



SOLCYP

Projet National de R&D

SOLlicitations CYcliques dans les fondations Profondes



F O N D A T I O N S S P E C I A L E S



Essais de chargements cycliques des pieux à Merville (59) – Rapport factuel

Alain Le Kouby (Ifsttar)

Omar Benzaria (Ifsttar – Fugro)

Stanislas Po (Fugro)

LC/11/SOL/19
et LC/11/SOL/23
R/11/SOL/009
Décembre 2011

SOLCYP FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Essais de chargements cycliques des pieux sur le site de MERVILLE

RAPPORT N°: R/11/SOL/009

DATE D'ETABLISSEMENT: décembre 2011

AUTEUR(S) : A. LE KOUBY, O. BENZARIA et S. PO

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : IFSTTAR et FUGRO

THEME DE RATTACHEMENT : thème 3 : ESSAIS DE PIEUX

LETTRE DE COMMANDE : LC/11/SOL/19 et LC/11/SOL/23

Résumé

Dans le cadre du thème 2 « Pieux » du projet national SOLCYP (SOLlicitations CYcliques sur les Pieux), l'IFSTTAR / LCPC a été chargé de réaliser une campagne d'essais de chargements de pieux sur le plot expérimental de Merville (59) situé dans l'emprise de l'Aéroport de Merville-Calonne exploité par la CCI du Grand Lille. Le sol est essentiellement constitué d'argile des Flandres surconsolidée.

L'objet de l'étude est le comportement des pieux sous charges cycliques, un domaine pour lequel le besoin en règles de dimensionnement est très important. Cette campagne d'essais est essentielle puisqu'elle va permettre de collecter une base de données importante pour la compréhension des phénomènes et la validation des modèles développés dans le cadre du projet.

L'équipe Fondations de GER2 a été mobilisée. La campagne d'essais s'est déroulée du 09 Mai au 30 Juin 2011. Elle a été conduite avec l'aide du CER de Rouen, en collaboration avec FUGRO France et avec l'assistance de l'entreprise FRANKI FONDATIONS. Au total 10 pieux ont été testés se répartissant en 3 types : pieux forés (4), pieux battus (4) et pieux vissés (2). Les diamètres des pieux étaient de 420 mm pour les pieux en béton et de 406 mm pour les pieux battus. Des essais de chargements cycliques de pieux en compression, en traction et alternés ont été effectués.

Ce rapport, purement factuel, décrit :

- les objectifs de la campagne d'essais en termes d'étude de stabilité et de dégradation de la capacité portante d'une fondation profonde soumise à des chargements cycliques.
- le programme expérimental réalisé au cours des sept semaines d'essais sur site,
- les dispositifs expérimentaux et les systèmes d'instrumentation mis en œuvre,
- des courbes typiques de résultats qui permettent de juger de la nature et de la qualité des données acquises.

- La réalisation d'essais cycliques instrumentés à grand nombre de cycles était l'objectif principal de cette campagne et représentait un défi opérationnel majeur.

Les équipements spécifiques mis en œuvre ont donné satisfaction, notamment :

- le vérin cyclique et son système de pilotage,
- les extensomètres amovibles et le système d'acquisition de données.

L'examen des premiers résultats permet de penser que les données sont représentatives et de bonne qualité. L'interprétation des résultats est en cours.

SOMMAIRE DU RAPPORT

| | |
|--|-----------|
| <u>RESUME</u> | 3 |
| <u>1 INTRODUCTION</u> | 5 |
| <u>2 OBJECTIFS DES ESSAIS DE CHARGEMENTS CYCLIQUES AXIAUX</u> | 6 |
| <u>3 PROGRAMME EXPERIMENTAL</u> | 8 |
| 3.1 ESSAIS STATIQUES DE REFERENCE | 8 |
| 3.2 ESSAIS STATIQUES RAPIDES | 9 |
| 3.3 ESSAIS CYCLIQUES | 9 |
| 3.4 PROCEDURE EXPERIMENTALE | 11 |
| <u>4 DISPOSITIF EXPERIMENTAL</u> | 14 |
| 4.1 EQUIPEMENTS UTILISES | 14 |
| 4.1.1 VERIN STATIQUE | 14 |
| 4.1.2 VERIN CYCLIQUE | 15 |
| 4.1.3 CHARGEMENT ALTERNE | 16 |
| 4.1.4 CAPTEURS DE DEPLACEMENTS | 16 |
| 4.1.5 EXTENSOMETRES AMOVIBLES | 17 |
| 4.2 MONTAGE D'UN ESSAI DE CHARGEMENT EN COMPRESSION | 19 |
| 4.3 MONTAGE D'UN ESSAI DE CHARGEMENT EN TRACTION | 20 |
| 4.4 MONTAGE D'UN ESSAI DE CHARGEMENT CYCLIQUE ALTERNE | 20 |
| 4.5 PILOTAGE DU VERIN CYCLIQUE | 22 |
| 4.6 ACQUISITION | 22 |
| <u>5 COURBES TYPIQUES</u> | 23 |
| 5.1 CHARGEMENT STATIQUE | 23 |
| 5.2 CHARGEMENT CYCLIQUE | 24 |
| 5.2.1 CHARGEMENT EN COMPRESSION | 24 |
| 5.2.2 CHARGEMENT ALTERNE | 28 |
| <u>6 CONCLUSIONS</u> | 29 |
| <u>7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u> | 30 |

1 INTRODUCTION

Dans le cadre du projet national de recherche SOLCYP (SOLlicitations CYcliques sur les Pieux), l'IFSTTAR / LCPC a été chargé d'effectuer la campagne d'essais de pieux prévue dans le projet (9 mai – 30 juin 2011). Cette campagne d'essai est considérée comme essentielle pour le projet car elle va servir de bases de données pour la validation des modèles de comportement proposés dans le projet. 3 types de pieux (battu, vissé et foré) ont été testés dans un matériau typique l'argile de Merville.

Ces essais ont été réalisés en collaboration avec l'entreprise FUGRO France et avec l'aide de l'entreprise FRANKI.

L'entreprise FRANKI –qui a mis en place les pieux du plot expérimental - a mis des personnels à disposition pour aider aux opérations de montage et démontage des bâtis de réaction et installation des vérins et capteurs de déplacements .

L'entreprise FUGRO France a directement participé à la définition, au pilotage et à la réalisation des essais. Elle est plus particulièrement intervenue sur les opérations de mise en place des pieux battus qui ont été instrumentés et sur la réalisation du montage des essais alternés qui a nécessité l'utilisation d'un accumulateur haute pression. On rappelle que cette campagne d'essais constitue aussi une part importante d'une thèse CIFRE menée en collaboration entre l'IFSTTAR et FUGRO France.

Le présent rapport est un rapport factuel présentant :

- les objectifs de la campagne d'essais en termes d'étude de stabilité et de dégradation de la capacité portante d'une fondation profonde soumise à des chargements cycliques.
- le programme expérimental réalisé au cours des sept semaines d'essais sur site,
- les dispositifs expérimentaux et les systèmes d'instrumentation mis en œuvre,
- des courbes typiques de résultats qui permettent de juger de la nature et de la qualité des données acquises.

2 OBJECTIFS DES ESSAIS DE CHARGEMENTS CYCLIQUES AXIAUX

Les objectifs du chantier expérimental de Merville (9 mai – 30 juin 2011) sont d'obtenir des informations sur:

- la réponse des pieux soumis à des sollicitations cycliques dans l'argile (résistance et accumulation des déplacements)
- la stabilité des pieux en termes d'accumulation des déplacements
- l'effet des cycles sur la dégradation du frottement latéral
- l'effet des cycles sur la dégradation de la résistance en pointe
- l'effet de la nature du chargement sur la réponse du pieu
 - ✓ Chargement non alterné (traction ou compression)
 - ✓ Chargement alterné (traction et compression dans un cycle)
- le rôle joué par le mode d'installation :trois types de pieux ont été installés: battus (B), forés (F) et vissés (S)

L'implantation des pieux est présentée sur la figure 1.

Les trois types de pieux qui ont été testés sont :

- 4 pieux forés (**F**) réalisés à la tarière de $L=13,5$ m (0,5m au dessus du niveau de sol) et $\Phi = 420$ mm.
- 4 pieux battus (**B**) type tube métallique fermé à la base $L=15$ m (2 m au dessus du niveau de sol) et diamètre $\Phi = 406$ mm et $e = 15$ mm.
- 2 pieux vissés (**S**) de $L=13,5$ m (0,5m au dessus du niveau du sol) et $\Phi = 420$ mm.

Il est important de mentionner que pour effectuer un essai de chargement sur un pieu, il faut établir un système de réaction qui nécessite 4 pieux. Donc, on a mis en place 13 pieux forés de réactions (**R**) réalisés à la tarière de $L=13$ m) et $\Phi = 420$ mm.

Les équipements propres à chaque pieu (ferraillages, barres de traction, tubes de réservation pour instrumentation) sont détaillés dans le rapport d'installation des pieux.

