



## RAPPORT DE RECHERCHE

Thème 3 :  
Interprétation approfondie des essais de pieux  
Auteur : M. BEN AMOR, A. PUECH, Z. DELIMI  
Organisme : FUGRO

R/13/SOL/019  
LC/13/SOL/40  
Septembre 2013

## SOLCYP/ FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE :	Interprétation approfondie des essais de pieux
Rapport : R/13/SOL/19	
DATE D'ETABLISSEMENT :	Septembre 2013
AUTEURS :	Meriam KHEMAKHEM-BEN AMOR / Zine Labidine DELIMI / Alain PUECH
ORGANISME CHARGE DE L'ACTION :	Fugro GeoConsulting S.A.S.
THEME DE RATTACHEMENT : Thème 3 - Essais de pieux	
LETTRE DE COMMANDE :	LC/13/SOL/40

## **Sommaire**

RESUME .....	3
ABSTRACT .....	3
1. INTRODUCTION GENERALE .....	4
2. METHODE GLOBALE – CAS D’UN PIEU FORE DANS UN SABLE DENSE SOUMIS A UNE CHARGE AXIALE EN COMPRESSION .....	7
2.1. Introduction .....	7
2. 2. Données expérimentales .....	7
2.2.1. Caractéristiques du sol .....	7
2.2.2. Pieux testés.....	9
2.2.3. Charge ultime conventionnelle .....	9
2.2.4. Chargements cycliques appliqués .....	11
2.3. Effet des cycles sur le déplacement en tête du pieu.....	12
2.3.1. Résultats expérimentaux.....	12
2.3.2. Evolution du déplacement cyclique $z_n$ en fonction du nombre de cycle .....	14
2.3.3. Ajustement des courbes $z_n/z_1 = (n)$ .....	15
2.3.4. Calcul à rebours.....	18
2.4. Conclusions .....	21
3. METHODE LOCALE – CAS D’UN PIEU BATTU DANS UN SABLE DENSE SOUMIS A UNE CHARGE AXIALE EN TENSION .....	22
3.1. Introduction .....	22
3.2. Données expérimentales.....	22
3.2.1. Projet de recherche GOPAL.....	22
3.2.1.1. Situation géographique du site: .....	23
3.2.1.2. Caractéristiques du sol : .....	23
3.2.1.3. Caractéristiques des pieux : .....	27
3.2.2. Projet de recherche SOLCYP.....	28
3.2.2.1 Situation géographique du site: .....	28
3.2.2.2 Caractéristiques du sol : .....	28

3.2.2.3. Caractéristiques des pieux : .....	31
3.3. Programme numérique SCARP .....	32
3.3.1. Présentation du programme .....	32
3.3.2. Calcul statique .....	32
3.3.3. Calcul Cyclique.....	32
3.3.3.1. Dégradation cyclique.....	32
3.3.3.2. Accumulation des déplacements cycliques :.....	34
3.3.3.3. Procédure de l'analyse numérique .....	35
3.4. Procédure d'analyse .....	36
3.4.1. Construction de modèle numérique (Input SCARP).....	36
3.4.2. Calage du modèle en statique :.....	37
3.4.3. Calage des paramètres cycliques. ....	37
3.4.3.1. Paramètres de modèle de dégradation Matlock et Foo .....	37
3.4.3.2. Paramètres d'accumulation de déplacement cyclique .....	38
3.5. Etude numérique .....	38
3.5.1. Etude des pieux de projet GOLAP .....	38
3.5.1.1. Calage en statique .....	38
3.5.1.2. Calage des paramètres cycliques de l'approche Matlock et Foo.....	41
3.5.1.3. Calage des paramètres d'accumulation de déplacement cyclique:.....	46
3.5.2. Etude des pieux battus de LOON-PLAGE.....	49
3.5.2.1 Calage en statique .....	50
3.5.2.2. Calage des paramètres cyclique de l'approche Matlock et Foo: .....	52
3.5.2.3. Calage des paramètres d'accumulation de déplacement cyclique:.....	53
3.6. Conclusions.....	57
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	59

## RESUME

Le projet de recherche SOLCYP a pour objectif de développer des méthodologies innovantes pour dimensionner les pieux soumis à des chargements cycliques axiaux. Trois types d'approches de conception sont proposés : une analyse globale du système sol-pieu, une analyse locale de l'interface sol-pieu et une analyse par éléments finis. Pour établir ces méthodes, une base de données expérimentale importante a été obtenue durant ces dernières quatre années à partir d'essais sur terrain et sur modèles réduits. Les essais in-situ de chargement axial ont été réalisés dans deux sites : le site de Merville (argile de Flandres fortement surconsolidée) et le site de Loon-Plage (sable de Flandres dense).

Le présent travail expose les avancées réalisées dans le cadre des méthodes globale et locale pour un pieu sous charge cyclique axiale dans un sable dense.

Pour la méthode globale, l'accumulation du déplacement permanent en tête du pieu en fonction du nombre de cycles est analysée pour les essais de Loon-Plage et en modèle réduit centrifugé. Une étude paramétrique est réalisée. Des lois empiriques sont ensuite proposées permettant le calcul du déplacement en tête du pieu après  $n$  cycles à partir du déplacement statique et des caractéristiques du chargement cyclique.

Pour la méthode locale, l'interface sol-pieu est modélisée par des courbes de transfert « t-z ». Le code SCARP, basé sur ce principe, a été validé pour différentes conditions. Les paramètres cycliques de calibrage sont ensuite proposés pour le sable dense de Dunkerque et de Loon-Plage. Les résultats clés de la modélisation numérique d'un pieu sous une charge cyclique non alternée en tension sont présentés.

**MOTS-CLES:** pieu, charge axiale, chargement cyclique, SOLCYP

## ABSTRACT

The SOLCYP joint industry project is aimed at developing improved methodologies for designing piles submitted to axial and lateral cyclic loading. Three types of cyclic design approaches are proposed: global pile analyses, local soil-pile analyses and finite elements analyses. To elaborate these methods, an extensive experimental data base was gathered through the past four years from field and reduced scale model tests. In situ axial pile tests were conducted at Merville site (stiff overconsolidated Flanders clays) and at Loon-Plage site (Flanders dense sands).

This present work addresses advances made in global and local pile analyses focusing on the response of a pile under axial cyclic loading in dense sand.

For global analyses, the accumulation of permanent pile head displacements with number of cycles is analyzed for Loon-Plage and reduced scale models tests. A parametric study is conducted. Empirical laws are then proposed to evaluate the pile head displacement after  $n$  cycles from the static displacement and the cyclic load characteristics.

For local soil-pile analyses, the pile soil interface is modeled by transfer curves commonly called t-z curves. The Software SCARP is validated under different situations. Cyclic calibration parameters are then proposed for dense sands at Loon-Plage and Dunkerque. Key results from numerical modeling of cyclic one-way tests in tension are presented.

**KEYWORDS:** pile, axial load, cyclic loading, SOLCYP

# 1. INTRODUCTION GENERALE

Dans le cadre de projet de recherche SOLCYP, une base de données importante a été obtenue à partir d'essais sur des pieux à grande échelle conduits sur deux sites différents. Le premier site est à Loon-Plage (sable dense des Flandres) et le deuxième site est à Merville (argile des Flandres). Ces essais sont complétés par des essais sur pieux-modèles dans des chambres d'étalonnage (3SR, Grenoble et CERMES, Marne-la-Vallée) et en centrifugeuse (IFSTTAR, Nantes). Les résultats sont actuellement disponibles.

En parallèle, les méthodes de conception sont en cours d'élaboration. SOLCYP recommande une approche graduée telle que résumée dans l'organigramme de la Figure 1 : Organigramme de SOLCYP pour la conception des pieux sous chargement cyclique axial

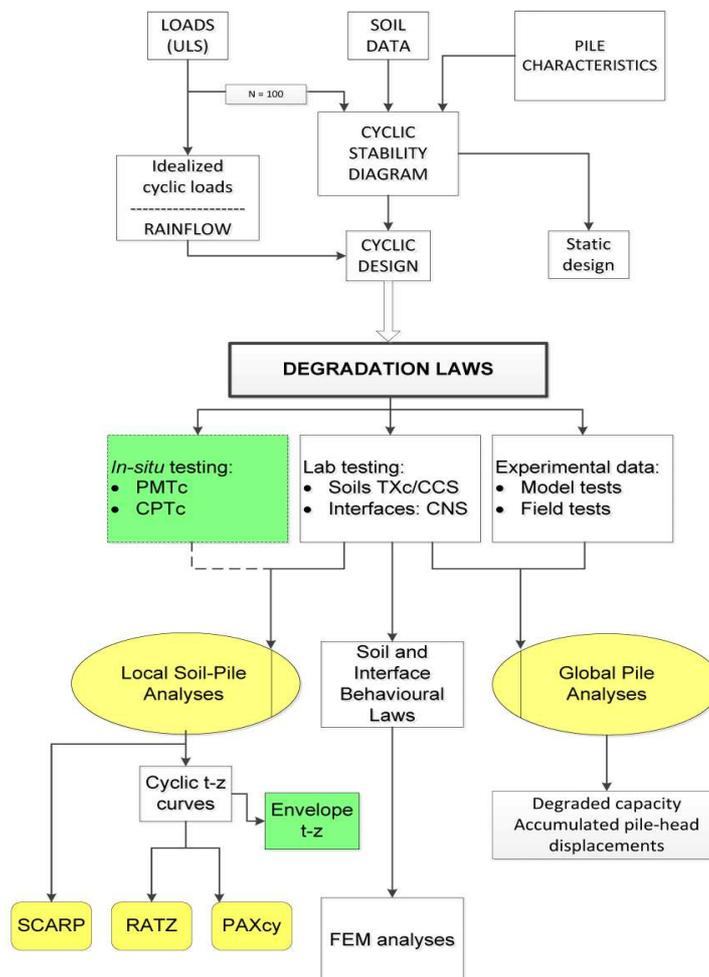


Figure 1 : Organigramme de SOLCYP pour la conception des pieux sous chargement cyclique axial

Les étapes principales de la conception des pieux sous chargement cyclique axial sont:

- Une caractérisation précise des charges cycliques ;
- Une vérification de la sévérité de la charge cyclique en comparant le niveau de la charge cyclique avec la réponse globale d'un pieu similaire, dans des conditions de sol semblables, à partir des diagrammes de stabilité cycliques appropriés;
- La sélection d'une méthode de conception cyclique, si nécessaire.

Trois types d'approches de conception cycliques sont proposés en rapport avec l'impact attendu du chargement cyclique sur la réponse du pieu :

- Approches globales : le pieu est calculé dans les conditions de chargement monotone, des lois de dégradation sont ensuite appliquées pour tenir en compte de la dégradation du frottement latéral et du cumul de déplacement en tête du pieu dû aux cycles.
- Approches locales : lorsque les approches globales sont insuffisantes (en particulier pour les pieux longs et flexibles) des approches locales doivent être mises en œuvre. L'analyse par poutre élastique combinée avec l'utilisation des courbes de transfert t-z sont couramment utilisées pour le chargement statique. Toutefois, aucune courbes t-z cyclique n'est à ce jour proposée dans les codes ou les recommandations professionnelles. Des programmes spécifiques ont été développés pour tenir compte des charges cycliques, à savoir RATZ (Randolph, 2003) et SCARP (Poulos, 1992). Ces programmes comprennent un algorithme pour générer les courbes t-z cycliques. Le calibrage des paramètres internes sur des tests de pieux bien documentés et fiables est encore à faire.
- Approches par éléments finis (FEM): les procédures implicites où chaque cycle est calculé avec un modèle de comportement approprié n'ont pas été considérées pour la prise en compte d'un nombre élevé de cycles. Les procédures explicites au sens de Wichtman (2005) semblent plus appropriées. L'accumulation des déformations résiduelles générées par les cycles est traitée d'une manière similaire au problème du fluage sous charge constante. Des progrès ont été réalisés.

Le présent rapport s'intéresse à deux approches :

- **Partie I : Méthode globale.** Il s'agit de modéliser l'effet des cycles sur le déplacement en tête du pieu. Le cas d'un pieu foré dans un sable dense soumis à une charge axiale en compression est en particulier étudié. Des données expérimentales issues des essais en grandeur réelle à Loon-Plage et des essais sur modèles réduits en centrifugeuse sont exploitées. L'accumulation du déplacement cyclique en tête du pieu en fonction du nombre de cycles a été analysée. Des lois puissances ajustées sur les courbes expérimentales ont été examinées pour proposer des lois empiriques permettant de calculer le déplacement cyclique de la tête du pieu à partir du déplacement statique et des caractéristiques du chargement cyclique.
- **Partie II : Méthode locale.** L'objectif est de calibrer les paramètres internes du code de calcul SCARP afin de simuler le comportement local des pieux sur la base des essais de chargement

cyclique réels. Le cas d'un pieu battu dans le sable dense sollicité en traction est en particulier étudié. La base des données expérimentales provient à la fois des essais de Loon-Plage réalisés dans le cadre du projet SOLCYP et des données issues des essais réalisés par l'Imperial College dans le site voisin de Dunkerque (Jardine et Standing, 2000 et Rimoy et al. 2013) présentant les mêmes caractéristiques mécaniques.

## **2. METHODE GLOBALE – CAS D’UN PIEU FORE DANS UN SABLE DENSE SOUMIS A UNE CHARGE AXIALE EN COMPRESSION**

### **2.1. Introduction**

L’effet d’un chargement cyclique axial sur le comportement d’un pieu dans le sable en compression est étudié dans cette partie. Comme prévu dans le programme SOLCYP, nous tentons de développer « une méthode globale » où nous nous intéressons à la réponse globale du pieu en termes de déplacements en tête.

L’intérêt de la « Méthode globale » est de proposer au concepteur un outil simple lui permettant d’évaluer le déplacement cyclique d’un pieu sous charge axiale en connaissant les caractéristiques du chargement cyclique appliqué. Dans cette méthode, le pieu est d’abord calculé selon les règles classiques sous une charge monotone pour déterminer le déplacement en tête correspondant. On se propose ensuite d’utiliser des expressions permettant de calculer le déplacement après  $n$  cycles en fonction du déplacement monotone et des caractéristiques du chargement cyclique.

Pour ceci, nous exploitons les données expérimentales SOLCYP qui proviennent de:

- résultats des essais in-situ réalisés à Loon-Plage (Benzaria (2012), Benzaria et al. (2013)) ;
- résultats des essais réalisés sur modèles réduits en centrifugeuse de l’IFSTTAR-Nantes (Guefrech et Rault (2012), Guefrech et al. (2012)).

Nous nous intéressons en particulier au cas d’un **pieu foré sous charge axiale en compression cyclique non alternée dans un sable dense**.

Dans la suite, nous rappelons d’abord brièvement les données expérimentales. Nous présentons ensuite les résultats typiques obtenus que nous exploitons pour tenter de développer l’approche globale.

### **2. 2. Données expérimentales**

Tous les détails des campagnes expérimentales sont respectivement donnés dans la thèse de Benzaria (2012) pour les essais de Loon-Plage et dans le rapport de Guefrech et Rault (2012) pour les essais en centrifugeuse. Nous rappelons dans la suite ces données en soulignant les similitudes ou/et les différences entre les conditions des essais de Loon-Plage et les essais sur modèles réduits en centrifugeuse.

#### **2.2.1. Caractéristiques du sol**

Le site de Loon-Plage est situé dans le Nord de La France. Une campagne spécifique d’investigation a été réalisée. La Figure 2 présente les profils pénétrométriques obtenus ainsi que les densités relatives déduites comprises entre 80 et 100%. Le site est caractérisé par des sables denses appelés « sables de Flandres ».

Une autre particularité du site est la présence d'une couche d'argile très molle à partir de 12m comme l'illustre la Figure 2.

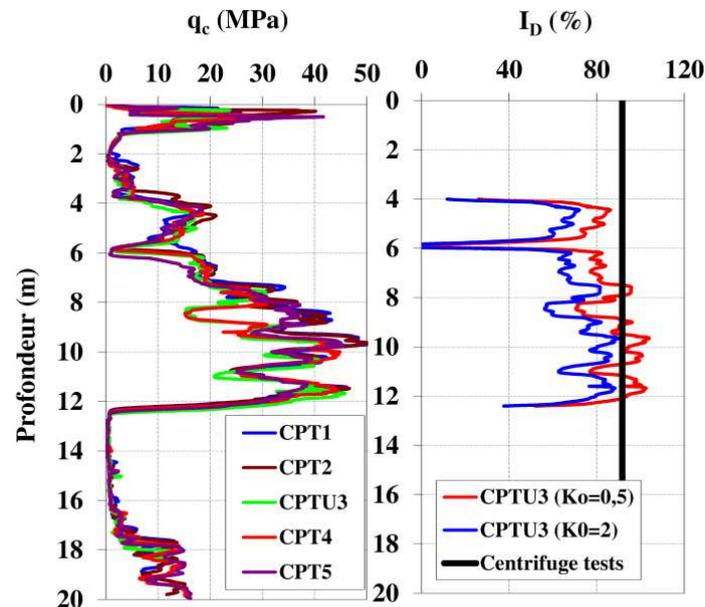


Figure 2 : Profils pénétrométriques à Loon-Plage (Benzaria, 2012)

Pour les essais sur modèles réduits, le sable de Fontainebleau a été utilisé pour reconstituer les massifs de sable homogènes. Ce matériau a été choisi notamment en raison de la similarité de ses caractéristiques physiques et mécaniques avec celles du sable de Flandres.

Les massifs de sable sont reconstitués par pluviation à une hauteur réglable et définie au préalable en fonction de la densité visée. Le contrôle de la densité des massifs reconstitués est effectué après reconstitution au moyen de boîtes cylindriques calibrées posées sur le fond du conteneur et qui sont prélevées après la campagne d'essais en centrifugeuse. Le Tableau 1 résume les valeurs de densité relative obtenues dans les massifs de sable reconstitués. Une valeur moyenne de 91.7% est obtenue entre les différents conteneurs (noté C).

Tableau 1 : Valeurs de densité relative pour les massifs de sable reconstitués

Conteneur	$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	$I_D$ (%)
C02	16,72	91,8
C03	16,72	91,6
C04	16,75	92,6
C05	16,76	92,8
C06	16,55	87
C07	16,77	93,2
C08	16,77	93,2
<b>Moyenne</b>	<b>16,72</b>	<b>91,7</b>

La densité relative des massifs de sable reconstitués est proche des valeurs du site Loon-Plage (voir Figure 2). L'avantage des essais en centrifugeuse est d'obtenir des sols parfaitement homogènes facilitant ainsi les analyses des résultats. La présence de la couche d'argile molle sur le site de Loon-Plage doit être prise en considération avec précaution.

### 2.2.2. Pieux testés

Le Tableau 2 résume les caractéristiques géométriques et mécaniques des pieux prototypes correspondant aux pieux modèles centrifugés et des pieux de Loon-Plage testés. On note que les pieux prototypes correspondant aux pieux modèles centrifugés sont plus élancés et plus rigides que les pieux de Loon-Plage.

**Tableau 2 : Comparaison des caractéristiques géométriques et mécaniques des pieux modèles et des pieux de Loon-Plage**

		Unité	Pieu Loon-plage	Pieu prototype correspondant au pieu modèle
Diamètre	D	[mm]	420	414
Longueur de fiche	L	[m]	8	12.88
Elancement	<b>L/D</b>	<b>[-]</b>	<b>19</b>	<b>31</b>
Matériau			Béton armé	Aluminium
Module d'Young en compression	E	[MPa]	3904	$7.4 \cdot 10^4$
Surface	A	[m <sup>2</sup> ]	0.14	0.13
EA	<b>EA</b>	<b>[MN]</b>	<b>5465</b>	<b>9961</b>

Les pieux sont « forés » pour les essais à Loon-Plage et les essais à échelle réduite :

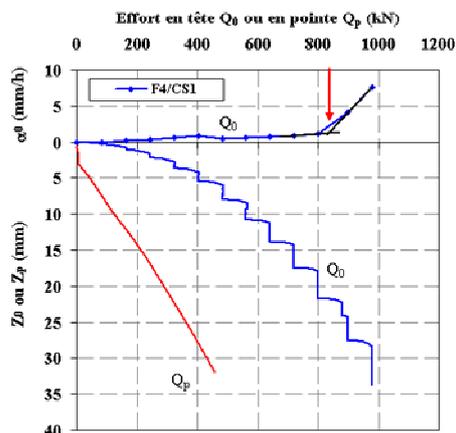
- pieu de Loon-Plage : le forage est réalisé avec une tarière creuse de diamètre 420mm. Cette technique consiste à visser dans le sol une tarière à axe creux sur une longueur d'au moins égale à celle du pieu à réaliser, puis à l'extraire du sol sans dévisser en injectant du béton par l'axe creux. Les cages ont été insérées dans le béton frais soit sous leur seul poids propre soit à l'aide d'un vibreur.
- pieu modèle centrifugé : le pieu est moulé dans le sol. Les massifs de sable sont reconstitués par pluviation et le pieu est suspendu avant et pendant la pluviation. Cette mise en place est considérée comme représentative de celle d'un pieu foré.

### 2.2.3. Charge ultime conventionnelle

L'étude des cycles nécessite de définir une référence relative au chargement statique. La charge ultime en compression qu'on note  $Q_{uc}$  est estimée conventionnellement pour un déplacement en tête du pieu égal à 10%.

- Essais de Loon-Plage

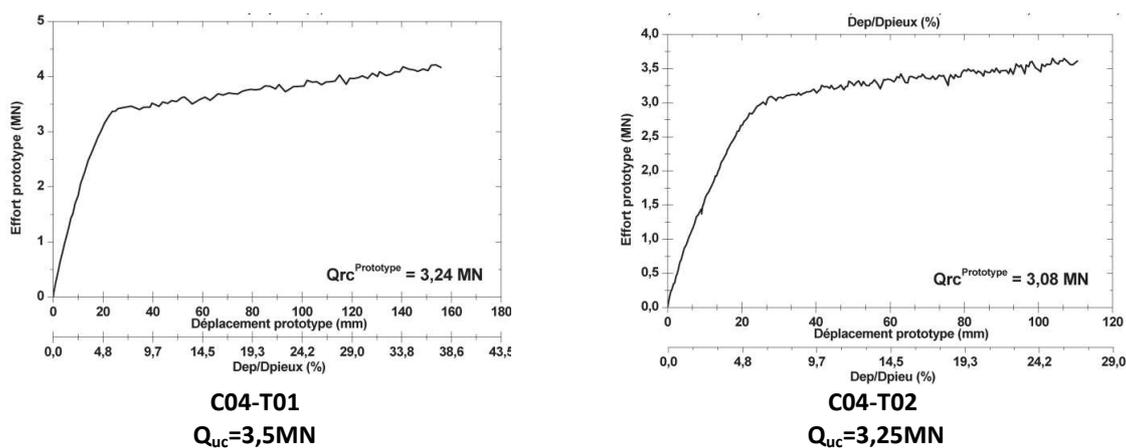
Pour les pieux de Loon-Plage, des essais statiques de référence à paliers d'une heure selon la norme NF P 94-150 et des essais statiques rapides (temps pour un palier : 3mn) ont été réalisés. Un exemple typique de la courbe effort-déplacement obtenue est présenté sur la Figure 3. En extrapolant la courbe à un déplacement égal à 10% du diamètre (soit 42mm), Benzaria et al. (2013) proposent une valeur de charge ultime égale à 1100kN.



