



## RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 3 :  
Expérimentations en centrifugeuse sur  
pieux foncés :  
(a) effet du mode de mise en place,  
(b) effet de l'histoire de chargement  
Essais préliminaires

Auteurs : M. BLANC – M. NIVOCHÉ  
Organisme : IFSTTAR

R/15/SOL/024  
LC/13/SOL/45  
Juillet 2014

# SOLCYP/FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : Expérimentations en centrifugeuse sur pieux foncés: (a) effet du mode de mise en place ; (b) effet de l'histoire de chargement. Essais préliminaires
RAPPORT N° : R/15/SOL/024
DATE D'ETABLISSEMENT : Juillet 2014
AUTEURS: Matthieu BLANC, Mathieu NIVOCHÉ
ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : IFSTTAR
THEME DE RATTACHEMENT : 3, Essais de pieux
LETTRE DE COMMANDE : 13/SOL/45

**Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)**

Cité Descartes  
Boulevard Newton  
Champs-sur-Marne  
77447 Marne-la-Vallée Cedex 2  
Tél. : 01 40 43 50 00  
Fax : 01 40 43 54 98

**IFSTTAR - Centre de Nantes**

Route de Bouaye, CS4, 44344 Bouguenais Cedex  
La 47.154889 Lo -1.63878

*Remerciements*

*Pour mener à bien ce programme expérimental (conception, développement, mise au point et réalisation), plusieurs intervenants ont apporté leur contribution :*

<i>Philippe Audrain</i>	<i>Laboratoire Terrassements et Centrifugeuse</i>	<i>GERS-TC</i>
<i>Claude Favraud</i>	<i>Laboratoire Terrassements et Centrifugeuse</i>	<i>GERS-TC</i>
<i>Patrick Gaudicheau</i>	<i>Laboratoire Terrassements et Centrifugeuse</i>	<i>GERS-TC</i>
<i>Alain Néel</i>	<i>Laboratoire Terrassements et Centrifugeuse</i>	<i>GERS-TC</i>

## LISTE DE DIFFUSION

NOM	ADRESSE
Matthieu Blanc	matthieu.blanc@ifsttar.fr
Alain Puech	a.puech@fugro.com
Meriam Benamor	m.benamor@fugro.com
Luc Thorel	luc.thorel@ifsttar.fr

*Abstract (facultatif)*

**Key-Words** : centrifuge, reduced scale models, piles, cyclic vertical load

*Résumé*

*Ce rapport présente des éléments relatifs à l'essai de mise au point du dispositif expérimental destiné à étudier le comportement de pieux sous charge cyclique verticale, incluant une phase de fonçage.*

**Mots clés** : Centrifugeuse, modèles réduits, pieu, sollicitation verticale cyclique

## Notations

$C$	essai de compression,
$CF$	essai de compression sur pieu foncé,
$CM$	essai de compression sur pieu moulé
$d$	diamètre du pieu,
$D_{50}$	diamètre moyen des grains du sol,
$f$	fréquence du chargement cyclique,
$F_{34}$	effort appliqué par le vérin au cours de l'essai,
$F_{lat}$	effort latéral appliqué sur l'ensemble du pieu,
$F_{lat1}$	effort latéral appliquée sur la première partie du pieu, située entre la surface du conteneur et le capteur en pointe,
$F_{lat2}$	effort latéral appliquée sur la seconde partie du pieu, située entre le capteur en pointe et l'extrémité du pieu,
$g$	accélération centrifuge,
$G$	module de cisaillement du sol,
$h$	distance entre la pointe du pieu et le point d'étude,
$I_D$	indice de densité,
$K_0$	coefficient de pression des terres au repos,
$N_c$	nombre de cycles menant à la rupture,

$N$	facteur d'échelle,
$p$	hauteur de la partie 2 du pieu modèle,
$P_a$	pression atmosphérique absolue correspondant à 100 000 Pa,
$Q_f$	effort de frottement sur l'ensemble du pieu,
$Q_{f1}$	effort de frottement sur la première partie du pieu,
$Q_{f2}$	effort de frottement sur la seconde partie du pieu,
$Q_p$	effort de pointe,
$r$	rayon du pieu.
$R$	constante représentant le poids de la rotule à 23g,
$R_{max}$	hauteur des aspérités sur une longueur de $D_{50}$ ,
$R_n$	rugosité normalisée,
$S$	surface du pieu,
$T$	essai de traction,
$T_{cy}$	essai de traction sur pieu cyclique,
$TF$	essai de traction sur pieu foncé,
$TM$	essai de traction sur pieu moulé,
$t$	temps de l'essai,
$v$	déplacement du pieu,
$v_{moy}$	déplacement moyen du pieu,
$V$	effort réel appliqué sur le pieu,
$V_c$	demi-amplitude de la sollicitation cyclique,
$V_{CP}$	effort en pointe (composé de l'effort de pointe et de frottement),
$V_m$	composante moyenne de la charge cyclique,
$V_{max}$	charge maximale au cours des cycles ( $V_{max} = V_m + V_c$ ),
$V_{min}$	charge minimale au cours des cycles ( $V_{min} = V_m - V_c$ ),
$V_r$	résistance caractéristique ( $V_{rc}$ ou $V_{rt}$ suivant le type d'essai réalisé),
$V_{rc}$	résistance à la compression,
$V_{rc\ moy}$	résistance moyenne à la compression,
$V_{rt}$	résistance à la traction,
$V_{rt\ moy}$	résistance moyenne à la traction,
$z$	profondeur du pieu au cours du temps,
$z_0$	hauteur entre le sol et le capteur en pointe.
$\delta$	angle de frottement sol-pieu,
$\delta h$	déplacement perpendiculaire au plan de cisaillement,
$\Delta\sigma'_{rd}$	variation de la contrainte radiale effective due au chargement.
$\gamma$	poids volumique du sol,
$\gamma_d$	poids volumique sec,
$\emptyset$	diamètre du pieu,
$\varphi$	angle de frottement du sable,
$\rho_{dmin}$	densité sèche minimale du sable,
$\rho_{dmax}$	densité sèche maximale du sable,
$\rho_s$	densité des grains,
$\sigma'_{cv}$	contrainte verticale effective du sol avant la mise en place du pieu,
$\sigma'_h$	contrainte horizontale dû au sol,
$\sigma'_{rc}$	contrainte radiale effective initiale,
$\sigma'_{rf}$	contrainte radiale effective finale.

## Liste des tableaux

Tableau I. Facteurs d'échelle utilisés pour l'étude.....	15
Tableau II. Caractéristiques du sable de Fontainebleau (Sobesol, 2007). ....	15
Tableau III. Distribution granulométrique du sable de Fontainebleau N34 (Sobesol, 2007).....	15
Tableau IV. Valeurs de corrections d'effort pour chaque palier.....	22
Tableau V. Mode de mise en oeuvre des pieux. ....	23
Tableau VI. Programme d'essais réalisés.....	30
Tableau VII. Chargement du conteneur C04.....	30
Tableau VIII. Résultats des essais de chargement quasi-statique sur pieux moulés. ....	32
Tableau IX. Essais de chargement quasi-statique de référence en compression sur pieux foncés.....	33
Tableau X. Essai de chargement quasi-statique de référence en traction sur pieux foncés. ....	33
Tableau XI. Essais cycliques de traction sur pieux foncés.....	34
Tableau XII. Données remarquables des essais en traction cyclique. ....	35
Tableau XIII. Caractéristiques des pieux.....	36
Tableau XIV. Valeurs caractéristiques moyennes suivant le mode de mise en place.....	39
Tableau XV. Valeur de la résistance à la rupture en compression lors du premier fonçage. ....	40
Tableau XVI. Déplacement des pieux du conteneur C04 au cours de l'essai. ....	51
Tableau XVII. Pente du déplacement en fonction des cycles des essais C04.....	51

## Liste des figures

Figure 1. Diagramme de stabilité cyclique (Poulos, 1988). .....	13
Figure 2. Diagramme de stabilité des pieux sous chargement cyclique axial (sable de Fontainebleau fortement dense) (Guefrech & Rault, 2012).....	14
Figure 3. Ensemble du dispositif expérimental utilisé pour la reconstitution des massifs de sable. ....	16
Figure 4. Représentation schématique du pieu instrumenté. ....	17
Figure 5. Définition de la rugosité à l'interface pieu et particule. ....	18
Figure 6. Montage expérimental : photo du montage embarqué en centrifugeuse (gauche) - représentation schématique du montage (droite). ....	19
Figure 7. Liaison entre le vérin et le pieu : photo (gauche) - représentation schématique (droite). ....	19
Figure 8. Représentation schématique du pré-fonçage du pieu à 1g.....	21
Figure 9. Effort réel $V$ en fonction du déplacement pour représenter les différents types de mise en oeuvre. ....	23
Figure 10. Principe d'un essai de chargement cyclique à travers la représentation de l'effort axial en fonction du temps. ....	24
Figure 11. Effort $F_{34}$ en fonction du temps $t$ de l'essai C03-T06 en valeur modèle. ....	25
Figure 12. Représentation schématique d'un pieu et de ses grandeurs associées.....	26
Figure 13. Effort réel $V$ en fonction du déplacement adimensionné d'un essai monotone en compression. ....	29
Figure 14. Effort réel $V$ en fonction du déplacement sur un essai sollicité en traction.....	29
Figure 15. Effort réel $V$ en fonction du déplacement sur les pieux possédant une rugosité normalisée $R_n$ de 0,5 (a) et de 1 (b).....	37
Figure 16. Écart à l'effort caractéristique ( $V_{rc}$ ou $V_{rt}$ ) normalisé (a) et écart au déplacement normalisé à la rupture (b) en fonction de l'angle de la pointe.....	38
Figure 17. Effort appliqué $V$ des essais monotones en fonction du déplacement. ....	39
Figure 18. Effort de frottement en fonction du déplacement sur la partie 1 du pieu $Q_{f1}$ (a) et sur l'ensemble du pieu $Q_f$ (c). Angle de frottement sol-pieu en fonction du déplacement (b). ....	42
Figure 19. Effort en pointe $V_{CP}$ (a) et effort de pointe corrigé $Q_p$ (b) et effort de pointe $Q_p$ en fonction du déplacement normalisé. ....	44
Figure 20. Effort appliqué $V$ (a), effort de frottement $Q_f$ (b) et effort de pointe $Q_p$ (c) en fonction du déplacement adimensionné.....	46
Figure 21. Angle de frottement sol-pieu $\delta$ en fonction du déplacement adimensionnel. ....	47
Figure 22. Diagramme de stabilité des pieux sous chargement axial obtenue dans le cadre du projet SOLCYP.....	48
Figure 23. Diagramme de stabilité: comparaison entre les résultats de l'IFSTTAR, 3S-G et ICST. ....	48
Figure 24. Diagramme de stabilité des pieux sous chargement cyclique axial exprimé en ration de $V_{rt}$ (a) en ration de $V_{rc}$ (b) et sans ratio (c). ....	49

Figure 25. Evolution des déplacements des essais cycliques en fonction du nombre de cycle appliqué.  
..... 51

# SOMMAIRE

<b>Notations</b> .....	<b>5</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>7</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Introduction</b> .....	<b>12</b>
1.1 Contexte de l'étude .....	12
1.2 Objectifs de l'étude .....	14
<b>2 Dispositif expérimental</b> .....	<b>14</b>
2.1 Modélisation en centrifugeuse .....	14
2.2 Matériau granulaire .....	15
2.2.1 Caractérisation .....	15
2.2.2 Préparation du massif .....	16
2.3 Pieux modèles .....	17
2.3.1 Pieux instrumentés .....	17
2.3.2 Etat de surface des pieux : rugosité .....	17
2.4 Dispositif de chargement .....	18
2.4.1 Montage expérimental .....	18
2.4.2 Instrumentation .....	20
<b>3 Campagne expérimentale</b> .....	<b>21</b>
3.1 Protocole expérimental .....	21
3.1.1 Pré-fonçage à 1g .....	21
3.1.2 Phase de préconditionnement du massif .....	22
3.1.3 Fonçage à 23g .....	22
3.1.4 Chargement .....	23
3.2 Exploitation des résultats obtenus .....	25
3.2.1 Introduction .....	25
3.2.2 Exploitation des données .....	26
3.2.3 Détermination des résistances caractéristiques .....	29
3.3 Programme de chargement .....	30

<b>4</b>	<b>Synthèse des résultats.....</b>	<b>32</b>
4.1	Essais monotones .....	32
4.1.1	Essais monotones sur pieux moulés.....	32
4.1.2	Essais monotones sur pieux forcés.....	33
4.2	Essais cycliques .....	34
<b>5</b>	<b>Analyse des résultats.....</b>	<b>36</b>
5.1	Influence de la forme de la pointe et de la rugosité du pieu.....	36
5.2	Influence du mode de mise en place.....	39
5.2.1	Comportement des efforts caractéristiques $V_r$ .....	39
5.2.2	Comportement de l'effort de frottement $Q_f$ .....	40
5.2.3	Comportement de l'effort de pointe $Q_p$ .....	43
5.2.4	Conclusion.....	44
5.3	Etude du comportement cyclique .....	45
5.3.1	Distribution des efforts dans le pieu .....	45
5.3.2	Comportement des essais cycliques : diagrammes de Poulos.....	47
5.3.3	Influence de l'histoire de chargement .....	50
<b>6</b>	<b>Conclusions et perspectives .....</b>	<b>52</b>
	<b>Références .....</b>	<b>53</b>

# 1 Introduction

Les travaux présentés dans ce rapport font suite aux expérimentations réalisées dans le cadre du projet ANR-SOLCYP, au cours duquel des pieux moulés ont été soumis à un chargement vertical cyclique afin d'identifier le diagramme de stabilité (Guefrech & Rault, 2012).

L'enjeu du présent programme est de poursuivre la même étude, mais dans le cas de pieux foncés. Cela a nécessité des modifications dans le montage et dans la procédure d'essai.

## 1.1 Contexte de l'étude

Selon Poulos (1988), le diagramme de stabilité cyclique permet d'analyser la réponse d'un pieu 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.

Le diagramme (figure 1) est défini par trois zones :

- une région A stable cycliquement : le chargement cyclique n'a pas d'influence dans ce cas sur la capacité axiale du pieu,
- une région B métastable cycliquement : le chargement cyclique cause une certaine réduction de la capacité axiale du pieu,
- une région C instable cycliquement : le chargement cyclique provoque une réduction significative de la capacité axiale du pieu pouvant mener jusqu'à la rupture au bout d'un nombre de cycle  $N_c$ .

Les limites des zones ainsi définies correspondent à un nombre de cycles égal pour atteindre la rupture. Une partie de l'étude consiste à tester différents types de chargements remarquables et d'en connaître le nombre de cycles pour atteindre la rupture : on s'attache uniquement à étudier le comportement sous charges axiales.

La construction du diagramme est faite en associant les paramètres caractéristiques d'un cycle : l'amplitude  $V_c$  en fonction du chargement moyen  $V_m$  normalisé par la résistance ultime en compression  $V_{rc}$  (ou résistance ultime en traction  $V_{rt}$ ).

On rappelle que :

- $V_{rc}$  : résistance à la compression monotone,
- $V_{rt}$  : résistance à la traction monotone (arrachement),
- $V_m$  : la composante moyenne de la charge cyclique,
- $V_c$  : amplitude de la sollicitation cyclique.

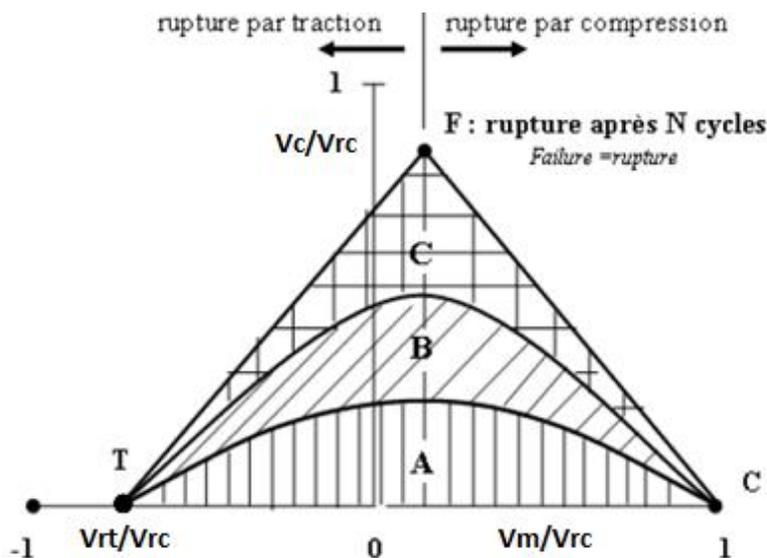


Figure 1. Diagramme de stabilité cyclique (Poulos, 1988).

Les points et axes remarquables de ce diagramme sont les suivants :

- Le point C ( $V_m / V_{rc} = 1 ; V_c / V_{rc} = 0$ ) correspond à la rupture sous chargement monotone en compression. En effet, il n'y a pas de composante cyclique. De plus, la charge en compression appliquée correspond à la rupture,
- Le point T ( $-V_{rt} / V_{rc} ; V_c / V_{rc} = 0$ ) correspond à la rupture sous chargement monotone en traction. Ce point n'atteint pas -1 car la capacité en traction est inférieure à la capacité en compression. Cette différence est due à la résistance du sol en pointe,
- Les points sur l'axe des abscisses ( $V_c / V_{rc} = 0 ; -V_{rt} / V_{rc} < V_m / V_{rc} < 1$ ) correspondent à une rupture impossible,
- L'ordonnée du point F est égal à  $(V_{rc} - V_{rt}) / (2 V_{rt})$ ,
- La droite CF d'équation  $V_c / V_{rc} = 1 - V_m / V_{rc}$  correspond à une charge maximale telle que  $V_c = V_{rc} - V_m$ . On atteint donc la rupture en compression au premier cycle,
- De même la droite TF d'équation  $V_c / V_{rc} = V_{rt} / V_{rc} - V_m / V_{rc}$  correspond à une rupture en traction qui est atteinte dès le premier cycle pour la même raison,

Ainsi, les cas de chargements favorables aux cycles (nombre élevé de cycles) combinent des paramètres  $V_c$  et  $V_m$  proches de l'abscisse, et inversement les cas de chargement combinant des valeurs de paramètres proches des diagonales seront défavorables aux cycles.