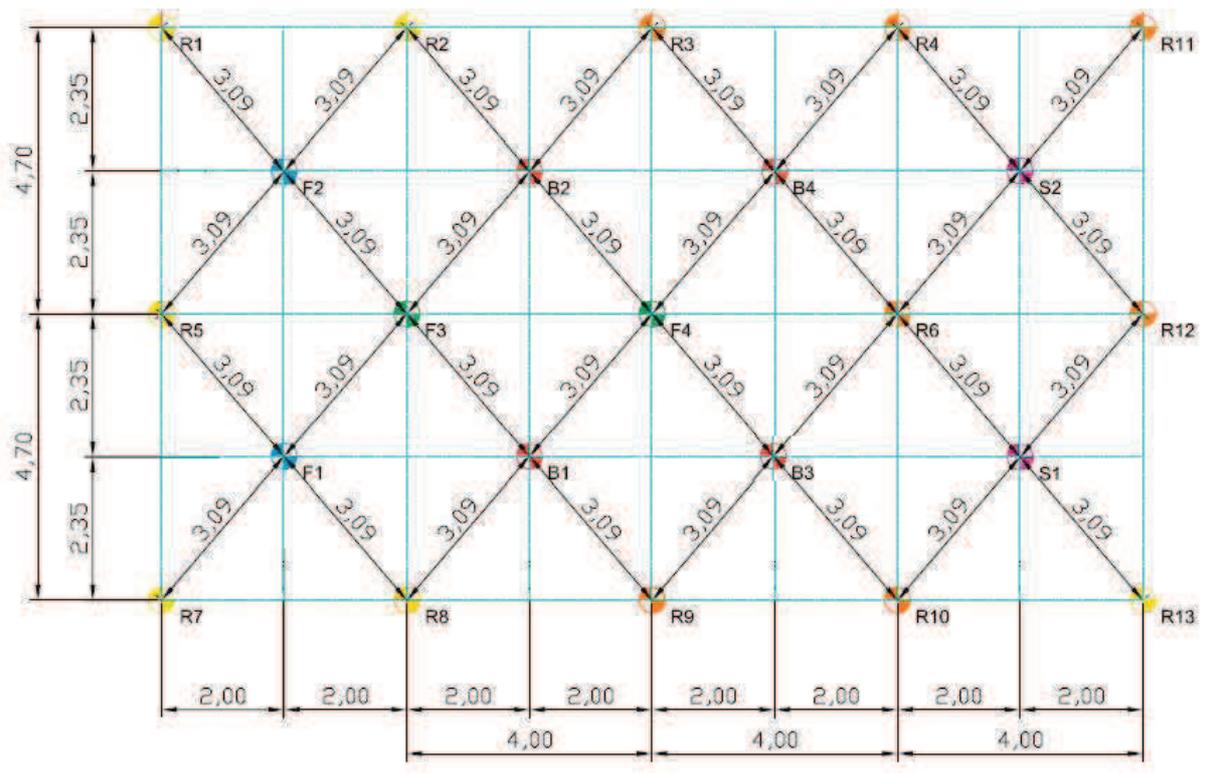


Figure 1 : Implantation des pieux

3 PROGRAMME EXPERIMENTAL

Pour atteindre les objectifs fixés, on a effectué une série d'essais de chargement en compression et d'arrachement statique et cyclique sur les trois types de pieux :

- une série d'essais statiques de référence
- une série d'essais statiques rapide
- une série d'essais cycliques en compression
- une série d'essais cycliques en traction
- une série d'essais cycliques alternés

Pour chacun des pieux, le type d'essai réalisé est décrit dans le

Tableau 1. Dans le Tableau 2, le détail du programme d'essai effectué est détaillé.

Tableau 1 : Type d'essais réalisés

| Pieu | Diamètre (mm) | Longueur (m) | Tube logement | Essai |
|------|---------------|--------------|---------------|-------------|
| F1 | 420 | 13,5 | 1 | Compression |
| F2 | 420 | 13,5 | 1 | Compression |
| F3 | 420 | 13,5 | 1 | Traction |
| F4 | 420 | 13,5 | 1 | Alterné |
| S1 | 420 | 13,5 | 1 | Compression |
| S2 | 420 | 13,5 | 1 | Traction |
| B1 | 406 (536) | 13,5 | 2 | Compression |
| B2 | 406 (536) | 13,5 | 2 | Compression |
| B3 | 406 (536) | 13,5 | 2 | Traction |
| B4 | 406 (536) | 13,5 | 2 | traction |

3.1 Essais statiques de référence

Le principe des essais statiques de pieu isolé sous charge axiale est défini dans la norme NF P94-150-1 [7] pour les essais de compression et dans la norme NF P94-150-2 [8] pour les essais de traction.

L'essai consiste à appliquer un chargement par palier, Q_0 , sur la tête du pieu, puis à mesurer les déplacements en tête S_0 correspondants. C'est un essai qui est exécuté à forces contrôlées et consiste à charger le pieu par incréments ΔQ égaux à approximativement 10% de la charge ultime Q_{max} (estimée par les méthodes prévisionnelles de calcul) et à maintenir chaque incrément de charge pendant 1 heure. Il permet de déterminer la charge limite (de référence) qui correspond à celle qui génère un déplacement en tête de 10% du diamètre. Il permet aussi de déterminer la charge critique de fluage conventionnelle Q_{ce} .

De plus, on a instrumenté les pieux à l'aide d'extensomètres amovibles disposés régulièrement le long du fût du pieu afin de connaître la distribution des efforts en fonction de la profondeur et la répartition entre frottement latéral et effort de pointe.

3.2 Essais statiques rapides

Cet essai est similaire à l'essai statique de référence mais il est exécuté avec des montées en charges qui durent 20 s et des paliers qui durent seulement 180 s. On a choisi de réaliser ce type d'essai, d'une part, pour étudier l'effet de la vitesse de chargement sur la capacité portante des pieux installés dans l'argile et, d'autre part, pour estimer la dégradation de résistance après chaque série de cycles. Le temps très court de réalisation permet de faire un essai statique avant et après chaque chargement cyclique.

Cet essai est inspiré de la méthode ASTM qui propose de réaliser un essai à déplacement (ou vitesse) contrôlé »

3.3 Essais cycliques

Les paramètres nécessaires à la définition d'un essai de chargement cyclique (voir Figure 2) sont :

- la charge moyenne V_m ,
- l'amplitude de charge cyclique V_c ,
- la fréquence des cycles,
- le nombre de cycles N dans la série.

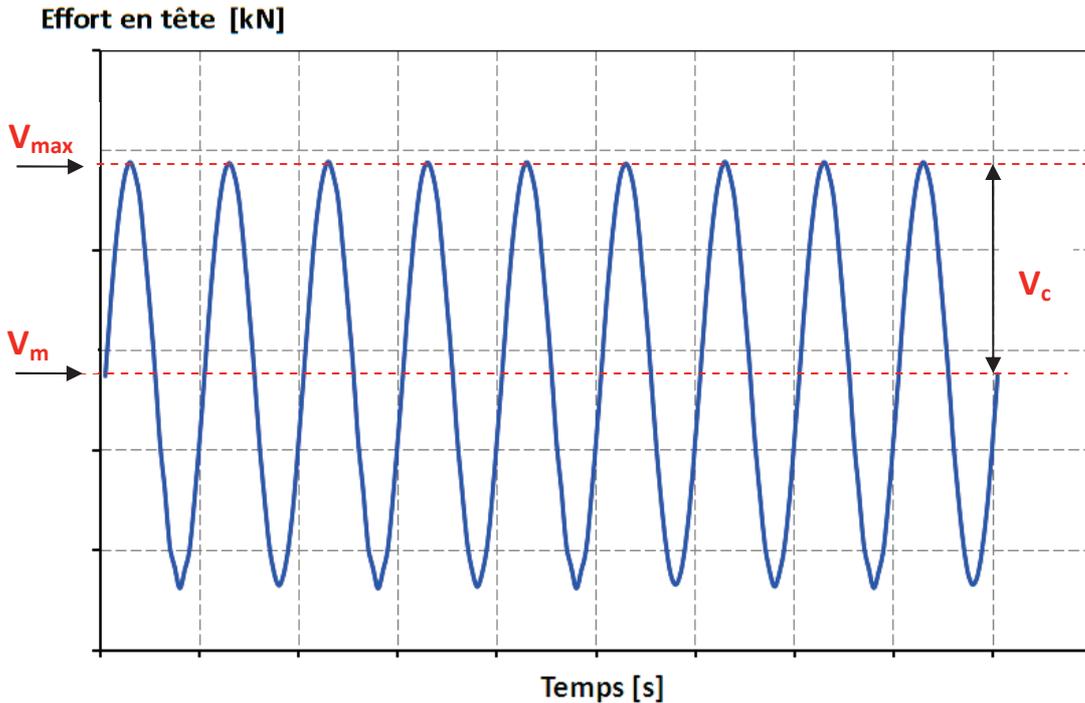


Figure 2 : Définition d'un chargement cyclique

La majorité des essais de chargements cycliques ont été réalisés à fréquence de 0,5 Hz qui est apparue un bon compromis pour rester dans le domaine quasi-statique tout en permettant de réaliser des nombres de cycles importants dans une journée de test. Quelques essais ont été effectués à 0,1 et 1Hz pour étudier l'effet de la fréquence sur la réponse des pieux sous chargements cycliques.