**Figure 3 : Essai statique de référence sur un pieu foré. Courbes de charge-déplacement en tête, de mobilisation de l'effort de pointe et de fluage (Benzaria et al., 2013)**

- Essais sur modèles réduits

Un essai de compression statique est réalisé dans chaque massif. Deux exemples de courbes effort-déplacement obtenues sont illustrés sur la Figure 4. Le Tableau 3 regroupe les valeurs déterminées pour la charge ultime conventionnelle, la moyenne de ces valeurs est de 3290kN.



**Figure 4 : Courbes effort-déplacement obtenues sur des pieux modèles (données à l'échelle du prototype)**

**Tableau 3 : Charge ultime conventionnelle pour les pieux centrifugés**

		$I_D$ [%]	$\rho$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$Q_{uc}$ [MN]
C02	C02-T01	91,8	16,72	3.11
	C02-T04	91,8	16,72	3.1
C04	C04-T01	92,6	16.72	3,5
	C04-T02	92,6	16.72	3,25
C07	C07-T01	93,2	16,77	3,5
<b>Moyenne</b>				<b>3.29</b>

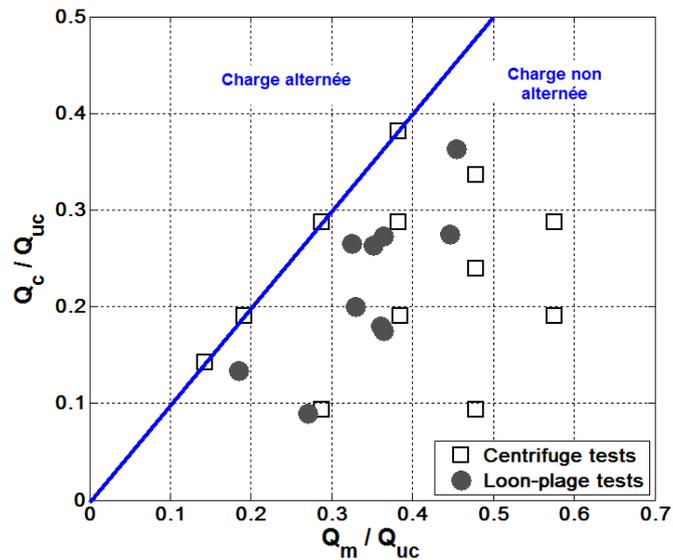
#### 2.2.4. Chargements cycliques appliqués

Pour estimer la sévérité des cycles appliqués, l'amplitude cyclique  $Q_c$  ainsi que la charge moyenne  $Q_m$  appliquées sont normalisées par la charge ultime en compression  $Q_{uc}$ .

Nous récapitulons dans la Figure 5 l'ensemble des essais considérés dans cette étude en présentant le rapport  $Q_c/Q_{uc}$  en fonction de  $Q_m/Q_{uc}$ . Tous les essais se situent dans le domaine des charges non alternées. Le niveau de chargement est à peu près dans la même gamme de valeurs pour les essais à Loon-Plage et en centrifugeuse :

$$0.1 < Q_m/Q_{uc} < 0.6$$

$$0.05 < Q_c/Q_{uc} < 0.4$$



**Figure 5 : Chargements cycliques appliqués pour les pieux centrifugés et les pieux de Loon-Plage**

Le nombre de cycles testé est élevé : 2500 cycles pour les essais sur modèles réduits et 5000 cycles pour les essais de Loon-Plage.

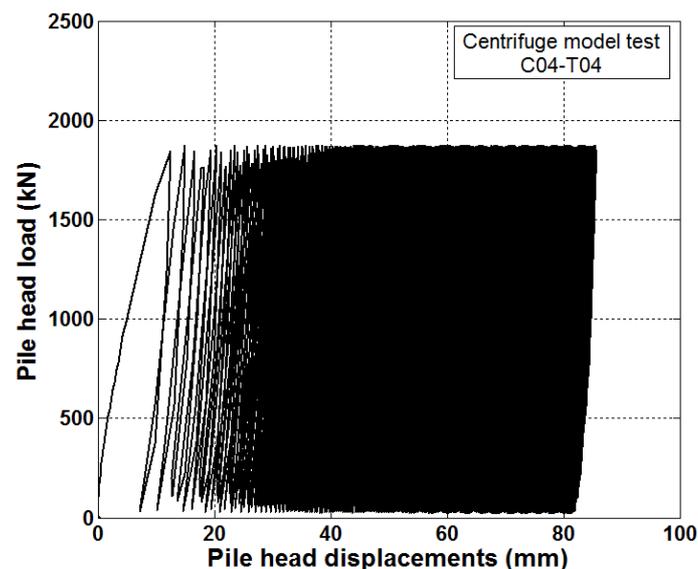
Des différences sont à souligner entre les essais en centrifugeuse et les essais sur modèles réduits à savoir :

- la fréquence de chargement n'est pas la même :  $f=0.1\text{Hz}$  pour les essais en centrifugeuse et  $f=0.5\text{Hz}$  pour les essais à Loon-Plage ;
- les pieux testés en centrifugeuse ne subissent aucun pré-chargement, ce qui n'est pas forcément le cas pour les pieux de Loon-Plage où des séries de chargements (statique et monotone) sont appliquées successivement sur un même pieu.

## 2.3. Effet des cycles sur le déplacement en tête du pieu

### 2.3.1. Résultats expérimentaux

La Figure 6 présente une courbe effort-déplacement typique obtenue pour un pieu modèle centrifugé. Les valeurs sont à l'échelle du prototype.



**Figure 6 : Exemple typique d'une courbe Q-z pour les essais en centrifugeuse (à partir des données de Guefrech et Rault (2012))**

La Figure 7 montre l'ensemble des courbes effort-déplacement obtenues sur un pieu foré à Loon-Plage chargé successivement par des séquences statiques et cycliques (avec CS : Compression Statique lente, CC : Compression Cyclique et CR : Compression Rapide).

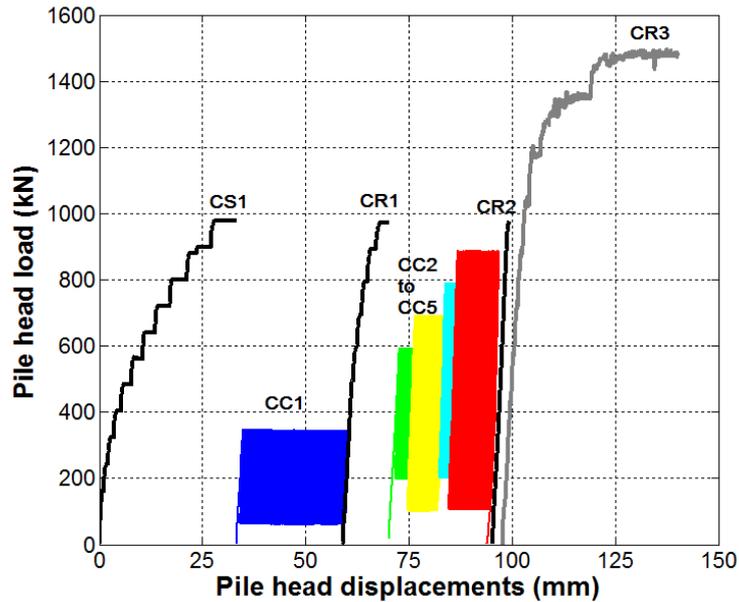


Figure 7 : Exemple typique d'une courbe Q-z pour les essais à Loon-Plage (Benzaria, 2012)

Un chargement cyclique induit une accumulation du déplacement cyclique global. En effet, les cycles provoquent une succession de petits glissements relatifs sol-pieu dont le cumul détermine le déplacement global. Localement le long du pieu, les frottements sol-pieu évoluent en fonction du chargement appliqué, et la vitesse de la détérioration ou de l'amélioration est fonction du niveau de la sollicitation appliquée.

L'analyse des phénomènes locaux n'est pas l'objet de ce rapport et nous nous intéressons dans la suite à la réponse globale du pieu en terme de déplacement cyclique en tête du pieu. Nous examinons l'évolution du déplacement cyclique  $z_n$  au nième cycle et sous la charge maximale  $Q_{max} = Q_m + Q_c$  en fonction du nombre de cycle (voir Figure 8). Nous étudions en particulier l'évolution du déplacement cyclique relatif  $z_n/z_1$  en fonction du nombre de cycles, où  $z_1$  correspond au chargement monotone.

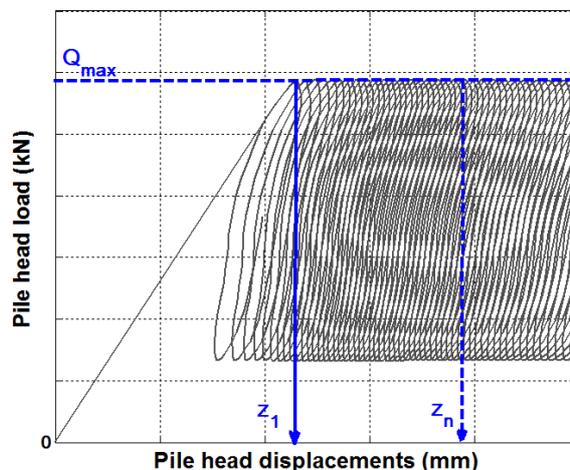


Figure 8 : Notations pour le déplacement cyclique  $z_n$

### 2.3.2. Evolution du déplacement cyclique $z_n$ en fonction du nombre de cycle

L'ensemble des courbes  $z_n/z_1=f(n)$  obtenues à partir des essais modèles en centrifugeuse et des essais à Loon-Plage est présenté sur la Figure 9. Au total, **21 essais de chargement cyclique** sont exploités : **11** essais sur modèles réduits et **10** essais in situ à Loon-Plage.

On constate que toutes les courbes suivent une loi puissance et admettent une asymptote horizontale. Cela s'explique physiquement par le fait que pour un pieu en compression, le cumul du déplacement s'accompagne d'une mobilisation progressive de l'effort de pointe de sorte que quel que soit le chargement appliqué le pieu tend vers une stabilisation à plus ou moins grands déplacements ou nombre de cycles.

La comparaison des courbes  $z_n/z_1=f(n)$  obtenues sur les pieux modèles et à Loon-Plage pour 2 niveaux de chargements comparables est présentée sur la Figure 10. Les 2 cas examinés ici montrent que le cumul des déplacements en tête du pieu à Loon-Plage est toujours plus sévère que pour les pieux modèles. Les raisons de cette différence ne sont pas clairement établies à ce stade.

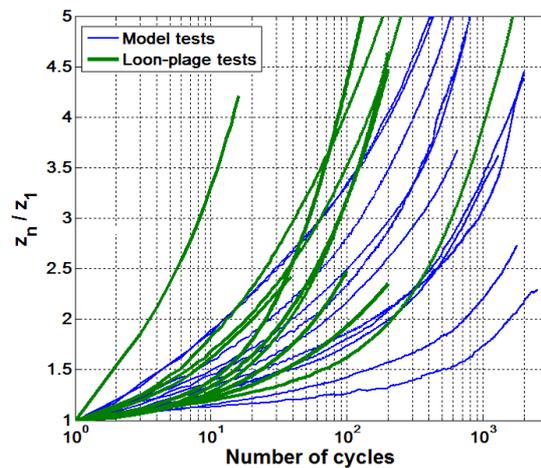


Figure 9 : Evolution du déplacement cyclique relatif en fonction du nombre de cycles dans une échelle semi-logarithmique

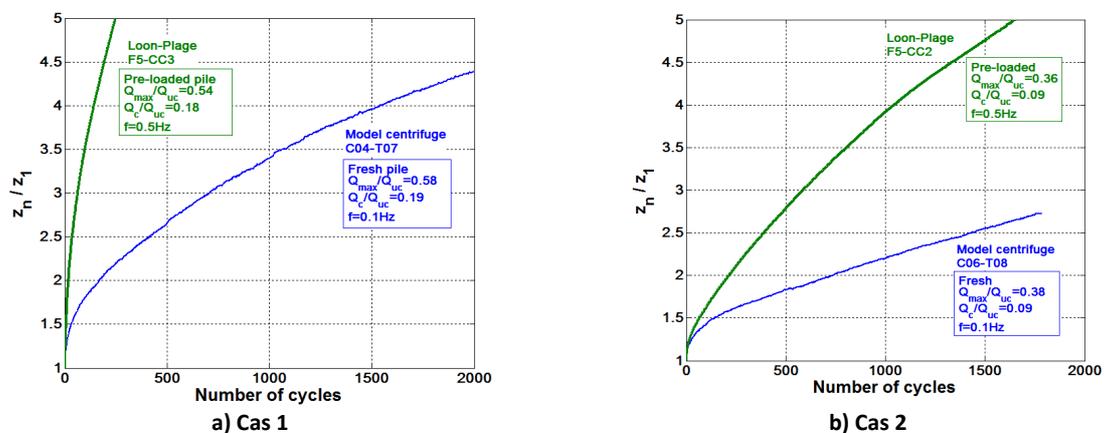


Figure 10 : Comparaison des courbes  $z_n/z_1=f(n)$  issues des essais en centrifugeuse et à Loon-Plage pour des niveaux de chargements comparables

### 2.3.3. Ajustement des courbes $z_n/z_1 = (n)$

La loi puissance ajuste assez bien les courbes expérimentales comme l'illustre la Figure 11 pour les essais de Loon-Plage et la Figure 12 pour les essais en centrifugeuse, cette loi semble valide jusqu'à un nombre de cycles de 5000 (Figure 12-b).

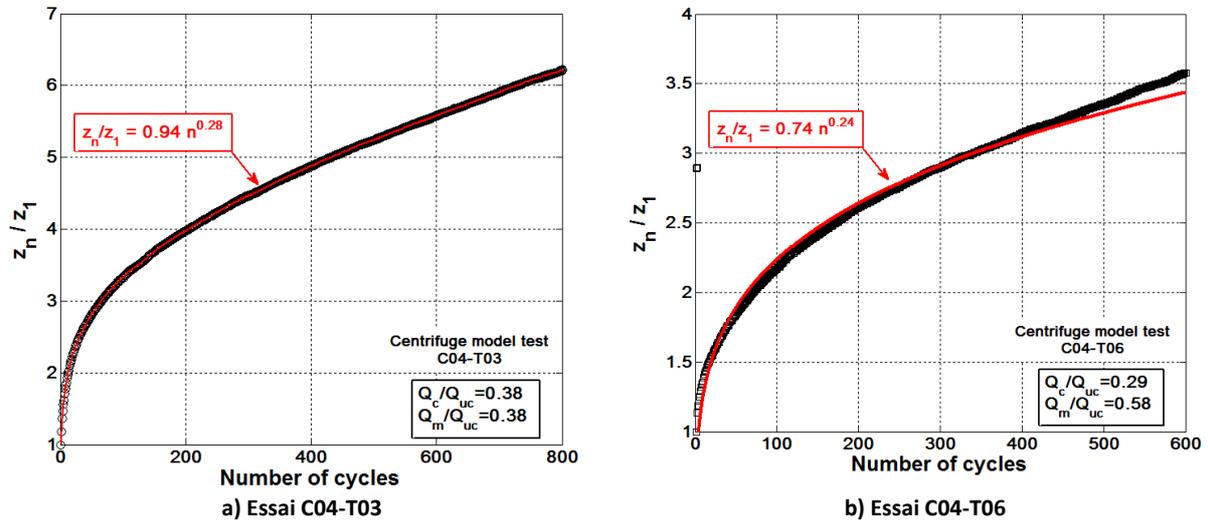


Figure 11 : Ajustement par une loi puissance pour les pieux modèles forés dans un sable dense

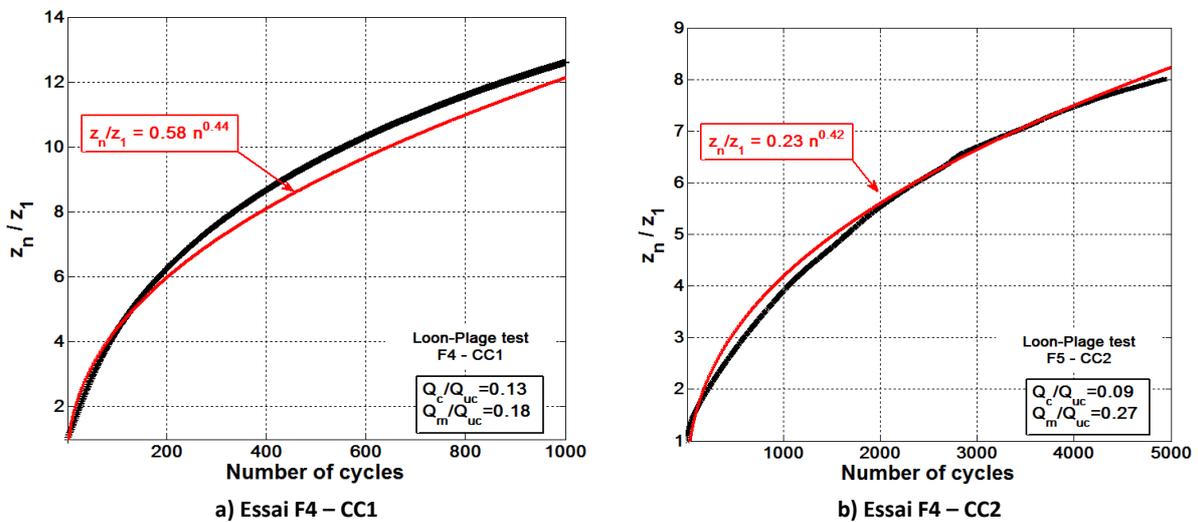


Figure 12 : Ajustement par une loi puissance pour les pieux forés de Loon-Plage

La loi puissance utilisée pour l'ajustement est de la forme suivante :

$$\frac{z_n}{z_1} = k n^a \quad \text{où } n > 1 \quad [1]$$

où  $k$  et  $a$  des coefficients d'ajustements. Nous tentons dans la suite d'étudier leur évolution en fonction des caractéristiques du chargement cyclique appliqué.

La dépendance des coefficients  $k$  et  $a$  en fonction de plusieurs combinaisons des paramètres du chargement cyclique ( $Q_c$ ,  $Q_m$  et  $Q_{max} = Q_m + Q_c$ ) ont été étudiées. Nous présentons dans la suite les meilleures corrélations constatées.

- **Coefficient  $k$**

La meilleure variation du coefficient  $k$  est obtenue en fonction du rapport  $Q_c/Q_{uc}$  (Figure 13). Bien que les valeurs soient un peu dispersés, le coefficient  $k$  semble à peu près proportionnel à  $Q_c/Q_{uc}$  ( $R^2=0.32$ ) en ayant adopté une valeur nulle du coefficient  $k$  lorsque le rapport  $Q_c/Q_{uc}$  s'annule. On note que les valeurs issues des essais en centrifugeuse sont moins dispersées que celles issues des essais de Loon-Plage. Nous retenons l'expression suivante pour le coefficient  $k$ , valable pour les deux familles d'essais:

$$k = 2.7 \frac{Q_c}{Q_{uc}} \quad [2]$$

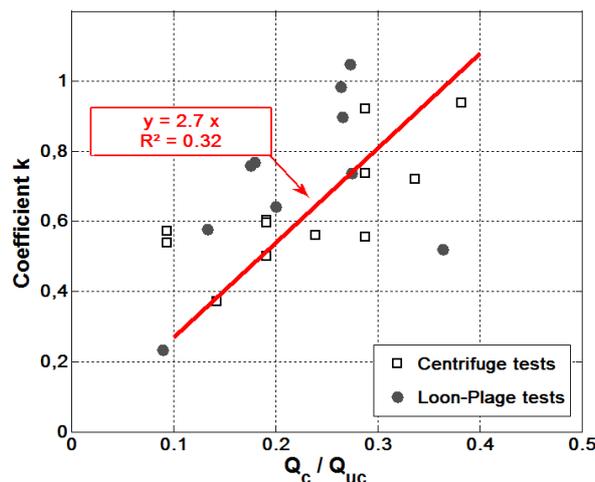


Figure 13 : Evolution du coefficient  $k$  en fonction du rapport  $Q_c/Q_{uc}$

- **Exposant  $a$**

L'exposant  $a$  semble décroître quand  $Q_m/Q_{uc}$  augmente (Figure 14). Nous avons noté la même tendance en examinant la variation de  $a$  avec  $Q_{max}/Q_{uc}$ , cela pourrait traduire l'effet de la mobilisation progressive de l'effort de pointe. De même que pour le coefficient  $k$ , les valeurs issues des essais en centrifugeuse sont moins dispersées que les essais Loon-Plage.