Une précédente campagne expérimentale en centrifugeuse (Guefrech & Rault, 2012) a permis de dévoiler les contours de ce diagramme de stabilité dans le cadre de pieux moulés, ayant une certaine rugosité, pour une rupture à 10% du diamètre du pieu à partir du début des cycles.

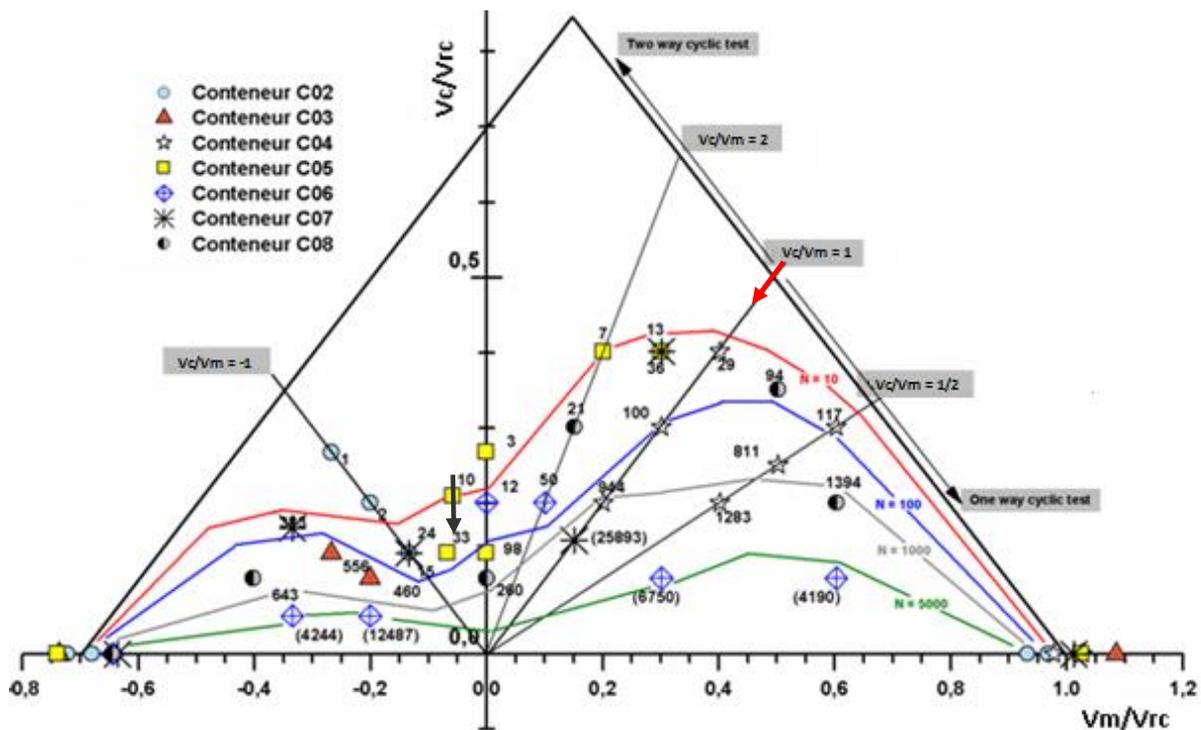


Figure 2. Diagramme de stabilité des pieux sous chargement cyclique axial (sable de Fontainebleau fortement dense) (Guefrech & Rault, 2012).

## 1.2 Objectifs de l'étude

Cette présente étude compte trois objectifs principaux :

- confronter des pieux de différentes rugosités et de différents angles de pointe,
- comparer différents modes de mise en place : pieux moulés et pieux fondés,
- étudier l'influence de l'histoire du chargement : effectuer des combinaisons de cycles d'amplitudes variées dans des ordres différents.

## 2 Dispositif expérimental

### 2.1 Modélisation en centrifugeuse

Les essais en vraie grandeur nécessitent souvent des budgets lourds en termes de moyens et de temps consacré, particulièrement pour les essais sur les fondations profondes. De plus, la variabilité naturelle des sols d'un site n'est pas toujours facilement identifiable. L'unicité de l'essai de pieu associé à l'ouvrage ne permet pas toujours de conduire le protocole d'essais jusqu'à la rupture et doit tenir compte des aléas du site (condition de chantier, d'instrumentation, homogénéité du site,...). Ce type d'essais s'avère donc difficile et parfois délicat à analyser, mais néanmoins indispensable pour tester des procédés de mise en place par exemple.

L'approche expérimentale par le biais de modèles réduits centrifugés permet de modéliser l'ouvrage en vraie grandeur à condition que certaines règles soient respectées. Ces lois dites de similitude permettent de transposer les comportements statiques, cycliques ou dynamiques du modèle réduit vers l'ouvrage réel appelé prototype.

Parmi les avantages de la modélisation physique en centrifugeuse, on souligne notamment la possibilité de dupliquer les essais afin de vérifier un comportement, de référence par exemple, de multiplier les configurations, de les réaliser dans des conditions idéales de reconstitution et de mise en œuvre parfaitement maîtrisées et de les conduire jusqu'à la rupture sans trop de risque pour les équipements et l'instrumentation récupérable.

Le Tableau I présente les grandeurs et paramètres principaux utilisés pour l'étude en cours où le rapport N est le facteur d'échelle à appliquer pour respecter l'analogie de comportement entre le prototype et le modèle réduit.

On rappelle que les essais sont réalisés sous une gravité constante de 23g, accélération centrifuge équivalente au rapport de réduction dimensionnel des modèles.

Tableau I. Facteurs d'échelle utilisés pour l'étude.

Grandeur physique	Facteur d'échelle
Accélération	1
Longueur	1/N
Déplacement	1/N
Déformation	1
Force	1/N <sup>2</sup>
Force de masse	N
Contrainte	1
Masse	1/N <sup>3</sup>
Poids	1/N <sup>2</sup>
Masse volumique	1
Fréquence	N
Temps dynamique	1/N
Vitesse dynamique	1

## 2.2 Matériau granulaire

### 2.2.1 Caractérisation

Tous les essais sous charges axiales ont été réalisés en utilisant du sable de Fontainebleau NE34 dont on rappelle dans le Tableau II et Tableau III, les principales caractéristiques et la distribution granulométrique issues du rapport d'essais de caractérisation établie par Sobesol (2007).

La détermination des densités maximale et minimale est utile pour encadrer le calcul de l'indice de densité de chaque massif reconstitué.

Tableau II. Caractéristiques du sable de Fontainebleau (Sobesol, 2007).

$\rho_{dmin}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{dmax}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]
1,417	1,736	2,65

Tableau III. Distribution granulométrique du sable de Fontainebleau N34 (Sobesol, 2007).

Tamis [mm]	0,5	0,2	0,1	0,08
Passant [%]	100	35,4	0,5	0,2

## 2.2.2 Préparation du massif

La préparation des massifs de sable de Fontainebleau est réalisée par la méthode de pluviation dans l'air au moyen de la trémie automatique de l'IFSTTAR installée dans une salle dédiée. La Figure 3 présente les détails du dispositif expérimental utilisé pour la préparation des massifs de sable et permet de comprendre le fonctionnement de l'installation.

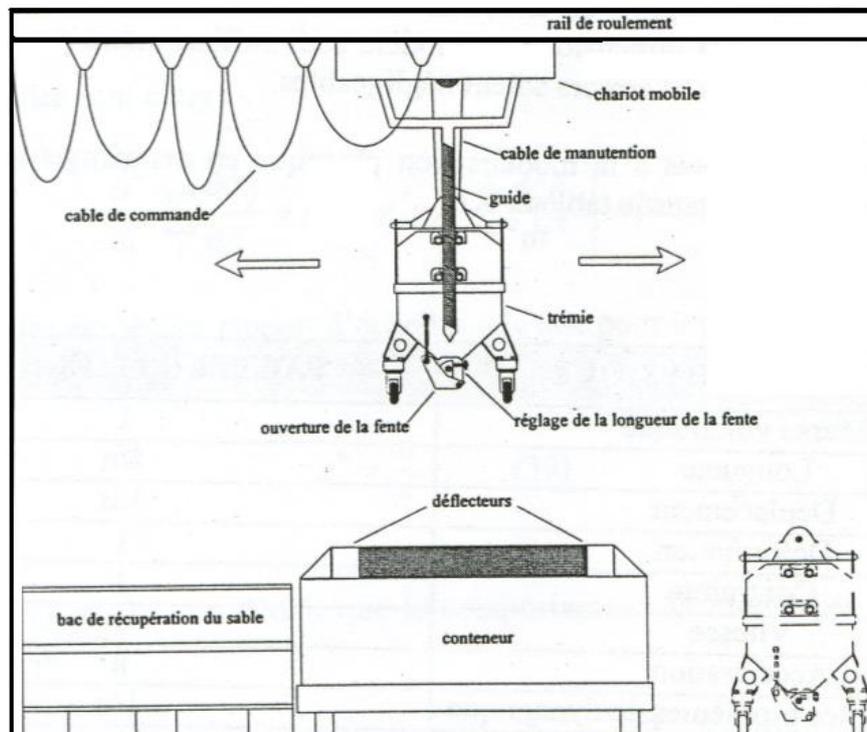


Figure 3. Ensemble du dispositif expérimental utilisé pour la reconstitution des massifs de sable.

Les paramètres de réglage de la trémie conditionnent la densité finale du massif : l'ouverture de la fente, la hauteur de chute et la fréquence (nombre) d'aller/retour de la trémie. La remontée de la trémie se fait automatiquement.

Par exemple, pour atteindre la densité relative visée de 90%, les paramètres sont les suivants :

- une hauteur de chute de 900 mm,
- une ouverture de la fente de 3 mm,
- une vitesse de déplacement de 4 allers et retours (réglage des paramètres du moteur équivalent à 50 Hz).

Le massif de sol est reconstitué dans un conteneur métallique rectangulaire, assemblage de deux éléments superposés de 360 mm de profondeur ce qui permet de réaliser un massif de sol d'une hauteur totale de 720 mm compte tenu de la fiche des pieux (560 mm).

## 2.3 Pieux modèles

### 2.3.1 Pieux instrumentés

Le pieu modèle est un pieu cylindrique à pointe plate de diamètre 18 mm, de longueur 590 mm et de fiche 560 mm. Ce pieu est instrumenté en pointe d'un capteur de force *Measurement Specialties* XF3057 de résistance maximale en traction et en compression de 17 kN. Ce capteur de force se situe à 25 mm de la pointe et fait 21 mm de long. Afin de laisser passer le câble d'alimentation et de mesure, la partie supérieure du pieu est constituée de trois tubes creux (de diamètre interne 5 mm) vissés les uns dans les autres d'une longueur totale de 544 mm.

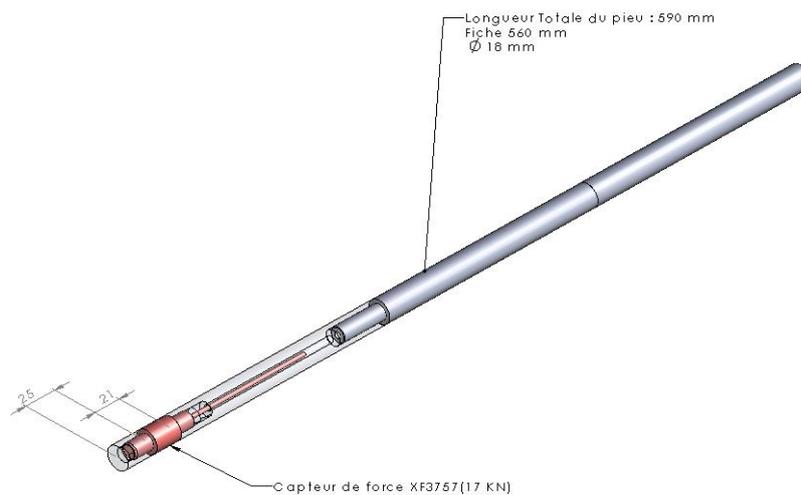


Figure 4. Représentation schématique du pieu instrumenté.

### 2.3.2 Etat de surface des pieux : rugosité

L'état de surface des pieux influence le contact sol-pieu et par voie de conséquence la capacité portante du pieu ainsi que son comportement à long terme vis à vis de sollicitations de type cyclique. En effet, la mobilisation du cisaillement par frottement sur la surface latérale du pieu dépend de la rugosité de ce dernier.

On définit la rugosité normalisée  $R_n$  par le rapport :

$$R_n = \frac{R_{max}}{D_{50}} \quad (1)$$

avec  $D_{50}$  : diamètre moyen des grains du sol,  $R_{max}$  : profondeur des aspérités sur une longueur de  $D_{50}$ .

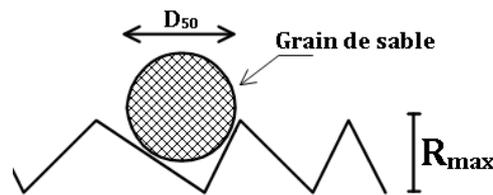


Figure 5. Définition de la rugosité à l'interface pieu et particule.

Selon Lings & Dietz (2005) :

- interface lisse :  $R_n < 0,02$  ou  $R_a/D_{50} < 0,003$  (non dilatant),
- interface rugueuse :  $R_n > 0,5$  ou  $R_a/D_{50} > 0,08$ .

avec  $R_a$ , la moyenne arithmétique de l'écart à la surface de référence.

Par exemple, sachant que pour le sable de Fontainebleau,  $D_{50}$  est de l'ordre de 0,2 mm, s'il on veut assurer une rugosité normalisée  $R_n = 1$ , il faut que l'état de surface des pieux présente une valeur de  $R_{max} = 0,2$  mm. Pour garantir ce type de rugosité, l'usinage de l'enveloppe des pieux modélisés doit être usiné avec une filière de 200  $\mu\text{m}$ .

En adoptant un état de surface de type rugueux, la mobilisation de l'effort de cisaillement devient maximale et le plan de rupture se manifeste non pas au niveau de l'interface sol-pieu mais dans le sol environnant.

Dans le cadre de notre étude, deux types de rugosité différente sont étudiés avec des pieux usinés à 100 et 200  $\mu\text{m}$  correspondant respectivement à une rugosité normalisée  $R_n$  de 0,5 et 1.

## 2.4 Dispositif de chargement

### 2.4.1 Montage expérimental

L'application du chargement, aussi bien monotone que cyclique, sur le pieu se fait au moyen d'un servo-vérin hydraulique contrôlé par un tiroir de contrôle-commande MOOG ST003014-205 positionné dans l'axe de la centrifugeuse. Ce contrôleur est relié par Ethernet jusqu'à un ordinateur situé dans le centre de commande permettant d'effectuer les différentes séquences de chargement à réaliser au cours de l'essai.

Dans la configuration de l'essai, le vérin est positionné verticalement au-dessus du pieu (Figure 6). Il est fixé sur une bi-poutre rigide, elle-même posée sur des plats martyrs vissés sur les bords longitudinaux du conteneur. L'ensemble est fixé rigidement par des pinces de serrage pour reprendre les efforts de poussée. Vu les possibilités de réglage, l'ensemble de vérinage peut être déplacé rapidement d'un emplacement à l'autre sans modifier fondamentalement le dispositif.

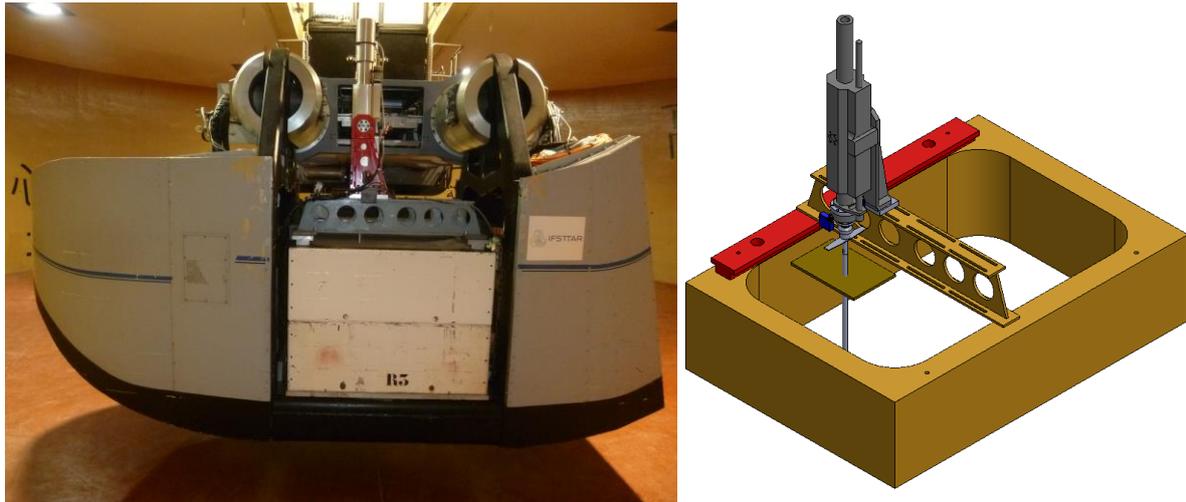


Figure 6. Montage expérimental : photo du montage embarqué en centrifugeuse (gauche) - représentation schématique du montage (droite).

La liaison vérin – modèle (Figure 7) est faite au moyen d'un filetage intérieur de la tête du pieu. Entre la base du piston du vérin et le pieu sont intercalés, du haut vers le bas, un capteur de force et une pièce de liaison rotulée. Le montage mécanique spécifique, sous-jacent à la cellule de force, est conçu pour autoriser une articulation rotulée sans déplacement axial au droit de la liaison vérin-pieu. Ce principe de montage fait que le capteur reprend le poids propre du système mécanique pendant les phases de montée en accélération, élément pour lequel une correction est appliquée (§3.1.2). Associée à la rotule par un système d'écrou et contre-écrou, une barrette disposée horizontalement est positionnée sur la tête du pieu. Des cibles sont collées sur la face plane de la barrette, plan qui définit la référence des capteurs de déplacement verticaux.

