Chargements cycliques axiaux de pieux modèles en chambre d'étalonnage

Analyse de la dégradation cyclique

Journée Technique Hommage au Professeur Pierre FORAY

Sols et fondations sous sollicitations statiques, cycliques et dynamiques

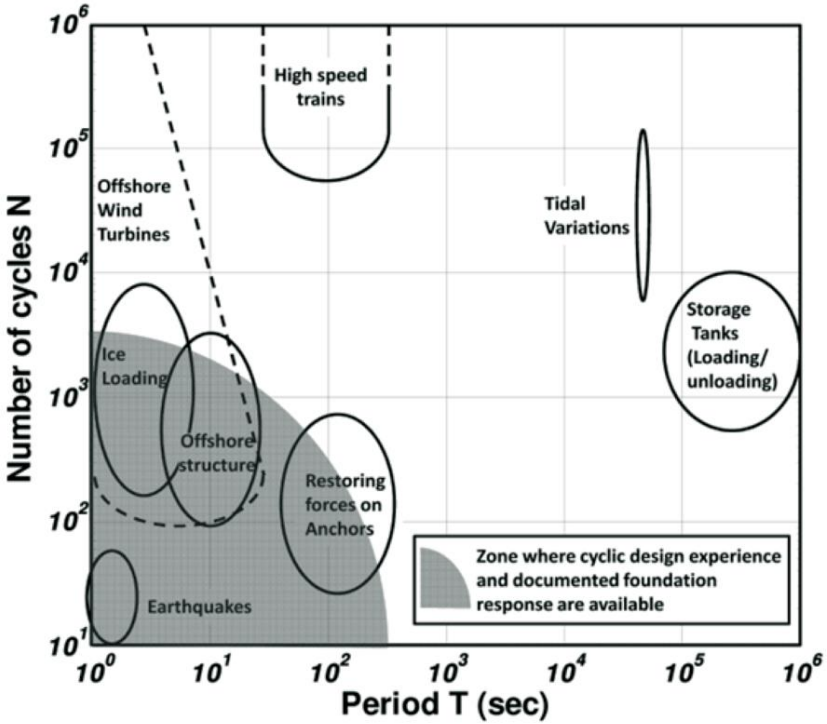
Matias Silva I.

Post-doc Laboratoire 3SR (ancien thésard de Pierre)

Université Grenoble-Alpes

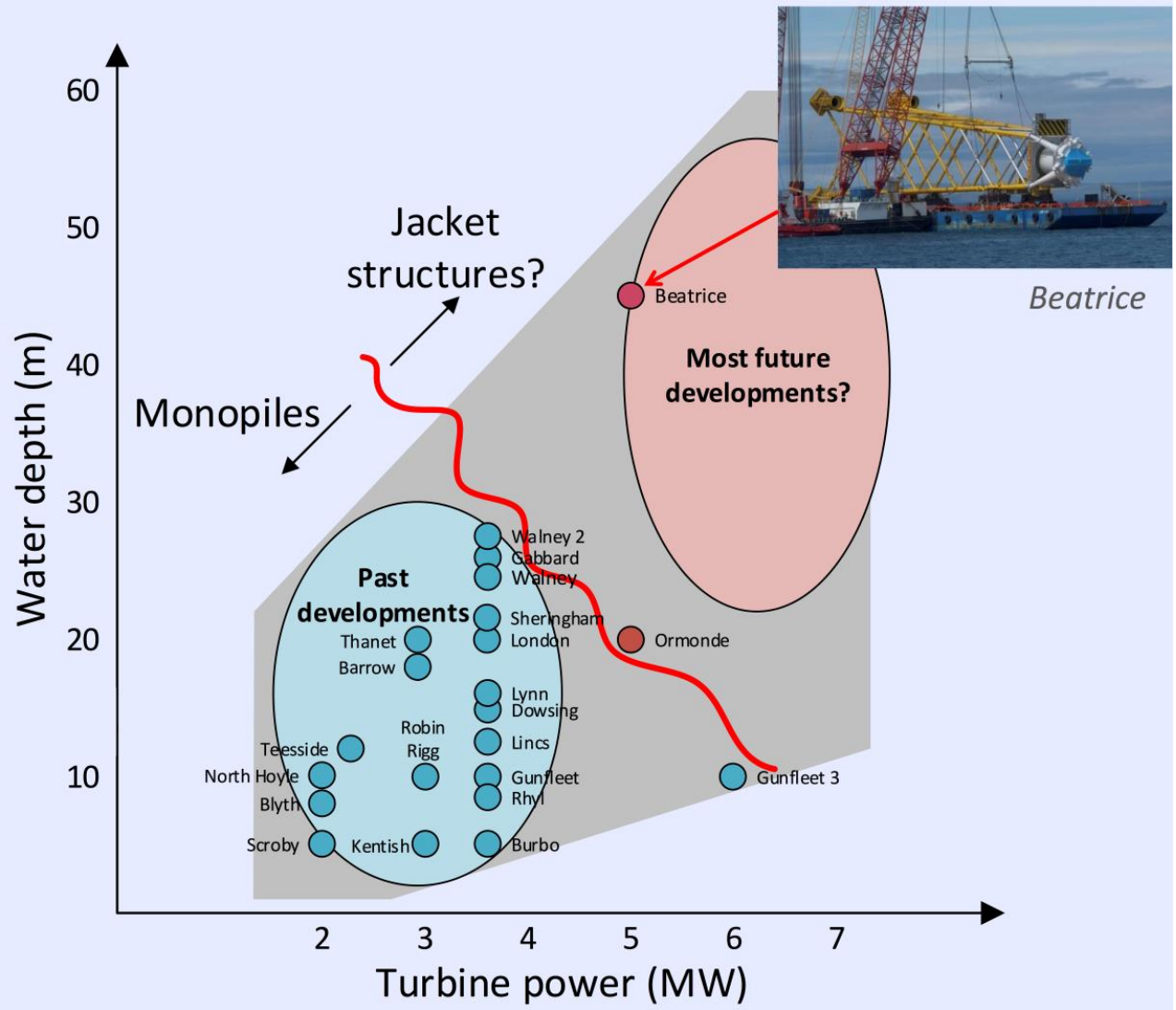
Pourquoi s'intéresse-t-on à la réponse cyclique des pieux?

- Les fondations offshore sont soumises à des chargements cycliques environnementaux ainsi qu'à des sollicitations opérationnelles,
- Elles sont aussi soumises à une grande quantité de cycles charge-décharge pendant leur installation,
- Sujet complexe à traiter → approche multi-échelles,
- Particulièrement important dans le cas des éoliennes → transmission des charges vers les fondations.



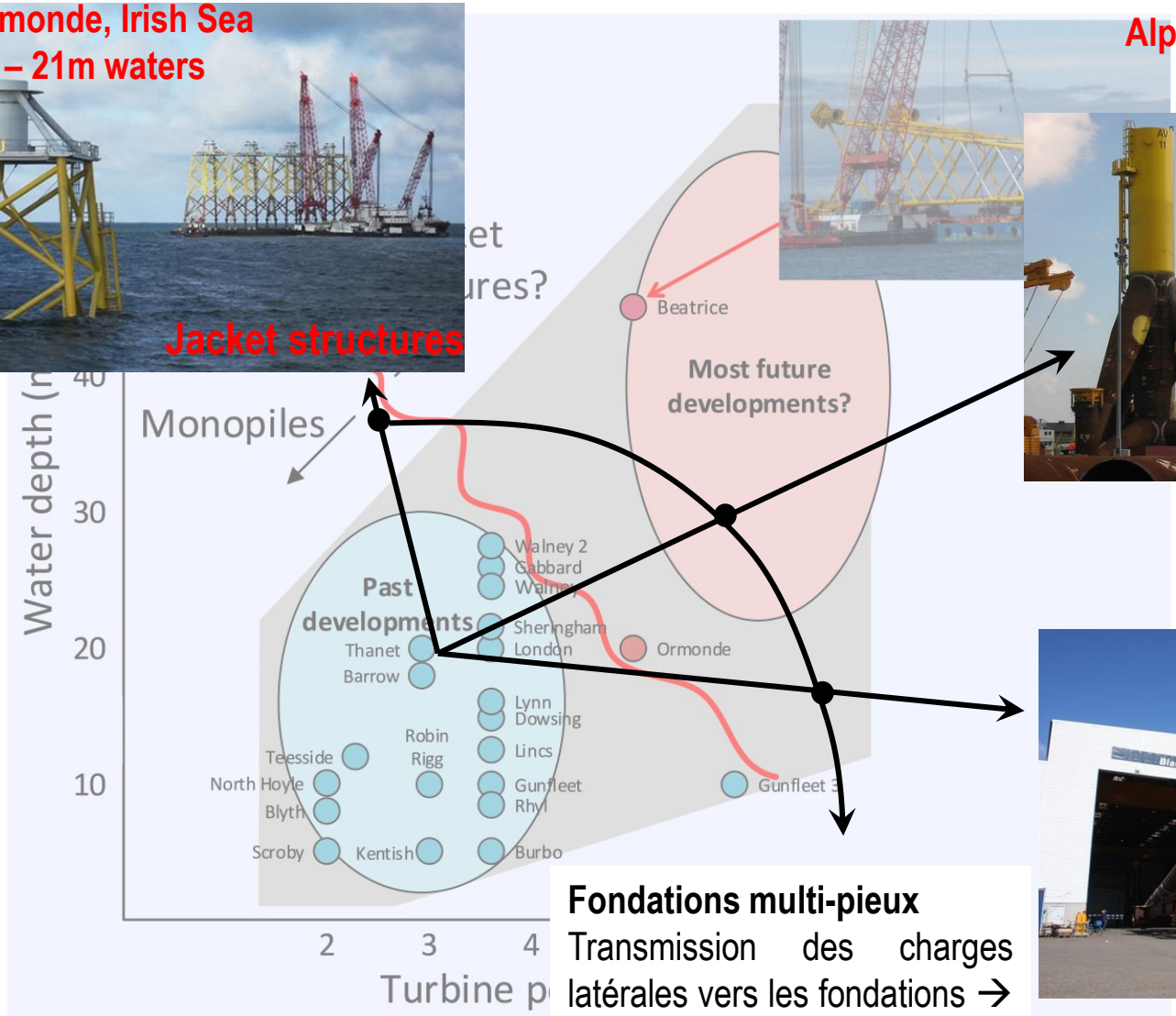
Periods and number of cycles characterising typical cyclic loading events. Andersen et al. 2013

Chargement cyclique en géotechnique offshore



Rankine Lecture 2014, *Interactions in Offshore Foundation Design*, Guy Houlsby.

