



Analyse multi-échelle du risque sismique d'une structure reposant sur un complexe de sol amélioré



Thèse - Hana Santruckova

Stage M2 MEMS - Alberto Cofone

Encadrement: P. Foray, P. Gotteland, S. Grange

Introduction: les complexes de sol amélioré, pourquoi?

- Augmentation démographique dans les zones à fort aléa sismique.
- Industrie de la construction confrontée à la raréfaction des terrains présentant de bonnes caractéristiques

→ construire dans des zones de terrains fortement compressibles, qui sont par nature plus sujettes aux risques sismiques (ex: bassin Grenoblois).

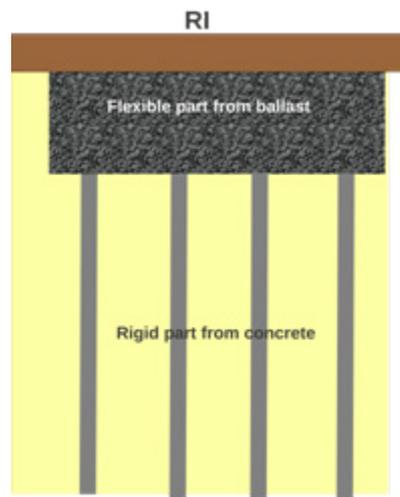


Introduction: les complexes de sol amélioré

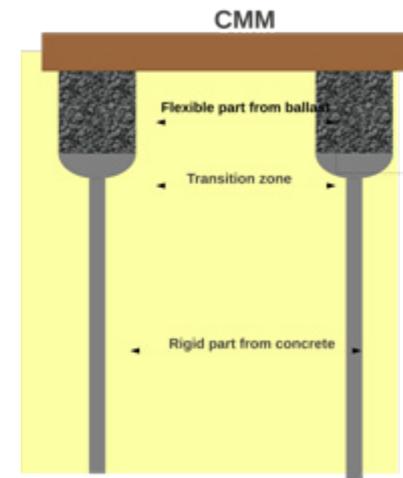
- Les techniques d'amélioration des sols compressibles sont en plein développement:
le renforcement par inclusions rigides associant deux éléments de rigidité différentes :
 - des pieux, micro pieux en partie basse,
 - associés en partie haute en interaction avec la structure, à une zone de transfert de charge répartie (matelas) ou localisée (colonnes) autour des inclusions (technique de la colonne à module mixte – CMM introduite par KELLER Fondations Spéciales).

Une zone de transition relie les deux parties (Bustamante et al., 2006). De nombreuses études ont été entreprises en statique afin de montrer les apports de ces techniques sur les capacités portantes des sols améliorés.

Mais les comportements de ces interactions sol-structure sous chargement **dynamiques et sismiques**, tout particulièrement **latéraux** sont encore mal connus compte tenu de la complexité des interactions entre les différents éléments en présence.



Technique de matelas et inclusions rigides



Technique de colonne à module mixte - Keller

Introduction: état de l'art

De nombreuses études ont été menées sur:

- Les pieux (toutes sollicitations) (Chenaf, 2006 ; Georgiadis et al., 1992 ; Li & Byrne, 1992 ; Remaud, 1999 ; Rosquoët et al., 2007).
- Les complexes de sol amélioré (sollicitation verticale) (Villard et al., 2008) (Le Hello et al., 2007)



Plan de la présentation

- Introduction
- Dispositif Expérimental et modèle physique
- Procédure de mise en place de l'argile, colonne ballasté CB, matelas
- Types d'essais réalisés
- Traitement des résultats expérimentaux
- Résultats en terme d'énergie dissipée dans le dispositif
- Conclusions et perspectives



Dispositif Expérimental - VisuCuve



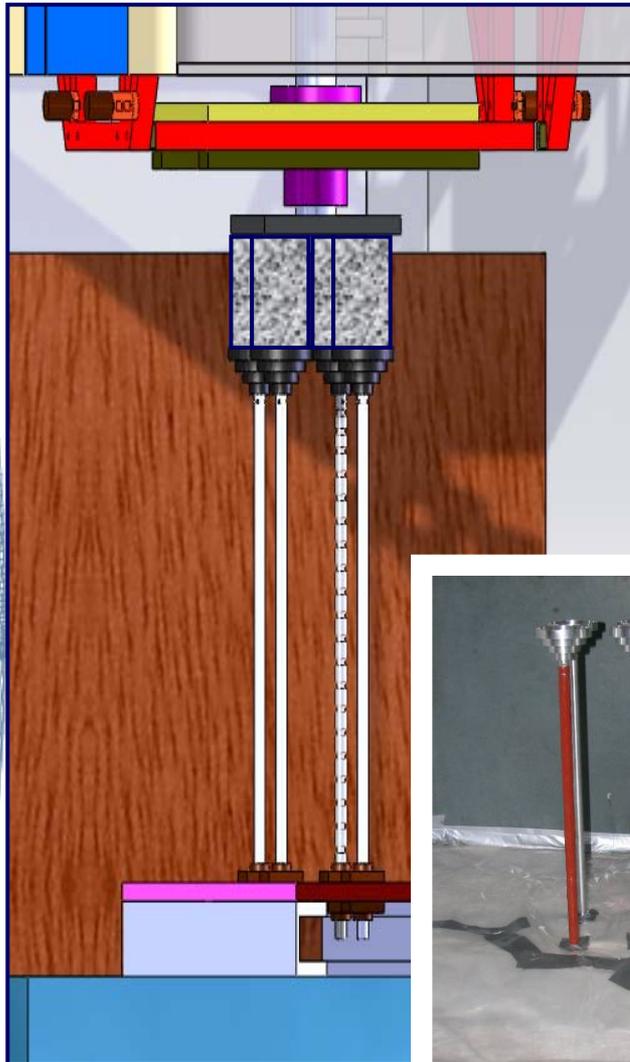
- **vérin horizontal dynamique**
- **système de chargement vertical**

Cuve de 2m x 1m x 1m

Fondation carrée 0.4m de large

Modèle physique 1/10, attention les lois de similitudes ne sont pas respectées compte tenu du fait que la gravité n'est pas multipliée par 10.

Modèle physique 1/10



- Partie rigide – tube alu AU4G

$$\Phi_{\text{int}} = 8\text{mm}$$

$$\Phi_{\text{ext}} = 16\text{mm}$$

- Partie souple – colonnes ballastées

$$\text{HCB} = 50\text{-}80\text{mm}$$

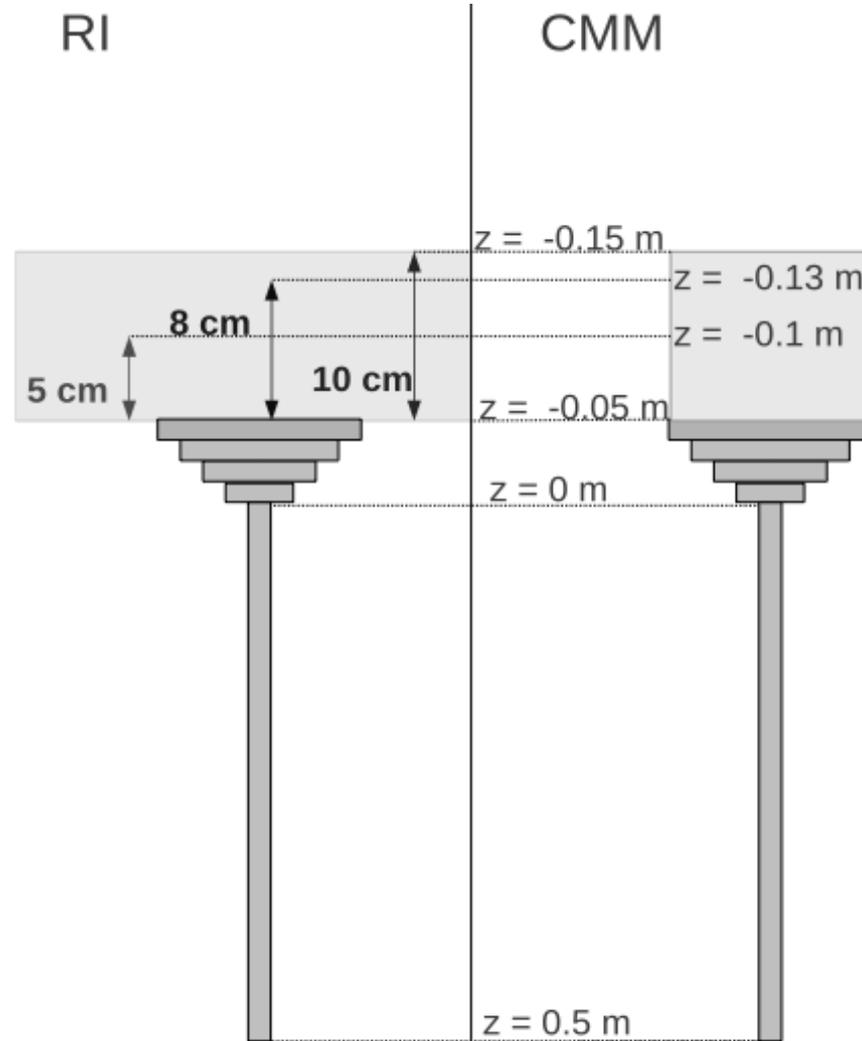
- Zone de transition – entonnoirs remplis par gravier

- Sol – Argile - $c_u = 18\text{kPa}$, $w = 30\%$

- Gravier – $\Phi = 57^\circ$ en pic, $\Phi = 36^\circ$ en palier, densité 2000kg/m^3

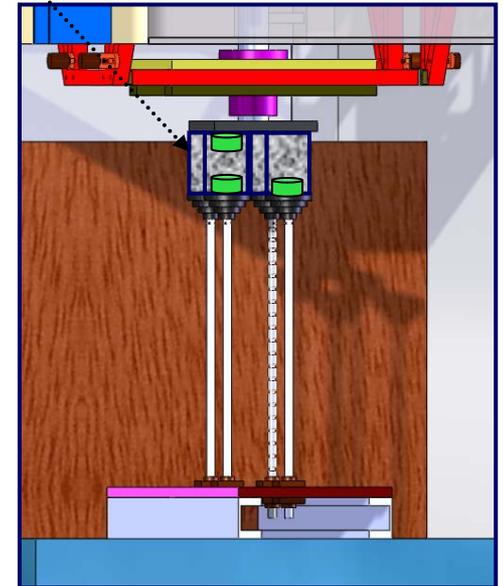
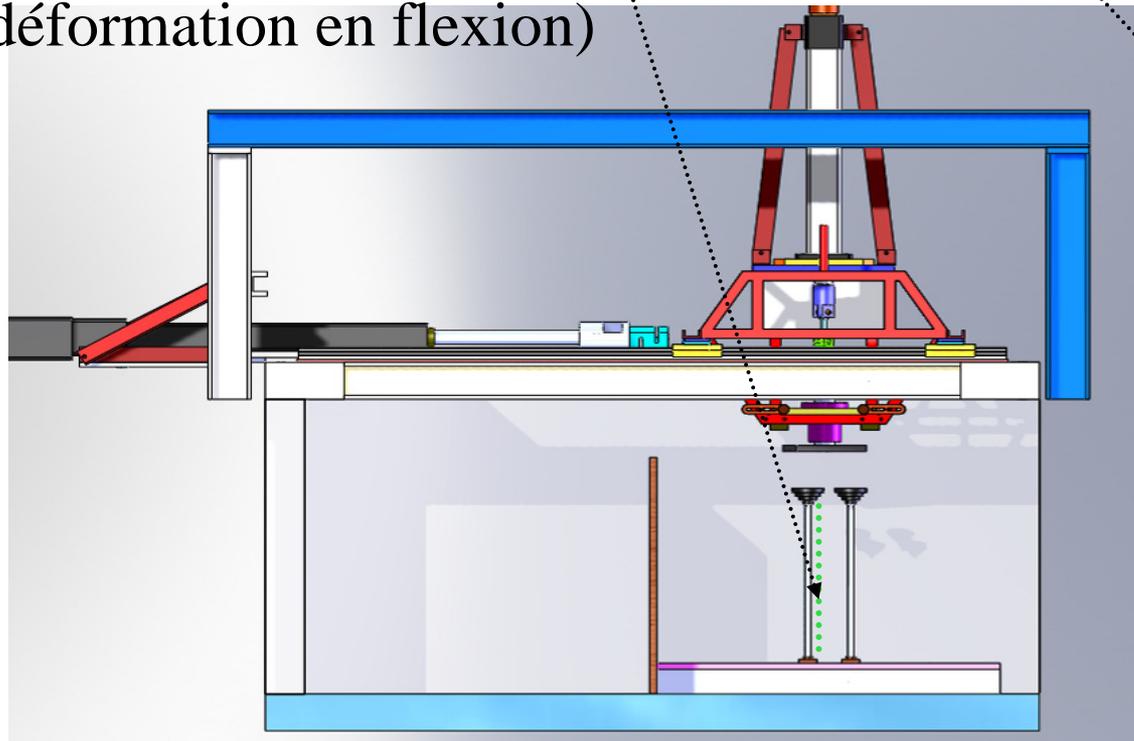
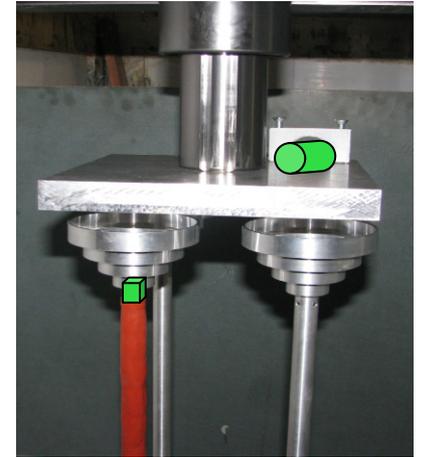


Géométrie des modèles



Monitoring – capteurs utilisés

- Accéléromètres
- Capteurs de force
- LVDT, capteur de force H, V
- Jauges de déformation (20 niveaux; déformation en flexion)



Types d'essais réalisés (1)

- **Comportement des CMM** sous différentes configurations de charges
 - V statique avec $H=0$,
 - V statique avec H cyclique/dynamique avec $V= 1/3$ de la capacité portante
 - V jusqu'à la capacité portante puis déplacement horizontal (Swipe test)

Déformation latérale, moment, effort tranchant transmis à la partie rigide

Dissipation d'énergie le long de colonne ballastée ou dans le matelas

Part d'énergie dissipée dans le dispositif souple

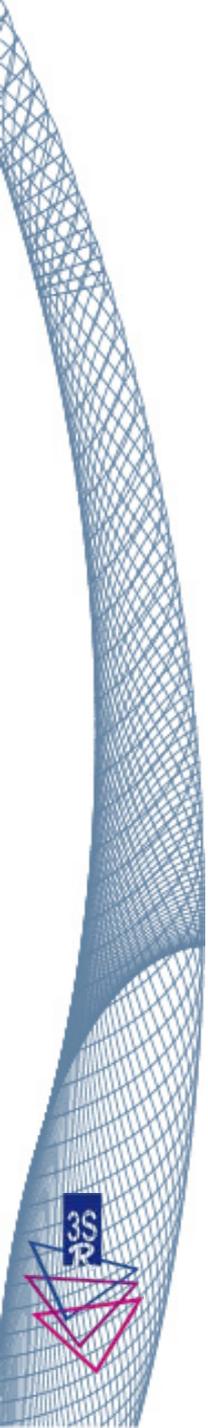


Types d'essais réalisés (2)

- Essais préliminaires en petite et grande cuve: définition du dimensionnement des modèles (l, position des jauges, test des programmes,...
- Essais de mise en place de l'argile (5 remplissages). Tests du système de chargement
- 18 essais avec étude paramétrique: variation hauteur de colonne et matelas (5cm, 8cm et 10cm), essais cycliques et swipe tests.