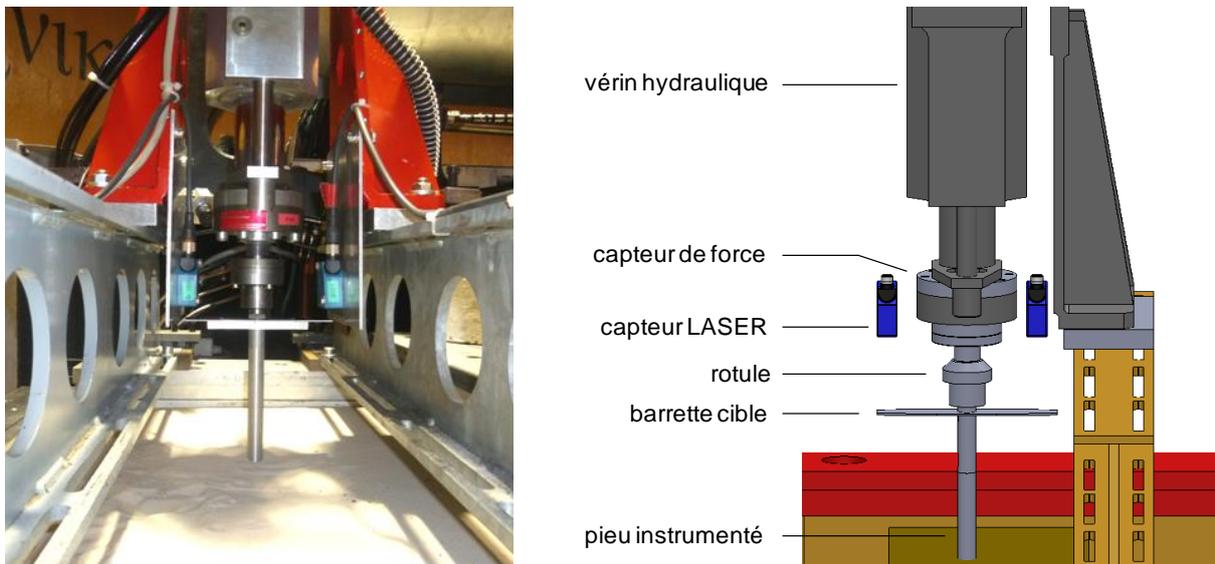


Figure 7. Liaison entre le vérin et le pieu : photo (gauche) - représentation schématique (droite).

## 2.4.2 Instrumentation

L'instrumentation consiste essentiellement à mesurer la force et le déplacement :

- les capteurs d'efforts verticaux :
  - la cellule de force de marque FGP (répertoriée sous la nomenclature  $F_{34}$  dans le parc interne au groupe GERTC) a été choisi en fonction de la plage de mesure attendue et de son utilisation possible aussi bien en traction qu'en compression : sa capacité est de 25 kN,
  - le capteur de force en pointe du pieu (§2.3.1).
- les capteurs de déplacement sont placés de la façon suivante :
  - un capteur de déplacement magnétostrictif de la compagnie TWK (*MAGNOSENS MSE 1/300 S 010 - 1 E 01*), externe au vérin, contrôle les mouvements du piston du vérin (asservissement en déplacement). Ce capteur a une étendue de mesure de 300 mm,
  - la mesure du déplacement du pieu est assurée par deux autres capteurs lasers *WENGLOR* d'étendue de mesure 120 mm, entre 40 et 160 mm, (désignation : D13X), montés sur un support rigide fixé sur l'embase du vérin. Les deux spots lumineux des capteurs lasers sont pointés sur les cibles collées sur la barrette horizontale. La moyenne des deux mesures correspond au déplacement axial du pieu.

## 3 Campagne expérimentale

### 3.1 Protocole expérimental

#### 3.1.1 Pré-fonçage à 1g

Une fois le massif de sol préparé (§2.2.2), le pieu est pré-foncé à 1g. Pour cela, le vérin est positionné à 600 mm à la verticale du futur emplacement du pieu grâce à un empilement de bipoutres. Le pieu est pincé dans le casque de fonçage lui-même fixé à une tige de 500 mm coulissant librement à l'intérieur du vérin. Le fonçage de 500 mm s'effectue en deux phases de 250 mm. Une première phase de fonçage est appliquée : le vérin appuie sur le casque. L'ensemble pieu - vérin - tige descend donc de 250 mm. On remonte alors le vérin coulissant librement sur la tige, puis on solidarise le vérin et la tige. Le vérin applique alors la seconde phase de fonçage de 250 mm grâce la tige fixé sur ce dernier. L'ensemble pieu - vérin - tige descend, de nouveau, de 250 mm. Le pieu est alors foncé à 1g sur une hauteur de 500 mm.

Cette opération est répétée pour l'ensemble des pieux.

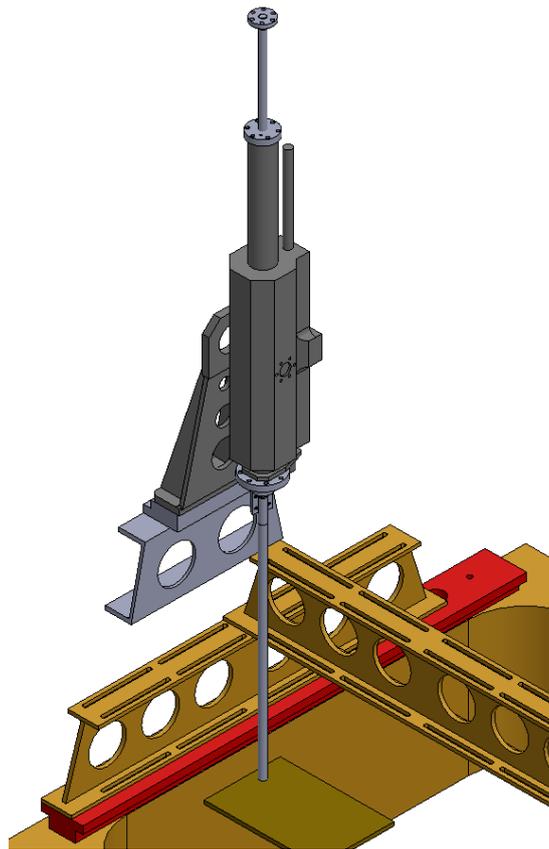


Figure 8. Représentation schématique du pré-fonçage du pieu à 1g.

### 3.1.2 Phase de préconditionnement du massif

Avant le chargement des pieux, le massif de sable subit un processus de stabilisation en centrifugeuse. Ceci consiste à soumettre le massif à deux ou trois cycles de montée en  $g$  à l'accélération centrifuge choisie pour les essais, ici  $23g$ . Un cycle consiste donc à une montée en  $g$  du massif que l'on maintient sous cette accélération pendant quelques minutes (minimum 3') avant de redescendre à  $1g$ .

Cette procédure optimise la stabilité du réarrangement des grains de sable soumis à l'accélération centrifuge et gomme les imperfections préparatoires de la phase de pluviation.

Lors de cette phase, le pieu n'est pas solidarisé au dispositif de chargement, ce qui permet de quantifier, pendant la montée en accélération, par palier de  $5g$  et à  $g$  constant, l'équivalent de force générée par le poids de l'équipage mobile ( $1,25\text{ kg}$  à  $1g$ ) qui assurera la liaison entre le dispositif de chargement et le pieu fiché dans le sol. Cette information est directement donnée par le capteur  $F_{34}$ .

Pour l'essai, quand le pieu sera définitivement solidarisé au dispositif de chargement, le principe de la correction consiste à activer le servo-vérin manuellement de façon à garder la même valeur de poids propre de l'équipage mobile, équivalente à chaque palier (Tableau IV). Les efforts parasites au cours de la montée en accélération sont alors corrigés et l'on garantit une non-sollicitation du pieu (ou un minimum) avant d'appliquer le chargement lui-même.

Tableau IV. Valeurs de corrections d'effort pour chaque palier.

Niveau de $g$	Correction [N]
1	12,3
5	61,3
10	122,6
15	183,9
20	245,3
23	282

La phase de conditionnement est pratiquée pour chaque conteneur, vérification oblige, et la procédure de correction est conduite identiquement pour chaque essai.

### 3.1.3 Fonçage à $23g$

Le fonçage en vol consiste simplement à enfoncer le pieu à une vitesse constante de  $0,1\text{ mm/s}$  sur  $60\text{ mm}$ , soit pendant  $10\text{ min}$ . On rappelle que le pieu de  $590\text{ mm}$  de long avec une fiche de  $560\text{ mm}$  avait été pré-foncé à  $1g$  sur une hauteur de  $500\text{ mm}$ .

Deux méthodes de mises en œuvre sont utilisées :

- le fonçage qui consiste à enfoncer les  $60\text{ mm}$  en une seule fois,
- le « battage » qui consiste à réaliser 12 fonçages de  $5\text{ mm}$ . Entre chacun d'eux, l'effort réel  $V$  redevient nul, mais l'impact sur le pieu, qui se produit lors d'un vrai battage, n'est pas simulé, d'où le terme de pseudo-battage.

Ces différents types de mises en œuvre sont représentés sur la Figure 9, représentant  $V$  en fonction du déplacement normalisé par rapport au diamètre du pieu  $v/\varnothing$ .

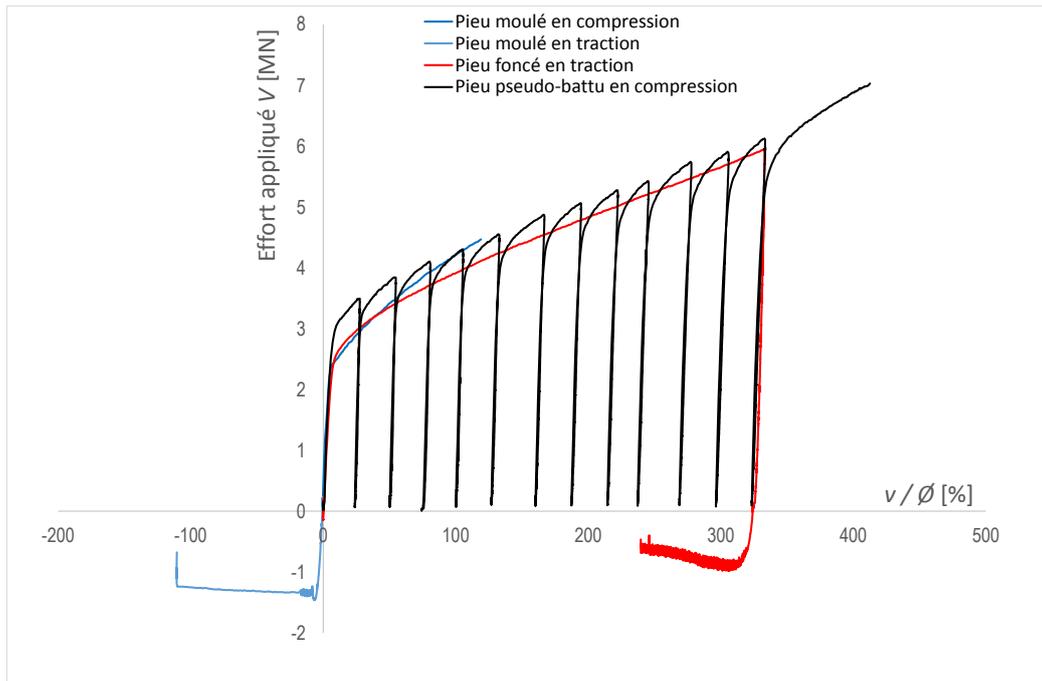


Figure 9. Effort réel  $V$  en fonction du déplacement pour représenter les différents types de mise en oeuvre.

Sur la Figure 9, les courbes des pieux moulés correspondent aux chargements des pieux. Elles sont donc à comparer aux parties de courbes, du pieu foncé et pseudo-battu, situées après le fonçage c'est-à-dire après un déplacement d'environ 333%.

Le mode de mise en place de l'ensemble des essais est détaillé dans le Tableau V.

Tableau V. Mode de mise en oeuvre des pieux.

Test		Mode de mise en oeuvre		
Conteneur	Test	Fonçage	Pseudo-battage	Moulé
C01	T01 à T06	x		
C02	T01 ; T03	x		
	T02 ; T04 à T06		x	
C03	T01 à T02			x
	T03 à T06		x	
C04	T01 à T06	x		

### 3.1.4 Chargement

#### 3.1.4.1 Chargement monotone

Des essais préliminaires monotones sont nécessaires pour déterminer les capacités portantes statiques des pieux en compression et en traction :  $V_{rc}$  et  $V_{rt}$ . Ces essais de chargement monotone sont menés jusqu'à la rupture, à une vitesse de chargement prédéfinie de 1 mm/min (pilotage en déplacement du vérin).

### 3.1.4.2 Chargement cyclique

Les essais monotones conditionnent le choix des paramètres des séquences cycliques (valeurs d'offset  $V_m$  et d'amplitude  $V_c$ ), valeurs exprimées en pourcentage des valeurs moyennes  $V_{rc}$  et  $V_{rt}$ .

Hormis la montée en accélération qui se fait en asservissement en déplacement (§ 3.1.2), dès que l'accélération souhaitée est atteinte (23g), le mode d'asservissement du vérin est basculé en force pour assurer les essais cycliques.

Le principe d'un essai cyclique est donné par la Figure 10 où on distingue deux phases :

- une rampe linéaire, pilotée en force à la vitesse de 40 N/s (correspondant à 21,1 kN/s à l'échelle du prototype), jusqu'à atteindre la valeur moyenne cyclique  $V_m$ . Cette vitesse est choisie parce qu'elle correspond à la même vitesse, en terme d'accroissement d'effort, que celle imposée lors d'un essai statique (1 mm/minute). De plus, ce choix de vitesse est suffisamment faible pour ne pas induire d'effet dynamique sur le pieu,
- une variation sinusoïdale de l'effort à une fréquence de 0,1 Hz. L'effort oscille entre deux valeurs, maximale  $V_{max}$  et minimale  $V_{min}$ , qui définissent la demi-amplitude  $V_c$ . Ces limites supérieures et inférieures correspondent à un certain ratio des valeurs de résistances statiques obtenues lors des essais monotones. Le nombre de cycles est imposé au début de l'essai mais peut être accru si le nombre de cycle initialement programmé s'avère insuffisant pour atteindre la rupture.

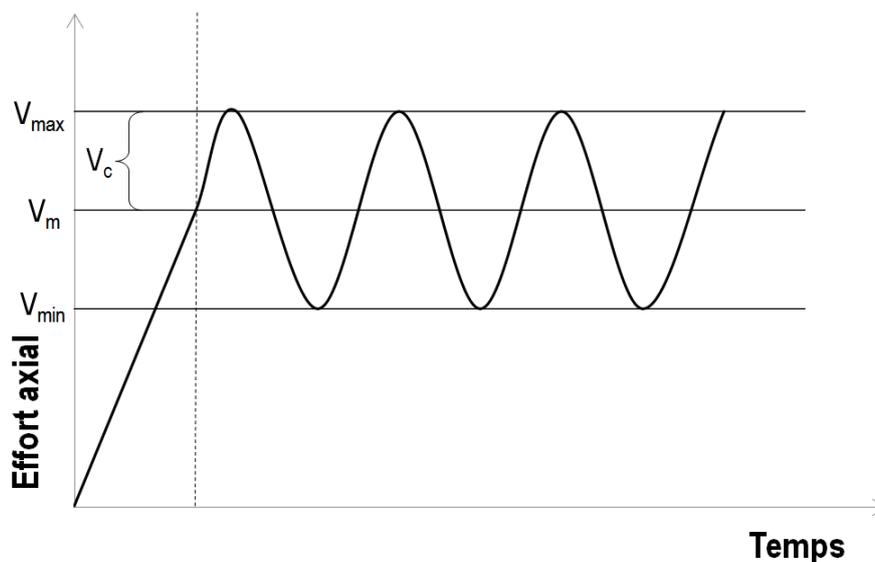


Figure 10. Principe d'un essai de chargement cyclique à travers la représentation de l'effort axial en fonction du temps.

En règle générale, un essai cyclique est caractérisé par sa valeur moyenne  $V_m$ , sa demie amplitude  $V_c$ , sa fréquence  $f$ , et le nombre de cycles  $N_c$  réalisés.

Pour les essais cycliques, le critère de rupture équivaut à un déplacement en tête du pieu de 10% du diamètre du fût (1,8 mm en valeur modèle) pour correspondre au premier rapport SOLCYP (Guefrech & Rault, 2012). Dans ce rapport, un second critère a été adopté correspondant à la rupture physique du pieu.

## 3.2 Exploitation des résultats obtenus

### 3.2.1 Introduction

Plusieurs grandeurs brutes sont obtenues grâce au dispositif expérimental mis en place :

- l'accélération [g],
- le temps  $t$  [s],
- la force appliquée par le vérin  $V$  [N],
- le déplacement du vérin [mm],
- le déplacement de deux capteurs LASERs [mm],
- l'effort du capteur en pointe  $V_{CP}$  [N].

Les déplacements indiqués par les deux capteurs LASERs (Figure 7) permettent de vérifier le déplacement du vérin et d'observer si la force appliquée  $V$  est bien dirigée dans l'axe du pieu, en comparant l'homogénéité des résultats donnés par les deux capteurs.

Le capteur en pointe ne peut pas être installé parfaitement à l'extrémité du pieu (pour des raisons techniques), l'effort obtenu  $V_{CP}$  est donc composé d'une part de frottement  $Q_{f2}$  et de l'effort de pointe  $Q_p$  (équation 9). La part de frottement provient des 46 derniers millimètres du pieu, correspondant à la hauteur de la pointe (25 mm) ajoutée à celle du capteur de force (21 mm).