La meilleure corrélation est obtenue en fonction du rapport  $Q_m/Q_{uc}$  avec une fonction logarithmique de la forme suivante :

$$a = -0.13 \log\left(\frac{Q_m}{Q_{uc}}\right) + 0.15 \quad [3]$$

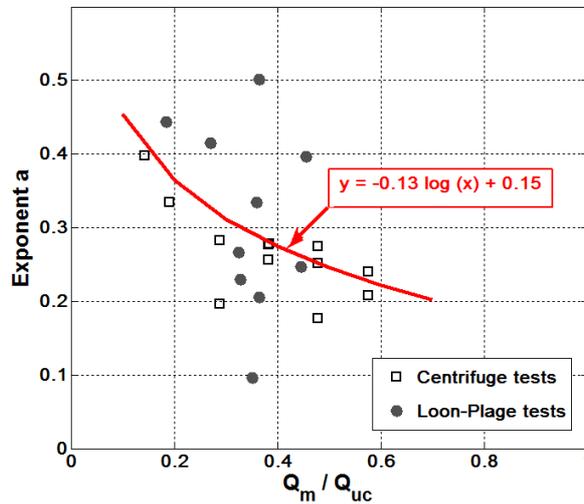


Figure 14 : Evolution de l'exposant a en fonction de  $Q_m/Q_{uc}$

- **Généralisation**

En intégrant les équations [2] et [3] dans l'équation [1], nous obtenons l'expression suivante du déplacement cyclique normalisé :

$$\frac{z_n}{z_1} = 2.7 \frac{Q_c}{Q_{uc}} n^{-0.13 \log\left(\frac{Q_m}{Q_{uc}}\right) + 0.15} \quad n > 1 \quad [4]$$

Cette expression a été établie pour un pieu foré dans un sable dense soumis à un chargement cyclique en compression sur la base de 21 essais cycliques. Elle tient compte des paramètres suivants :

- l'amplitude cyclique  $Q_c$
- la charge moyenne  $Q_m$ , de
- la charge ultime en compression  $Q_{uc}$
- le nombre de cycles avec  $n > 1$  (et pour  $n=1$   $z_n/z_1=1$ ).

On se propose dans la suite de valider cette expression [4] en comparant les courbes expérimentales aux courbes obtenues par le calcul.

#### **2.3.4. Calcul à rebours**

La Figure 15 présente la comparaison des résultats mesurés et calculés pour les essais sur modèles réduits. Globalement, on observe une bonne concordance des évolutions du déplacement cyclique normalisé en fonction du nombre de cycles. En revanche, deux essais (C06-T04 et C06-T08)-caractérisés par un rapport  $Q_c/Q_{uc}$  faible (de l'ordre de 0.09) - montrent que le calcul donne un déplacement cyclique normalisé légèrement sous-estimé (un écart de 30%) mais qui simule assez bien son évolution avec les cycles. Physiquement, la valeur de  $z_n/z_1$  est strictement supérieure à 1, mais l'expression établie (équation [4]) donne des valeurs faibles si le rapport  $Q_c/Q_{uc}$  est lui-même faible. L'examen des essais supplémentaires avec différents ratios  $Q_c/Q_{uc}$  faibles permettrait de définir le domaine de validité de l'expression [4] en ce qui concerne les valeurs de  $Q_c/Q_{uc}$ . A ce stade d'étude, il faut rajouter la condition suivante :

$$Q_c/Q_{uc} > 0.09$$

La Figure 16 présente la comparaison des résultats mesurés et calculés pour les essais de Loon-Plage. Trois essais sur dix présentent une bonne concordance des évolutions du déplacement cyclique normalisé en fonction du nombre de cycles. Les sept autres essais montrent des écarts – parfois importants - entre le déplacement cyclique normalisé mesuré et calculé. En effet, l'expression établie ne simule pas correctement l'évolution rapide du déplacement cyclique. Benzaria et al. (2013) soulignent que pour certains essais de chargement à Loon-Plage, il a été impératif d'arrêter prématurément les essais de chargement à cause d'une évolution rapide vers la rupture au bout de quelques cycles. Les raisons de ce comportement ne sont pas clairement établies à ce stade.

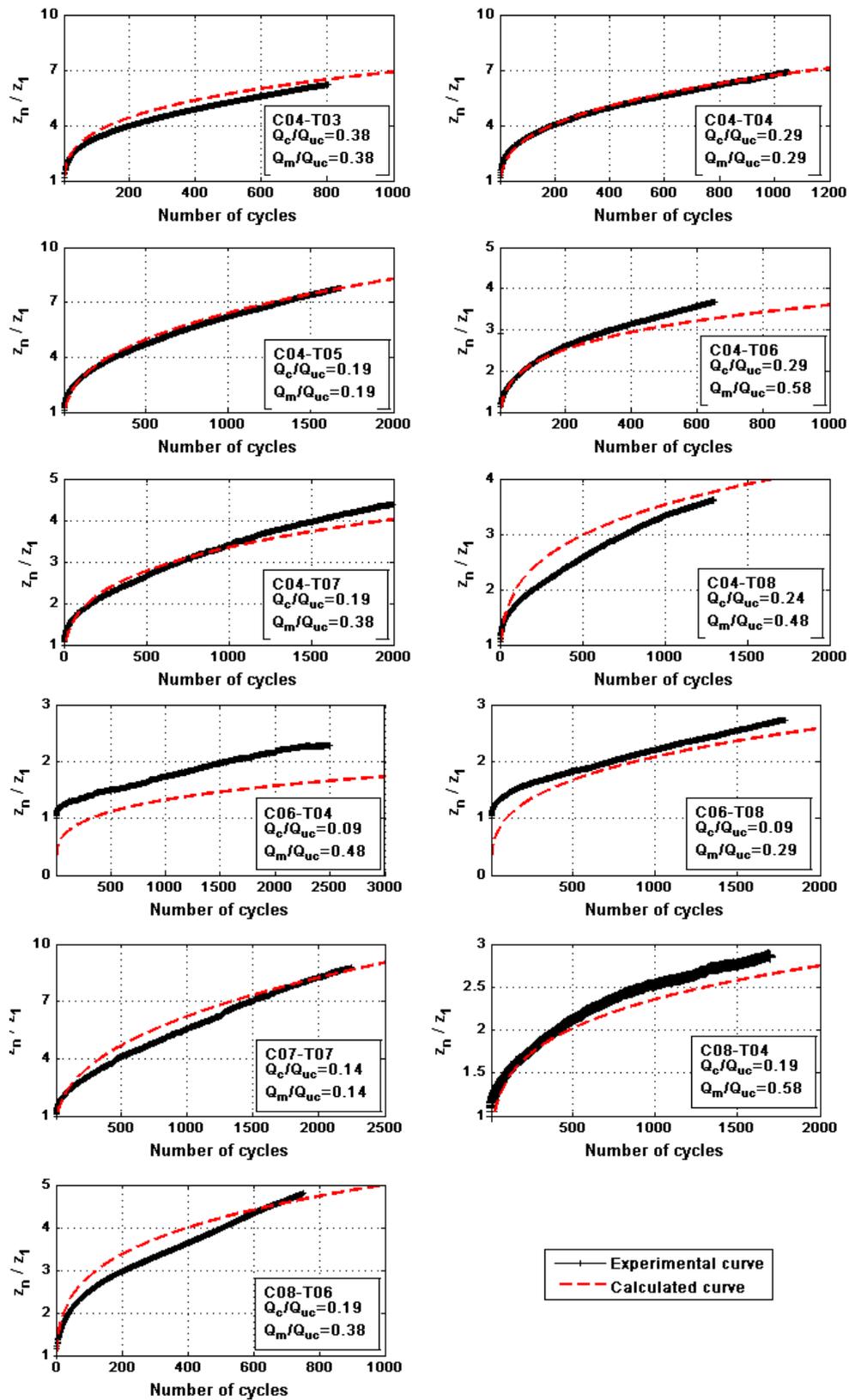


Figure 15 : Calcul à rebours des essais sur modèles réduits centrifugés

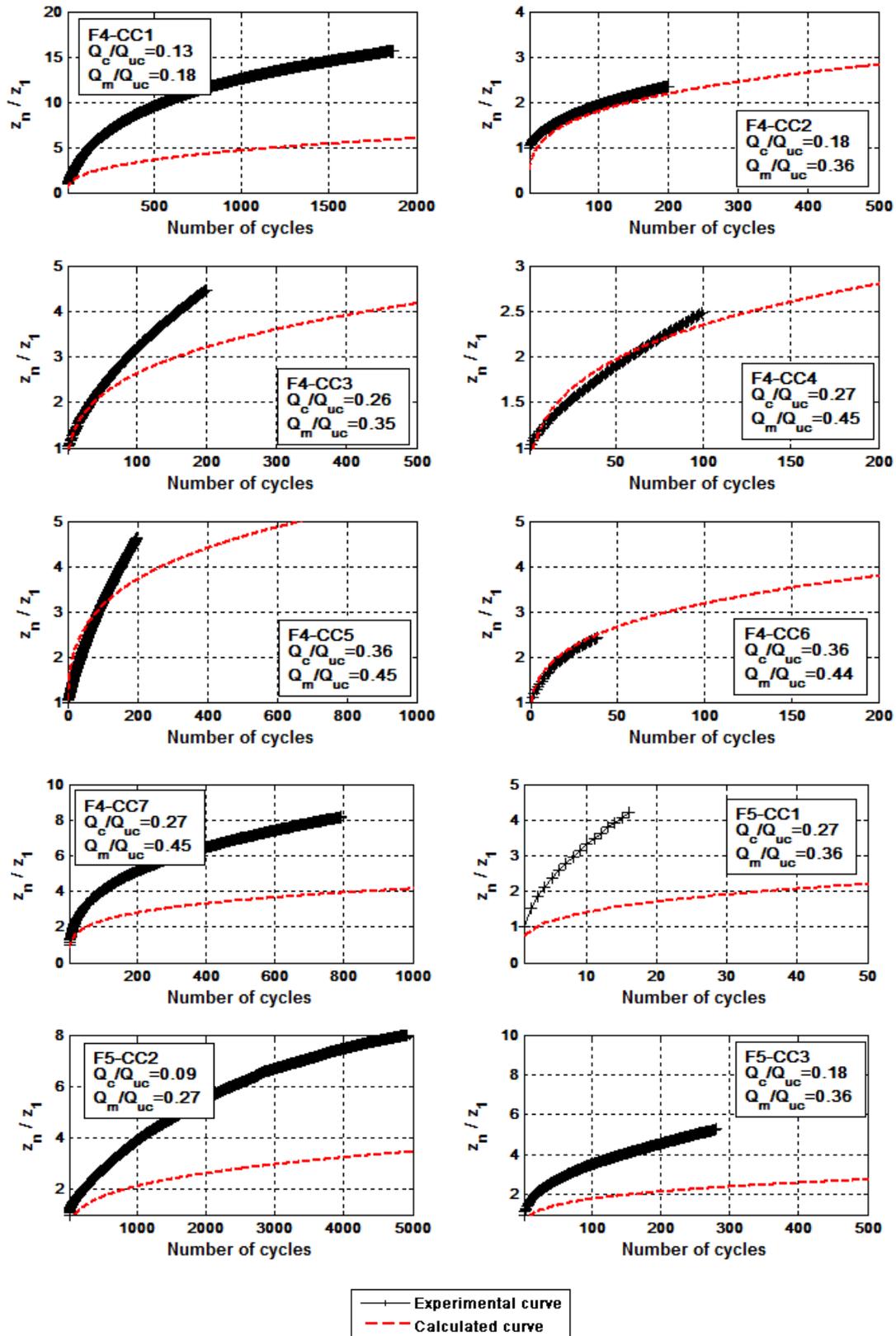


Figure 16 : Calcul à rebours des essais Loon-Plage

## 2.4. Conclusions

L'ensemble des résultats expérimentaux des essais en grandeur réelle à Loon-Plage et des essais sur modèles réduits centrifugés a été analysé dans cette partie. Nous nous sommes intéressés à la méthode globale qui s'intéresse à la réponse d'ensemble du pieu et à la prévision de l'effet des cycles sur le déplacement en tête du pieu. Le cas d'un pieu foré dans un sable dense et sous une charge cyclique en compression a été étudié.

Les courbes  $z_n/z_1=f(n)$  ont été ajustées pour proposer une expression permettant le calcul du déplacement cyclique en fonction de l'amplitude cyclique  $Q_c$ , de la charge moyenne  $Q_m$ , de la charge ultime en compression  $Q_{uc}$  et du nombre de cycles avec  $n$ . Un calcul à rebours a permis la validation de cette expression pour des cas de chargements cycliques caractérisés par un ratio  $Q_c/Q_{uc}$  strictement supérieur à 0.09 et sur la base des essais sur modèles réduits centrifugés.

Il serait intéressant d'analyser les données issues des essais des pieux en tension, où la résistance de la pointe ne jouera aucun rôle. Dans ce cas, l'effet des cycles est lié directement au frottement latéral le long du pieu.

## **3. METHODE LOCALE – CAS D’UN PIEU BATTU DANS UN SABLE DENSE SOUMIS A UNE CHARGE AXIALE EN TENSION**

### **3.1. Introduction**

Nous nous intéressons dans cette partie à la méthode des courbes locales de transfert du frottement dites courbes t-z. Pour un chargement statique, les normes actuelles – comme les normes américaines API RP2GEO 2011 et les normes françaises NF P 94-262 – proposent des méthodes pour construire les courbes de transfert. En revanche rien n’est mentionné pour l’obtention de courbes de transfert sous chargement cyclique axial. Des logiciels de calcul, comme SCARP, permettent de simuler les phénomènes de dégradation cyclique à l’interface sol-pieu. Cette simulation se fait par le biais d’algorithmes qui nécessitent un calage sur des données expérimentales bien documentées et de qualité. L’objectif des travaux présentés dans la suite est de calibrer SCARP pour le cas d’un **pieu battu soumis à une charge cyclique en traction dans un sable dense**.

Les résultats des essais de Loon-Plage, réalisés dans le cadre du projet SOLCYP, sont modélisés. Les données de la campagne d’essais réalisés antérieurement par l’Imperial College - dans le cadre du projet GOBAL - sur le site voisin de Dunkerque ont été aussi exploités (Jardine et Standing, 2000 et Rimoy et al. 2013). On rappelle que les deux sites présentent des caractéristiques géotechniques très similaires.

Le rapport s’articule comme suit :

- Rappel des données expérimentales de Dunkerque (GOPAL) et Loon-Plage (SOLCYP)
- Présentation du logiciel SCARP
- Calages du logiciel SCARP en statique
- Calage des paramètres de dégradation du frottement par l’approche Matlock et Foo
- Calage des paramètres de l’expression empirique utilisée par SCARP pour le calcul de l’accumulation des déplacements cycliques.

### **3.2. Données expérimentales**

#### **3.2.1. *Projet de recherche GOPAL***

Dans le cadre du projet de recherche GOPAL, une série d’essais de chargements cycliques sur des pieux a été effectuée par Jardine et Standing.

### 3.2.1.1. Situation géographique du site:

Le site se situe à Dunkerque (Nord de la France) près de la mer, entre la zone du quai pétrolier du Port Autonome du Dunkerque (PAD) et un dépôt de stockage de pétrole.

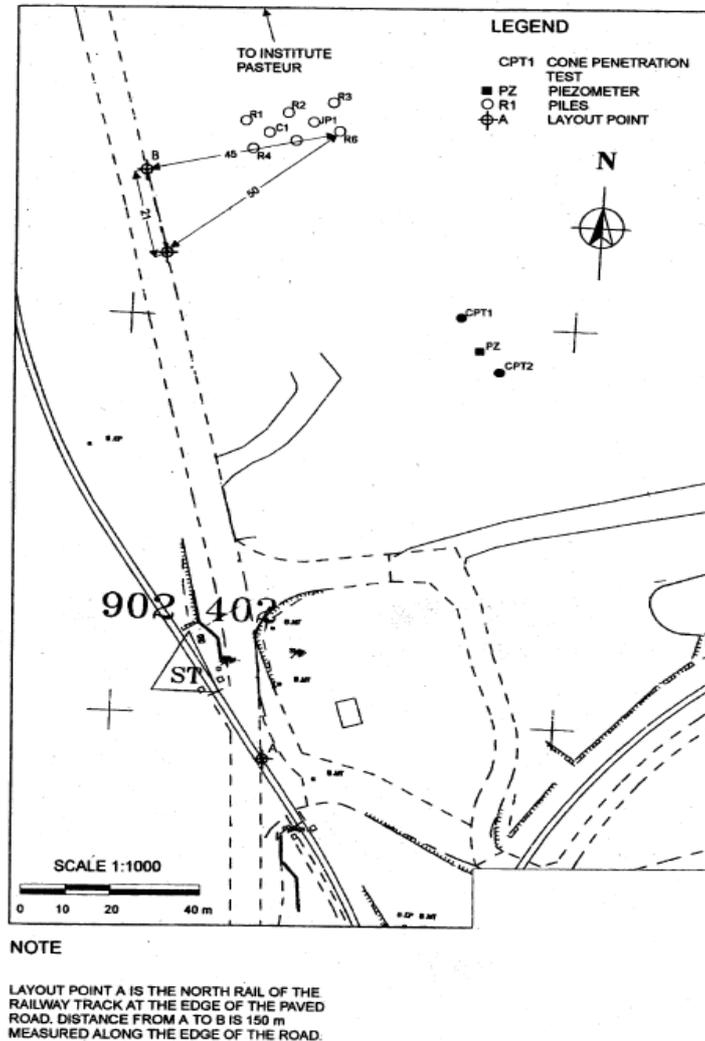


Figure 17 : le site expérimental de Dunkerque (Jardine et Standing, 2000)

### 3.2.1.2. Caractéristiques du sol :

#### 3.2.1.2.1. Géologie du site:

La stratigraphie du site est résumée par un profil typique de CPT (Figure 18) La première couche jusqu'à 3 m de profondeur est un remblai hydraulique placé entre 1972 et 1975 pour élever le niveau

de la terre locale d'environ 3 mètres. Entre 3 et 30 mètre de profondeur, on rencontre un sable marin déposé au cours de trois transgressions marines locales qui ont eu lieu entre 2100 et 900 années avant J.C. En dessous de 30 mètres apparaît la formation d'argile des Flandres (connue aussi par les noms de « London Clay » et « Yprésian Clay ». La nappe phréatique se situe à 4 mètres de profondeur.

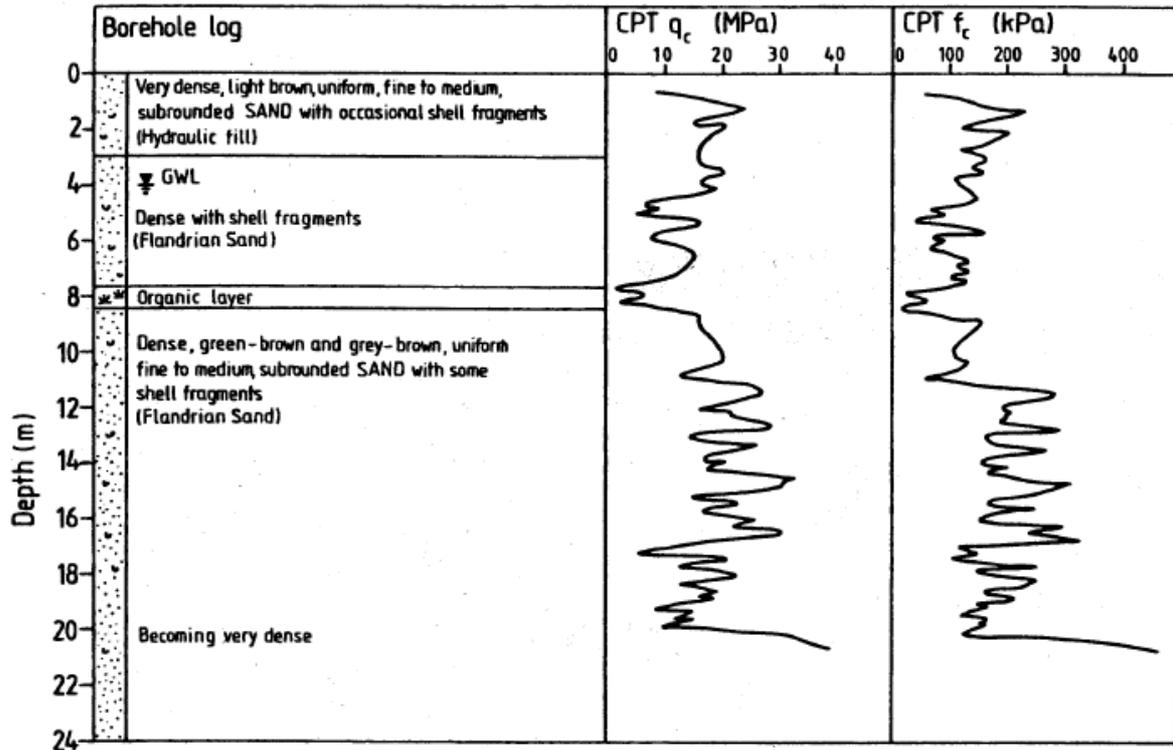


Figure 18 : un profil cpt typique de site de Dunkerque (Jardine et Standing, 2000)

### 3.2.1.2.2. Propriétés géotechniques

#### a. Identification du sol

Dans le cadre de ce programme de recherche, une série d'essais d'identification sur la couche de sable et le remblai hydraulique a été effectué. Les deux couches sont des sables fin à moyen ( $D_{50} = 0,25$  mm) avec une densité relative de 100% dans la couche de remblai hydraulique et 75% dans la couche de sable. Le poids volumique est  $17.1 \text{ KN/m}^3$  en dessus de la nappe phréatique et  $19.9 \text{ KN/m}^3$  en dessous de la nappe.

