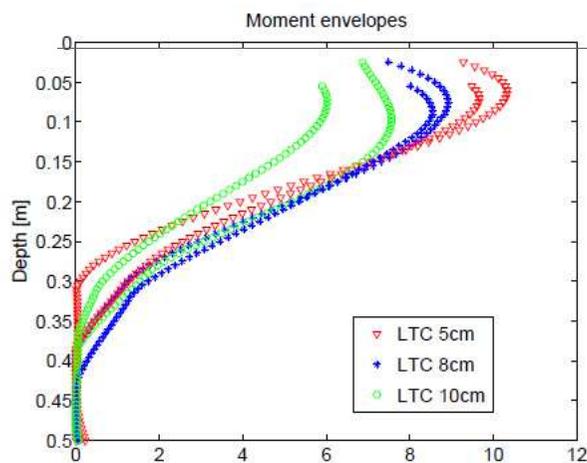


Réduction des moments de flexion de l'ordre de 40 % entre une colonne ballastée de 5 cm et de 10 cm

# Résultats expérimentaux

Chargement vertical  
statique et  
horizontal cyclique

30 cycles



Moment multiplié par 2  
/ premier cycle

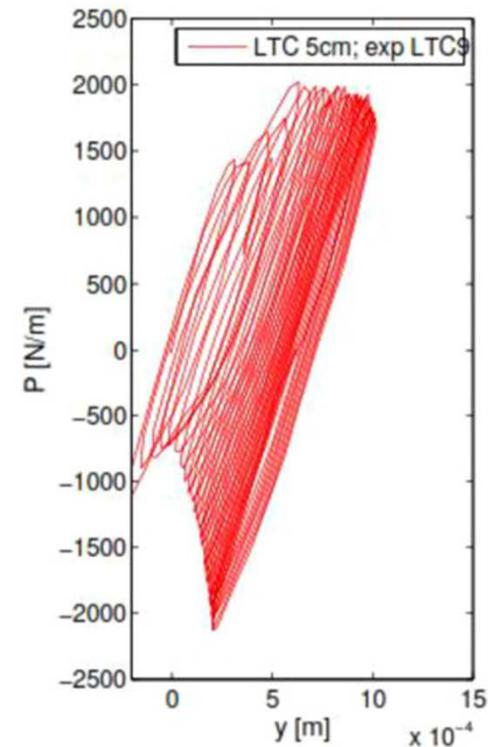
Déplacement horizontal  
x (2 à 5) / premier cycle

# Résultats expérimentaux

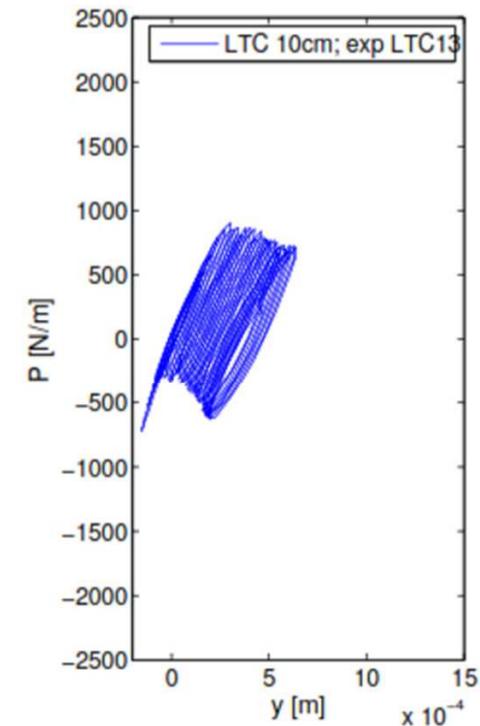
## Chargement vertical et horizontal cyclique Courbes P-y

Y = déplacement horizontal de la tête de l'inclusion rigide  
P = réaction linéique latéral du sol

Une hauteur de CB de 10 cm permet de réduire les sollicitations dans les inclusions dans un rapport de 2 environ par rapport à une CB de 5 cm



Colonne ballastée de 5 cm

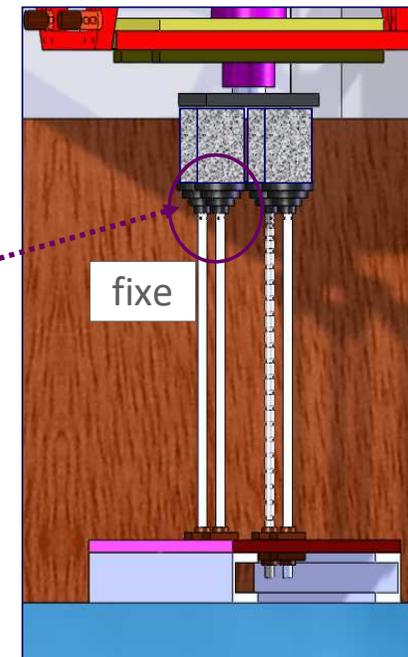
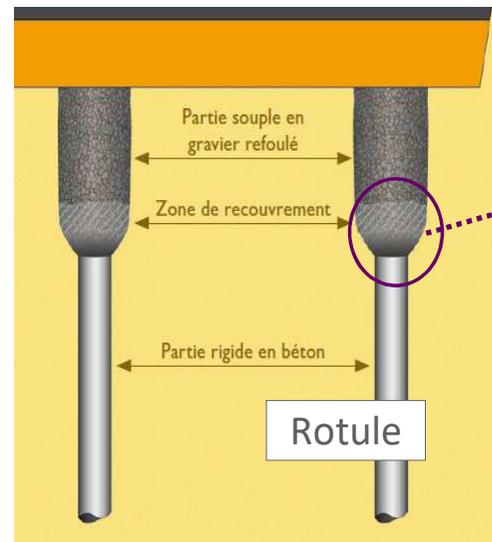


Colonne ballastée de 10 cm

# 4. Conclusions

## Limitation de ce modèle physique

- Les conditions de similitude rigoureuses ne sont pas respectées au niveau des contraintes pour les modèles réduits soumis à une gravité normale
- Difficulté à simuler la zone de transition avec des entonnoirs



Néanmoins ce modèle a permis de visualiser et de quantifier l'interaction entre la semelle et les CMM

# Conclusions

- La modélisation physique en modèle réduit a permis d'instrumenter les inclusions rigides de la CMM ce qui n'était pas possible de manière In situ,
- D'étudier le comportement du renforcement de sol par les Colonnes à Module Mixte sous sollicitations statiques et cycliques,
- de quantifier les sollicitations sur la partie rigide en fonction de la hauteur de la tête en colonne ballastée,
- Toutes ces mesures ont ensuite permis de calibrer des modèles de calcul numérique et analytique.

**Merci pour votre attention**