Trois grands types d'essais cycliques ont été réalisés :

- des essais répétés en compression
- des essais répétés en traction
- des essais alternés

Lors d'essais « répétés » - dits essais « one-way » en Anglais - il n'y a pas inversion de la charge en cours de cyclage (V_{max} et V_{min} sont de même signe). Dans les essais « alternés » - dits essais « two-way » - il y a changement du signe de la charge appliquée (passage de compression en traction et vice-versa lors de chaque cycle).

Les amplitudes de charges ont été choisies de manière à :

- appliquer des séries de chargements dont la valeur maximale V_{max} ne dépasse pas $1/3$ puis $1/2$ de la résistance ultime du pieu. On espère avec ce type d'essais montrer que le pieu reste stable lorsqu'il est sollicité par des charges opérationnelles (Facteur de sécurité de 3 ou 2).
- appliquer des séries de chargements dont la valeur maximale V_{max} dépasse approche voire dépasse la charge de fluage de pieu. Cette procédure a été

appliquée essentiellement sur des pieux vierges. On espère ainsi amener le pieu à la rupture sous un nombre de cycles limité.

Différentes combinaisons de chargement pouvaient ensuite être enchaînées afin de permettre à terme le développement des lois de dégradation et étudier l'influence de la charge moyenne et l'amplitude cyclique sur l'accumulation du déplacement en tête du pieu.

Le programme global des essais réalisés est synthétisé dans le Tableau 2.

3.4 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale suivie pour chaque pieu s'inspire de la procédure type ci-après:

- 1- Exécution de l'essai statique NF avec des paliers de 1 heure,
- 2- Exécution d'un essai statique rapide (ESR) avec paliers de 3 minutes. La charge statique à la rupture V_r de l'essai ESR est prise comme charge de référence pour la définition de la séquence cyclique suivante. Ce choix reste arbitraire dans l'attente d'une meilleure appréhension de l'influence de l'histoire du chargement.
- 3- Exécution d'une ou plusieurs séries d'essais cycliques enchaînées à une fréquence de 0,5 Hz (quelques essais à 0,1 Hz et 1 H). En règle générale la montée à la charge moyenne est appliquée comme dans le cas d'un chargement statique rapide, puis les cycles sont lancés à la fréquence prescrite.
- 4- Exécution d'un nouvel essai statique rapide ESR après une rupture sous cycle (grands déplacements) ou un déplacement cumulé de l'ordre de 2-3 mm pour évaluer la dégradation de la capacité portante.

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des types d'essais, des séquences de chargement et du nombre de cycles.

| Pieux | Essai | Effort | Type | F(Hz) | Vm/Vr | Vc/Vr | Nbr de cycles |
|--------------|-----------------|-------------|------------------|-------|----------|-----------|---------------|
| F1 | F1S1 | Compression | Statique NF | | | | |
| | F1S2 | | Statique rapide | | | | |
| | F1C1 | | Cyclique (F = 3) | 0.5 | 0.3 | 0.05 | 5000 |
| | F1C2 | | Cyclique (F = 3) | 0.5 | 0.2 | 0.15 | 2500 |
| | F1C3 | | Cyclique (F = 2) | 0.5 | 0.4 | 0.1 | 5000 |
| | F1C4 | | Cyclique (F = 2) | 0.5 | 0.3 | 0.2 | 2500 |
| | F1S3 | | Statique rapide | | | | |
| | F1C5 | | Cyclique | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 1000 |
| | F1C6 | | Cyclique | 0.5 | 0.6 | 0.3 | 1000 |
| | F1C7 | | Cyclique | 0.5 | 0.7 | 0.3 | 200 |
| | F1S4 | | Statique rapide | | | | |
| F2 | F2C1 | Compression | Cyclique | 0.5 | 0.6 | 0.3 | 10000 |
| | F2C2 | | Cyclique | 0.5 | 0.7 | 0.3 | 5000 |
| | F2C3 | | Cyclique | 0.5 | 0.7 | 0.4 | 2500 |
| | F2S1 | | Statique rapide | | | | |
| | F2C4 | | Cyclique | 0.5 | 0.25 | 0.2 | 1000 |
| | F2C5 | | Cyclique | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 1000 |
| | F2C6 | | Cyclique | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 1000 |
| | F2C7 | | Cyclique | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 600 |
| | F2C8 | | Cyclique | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 81 |
| | F2C9 | | Cyclique | 0.1 | 0.5 | 0.4 | 25 |
| | F2C10 | | Cyclique | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 50 |
| | F2S2 | | Statique rapide | | | | |
| | F2C11 | | Cyclique | 0.1 | 0.4 | 0.4 | 500 |
| | F2C12 | | Cyclique | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 500 |
| F2C13 | Cyclique | 0.5 | 0.6 | 0.3 | 5 | | |
| F3 | F3C1 | Traction | Cyclique | 0.5 | 400 | 300 | 500 |
| | F3C2 | | Cyclique | 0.1 | 400 | 400 | 100 |
| | F3C3 | | Cyclique | 0.5 | 500 | 300 | 200 |
| | F3S1 | | Statique rapide | | | | |
| | F3C4 | | Cyclique | 0.5 | 500 | 400 | 500 |
| | F3C5 | | Cyclique | 0.5 | 500 | 500 | 500 |
| F4 | F4S1 | Alterné | Statique rapide | | 400 T | | |
| | F4C1 | | Cyclique | 0.1 | 0.05 | 0.35 | 400 |
| | F4C2 | | Cyclique | 0.1 | 0.15 | 0.35 | 800 |
| | F4C3 | | Cyclique | 0.1 | 0.1 | 0.4 | 500 |
| | F4S2 | | Statique rapide | | 400 T | | |
| | F4C5 | | Cyclique | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1000 |
| | F4C6 | | Cyclique | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 1000 |
| | F4S3 | | Statique rapide | | 400 T | | |
| | F4C7 | | Cyclique | 0.1 | 0 | 0.3333333 | |
| | F4C8 | | Cyclique | 0.1 | 0 | 0.3333333 | 50 |
| | F4C9 | | Cyclique | 0.1 | 0.161111 | 0.55 | 200 |
| | F4C10 | | Cyclique | 0.1 | 0 | 0.3888889 | 50 |
| F4S4 | Statique rapide | | 400 T | | | | |
| F4C11 | Cyclique | 0.5 | 0.5 | 0.2 | 50 | | |

| | | | | | | |
|--|-------------|-----------------|-----|-----|-----|------|
| | F4C12 | Cyclique | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 1000 |
| | F4C13 | Cyclique | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 1000 |
| | F4C14 | Cyclique | 0.5 | 0.6 | 0.3 | 1000 |
| | F4C13 | Cyclique | 0.5 | 0.6 | 0.4 | 1000 |
| | F4C14 | Cyclique | 0.5 | 0.7 | 0.4 | 2000 |
| | F4S5 | Statique rapide | | | | |

| Pieux | Essai | Effort | Type | fHz) | Vm/Vr | Vc/Vr | Nombre de cycles |
|-------|-------------|-------------|------------------------|------|-------|-------|------------------|
| B1 | B1S1 | Compression | Statique NF | | | | |
| | B1S2 | | Statique rapide | | | | |
| | B1C1 | | Cyclique (F = 3) | | 0.3 | 0.05 | 10000 |
| | B1C2 | | Cyclique (F = 2) | | 0.3 | 0.2 | 389 |
| | B1C3 | | Cyclique | | 0.3 | 0.3 | 200+800 |
| | B1C4 | | Cyclique | | 0.4 | 0.3 | 1000 |
| | B1C5 | | Cyclique | | 0.4 | 0.4 | 1000 |
| | B1S2 | | Statique rapide | | | | |
| B2 | B2C1 | Compression | Cyclique | | 0.5 | 0.25 | 100-1000 |
| | B2S1 | | Statique rapide | | | | |
| | B2C2 | | Cyclique | | 0.4 | 0.2 | 10000 |
| | B2C3 | | Cyclique | | 0.25 | 0.25 | 5000 |
| | B2S2 | | Statique rapide | | | | |
| B3 | B3S1 | Traction | Statique NF | | | | |
| | B3S2 | | Statique rapide | | | | |
| | B3C1 | | Cyclique (F = 2) | | 0.3 | 0.2 | 5000 |
| | B3C2 | | Cyclique | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 1000 |
| | B3C3 | | Cyclique | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 1000 |
| | B3C4 | | Cyclique | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 100 |
| | B3S3 | | Statique rapide | | | | |
| B4 | B4C0 | Traction | Cyclique | | 900 | 10 | 5 |
| | B4C1 | | Cyclique | | 500 | 490 | 2800 |
| | B4S1 | | Statique rapide | | | | |
| | B4S2 | | très rapide | | | | |
| | B4S3 | | Statique rapide | | | | |
| | B4C2 | | Cyclique | | 500 | 485 | 93 |
| | B4S4 | | Statique rapide | | | | |
| | B4C3 | | Cyclique | | 270 | 180 | |
| | B4C4 | | Cyclique | | 270 | 260 | |
| | B4C5 | | Cyclique | | 360 | 270 | |
| | B4C6 | | Cyclique | | 0.5 | 0.3 | |
| | B4C7 | | Cyclique | | 0.4 | 0.4 | |
| | B4C8 | | Cyclique | | 0.5 | 0.4 | |
| | B4S5 | | Statique rapide | | | | |
| | B4S6 | | Statique Dépl-contrôlé | | | | |