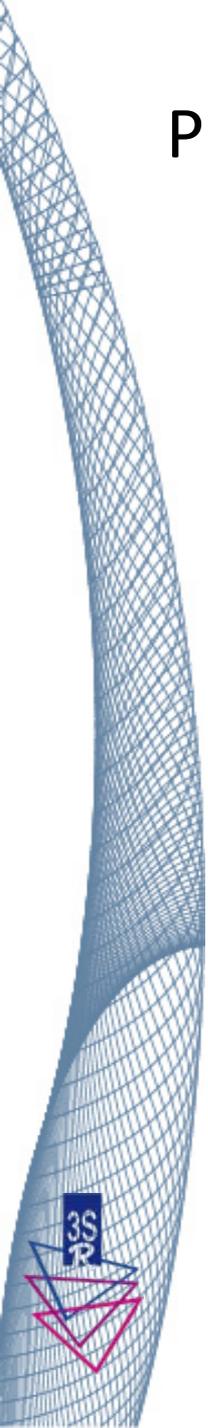


Procédure de mise en place de l'argile:



Procédure de mise en place des colonnes ballastées:

- Gabarit en geotextile, PVC
- Carottier avec diamètre 75 mm
- Compactage en retirant le carottier (1 min pour 1cm)
- Diamètre final de 90mm
- Densité finale 1.7-2 g/cm³



Traitement des résultats expérimentaux (1)

Jauges de déformation:

Déformation en flexion ε le long de pieu.

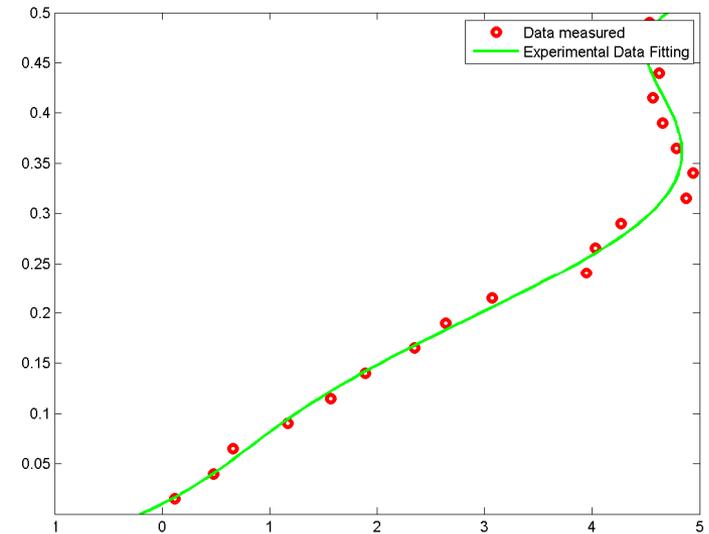
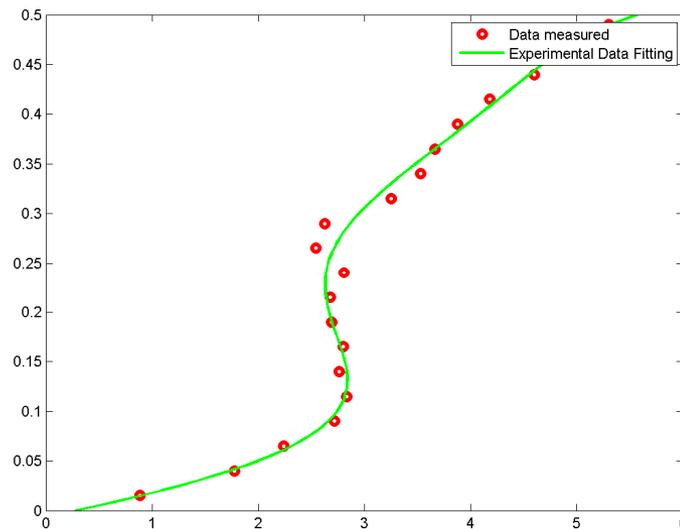
→ **moment de flexion M_f** ($M_f = \varepsilon * E * I / r_e$)

I - détermination basé sur essais expérimentaux
($r_e = 7\text{mm}$, $I = 1.78e^{-9} \text{ m}^4$)



Traitement des résultats expérimentaux (2)

M_f le long du pieu est interpolé par une fonction polynomiale afin d'avoir des dérivées et des intégrations plus précises



Traitement des résultats expérimentaux (3)

$$p = \frac{d^2 M}{dz^2}$$

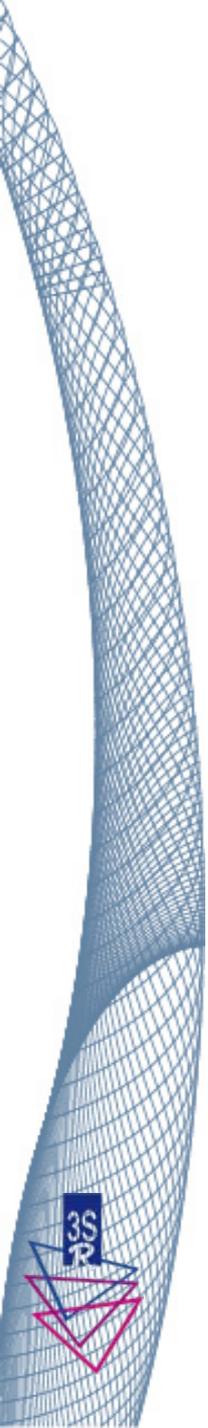
$$y = \iint \frac{M}{EI}$$

$$T = \frac{dM}{dz}$$

- Courbes P-y (P= réaction du sol, y=déflexion du pieu)

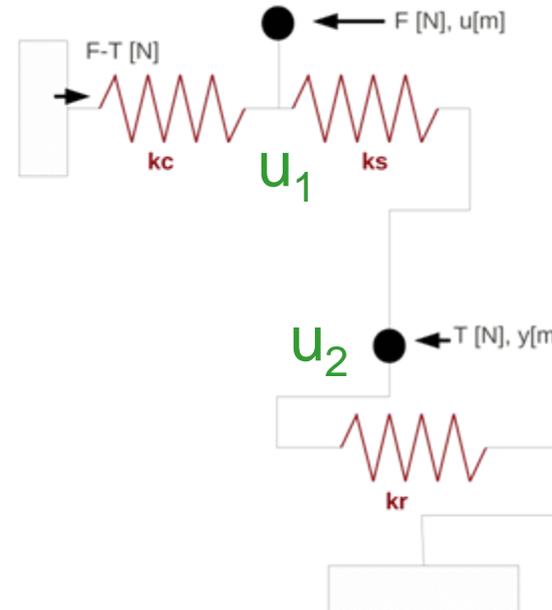
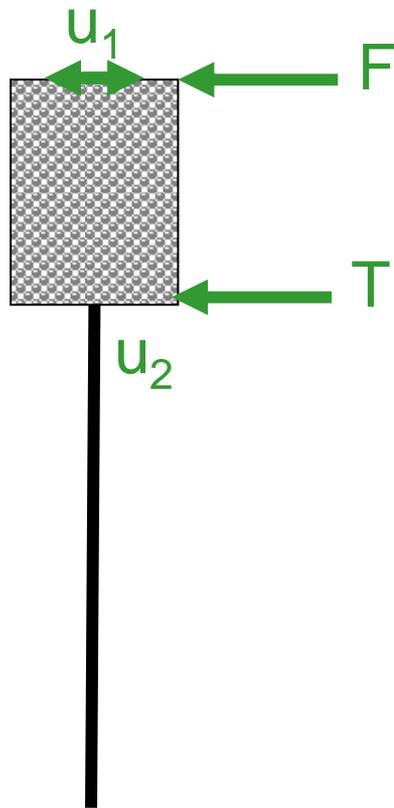
- Accélération en tête du pieu: $a = \frac{d^2 y}{dt^2}$

- Energie dissipée



Traitement des résultats expérimentaux (4)

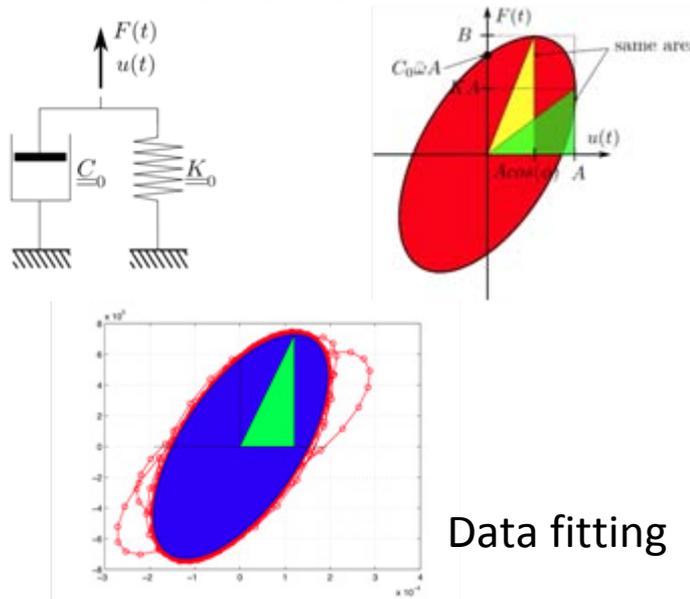
- Energie dissipée de manière globale, boucle $F - u_1$
- Energie dissipée dans la partie souple, i.e. colonne ballastée ou Matelas, boucle $F - (u_1 - u_2)$
- Energie dissipée dans la partie rigide (pieux + argile), boucle $T - u_2$



Traitement des résultats expérimentaux (4)

2 méthodes pour calculer ξ :

1. Régression elliptique pour trouver l'aire de la courbe

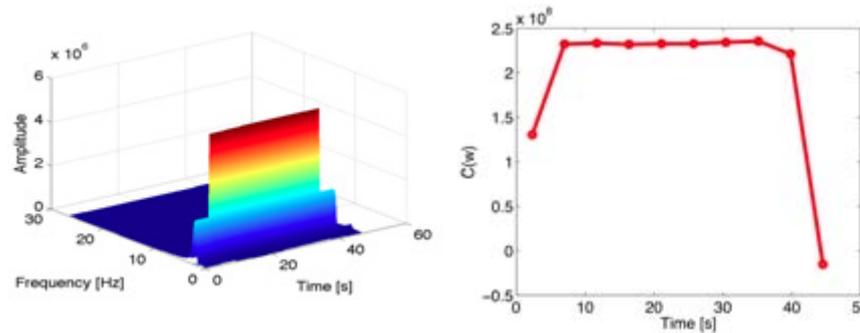


$$\xi = \frac{A_{\text{loop}}}{4\pi A_{\text{triangle}}}$$

$$\begin{cases} K_r(\omega) = 2.36 \cdot 10^9 \text{ Nm.rad}^{-1} \\ C_r(\omega) = 2.32 \cdot 10^8 \text{ Nms.rad}^{-1} \\ K_h(\omega) = 1.24 \cdot 10^7 \text{ N.m}^{-1} \\ C_h(\omega) = 2.24 \cdot 10^7 \text{ Ns.m}^{-1} \end{cases}$$

Data fitting

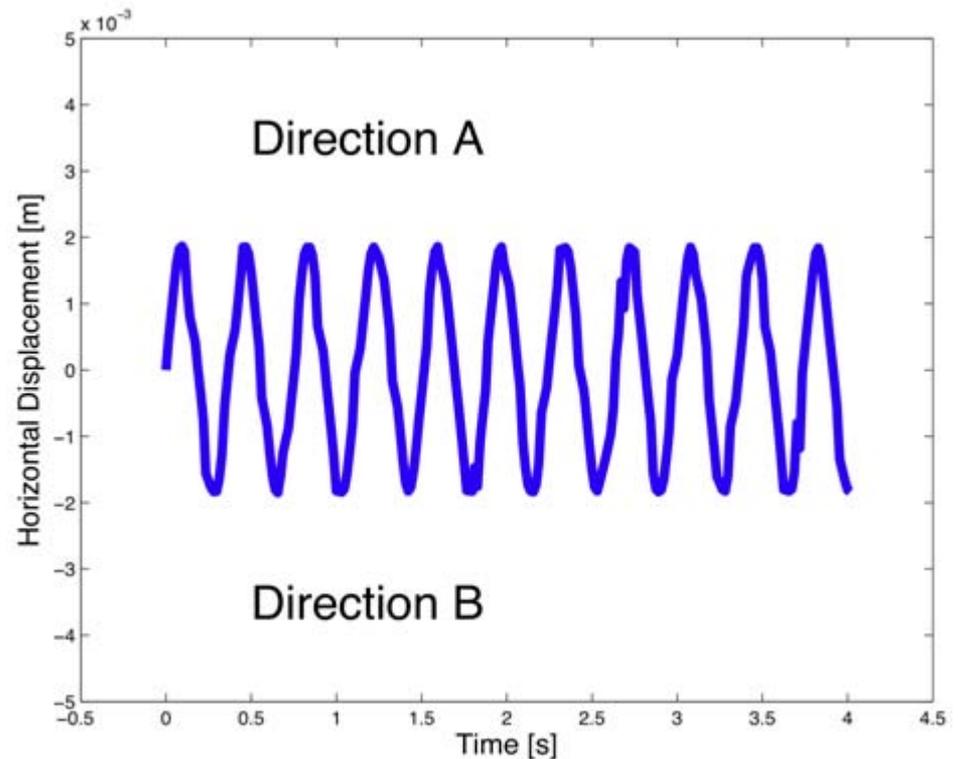
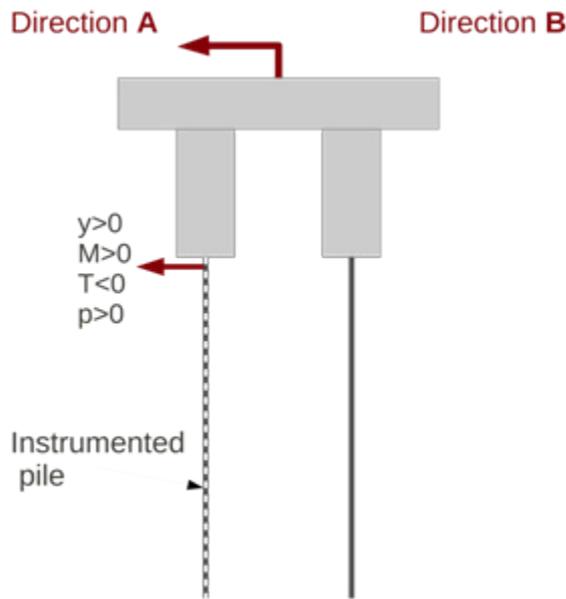
2. Fonction de transfert (partie imaginaire du rapport des transformées de Fourier)



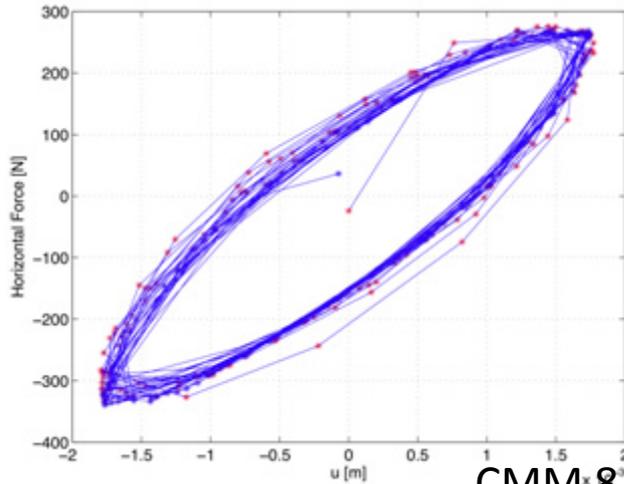
Résultats sous chargement dynamique sinusoïdal