Chargement cyclique en géotechnique offshore



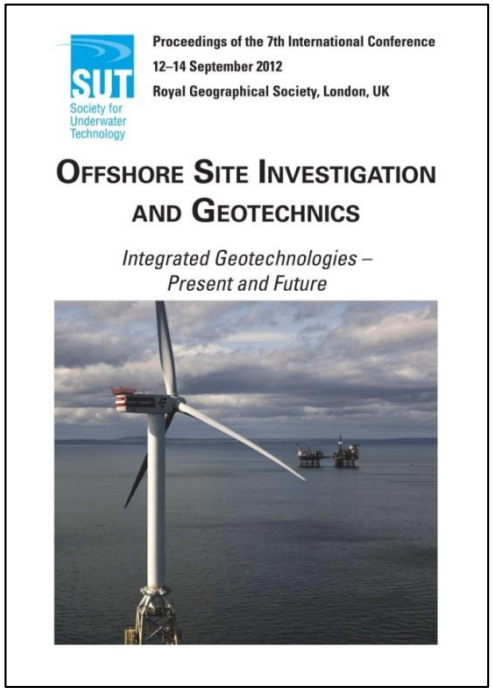
Alpha Ventus, North Sea
~30m waters

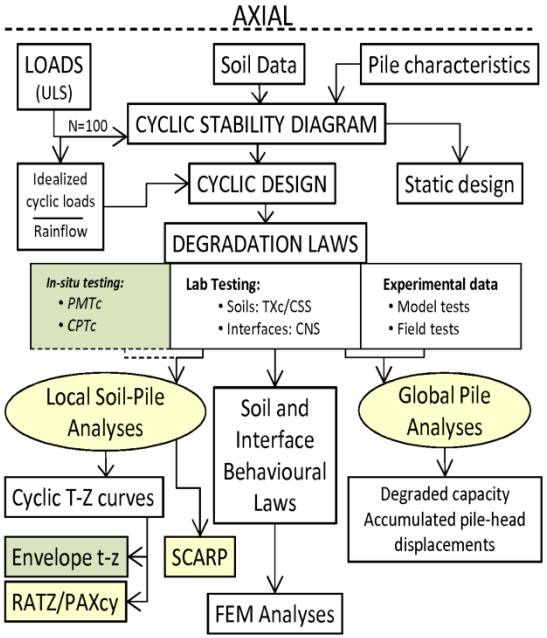
Hornsea, North Sea
30m+ waters

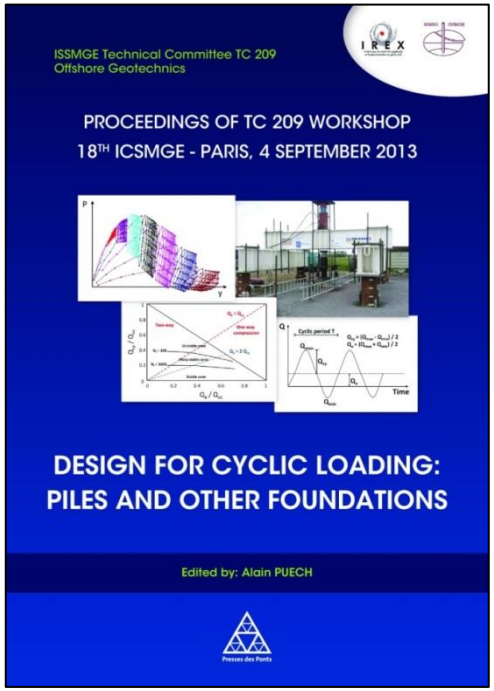
Fondations multi-pieux
Transmission des charges latérales vers les fondations → effet 'Push-pull'.

Rankine Lecture 2014, *Interactions in Offsho Design*, Guy Houlsby.

Quelle est l'importance de ce sujet? Est-il d'actualité?







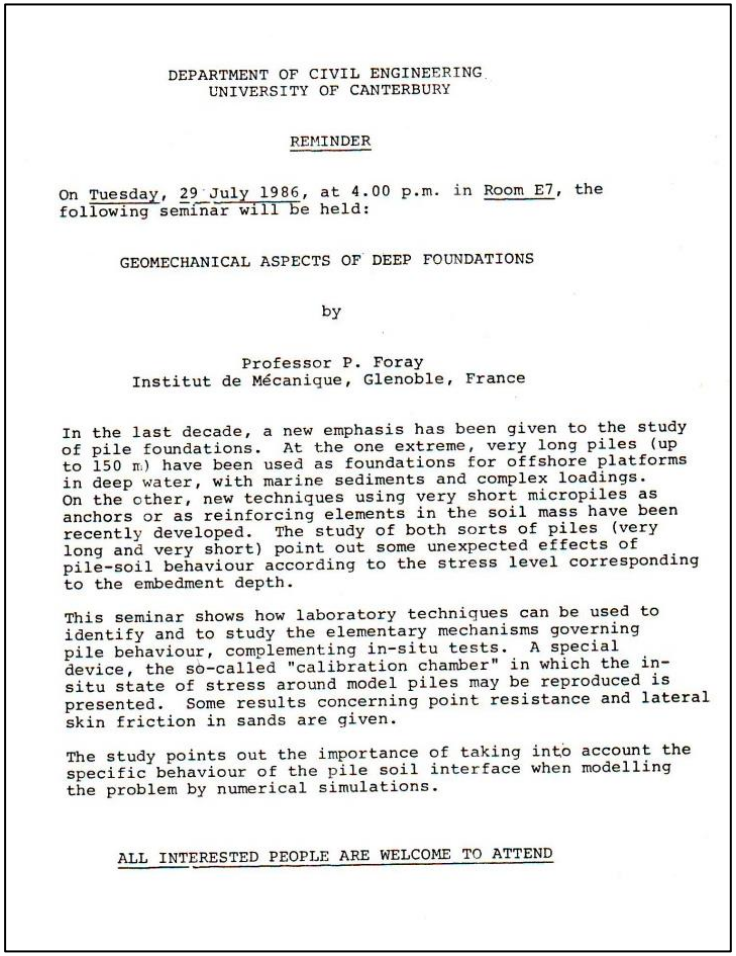
Flow chart for cyclic design for axially loaded piles. In yellow approach than can be applied in current practice. In green approaches requiring further development, after Jardine et al. 2012

- Randolph, M., & Cassidy, M. (2005). *Challenges of offshore geotechnical engineering*. *Proceedings of the international conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Vol. 16. No. 1.
- *Geo*technique Lecture 2011, *Foundation Design of Offshore Wind-Turbines*, Byron Byrne.
- Projet National *SOLCYP*, *Comportement des pieux soumis à des sollicitations cycliques. http://www.pnsolcyp.org/*
- Rankine Lecture 2014, *Interactions in Offshore Foundation Design*, Guy Houlsby.

Comment peut-on faire pour mieux comprendre ce sujet?

Les chargements cycliques axiaux

La célèbre équipe MASTEC!!



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
UNIVERSITY OF CANTERBURY

REMINDER

On Tuesday, 29 July 1986, at 4.00 p.m. in Room E7, the following seminar will be held:

GEOMECHANICAL ASPECTS OF DEEP FOUNDATIONS

by

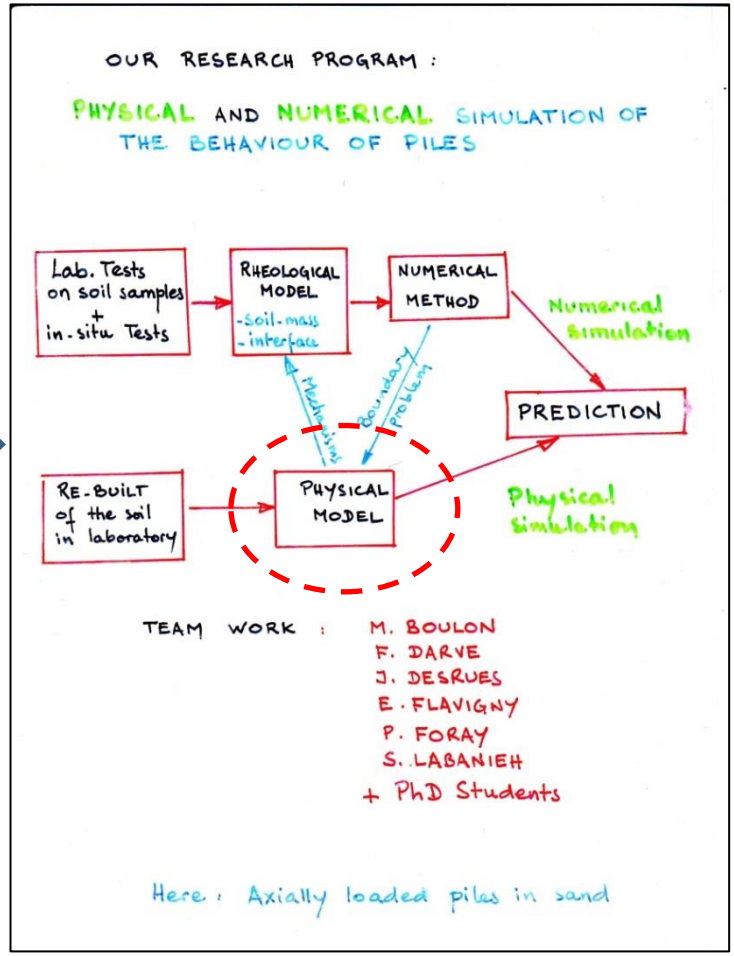
Professor P. Foray
Institut de Mécanique, Glenoble, France

In the last decade, a new emphasis has been given to the study of pile foundations. At the one extreme, very long piles (up to 150 m) have been used as foundations for offshore platforms in deep water, with marine sediments and complex loadings. On the other, new techniques using very short micropiles as anchors or as reinforcing elements in the soil mass have been recently developed. The study of both sorts of piles (very long and very short) point out some unexpected effects of pile-soil behaviour according to the stress level corresponding to the embedment depth.