4 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

4.1 Equipements utilisés

4.1.1 Vérin statique

Les propriétés du vérin hydraulique à simple effet qui a été utilisé pour le chargement statique sont :

- Charge maximale = 300 T
- Poids = 594 kg
- Diamètre = 356 mm
- Hauteur = 765 mm
- Course = 300 mm
- Plaque de 400mm x 400 mm

Les caractéristiques de la rotule sont :

- Diamètre = 270 mm
- Hauteur = 125 mm

Les caractéristiques du peson sont :

- Charge maximale = 250 T
- Diamètre = 220 mm
- Hauteur = 230 mm

Une photo est présentée sur la Figure 3.



Figure 3 : photo du vérin hydraulique de 300T

Le vérin statique est piloté par une pompe hydraulique manuelle. L'effort est appliqué par paliers de 1 heure. Le palier est donc aussi maintenu manuellement.

4.1.2 Vérin cyclique

Le vérin hydraulique utilisé pour appliquer les essais cycliques sur les pieux a été développé et mis en œuvre par le CEP de Rouen. Il a une capacité de 100 T et une course de 200mm. Il peut effectuer des essais cycliques à de faibles fréquences (0,05 à 2 Hz).

La Figure 4 et la Figure 5 illustrent les caractéristiques de ce vérin.

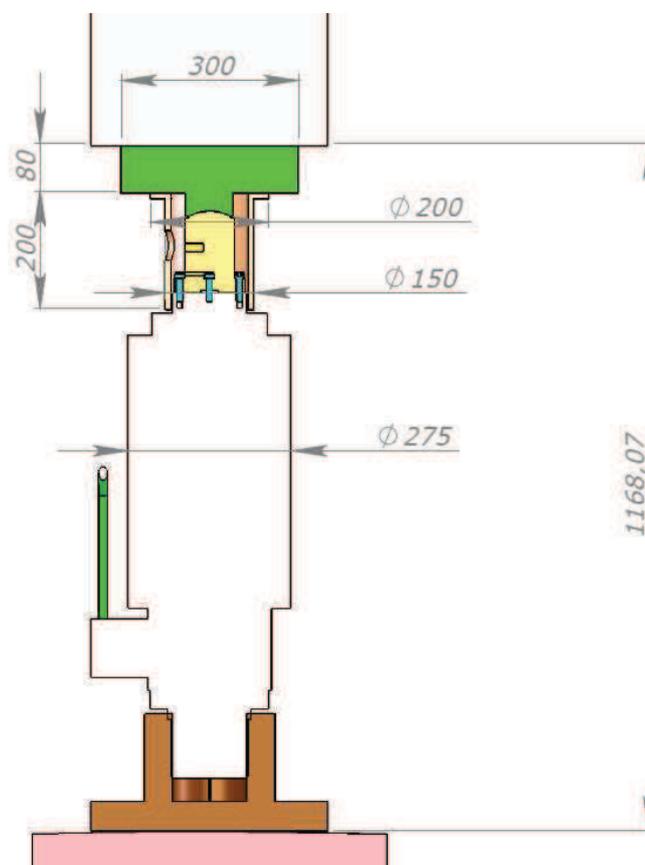


Figure 4 : Vérin hydraulique cyclique (schéma)



Figure 5 : Vérin hydraulique cyclique en opération

4.1.3 *Chargement alterné*

L'application d'un chargement alterné a nécessité la mise en œuvre simultanée des deux vérins agissant en opposition :

- le vérin statique applique un effort de traction maintenu constant par l'intermédiaire d'un accumulateur.
- le vérin cyclique applique des efforts variables qui s'ajoutent (traction) ou se retranchent (compression) à l'effort constant.

Le montage est décrit plus en détail au paragraphe 3.4.

4.1.4 *Capteurs de déplacements*

Pour mesurer les déplacements en tête du pieu, on a utilisé deux types de capteurs :

- des palpeurs LVDT de 50 mm de course utilisés essentiellement pour le chargement cyclique parce qu'ils ont une linéarité de 0,05% (figure 6).
- des palpeurs LVDT de 125 mm avec une linéarité de 0,1%. utilisés pour le chargement statique (figure 7).



Figure 6 : capteur LVDT de 50 mm de course



Figure 7 : capteur LVDT de 125 mm de course

4.1.5 Extensomètres amovibles

Les pieux ont été équipés d'extensomètres amovibles LCPC. Deux tubes de réservation ont été soudés à l'extérieur des pieux battus. Un tube de réservation a été introduit dans le béton après coulage au centre des pieux forés (voir rapport d'installation)

La figure 8 présente un schéma descriptif de l'instrumentation des pieux et la figure 9 montre des photos de l'extensomètre amovible et son montage dans un pieu (Rocher-Lacoste et al, Méthode d'essai n°8, 2011). Pour chacun des types de pieux, 12 niveaux de jauges ont été prévus : un premier tronçon de 1 m en tête de pieu, un second tronçon de 1,40 m puis 10 tronçons de 1 m de long. Dans le cas du pieu battu, étant donné qu'un pré-forage de 4 m a été réalisé pour guider

l'installation, l'instrumentation installée dans les 4 premiers tronçons ne sera pas prise en compte car il n'y a pas de frottement mobilisé sur ces quatre mètres.

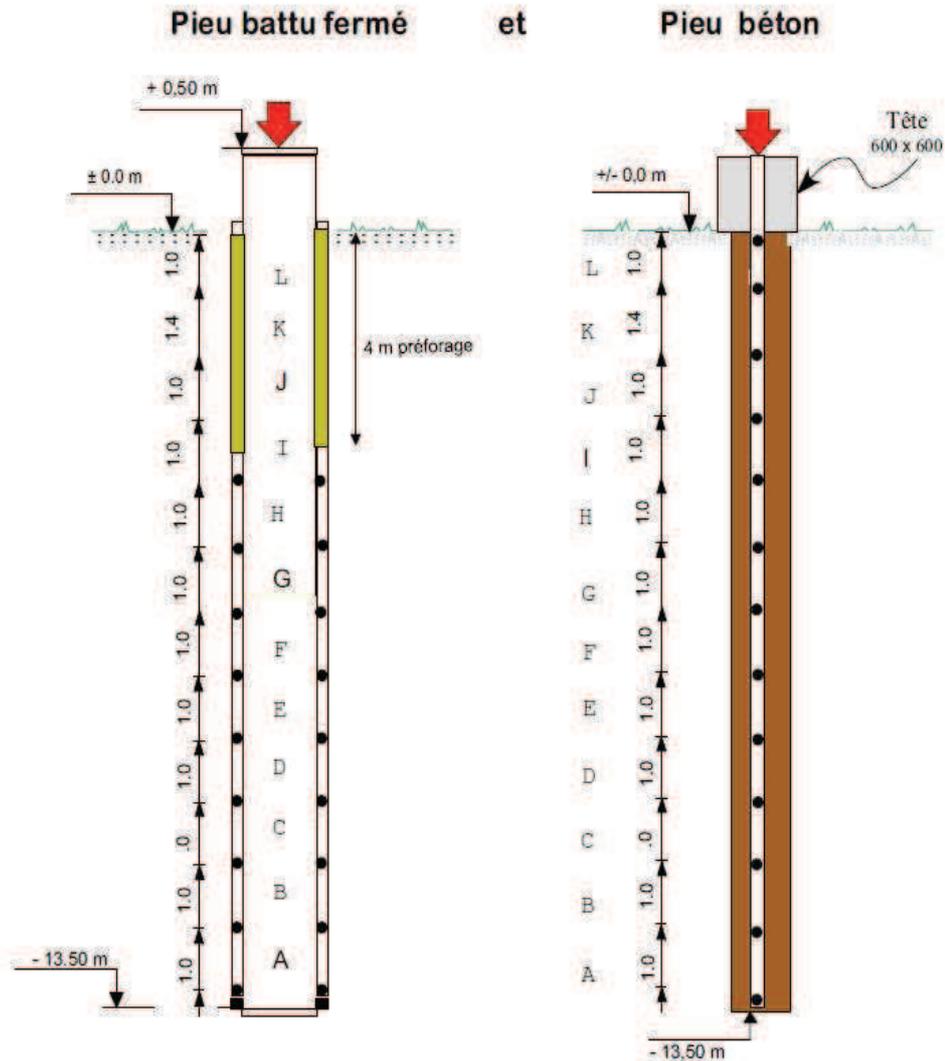


Figure 8 : schéma descriptif de l'instrumentation des pieux



Figure 9 : photos de l'extensomètre amovible

4.2 Montage d'un essai de chargement en compression

Lors de l'essai de chargement en compression, le massif de réaction subit de la traction. En effet, le vérin applique un effort de compression en tête du pieu et un effort sur la poutre qui est transféré via les traverses aux barres ancrées dans les pieux de réactions.