Un essai complet comporte trois phases, observable sur la Figure 11, qui représente l'effort appliqué par le vérin  $F_{34}$  en fonction du temps  $t$  de l'essai C03-T06 en valeur modèle.

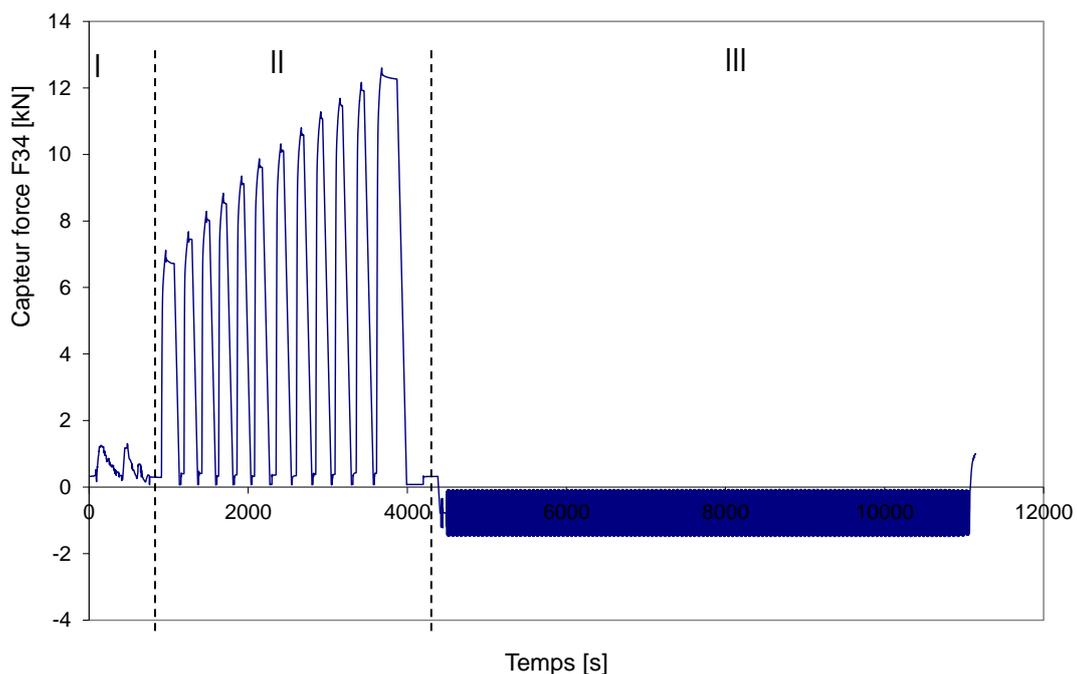


Figure 11. Effort  $F_{34}$  en fonction du temps  $t$  de l'essai C03-T06 en valeur modèle.

Sur la Figure 11, trois phases se détachent :

- phase I : montée en  $g$  et correction du poids de la rotule tous les 5g (§ 3.1.2),
- phase II : fonçage sur 60 mm puis relaxation de l'effort en tête,
- phase III : rampe puis essai de chargement monotone ou cyclique.

L'ensemble des essais réalisés en centrifugeuse comporte ces trois phases, hormis les pieux C03-T01 et C03-T02 qui ne passent pas par la phase II car ils sont mis en place lors de la pluviation, ce qui modélise des pieux moulés. Les analyses composant cette étude reposent sur les résultats obtenus lors de la phase de chargement du pieu (phase III).

### 3.2.2 Exploitation des données

Avant de pouvoir exploiter et analyser les données, les résultats bruts doivent être corrigés et traités afin d'obtenir le frottement total le long du pieu  $Q_f$  et l'effort de pointe pur  $Q_p$ . On s'applique ici à traiter les données en grandeur modèle. Deux exploitations de résultats sont réalisées pour obtenir les deux grandeurs. La première consiste à considérer une contrainte radiale effective ayant une répartition triangulaire en profondeur. La seconde est basée sur les résultats obtenus par Jardine *et al* (2005).

Les grandeurs utiles à l'exploitation des données sont indiquées sur la Figure 12, sur laquelle les longueurs sont données en valeur modèle juste après le fonçage, c'est-à-dire pour une fiche de 560 mm.

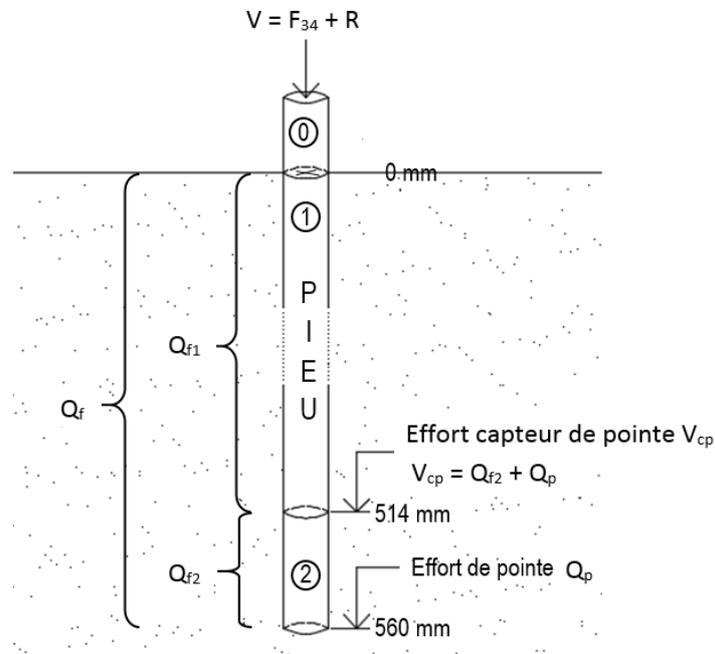


Figure 12. Représentation schématique d'un pieu et de ses grandeurs associées.

#### 3.2.2.1 Méthode du $K_0$

Dans un premier temps, l'effort appliqué par le vérin doit être pondéré par le poids de la rotule, qui sert de liaison entre le vérin et le pieu (Figure 7) afin d'obtenir le frottement réel  $V$ .

$$V = F_{34} + R \quad (2)$$

Avec  $R = m_{rotule} g N$ , représentant l'effort supplémentaire amené par la rotule sur le pieu à 23g en newton, avec la masse de la rotule  $m_{rotule}$  égal à 1,25 kg (Tableau IV).

L'effort réel permet d'obtenir, par soustraction avec l'effort du capteur en pointe  $V_{CP}$ , l'effort de frottement  $Q_{f1}$  correspondant à la partie 1 du pieu (entre la surface du sol et le capteur en pointe).

$$Q_{f1} = V - V_{CP} \quad (3)$$

Sur cette même partie, on peut également obtenir l'effort  $F_{lat}$ , perpendiculaire au pieu.

$$F_{lat1} = \int_{S_{pieu}} \sigma_h dS \quad (4)$$

Avec  $\sigma_h = K_0 \sigma_v = K_0 \gamma N z$ , correspondant à la contrainte horizontale,  
 $dS = \pi \varnothing dz$ .

Ainsi :

$$F_{lat1} = \int_0^{z_0} \pi \varnothing K_0 \gamma N z dz = \pi \varnothing K_0 \gamma N \frac{z_0^2}{2} \quad (5)$$

Avec  $z_0$  la hauteur entre la surface et le capteur en pointe,  
 $K_0$  le coefficient de pression des terres au repos, considéré d'après la loi de Jacky,  
 $K_0 = 1 - \sin \varphi$ .  $\varphi$  le coefficient de frottement du sable égale à 38° dans notre cas.

D'après le critère de Mohr-Coulomb, on a à la rupture :

$$Q_f = F_{lat} \tan \delta \quad (6)$$

L'équation 6 permet de déterminer, à chaque instant, l'angle de frottement sol-pieu  $\delta$  sur la première partie du pieu. En considérant le même coefficient de frottement  $\delta$  sur la partie 2, de hauteur  $p$  égale 46 mm, il est possible d'en déduire le frottement, en s'appuyant sur les équations 4 et 5.

$$F_{lat2} = \pi \varnothing K_0 \gamma N \int_{z_0}^{z_0+p} z dz \quad (7)$$

On peut ainsi déterminer le frottement présent sur la partie basse du pieu.

$$Q_{f2} = F_{lat2} \tan \delta \quad (8)$$

L'effort du capteur de pointe  $V_{CP}$  est composé du frottement  $Q_{f2}$  et de l'effort de pointe  $Q_p$ , d'où :

$$V_{CP} = Q_p + Q_{f2} \quad (9)$$

Ainsi, il est possible d'obtenir le frottement total le long du pieu  $Q_f$  (équation 10) et l'effort de pointe pur  $Q_p$  (équation 11).

$$Q_f = Q_{f1} + Q_{f2} \quad (10)$$

$$Q_p = V_{CP} - Q_{f2} \quad (11)$$

### 3.2.2.2 Méthode ICP-05

Une seconde exploitation des résultats consiste à déterminer le frottement grâce à la méthode ICP-05 (Jardine *et al*, 2005). Les résultats obtenus ont montré que le frottement  $Q_f$  est bien représenté par le critère de rupture de Mohr-Coulomb.

$$Q_f = \sigma'_{rf} \tan \delta \quad (12)$$

Avec  $\delta$  angle de frottement entre le pieu et le sol,  
 $\sigma'_{rf}$  contrainte radiale effective finale.

La contrainte radiale effective finale  $\sigma'_{rf}$  est déterminée grâce à l'équation 13.

$$\sigma'_{rf} = (\sigma'_{rc} + \Delta \sigma'_{rd}) \quad (13)$$

Avec  $\sigma'_{rc}$  contrainte radiale effective initiale,  
 $\Delta\sigma'_{rd}$  variation de la contrainte radiale effective due au chargement.

L'expression de la contrainte radiale au début du chargement  $\sigma'_{rc}$ :

$$\sigma'_{rc} = \frac{q_c}{34} \left(\frac{h}{r}\right)^{-0,38} \left(\frac{\sigma'_{cv}}{P_a}\right)^{0,13} \quad (14)$$

Avec  $q_c$  effort de pointe déterminée grâce aux abaques,  
 $\sigma'_{cv}$  contrainte verticale effective du sol avant la mise en place du pieu,  
 $P_a$  pression atmosphérique absolue correspondant à 100 000 Pa,  
 $h$  distance entre la pointe du pieu et le point d'étude,  
 $r$  rayon du pieu.

Pendant le chargement, la différence  $\Delta\sigma'_{rd}$  rend compte des déformations volumiques (contractance, dilatance) autour du pieu. Ce terme peut être négligé pour les pieux de grand diamètre. Il est donné par l'équation suivante :

$$\Delta\sigma'_{rd} = \frac{2G}{R} \delta h \quad (15)$$

Avec  $G$  module de cisaillement du sol,  
 $\delta h$  déplacement perpendiculaire au plan de cisaillement, estimé à  $2 \times 10^{-5}$  m pour des pieux.

Pour déterminer le frottement latéral en traction la formule suivante est proposée :

$$Q_f = (0,8\sigma'_{rc} + \Delta\sigma'_{rd}) \tan\delta \quad (16)$$

En considérant, sur la première partie du pieu, l'angle de frottement sol-pieu  $\delta$  comme inconnue dans les équations 12 et 16, pour respectivement la compression et la traction, il est ensuite possible, en extrapolant la valeur à l'ensemble du pieu, de déterminer le frottement  $Q_f$ . A partir de cette grandeur, il est aisé de déterminer la valeur de capacité portante  $Q_p$  (Eq. 17).

$$Q_p = V - Q_f \quad (17)$$

En Annexe 1, une présentation des données de chaque essai est faite en valeur modèle. On retrouve ainsi les graphiques suivants (quand les données sont disponibles) :

- valeur du capteur force  $F_{34}$  en fonction du temps  $t$ ,
- valeur du capteur en pointe  $F1XX V_{CP}$  en fonction du temps  $t$  ( $F1XX$  étant la dénomination du capteur),
- déplacement (du vérin des deux capteurs séparés et moyennés) en fonction du temps  $t$ ,
- effort modèle  $V$  en fonction du déplacement du vérin.

### 3.2.3 Détermination des résistances caractéristiques

#### 3.2.3.1 Résistance caractéristique en compression

Sur la Figure 13, est représenté en valeur prototype l'effort réel  $V$  en fonction du déplacement d'un essai sollicité en compression monotone.

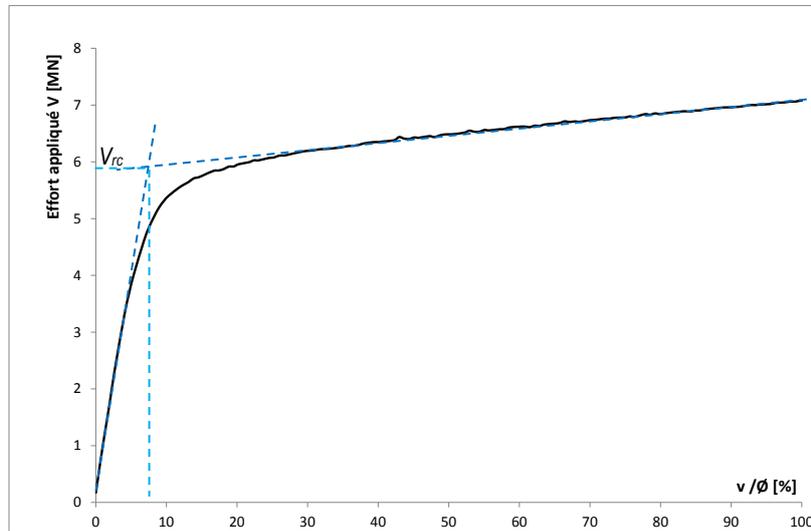


Figure 13. Effort réel  $V$  en fonction du déplacement adimensionné d'un essai monotone en compression.

Pour les essais en compression monotone, une nette rupture de pente est présente dans la courbe d'effort. L'intersection des tangentes des deux parties de courbes permet d'identifier la résistance caractéristique en compression  $V_{rc}$ .

#### 3.2.3.2 Résistance caractéristique en traction

Sur la Figure 14, est représenté en valeur prototype l'effort réel  $V$  en fonction du déplacement d'un essai sollicité en traction monotone.

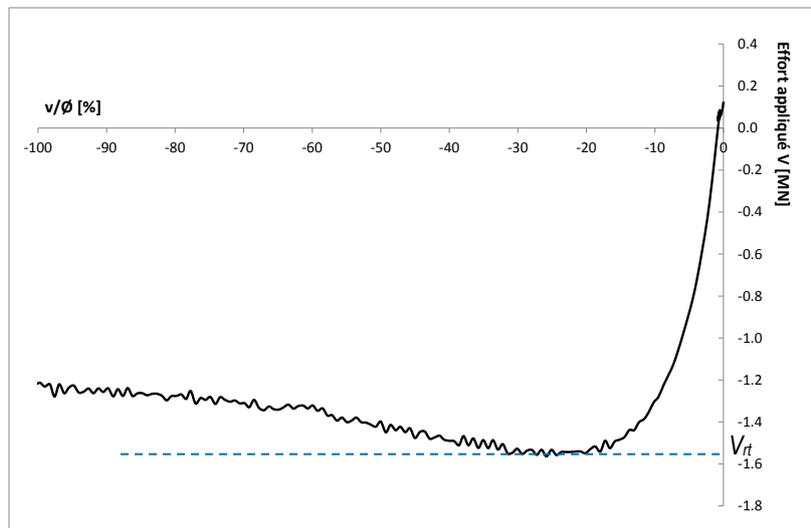


Figure 14. Effort réel  $V$  en fonction du déplacement sur un essai sollicité en traction.

On observe une variation linéaire de l'effort au cours du temps jusqu'à atteindre un pic de valeur, correspondant à la résistance en traction  $V_{rt}$ . En phase post pic, l'effort diminue progressivement pour atteindre un palier de stabilisation.

### 3.3 Programme de chargement

Dans un premier temps, des essais monotones, en traction et en compression sont réalisés. Ils permettent d'étudier l'influence de la rugosité du pieu et de l'angle de la pointe et de comparer le mode de mise en place des pieux (foncés, pseudo-battus ou moulés). Dans un second temps, des essais cycliques, non alternés et en traction ont été effectués pour compléter le diagramme de Poulos mais également pour étudier la dégradation éventuelle du frottement ou de la pointe au cours des cycles. Enfin, le même type d'essais mais à amplitudes variables au cours du temps a été testé afin de comprendre les effets de l'histoire du chargement cyclique.

L'ensemble du programme d'essais réalisés est répertorié dans le Tableau VI, que l'on résume ici :

- 4 conteneurs préparés possédant un indice de densité moyen  $I_D$  de 91,9% avec un écart-type de 2%,
- 6 pieux par conteneurs,
- nombre d'essai quasi-statique sur pieux moulés: 1 en compression, 1 en traction (conteneur C03),
- nombre d'essai quasi-statique sur pieux foncés: 7 en compression, 4 en traction,
- nombre d'essai cyclique sur pieux foncés: 8 non alternés en traction,
- nombre d'essai non exploitable : 3.

Tableau VI. Programme d'essais réalisés.

Type de sollicitation	Repérage	C01	C02	C03	C04	Total
Essai monotone en traction	<i>T</i>	3	1	1*		5
Essai monotone en compression	<i>C</i>	2	5	1*		8
Essai cyclique en traction	<i>T<sub>cy</sub></i>			4	4	8
Essai non exploitable		1			2	3
<b>Total</b>		6	6	6	6	24

\* Dans le conteneur C03, les deux essais monotones ont été réalisés sur des pieux moulés.