This seminar shows how laboratory techniques can be used to identify and to study the elementary mechanisms governing pile behaviour, complementing in-situ tests. A special device, the so-called "calibration chamber" in which the in-situ state of stress around model piles may be reproduced is presented. Some results concerning point resistance and lateral skin friction in sands are given.

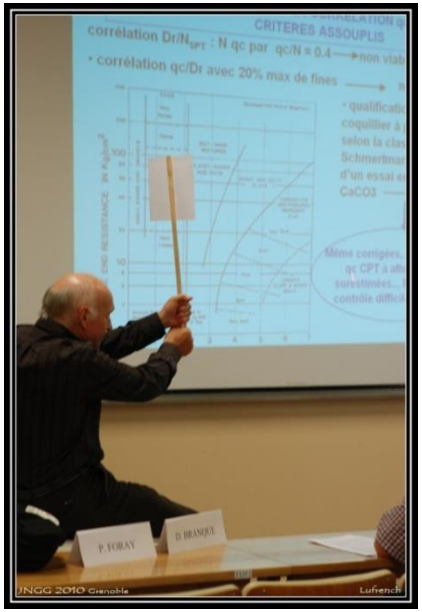
The study points out the importance of taking into account the specific behaviour of the pile soil interface when modelling the problem by numerical simulations.

ALL INTERESTED PEOPLE ARE WELCOME TO ATTEND



D'abord on doit comprendre que le comportement des pieux en sable a besoin d'une approche intégrale, **et surtout…**

Cours ‘Ouvrages géotechniques’, Master International, Grenoble 2008*

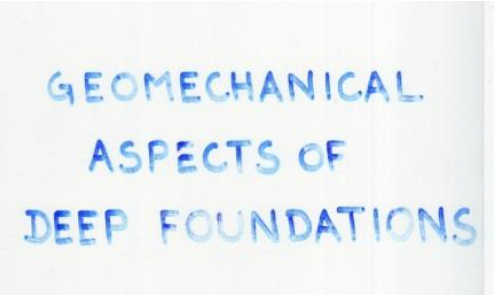


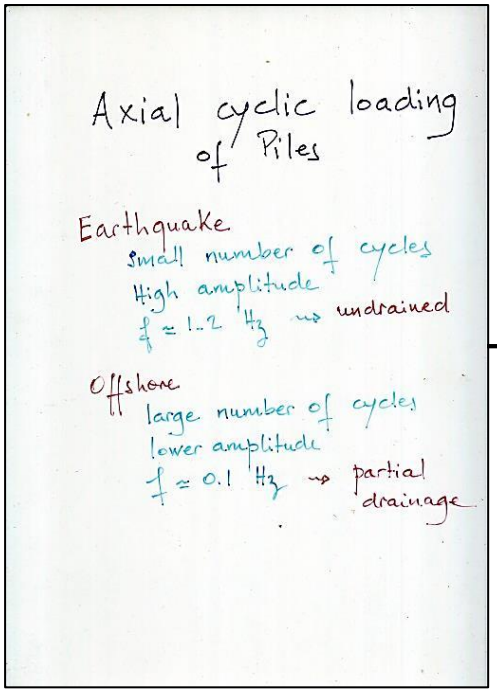
JNGG2010, Grenoble

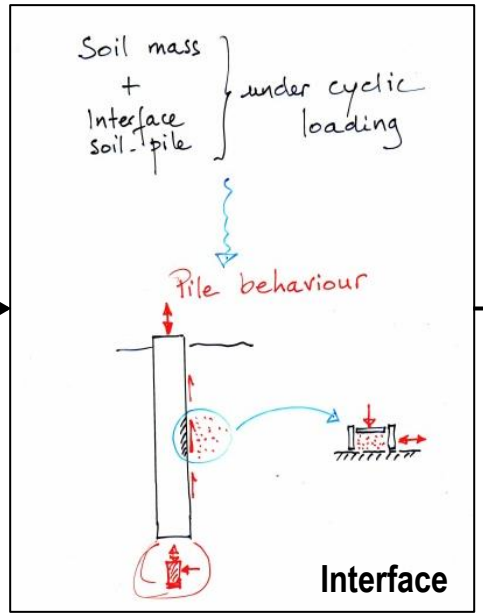
… beaucoup d’expérience!

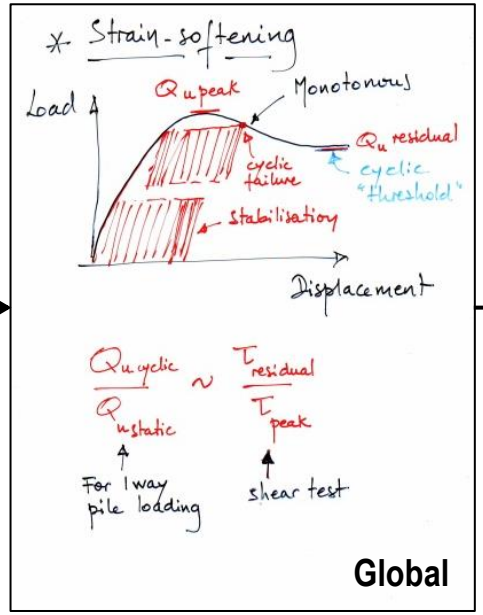
*J’ai presque raté son examen final!

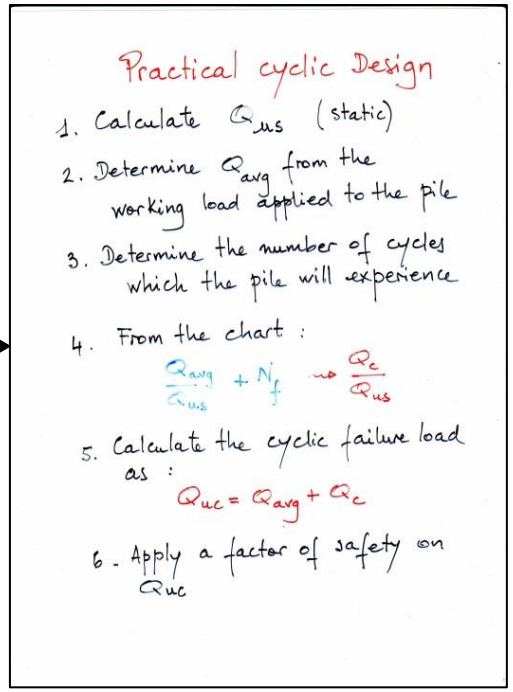
Les chargements cycliques axiaux



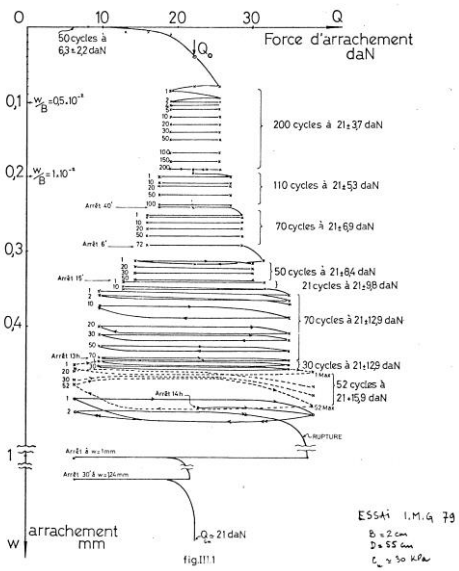


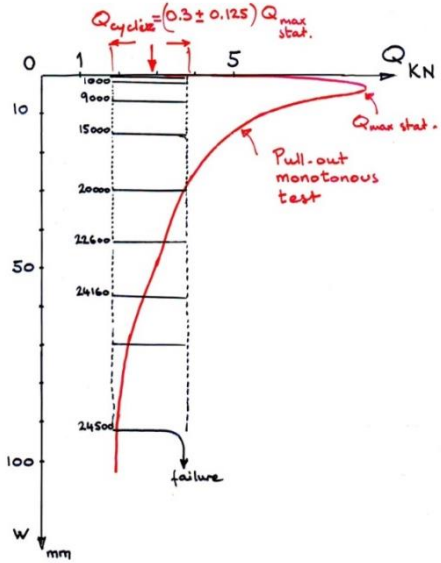






Transparents du cours 'Fondations Profondes', P. Foray
University of Canterbury, New Zealand, Mai 1996



