

PROJET SOLCYP : PROGRAMME ET OBJECTIFS DES ESSAIS DE CHARGEMENT AXIAUX SUR DES PIEUX IN SITU, EN CENTRIFUGEUSE ET EN CHAMBRE D'ÉTALONNAGE

SOLCYP PROJECT : EXPERIMENTAL PROGRAM AND OBJECTIVES OF AXIAL PILE LOAD TESTS IN SITU, CENTRIFUGE AND CALIBRATION CHAMBER TESTS

Alain LE KOUBY¹, Alain PUECH², Luc THOREL¹, Matthieu BLANC¹, Matias SILVA³, Jean CANOU⁴, Jean Claude DUPLA⁴

¹ IFSTTAR, Paris & Nantes, France

² Fugro GeoConsulting, Nanterre, France

³ Laboratoire 3SR, Grenoble, France

⁴ Ecole des Ponts ParisTech, laboratoire Navier, Champs sur Marne, France

RÉSUMÉ – L'objectif ultime du projet SOLCYP (SOLlicitations Cycliques sur les Pieux) est de proposer des recommandations sur la prise en compte des cycles dans le dimensionnement des pieux. Il a été décidé d'établir une base de données d'essais pour caractériser la réponse d'un pieu sous chargement cyclique en termes d'accumulation des déplacements et d'évolution de la capacité portante (plus précisément du frottement latéral et de la résistance en pointe). Deux sols de référence ont été choisis : une argile surconsolidée et un sable.

ABSTRACT – One of the main objective of the SOLCYP project is to provide design recommendations on pile response submitted to cyclic loading. A database of cyclic loading pile tests in terms of cumulative displacements and bearing capacity evolution (in particular shaft friction and tip resistance) has been created from *in situ* and laboratory tests. Two reference soils were chosen : an overconsolidated clay and a sand.

1. Introduction

De nombreux travaux de recherche ont été effectués sur le comportement des pieux sous chargements cycliques axiaux. Les recommandations relatives aux cas des charges cycliques sont assez peu nombreuses, on notera les API (1993) et le DnV (1992). Un des objectifs du projet SOLCYP était de faire une synthèse des travaux les plus pertinents existants dans la littérature, de développer des procédures permettant la prise en compte de l'effet des cycles dans le dimensionnement des ouvrages de génie civil ou maritime. Cette procédure a été testée et validée dans le cadre d'un programme expérimental proposé dans le cadre du projet SOLCYP.

Trois types d'essais ont été mis en œuvre :

- Essais *in situ* réalisés par l'IFSTTAR sur les sites expérimentaux de Merville (argile surconsolidée) et Loon-Plage (sable de Dunkerque)
- Essais en centrifugeuse à l'IFSTTAR (sable de Fontainebleau) (Figure 1),
- Essais en chambre d'étalonnage au Laboratoire 3SR (sable de Fontainebleau) et au Laboratoire Navier (sable de Fontainebleau et kaolinite Speswhite) (Figure 1).

Ces essais, fortement instrumentés (extensomètres amovibles, jauges de contraintes) ont permis de mettre en évidence :

- L'influence du mode de chargement (monotone, cyclique répété, cyclique alterné)

- L'ordre d'application des chargements
 - La dégradation du frottement avec l'amplitude et le nombre de cycles et l'éventuel report des charges en pointe (essais en compression)
- Le projet couvre également les aspects suivants: pieux battus et pieux forés ; sables et argiles ; chargements cycliques répétés ou alternés ; grand nombre de cycles.