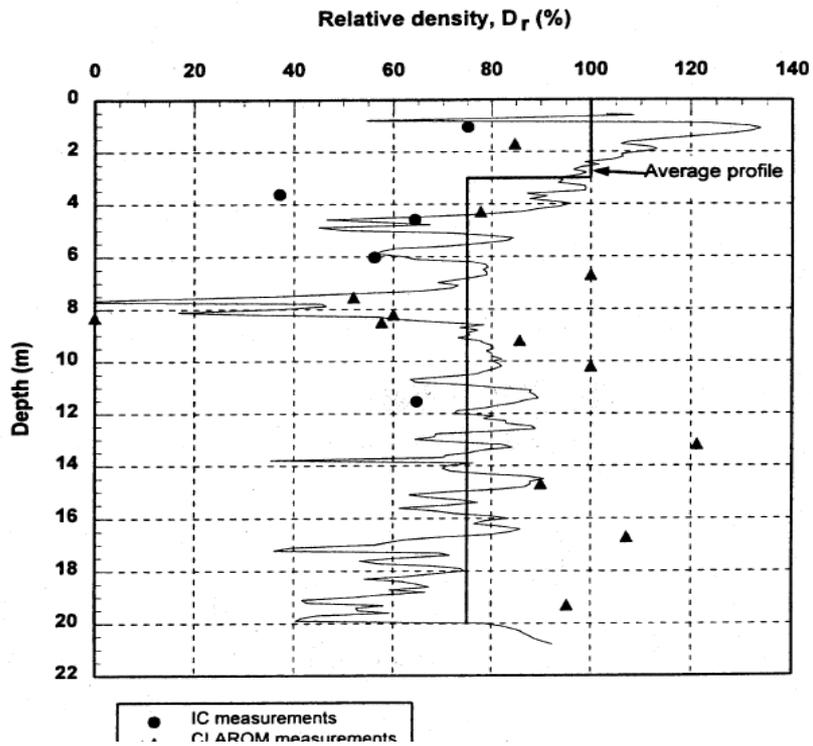


Figure 19 : La densité relative du sable à Dunkerque (Jardine et Standing , 2000)

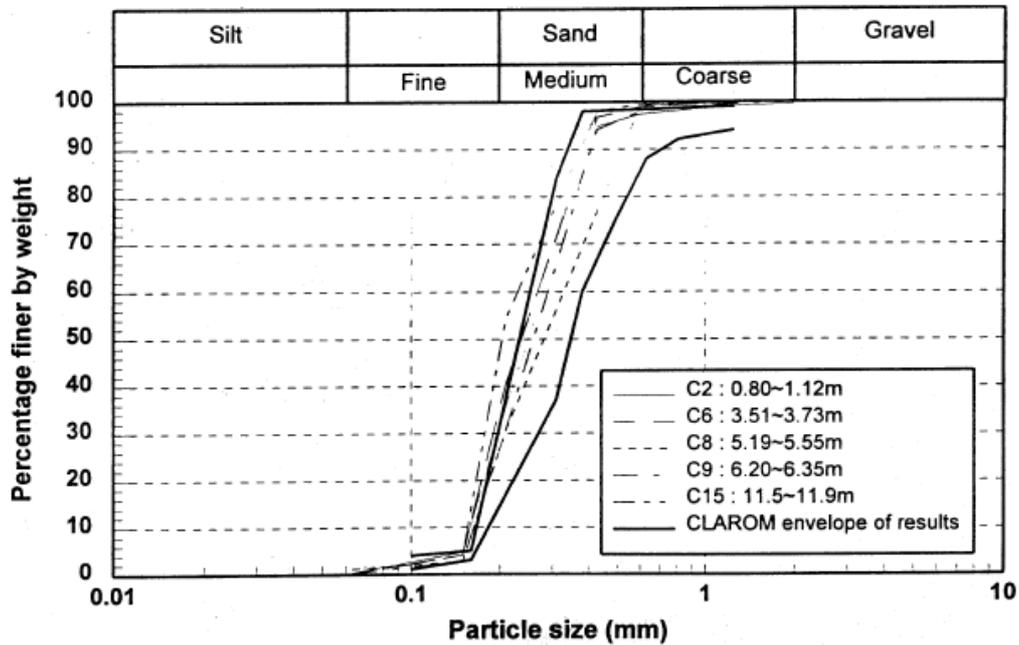


Figure 20 : distributions granulométrique du sable de Dunkerque (Jardine et Standing , 2000)

*b. Résistance mécanique:*

Kuwano (1996) a effectué des essais d'interface sur le sable de Dunkerque à la boîte de cisaillement. Les échantillons ont montré un angle de frottement interne  $\phi' = 31^\circ$  et un angle de frottement d'interface sol acier  $\delta' = 27^\circ$ .

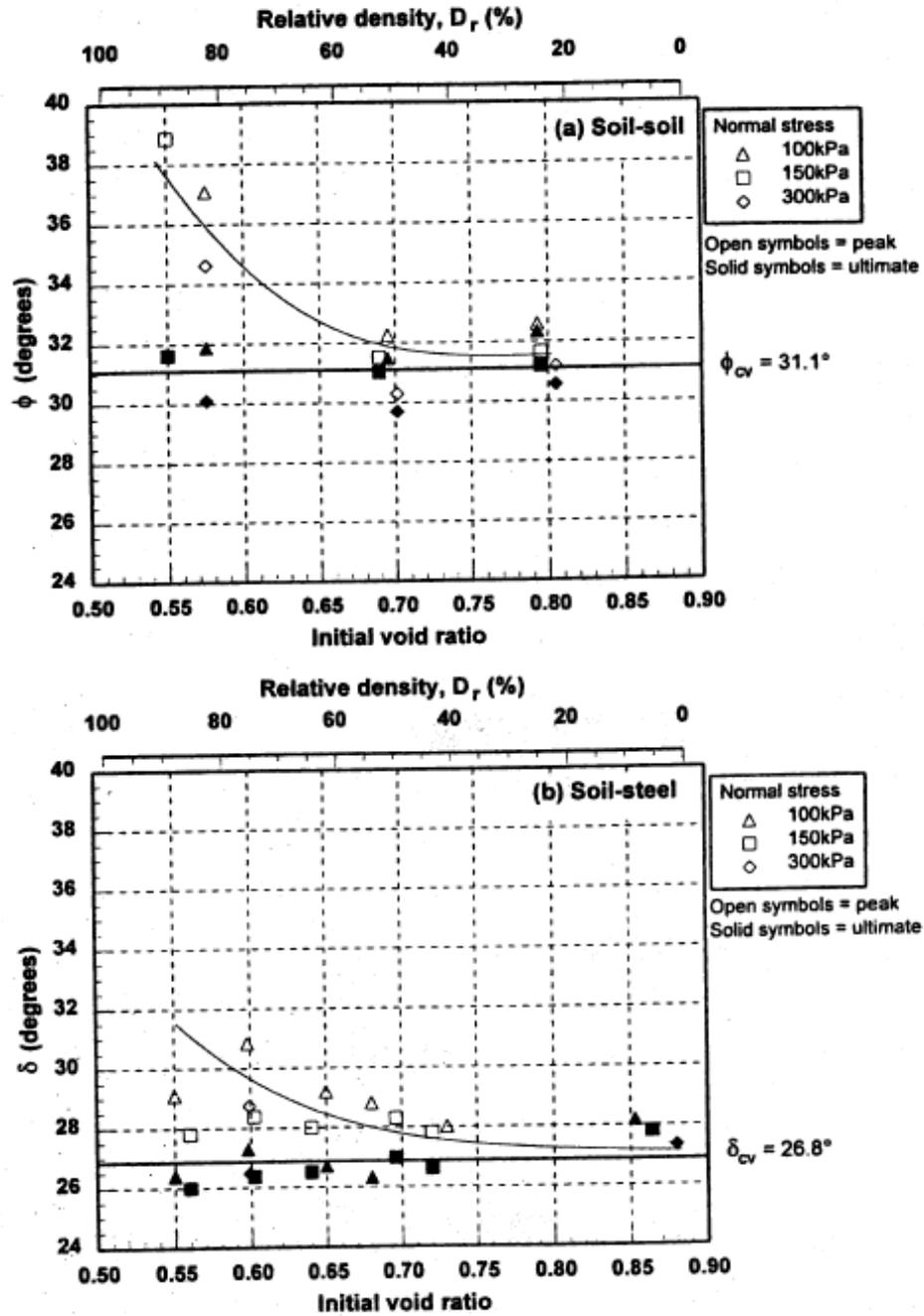


Figure 21 : Résultats des essais à la boîte de cisaillement : angle de frottement interne de sol et angle d'interface (Jardine et Standing, 2000)

### 3.2.1.3. Caractéristiques des pieux :

Le programme d'essais comporte 8 pieux dont 2 pieux forés et 6 pieux battus. Les pieux battus ont été utilisés dans un premier temps comme des pieux de réactions pour charger en compression les deux pieux forés. Ensuite, ces pieux ont été soumis à différents chargements statiques et cycliques.

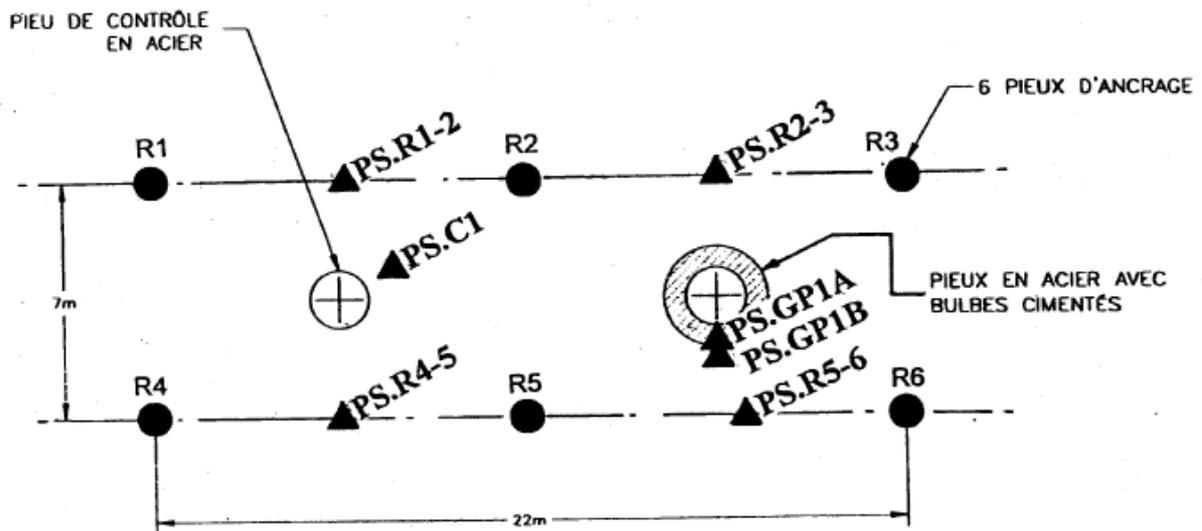


Figure 22 : implantation des pieux (Jardine et Standing, 2000)

On s'intéresse dans notre étude au cas des 6 pieux métalliques battus de forme tubulaire, ouverts à la base. Leurs caractéristiques géométriques sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 4 : caractéristiques géométriques des pieux battus considérés

Caractéristique \ pieu	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Longueur (m)	19.32	18.85	19.24	19.37	19.05	18.9
Epaisseur (mm)	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
Diamètre extérieur (mm)	457	457	457	457	457	457

### **3.2.2. Projet de recherche SOLCYP**

#### 3.2.2.1 Situation géographique du site:

Le site retenu pour le projet est situé en bordure de la commune de Loon-Plage dans le nord de la France. Ce site a déjà été utilisé comme site expérimental pour de nombreuses recherches sur les pieux. Il est situé à seulement quelques kilomètres du site du Port Autonome utilisé pour le GOPAL.



**Figure 23 : le site expérimental (Benzaria, 2012)**

#### 3.2.2.2 Caractéristiques du sol :

##### 3.2.2.2.1. Géologie du site :

La succession stratigraphique peut être schématisée comme suit :

- Formations du Quaternaire : dépôts marins constitués par des sables grossiers jaunâtres très coquilliers, passant vers le bas à des sables verdâtres coquilliers.
- Formations du Tertiaire : l'Yprésien représenté par une argile plastique ou finement sableuse, grise à gris verdâtre ou gris bleuté (Argile des Flandres).

La couche de sable des Flandres entre 4 et 12 mètres est très similaire du point de vue granulométrie et résistance mécanique à celle des sables du site de Dunkerque

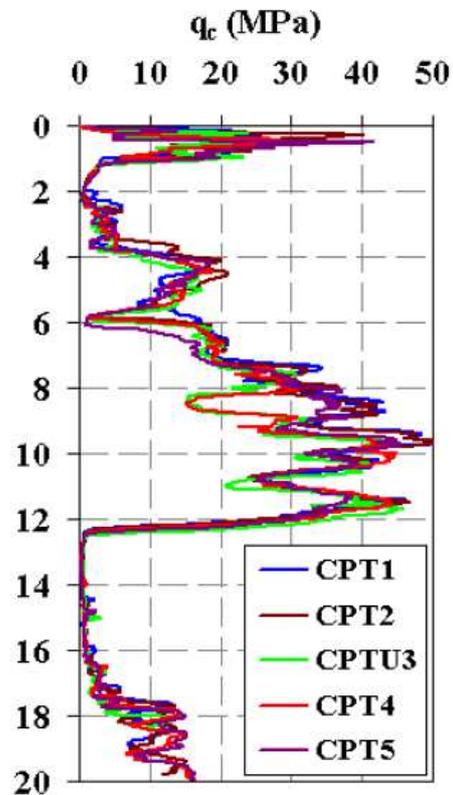
Cependant on a trouvé les différences suivantes par rapport au site de GOPAL :

- Une première couche de remblai de 60 cm
- Une couche argileuse entre 0,6 et 2,2 m
- Une couche argileuse entre 11,5 et 16,5 m

Le tableau suivant résume la stratigraphie du terrain :

Profondeur (m)	Description
0,0 – 0,6 m	Vestiges d'un ancien remblai : briques, béton dans Sable verdâtre
0,6 – 2,2 m	Argile légèrement sableuse gris-vert foncé.
2,2 – 11,5 m	Sable gris très fin.
11,5 –16,5 m	Argile molle olive-gris foncé légèrement sableuse
16,5– 18 m	Sable fin gris légèrement argileux

**Tableau 5 : Stratigraphie dans la zone des pieux SOLCYP**



**Figure 24 : profils CPT du site de Loon-Plage (Benzaria, 2012)**

### 3.2.2.2.2. Propriétés géotechniques

#### a. Identification des sols

Le sable est un sable siliceux très fin ( $D_{50} = 0,15$  mm) avec coefficient de courbure CC moyen de 1,95 et un coefficient d'uniformité CU égal à 0,98, ce qui classe le sol en sable propre mal gradué selon l'USCS.

L'interprétation des CPT par la méthode de Jamiolkowski et al. (2003) conduit à un indice de densité  $I_D$  compris entre 0,7 et 0,9 (sable dense à très dense).

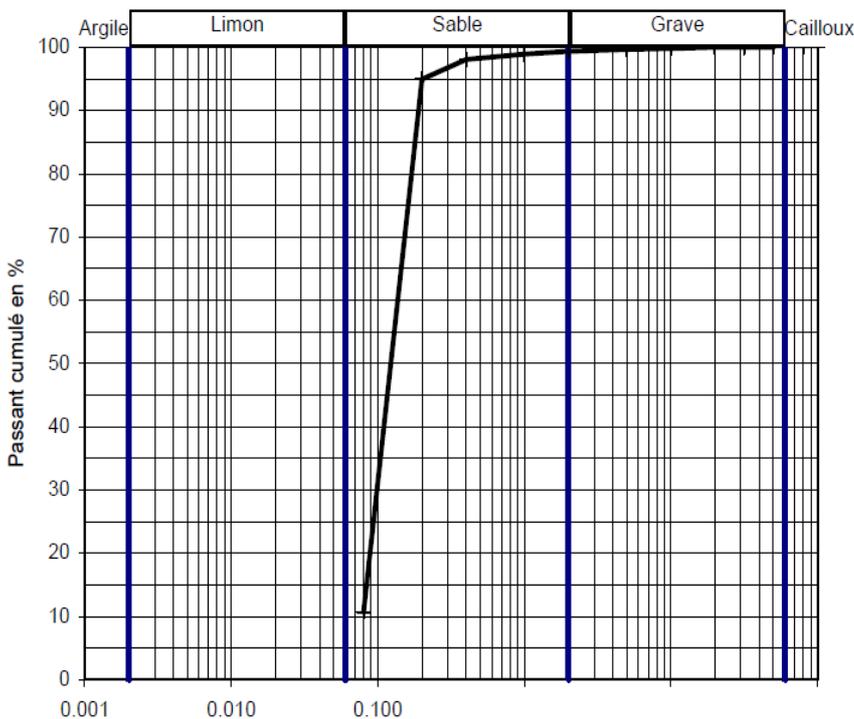


Figure 25 : distributions granulométrique du sable de Dunkerque (Benzaria, 2012)

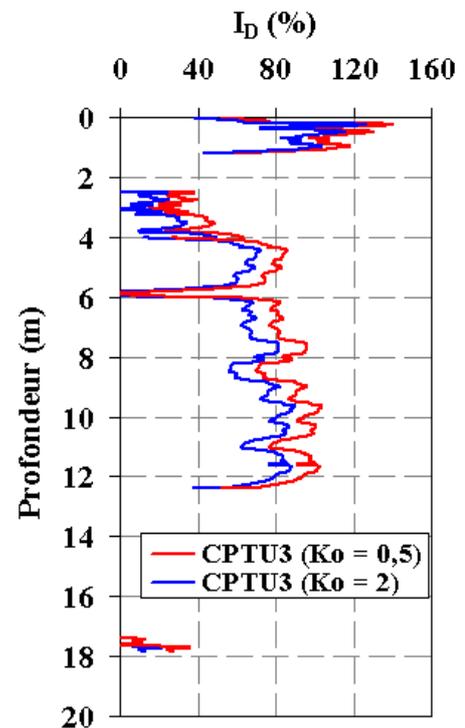


Figure 26 : indice de densité (Benzaria, 2012)

#### b. Résistance mécanique

L'angle de frottement interne du sable et l'angle de l'interface sable acier sont supposés les mêmes que ceux obtenus par Kuwano (1996) dans le cadre de programme de recherche GOPAL,  $\varphi' = 31^\circ$  et  $\delta' = 27^\circ$ . Des essais spécifiques sont en cours.

Les résultats des essais de Kuwano (1996) sont présentés plus haut (page 26).

### 3.2.2.3. Caractéristiques des pieux :

À Loon-Plage, deux types de pieux ont été testés :

- 5 pieux forés réalisés à la tarière creuse de diamètre  $D = 420$  mm (deux pieux de longueur de fiche  $L=8$  m destinés aux essais en compression et trois pieux de longueur de fiche  $L=10,5$  m destinés aux essais en traction). Ces pieux sont désignés par la lettre F.
- 2 pieux battus de type tube métallique fermé à la base de longueur totale  $L=13$  et de diamètre  $D = 406$  mm et d'épaisseur  $e = 14$  mm. Ces pieux sont désignés par la lettre B.

On s'intéresse dans ce rapport au seul pieu battu B2. L'étude des autres pieux sera complétée ultérieurement.

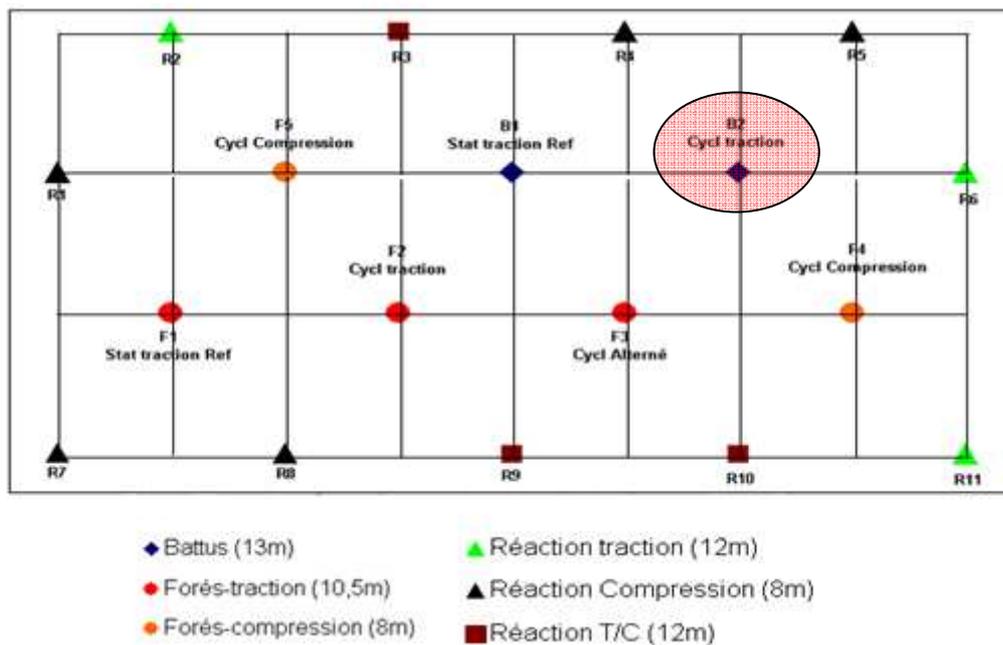


Figure 27 : implantation des pieux à Loon-Plage (Benzaria, 2012)

### 3.3. Programme numérique SCARP

#### 3.3.1. Présentation du programme

SCARP est un développement des programmes AXCYC et TAPCYC. Le programme a été mis au point par Poulos (1989) à l'Université de Sydney afin de calculer la réponse d'un pieu ou d'un groupe de pieux sous chargements statiques et/ou cycliques. Ce logiciel s'appuie sur la notion de continuum qui est une approche continue des éléments de bord simplifiée 1D en considérant le sol ayant un comportement élastique. Le pieu est divisé en nombre d'éléments de longueurs égales. À l'interface pieu/sol de chaque élément un modèle d'interface avec le choix de radoucissement élasto-plastique gouverne le comportement.

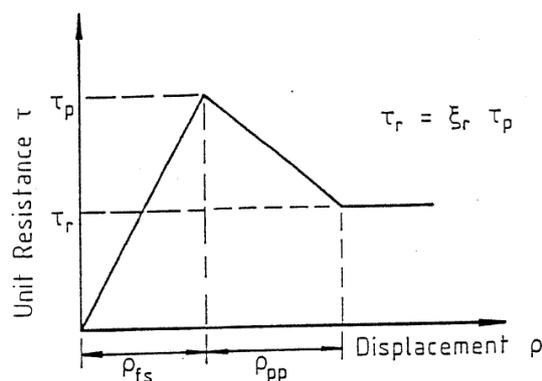


Figure 28 : modèle d'interface (Poulos, 1989)

#### 3.3.2. Calcul statique

Pour obtenir la solution (les valeurs du frottement, de l'effort de pointe et du déplacement du pieu), il est nécessaire d'avoir les expressions du déplacement vertical du pieu et du sol dans chaque élément. Le déplacement d'un élément du pieu est égal au déplacement en pointe augmenté du déplacement dû à la compressibilité du pieu. Le déplacement du sol adjacent est obtenu par intégration des équations de Mindlin. Ensuite SCARP impose deux conditions : i) compatibilité de déplacement (déplacement d'un élément de pieu = déplacement du sol adjacent) et ii) condition d'équilibre vertical (somme de frottement multiplié par la surface de chaque élément = l'effort appliqué en tête). En résolvant ces équations on obtient les valeurs du frottement, de l'effort de pointe et du déplacement du pieu.

#### 3.3.3. Calcul Cyclique

##### 3.3.3.1. Dégradation cyclique

Pour le calcul de la réponse cyclique, SCARP considère l'influence du chargement cyclique sur le frottement latéral, la résistance en pointe et le module de sol. Il peut également tenir compte des

effets de la vitesse de chargement sur ces propriétés. Pour quantifier les effets cycliques SCARP introduit le concept de « facteur de dégradation D ».

$$D = \frac{\text{propriété après le chargement cyclique}}{\text{propriété après le chargement statique}} \quad [5]$$

SCARP utilise deux approches différentes pour déterminer les facteurs de dégradation.