Fréquence: 2.5Hz

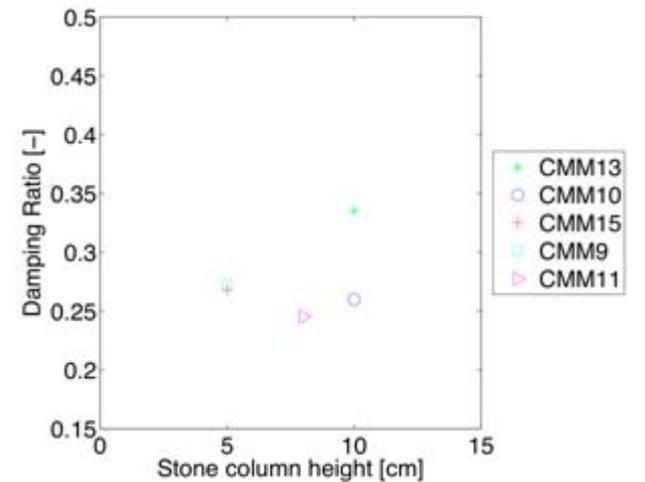
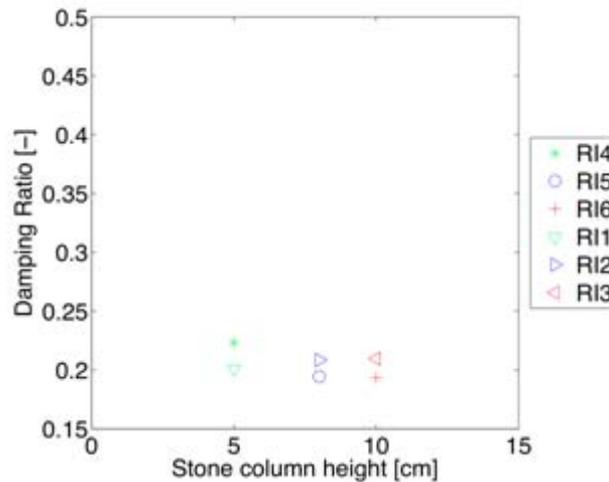
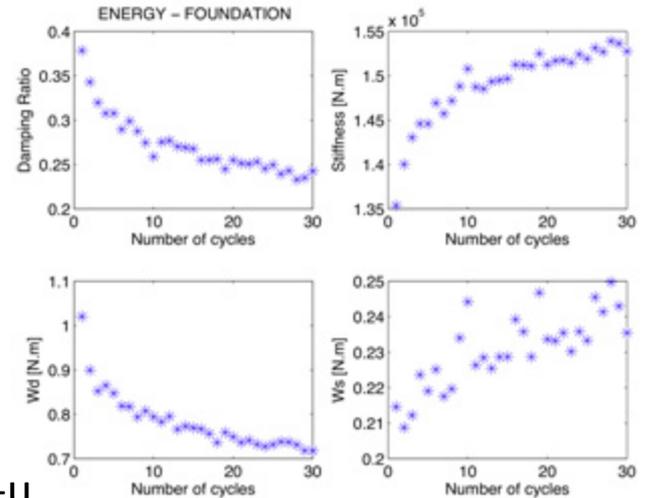
Amplitude= +/-2mm



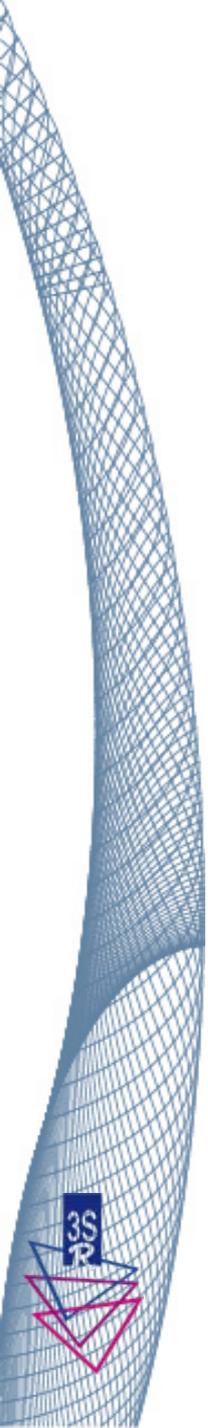
Comportement global F-u₁



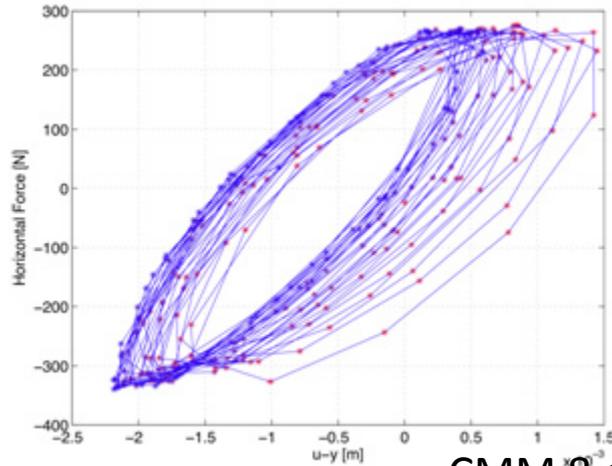
CMM x 8 cm boucles F-u₁



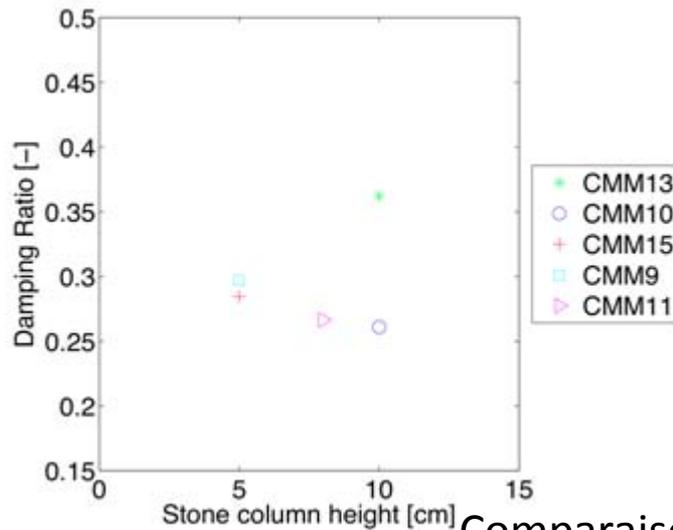
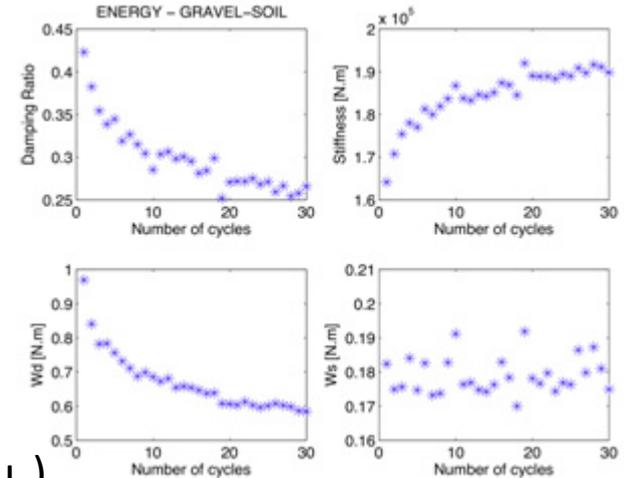
Comparaison CMM - Matelas



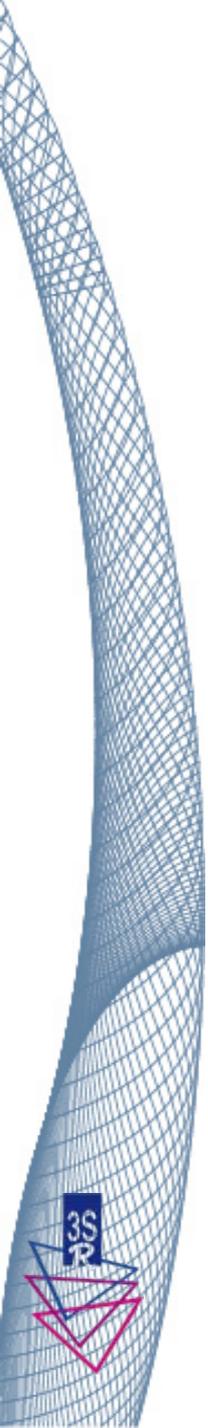
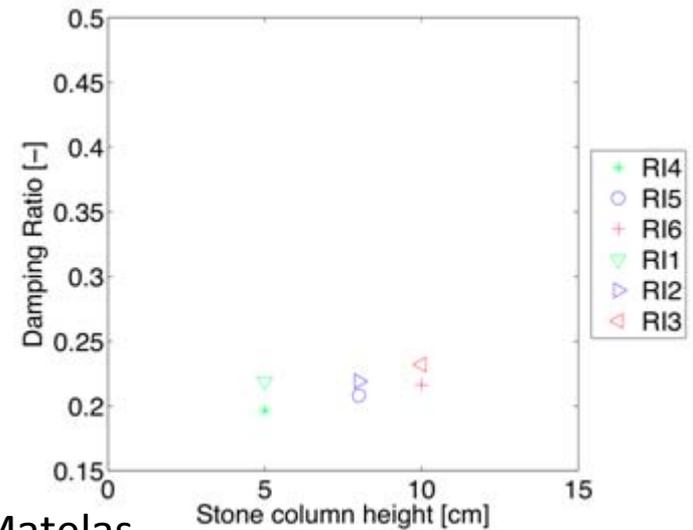
Comp. Sol granulaire F-(u_1-u_2)



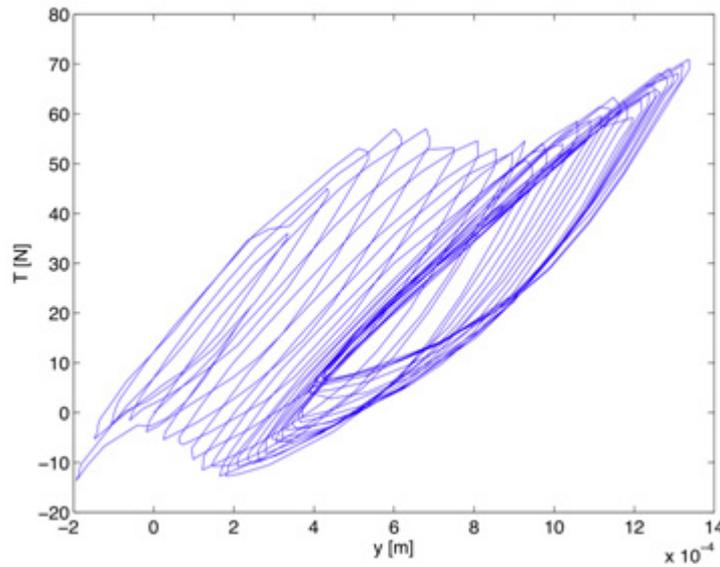
CMM 8 cm boucles F-(u_1-u_2)



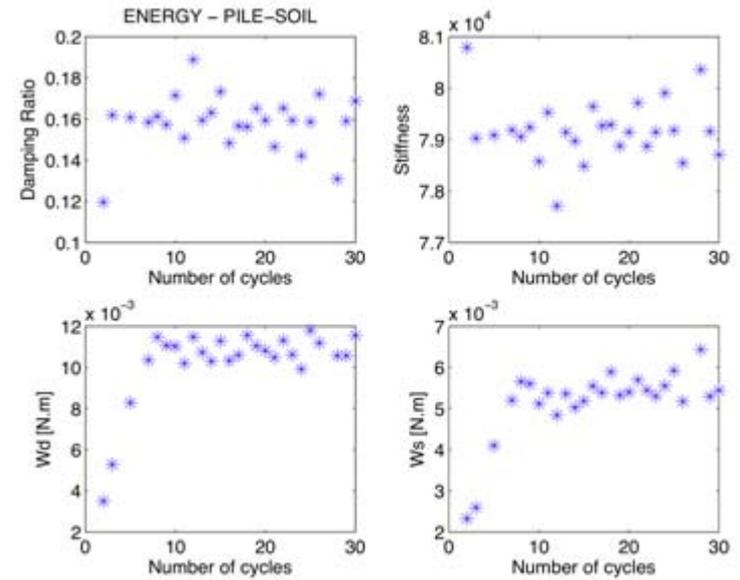
Comparaison CMM - Matelas



Comportement pieux (T-u₂)



CMM 8 cm boucles T-u₂



Analyse des résultats -Raideurs

- Le pieu et l'argile ne sont que très peu sollicités latéralement pour CMM et IR
- Un rapport d'1/6 à 1/8 est appliqué en tête de pieux par rapport à l'effort appliqué sur la fondation
- La CMM sollicite d'avantage la tête de pieu (+20%)
- Cette valeur diminue faiblement avec une augmentation de la hauteur de colonne ou du matelas



Analyse des résultats (2)

- Pas de différence significative entre CMM et IR en terme d'énergie dissipée
- La hauteur de la colonne ne modifie pas significativement le comportement en terme d'énergie
- Le complexe granulaire (matelas ou colonne) dissipe 85% de l'énergie totale

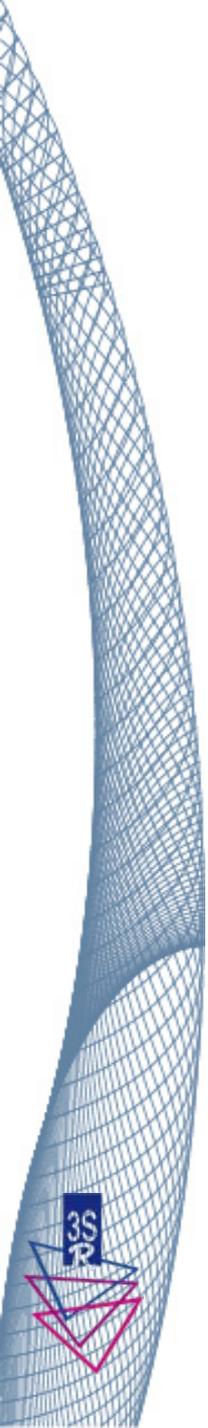


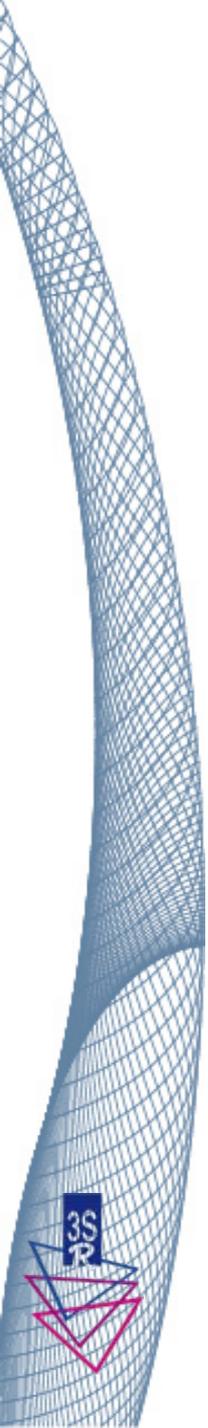
Perspectives

- Essais supplémentaires avec des hauteurs de colonnes ou matelas différentes
- Essais à fréquences différentes pour estimer les fonctions de transferts
- Calcul numériques sous Flac3D en cours