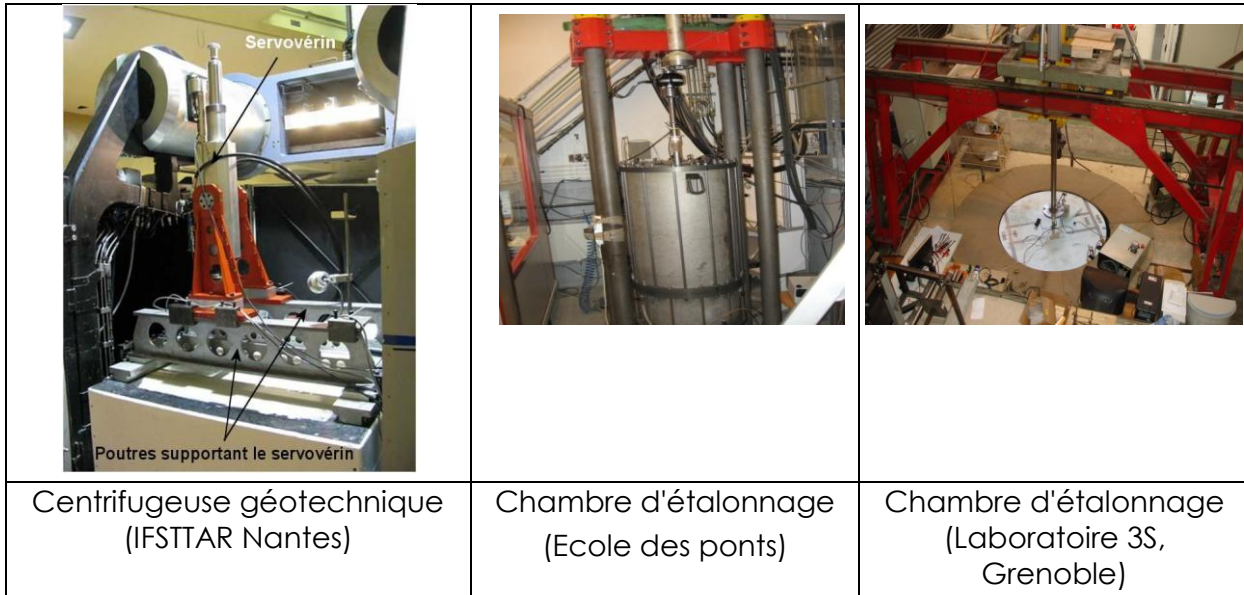


Figure 1. Exemples d'équipements permettant la réalisation d'essais sur modèles réduits (Centrifugeuse) / sondes de mesure.

2. Les dispositifs

Deux dispositifs expérimentaux de laboratoire et les essais in situ sont décrits dans cette partie.

2.1. Chambre d'étalonnage

La chambre d'étalonnage est un outil de modélisation physique du type « 1g » bien adapté pour étudier de manière fine la réponse axiale d'une « tranche » élémentaire sol-pieu (ou d'un tronçon de pieu) représentative d'une profondeur donnée, et d'évaluer, par exemple, la mobilisation du frottement local de l'interface sol-pieu et son évolution sous divers types de chargements (monotones, cycliques).

Les modes d'installation possibles sont le moulage (« foré simple »), le fonçage, le vibrofonçage et le battage. Deux types de sondes ont été utilisées :

- Sonde ICP : mesures des contraintes tangentielles (frottement latéral) et radiales et résistance de pointe,
- Sonde-pieu CERMES $\phi 36\text{mm}$: contraintes tangentielles et résistance de pointe

2.2. Centrifugeuse

Les effets d'échelle ainsi que l'effet de la taille des modèles sont résumés dans Garnier et al. (2007).

La centrifugeuse permet d'étudier la réponse axiale ou transversale d'un système sol-pieu complet de dimensions réduites en respectant au mieux les règles de similitude et en reproduisant, en particulier, par macro-gravité, l'état des contraintes réel qui règne le long du pieu prototype.

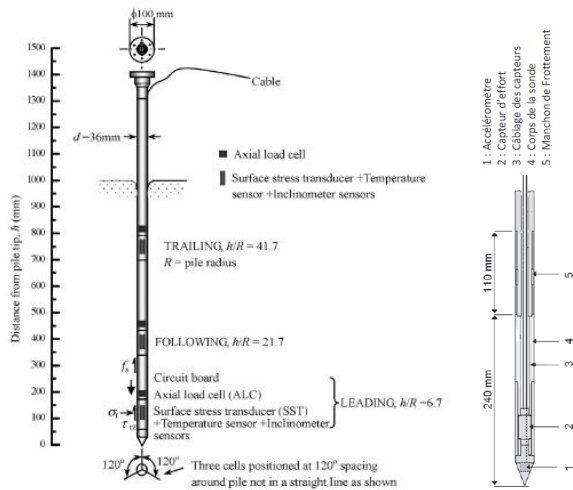


Figure 2. Sonde (a) Imperial College Prototype (ICP) (b) CERMES $\phi 36$ mm.

Le principe de base consiste à appliquer une accélération de $N \cdot g$ sur un modèle réduit à l'échelle N .