- **Approche de Matlock**

Un facteur de dégradation  $D\tau$  est appliqué sur le frottement de pic d'un élément si le frottement dans cet élément est mobilisé à 100% (partie plastique dans le modèle d'interface). En plus du frottement de pic, l'utilisateur spécifie un facteur  $\lambda$  qui gouverne la vitesse de dégradation et un paramètre  $D_{\min}$  comme une asymptote (dégradation minimale).

$$D\tau = (1-\lambda) (D' - D_{\min}) + D_{\min} \quad [6]$$

Avec

$D\tau$  : valeur actuelle du facteur de dégradation pour le frottement

$D'$  : valeur du cycle précédent du facteur de dégradation pour le frottement

$D_{\min}$  : valeur minimale du facteur de dégradation

$\lambda$  : paramètre taux de dégradation

Cette expression s'applique de manière similaire pour les facteurs de dégradation de la résistance en pointe  $D_b$  et le module de sol  $D_\epsilon$ .

- **Approche de déplacement cyclique**

Dans ce modèle la dégradation de frottement dépend du déplacement cyclique du pieu. SCARP permet trois hypothèses concernant la fonction du déplacement cyclique qui gouvernent dégradation :

- La dégradation dépend du déplacement cyclique normalisé (déplacement cyclique divisé par le diamètre de pieu ou une autre dimension de référence  $\rho_c/d$ )
- La dégradation dépend du déplacement cyclique de glissement  $\rho_{cs}$  (la différence entre l'amplitude de déplacement cyclique total et le déplacement nécessaire pour provoquer un glissement dans l'interface sol-pieu  $\rho_{cs}$ ) (Figure 28)
- La dégradation dépend du déplacement cyclique de glissement normalisé, en divisant  $\rho_{cs}$  par le diamètre de pieu ou une autre dimension de référence  $\rho_{cs}/d$ .

$$D\tau(N) = (1-\lambda) (D\tau(N-1) - D\tau(\infty)) + D\tau(\infty) \quad [7]$$

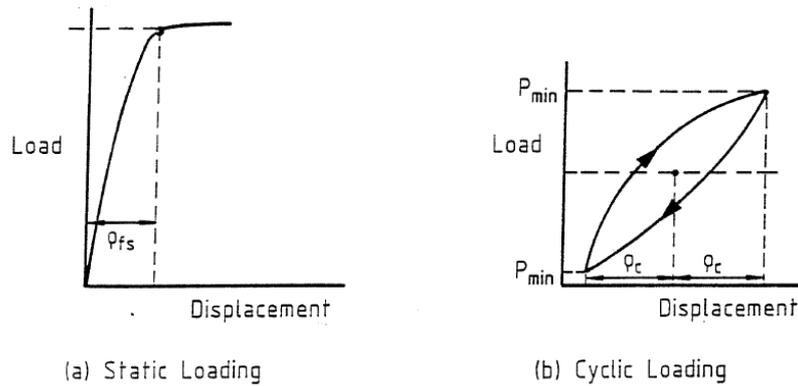
Avec

$D\tau$  : valeur actuelle du facteur de dégradation pour le frottement

$D'$  : valeur du cycle précédent du facteur de dégradation pour le frottement

$D_{\min}$  : valeur minimale du facteur de dégradation

$\lambda$  : paramètre taux de dégradation



**Figure 29 : définitions des déplacements (poulos, 1989)**

$\rho_{fs}$  : déplacement pour provoquer le glissement dans l'interface sol-pieu

$\rho_c$  : amplitude de déplacement cyclique

$\rho_{cs}$  :  $(\rho_c - \rho_{fs})$  déplacement cyclique de glissement

Pour la dégradation du module de sol, une expression similaire à celle proposé par Idriss et al (1978) à partir d'essais triaxiaux cycliques est adoptée. Le facteur de dégradation de module est donné par :

$$D_E = N^{-t} \quad [8]$$

Avec

N : nombre de cycles

t : paramètre de dégradation dépend d'une fonction de déplacement cyclique.

Pour les calculs par incréments on peut utiliser la formule suivante :

$$D_E = D'_E - 0.5 D'_E^{(1+t)/t} \quad [9]$$

$D'_E$  : Facteur de dégradation de module de sol dans le cycle précédent.

### 3.3.3.2. Accumulation des déplacements cycliques :

Les déplacements permanents dans SCARP sont calculés à partir d'une expression empirique basée sur le travail de Diyaljee et de Raymond et donnée par :

$$S_p = B N^m e^{nX} \quad [10]$$

Avec

B : déplacement permanent généré par le premier cycle d'un faible niveau de chargement ;

N : nombre de cycles ;

$m, n$  : paramètres déterminés expérimentalement.  
 $X$  : niveau de chargement correspondant au ratio  $Q_{max}/Q_u$

Lorsque le pieu est soumis à une succession de combinaisons de chargements cycliques, un nombre de cycles équivalent d'un niveau de chargement actuel est déterminé pour prendre en compte tous les cycles des chargements précédents :

$$N_{ke} = \sum_{j=1}^k N_j e^{\alpha(N_j - N_{k+1})} \quad [11]$$

Avec

$N_j$  : nombre de cycles de la combinaison  $j$  ;  
 $X_j$  : niveau de chargement de la combinaison  $j$  ;  
 $X_{k+1}$  : niveau de chargement de la combinaison  $k+1$  ;  
 $\alpha = n/m$  : ratio des paramètres déterminés expérimentalement.

Pour les calculs par incréments on peut utiliser la formule suivante :

$$\Delta S_p = S_p N (m \Delta N / N_{ke}) \quad [12]$$

$\Delta S_p$  : incrément en déplacement permanent entre les cycles  $N_{ke}$  et  $N_{ke} + \Delta N$   
 $S_p N$  : déplacement permanent dans le cycle  $N_{ke}$ .

$$X_j = \frac{P_{0j} + 0.5 P_{sj}}{P_u} \quad [13]$$

$P_{0,j}$  : La charge moyenne de  $j$   
 $P_{c,j}$  : Chargement cyclique de  $j$   
 $P_u$  : Pic de capacité statique

### 3.3.3.3. Procédure de l'analyse numérique

La réponse d'un pieu après  $N$  cycles d'un chargement uniforme d'une valeur maximale de  $P_{max}$  et une valeur minimale de  $P_{min}$  peut être analysée comme suit :

- 1- On commence par les valeurs statiques  $E_s$ ,  $\tau_a$  et  $P_{bu}$  obtenues sous un chargement  $P_{max}$ .
- 2- Ensuite, le chargement diminue à  $P_{min}$  et l'analyse se répète. Enfin, le chargement revient « au zéro » complétant le premier cycle de chargement.
- 3- Pour le modèle de dégradation de déplacement cyclique, le déplacement cyclique dans chaque élément et les facteurs de dégradation  $D_\tau$ ,  $D_b$  et  $D_E$  sont calculés par les équations :

$$D_\tau(N) = (1-\lambda) (D_\tau(N-1) - D_\tau(\infty)) + D_\tau(\infty) \quad [7]$$

$$D_E = N^{-t} \quad [8]$$

$$D_E = D'_E - 0.5 D'_E (1+t)/t \quad [9]$$

Pour le modèle de Matlock et Foo  $D_\tau$ ,  $D_b$  et  $D_E$  sont calculés par l'équation

$$(D\tau = (1-\lambda) (D' - D_{min}) + D_{min}) \quad [6]$$

si le frottement de pic dans un élément est mobilisé, sinon les paramètres ne changent pas pour le cycle suivant.

- 4- L'incrément de déplacement permanent est calculé par l'équation

$$S_p = \mathbf{B} \mathbf{N} \mathbf{m} \mathbf{e} \mathbf{n} \mathbf{X}$$

[10]

- 5- Les valeurs de  $E_s$ ,  $\tau_a$  et  $P_{bu}$  pour le cycle suivant sont déterminées en multipliant les valeurs statiques par leur facteurs de dégradation appropriés. Après, on applique le chargement suivant comme dans les étapes 1 et 2. La procédure est répétée jusqu'à ce que les N cycles soient simulés.

### 3.4. Procédure d'analyse

La procédure d'analyse se compose de trois étapes principales :

- 1- construction du modèle numérique (Input SCARP)
- 2 - calage du modèle en statique
- 3- calage des paramètres cycliques (approche Matlock et Foo)

L'approche de dégradation du déplacement cyclique sera faite ultérieurement. Une comparaison entre les deux approches de dégradation est prévue.

Dans cette étude on s'est essentiellement intéressé aux pieux qui n'ont pas été menés à la rupture (statique ou cyclique) avant l'application de la séquence cyclique considérée. Idéalement, pour éliminer l'effet d'interaction entre plusieurs phénomènes, il serait souhaitable de ne considérer que les résultats inhérents à des pieux vierges de tout chargement antérieur et testés après un même laps de temps après leur installation. Cette option n'est pas possible en pratique, la réalisation des essais s'échelonnant sur plusieurs mois et certains pieux servant de réaction lors d'essais de chargement de pieux voisins.

Les effets potentiels liés au vieillissement et aux chargements antérieurs de faible intensité ont été pris en compte en considérant la capacité pré-cyclique du pieu testé telle que définie par Jardine et Standing et reportée dans le Tableau 3.

#### 3.4.1. Construction de modèle numérique (Input SCARP)

Dans cette étape on prépare le fichier Input SCARP qui contient les paramètres suivants :

Paramètres du pieu :

- Longueur de fiche du pieu (m)
- Diamètre extérieur (m)
- Module d'élasticité équivalent (MPa)
- La section nette (m<sup>2</sup>)

Discrétisation :

- Le nombre sur lequel on divise le modèle (pieu + sol)

Paramètres du sol :

- Le coefficient de poisson
- Le module d'élasticité de chaque élément (Mpa)
- Le frottement de pic et résiduel de chaque élément (MPa) ainsi que la distance entre le déplacement local qui mobilise le frottement au pic et celui qui correspond au frottement résiduel pour chaque élément (m) (Figure 28 : modèle d'interface)
- La profondeur de substratum (m) ainsi que son module d'élasticité (MPa)
- 

Sollicitation:

- Force (MN) (force imposé)
- Déplacement (m) (déplacement imposé)

Dans cette étape deux paramètres principaux sont calculés (méthode cpt):

- Le frottement : calculé par la méthode ICP
- Le module d'élasticité de sol calculé par les formules de Lunne et al. (1997).

### **3.4.2. Calage du modèle en statique :**

Dans cette étape on cale le modèle construit sur les essais statiques disponibles, le paramètre à caler étant principalement le module d'élasticité de sol. Toutefois, on peut être amené à ajuster le frottement calculé (souvent dans le sens d'une majoration) tout en gardant la même distribution de frottement que celle obtenue par la méthode ICP. Le calage du frottement est obtenu lorsque la capacité du pieu calculée est égale à celle de la capacité prè-cyclique de référence.

### **3.4.3. Calage des paramètres cycliques.**

Dans cette étape on cale les paramètres de dégradation de frottement et les paramètres d'accumulation de déplacement cyclique.

#### **3.4.3.1. Paramètres de modèle de dégradation Matlock et Foo**

L'objectif de ce calage est de chercher le modèle de dégradation (paramètres  $\lambda$  et  $D_{min}$ ) qui donne en numérique un nombre de cycles à la rupture le plus proche possible de celui observé expérimentalement.

### 3.4.3.2. Paramètres d'accumulation de déplacement cyclique

L'objectif de ce calage est de trouver les paramètres du déplacement cyclique (m et n) qui permettent d'obtenir un déplacement cyclique le plus proche possible de celui obtenu par l'essai expérimental.

## **3.5. Etude numerique**

### **3.5.1. Etude des pieux de projet GOLAP**

Dans ce programme les noms des essais sont désignés comme suit :

Nombre de série, Dénomination du pieu ; Type de chargement + numéro de la séquence

Exemple : 2.R1.T1

2 : série de l'essai (1 : réaction de chargement des pieux forés, période de septembre/octobre 1998, 2 : chargement direct sur le pieu dans la période de octobre-novembre 1998, 3 : chargement direct sur le pieu dans la période d'avril 1999)

R1 : dénomination du pieu (R1, R2, R3, R4, R5, R6)

T1 : type de chargement et numéro de la séquence (T : traction, C : cyclique)

Les essais sur pieux vierges étudiés sont :

- 2.R3.CY2

- 2.R4.CY2

- 2.R5.CY2

On a également considéré les deux essais suivants :

- 3.R6.CY6

- 3.R4.CY6

Ces essais ont été préalablement conduits à la rupture mais le dernier essai à la rupture date d'au moins 150 jours avant la séquence cyclique étudiée (contre 1 et 2 jours dans les autres cas). Il est apparu que les résultats des chargements statiques et cycliques sur ces pieux montraient un comportement similaire à celui des pieux vierges (comme si le vieillissement avait effacé l'effet des chargements antérieurs).

#### 3.5.1.1. Calage en statique

On a choisi l'essai statique 2.R6.T1 comme essai de référence en statique, car c'est le seul essai statique sur un pieu vierge. Le calage du module d'élasticité du sol se fait par rapport à la courbe expérimentale effort déplacement de l'essai 2.R6.T1.

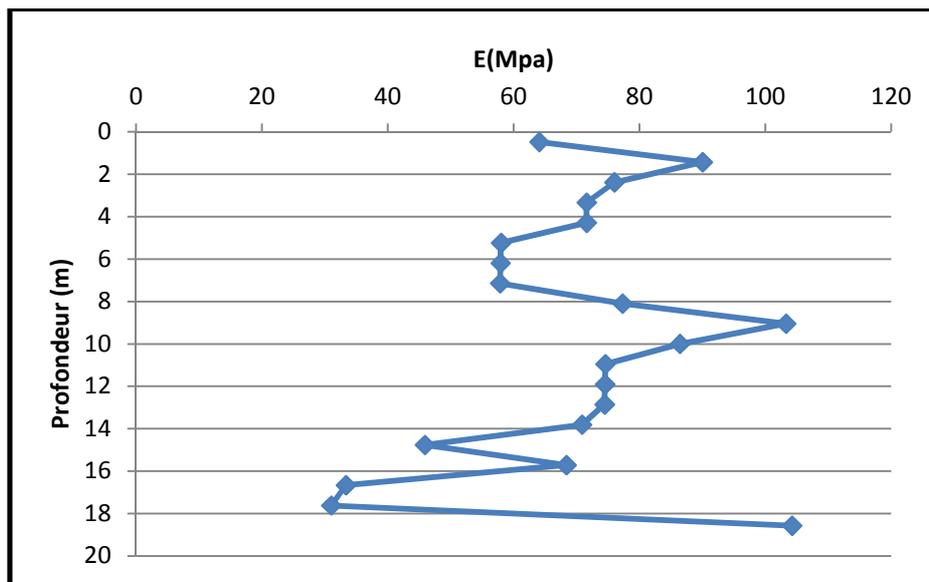
Le calage du frottement calculé a consisté à retrouver une capacité statique égale à celle mesurée ou estimée par Imperial College avant l'essai cyclique.

essais	Capacité pré-cyclique en traction estimée ou mesurée (KN)
2.R3.CY2	2317
2.R4.CY2	2963
2.R5.CY2	2464
3.R6.CY6	2110
3.R4.CY6	1650

**Tableau 6 : Capacité pré-cyclique en traction estimée ou mesurée par l'IC**

La capacité statique en traction des pieux est différente d'un essai à un autre pour les raisons suivantes :

- Histoire de chargement différent
- Age du pieu lors de l'essai différent
- Comportement légèrement différent lors des essais lents et rapides



**Figure 30 : Profil du module d'élasticité calé site Dunkerque.**

Le module d'élasticité du sol tel que calculé par les formules de Robertson (qui correspond à une déformation de 1‰) est ensuite calé en divisant par 1.25.

- Exemple de calage de R3 (2.R3.CY2) :

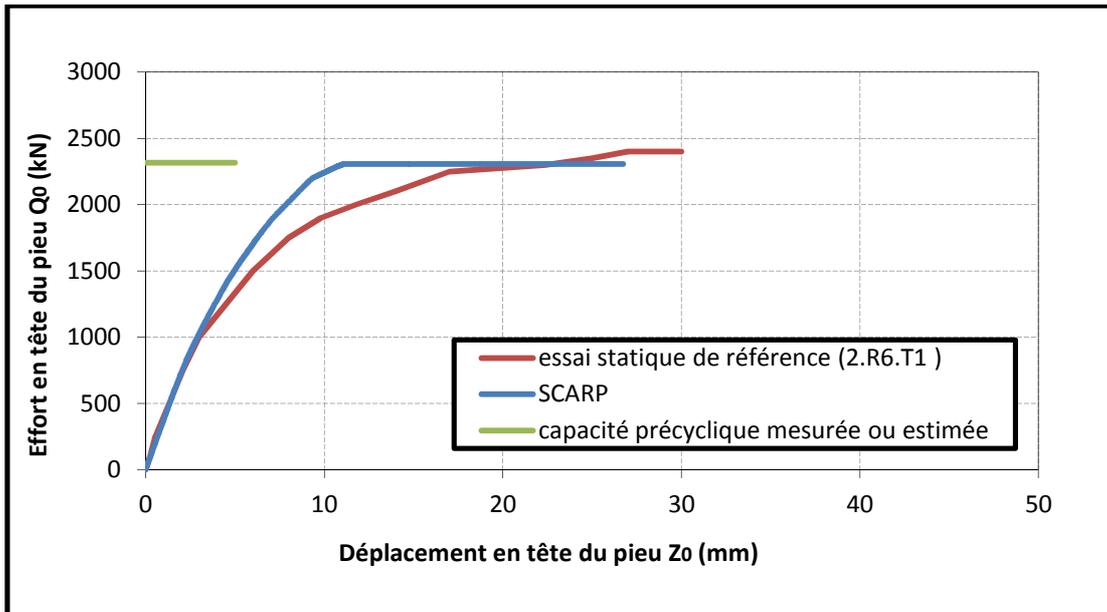


Figure 31 : calage en statique 2.R3.CY2

Exemple de calage de R6 (pré-cyclique 3.R4.CY6):

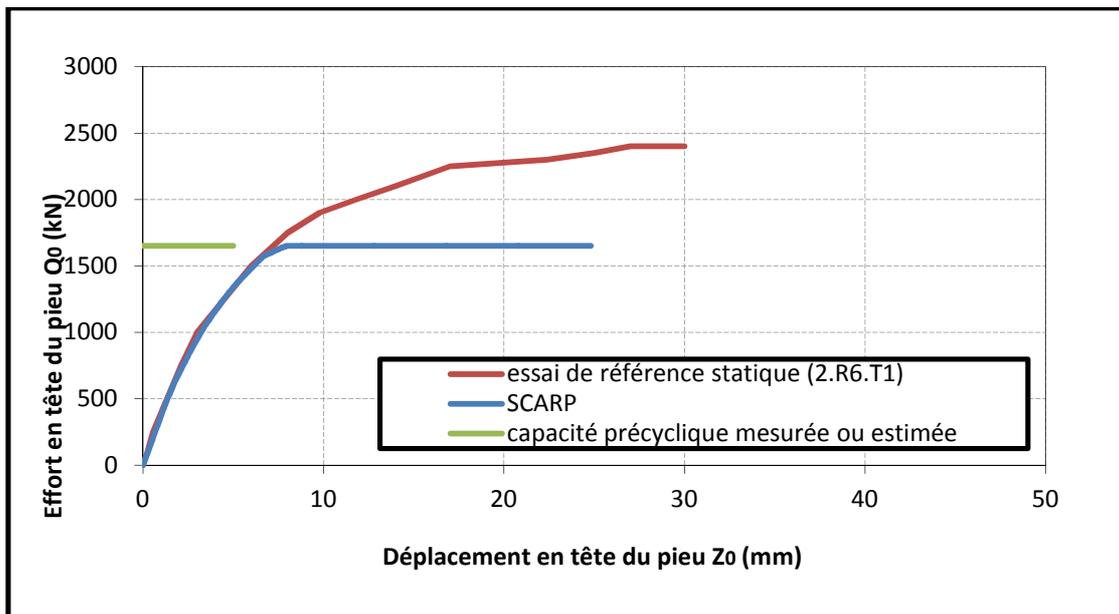


Figure 32 : calage en statique 3.R4.CY6

Dans ce calage, le frottement est ajusté tout en gardant la même distribution de frottement que celle obtenue par la méthode ICP. Le calage du frottement est fait pour que la capacité du pieu calculée est égale à celle de la capacité prè-cyclique de référence (niveau désigné en vert).

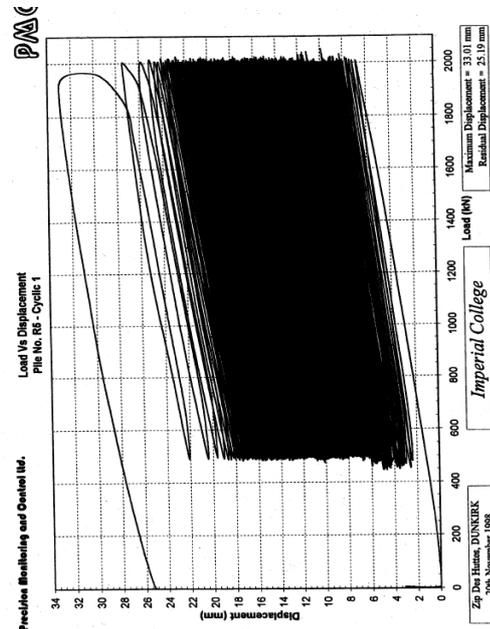
3.5.1.2. Calage des paramètres cycliques de l'approche Matlock et Foo.

On a d'abord procédé au calage des paramètres  $\lambda$  et  $D_{min}$  sur les essais cycliques qui sont allés jusqu'à la rupture. On a ensuite appliqué le modèle de dégradation obtenu aux autres essais.