Le conteneur C04 est réalisé pour observer l'influence de l'histoire de chargement. Ainsi, au cours de ces essais cycliques, la valeur moyenne  $V_m$  reste constante et l'amplitude  $V_c$  varie. Les paramètres de chargement sont définis dans le Tableau VII, dans lequel chacune des lettres capitales représente un motif composé de 200 cycles, hormis pour le sixième essai, où chaque motif est composé de 100 cycles pour conserver un nombre total de 600 cycles. Avec :

- $G$  la plus grande des trois amplitudes  $V_c$  appliquées,  $G = 0,3 V_{rt}$
- $M$  l'amplitude  $V_c$  de taille moyenne,  $M = 0,25 V_{rt}$
- $P$  la plus petite amplitude  $V_c$ ,  $P = 0,2 V_{rt}$

Où  $V_{rt}$  est égale à 1,27 MN en valeur prototype.

Tableau VII. Chargement du conteneur C04.

Test	$V_m$	$V_c$
C04-T01	$0,3 V_{rt}$	$G-M-P$
C04-T02	$0,3 V_{rt}$	$P-M-G$
C04-T03	$0,3 V_{rt}$	$G-M-P$
C04-T04	$0,3 V_{rt}$	$M-P-G$
C04-T05	$0,3 V_{rt}$	$G-M-P$

<b>C04-T06</b>	0,3V <sub>rt</sub>	P-M-G-P-M-G
----------------	--------------------	-------------

## 4 Synthèse des résultats

L'objectif de cette partie est de présenter les résultats de façon succincte. Les comparaisons et les interprétations des résultats sont réalisés dans la partie 5.

Afin de croiser les effets des différents paramètres et d'avoir une analyse fine, les essais sont redistribués dans des tableaux par famille :

- les essais monotones sur pieux moulés,
- les essais monotones en traction sur pieux foncés ou assimilés,
- les essais monotones en compression sur pieux foncés ou assimilés,
- les essais cycliques de type traction pure sur pieux foncés ou assimilés.

Les résultats d'essais sont proposés en valeur prototype où on trouve successivement dans les tableaux:

- la référence du test (Conteneur **CN°** - test **TN°**),
- le type de test avec un signe particulier selon sa nature,
  - *C* : essai monotone en compression,
  - *T* : essai monotone en traction,
  - *T<sub>cy</sub>* : essai cyclique en traction.

Les grandeurs suivantes dépendent de l'essai réalisé et sont donc exposées au cas par cas.

### 4.1 Essais monotones

En plus des grandeurs précédemment citées, on trouve dans les tableaux des essais monotones :

- la valeur de résistance caractéristique ( $V_{rc}$  en compression ou  $V_{rt}$  en traction suivant le type d'essai réalisé),
- le déplacement en pourcentage du diamètre du pieu à la résistance caractéristique  $V_r$  donnée,
- l'angle de frottement sol-pieu  $\delta$  au moment de la rupture.

Pour les essais sur pieux foncés, il est également indiqué l'écart à la valeur caractéristique moyenne normalisé en valeur absolue, c'est-à-dire  $|\Delta V_{rc} / V_{rc moy}|$  ou bien  $|\Delta V_{rt} / V_{rt moy}|$ , en pourcentage.

#### 4.1.1 Essais monotones sur pieux moulés

Deux pieux moulés, dont les résultats sont présentés Tableau VIII, sont réalisés afin d'observer l'influence de cette mise en place vis-à-vis des pieux foncés. L'installation des pieux moulés, respecte la procédure établie dans le premier rapport SOLCYP (Guefrech A. et Rault G. 2012).

Tableau VIII. Résultats des essais de chargement quasi-statique sur pieux moulés.

	Test	Type	$V_{rc}$ [MN]	$V_{rt}$ [MN]	$v / \varnothing$ [%]
SOLCYP II	C03-T01	C	2,3	/	5,2
	C03-T02	T	/	1,46	6,3
SOLCYP I	C		3,2	/	6,2
	T		/	2,2	7,5

L'étude menée par Guefrech A. et Rault G. (2012), a été réalisée dans les mêmes conditions, c'est-à-dire sur pieux moulés et pour un indice de densité du sol  $I_D$  de 90%. On observe pour la résistance en compression et la résistance en traction une différence respective de 28% et 34% avec les résultats de Guefrech A. et Rault G. (2012).

#### 4.1.2 Essais monotones sur pieux foncés

##### 4.1.2.1 En compression

Le Tableau IX regroupe l'ensemble des résultats, sous chargement quasi-statique en compression sur pieux foncés, obtenus lors de la campagne d'essais. Les essais sont contrôlés en déplacement avec une vitesse de chargement égale à 1 mm/min.

Tableau IX. Essais de chargement quasi-statique de référence en compression sur pieux foncés.

Test	$V_{rc}$ [MN]	$v / \emptyset$ [%]	$ \Delta V_{rc} / V_{rc\ moy} $ [%]
<b>C01-T04</b>	5,06	8,6	13,6
<b>C01-T06</b>	6,25	9,6	6,7
<b>C02-T01</b>	6,31	8,4	7,7
<b>C02-T02</b>	5,60	9,0	4,4
<b>C02-T03</b>	5,84	9,4	0,3
<b>C02-T04</b>	5,54	8,2	5,4
<b>C02-T06</b>	6,40	9,0	9,3
<b>Moyenne</b>	<b>5,86</b>	<b>8,9</b>	<b>6,8</b>

##### 4.1.2.2 En traction

Le Tableau X regroupe l'ensemble des résultats, sous chargement quasi-statique en traction sur pieux foncés, obtenus lors de la campagne d'essais. Les essais sont contrôlés en déplacement avec une vitesse de chargement égale à 1 mm/min.

Tableau X. Essai de chargement quasi-statique de référence en traction sur pieux foncés.

Test	$V_{rt}$ [MN]	$v / \emptyset$ [%]	$ \Delta V_{rt} / V_{rt\ moy} $ [%]	$V_{rt} / V_{rc\ moy}$ [%]
<b>C01-T01</b>	1,2	18,8	6,0	19,6
<b>C01-T03</b>	1,0	19,6	19,3	16,8
<b>C01-T05</b>	1,2	28,2	2,9	20,2
<b>C02-T05</b>	1,6	25,8	28,2	26,7
<b>Moyenne</b>	<b>1,2</b>	<b>23,1</b>	<b>14,1</b>	<b>20,8</b>

La résistance moyenne à la traction est égale à environ 20% de la résistance moyenne à la compression  $V_{rc}$ .

## 4.2 Essais cycliques

En plus de la référence du test et du type d'essai réalisé, le tableau relatif aux essais cycliques indiquent :

- la valeur moyenne  $V_m$  imposée en MN,
- le pourcentage que représente la valeur moyenne  $V_m$  par rapport à l'effort max de traction  $V_{rt}$ ,
- la valeur de l'amplitude  $V_c$  imposée en MN,
- le pourcentage que représente la valeur  $V_c$  par rapport à l'effort max de traction  $V_{rt}$ ,
- le pourcentage que représente la valeur moyenne  $V_m$  par rapport à l'amplitude  $V_c$ ,
- la fréquence imposée pour la réalisation du test,
- le nombre de cycle programmé lors de ce test.

Les essais cycliques sont réalisés sur des pieux forcés et sont sollicités en traction pur. Ils sont résumés dans le Tableau XI et sont de deux types :

- les quatre premiers, réalisés dans le conteneur C03, permettent de compléter le diagramme de Poulos et de vérifier le(s)quel(s) des paramètres, entre le frottement et la pointe, se dégrade(nt) au cours des cycles,
- les suivants, réalisés dans le conteneur C04, ont été mis en œuvre afin d'analyser l'histoire de chargement des pieux, en gardant la valeur moyenne  $V_m$  constante mais en faisant varier l'amplitude  $V_c$ .

Tableau XI. Essais cycliques de traction sur pieux forcés.

Test	Type	$V_m$ [MN]	$V_m / V_{rt}$	$V_c$ [MN]	$V_c / V_{rt}$	$V_m / V_c$	$f$ [Hz]	Nb cycles programmé
C03-T03	Tcy	-0,10	-0,08	0,26	0,21	-0,38	0,1 + 1	1500 + 5000
C03-T04	Tcy	-0,56	-0,46	0,50	0,41	-1,11	0,1	1500
C03-T05	Tcy	-0,40	-0,33	0,26	0,21	-1,57	0,1 + 1	1600 + 5000
C03-T06	Tcy	-0,41	-0,34	0,38	0,31	-1,09	0,1	1500
C04-T01	Tcy	-0,38	-0,31	{0,38 ; 0,32 ; 0,25}	{0,31 ; 0,26 ; 0,20}	{-1 ; -1,2 ; -1,5}	0,1	200 x 3
C04-T02	Tcy	-0,38	-0,31	{0,25 ; 0,32 ; 0,38}	{0,20 ; 0,26 ; 0,31}	{-1,5 ; -1,2 ; -1}	0,1	200 x 3
C04-T04	Tcy	-0,38	-0,31	{0,32 ; 0,25 ; 0,38}	{0,26 ; 0,20 ; 0,31}	{-1,26 ; -1,5 ; -1}	0,1	200 x 3
C04-T05	Tcy	-0,38	-0,31	{0,38 ; 0,32 ; 0,25}	{0,31 ; 0,26 ; 0,20}	{-1 ; -1,2 ; -1,5}	0,1	200 x 3
C04-T06	Tcy	-0,38	-0,31	{0,25 ; 0,32 ; 0,38} x2	{0,20 ; 0,26 ; 0,31} x2	{-1,5 ; -1,2 ; -1} x2	0,1	100 x 6

En raison des conditions expérimentales, il apparait que l'essai C03-T03 est un essai alterné ( $V_m < V_c$ ), il sera donc traité comme tel.

Les 5000 cycles supplémentaires réalisés sur les pieux C03-T03 et C03-T05 ne sont pas exploités.

Pour les essais cycliques, deux types de rupture peuvent être définies :

- une rupture à 10% du diamètre du pieu qui correspond au premier rapport SOLCYP,
- une rupture dite physique, qui correspond à la rupture réelle du pieu, c'est-à-dire au moment où le déplacement entre deux cycles augmente brusquement.

Ces deux types de rupture sont définis dans le Tableau XII.

Tableau XII. Données remarquables des essais en traction cyclique.

Test	Rupture à 10% $\emptyset$		Rupture physique			Fin du programme cyclique visé		
	$v$ [mm]	$N_c$	$v / \emptyset$ [%]	$v$ [mm]	$N_c$	$v / \emptyset$ [%]	$v$ [mm]	$N_c$
C03-T03	-	-	-	-	-	4,2	17,3	1500
C03-T04	41,4	1	21,3	88,2	16	-	-	-
C03-T05	41,4	377	-	-	-	18,6	76,9	1500
C03-T06	41,4	98	50	207,0	633	-	-	-
C04-T01	41,4	100	-	-	-	16,8	69,4	600
C04-T02	41,4	241	38,9	161,3	514	-	-	-
C04-T04	41,4	164	34,7	143,5	568	-	-	-
C04-T05	41,4	27	-	-	-	25,5	105,4	600
C04-T06	-	-	6,7	27,7	127	-	-	-

## 5 Analyse des résultats

L'analyse des résultats est composée de trois parties :

- l'influence de la forme de la pointe et de la rugosité du pieu,
- l'influence du mode de mise en place des pieux,
- l'étude du comportement cyclique.

### 5.1 Influence de la forme de la pointe et de la rugosité du pieu

Trois types de pointes et deux rugosités différentes sont utilisés afin d'observer leur(s) influence(s). Les caractéristiques sont définies dans le Tableau XIII. Le mode de mise en œuvre des pieux mis en place en vol (foncés ou pseudo-battu) n'influe pas sur les résultats (§ 5.2.1) ce qui permet de pouvoir se concentrer sur les paramètres « rugosité » et « angle de la pointe ».

Tableau XIII. Caractéristiques des pieux.

Test	Type	Pointe [°]	Rugosité [μm]
<b>C01-T01</b>	T	180	200
<b>C01-T03</b>	T	180	100
<b>C01-T04</b>	C	180	100
<b>C02-T01</b>	C	60	200
<b>C02-T02</b>	C	60	100
<b>C02-T03</b>	C	45	200
<b>C02-T04</b>	C	45	100
<b>C02-T05</b>	T	60	100
<b>C02-T06</b>	C	180	200

Afin de conserver une homogénéité dans les résultats, les trois types pointes sont dimensionnés pour posséder le même volume. Ceci permet de considérer qu'un même volume de sol est déplacé lors de chaque essai. La Figure 15, représentant les efforts réels  $V$  en fonction du déplacement vertical adimensionné pour une même rugosité normalisée, permet de comparer les effets de l'angle de la pointe.

Pour étudier l'influence des deux paramètres, c'est-à-dire de la rugosité et de l'angle de la pointe, deux graphiques sont proposés :

- l'écart à l'effort caractéristique,  $V_{rc}$  ou  $V_{rt}$  suivant l'essai, normalisé en fonction de l'angle de la pointe (Figure 16.a),
- l'écart au déplacement à la rupture en fonction de l'angle de la pointe (Figure 16.b).

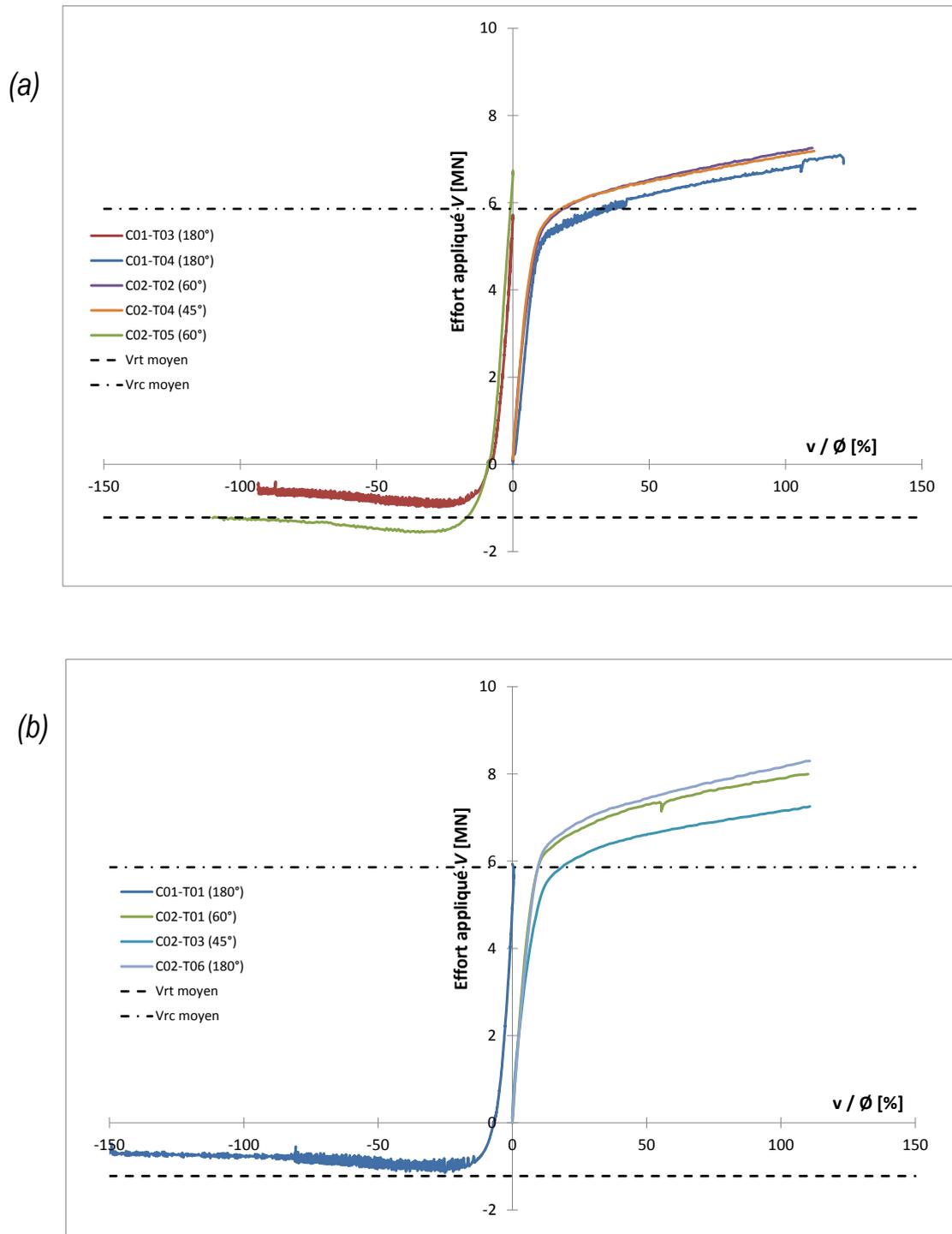


Figure 15. Effort réel  $V$  en fonction du déplacement sur les pieux possédant une rugosité normalisée  $R_n$  de 0,5 (a) et de 1 (b).