Deux pieux modèles ont été utilisés (Figure 3):

- Pieu instrumenté de 18 mm de diamètre et de longueur 560 mm. Ce pieu est instrumenté en pointe d'un capteur de force (Figure (a))
- Pieu instrumenté de 20 mm de diamètre et de longueur 260 mm, ce pieu est instrumenté sur cinq tronçons avec cinq jauges de mesure (J1 à J5). Le frottement est déduit de la différence entre la charge en tête et la force mesurée sur chacun des tronçons.

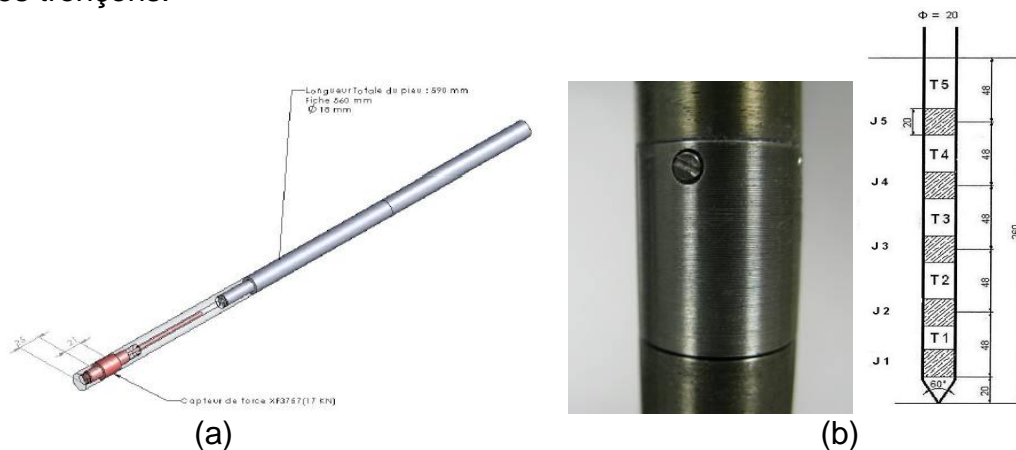


Figure 3. sonde (a) Blanc (2013) ; (b) Rakotonindriana (2009).

2.3. Essais in situ

L'essai de chargement in situ sur pieu(x) prototype(s) est a priori le type d'essai le plus représentatif lorsque :

- il est effectué dans une zone où les conditions de sols (stratigraphie, nature des matériaux, caractéristiques géotechniques) sont représentatives de l'ensemble ou d'une partie de l'ensemble du projet. Les conditions de sol doivent être déterminées à proximité immédiate des pieux d'essais par des investigations appropriées.
- le mode d'exécution des pieux est similaire à celui des pieux de l'ouvrage.
- les caractéristiques géométriques des pieux sont identiques à celles des pieux de l'ouvrage ou suffisamment proches pour ne pas introduire d'effet d'échelle.

Le principal inconvénient des essais in situ est lié à leur coût.

Deux sites de référence ont été choisis : un site dont la géologie était constituée principalement d'argile surconsolidée (Merville) et un second site sableux (Loon Plage). Plusieurs techniques d'installation de pieux ont été testées : foré, vissé, battu. L'instrumentation utilisée est de type extensomètre amovible. La figure 4 montre un schéma descriptif de l'instrumentation des pieux ainsi qu'une photo de l'extensomètre amovible et son montage dans un pieu (Rocher-Lacoste et al., Méthode d'essai n°68, 2011). Pour chacun des types de pieux, plusieurs niveaux de jauges ont été prévus. La procédure suivie était : un premier tronçon de 1 m en tête de pieu et un dernier tronçon en pointe de 1 m pour valider la descente de charge et l'effort récupéré en pointe complété de plusieurs autres tronçons à adapter en fonction du type de pieux et de la géologie.