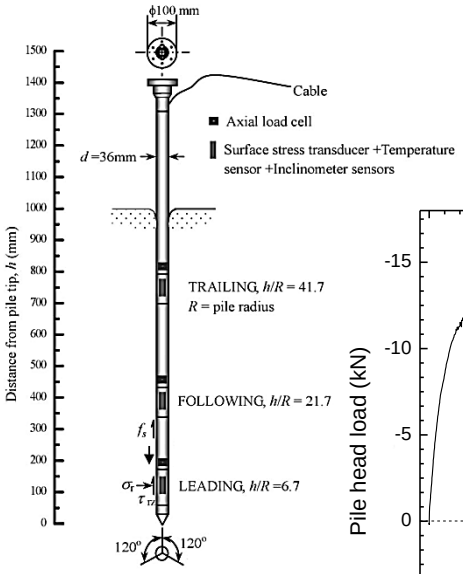


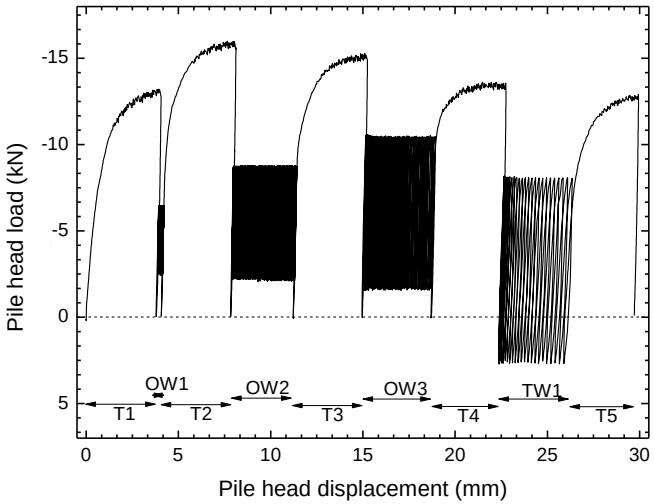
1977-1979

- Institut de Mécanique de Grenoble – ELF,
- Reproduire l'essai in-situ de ***Plancoët,***
- Pieu moulé, Dr = 70%,
- Pieu modèle de 55 mm de diamètre,
- 5 niveaux de jauges,
- 3 niveaux de mesure de contrainte normale,
- 6 capteurs de contrainte totale dans le sol,
- Chambre d'étalonnage diamètre 1.5 m et hauteur 2.0 m (présentation J. Desrues),
- 1 essai à 20000 cycles,
- 3 séries d'essais entre 100 et 300 cycles.

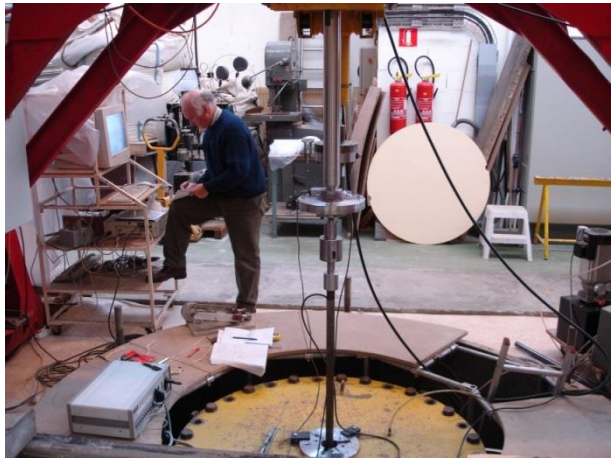
2007-2014

- Laboratoire 3SR, Imperial College London, Total, ANR SOLCYP,
- Reproduire les essais in-situ de ***Dunkerque,***
- Pieu foncé et battu, Dr=60-70%,
- Pieu modèle de 36 mm de diamètre,
- Plus de 60 essais cycliques,
- 3 niveaux avec mesure de contrainte normale et de cisaillement →***chemins de contraintes,***
- 12-36 capteurs de contrainte totale dans le sol,
- Chambre d'étalonnage diamètre 1.2 m et hauteur 1.4 m (présentation J. Desrues).

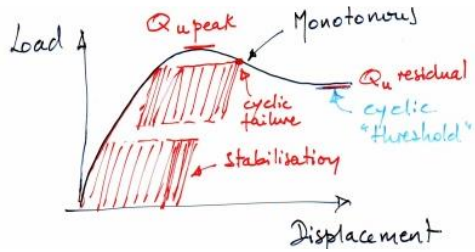


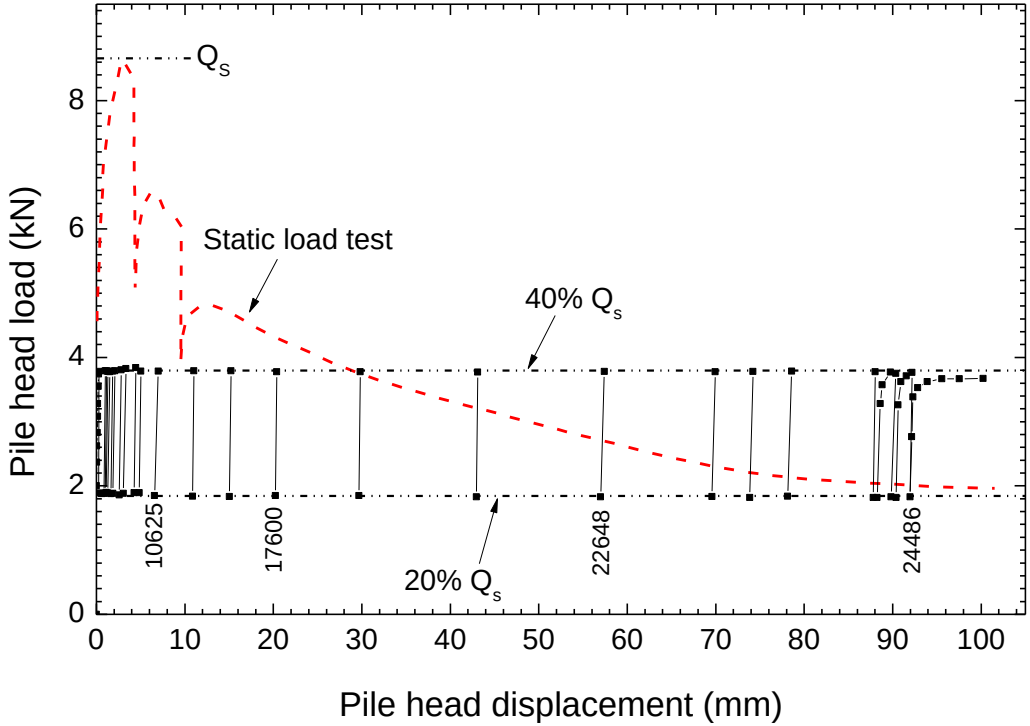


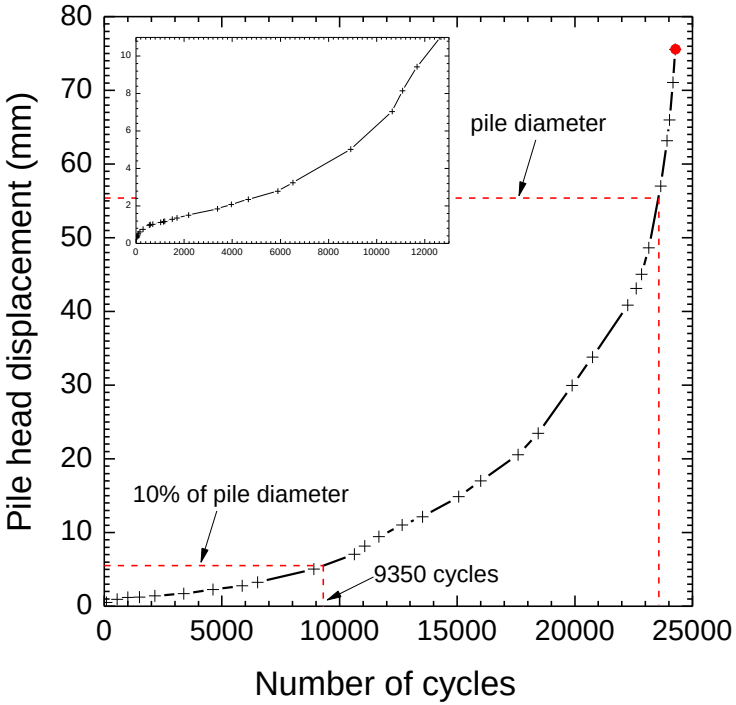
On se met au travail! On commence nos essais