- Essais 2.R5.CY2 :

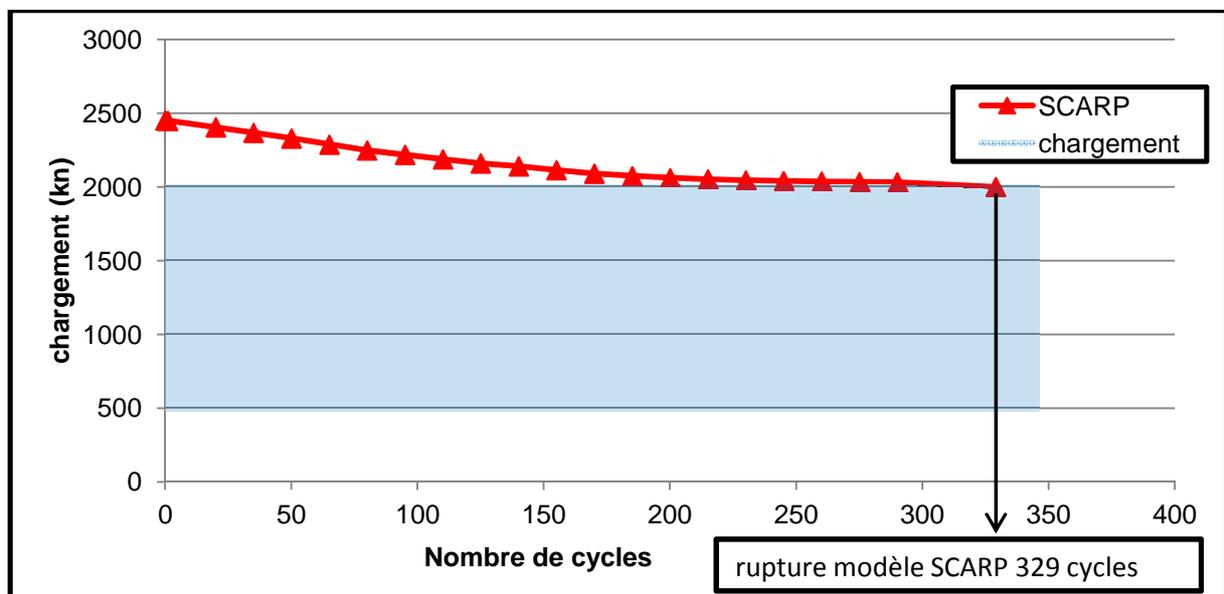
Capacité et chargement	Valeur
Capacité pré-cyclique $V_u$	2464 KN
Charge moyenne $V_m$	1250 KN
Amplitude de charge $V_c$	750 KN
$V_m/V_u$	0.3
$V_c/V_u$	0.51

**Tableau 7 Données de capacité et chargement pour l'essai 2.R5.CY2**



**Figure 33 : essai 2.R5.CY2 (Jardine et Standing, 2000)**

- Modèle de dégradation appliqué :  $\lambda = 0.02$ ,  $D_{min} = 0.2$



**Figure 34 : Capacité du pieu (SCARP) en fonction des cycles**

On voit sur la Figure 34

Figure 35 : essai 3.R6.CY2 la dégradation de la capacité du pieu en fonction des cycles, calculée par SCARP. Quand la capacité dégradée atteint le niveau le chargement cyclique maximum, la rupture se produit (définition de la rupture cyclique dans SCARP). On voit que le modèle de dégradation choisi, donne des résultats très satisfaisants : une rupture après 329 cycles obtenue par SCARP contre une rupture expérimentale observée après 345 cycles.

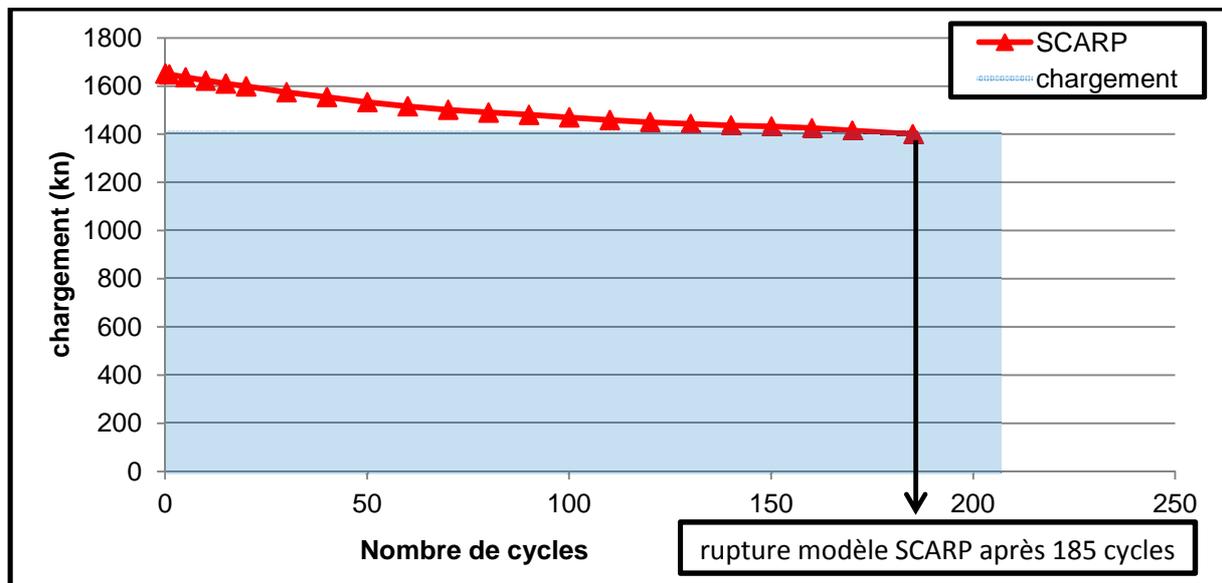
- Essais 3.R6.CY2 :

Capacité et chargement	Valeur
Capacité pré-cyclique $V_u$	1650 KN
La charge moyenne $V_m$	700 KN
Amplitude de charge $V_c$	700 KN
$V_m/V_u$	0.42
$V_c/V_u$	0.42

**Tableau 8 Données de capacité et chargement pour l'essai 3.R6.CY2**

**Figure 35 : essai 3.R6.CY2 (Jardine et Standing, 2000)**

- Modèle de dégradation appliqué :  $\lambda = 0.02$ ,  $D_{\min} = 0.4$



**Figure 36 : capacité du pieu (SCARP) en fonction des cycles**

On voit sur la Figure 36 que le modèle de dégradation choisi donne une rupture après 185 cycles, à comparer aux 206 cycles ayant causé la rupture lors de l'essai expérimental. Le modèle de dégradation est peu différent de celui de l'essai 2.R5.CY2. Comme on peut le constater la Figure 37.

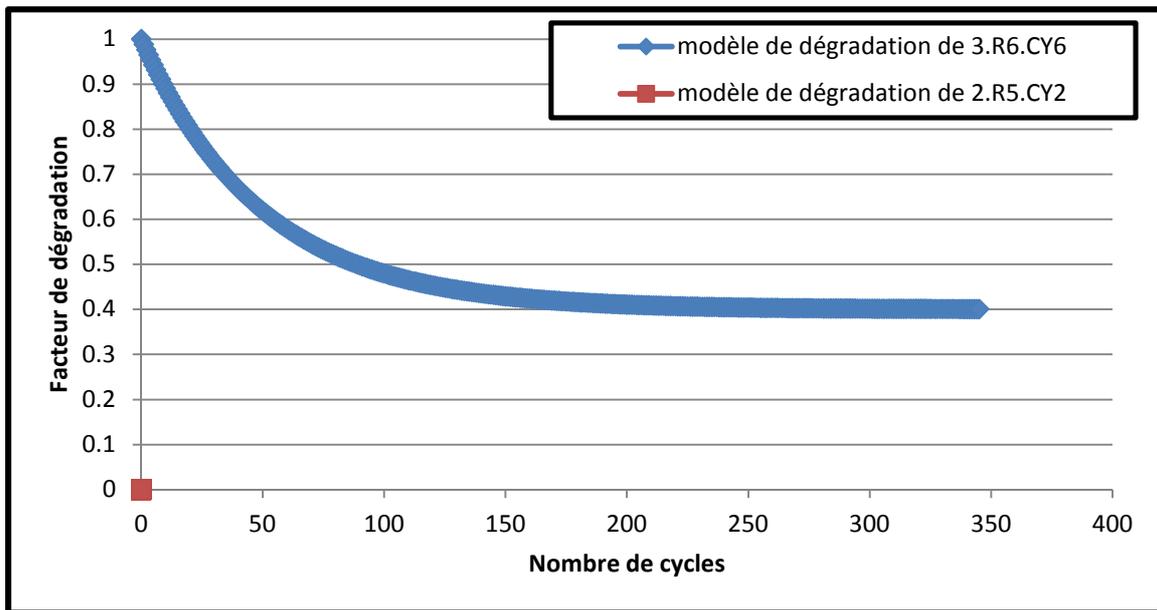


Figure 37 : modèles de dégradations calés

Le modèle le plus sévère ( $\lambda = 0.02$ ,  $D_{\min} = 0.2$ ) a été appliqué sur les essais qui ne sont pas allés jusqu'à la rupture.

- 2.R3.CY2:

Capacité et chargement	Valeur
Capacité pré-cyclique $V_u$	2317 KN
La charge moyenne $V_m$	700 KN
Amplitude de charge $V_c$	700 KN
$V_m/V_u$	0.3
$V_c/V_u$	0.3

Tableau 9 : Données de capacité et chargement pour l'essai 2.R3.CY2

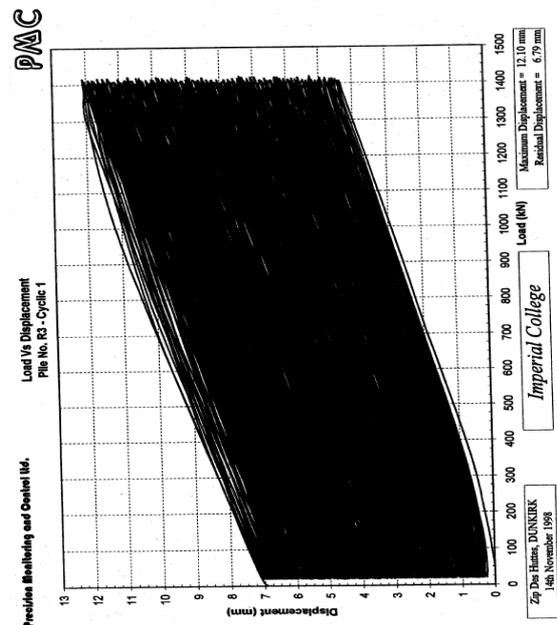


Figure 38 : essai 2.R3.CY2 (Jardine et Standing, 2000)

- Modèle de dégradation appliqué :  $\lambda = 0.02$ ,  $D_{\min} = 0.2$

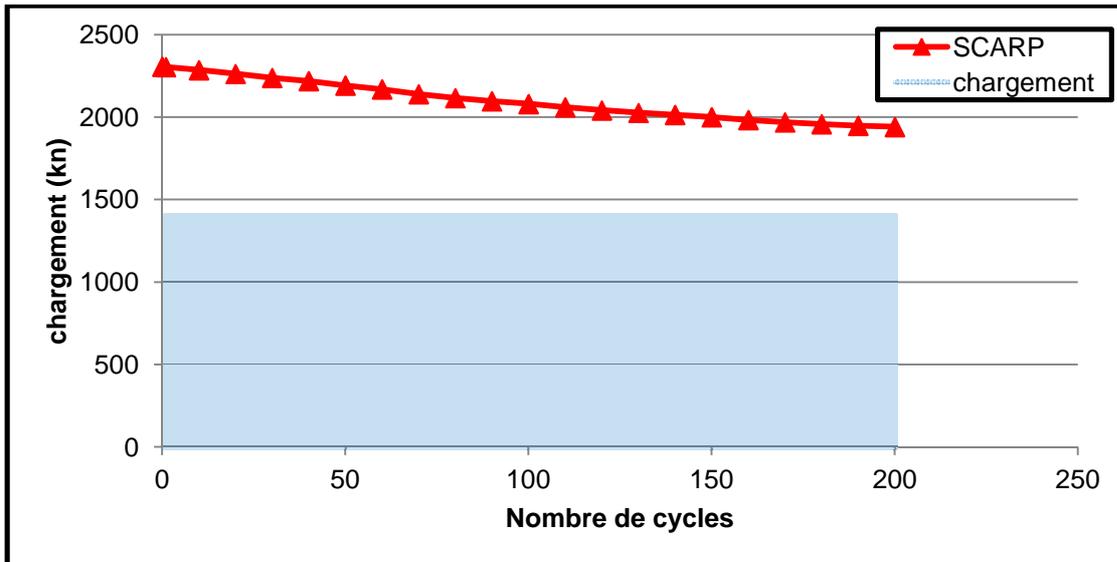


Figure 39 : capacité du pieu (SCARP) en fonction des cycles

On voit sur la Figure 40 la dégradation de la capacité en traction du pieu R3 en fonction des cycles calculée par SCARP (avec le modèle de dégradation de l'essai « 2.R5.CY2 »). Les résultats de SCARP montrent qu'il n'y a pas de rupture avec ce modèle ce qui est en accord avec les résultats expérimentaux. En poursuivant la simulation SCARP jusqu'à 30000 cycles on remarque que la capacité de pieu se stabiliserait vers 1850 K

- 2.R4.CY2 :

Capacité et chargement	Valeur
Capacité pré-cyclique $V_u$	2963 KN
La charge moyenne $V_m$	1000 KN
Amplitude de charge $V_c$	1000 KN
$V_m/V_u$	0.34
$V_c/V_u$	0.34

Tableau 10 : Données de capacité et chargement pour l'essai 2.R4.CY2

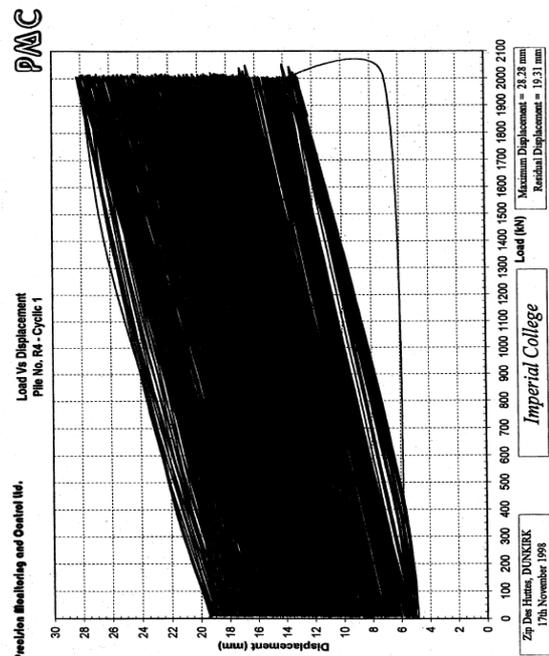


Figure 40 : essai 2.R4.CY2 (Jardine et Standing, 2000)

- Modèle de dégradation appliqué :  $\lambda = 0.02$ ,  $D_{\min} = 0.2$

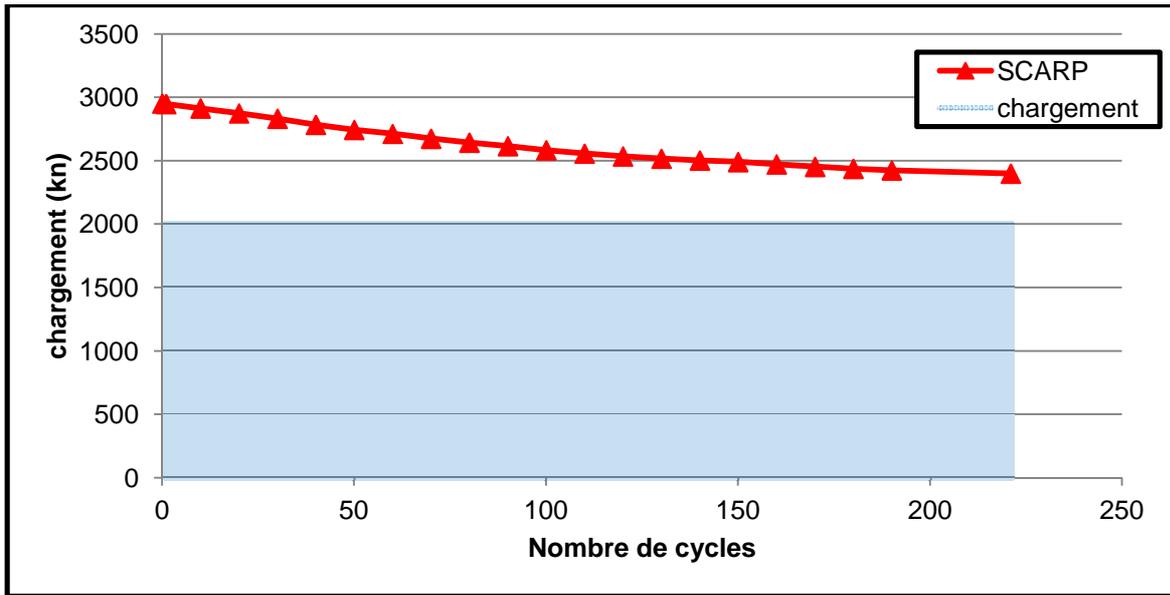


Figure 41 : Capacité du pieu (SCARP) en fonction des cycles

On voit sur la Figure 41 la dégradation de la capacité du pieu R4 en fonction des cycles, calculée par SCARP (avec le modèle de dégradation de l'essai « 2.R5.CY2 »). Les résultats de SCARP montrent qu'il n'y a pas de rupture jusqu'à 221 cycles ce qui est conforme aux résultats expérimentaux. En poussant la simulation SCARP jusqu'à 461 cycles on trouve que la capacité du pieu se dégraderait en dessous de la charge cyclique maximale provoquant une rupture à 461 cycles.

- 3.R4.CY6 :

Capacité et chargement	Valeur
Capacité pré-cyclique $V_u$	2110
La charge moyenne $V_m$	405 Kn
Amplitude de charge $V_c$	400 Kn
$V_m/V_u$	0.19
$V_c/V_u$	0.19

Tableau 11 : Données de capacité et chargement pour l'essai 3.R4.CY6

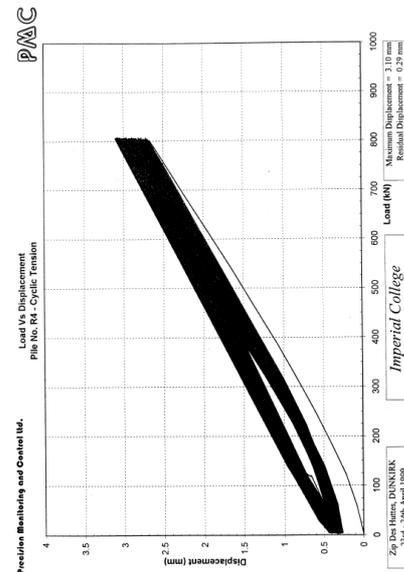


Figure 42 : essai 3.R4.CY6 (Jardine et Standing, 2000)

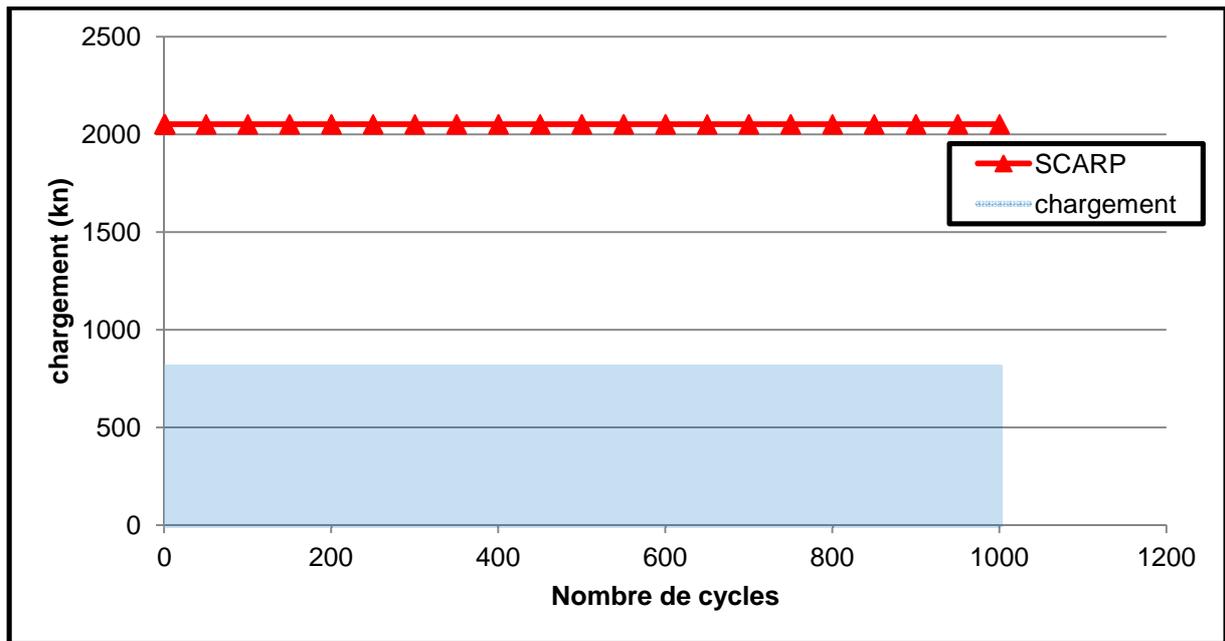


Figure 43 : capacité du pieu (SCARP) en fonction des cycles

On voit sur la Figure 43 la capacité du pieu ne se dégrade pas du tout (dans SCARP). Ce résultat s'explique par le fait que la charge cyclique maximale (805 KN) n'est pas capable de mobiliser le frottement à 100% y compris dans les éléments en surface L'accord avec les observations expérimentales est bon dans la mesure où le pieu R4 a montré un comportement très stable sous 1000 cycles lors de cet essai ( Figure 42 : essai 3.R4.CY6).