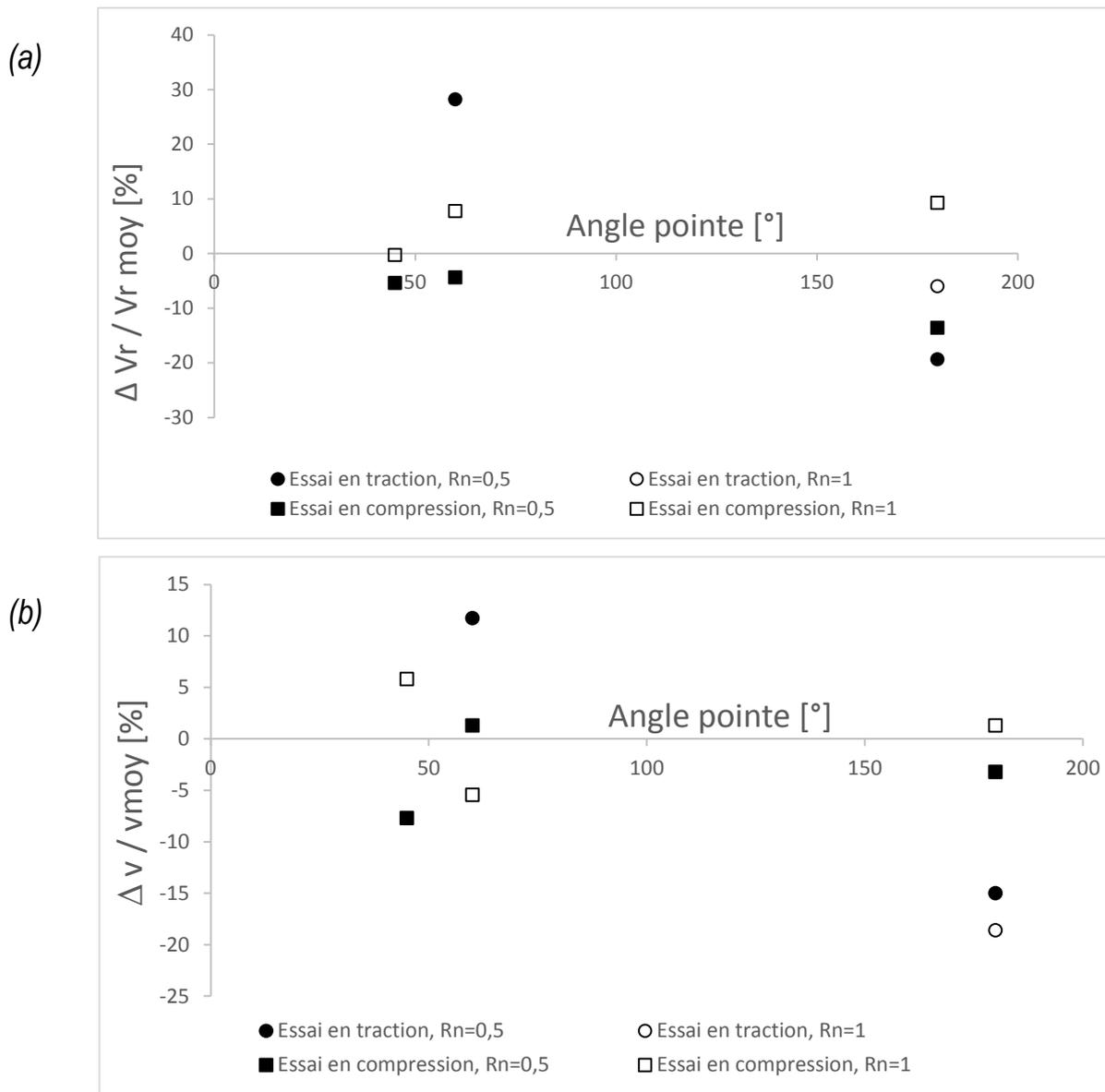


Figure 16. Ecart à l'effort caractéristique ( $V_{rc}$  ou  $V_{rt}$ ) normalisé (a) et écart au déplacement normalisé à la rupture (b) en fonction de l'angle de la pointe.

Nous constatons que l'angle de la pointe n'influence aucunement l'effort à la rupture du pieu lorsqu'il possède une rugosité normalisée de 0,5 (Figure 15.a). En revanche, l'effort varie légèrement pour une rugosité normalisée de 1 (Figure 15.b), mais sans logique apparente pour en déduire une quelconque influence provenant de l'angle de la pointe. Ceci est également visible sur la Figure 16.a, représentant l'écart de la résistance à l'effort caractéristique en fonction du déplacement, sur laquelle aucune tendance n'est visible concernant l'angle de la pointe. Ces essais démontrent donc qu'aucune influence de l'effort ne peut être imputée à la forme de la pointe.

Concernant l'influence de la rugosité, on rappelle que deux tailles d'aspérités différentes ont été testées, 100 et 200  $\mu\text{m}$ , ce qui correspond respectivement à une rugosité normalisée  $R_n$  de 0,5 et 1. Sur la Figure 16.a, représentant l'écart de l'effort caractéristique normalisé en fonction de l'angle de la pointe, les pieux ayant une rugosité normalisée de 1 tendent à avoir une valeur d'effort à la rupture plus élevée que ceux ayant une rugosité normalisée de 0,5. Ceci est un résultat attendu mais trop faible

pour quantifier l'influence de la rugosité par rapport à l'effort à la rupture. De plus, sur la Figure 16.b, représentant l'écart du déplacement normalisé à la rupture en fonction de l'angle de la pointe, les mêmes tendances ne se confirment pas pour tous les essais. Davantage d'essais avec un plus large spectre de rugosité normalisée devrait être réalisé pour confirmer, ou non, cette tendance.

Dans la suite de cette étude, les pieux moulés présentent une pointe plate et les pieux foncés, soumis à des chargements cycliques, des pointes de 60° comme il est d'usage pour les essais pénétrométriques.

## 5.2 Influence du mode de mise en place

### 5.2.1 Comportement des efforts caractéristiques $V_r$

D'un point de vue général, les valeurs des résistances caractéristiques  $V_r$  et des déplacements correspondants sont indiquées dans le Tableau XIV. Ils ont été obtenus grâce à la représentation de l'effort réel  $V$  en fonction du déplacement représenté Figure 17.

Tableau XIV. Valeurs caractéristiques moyennes suivant le mode de mise en place.

Mode de mise en place	En traction		En compression	
	$V_{rt\ moy}$ [MN]	$v/\varnothing$ [%]	$V_{rc\ moy}$ [MN]	$v/\varnothing$ [%]
Foncé	1,1	22,2	5,9	9,0
Pseudo-battu	1,6	25,8	5,9	8,7
Moulé	1,5	6,3	2,3	5,2

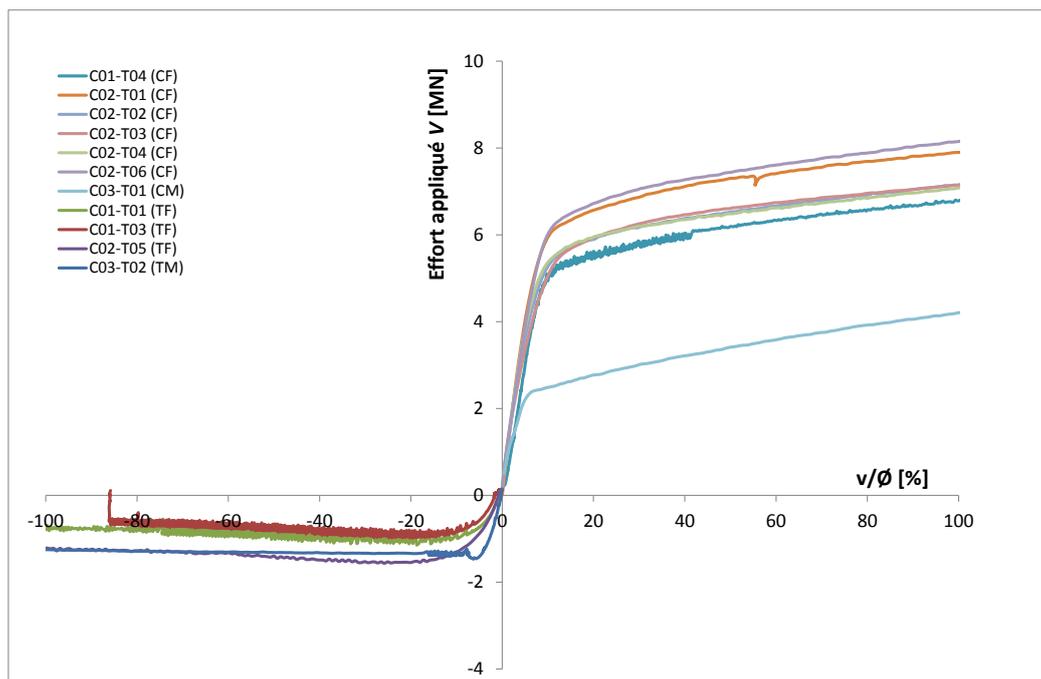


Figure 17. Effort appliqué  $V$  des essais monotones en fonction du déplacement.

Les deux modes de mise en place en vol, c'est-à-dire les pieux foncés et les pieux pseudo-battus, ont le même comportement, en effort et en déplacement en compression. Les résultats en traction ne sont pas aussi similaires mais on peut conclure que réaliser 12 fonçages consécutifs de 5 mm pour simuler un battage est identique à foncer le pieu en une seule fois sur 60 mm. Dans la suite de l'étude, les

pieux pseudo-battu et foncés vont donc être moyennés afin de représenter la catégorie des pieux foncés en vol sur une seule courbe.

Entre les pieux installés en centrifugeuse et les pieux moulés, la différence entre les valeurs de résistance à la traction  $V_{rt}$  n'est pas assez prononcée pour conclure sur une influence quelconque du mode de mise en place. En revanche, le déplacement correspondant est nettement inférieur pour le pieu moulé. Cette différence s'explique grâce à l'histoire de chargement des pieux. En effet, durant un fonçage, des lignes de rupture orientées dans le sens du fonçage se créent et de façon opposée, lors de la traction, elles s'orientent vers le haut. L'arrangement granulaire durant une phase de traction sera donc plus rapide pour un pieu moulé, ne possédant pas d'histoire de chargement, que pour un pieu foncé, autour duquel les lignes de rupture doivent totalement changer d'orientation. La réorganisation du sol étant plus longue pour un pieu foncé, le déplacement du pieu sera plus important que pour un pieu moulé à effort égal.

Pour les essais en compression, la valeur de la résistance  $V_{rc}$  du pieu moulé est inférieure à celle des pieux foncés en vol. La résistance à la compression  $V_{rc}$  est composée de l'effort de frottement  $Q_f$  et de l'effort de pointe  $Q_p$  alors que la résistance à la compression  $V_{rt}$  est seulement due au frottement. Ainsi, ces résultats permettent d'observer que le mode de mise en place influe de façon significative sur la valeur de la résistance de pointe  $Q_p$ . Lorsque le pieu est foncé, l'augmentation de la résistance de pointe suppose donc une augmentation de la densité autour de la pointe, comme le démontre Shakirev *et al* (1996).

Pour étudier l'influence générale du mode de mise en place plus finement, il est possible de comparer la valeur de la rupture du premier fonçage des pieux foncés en vol et du pieu moulé en compression avec celle des pieux moulés réalisés par Guefrech et Rault (2012) ; l'ensemble est détaillé Tableau XV. Pour rappel, les pieux moulés testés dans le premier volet SOLCYP possèdent une fiche de 560 mm et la moyenne a été calculée sur 7 essais, contrairement à cette étude où la valeur du pieu moulé ne provient que d'un seul essai mais où la fiche est identique. La valeur du pieu foncé a été calculée sur 17 essais sur des pieux possédant une fiche de 500 mm avant le fonçage en vol.

On constate des résultats similaires entre les deux études. En effet, les valeurs du premier volet de SOLCYP sont légèrement supérieures à celle de cette étude (« SOLCYP II ») pour les pieux moulés, mais ceci est probablement dû à la différence de fiche (560 vs 500 mm). De plus, les essais SOLCYP II ont été mis en place avec un indice de densité de sol  $I_D$  de 90%, le fonçage n'a pu que faiblement augmenter cette valeur, d'où la proximité des résultats avec les pieux moulés de la première étude. Cela signifie que mettre en place un pieu au cours de la pluviométrie, pour représenter un pieu moulé, ou foncer les 500 premiers millimètres de notre pieu à 1g semble donner les mêmes résultats en compression, avec les paramètres de cette étude. La différence entre les deux modes de mises en place provient donc du fonçage des 60 derniers millimètres à 23g.

Tableau XV. Valeur de la résistance à la rupture en compression lors du premier fonçage.

	Type d'essai	$V_{rc}$ [MN]	Ecart type	$v/\varnothing$ [%]
SOLCYP I	Pieux moulés	3,2	0,16	6,2
	Pieu moulé	2,3	/	5,2
SOLCYP II	Pieux foncés	2,9	0,22	6,3

### 5.2.2 Comportement de l'effort de frottement $Q_f$

Le frottement sur la première partie du pieu  $Q_{f1}$  peut être obtenu en faisant la différence entre l'effort  $V$  et l'effort donné par le capteur en pointe  $V_{CP}$  (Eq. 3). Cette grandeur est représentée en fonction du déplacement adimensionné sur la Figure 18.a. En déterminant le frottement sur la seconde partie du

pieu, à l'aide de l'angle de frottement sol-pieu  $\delta$  expérimental de la partie 1 (Eq. 8 et Eq. 12, représenté sur la Figure 18.b pour les deux méthodes d'exploitation de résultat), on peut obtenir le frottement total sur le pieu (Eq. 10 et Eq. 12), représenté sur la Figure 18.c en fonction du déplacement pour la méthode ICP.

Sur la Figure 18.b, on remarque pour l'ensemble des essais résultant de la première méthode d'exploitation de résultat, que l'angle de frottement croit de façon importante pour ensuite atteindre un palier. Ce comportement provient de la mobilisation totale du frottement qui n'est pas immédiate, comme on peut l'observer sur la Figure 18.a. Pour les essais en compression, l'angle de frottement sol-pieu  $\delta$ , correspondant à la rupture, est égal à  $77^\circ$  en moyenne, pour les différents modes de mise en place. En revanche, pour les essais en traction, l'angle de frottement  $\delta$  varie plus sensiblement entre les essais et atteint  $73^\circ$  pour le pieu moulé. Cet angle est trop important, il apparaît donc que la seconde méthode donnant des angles de frottement de l'ordre de  $37^\circ$  en compression donne de meilleurs résultats. Dans la suite du rapport, les résultats présentés proviennent donc de la méthode ICP-05 (Jardine *et al*, 2005).

Concernant l'effort de frottement total  $Q_f$  (Figure 18.c), les essais en compression indiquent que l'effort est plus important lorsque le pieu a été foncé que lorsqu'il a été moulé. A l'inverse, sur les essais en traction, l'effort de frottement mobilisé par le pieu moulé est supérieur, en valeur absolue, à celui mobilisé par les pieux foncés. C'est deux phénomènes sont dus à l'histoire de chargement des pieux. Le fonçage induit des lignes de rupture orientées dans son sens. L'arrangement granulaire consécutif va donc être favorable au frottement en compression mais défavorable en traction par rapport à un sol autour d'un pieu moulé qui n'a subi aucune modification. De la même façon, pour un même type de mise en place, l'effort de frottement est plus faible en traction qu'en compression.

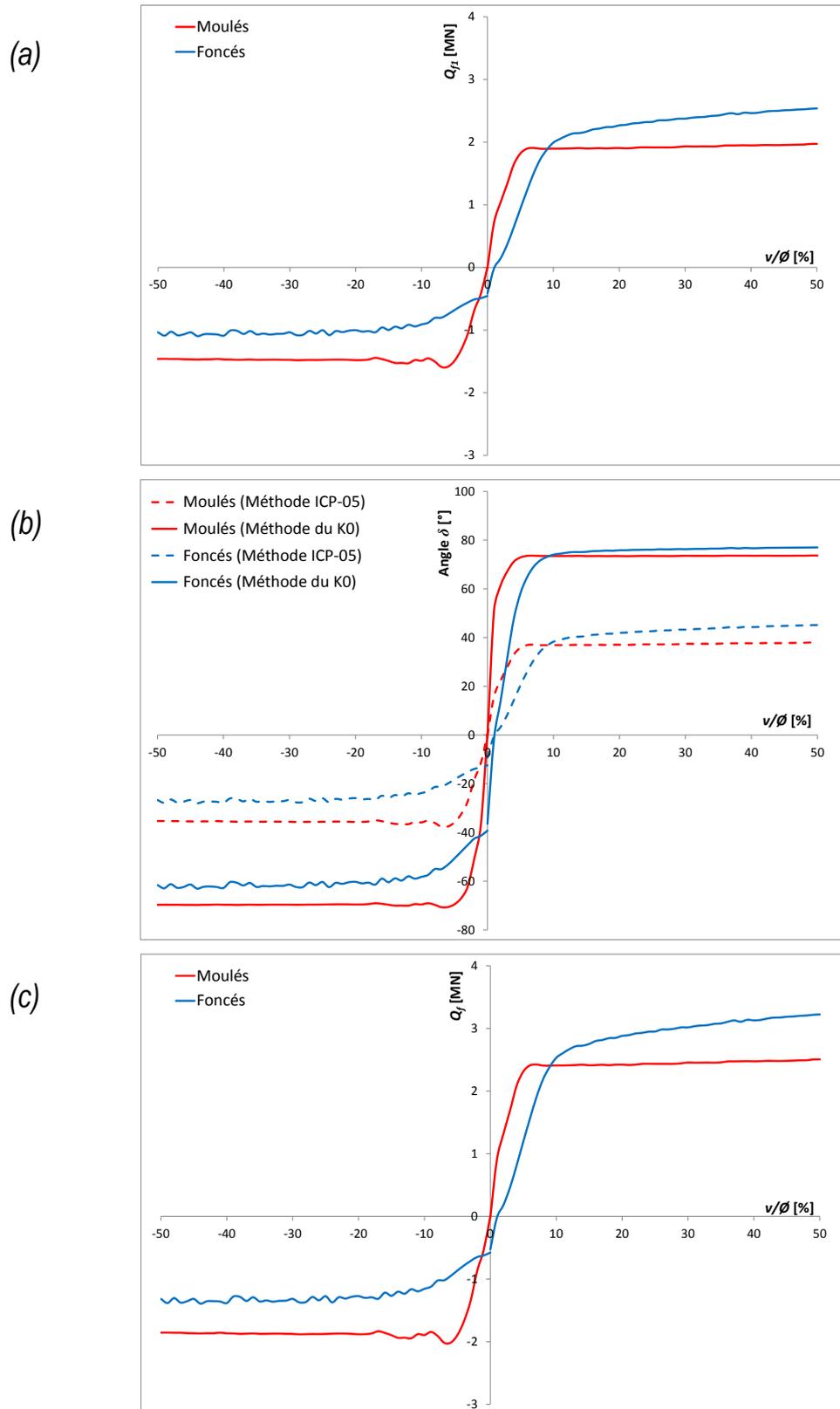


Figure 18. Effort de frottement en fonction du déplacement sur la partie 1 du pieu  $Q_{f1}$  (a) et sur l'ensemble du pieu  $Q_f$  (c).  
Angle de frottement sol-pieu en fonction du déplacement (b).