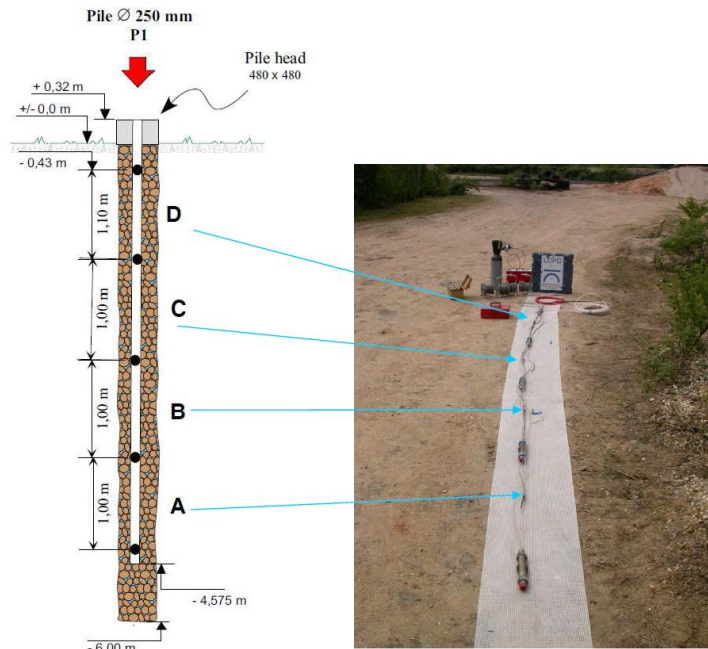


Figure 4. Principe de l'extensomètre amovible.

3. Les programmes d'essai

Le concept de diagramme de stabilité cyclique d'un pieu a été introduit par Poulos (1981). Il permet d'analyser globalement la réponse d'un pieu relativement rigide soumis à des actions cycliques axiales et d'en évaluer le comportement en fonction de la combinaison de ces actions et du nombre de cycles. Des chargements non alternés (traction ou compression) et alternés (compression et traction dans la même séquence) ont ainsi été appliqués (Figure 5).

L'objectif des essais est d'établir un diagramme de stabilité sous charge axiale (Figure 6).

En désignant par :

- V_{uc} : la résistance ultime à la compression monotone ;
- V_{ut} : la résistance ultime à la traction monotone (arrachement) ;

on peut représenter :

- En abscisse: la composante moyenne normalisée de la charge cyclique V_m / V_u ;
- En ordonnée : l'amplitude normalisée de la sollicitation cyclique V_c / V_u

L'enveloppe externe du triangle joignant les points où V_m / V_u et V_c / V_u sont égaux à 1 est le lieu des points de rupture statique (chargement monotone pour lequel $(V_m + V_c)/V_u = 1$).

Le diagramme est dissymétrique par rapport à l'axe des ordonnées car la capacité en compression est supérieure à la capacité en tension ($V_{uc} > V_{ut}$)

Dans sa forme la plus élémentaire, le diagramme (Figure 5.) peut être décomposé en trois zones définies par des combinaisons $(V_m / V_u ; V_c / V_u)$ (Projet SOLCYP (2016)).