3.5.1.3. Calage des paramètres d'accumulation de déplacement cyclique:

Dans cette section, présente les calages des paramètres « m » et « n » d'accumulation de déplacement cyclique, utilisés par SCARP [équation  $S_p = B N m e n X$

[10]

[10]

- Essais 2.R5.CY2 : Les paramètres calés :  $m = 0.3$   $n = 7.6$

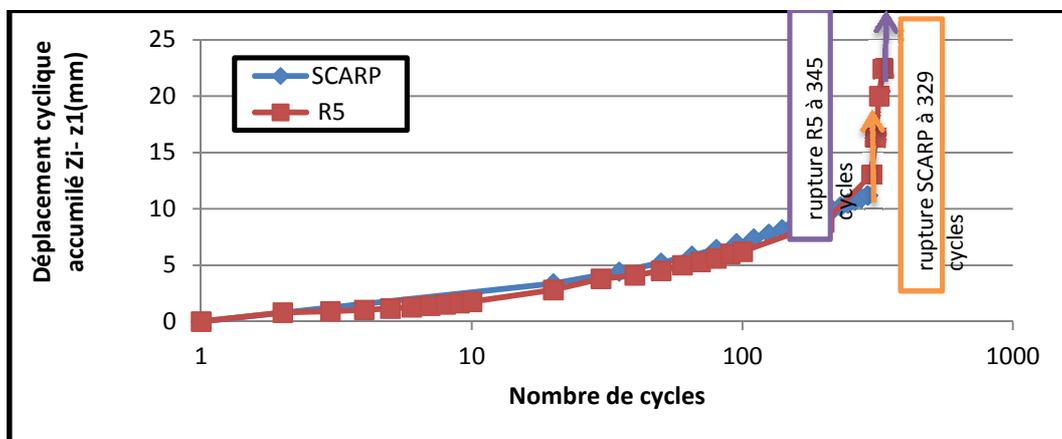


Figure 44: accumulation de déplacement cyclique  $z_n - z_1$  en fonction des cycles (2.R5.CY2)

On voit sur la Figure 44 que l'équation 6 avec les paramètres  $m = 0.3$   $n = 7.6$  reproduit convenablement l'évolution des déplacements cycliques observés (allure générale et valeurs finales)

- Essais 2.R3.CY2 : Les paramètres calés :  $m = 0.37$   $n = 7.6$ .

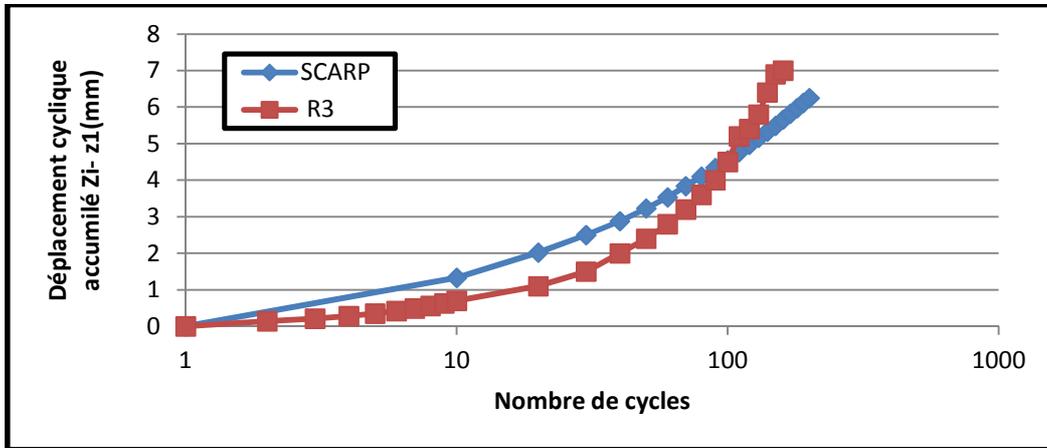


Figure 45 : accumulation de déplacement cyclique  $z_n - z_1$  en fonction des cycles (2.R3.CY2)

La Figure 45 montre que les paramètres choisis donnent bien l'ordre de grandeur de déplacement cyclique accumulé avec une allure satisfaisante.

- Essais 2.R4.CY2 : Les paramètres calés :  $m = 0.4$   $n = 7.6$ .

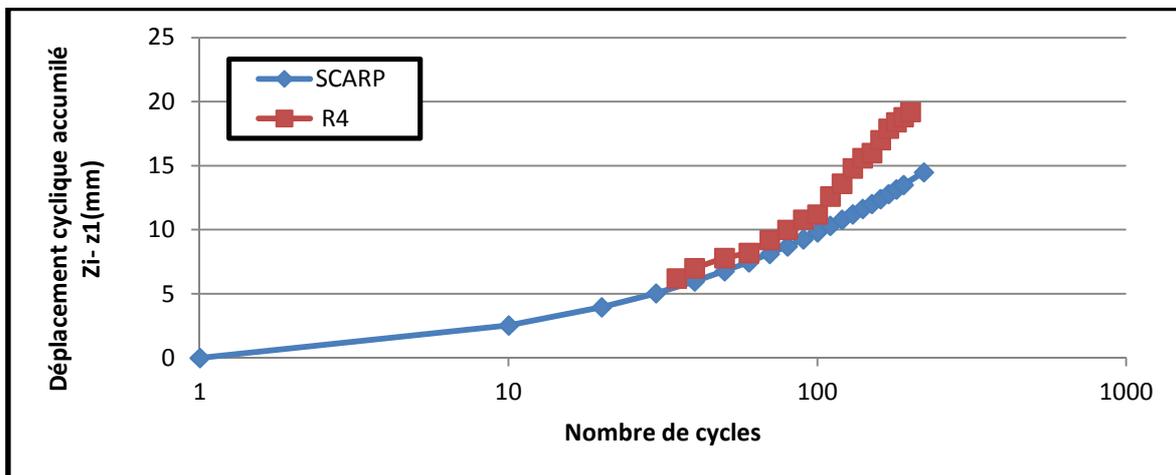
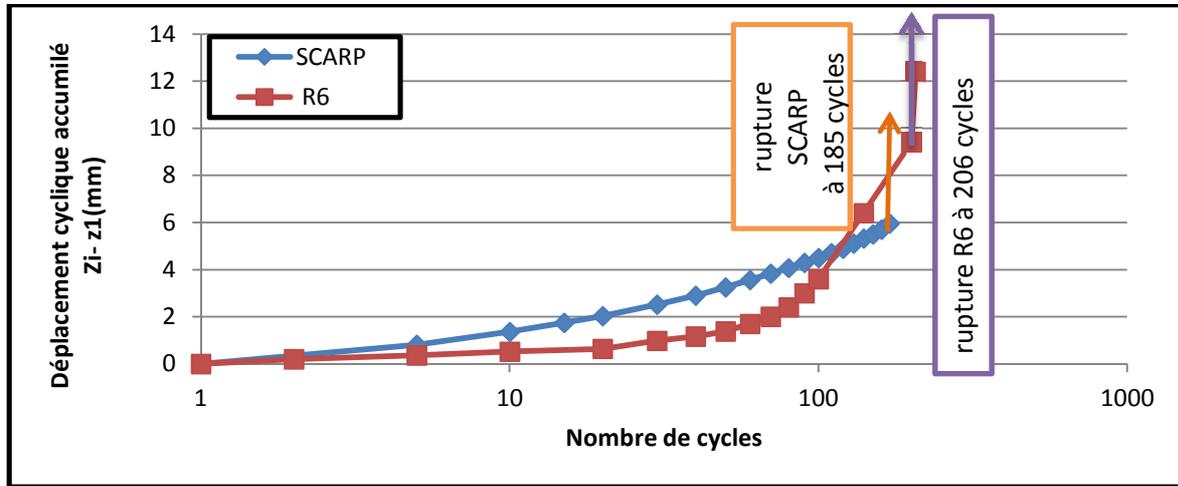


Figure 46 : accumulation de déplacement cyclique  $z_n - z_1$  en fonction des cycles (2.R4.CY2)

Les déplacements des 34 premiers cycles n'ont pas été enregistrés lors de l'essai. La Figure 47 montre que les paramètres utilisés donnent bien l'ordre de grandeur du déplacement cyclique accumulé avec une allure satisfaisante. On observe vers la centaine de cycles une accélération de

l'accumulation des déplacements. On rappelle que la rupture est prévue par SCARP après 461 cycles (commentaire sur la dégradation Figure 41).

- Essais 3.R6.CY6 : Les paramètres calés :  $m = 0.3$   $n = 7.6$



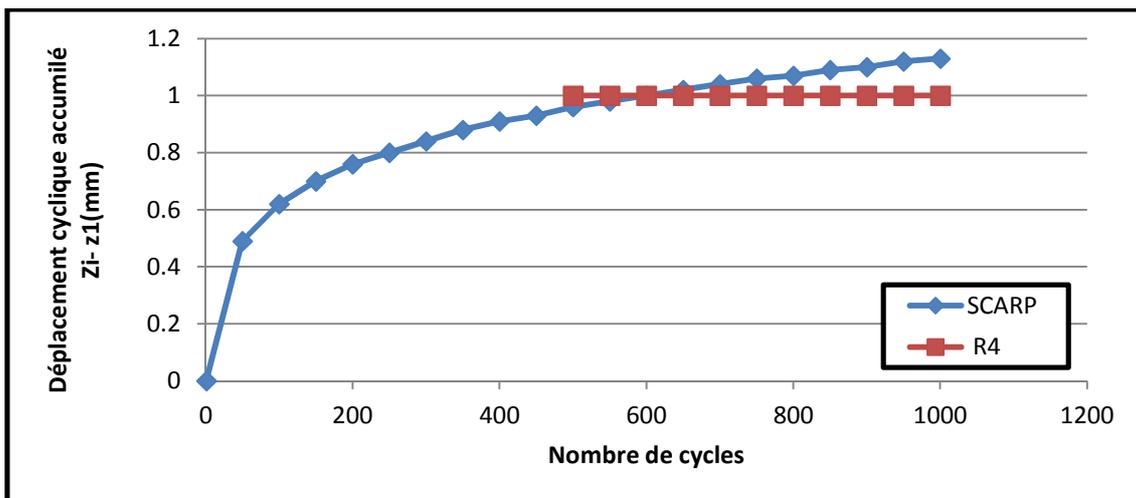
**Figure 47 : accumulation de déplacement cyclique  $z_n-z_1$  en fonction des cycles (3.R6.CY6)**

On voit sur la Figure 47. que le nombre de cycles aux phénomènes sont globalement correctement reproduits.

On peut à ce stade conclure que les essais ayant conduit à la rupture cyclique ou ayant généré des déplacements cycliques significatifs sont reproduits de manière globalement satisfaisante avec le jeu de paramètres suivant :  $n = 7.6$  et  $0.3 < m < 0.4$

Poulos (2006) propose des valeurs de  $n=7.6$  et  $m= 0.245$  pour un sable siliceux.

- Essais 3.R4.CY6 : Les paramètres calés :  $m = 0.14$   $n = 7.6$



**Figure 48 : accumulation de déplacement cyclique  $z_n-z_1$  en fonction des cycles Essais 3.R4.CY6**

Dans cet essai le déplacement cyclique accumulé est très faible et on n'a pas pu le tracer dans les 500 premiers cycles. Le déplacement s'est stabilisé vers 1mm après 500 cycles. On constate que le paramètre  $m$  ne se situe pas dans la fourchette précédemment définie ( $m=0.14$ )

On retrouve ici la différence de comportement entre essais métastables (les essais précédents) et essais stables (le présent essai 3.R4.CY6). Cette différence de comportement est bien identifiée sur la Figure 49 et dans le diagramme comparatif des déplacements cycliques été dans le choix des critères de stabilité proposés (Jardine et al, 2013)

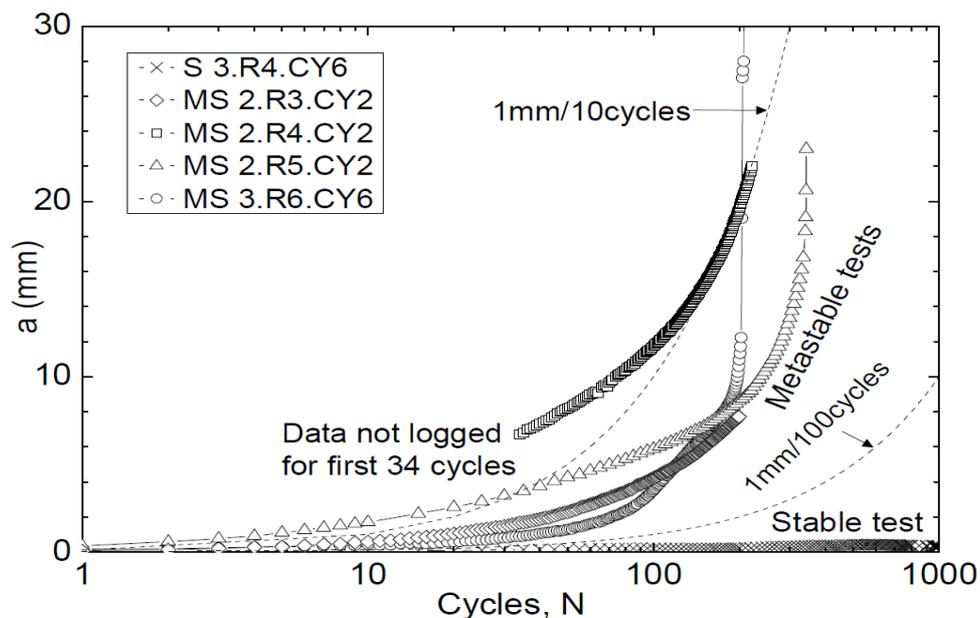


Figure 49 : déplacement cyclique accumulé de l'ensemble d'essais de projet GOPAL étudiés (Jardine et al, 2013)

### 3.5.2. Etude des pieux battus de LOON-PLAGE

On ne s'intéresse ici qu'aux pieux battus de Loon-Plage. Le programme de chargement de ces derniers est présenté dans le Tableau 12.

pieu	Effort	Essai	dates	Type	F(Hz)	V <sub>m</sub> (Kn)	V <sub>c</sub> (Kn)	N cycles
B1	Traction	Installation	14/10/2011					
		L-B1/TR1	20/03/2012	Statique rapide				
B2	Traction	Installation	14/10/2011					
		L-B2/TC1	22/03/2012	Cyclique	0.5	500	300	20
		L-B2/TC2	26/03/2012	Cyclique	0.5	500	300	750
		L-B2/TC3	26/03/2012	Cyclique	0.5	500	400	500
		L-B2/TC4	26/03/2012	Cyclique	0.5	500	450	1105
		L-B2/TR2	26/03/2012	Statique rapide				

Tableau 12 : Programme de chargement SOLCYP sur les pieux battus de Loon-Plage.

Les noms des essais sont désignés comme suit :

Site\_Type de pieu ± Numéro de pieu/type d'effort + type de chargement + numéro de la séquence

Exemple : L-B2/TC2

L : site (L : Loon-Plage)

B : Type de pieu (B : battu,)

T : type d'effort (T : traction, C : compression)

C : type de chargement (C : cyclique, S : statique, R : statique rapide)

2 : numéro de la séquence

### 3.5.2.1 Calage en statique

A cause de l'absence d'un essai de référence statique, l'incertitude sur la capacité statique du pieu battu en traction est grande (les plaques soudées sur les pieux, qui transmettent l'effort du vérin, ont été cisailées et fléchies lors de l'essai statique N-F sur le pieu B1).

Les essais dynamiques réalisés par l'UCL indiquent une capacité ultime en compression comprise entre 2,6 et 3,6 MN avec une résistance en frottement latéral de respectivement 2010 kN et 3350 kN.

A cause de l'incertitude sur la capacité statique en traction, notre procédure d'analyse est comme suit :

- On fait l'hypothèse que les modèles de dégradation obtenus via les essais de projet GOPAL (Figure 37 : modèles de dégradations calés sont applicables sur le pieu L-B2. Par conséquence, on a choisi le modèle suivant :  $\lambda = 0.02$ ,  $D_{\min} = 0.2$
- On cherche la capacité statique du pieu B2 qui donne, après une dégradation par le modèle choisi, une capacité post- cyclique qui corresponde à celle de l'essai L-B2/TR2, soit 1600 kN.
- Le module d'élasticité du sol est calé sur l'essai L-B2/TR2.

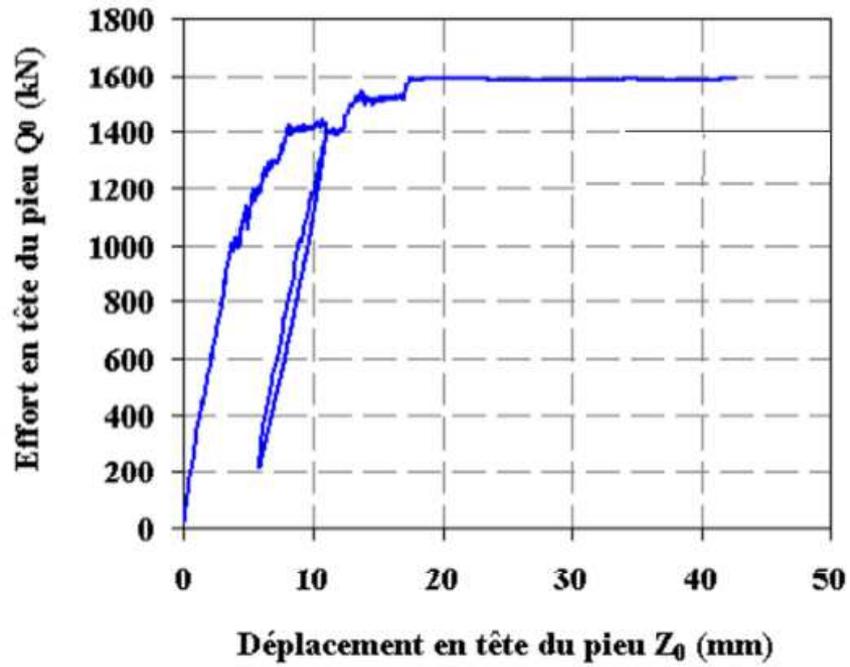


Figure 50 : essai L-B2/TR2 (Benzaria, 2012)

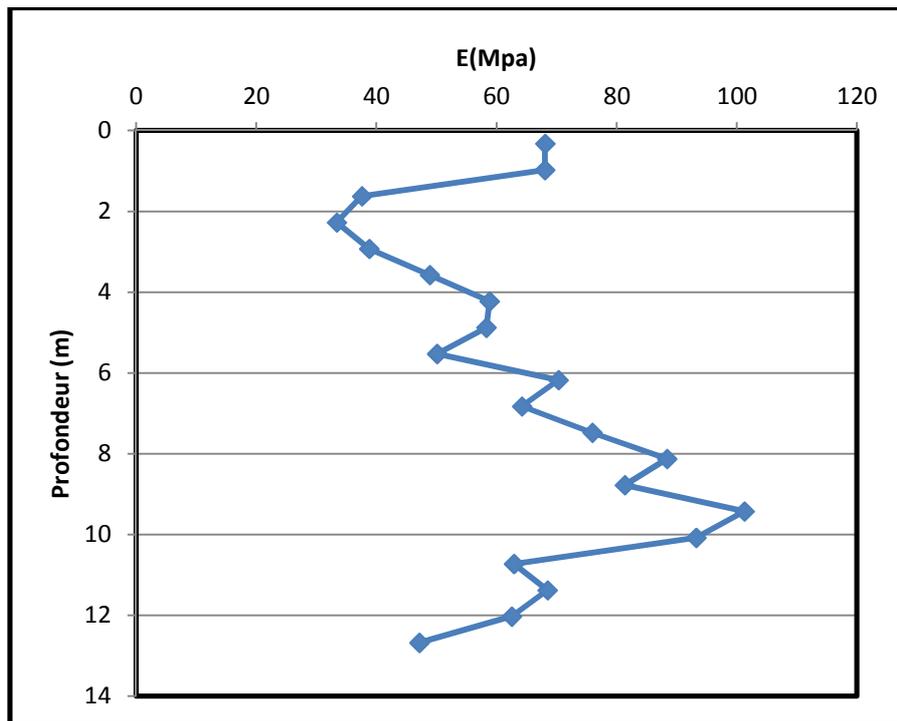
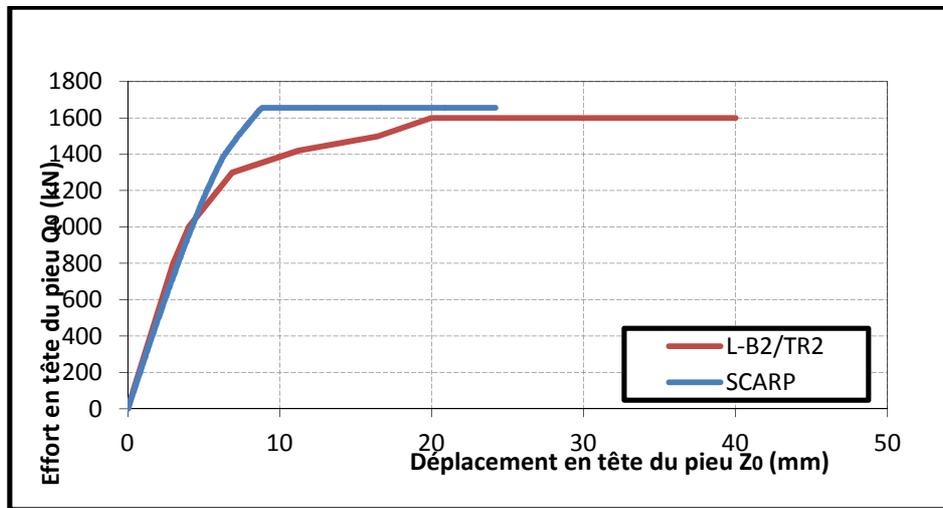


Figure 51 : profil de E (MPa) calé - site Loon-Plage.

Le module d'élasticité du sol tel que calculé par les formules de Robertson (qui correspond à une déformation de 1‰) est ensuite calé en divisant par 1.25.

Avec les hypothèses indiquées ci- dessus on parvient au calage montré sur la Figure 52:



**Figure 52 : calage en statique de pieu B2**

Les résultats de la simulation de l'essai L-B2/TR2 sont montrés sur la Figure 52.

#### 3.5.2.2. Calage des paramètres cyclique de l'approche Matlock et Foo:

On trouve dans notre calcul numérique que les 3 premières séries de chargement cyclique appliqué ne dégradent pas le pieu. Ce résultat peut s'expliquer : Le chargement maximal appliqué n'est pas très sévère ( $V_{max}/V_u = 0.54$ )

- Les couches de surface qui sont souvent les plus dégradés sont négligées dans le calcul à cause du pré-forage de 4m de profondeur exécuté lors de l'installation.

La quatrième série de chargement cyclique ( $V_{max}/V_u = 0.57$ ) dégrade très légèrement le pieu (3% de sa capacité portante).