Ce montage (Figure 10 et Figure 11) est identique pour les essais statiques et cycliques en changeant seulement le vérin.

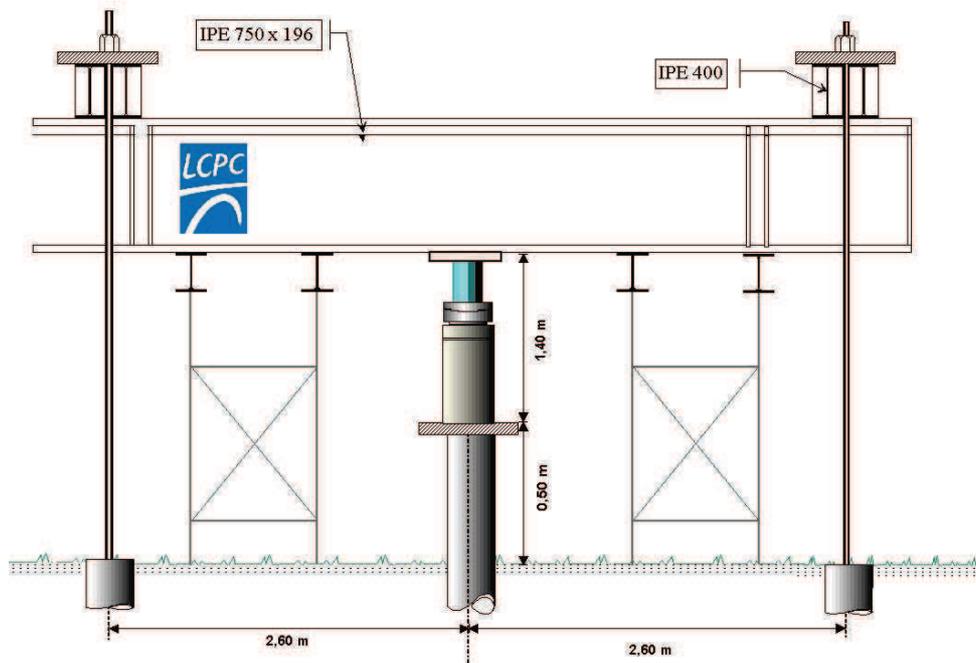


Figure 10 Montage pour essais de chargement à Merville



Figure 11 : photo du montage d'un essai de chargement en compression

4.3 Montage d'un essai de chargement en traction

Pour cet essai, le dispositif est inversé par rapport à l'essai de compression. En effet, le vérin est au dessus de la poutre et applique l'effort de traction via les barres qui sont boulonnées à la tête du pieu. Cet effort appliqué par le vérin est transmis par la poutre et les traverses aux quatre pieux de réaction sous forme de compression (Figure 12).



Figure 12: photo du montage d'un essai de chargement en traction

4.4 Montage d'un essai de chargement cyclique alterné

Le montage (Figure 13) de cet essai a nécessité deux vérins. Le vérin statique au dessus de la poutre et le vérin cyclique en dessous de celle-ci.

Le vérin statique est relié à un accumulateur air/huile (Figure 14) qui permet de compenser toute variation d'effort et donc d'appliquer un effort de référence constant. Cet effort de référence peut être réglé par ajustement de la pression de l'accumulateur. Le système a été conçu par FUGRO France. Le vérin cyclique agit en opposition par rapport au vérin statique.

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

De plus, les pieux de réaction devaient sortir d'au moins un mètre au dessus du sol afin de pouvoir les fixer aux traverses et laisser suffisamment de place pour mettre le vérin cyclique en dessous de poutre. Ce montage n'a été possible qu'en utilisant les pieux battus comme pieux de réaction (en fin de campagne)



Figure 13 : photo du montage d'un essai de chargement cyclique alterné



Figure 14 : photo de l'accumulateur

4.5 Pilotage du vérin cyclique

Le vérin cyclique, asservi par ordinateur, permet d'appliquer des sollicitations à des fréquences maximales de 1 Hz et un effort maximal de 100 tonnes en compression et 80 tonnes en traction. Cinq séquences consécutives peuvent être programmées et effectuées à la suite. La Figure 15 illustre le passage d'une séquence à une autre. Une consigne de sécurité en déplacement est programmée afin de bloquer le système en cas de déplacement trop important en cours de séquence.



Figure 15 Pilotage du vérin

4.6 Acquisition

Le système d'acquisition est équipé de 30 voies de mesure. Il permet d'enregistrer la réponse des quatre capteurs de déplacement, du peson (force appliquée par le vérin) et des extensomètres amovibles.

Pour avoir une précision adéquate, on a choisi d'effectuer :

- 1 mesure par seconde pour l'essai statique.
- 1 à 50 mesures par capteur par cycle.

Les mesures des capteurs y compris les 4 capteurs de déplacement (Figure 16) et les 24 jauges de déformation (Figure 17) installées dans les tubes logements, étaient visualisées en temps réel.

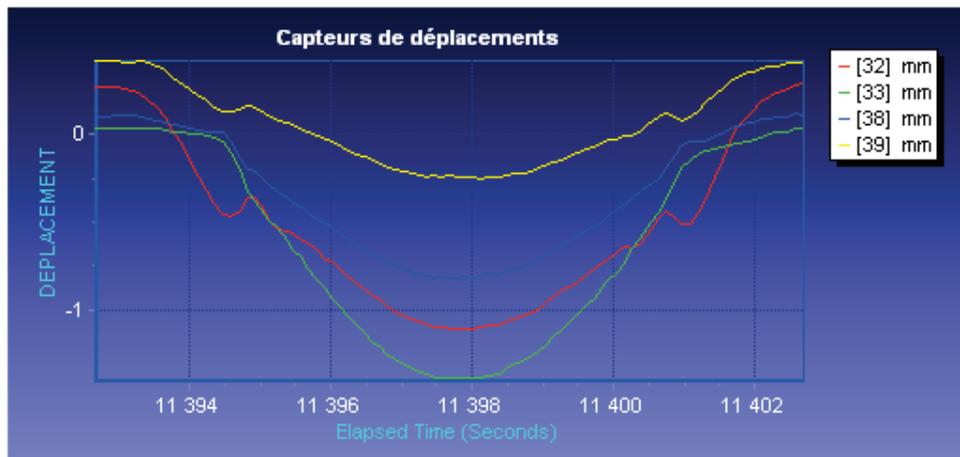


Figure 16 : Mesure en temps réel des 4 capteurs de déplacement

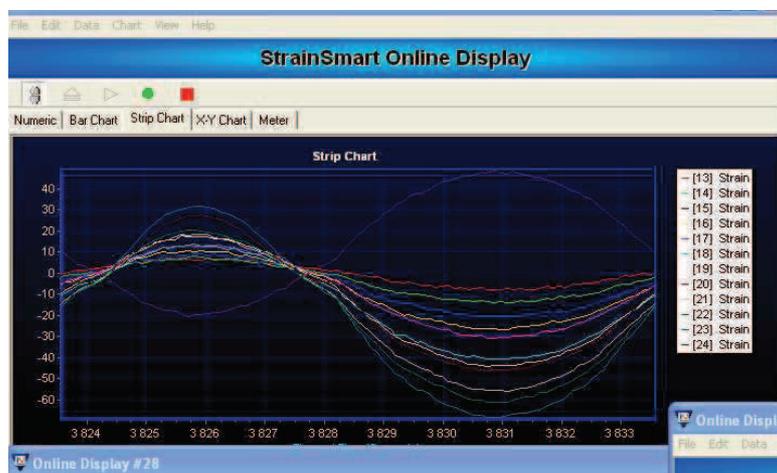


Figure 17 : Mesure en temps réel d'un des trains de jauges pendant une séquence cyclique.

5 COURBES TYPIQUES

5.1 Chargement statique

Sur la Figure 18, on présente les courbes Force – Déplacement enregistrées pour les trois types de pieux. Le pieu foré a la capacité portante la plus faible, suivi du pieu vissé et du pieu battu qui a la capacité portante la plus élevée. Cette hiérarchie est conforme aux prévisions.