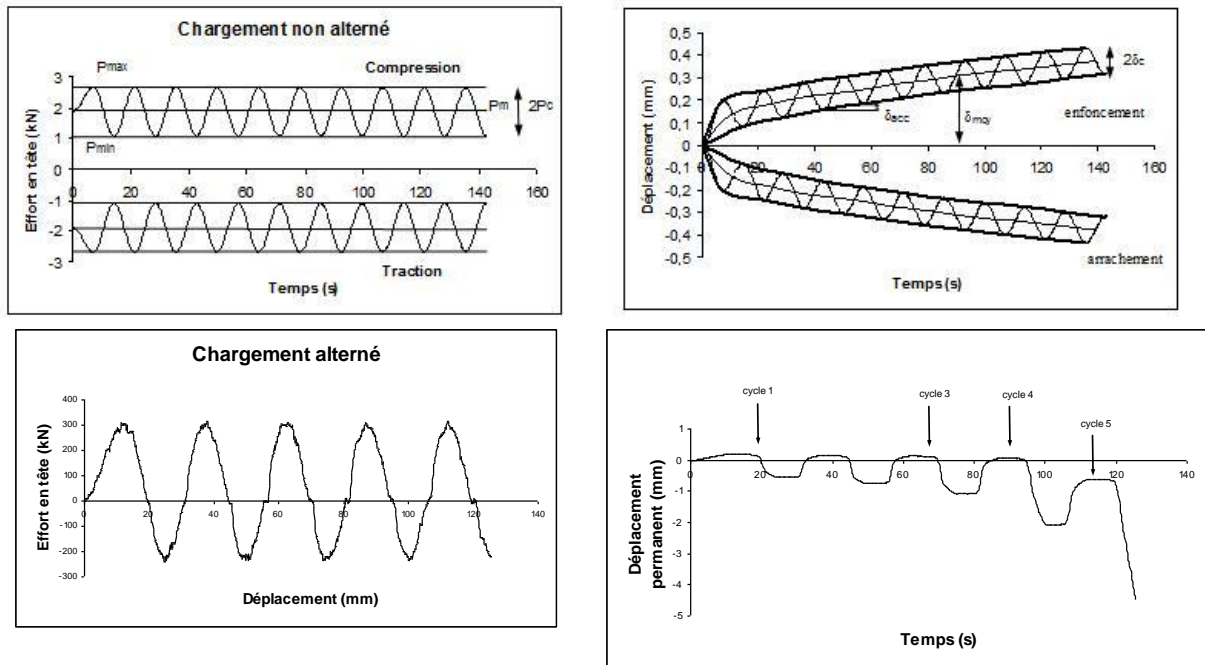


Figure 5. Courbes typiques des différents chargements cycliques appliqués (se lit de gauche à droite) – chargement non alterné et alterné.

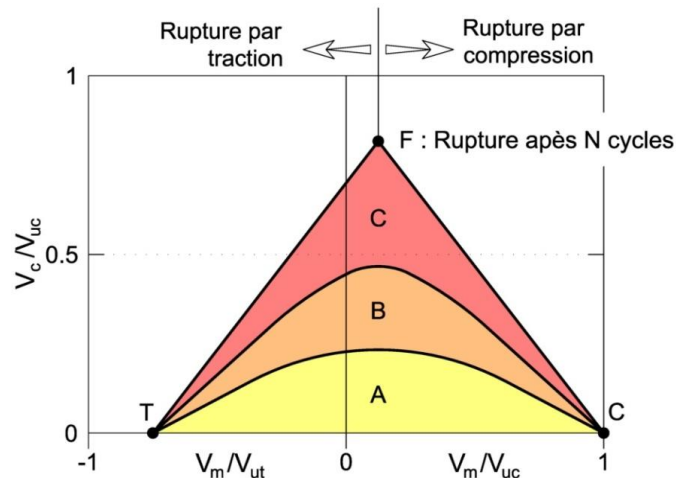


Figure 6 Schéma de principe d'un diagramme de stabilité cyclique (Poulos, 1981)

3.1. Essais in situ

Un des objectifs des essais cycliques réalisés sur un type de pieu et dans un type de sol choisi est l'établissement d'un diagramme de stabilité. Ce diagramme représente dans le repère V_m/V_{uc} - V_c/V_{uc} les combinaisons de chargement (V_m , V_c) pour lesquelles la réponse du pieu est considérée comme stable, instable ou métastable.

Une spécificité du projet SOLCYP est que le chargement non alterné (traction ou compression pour une séquence) et alterné (traction – compression dans la même séquences) ont été testés.

Dans le cas du projet SOLCYP, la solution retenue consistait à utiliser deux vérins en opposition : un vérin statique monté au-dessus de la poutre et un vérin cyclique monté en dessous de celle-ci. Le vérin statique était relié à un accumulateur air/huile qui permettait d'appliquer un effort de référence constant. Cet effort de référence pouvait être réglé par ajustement de la pression de l'accumulateur. Le vérin cyclique agissait en opposition par

rapport au vérin statique. Ce type de montage fonctionne si la valeur maximale du chargement cyclique de compression dépasse celle l'effort statique appliqué en traction.

Le tableau 1 présente la procédure qu'il faudrait appliquer à un nombre de pieux d'essais *in situ* minimum ; à savoir cinq, afin d'établir le diagramme de stabilité cyclique.



Figure 7. Photo du montage d'un essai de chargement cyclique alterné.

Tableau 1 Type d'essai effectué

F, S, B : respectivement pieu Foré, Pieu Vissé et pieu Battu

Référence essai : S : statique, C : cyclique, Type d'essai C : compression, T : traction

NF : Essai statique effectué suivant la norme NF-P94150-1 (compression) ou 94150-2 (traction)

Statique rapide : essai statique avec palier appliqué en moins d' une minute

Cyclique (F=2 ou F = 3) : tel que l'effort maximum appliqué atteint respectivement 1/2 ou 1/3 de la charge de rupture déterminée par l'essai statique.