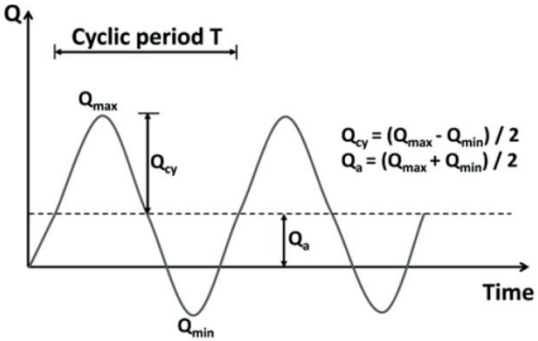
Les essais 1977-1979





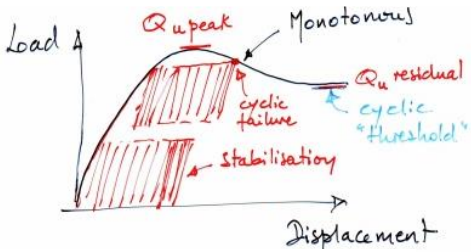


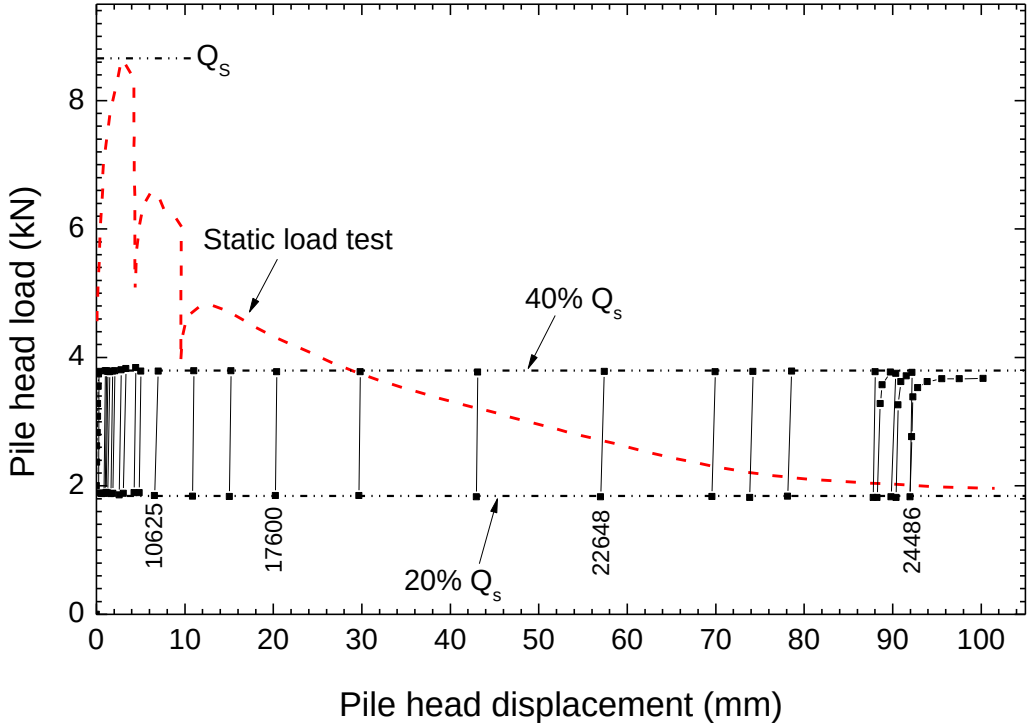
- Pieu moulé de 55 mm de diamètre
- Sable d'une densité forte, 70%

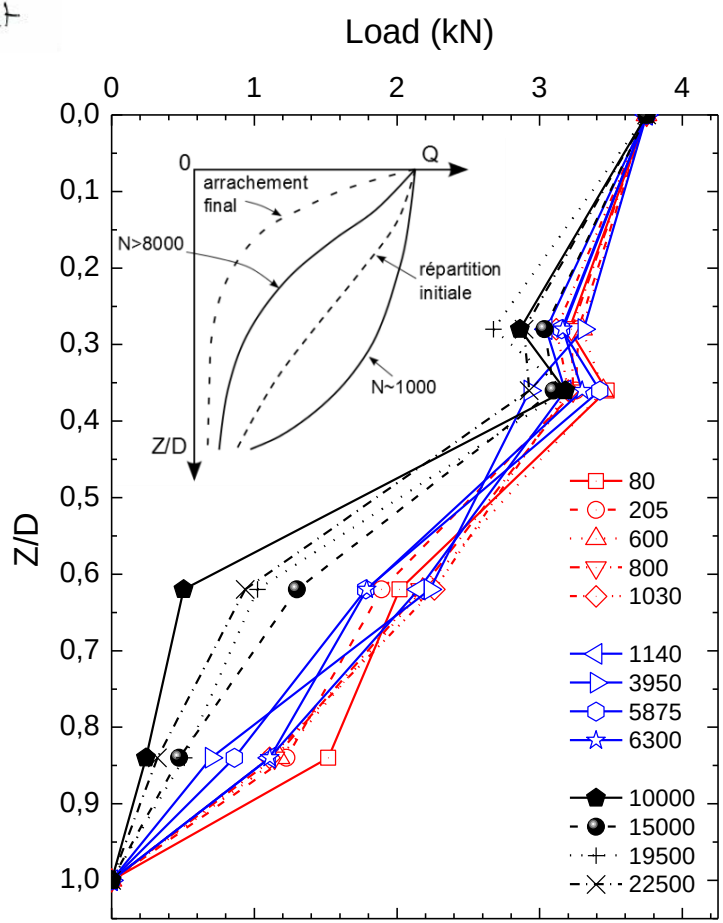


Définition des paramètres de chargement cyclique

Les essais 1977-1979





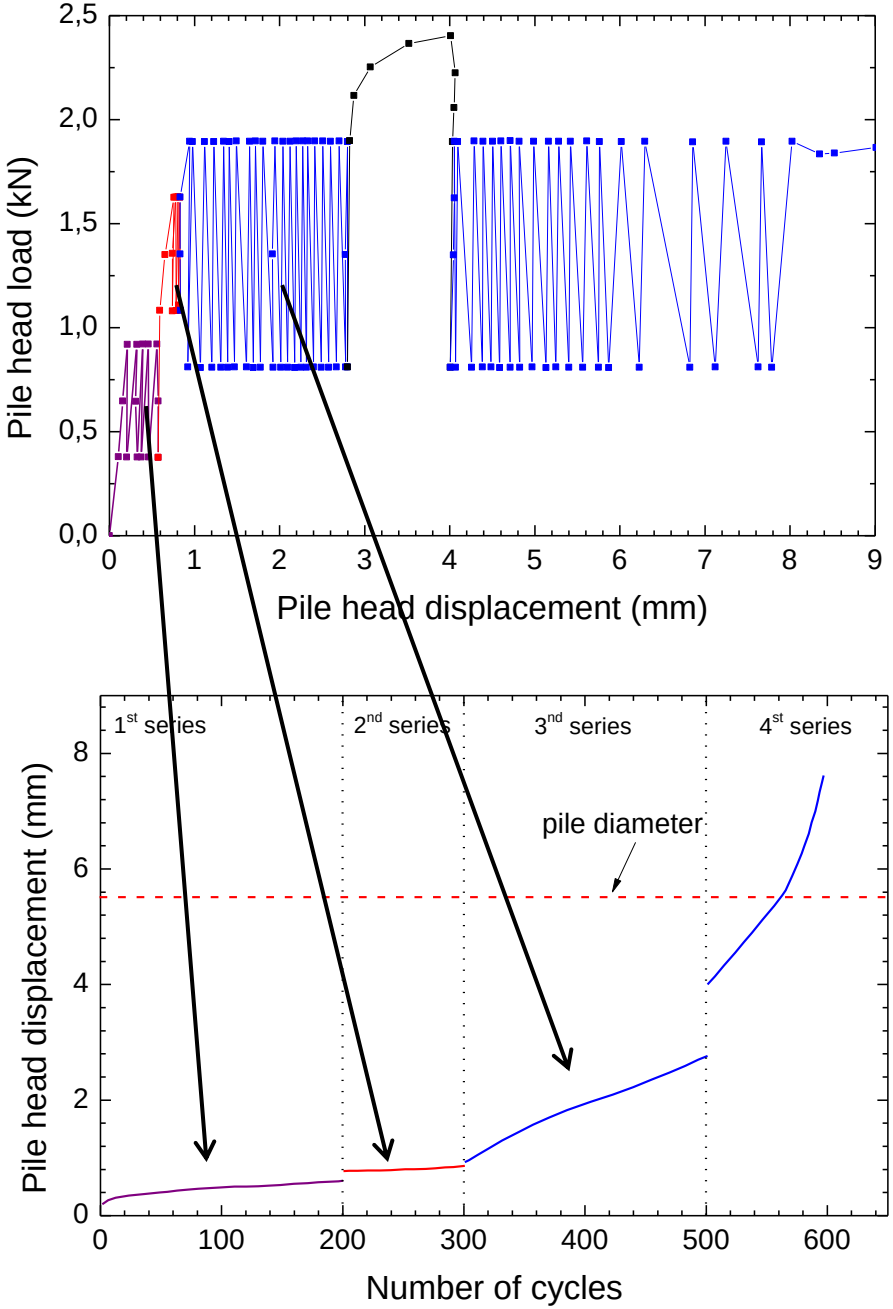


- Pieu moulé de 55 mm de diamètre
- Sable d'une densité forte, 70%

Les essais 1977-1979

- Pieu moulé de 55 mm de diamètre
- Sable d'une densité faible, 30%

- Le taux de déformation permanent est en relation avec les paramètres de charge cyclique imposés
- Le taux de déformation est très sensible aux variations de l'amplitude cyclique
- Introduction du concept de 'Stabilité'