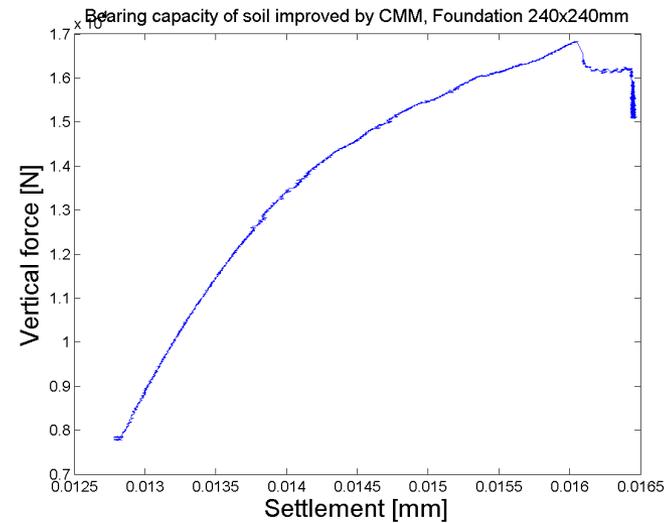
Merci de votre attention



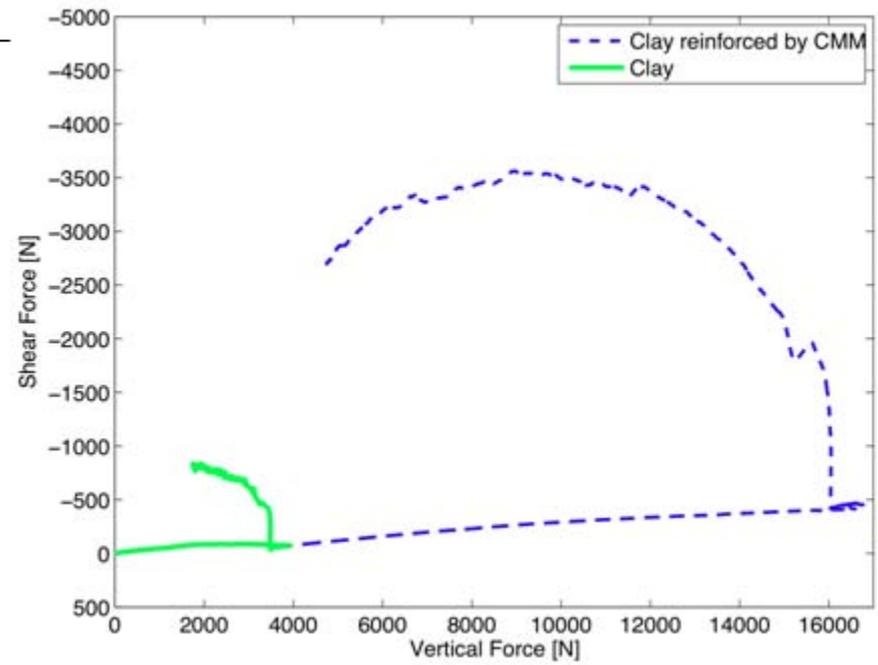


Essais à l'échelle 1/10 dans la VisuCuve – **Chargement V statique**

- Fondation 240x240 mm: $F_{vmax} = 17\text{kN}$, i.e. $\sigma_{max} = 295\text{kPa}$



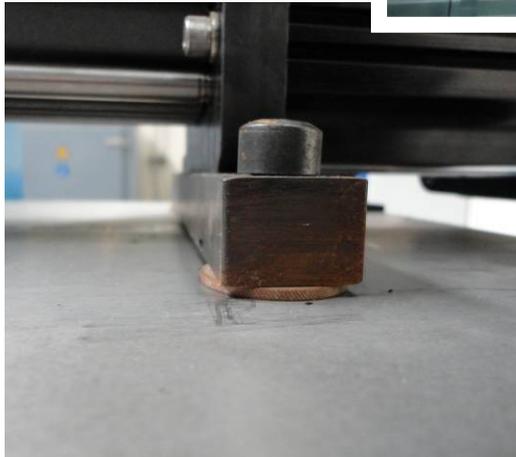
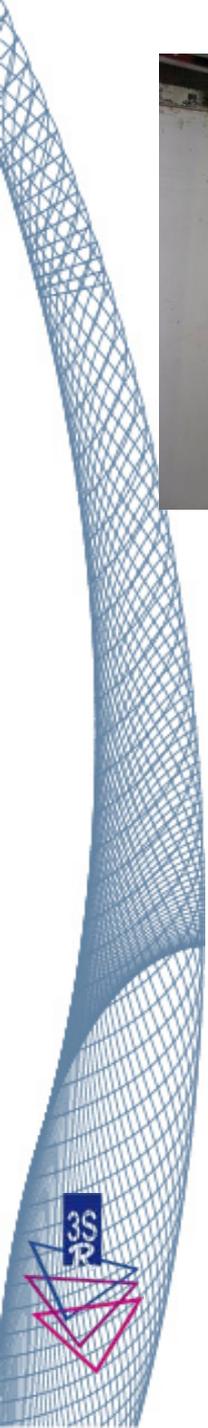
Swipe tests:
Influence des colonnes par rapport à l'argile seule

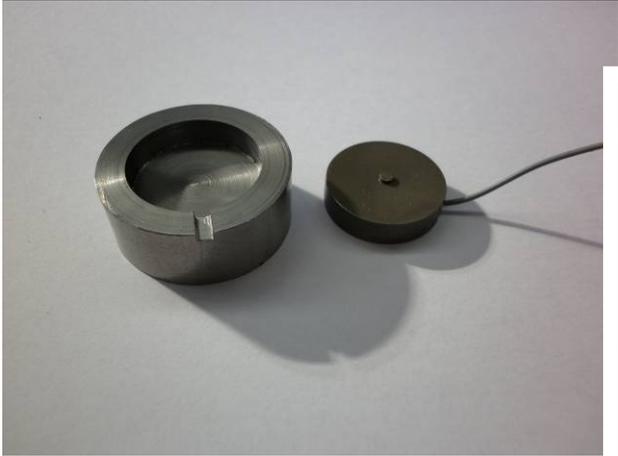
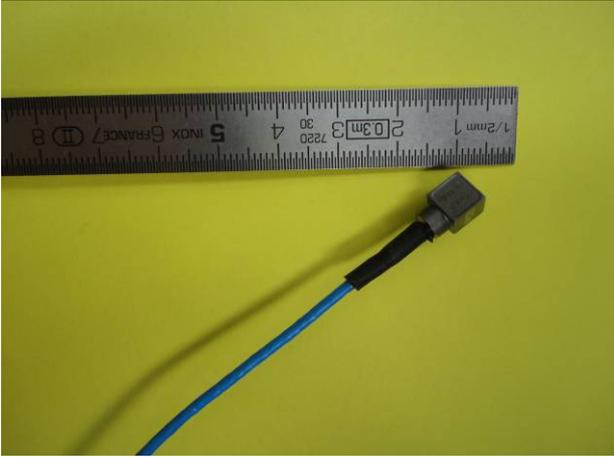
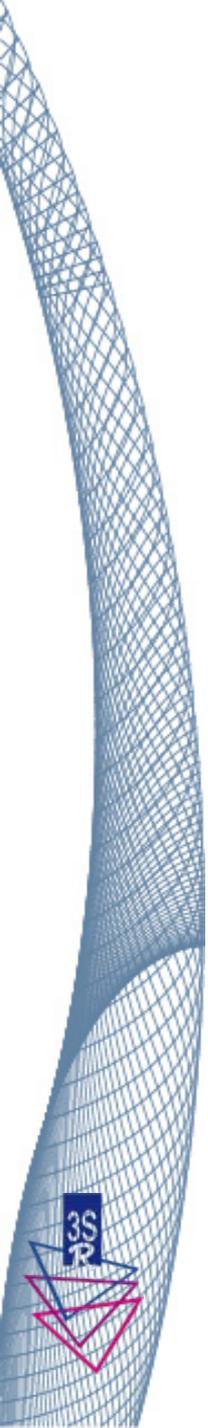


Dispositif Expérimental - VisuCuve



- **Isolation électrique** pour éliminer les perturbations du système d'acquisition
- Installation d'un **vérin horizontal dynamique**
- Nouveau **système de chargement**
- Installation du **modèle expérimental**
- Division de la VisuCuve en 2 parties
- Paroi démontable pour permettre un accès par le côté

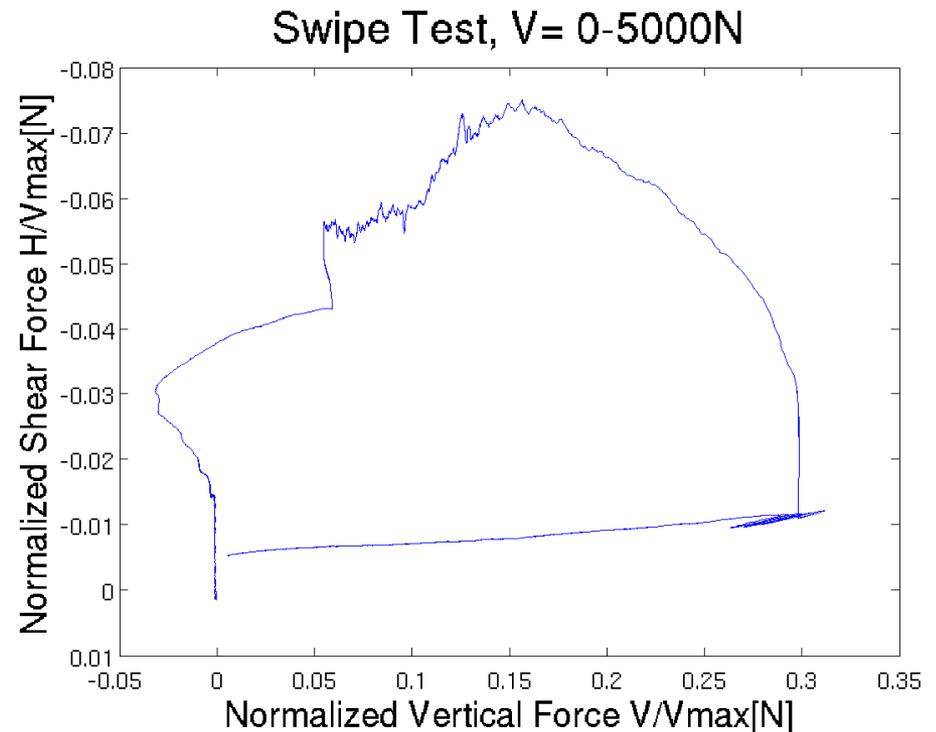




Essais à l'échelle 1/10 dans la VisuCuve

Chargement V + H statique

- L'essai de type « Swipe test » permet de déterminer la surface de rupture dans le plan V-H
- La résistance horizontale maximale H_{max} est mobilisée totalement pour $V/V_{max}=0.5$ (V_{max} = Capacité portante)

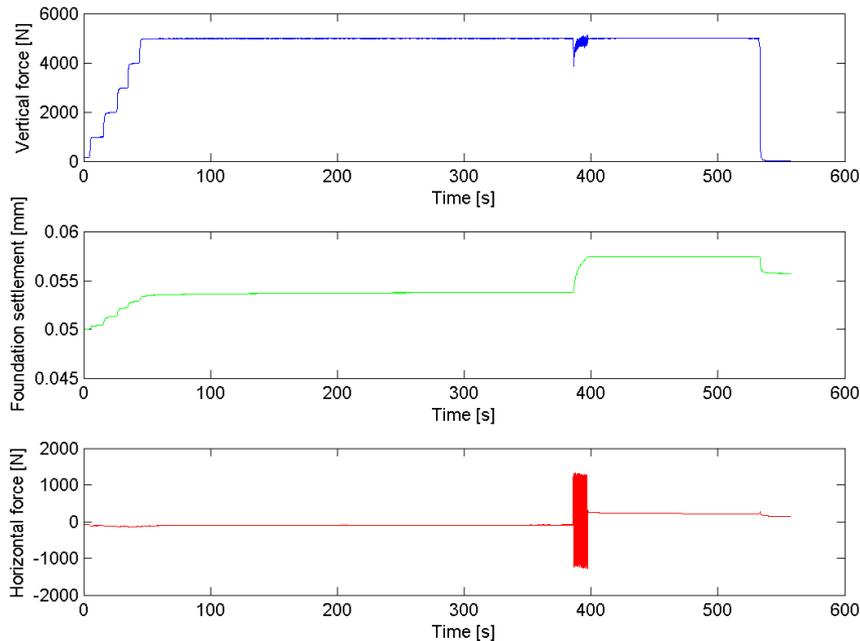


Essais à l'échelle 1/10 dans la VisuCuve

Chargement V const + H cyclique

Procédure d'essai:

- Chargement vertical par paliers jusqu'à 5000N
- Consolidation (X min)
- Chargement horizontal (A=2mm; f = 2.7Hz, 30 cycles) en déplacement contrôlé



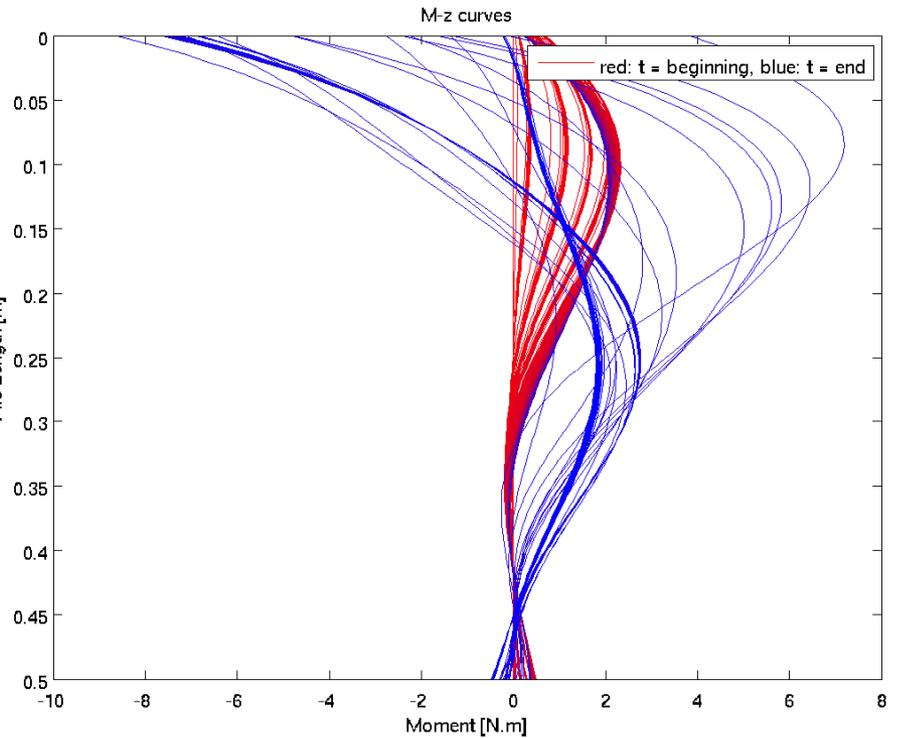
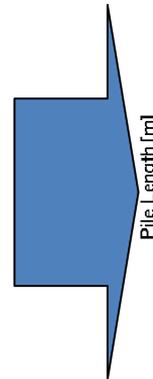
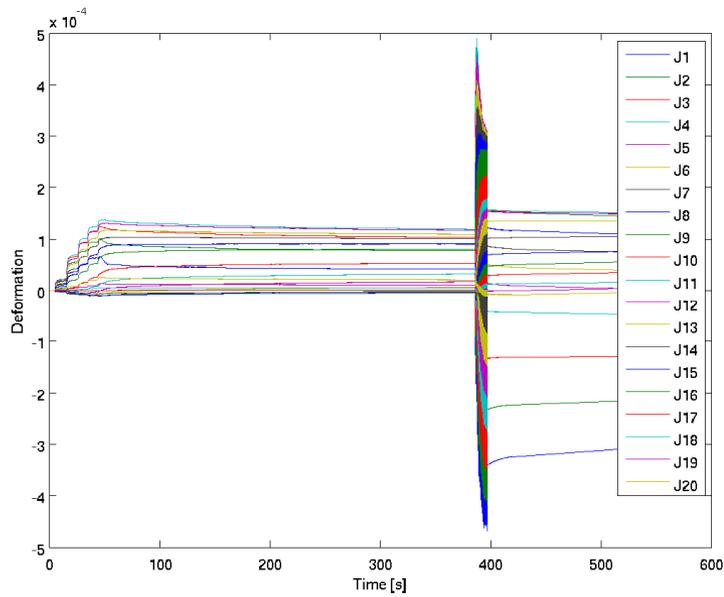
Hauteurs de CB testées:

10 cm

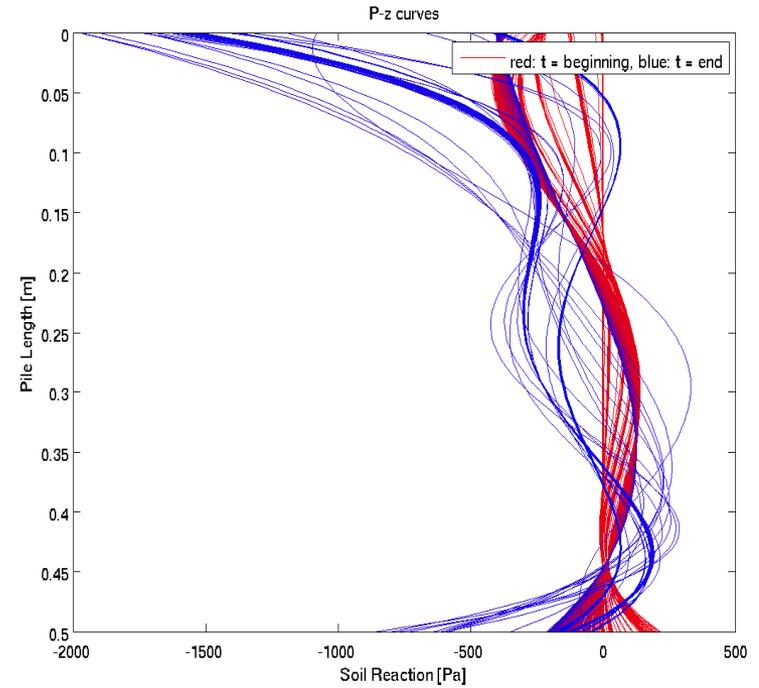
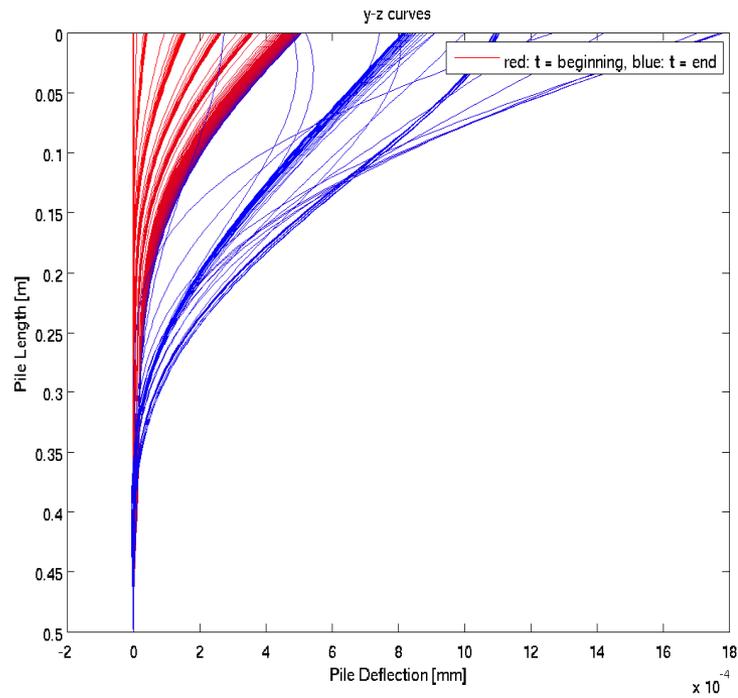
8 cm

5 cm

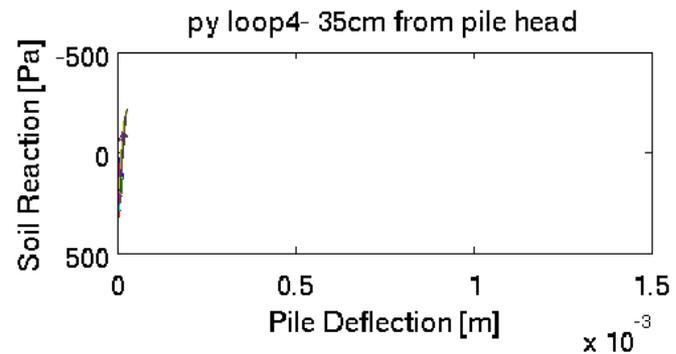
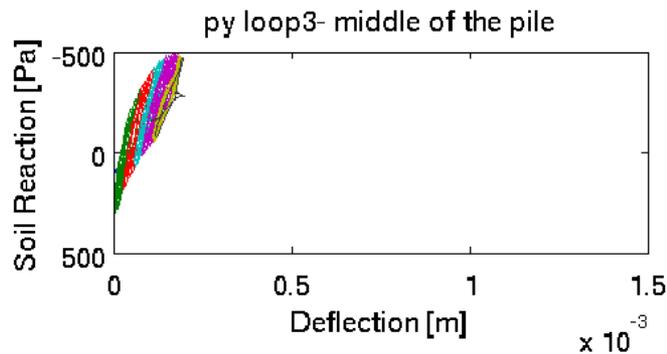
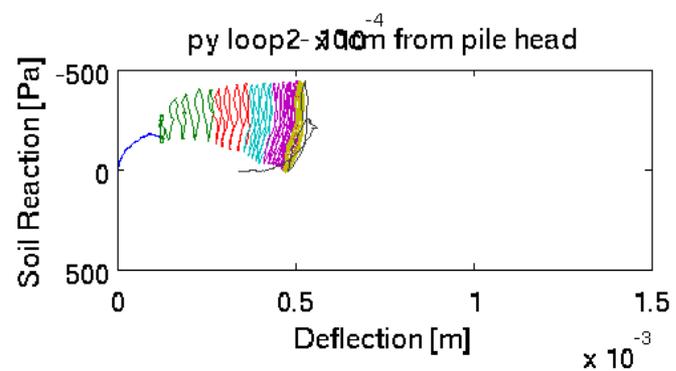
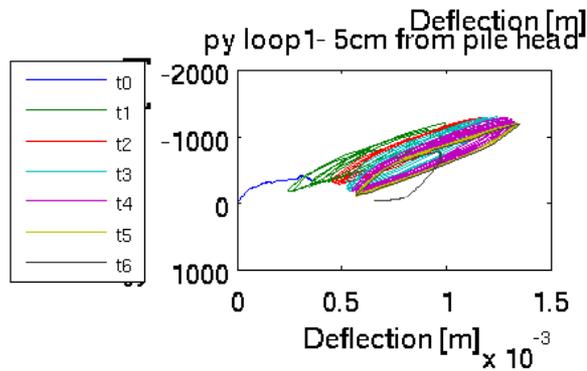
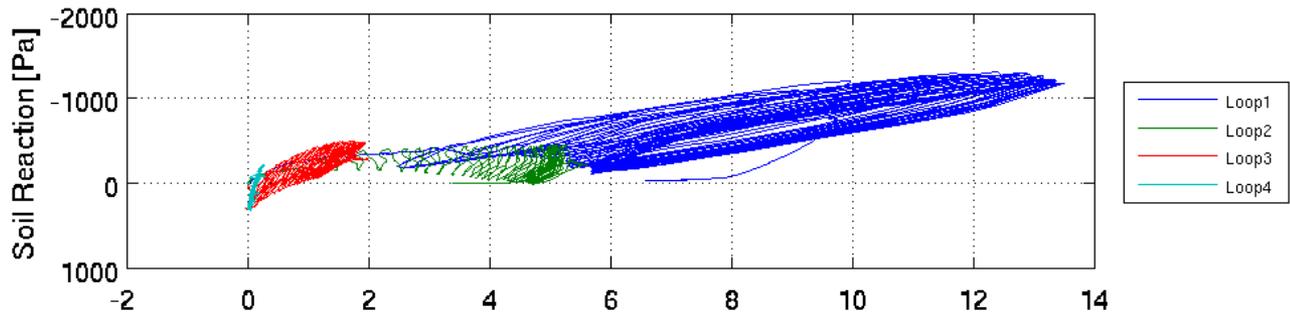
Essais à l'échelle 1/10 dans la VisuCuve - **CB 5cm**



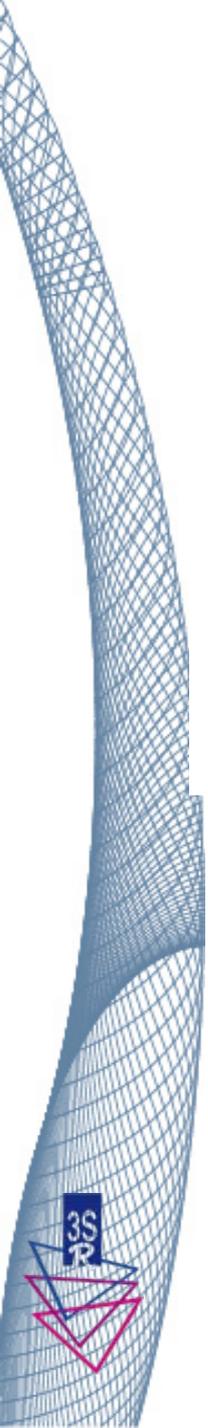
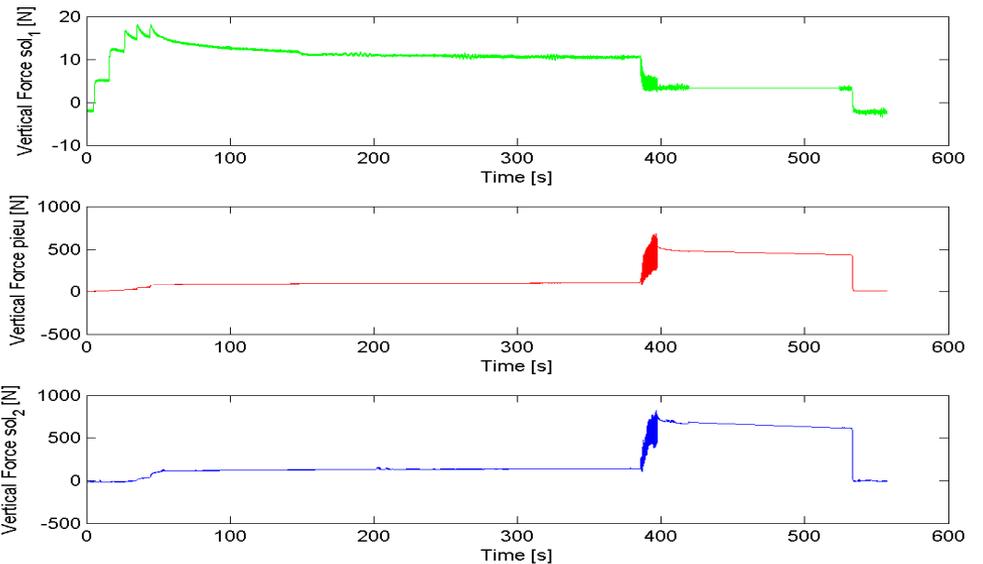
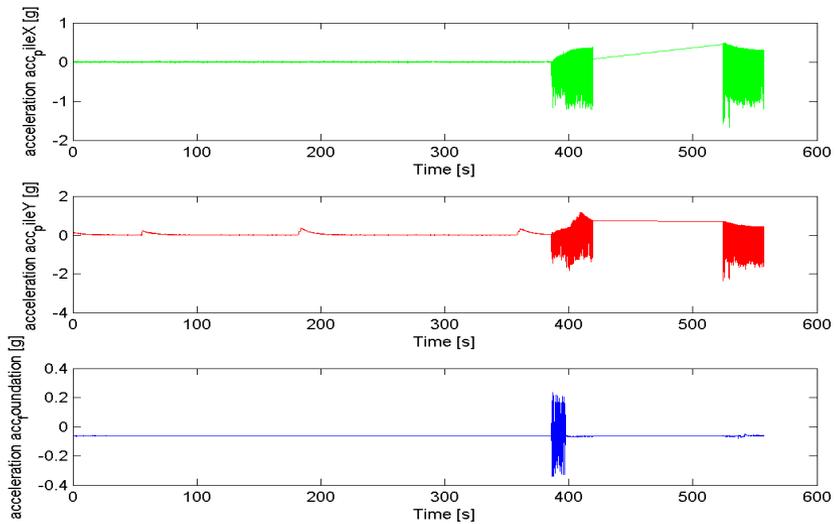
Essais à l'échelle 1/10 dans la VisuCuve - **CB 5cm**



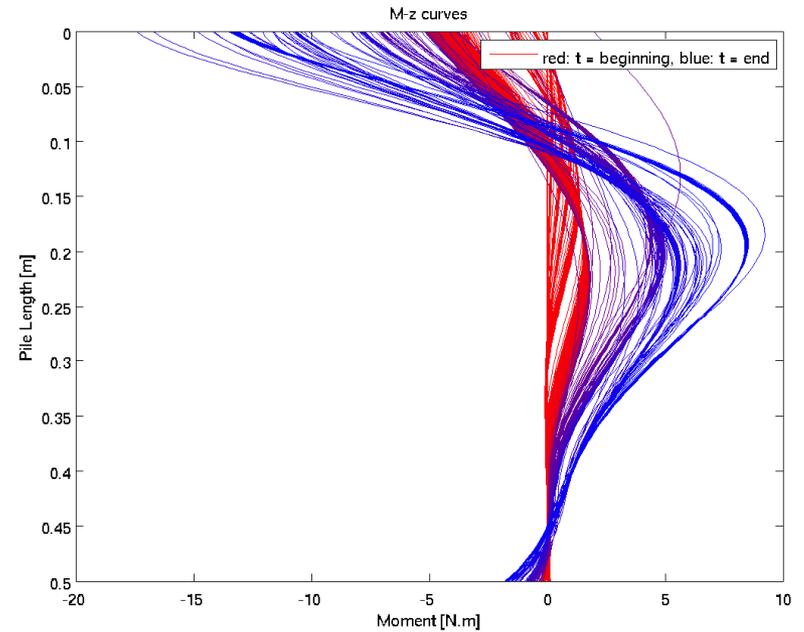
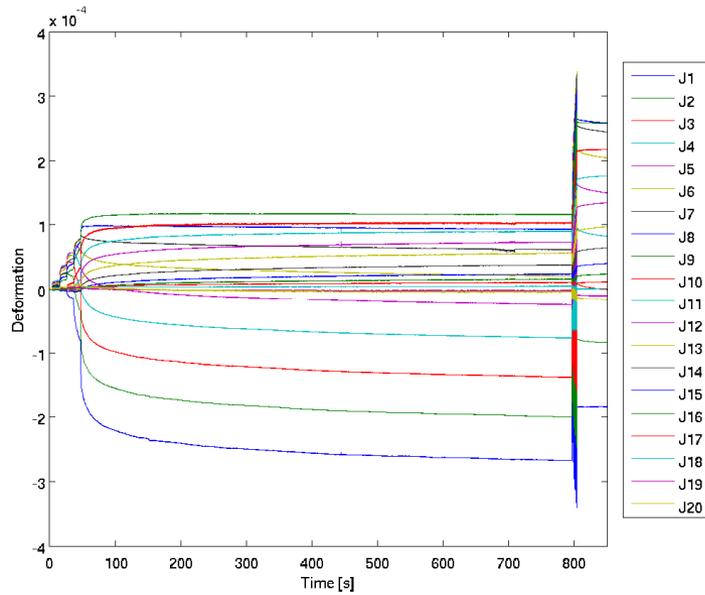
Essais à l'échelle 1/10 dans la VisuCuve - **CB 5cm**