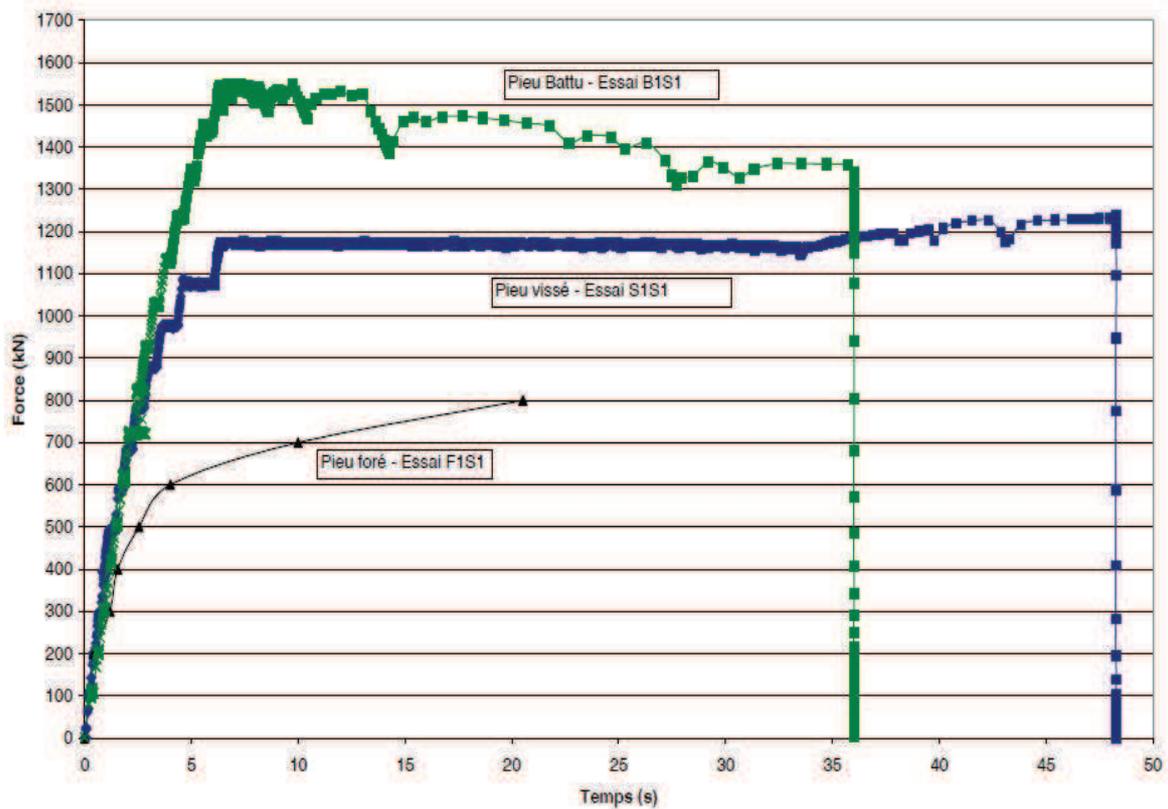


Figure 18 : Comparaison entre les trois types de pieux en compression (pieu foré, pieu vissé et pieu battu)

5.2 Chargement cyclique

5.2.1 Chargement en compression

Pour l'essai du pieu foré F1C5 (compression cyclique), on présente à titre d'illustration, les courbes Force en tête – Temps (Figure 19), Force – Déplacement (Figure 20), Déplacement – Temps (Figure 21), Jauge 12 – Temps (Figure 22), Jauge 1 – Temps (Figure 23). De même, pour l'essai cyclique F2C1, une combinaison de chargement (V_m , V_c) a été appliquée pendant 10 000 cycles. La Figure 24 montre l'évolution du déplacement maximum en fonction du nombre de cycles.

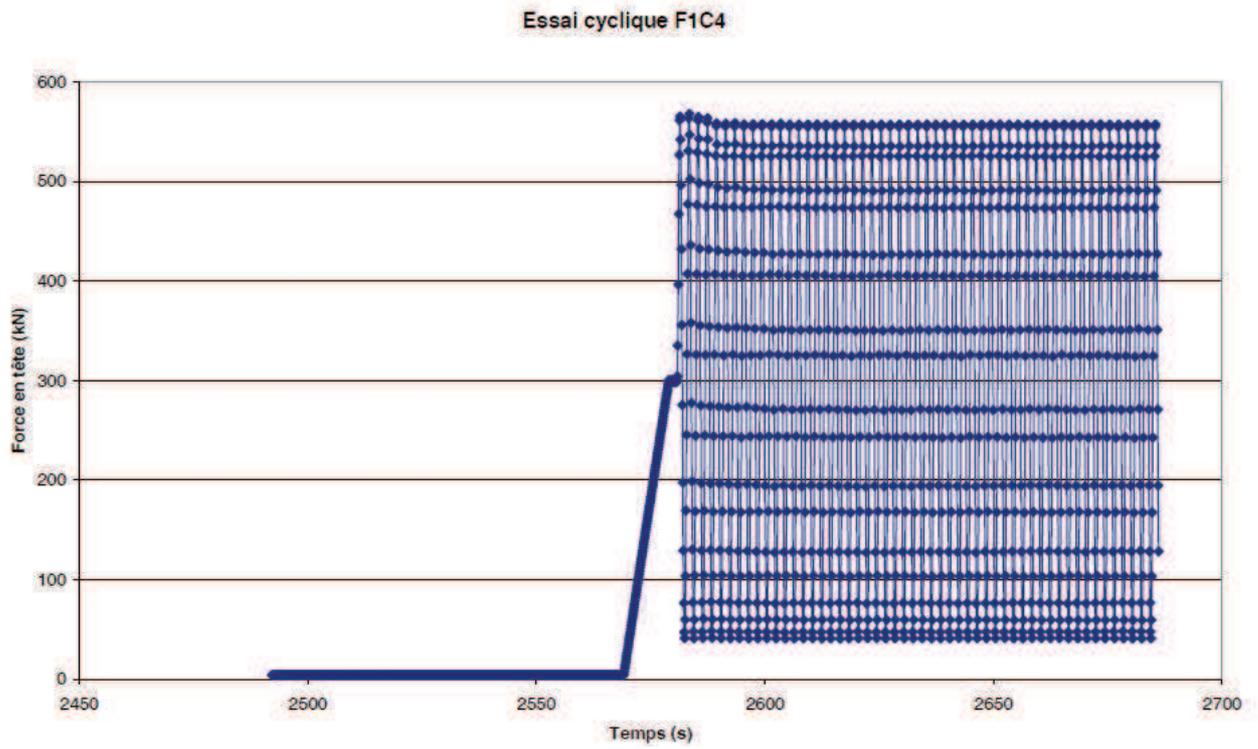


Figure 19 Courbe Effort – Temps (Essai F1C5)

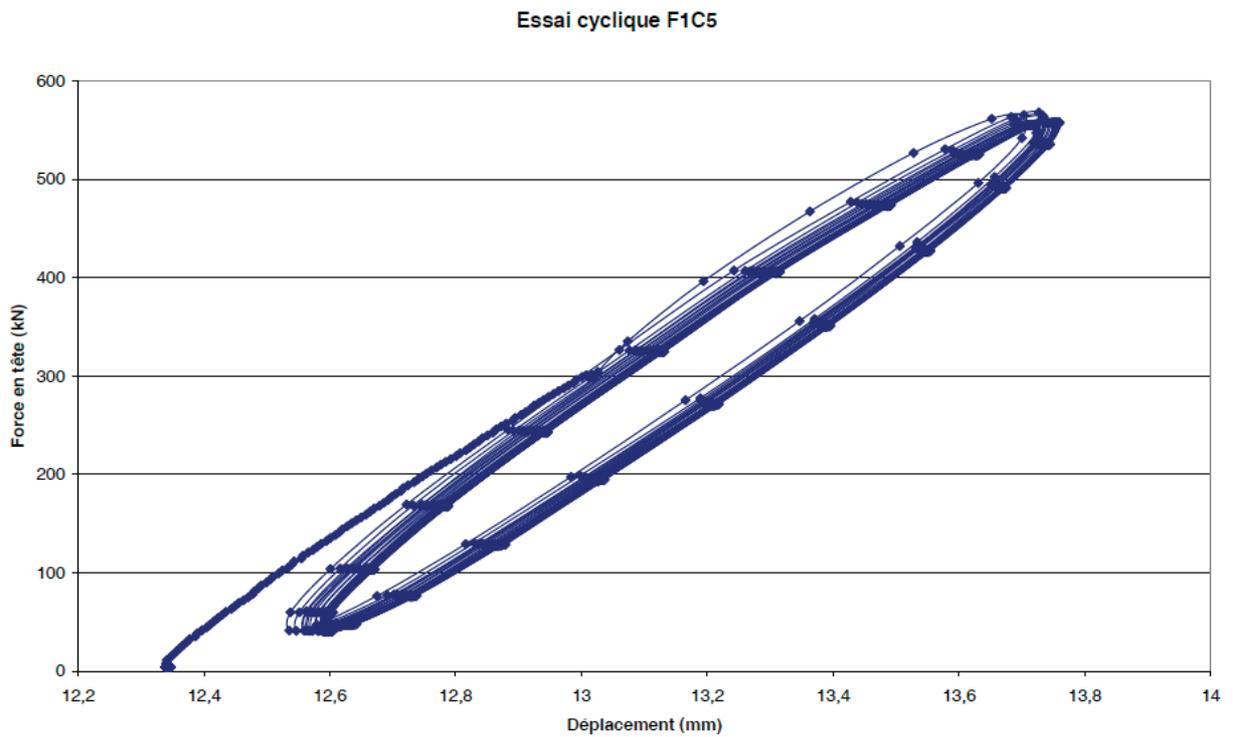


Figure 20 Courbe Effort – Déplacement (Essai F1C5)