### 5.2.3 Comportement de l'effort de pointe $Q_p$

Cette partie s'articule autour de deux graphiques : l'effort du capteur en pointe  $V_{CP}$  en fonction du déplacement (Figure 19.a) et l'effort de pointe pur  $Q_p$  en fonction du déplacement (Figure 19.b).

#### 5.2.3.1 *Pieu en compression*

Sur la Figure 19.a représentant les efforts du capteur en pointe  $V_{CP}$  en fonction du déplacement, on remarque pour les pieux foncés en compression, que la pente initiale est plus importante que celle obtenue sur le pieu moulé. Ceci démontre une incidence du fonçage sur le comportement en pointe. En effet, le fonçage induit une densification (Shakirev *et al*, 1996), ou a minima un arrangement granulaire, qui implique une augmentation de la résistance de pointe. Ce phénomène ne se produit pas (ou moins) durant la phase de fonçage à  $1g$  (§ 5.2.1), il se produit donc lors du fonçage des 60 derniers millimètres à  $23g$ .

De plus, on observe sur la Figure 19.b que l'effort du pieu moulé en compression, mais aussi en traction, comporte une phase de diminution avant d'augmenter constamment. Durant cette phase de décroissance, l'angle de frottement sol-pieu  $\delta$  se mobilise plus rapidement que l'effort en pointe  $V_{CP}$  en raison de l'élasticité du pieu. Pour obtenir l'effort de pointe pur  $Q_p$ , on retranche le frottement  $Q_{f2}$  à l'effort en pointe  $V_{CP}$  (Eq. 11), ce qui explique le phénomène observé.

#### 5.2.3.2 *Pieu en traction*

Sur la Figure 19.a, on constate que l'effort en pointe non corrigé  $V_{CP}$  du pieu moulé s'annule rapidement. Le pieu est soumis à un effort de traction, il paraît donc naturel que l'effort en pointe  $V_{CP}$  soit nulle au cours de l'essai. La courbe représentant les pieux foncés en vol tend également vers 0 au cours de l'essai et possède une partie négative, ce qui correspondrait à une aspiration du pieu : phénomène impossible. Néanmoins, cette grandeur comporte une part de frottement qu'il faut retirer pour avoir l'effort de pointe pur  $Q_p$  (Eq. 9), représenté Figure 19.b en fonction du déplacement.

Après correction, on constate que les efforts, aussi bien pour le pieu moulé que pour les pieux foncés, ne convergent plus vers 0 MN mais vers 0,4 MN. Cette valeur positive indique que la pointe est comprimée par le sol.

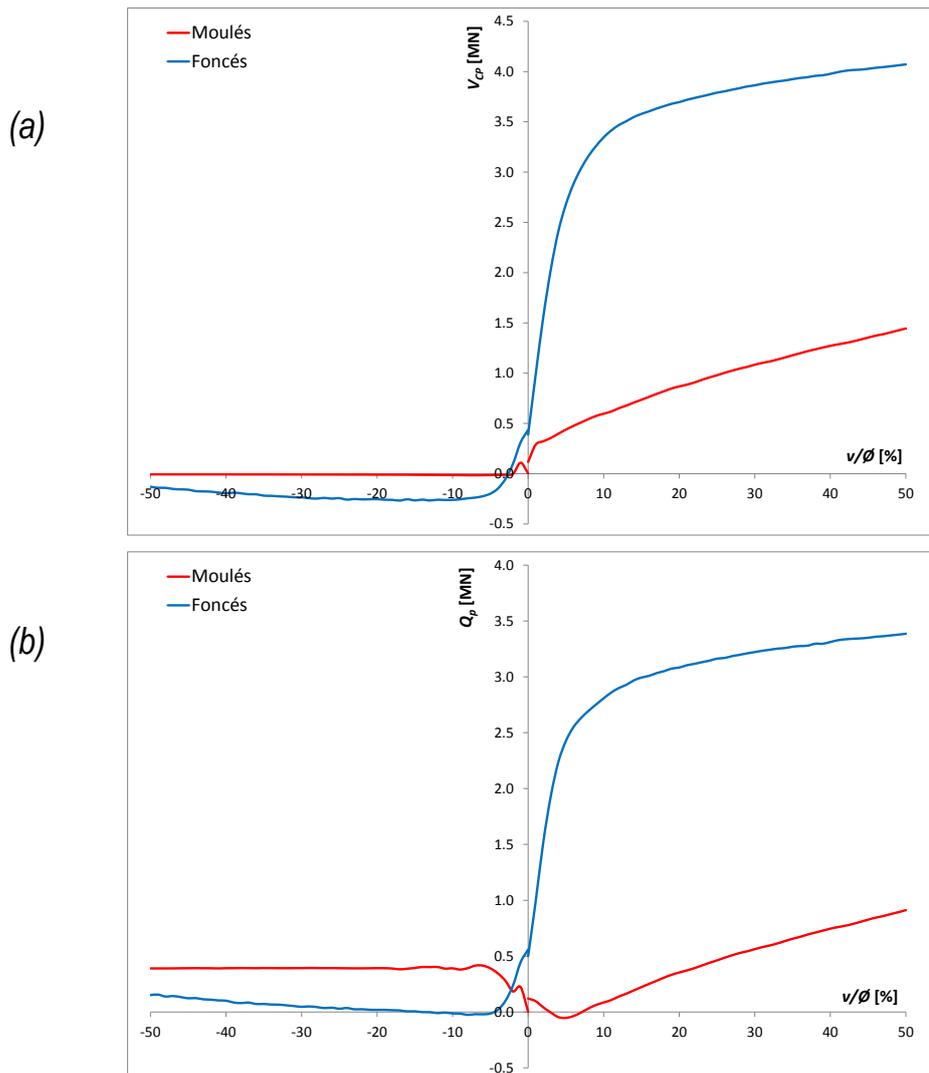


Figure 19. Effort en pointe  $V_{CP}$  (a) et effort de pointe corrigé  $Q_p$  (b) et effort de pointe  $Q_p$  en fonction du déplacement normalisé.

## 5.2.4 Conclusion

La technique de fonçage, pseudo-battu ou foncé, n'influe pas sur les résultats des valeurs caractéristiques obtenus. En comparant les pieux moulés aux pieux foncés à 1g, aucune différence n'est observable. Mettre en place un pieu lors de la pluviométrie ou le mettre en place par fonçage à 1g semble donc donner les mêmes résultats. En revanche, lorsque l'on compare les résultats des pieux moulés aux pieux foncés en vol, les différences sont notables après le fonçage à 23g. C'est donc ce dernier qui induit une histoire de chargement dans le sol.

L'exploitation des résultats indique qu'il est impossible de considérer une répartition d'effort triangulaire suivant la profondeur. Il faut donc se référer aux études précédemment réalisées qui ont abouti à des méthodes de calcul comme ICP-05 (Jardine *et al*, 2005).

L'étude de l'effort de frottement  $Q_f$  au cours de l'essai confirme la présence d'une modification de comportement du sol dû au fonçage, à travers l'apparition de lignes de ruptures orientées vers le bas. Il apparaît que l'arrangement granulaire durant une phase de fonçage va être favorable à l'effort de

frottement en compression et défavorable en traction, par rapport à l'effort de frottement d'un pieu moulé.

### 5.3 Etude du comportement cyclique

Les essais cycliques, contrairement aux essais monotones, sont pilotés en force, c'est-à-dire que le même niveau d'effort est appliqué pour réaliser chacun des cycles. C'est donc le déplacement global des essais qui va permettre de comprendre le comportement des pieux faces au chargement cyclique.

#### 5.3.1 Distribution des efforts dans le pieu

Sur la Figure 20.a est représenté l'effort appliqué  $V$  au cours de l'essai en fonction du déplacement. On observe facilement que les amplitudes sont constantes au cours de l'essai, même lorsque l'on atteint la rupture. On peut ainsi déterminer graphiquement la rupture des essais, correspondant au moment où le déplacement entre deux cycles devient important. Sur la Figure 20.b, représentant l'effort de frottement  $Q_f$  en fonction du déplacement, on observe que l'effort se mobilise peu à peu. Sur la Figure 20.c, représentant l'effort en pointe  $Q_p$  des essais cycliques en fonction du déplacement, les mêmes constatations que pour les essais monotones peuvent être faites. En effet, on retrouve une phase négative puis un effort de pointe  $Q_p$  non nul, qui traduit une compression de la pointe du pieu, deux éléments traduisant un comportement peu probable.

Il paraît impossible que le frottement  $Q_f$  soit supérieur à la valeur d'effort appliqué sur la tête du pieu, or c'est le phénomène observé. Cela provient de la distribution de l'effort de pointe au cours du temps. En effet, cette valeur devient positive, d'où une compression sur la pointe, ce qui augmente le frottement dans le pieu. Il semble donc que la rupture des pieux trouve son origine autour de la pointe.

Sur la Figure 21, l'angle de frottement sol-pieu  $\delta$  est représenté. On constate qu'à la rupture, cet angle est compris entre 20 et 25°, c'est-à-dire plus faible que les 37° des essais monotones (§ 5.2.2).

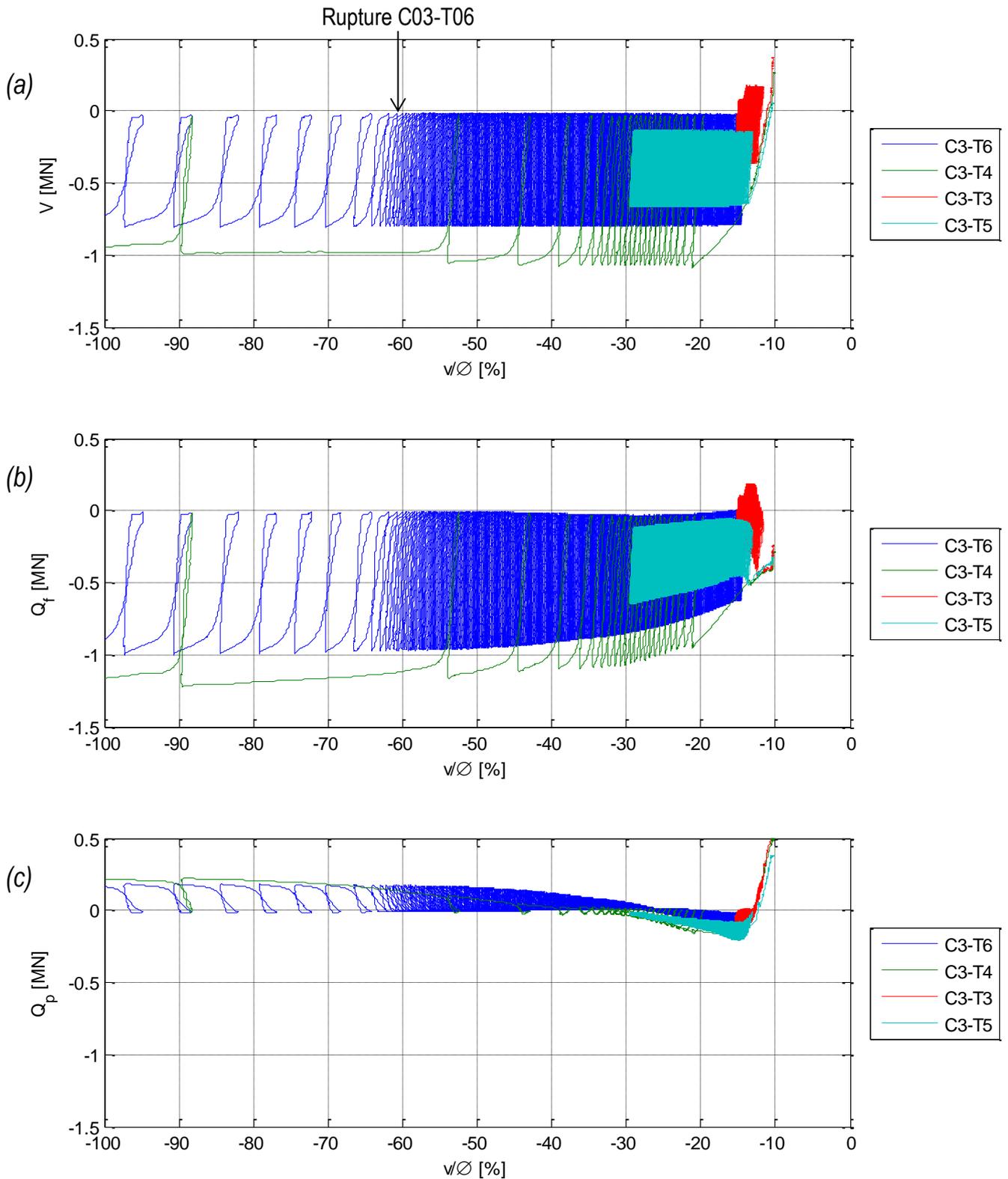


Figure 20. Effort appliqué  $V$  (a), effort de frottement  $Q_f$  (b) et effort de pointe  $Q_p$  (c) en fonction du déplacement adimensionné.

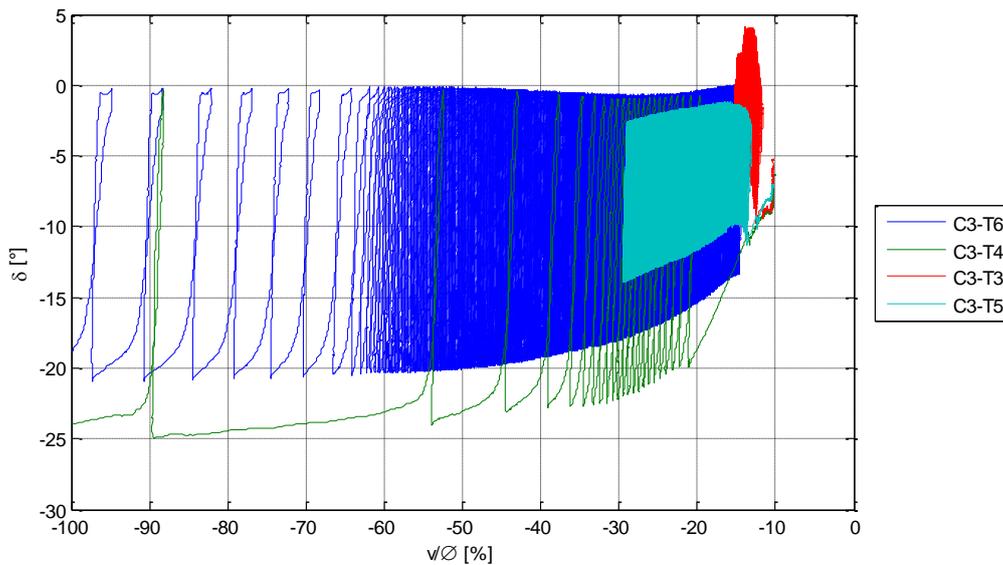


Figure 21. Angle de frottement sol-pieu  $\delta$  en fonction du déplacement adimensionnel.

### 5.3.2 Comportement des essais cycliques : diagrammes de Poulos

L'étude du comportement cyclique en traction pure repose sur les essais réalisés dans les trois premiers conteneurs. Le programme de chargement est fourni dans les tableaux VIII à XI. Ces derniers indiquent les efforts maximaux, pour les essais monotones, et les rapports  $V_m/V_{rt}$  et  $V_d/V_{rt}$ , pour les essais cycliques. Quant au tableau XII, il renseigne le nombre de cycle pour les ruptures choisies. L'ensemble de ces tableaux permettent de tracer les diagrammes de Poulos (§1.1) présents dans cette partie.

Le diagramme de Poulos, représenté Figure 22, regroupe l'ensemble des essais réalisés dans le cadre du projet SOLCYP exprimé en ratio de  $V_{rt}$  pour une rupture à 10% du diamètre. Celui représenté sur la Figure 23, permet de comparer les résultats à d'autres essais obtenus par différentes approches, notamment les résultats expérimentaux obtenus par 3S-G et ICST, exprimé en ratio de  $V_{rt}$ . Pour cette représentation, nous n'avons pas d'information sur le déroulement des essais, les protocoles d'exécution appliqués, ni accès aux données expérimentales et résultats. Ainsi, ces données ne sont qu'indicatives, d'autant que le mode de mise en place du pieu et la densité ne sont pas identiques.

Sur la Figure 22 et la Figure 23, les résultats de SOLCYP II sont comparés à d'autres études. Néanmoins, leurs paramètres ne sont pas identiques. En effet, entre les deux études de SOLCYP, le mode de mise en place à changer (moulé ou foncé), les valeurs de  $V_{rt}$  et  $V_{rc}$  sont donc différentes, ce qui implique un diagramme de Poulos différent.

Cette différence est représentée à travers trois diagrammes:

- Figure 24.a, le diagramme de Poulos exprimé en ratio de  $V_{rt}$ ,
- Figure 24.b, le diagramme de Poulos exprimé en ratio de  $V_{rc}$ ,
- Figure 24.c, le diagramme de Poulos exprimé sans ratio.

Sur chacun d'eux, le nombre de cycle est indiqué pour une valeur de rupture à 10% du diamètre du pieu à partir de l'application des cycles (conforme à SOLCYP I) et à la rupture physique.

Ces trois figures, représentant les diagrammes de Poulos, démontrent qu'il n'existe pas une représentation unique de ce même diagramme, mais plusieurs qui dépendent du mode de mise en

place (moulé ou foncé). Dans notre cas, représenter sur le même diagramme les résultats des deux volets SOLCYP (Figure 22) ne semble donc pas être pertinent.

Néanmoins, les résultats sur pieux moulés obtenus dans cette étude, se rapprochent de ceux obtenus par Guefrech & Rault (2012) (Figure 24).