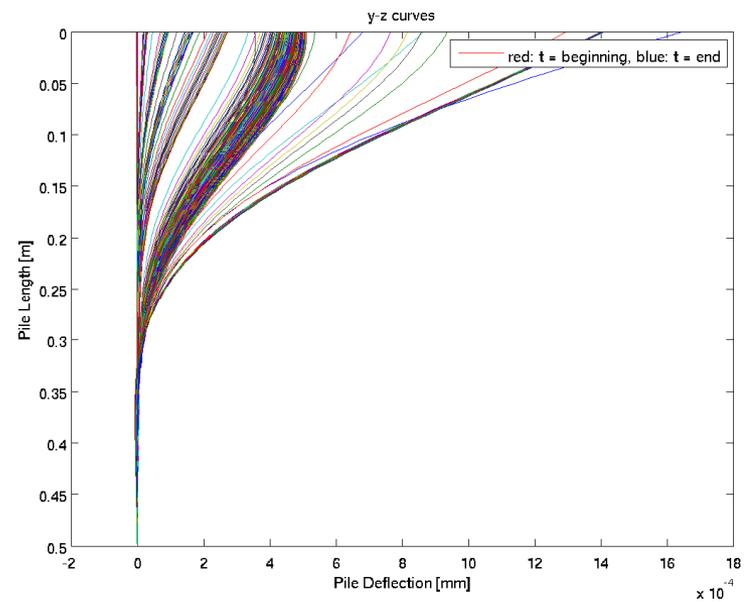
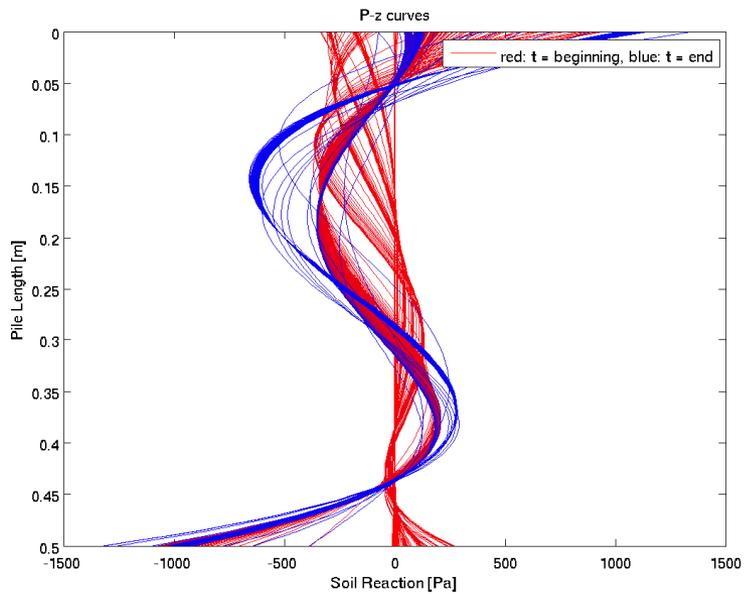
Essais à l'échelle 1/10 dans la VisuCuve - **CB 5cm**



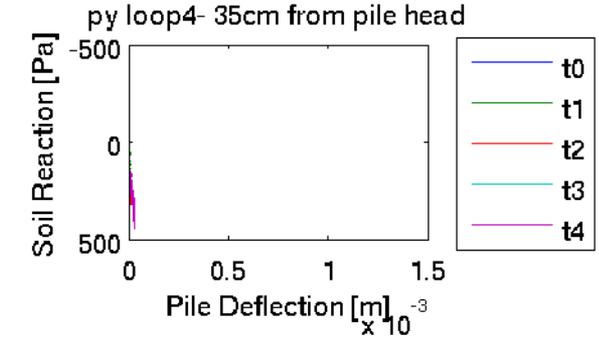
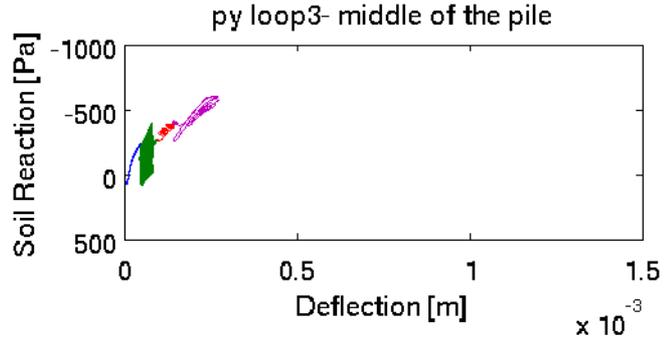
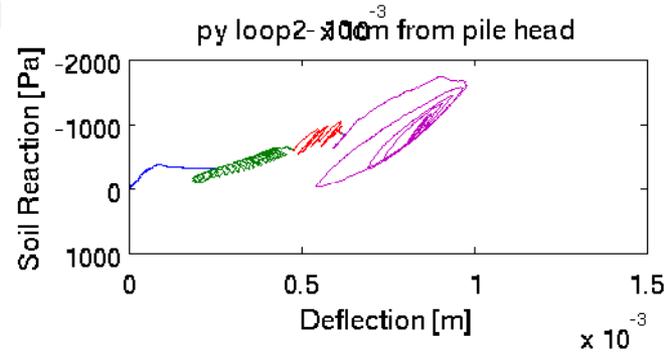
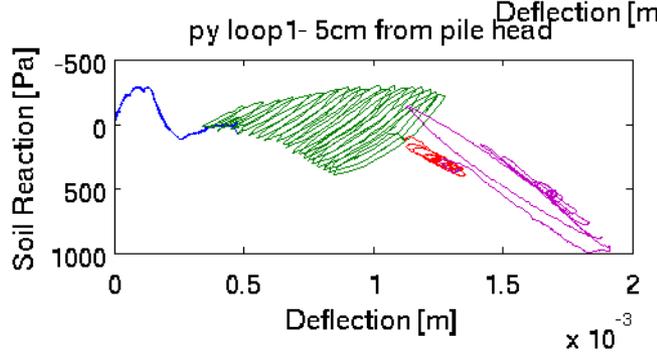
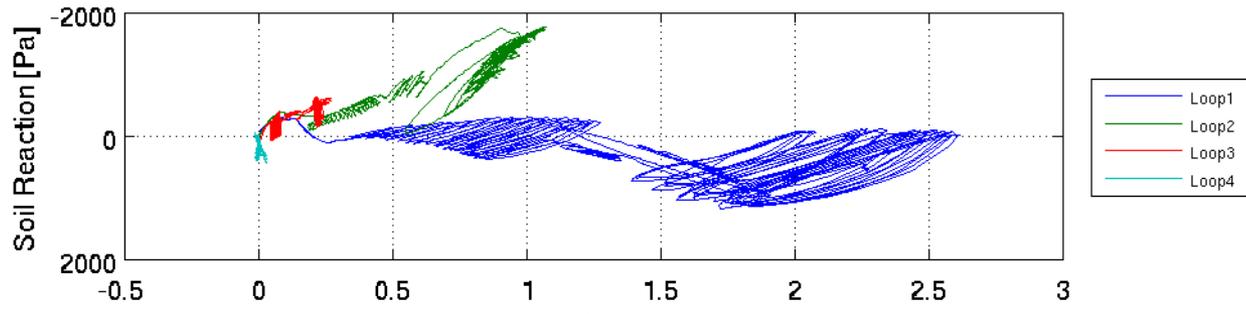
Essais à l'échelle 1/10 dans la VisuCuve – **CB 10cm**



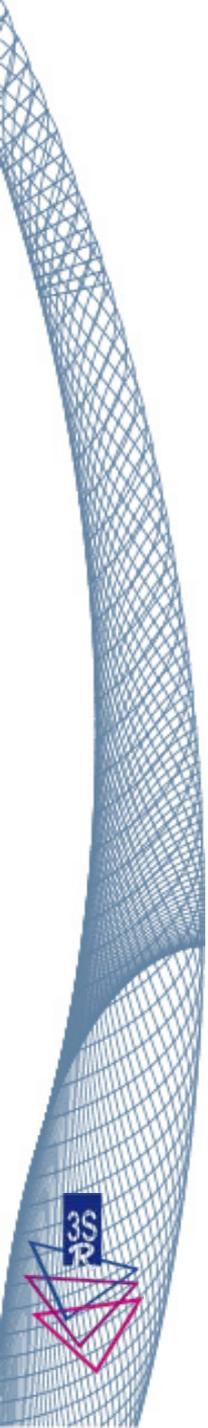
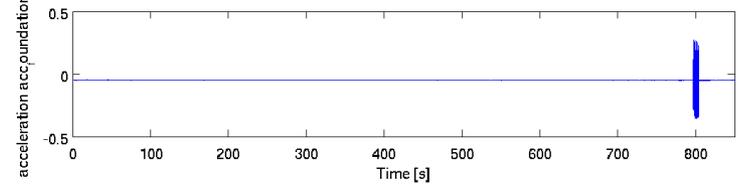
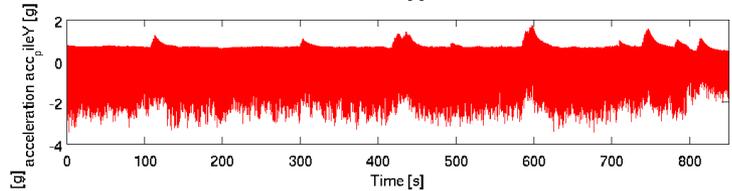
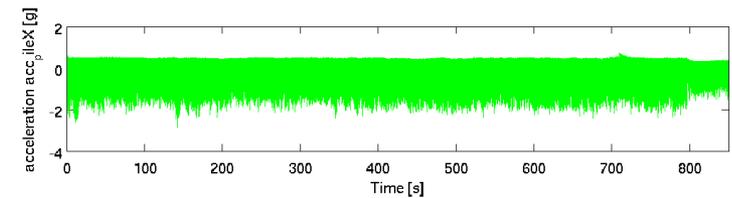
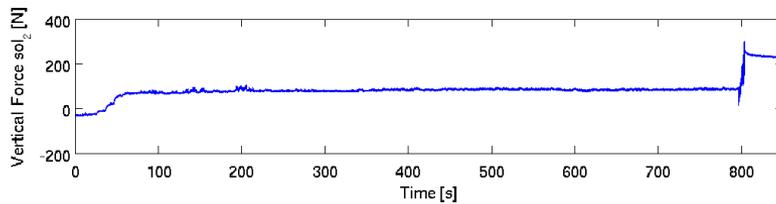
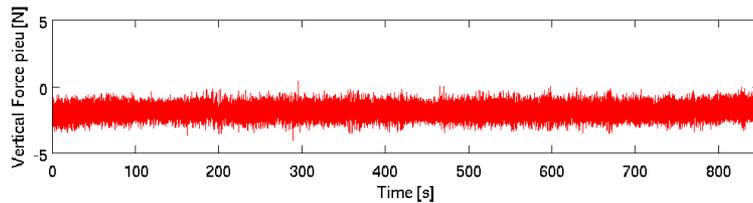
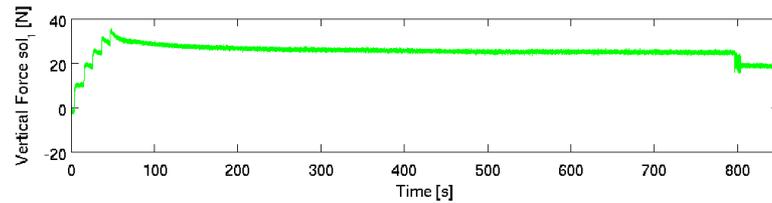
Essais à l'échelle 1/10 dans la VisuCuve – **CB 10cm**



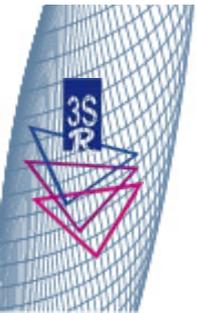
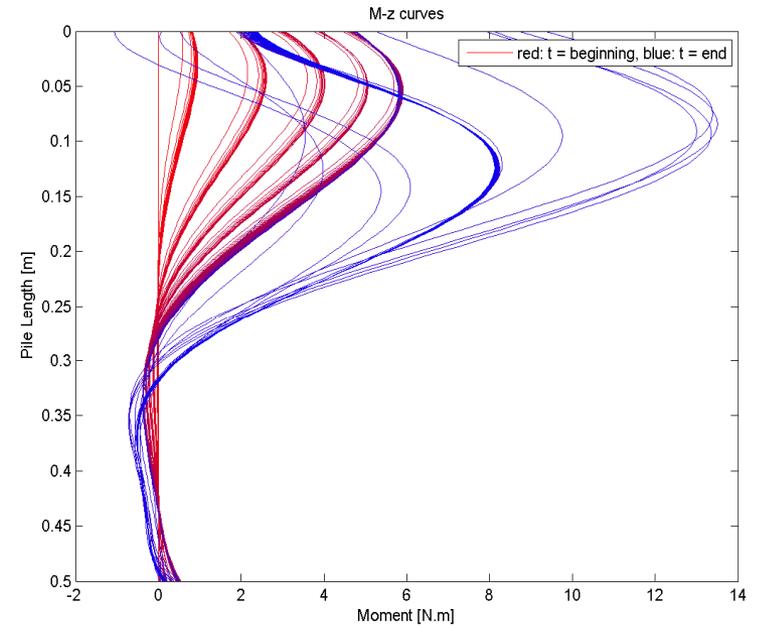
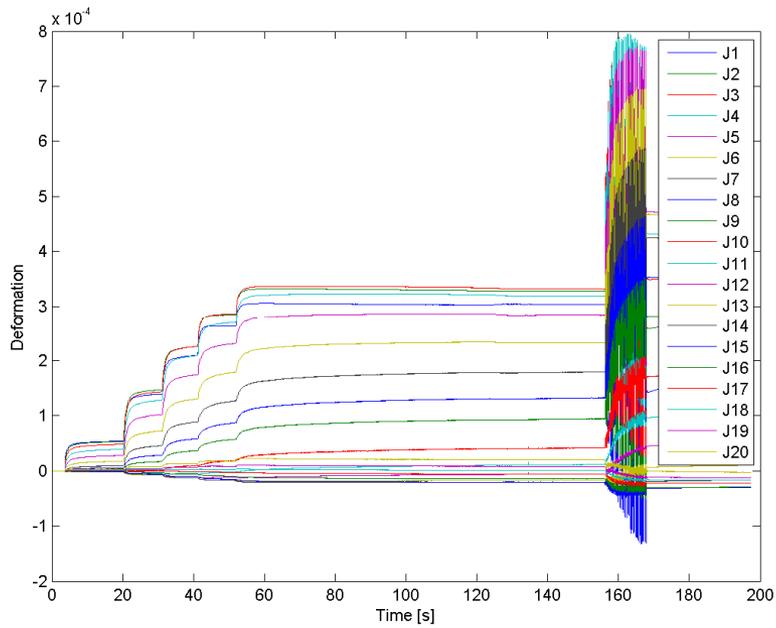
Essais à l'échelle 1/10 dans la VisuCuve – CB 10cm