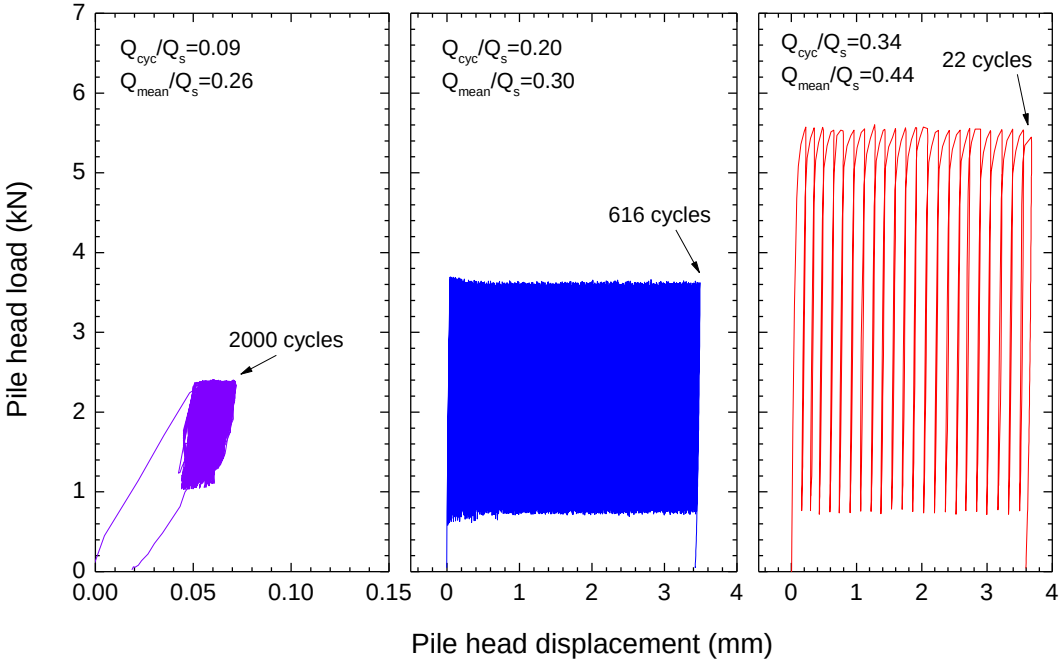
Quelques conclusions partielles

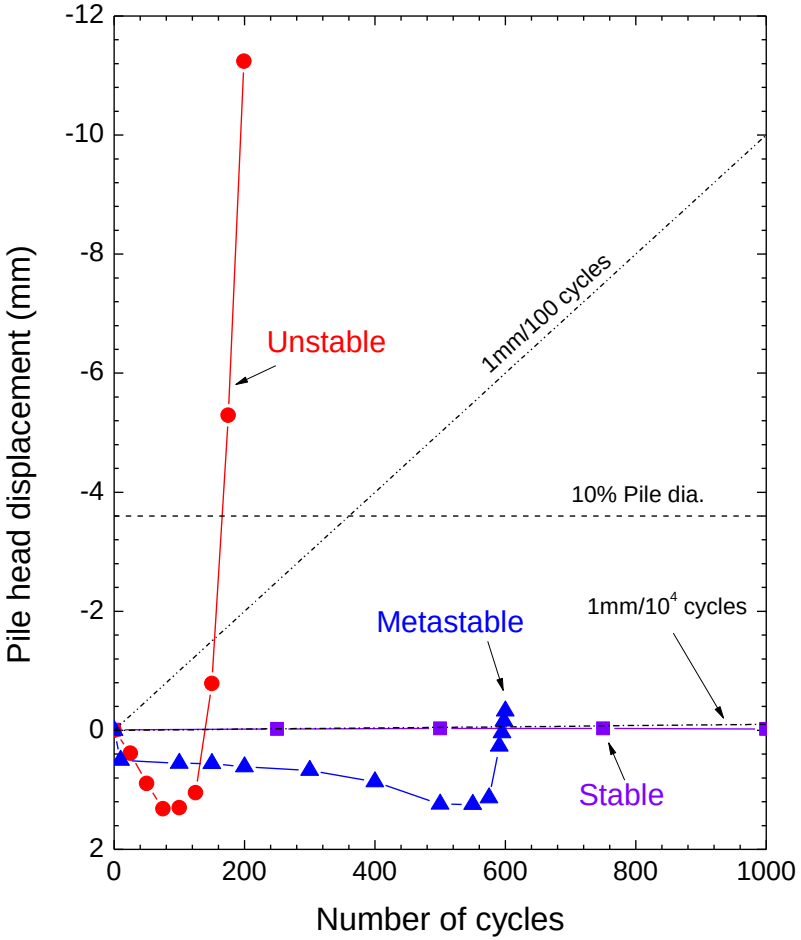
- La réponse à l'arrachement est fortement influencée par l'effet des chargements cycliques axiaux.
- Le taux de déplacement permanent en tête du pieu augmente de façon progressive.
- La répartition de charge, et l'évolution des contraintes de cisaillement le long du fût, est en relation avec le processus de cyclage.
- On constate une certaine valeur 'limite' suite à laquelle la rupture cyclique semble irréversible.
- On introduit une idée de '*stabilité*'.

…on continue nos essais

Essais 2007-2014, SOLCYP

Types de réponse

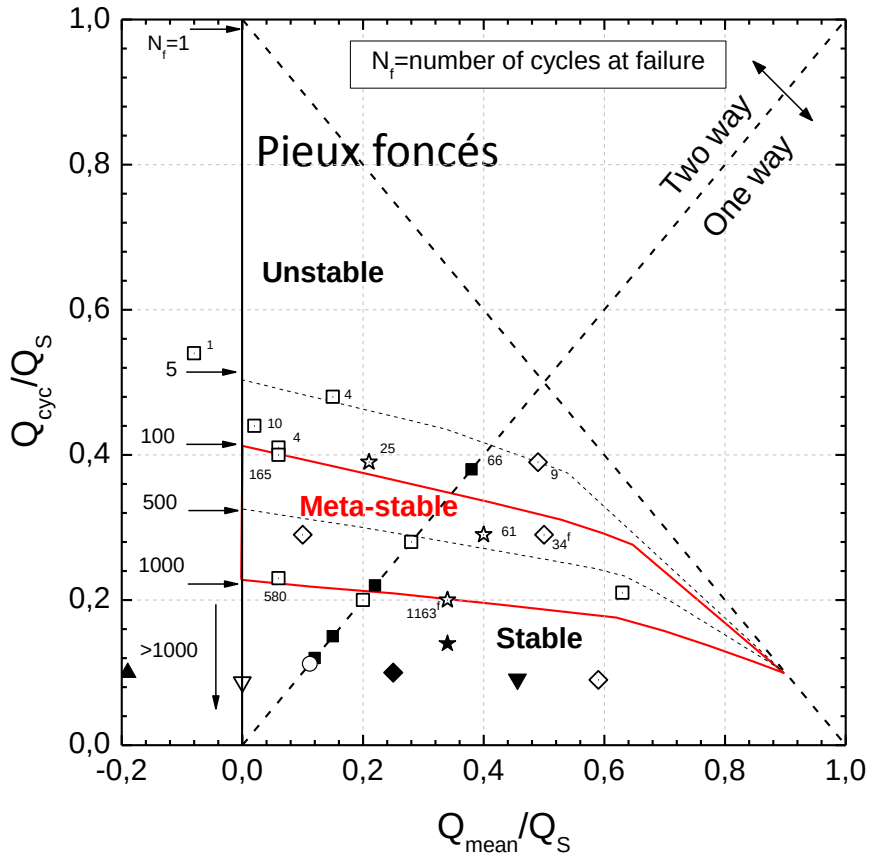


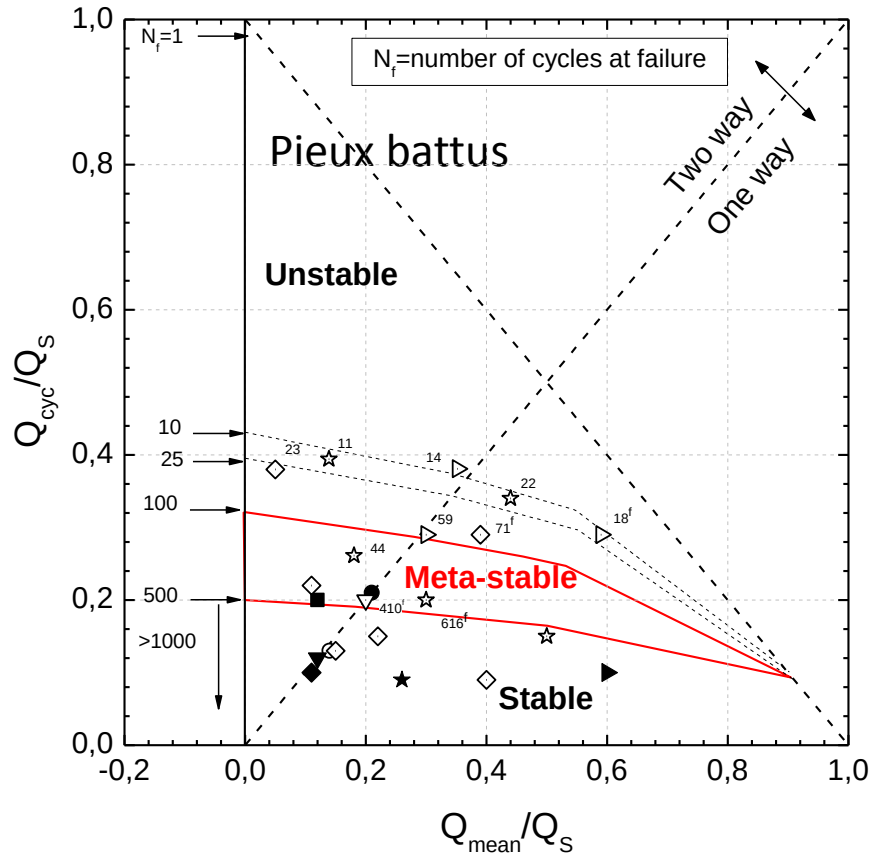


- Nous pouvons identifier trois types de réponses aux chargements cycliques: Stable, Meta-Stable et Instable
- Les cycles 'Stables' montrent de très lents taux de déformation presque constant dans le temps→ grand nombre de cycles
- Sensibilité importante à l'amplitude cyclique