Type de pieu	Pieu	Référence essai	Type d'essai	Description
F, S, B	1	S1	Compression (C)	Statique NF
F, S, B	2	S2	Traction (T)	Statique NF
F, S, B	3	C1	C	Cyclique (F = 3)
F, S, B	3	C2	C	Cyclique (F = 2)
F, S, B	3	S3	C	Statique rapide
F, S, B	3	C4	C	Cyclique
F, S, B	3	S5	C	Statique rapide
F, S, B	4	C1	T	Cyclique (F = 3)
F, S, B	4	C2	T	Cyclique (F = 2)
F, S, B	4	S3	T	Statique rapide
F, S, B	4	C4	T	Cyclique
F, S, B	4	S5	T	Statique rapide
F, S, B	5	S, C	C/T	alterné

Deux essais de pieux de référence sont effectués en compression (S1) et traction (S2).

Un pieu (n°3) est consacré aux essais de compression et un autre (n°4) pour la traction avec la méthodologie suivante : une séquence cyclique F=3 suivi par une séquence F = 2 si les déplacements cumulés ne dépassent pas un critère défini par le cahier des charges (par exemple 10% D). Un pieu pourra subir des chargements alternés ciblés afin de compléter le diagramme.

Enfin, un essai statique rapide permet de valider une perte ou pas de capacité portante. Puis on peut encore effectuer des séquences cycliques tant que le critère en déplacement est respecté.

3.2. Essais en centrifugeuse

Les essais à la centrifugeuse permettent, pour un massif de sol donné homogène, d'effectuer plusieurs séquences cycliques sur plusieurs pieux afin que ces derniers ne soient pas influencés par les séquences précédentes et donc l'histoire du chargement. Les résultats obtenus sont directement comparables à des mesures effectuées in situ dans des sols homogènes.

3.3. Essais en chambre d'étalonnage

En chambre d'étalonnage, on peut réaliser des essais à déplacement contrôlé afin d'évaluer la dégradation du frottement latéral et de la résistance de pointe pour une amplitude de déplacement donnée. Contrairement à un pieu réel qui tasse pendant l'application des cycles, dans le cas de la chambre d'étalonnage, c'est toujours la même zone de pieu qui sera sollicitée et on est donc dans le cas le plus défavorable. On définit ainsi un facteur de dégradation du frottement latéral pour une amplitude de déplacement et un nombre de cycles fixés (Figure 8).

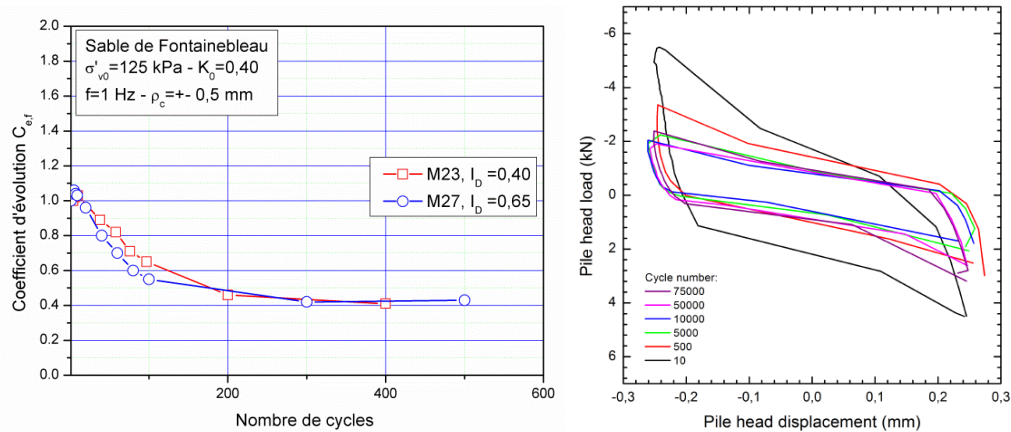


Figure 8. Essai en chambre d'étalonnage (a) Tali (2011), (b) Silva (2014).

3.3. Essais in situ

Dans ce paragraphe, on montre les résultats d'une séquence de chargement cyclique alterné pour un nombre de cycles de 51 dans l'argile de Merville. Entre $N = 1$ et $N = 50$, la boucle d'hystérésis se déplace vers la gauche soit dans le sens de la traction traduisant le sens de déplacement du pieu pour cette séquence à savoir un mouvement ascendant qui pourrait s'accroître pour un nombre de cycles plus importants (Figure 9).