- L-B2/TC4 :

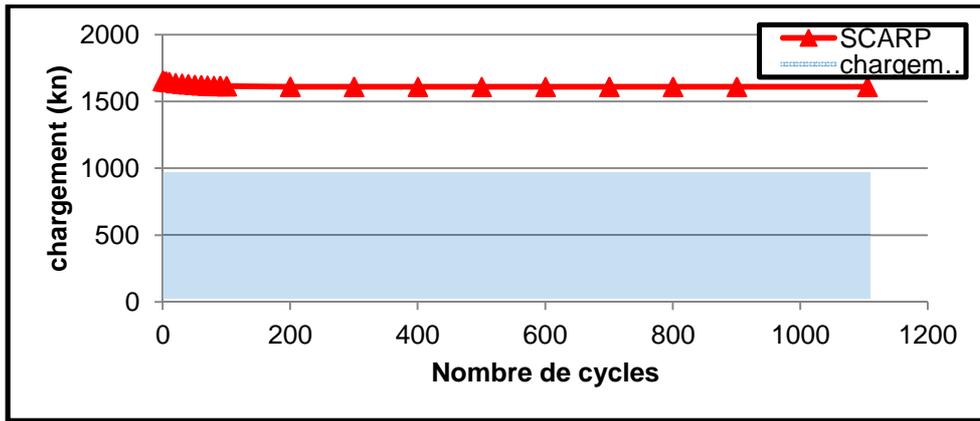


Figure 53 : variation de la capacité portante de pieu en fonction des cycles pour la séquence L-B2/TC4

3.5.2.3. Calage des paramètres d'accumulation de déplacement cyclique:

- L-B2/TC1 :

Capacité et chargement	Valeur
Capacité pré-cyclique $V_u$	1654
La charge moyenne $V_m$	160 KN
Amplitude de charge $V_c$	120 KN
$V_m/V_u$	0.1
$V_c/V_u$	0.07

Tableau 13 : Données de capacité et chargement pour l'essai L-B2/TC1

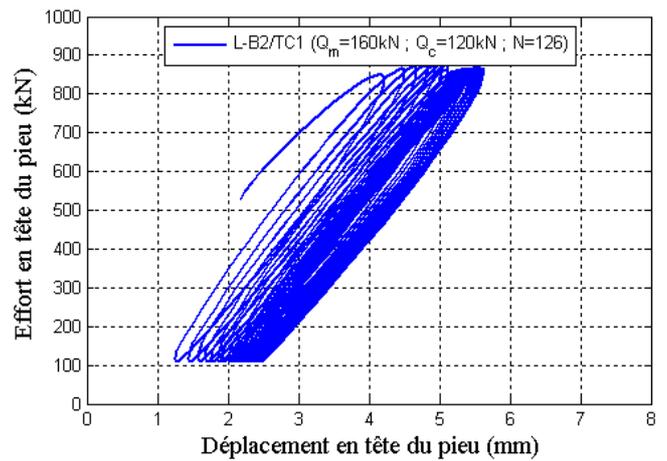


Figure 54 : essai L-B2/TC1 (Benzaria, 2012)

- Paramètres calés :  $m=0.2$ ,  $n=7.6$

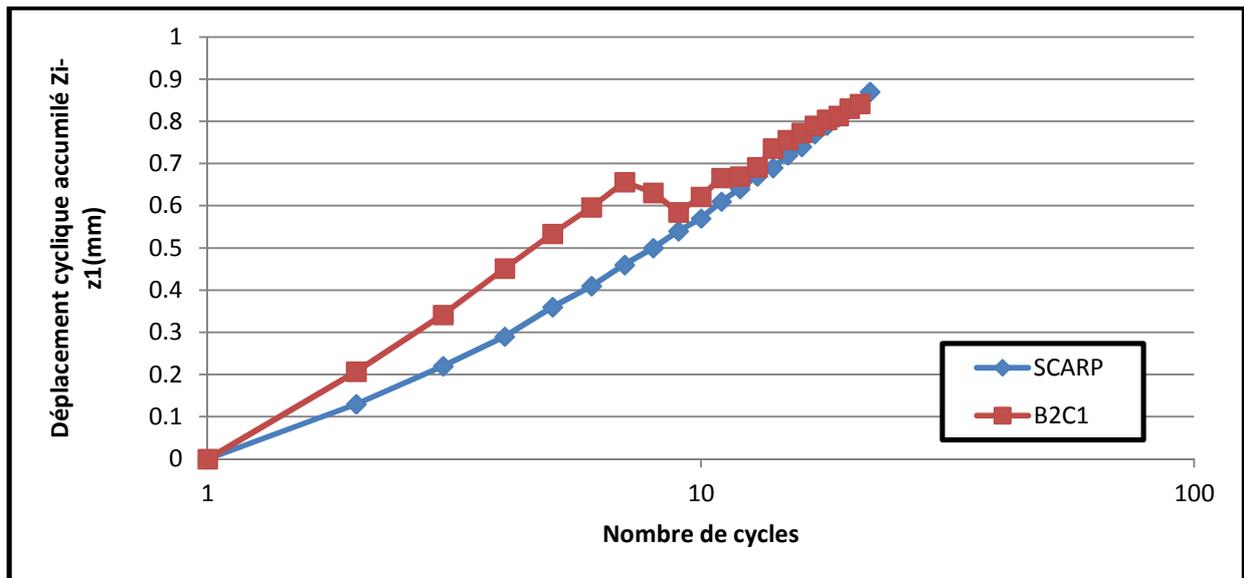


Figure 55 : accumulation de déplacement cyclique  $z_n-z_1$  en fonction des cycles (L-B2/TC1)

On voit sur la Figure 55 : accumulation de déplacement cyclique  $z_n-z_1$  en fonction des cycles (L-B2/TC1) les paramètres de « m » et « n » utilisés donnent une allure et des valeurs d'accumulation de déplacement cyclique qui permettent de retrouver les résultats expérimentaux.

- L-B2/TC2 :

Capacité et chargement	Valeur
Capacité pré-cyclique $V_u$	1654
La charge moyenne $V_m$	500 KN
Amplitude de charge $V_c$	300 KN
$V_m/V_u$	0.3
$V_c/V_u$	0.18

Tableau 14 : Données de capacité et chargement de l'essai L-B2/TC2

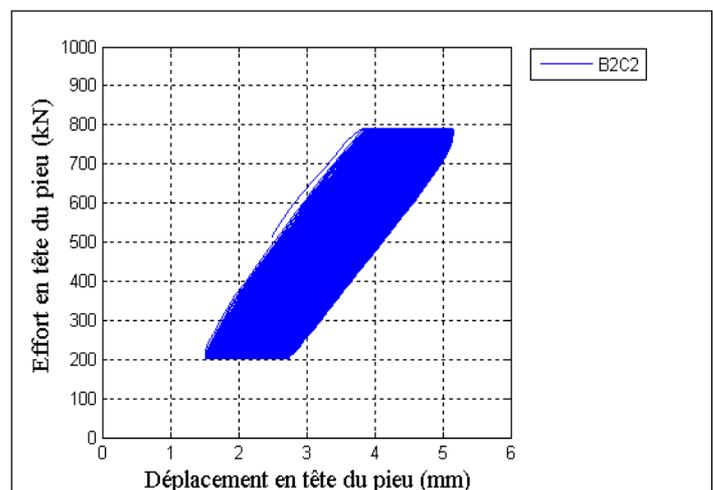


Figure 56 : essai L-B2/TC2 (Benzaria, 2012à)

- Paramètres calés :  $m=0.12$ ,  $n=7.6$

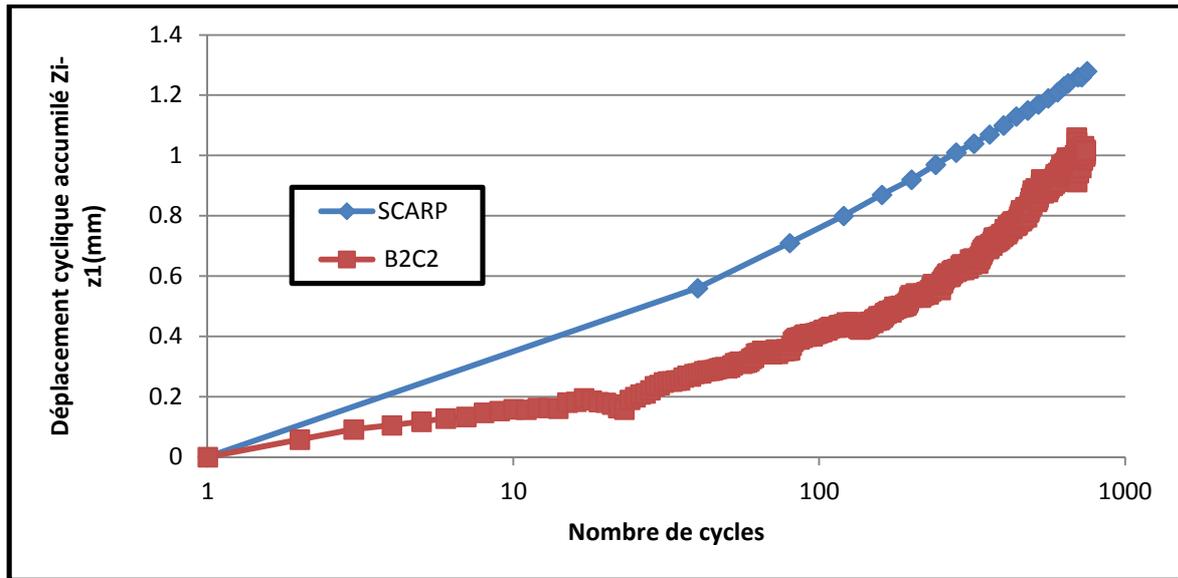


Figure 57 : accumulation de déplacement cyclique  $z_n-z_1$  en fonction des cycles (L-B2/TC2)

On note que les paramètres calés sont très proches de ceux utilisés pour l'essai GOPAL stable 3.R4.CY6.

- L-B2/TC3 :

Capacité et chargement	Valeur
Capacité pré-cyclique $V_u$	1654
La charge moyenne $V_m$	500 KN
Amplitude de charge $V_c$	400 KN
$V_m/V_u$	0.3
$V_c/V_u$	0.24

Tableau 15 : Donnée de capacité et chargement pour l'essai L-B2/TC3

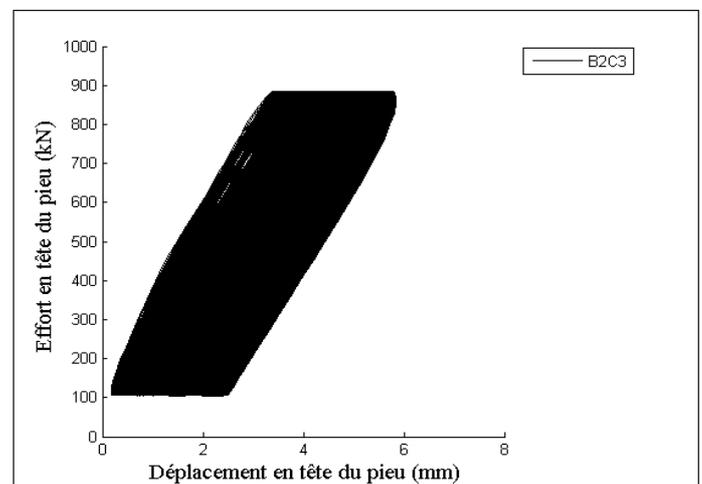


Figure 58 : essai L-B2/TC3

- Paramètres calés :  $m=0.12$ ,  $n=7.6$

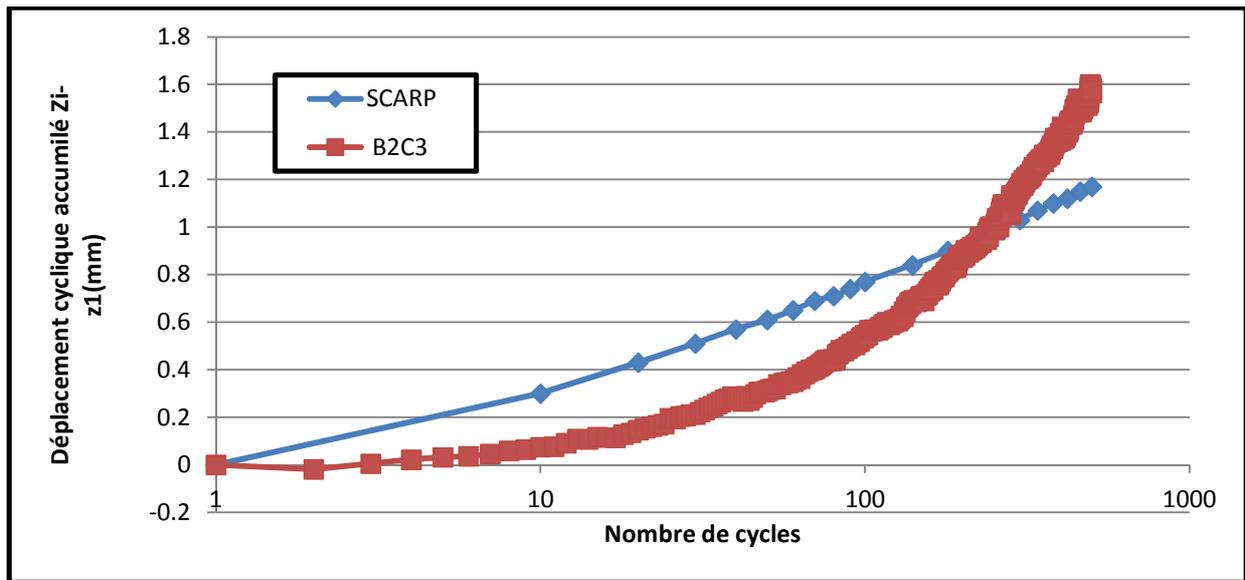


Figure 59 : accumulation de déplacement cyclique  $z_n - z_1$  en fonction des cycles (L-B2/TC3)

Les paramètres calés sont très proches de ceux retenus pour les essais 3.R4.CY6 et L-B2/TC2.

- L-B2/TC4 :

Capacité et chargement	Valeur
Capacité pré-cyclique $V_u$	1654
La charge moyenne $V_m$	500 KN
Amplitude de charge $V_c$	450 KN
$V_m/V_u$	0.3
$V_c/V_u$	0.27

Tableau 16 : Données de capacité et chargement pour l'essai L-B2/TC4

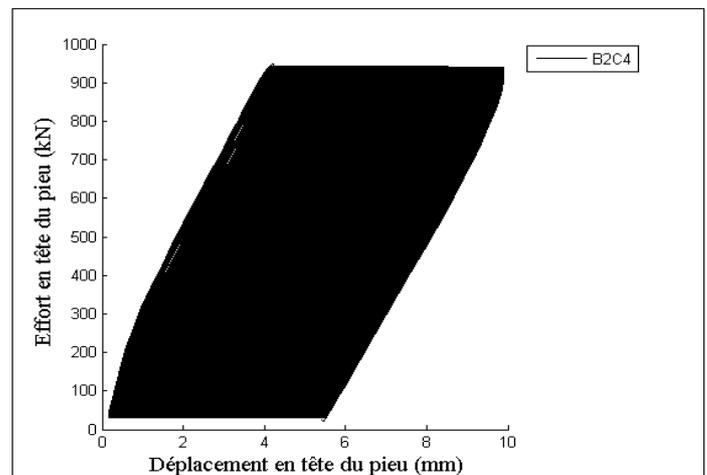


Figure 60 : essai L-B2/TC4 (Benzaria, 2012)

- Paramètres calés :  $m=0.22$ ,  $n=7.6$

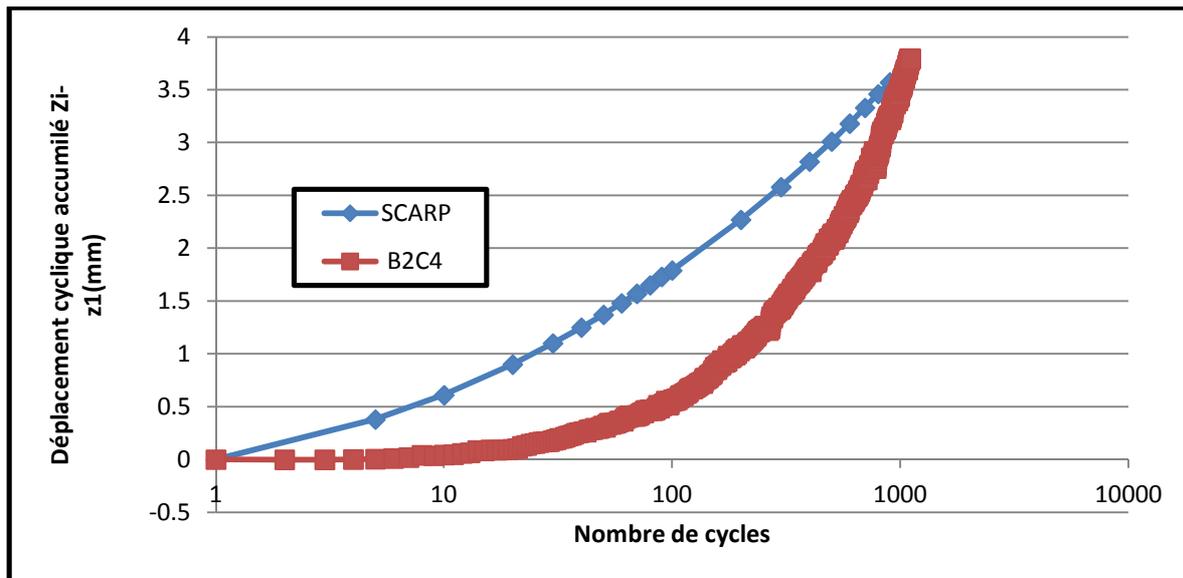


Figure 61 : accumulation de déplacement cyclique  $z_n - z_1$  en fonction des cycles (L-B2/TC3)

La simulation est montrée sur la Figure 61.

Les simulations effectuées sur le pieu B2 semblent indiquer que :

- Le coefficient  $m$  permettant de restituer le comportement des pieux stables se situe dans la fourchette  $0.1 < m < 0.15$  aussi bien pour le pieu de Loon-Plage que pour les pieux GOPAL ;
- Ces valeurs sont inférieures à celles retenues pour les pieux métastables (GOPAL) soit  $0.3 < m < 0.4$
- La valeur  $m=0.22$  utilisée pour le calage de la séquence L-B2/TC4 peut s'expliquer par un début de dégradation du frottement sous ce cas de charge légèrement plus important que les précédents ( $V_{max}/V_u = 0.57$ )
- La valeur  $m=0.2$  utilisée pour le calage de la séquence L-B2/TC1 peut s'expliquer par le petit nombre de cycles concernés et le fait qu'il s'agit des tout premiers cycles appliqués au pieu.

### 3.6. Conclusions

Dans cette partie du rapport, on a examiné l'effet du chargement cyclique sur les pieux battus dans le sable par une approche de type « local » à l'aide du logiciel SCARP. L'analyse porte sur les deux effets majeurs suivants :

- Dégradation du frottement latéral
- Accumulation du déplacement cyclique en tête de pieu

Dans SCARP, la dégradation du frottement est simulée par la méthode de Matlock et Foo qui suppose que la dégradation n'intervient que lorsqu'il y a inversion de la contrainte de cisaillement en phase plastique. La loi de dégradation intégrée dans SCARP a été calée grâce à la base de données disponible (essais in situ de Dunkerque et de Loon-Plage). Un même jeu de paramètres :  $\lambda = 0.02$  avec  $D_{min}$  compris entre 0.2 et 0.4 permet d'obtenir des résultats satisfaisants sur l'ensemble des données disponibles.

L'accumulation du déplacement cyclique en tête du pieu est calculée par dans SCARP de manière explicite par une formule empirique basée sur les travaux de Diyaljee et Raymond. Elle contient deux paramètres expérimentaux  $m$  et  $n$  qui ont pu être calés à partir de la même base de données. Il ressort que :

- pour les pieux stables (déplacements cycliques faibles sous grand nombre de cycles), les valeurs de  $m$  se situent dans la fourchette  $0.1 < m < 0.15$  avec  $n = 7.6$
- pour les pieux métastables (déplacements cycliques significatifs pouvant conduire à la rupture sous un nombre de cycles important, typiquement  $N > 100$ ), les valeurs de  $m$  se situent dans la fourchette  $0.3 < m < 0.4$  avec  $n = 7.6$ .

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR.1999. NF P 94-150-2. Norme Française. Sols: Reconnaissance et Essais – Essai statique de pieu sous effort axial – Partie 1: en compression et Partie 2: en traction.

AFNOR. 2012. NF P 94 262. Norme d'application de la Norme Française NF EN 1997-1. Fondations profondes.

API RP2GEO. 2011. API Recommended Practice, Geotechnical and Foundation Design Considerations, First Edition, April 2011.

Benzaria O. 2012. Contribution à l'étude du comportement des pieux isolés sous chargements cycliques. Thèse Université Paris-Est, soutenue le 14 Décembre 2012. Version provisoire de mars 2013. 338p.

Benzaria A., Puech A. et Le Kouby A. 2013. Essais cycliques axiaux sur des pieux forés dans des sables denses. Proceedings 18th ICSMGE, Paris

Diyaljee, V. A. and Raymond, G. P. (1982). Repetitive Load Deformation of Cohesionless Soil. Journal of The Geotechnical Engineering Division, Proceedings of The American Society of Civil Engineers, ASCE, Vol. 108, N°. GT10

Guefrech A. et Rault G.2012. Pieux sous sollicitations cycliques axiales dans un massif de sable – Essais en centrifugeuse. Rapport interne IFSTTAR. Référence interne GER/GER9: 2012-3-01-1/1-a. 60p.

Guefrech A., Rault G, Chenaf N., Thorel L., Garnier J., Puech A. 2012 Stability of cast in place piles in sand under axial cyclic loading . Proc. 7th Int. Conf. Offshore Site investigation and Geotechnics. London. 12-14 sept. pp.329-334.

Jardine R J., et Standing J R. 2000, Pile Load Testing Performed for HSE Cyclic Loading Study at Dunkirk France vol 1 2, Dept of Civil & Environmental Engineering Imperial College of Science & Technology.

Lunne T., Robertson P.K. et Powell J.J.M. (1997). Cone penetration testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic, EF Spon/Routledge Publishers, New York. 312p.

Matlock, H. and Foo, S. H. C. (1979). Axial analysis of piles using a hysteretic and degrading soil model. Numerical Methods in Offshore Piling. ICE, London, pp.127-133.,

Poulos, H.G. 1989. « SCARP USERS'S MANUAL ». Center for Geotechnical Research. The University of Sydney.

Rimoy S., Jardine R., Standing J.2013 Displacement response to axial cyclic loading of driven piles in sand. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013.