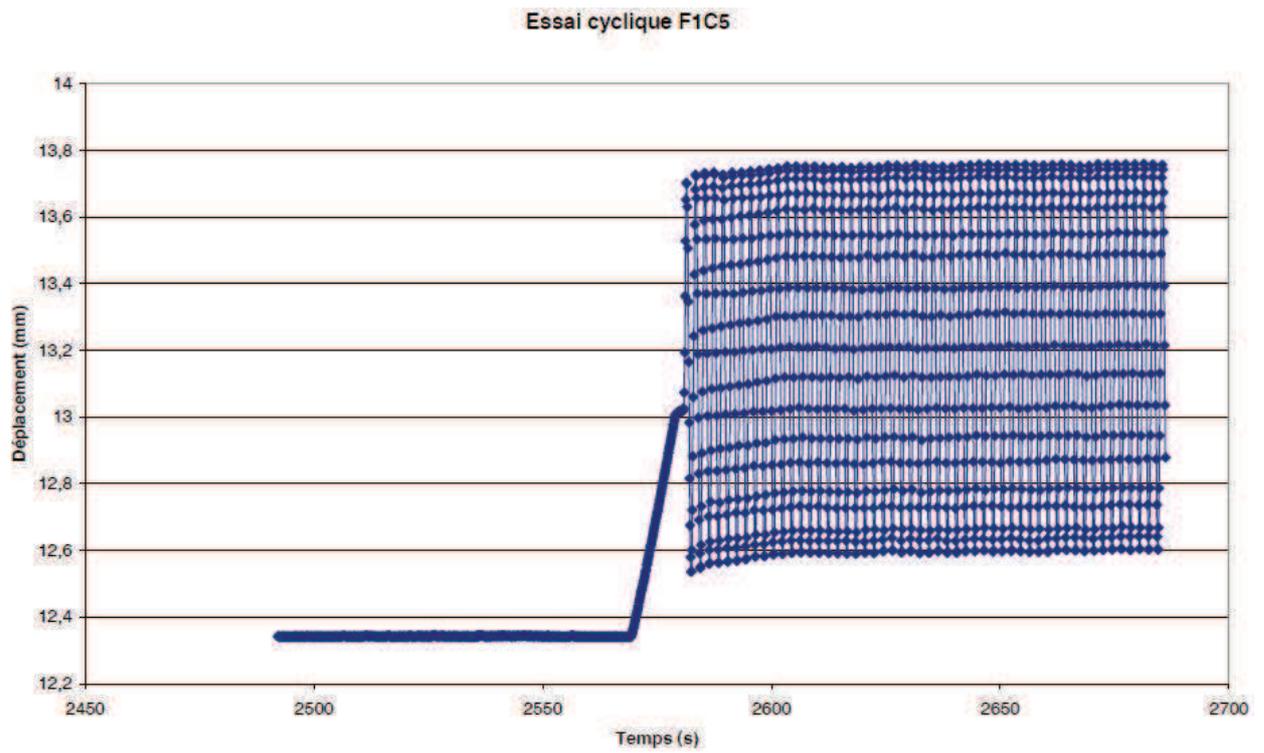


Figure 21 Accumulation des déplacements en fonction du temps (Essai F1C5)