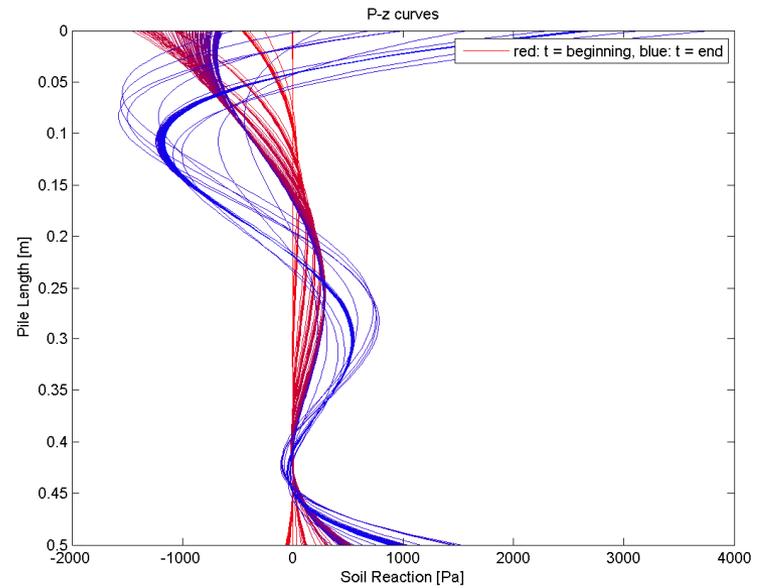
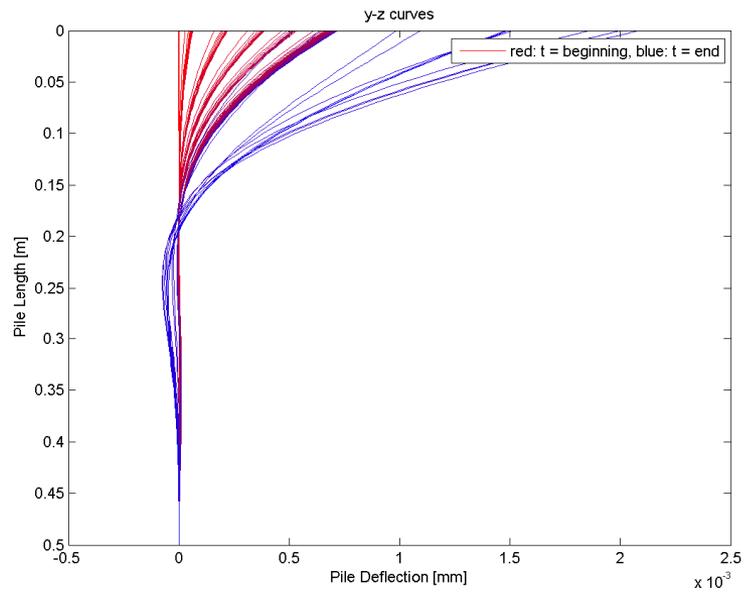
Essais à l'échelle 1/10 dans la VisuCuve – CB 10cm



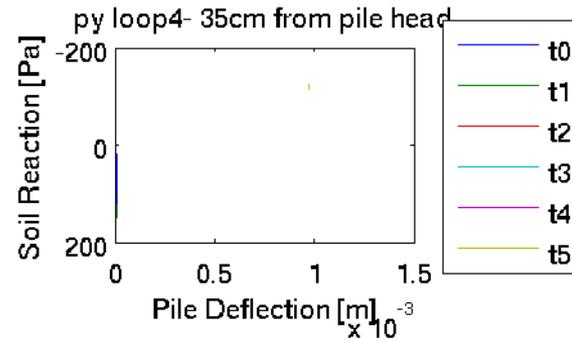
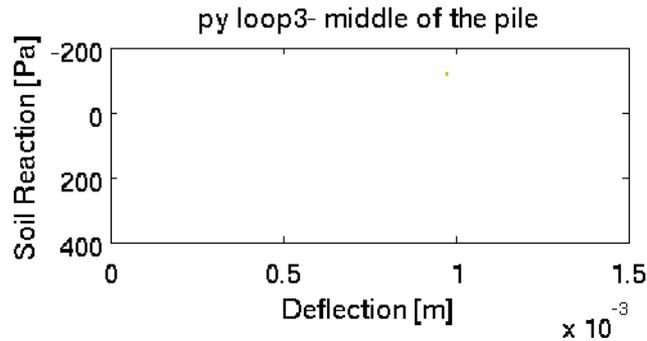
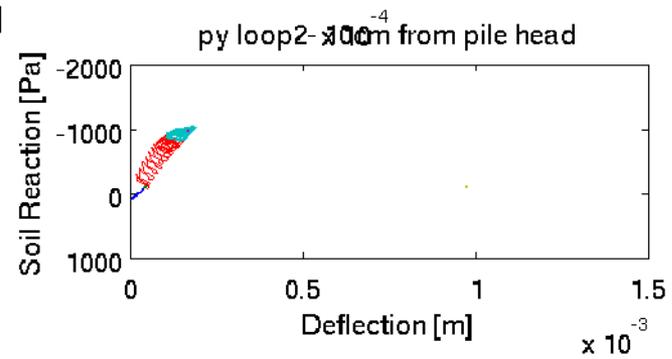
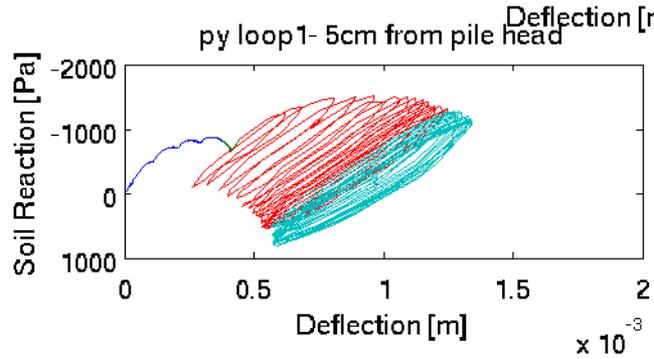
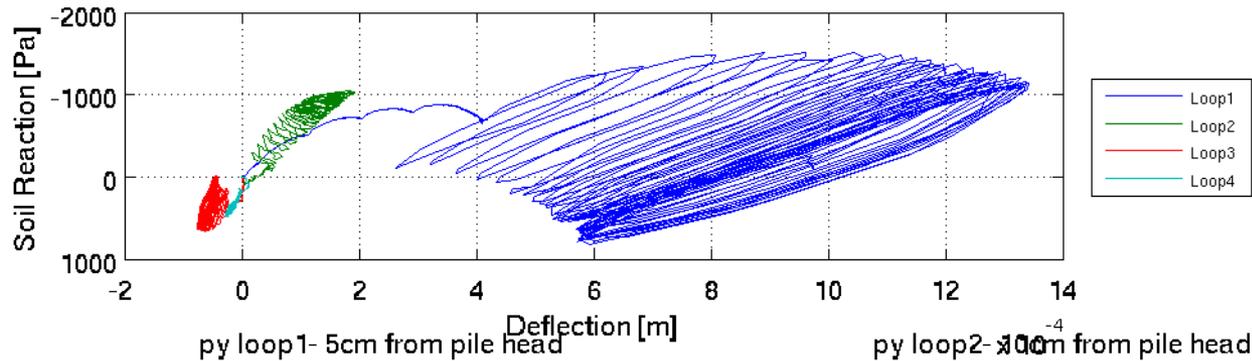
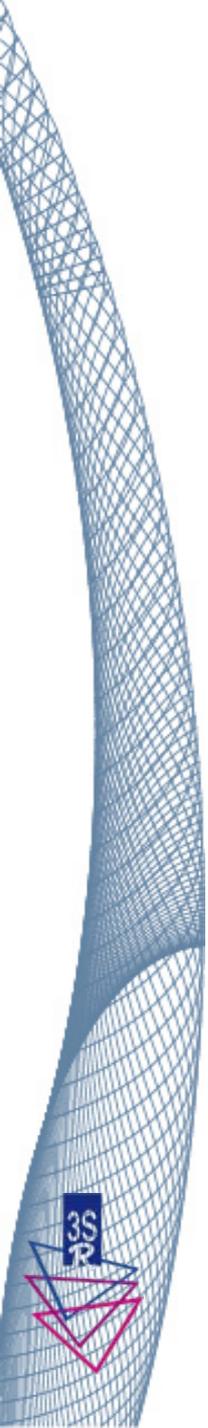
Essais en échelle 1/10 dans la VisuCuve – **CB 8cm**



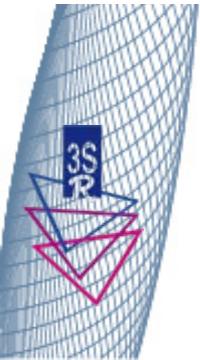
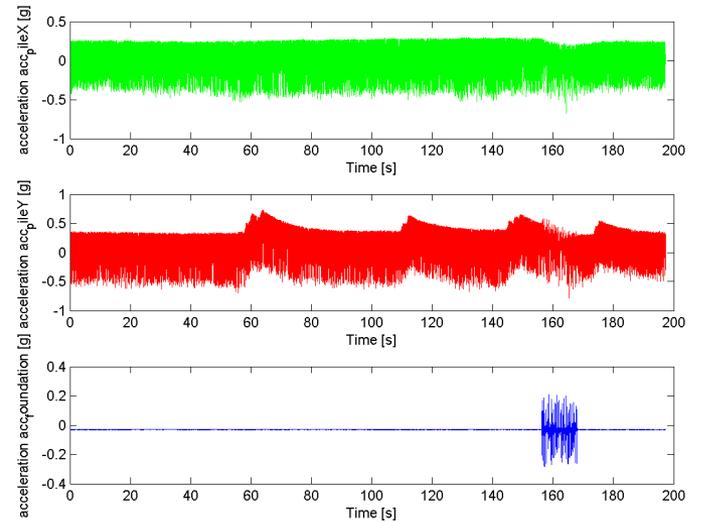
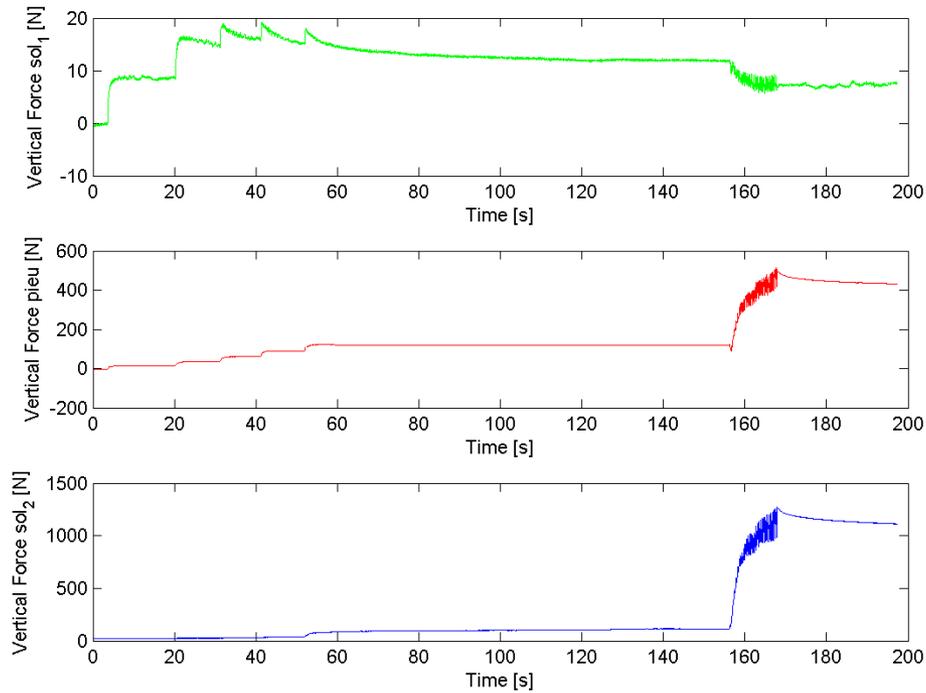
Essais en échelle 1/10 dans la VisuCuve – **CB 8cm**



Essais à l'échelle 1/10 dans la VisuCuve – CB 8cm

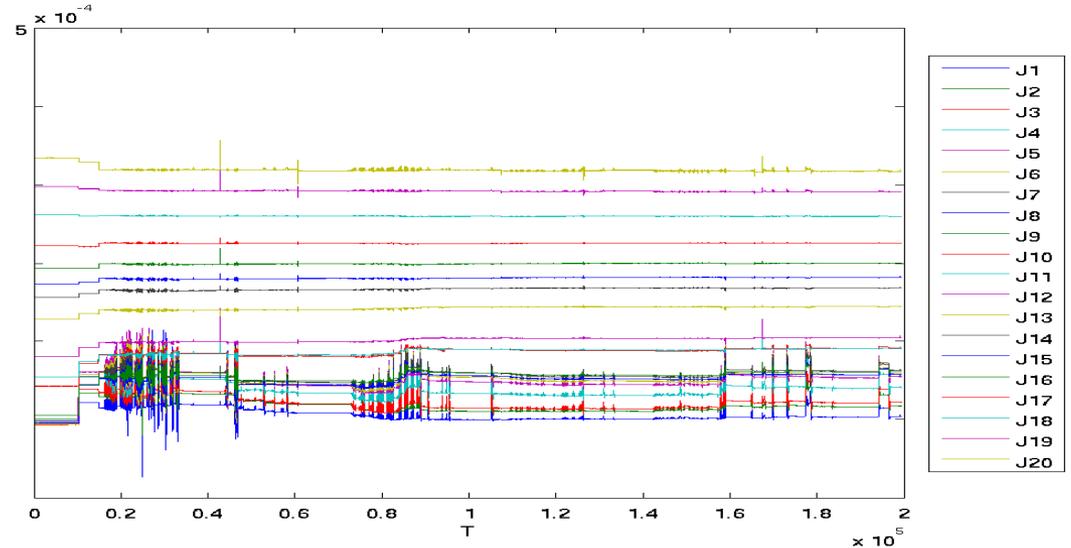
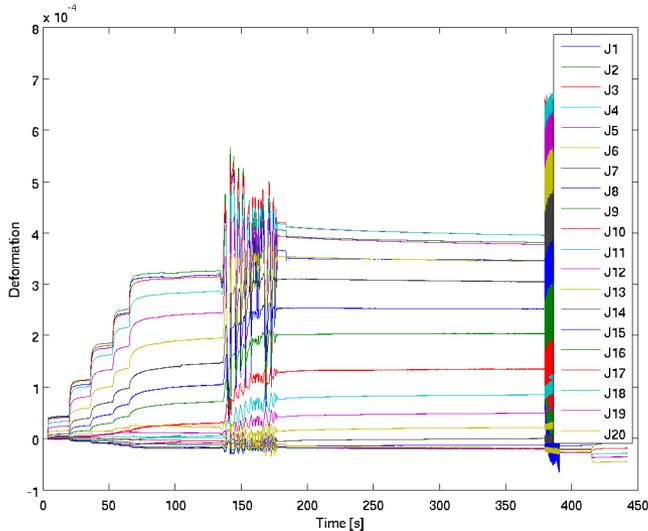