Essais 2007-2014, SOLCYP

Diagrammes de stabilité cyclique

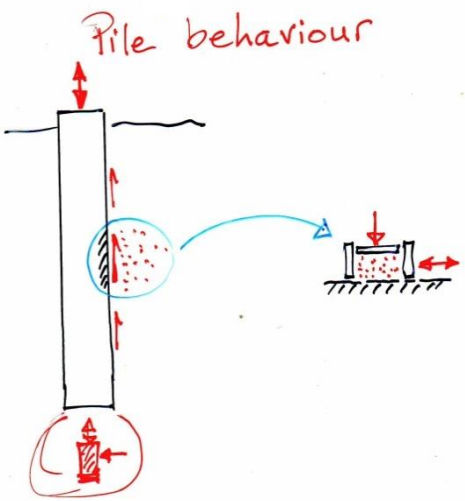




- **Stable:** Pas de rupture cyclique après > 1000 cycles? ~ Q_{cyc} < 20% Q_s
- **Meta-stable:** Rupture cyclique potentielle entre 100 et 1000 cycles
- **Instable:** Rupture cyclique en moins de 100 cycles

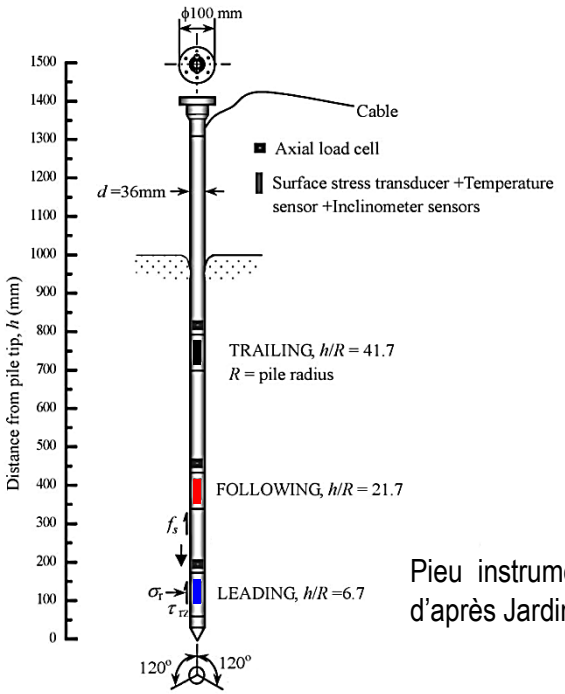
Essais 2007-2014, SOLCYP

Réponse de l'interface

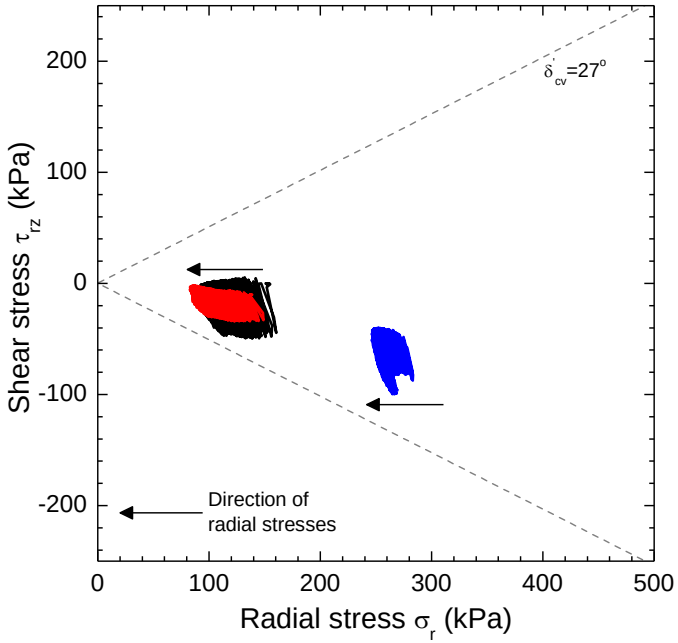


Mesure des chemins de contraintes à l'interface sol-pieu

Analogie avec des essais de laboratoire (Présentation Marc Boulon)

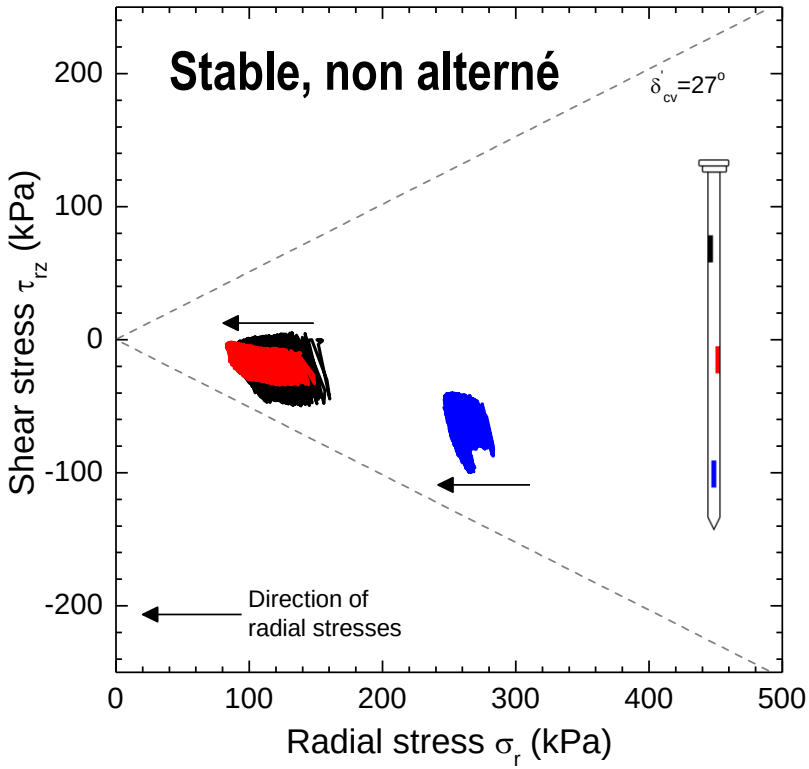


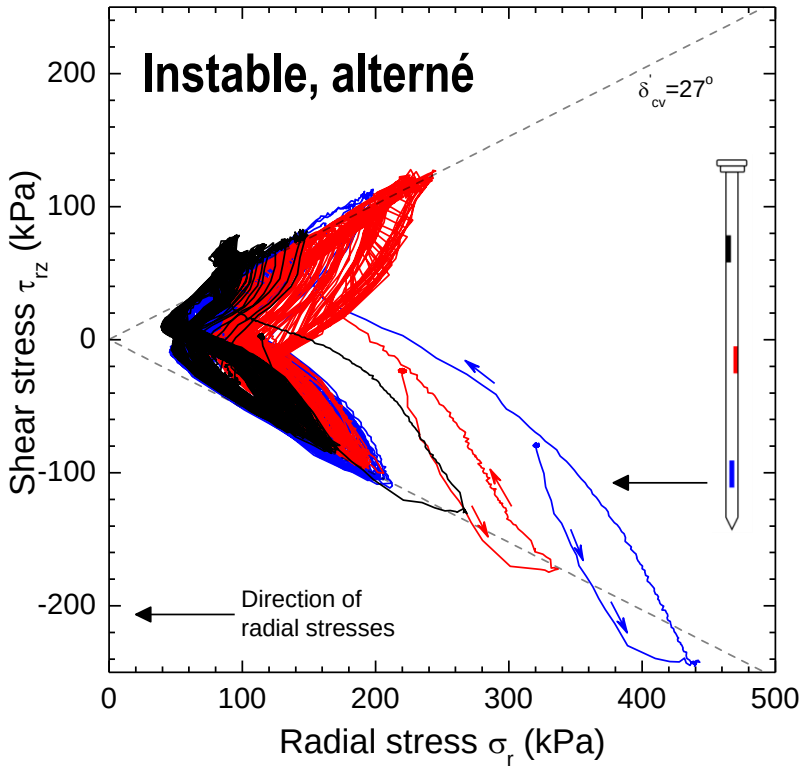
Pieu instrumenté Mini-ICP, d'après Jardine et al. 2009