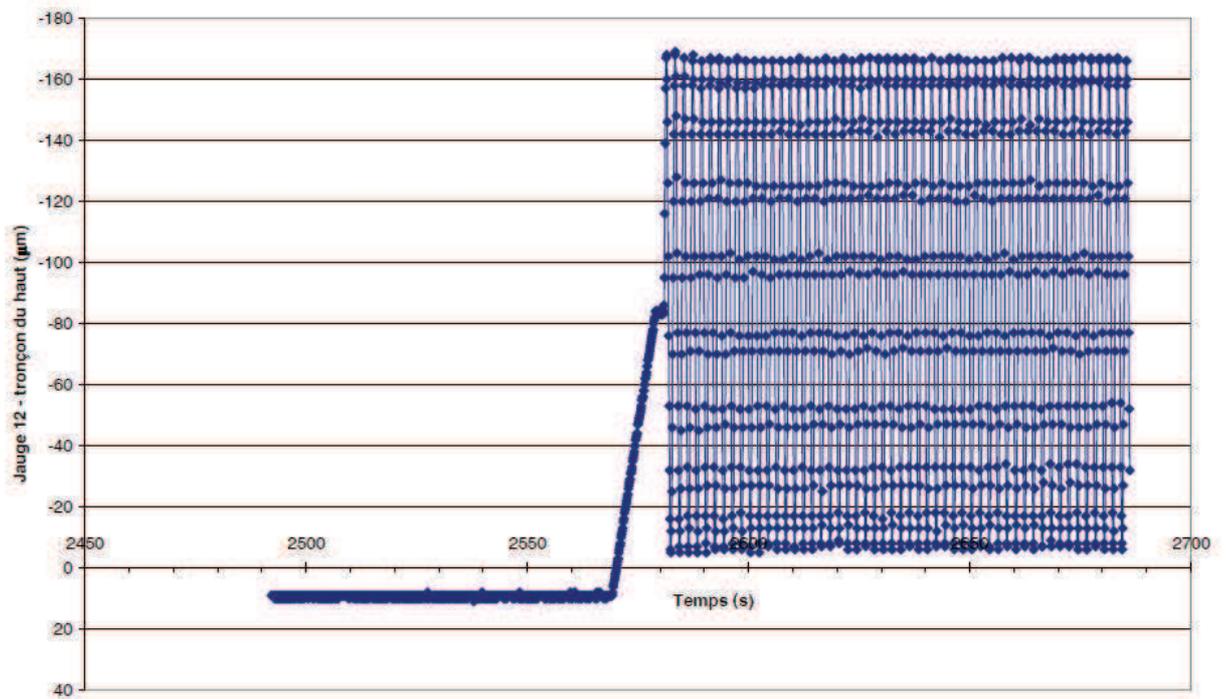


Figure 22 Jauge 12 au niveau de la tête du pieu – Essai F1 C5

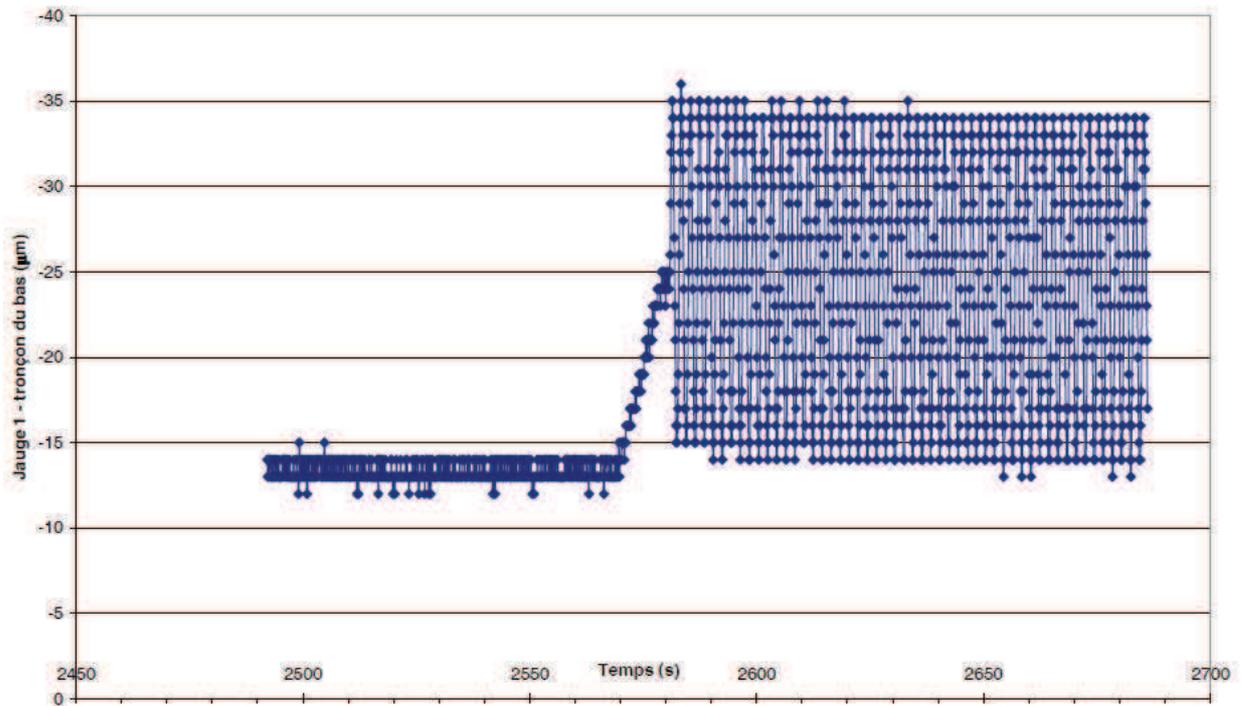


Figure 23 Jauge 1 au niveau de la pointe – Essai F1 – C5

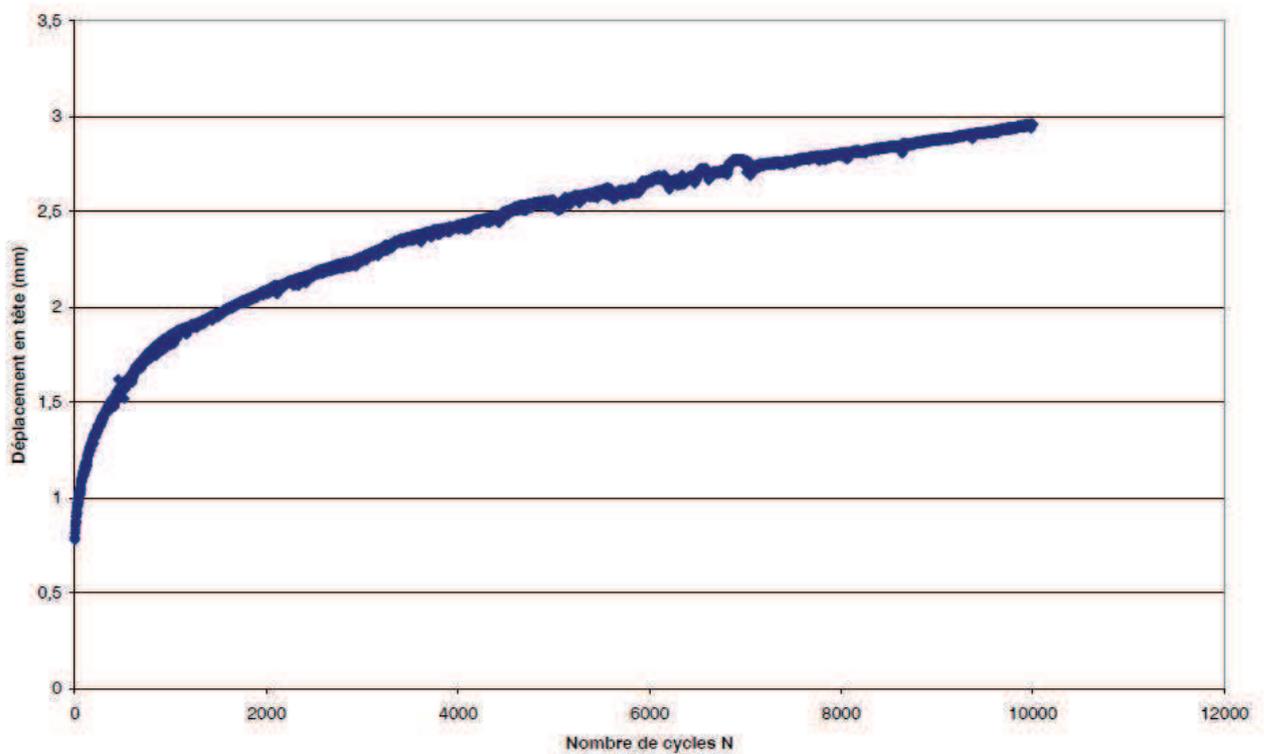


Figure 24 Accumulation des déplacements en tête lors d'une séquence cyclique (Essai F2C1 – $V_m = 0,6$ et $V_c = 0,3$ $N = 10\ 000$)

5.2.2 Chargement alterné

Sur la

Figure 25, on présente une petite partie d'une séquence cyclique alternée résultant de l'effort statique en compression appliqué à partir du vérin statique (300 kN) et de l'amplitude cyclique (0 à 850 kN) appliquée par le vérin cyclique. L'effort cyclique appliqué à la tête du pieu est compris entre 850 kN en compression et 180 kN en traction.

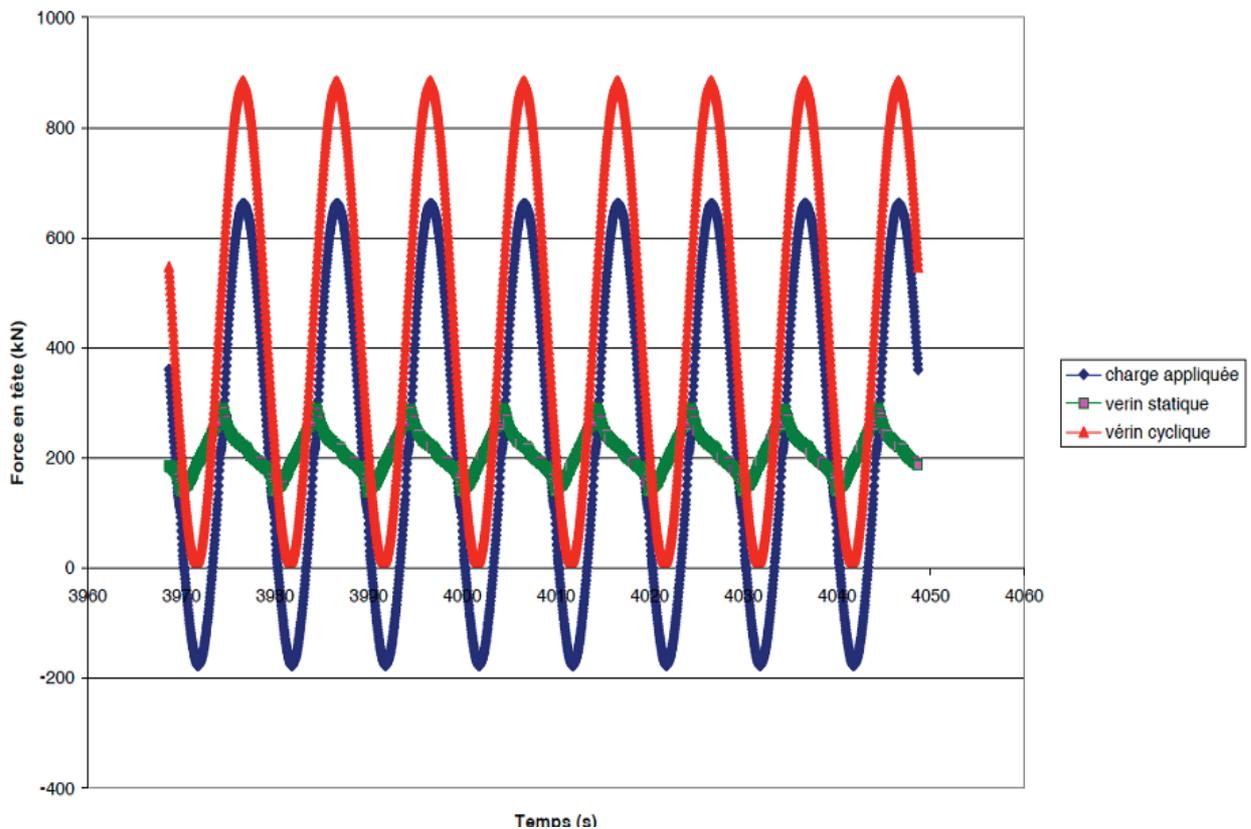


Figure 25 : Exemple de séquence cyclique alterné : l'effort appliqué résultant de la somme de l'effort appliqué par le vérin statique et le vérin cyclique

6 CONCLUSIONS

La campagne d'essais de chargement de pieux de Merville a été effectuée en collaboration entre l'IFSTTAR et FUGRO France avec l'assistance de l'entreprise FRANKI. Elle s'est déroulée du 09 Mai au 30 Juin 2011.

Les pieux étaient de trois types : métalliques battus (4), forés à la tarière (4) et vissés (2). Ils ont été soumis à des essais de chargement en compression, traction et alternés (traction-compression). Les modes de chargement étaient de type statique conventionnel, statique rapide et cyclique.

La réalisation d'essais cycliques instrumentés à grand nombre de cycles était l'objectif principal de cette campagne et représentait un défi opérationnel majeur. Les équipements spécifiques mis en œuvre, notamment :

- le vérin cyclique et son système de pilotage,
- les extensomètres amovibles et le système d'acquisition de données,

ont donné satisfaction.

L'examen des premiers résultats permet de penser que les données sont représentatives et de bonne qualité. L'interprétation des résultats est en cours.

Cette campagne d'essais, unique en son genre, devrait permettre des avancées importantes dans la compréhension de la réponse axiale des pieux sous chargements cycliques et fournir une base de données précieuse pour le projet SOLCYP.

7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASTM (1994) Standard test method for piles under static axial compressive load. ASTM Designation D1143 – 81, 11 pages.

Rocher-Lacoste, R., Dudouyt, F., Le Kouby, A., 2011. Méthode d'essai n°88 – Essai statique de pieu isolé instrumenté avec la technique de l'extensomètre amovible sous charge axiale. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées / IFSTTAR, Paris, 40 pages.