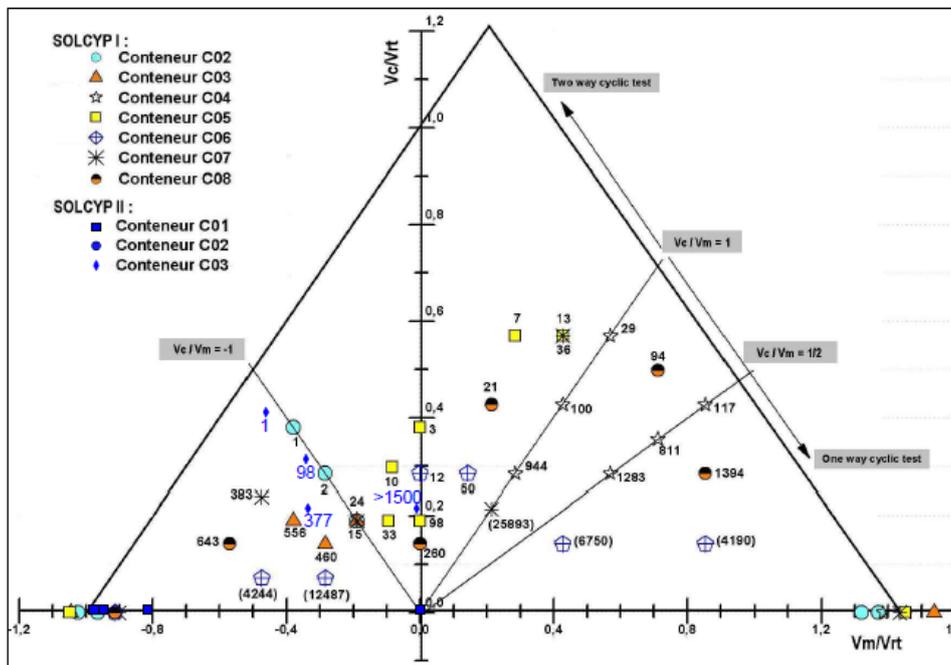


Figure 22. Diagramme de stabilité des pieux sous chargement axial obtenue dans le cadre du projet SOLCYP.

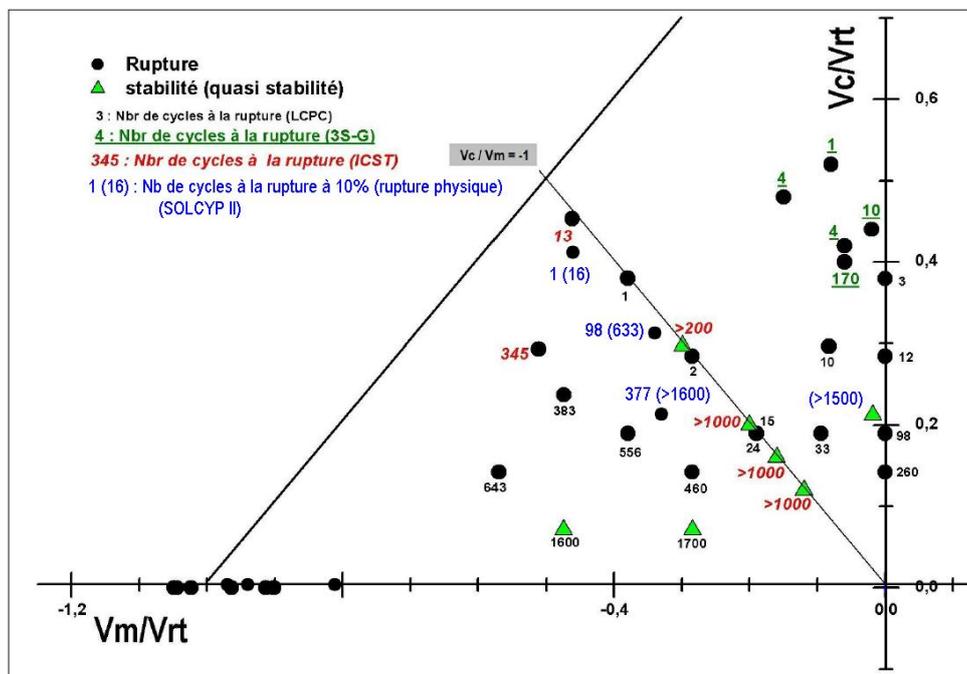


Figure 23. Diagramme de stabilité: comparaison entre les résultats de l'IFSTTAR, 3S-G et ICST.

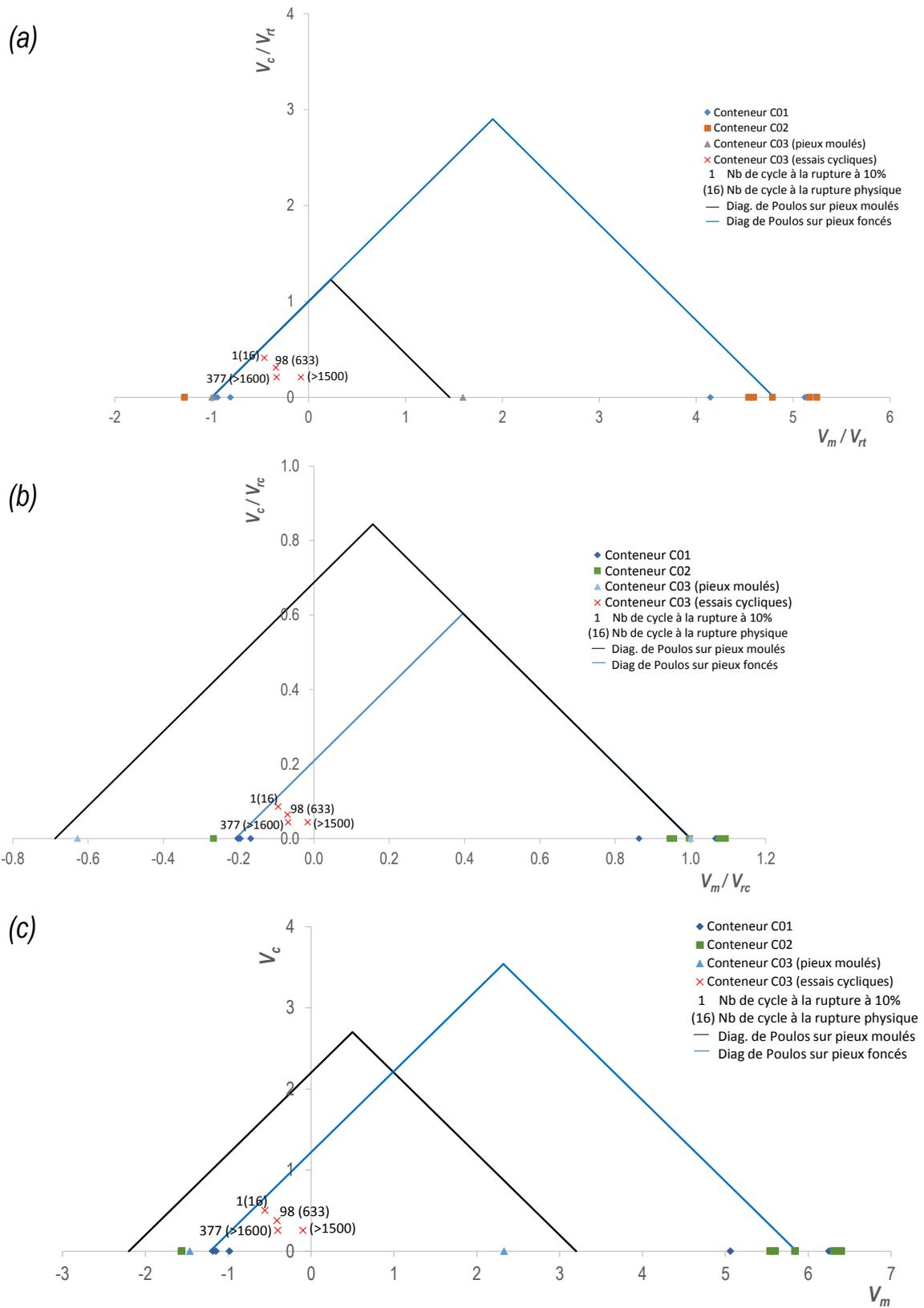


Figure 24. Diagramme de stabilité des pieux sous chargement cyclique axial exprimé en ration de  $V_{rt}$  (a) en ration de  $V_{rc}$  (b) et sans ratio (c).

### 5.3.3 Influence de l'histoire de chargement

L'influence de l'ordre de chargement a été étudiée dans le dernier conteneur réalisé, C04. Dans celui-ci, pour chaque pieu, le rapport  $V_c/V_{rt}$  a varié au cours de l'essai pour prendre des valeurs égales à 0,20 ; 0,25 et 0,30 ce qui correspond respectivement à des motifs « petits » *P*, « moyens » *M* et « grands » *G*. En revanche, le rapport  $V_m/V_{rt}$  reste inchangé et est égal à 0,3. Pour rappel, le Tableau VII indique le programme de chargement succinct, le Tableau XI le chargement détaillé en valeur prototype et le Tableau XII les différentes ruptures.

Pour analyser l'influence du chargement, on résume dans le Tableau XVI l'évolution du déplacement en fonction du nombre de cycle pour chaque essai. La Figure 25 représente cette évolution exacte, dans laquelle l'accentuation de la couleur correspond à l'augmentation de l'amplitude  $V_c$ . Afin d'établir une comparaison avec un essai cyclique à amplitude constante, on représente sur cette même figure l'essai C03-T06, qui est composé de grand cycle. Le Tableau XVI permet de tracer la pente des courbes pour chaque motif des essais du conteneur C04. Les pentes, représentant le coefficient directeur du déplacement en fonction du nombre de cycles, sont indiquées dans le Tableau XVII, présentés suivant l'ordre de chargement puis suivant les amplitudes  $V_c$ . On rappelle que pour les essais C04-T01 à C04-T05, chaque motif est composé de 200 cycles.

La Figure 25, représentant le déplacement en fonction du nombre de cycles, et le Tableau XVII, représentant les variations de pentes au cours des essais, indiquent que les motifs « Moyen » et « Petit » influent très peu si une « Grande » amplitude a sollicitée le pieu plus tôt dans l'essai. En revanche, une amplitude importante  $V_c$  a toujours des conséquences importantes pour le déplacement après des cycles plus faibles (essais C04-T02 et C04-T04). En comparant à l'essai C03-T06, on peut voir que pour les trois essais menés à la rupture on obtient des résultats similaires. En effet, il semble que l'on se situe dans la zone métastable du diagramme de Poulos.

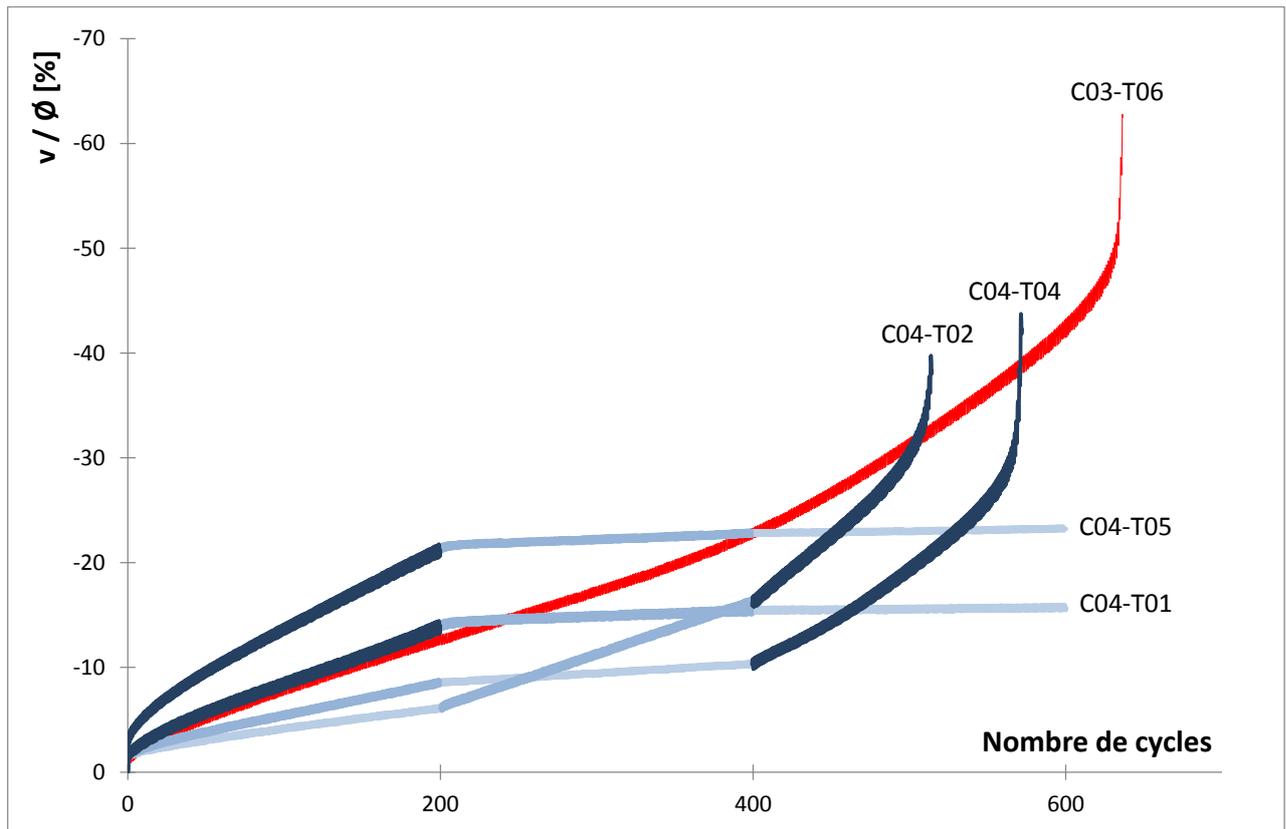


Figure 25. Evolution des déplacements des essais cycliques en fonction du nombre de cycle appliqué.

Tableau XVI. Déplacement des pieux du conteneur C04 au cours de l'essai.

Test	Programme $V_c$	$v / \emptyset$ [%] suivant le nombre de cycle									
		0	100	200	300	400	500	514	568	600	
C04-T01	G-M-P	-1,1	-9,5	-15,1	-16,1	-16,5	-16,7	-16,7	-16,7	-16,7	-16,7
C04-T02	P-M-G	-1,4	-5,5	-7,4	-12,5	-17,6	-31,8	-38,9	-	-	-
C04-T04	M-P-G	-1,6	-7,1	-10,1	-11	-11,9	-20,9	-22,6	-25,5	-	-
C04-T05	G-M-P	-1,5	-15,1	-22,7	-23,4	-24,3	-24,5	-24,5	-24,7	-24,7	-24,7

Tableau XVII. Pente du déplacement en fonction des cycles des essais C04.

Test	Pente suivant le motif [%]			Pente suivant $V_c$ [%]		
	1 <sup>er</sup> motif	2 <sup>ème</sup> motif	3 <sup>ème</sup> motif	<i>P</i>	<i>M</i>	<i>G</i>
C04-T01	7,0	0,7	0,1	0,1	0,7	7,0
C04-T02	3,0	5,1	18,7	3,0	5,1	18,7
C04-T04	4,2	0,9	13,6	0,9	4,2	13,6
C04-T05	10,6	0,8	0,2	0,2	0,8	10,6

## 6 Conclusions et perspectives

Les essais menés dans le cadre de cette étude ont permis de mettre en évidence différents phénomènes. Ainsi, l'angle de la pointe n'influence pas la valeur à la rupture, contrairement à la rugosité qui semble avoir un impact sur ce paramètre : plus elle est élevée plus la valeur de résistance à la rupture est importante. En revanche, cette tendance ne se confirme pas au niveau du déplacement du pieu.

De plus, le mode de mise en place a une influence au niveau des résultats obtenus. Ainsi, il apparaît que le fonçage induit une densification (Shakirev *et al*, 1996), ou a minima un arrangement granulaire, qui implique une augmentation de la résistance de pointe. Il est apparu évident que l'exploitation des résultats ne peut pas se faire en considérant une augmentation linéaire de la contrainte sur le pieu suivant la profondeur.

Le mode de mise en place permet également de démontrer l'existence de plusieurs diagrammes de Poulos. En effet, suivant le type d'essai mené, ici sur pieu foncé ou sur pieu moulé, les valeurs des résistances caractéristiques  $V_{rc}$  et  $V_{rt}$  sont différentes. Les points caractéristiques formant le diagramme de Poulos sont donc différents suivant la mise en œuvre et les essais ne peuvent donc pas être représentés sur le même diagramme. Pour compléter le diagramme relatif aux pieux forcés, des essais supplémentaires, notamment en compression, devraient être menés.

Enfin, l'étude du chargement cyclique met en évidence l'importance de l'histoire de chargement. Ainsi, si une faible amplitude intervient après une amplitude de plus forte importance, elle aura un faible impact sur le déplacement du pieu. Au contraire, une forte amplitude a toujours des conséquences importantes sur le déplacement du pieu après des cycles plus faibles.

## Références

- AFNOR (2013). Justifications des ouvrages géotechniques- Normes d'application nationale de l'Eurocode 7- Fondations profondes. 204p
- American Petroleum Institute (2011). Géotechnical and Foundation Design Considerations, ANSI/API recommended practice 2GEO. 120p
- Guefrech A. et Rault G. (2012). Pieux sous sollicitations cycliques axiales dans un massif de sable - essais en centrifugeuse. 60p
- Jardine R., Chow F., Overy R. & Standing J. (2005). ICP design methods for driven piles in sands and clays. 105p
- Lings M.L. & Dietz MS. (2005). The peak strength of sand-steel interfaces and the role of dilation. *Soils and Foundations*, 45(6). pp.1-14
- Poulos H.G. (1988). Cyclic stability diagram for axially loaded piles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 114. pp 877-895
- Shakirev V., Magnan J.P. et Ejjaaouani N. (1996). Etude expérimentale du comportement du sol lors du fonçage des pieux. *Bulletin du laboratoire des Ponts et Chaussées*, n°206. pp 95-113
- Sobesol (2007). Procès verbal des essais en laboratoire sur le sable de Fontainebleau. 10p