Essais en échelle 1/10 dans la VisuCuve – CB 8cm



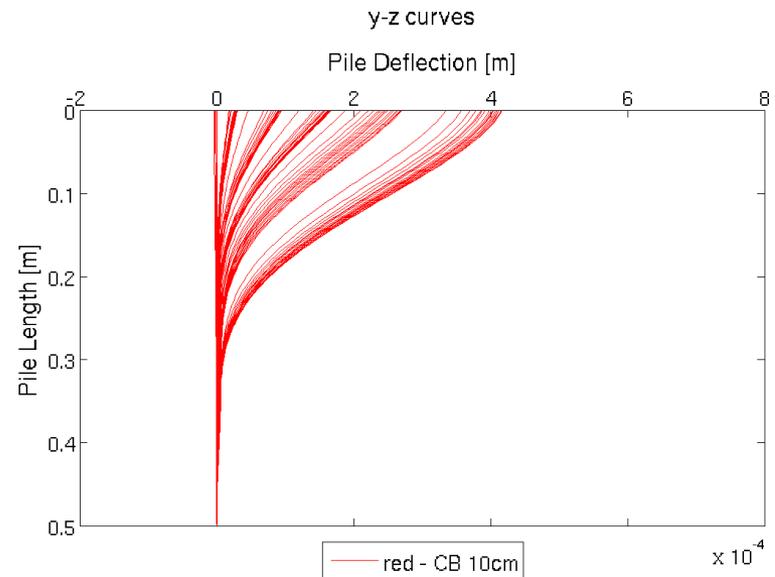
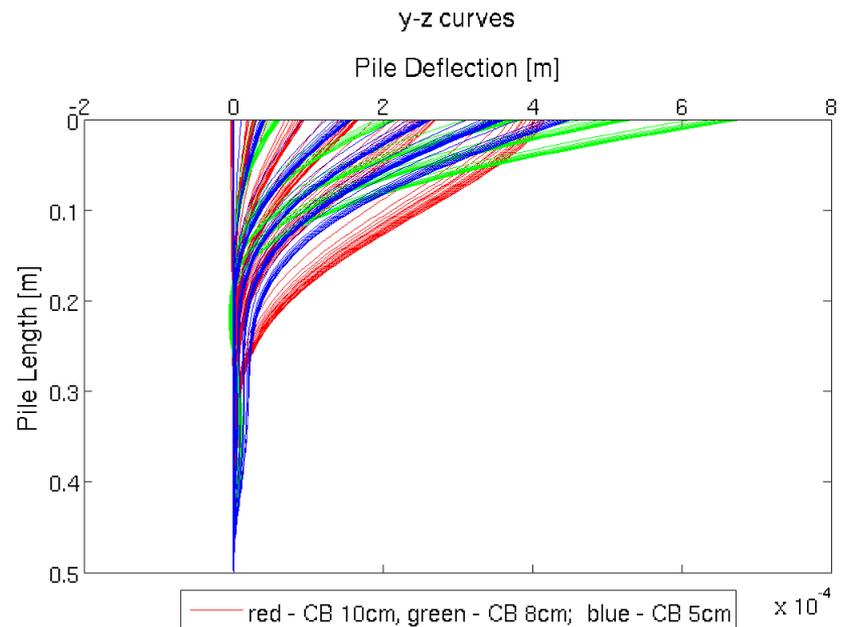
Problèmes rencontrés

- Déflexion initiale du pieu
- Performance du vérin vertical
- Réponse des capteurs de pression (tassement?)
- Réponse de l'accéléromètre 3ax sur le pieu instrumenté



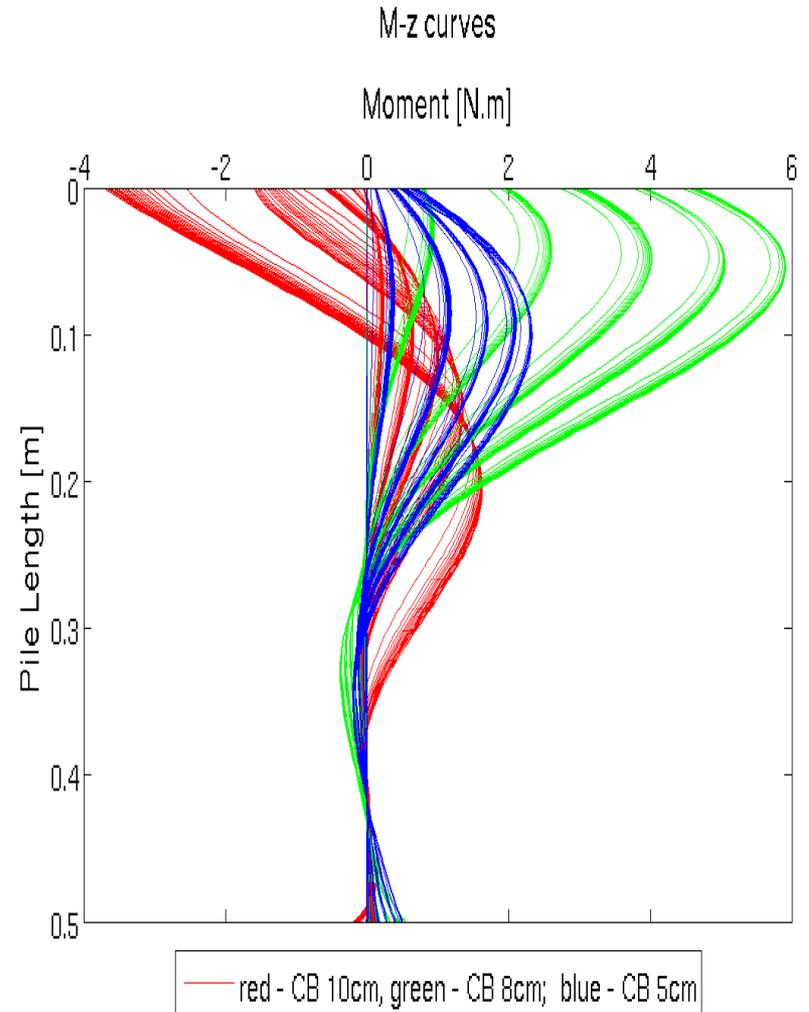
Conclusion (1)

- Les déflexions sous charge verticale statique sont faibles, et du même ordre quelque soit la hauteur de colonne (0.4 à 0.7mm)
- La profondeur jusqu'à laquelle le pieu est sollicité sous un chargement **vertical statique** est de l'ordre de 25cm (moitié de la hauteur). L'essai avec CB de 10cm semble devoir être répété.



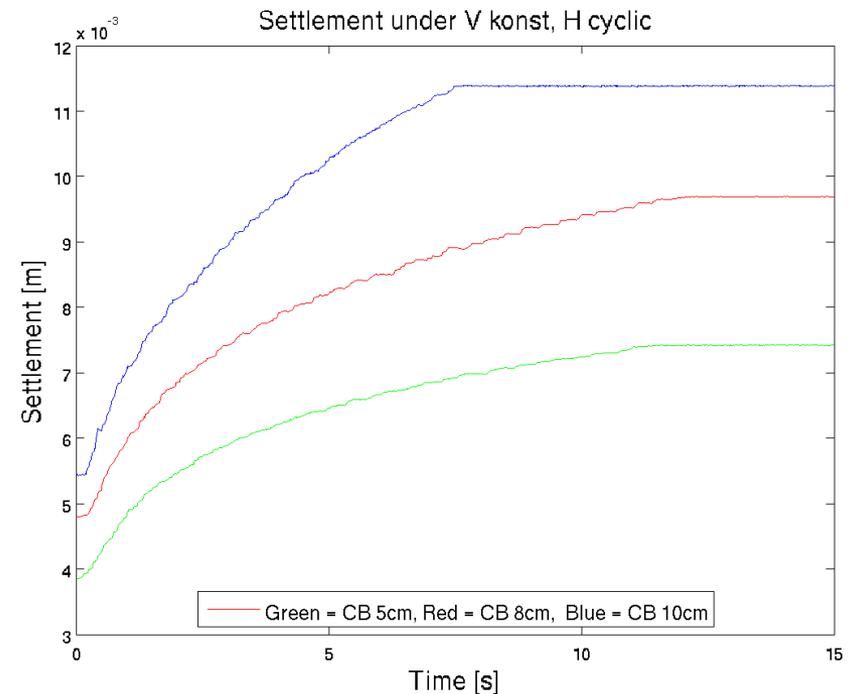
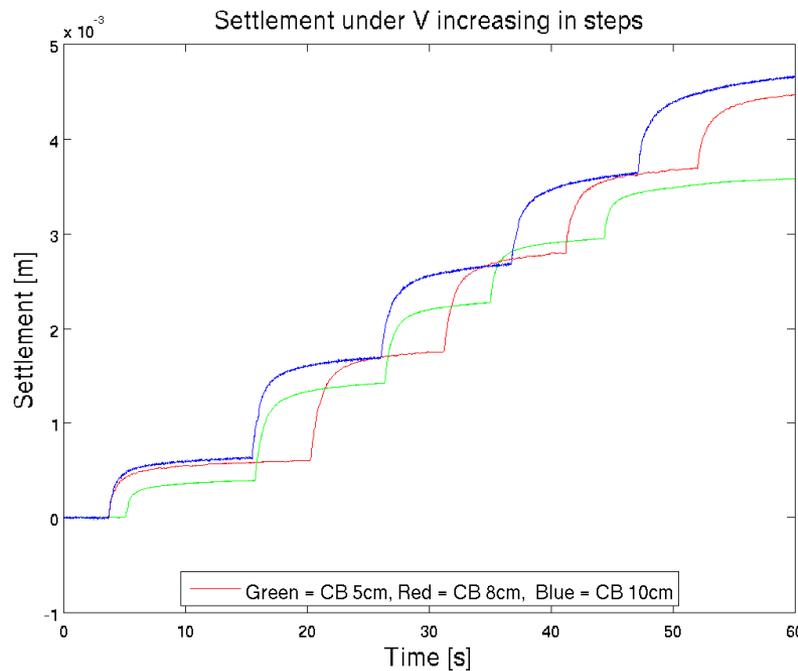
Conclusion (2)

- Une distribution du moment le long du pieu sous une **charge verticale** montre un moment négligeable en tête du pieu pour une configuration ayant une hauteur de colonne ballastée de 5cm.



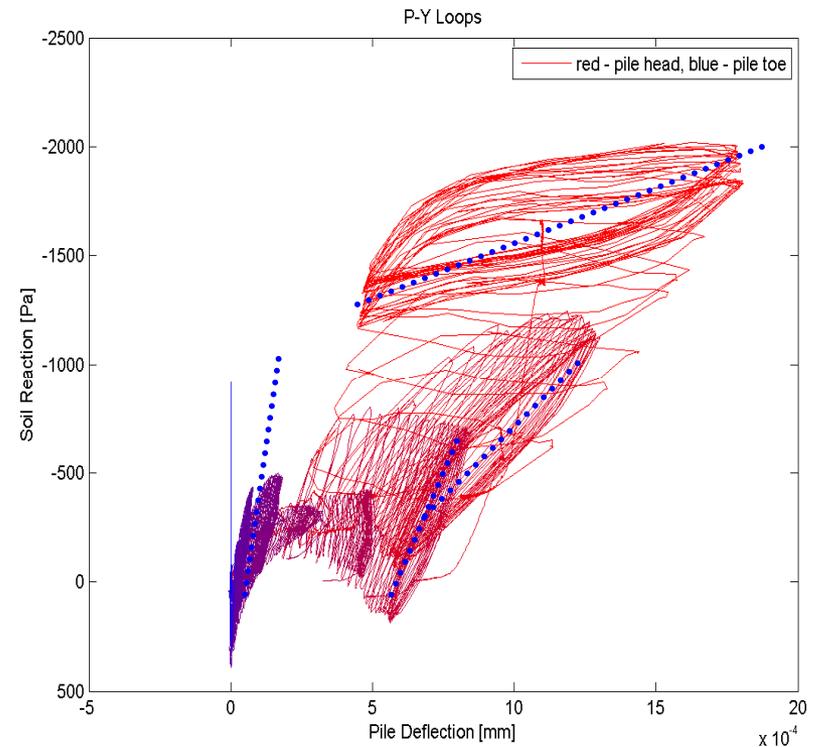
Conclusion (3)

- Le tassement est le plus importante pour CMM avec CB de 10cm (en statique et en dynamique)
- Le tassement de la fondation sous une sollicitation H cyclique augmente avec la hauteur de la CB.
- Les performances de CB=8cm et CB=10cm sous une charge V statique sont similaires



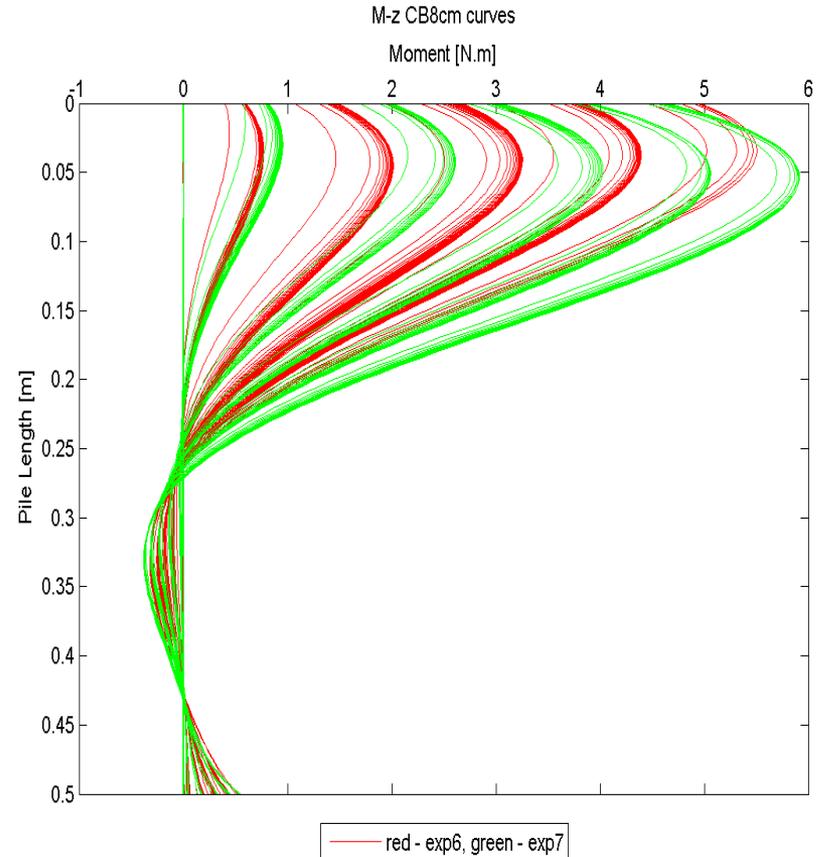
Conclusion (4)

- La rigidité sol-pieu augmente avec la profondeur
- La déflexion en tête du pieu due à un **chargement horizontal cyclique** est supérieure à celle causée par le chargement vertical statique imposé (1mm vs 0.5mm)
- L'amortissement calculé pour le système CB-argile semble montrer que environ 30-40% de l'énergie est dissipée par la CB. La valeur de ξ augmente avec la hauteur de la CB



Conclusion (5)

- Les essais doivent être répétés pour confirmer les résultats
- Répétabilité?



Merci pour votre attention