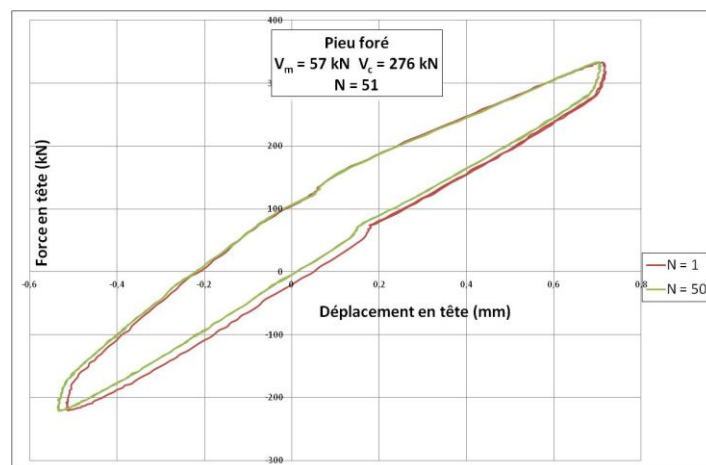


Figure 9. Essai alterné $V_m = 57$ kN ; $V_c = 276$ kN : de $N = 1$ à $N = 50$.

4. Conclusions et perspectives

Ce papier a permis de mettre en évidence la complémentarité des essais in situ et en laboratoire dans le but de caractériser le comportement des pieux sous sollicitations cycliques autant au niveau global (accumulation des déplacements et évolution de la capacité portante) qu'au niveau local (évolution du frottement latéral et de la résistance de pointe) (tableau 2). Les essais in situ peuvent permettre de tester la réponse d'un pieu pour une géologie donnée mais étant donné le nombre de pieux limités, plusieurs séries de chargement doivent être appliquées aux pieux d'essais. En revanche, dans le cas des essais de laboratoire, chaque séquence de chargement peut être appliquée à un pieu qui n'a jamais subi d'autres sollicitations dans son histoire. Dans le cas d'un projet de construction, la procédure décrite pourra être utilisée.

Tableau 2 Pertinence des dispositifs expérimentaux

	Méthodes d'essais		
	Chambre d'étalonnage	Centrifugeuse	Essai in situ
Pertinence	Développement de lois de dégradation d'interface Seules des couches de sol homogènes peuvent être étudiées dont la représentativité est à valider. Répétabilité des essais à vérifier.	Développement de références expérimentales (diagrammes de stabilité cyclique ; lois d'extrapolation des déplacements) Seules des couches de sol homogènes peuvent être étudiées dont la représentativité est à valider. Répétabilité des essais à vérifier.	- Développement de références expérimentales (diagrammes de stabilité cyclique ; lois d'extrapolation des déplacements) - Validation d'un projet

5. Références bibliographiques

- API RP 2A-LRFD, (1993). Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms – Load and resistance factor design.
- DnV. (Det Norske Veritas). 1992. Foundations. Classification notes n°. 30.4.
- Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S. M., Culligan, P. J., Goodings, D., König, D., Kutter, B., Phillips, R., Randolph, M. F., Thorel, L. (2007). Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modeling. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics* 3, p.01-23.
- Le Kouby A., Canou J., Dupla J.C. (2004) Behaviour of model piles subjected to cyclic axial loading. *International Conference on the cyclic behaviour of soils and Liquefaction Phenomena*, Bochum, Germany (31 March – 2 April 2004), pp. 159-166.
- Poulos, H.G. (1981), "Cyclic Axial Response of Single Pile." *Jnl. Geot. Eng. Divn, ASCE*, Vo1.107, No.GT7, pp.41-58.
- Projet SOLCYP. (2016). Recommandations sur le dimensionnement des pieux sous sollicitations cycliques.
- Rocher-Lacoste, F., Le Kouby, A., Dudouyt, F. (2014). Essai statique de pieu isolé instrumenté avec la technique de l'extensomètre amovible, sous charge axiale ME68.
- Silva, M. (2014). Experimental study of ageing and axial cyclic loading effect on shaft friction along driven piles in sands. Ph.D. thesis, Université de Grenoble.
- Tali B. (2011). Comportement de l'interface sol-structure sous sollicitations cycliques. Application au calcul des fondations profondes, Ph.D. thesis, Université Paris-Est, Ecole des Ponts ParisTech, 2011.