Essais 2007-2014, SOLCYP

Réponse de l'interface



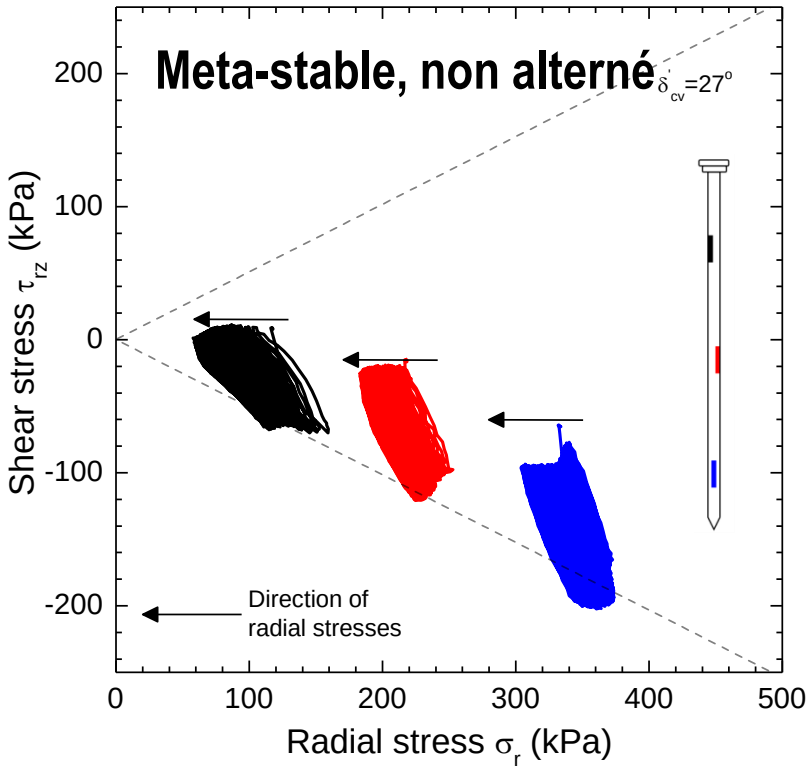


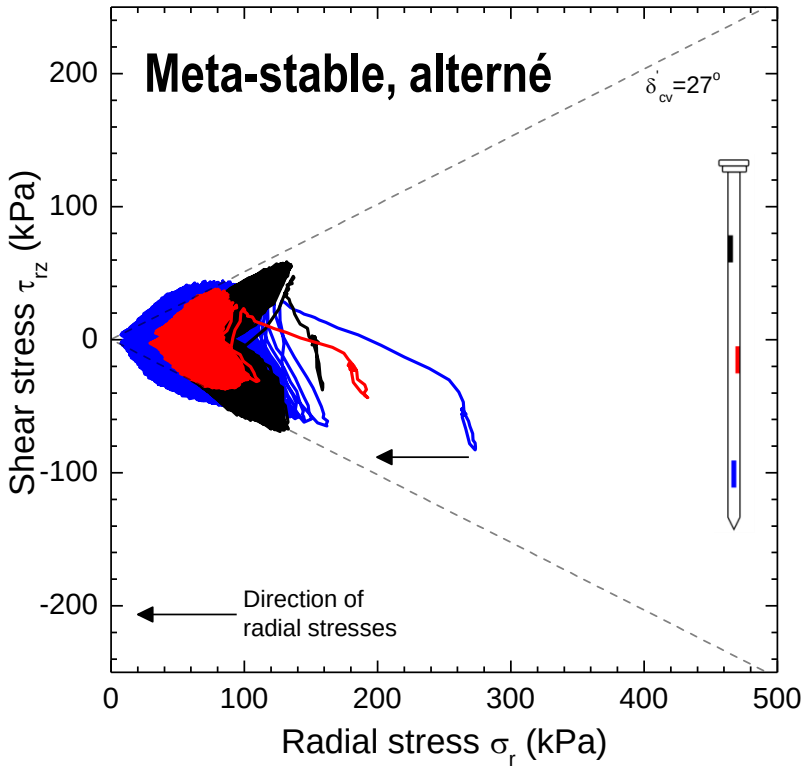
- Chemin de contrainte presque vertical éloigné de la ligne de rupture de l'interface, contraction des contraintes radiales
- Possible amélioration de la capacité à l'arrachement

- Forte contraction des contraintes radiales, la totalité du fût atteint la rupture
- Dégradation de la capacité à l'arrachement

Essais 2007-2014, SOLCYP

Réponse de l'interface

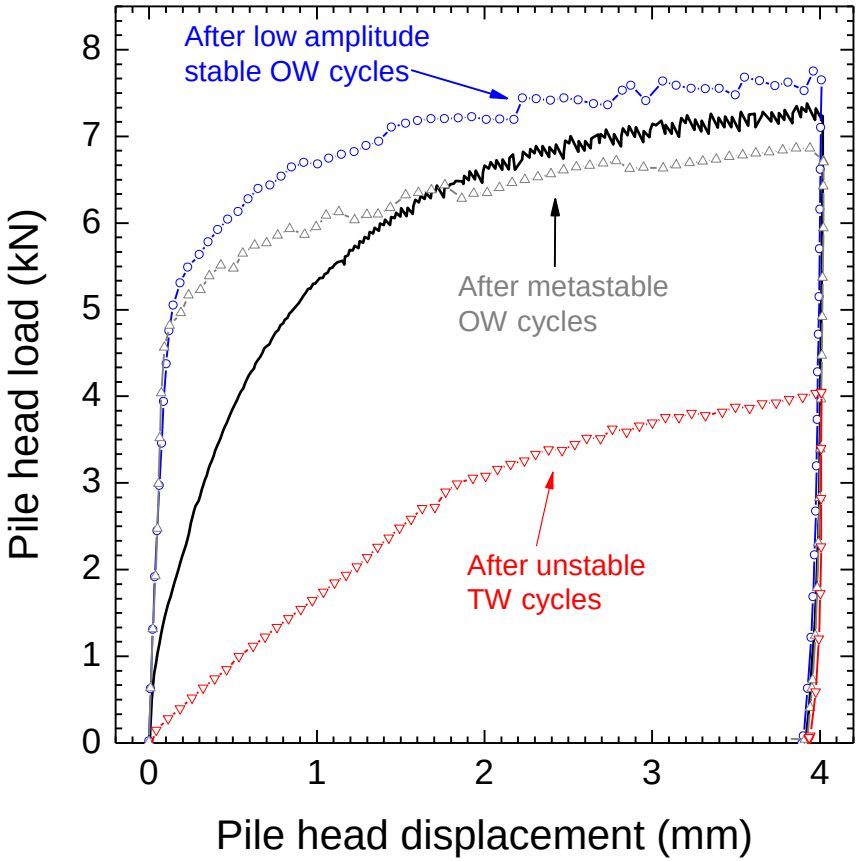




- Contraction progressive des contraintes radiales→ rupture progressive et locale
- Possible dégradation de la capacité à l'arrachement

Essais 2007-2014, SOLCYP

Effets de cycles sur la capacité à l'arrachement

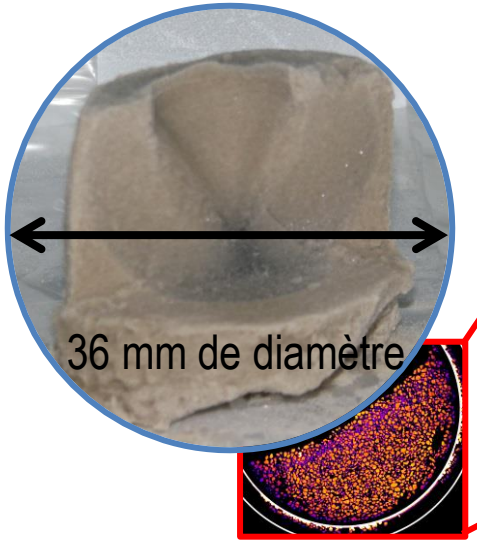


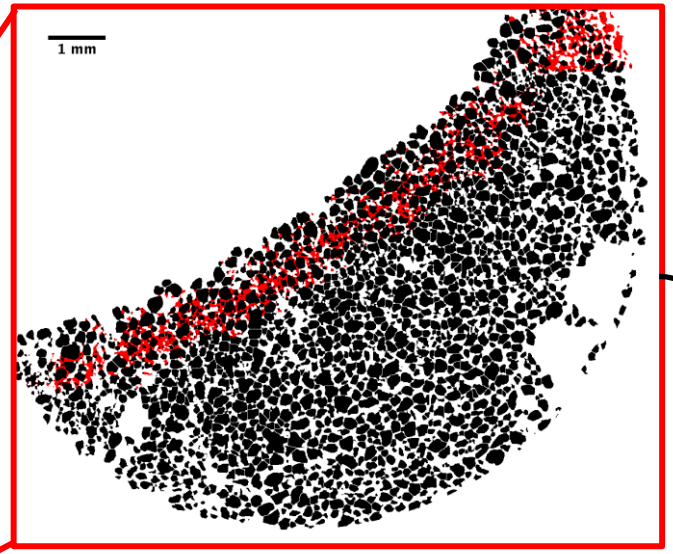
- Les essais stables de faible amplitude purement en tension peuvent induire une amélioration de la capacité à l'arrachement
- Confirmation des résultats obtenus dans le terrain, Jardine et al. 2006
- L'interface montre une réponse plus dilatante → réarrangement des grains, densification locale
- L'analyse de l'interface joue un rôle très important!!!

…et en parlant des interfaces?

Essais 2007-2014, SOLCYP

Réponse de l'interface





Coupe d'un échantillon récupéré depuis l'interface du pieu→ tomographie à rayon-X

Interface acier- sable suite à des essais 'Ring shear' d'après Barmpopoulos et al. (2010), Ho et al. (2011)

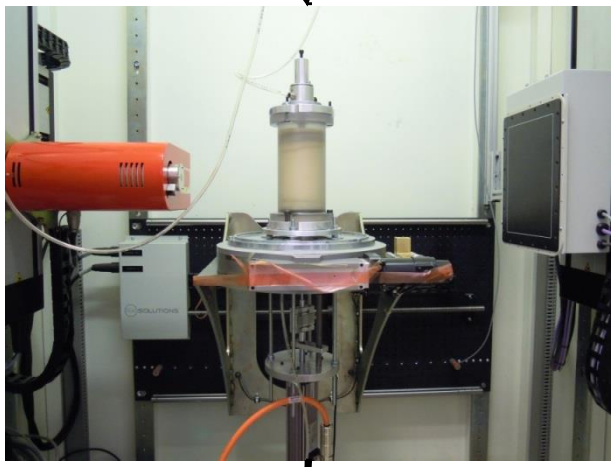
Terrain?

L'interface pieu-sol joue un rôle fondamental dans la réponse cyclique.

Conclusions

- La réponse cyclique des pieux peut être caractérisée en trois types: Stable, Meta-Stable et Instable.
- La rupture cyclique de pieux montre un mode Top-to-Down. La rupture se propage depuis la tête du pieux le long du fût.
- Des améliorations potentielles jusqu'à 20% de la capacité à l'arrachement suite à des cycles non-alternés (tension) de faible amplitude ($Q_{cyclic} < 27\% \ Q_s$).
- Cette augmentation de la capacité est actuellement attribuée à une dilatance améliorée (densification locale).
- Au cours du cyclage Métastable on observe un taux modéré de dégradation de la capacité en raison de la contraction des contraintes radiales conduisant à une rupture locale.
- Dans le cas des cycles Instables on observe une dégradation rapide de la capacité suite à une réduction plus importante des contraintes radiales menant à une rupture le long du fût.
- L'historique de chargement cyclique reste un sujet à analyser.

Perspectives



de la Macro à la Micro et vice versa

Merci!
… et merci profe!