

# Proposition d'une loi t-z cyclique au moyen d'expérimentations en centrifugeuse

## Proposal of cyclic t-z law by means of centrifuge experiments

Burlon S., Thorel L.

Université Paris-Est, IFSTTAR, Département GERS, Paris, France

Mroueh H.

LGCgE, Lille, France

**RÉSUMÉ :** Cet article propose une extension de la loi t-z de Frank et Zhao (1982) pour le calcul des déplacements d'un pieu soumis à des charges axiales cycliques. Les potentialités de cette nouvelle loi sont présentées et une comparaison est effectuée entre des résultats expérimentaux issus d'essais en centrifugeuse pour quatre pieux soumis à des charges cycliques et des résultats numériques obtenus au moyen de cette nouvelle loi. Pour chaque cas, le déplacement de la tête de pieu en fonction du nombre de cycles de chargement est analysé. Une discussion est menée pour mieux cerner l'influence de chaque paramètre de la nouvelle loi t-z cyclique développée et envisager les développements futurs à mettre en œuvre.

**ABSTRACT:** This paper includes an extension of the t-z law proposed by Frank and Zhao (1982) for the displacements calculation of a pile subjected to cyclic axial loads. The potential of this new law are presented and a comparison is made between experimental results obtained from centrifuge tests for four piles subjected to cyclic loads and numerical results obtained by this new law. For each case, the displacement of the pile head according to the number of load cycles is analyzed. A discussion is conducted to better understand the influence of each parameter of the new cyclic t-z law and to consider future developments to implement.

**MOTS-CLÉS :** Fondation profonde, charge axiale, sollicitations cycliques, centrifugeuse, loi t-z.

**KEYWORDS:** Deep foundations, axial load, cyclic load, centrifuge tests t-z curve.

## 1 INTRODUCTION

Le comportement des pieux soumis à des charges axiales monotones peut être appréhendé par des calculs mettant en œuvre des lois d'interaction locale de type t-z. Ces lois permettent, pour chaque section d'un pieu, d'associer le déplacement relatif de l'interface sol-pieu à la contrainte de cisaillement mobilisée. Cette approche de calcul du comportement des pieux est généralement mise en œuvre, comme le recommande l'Eurocode7 Partie 1 (Eurocode 7 2005), lorsque les exigences de la structure portée en termes de déplacement sont essentielles. En France, ces lois sont très largement utilisées et s'appuient essentiellement sur les propositions de Frank et Zhao (1982) à la fois pour les sols fins et les sols grenus. Elles sont toutefois limitées au cas de charges axiales monotones ne dépassant la charge de fluage du pieu et ne permettent pas de rendre compte des phénomènes observés dans le cas où le pieu est soumis à des charges cycliques (fondations d'éoliennes, de structures pétrolières, etc.). Toutefois, des lois t-z cycliques, développées notamment pour l'ingénierie pétrolière, existent pour rendre compte des effets de tels chargements (Chin et Poulos 1992 et Randolph 1986).

Sur la base de ces lois, cet article propose une extension de la loi t-z formulée par Frank et Zhao. Les aptitudes de cette nouvelle loi, pour rendre compte des phénomènes de durcissement ou de radoucissement cyclique ou de rochet et de relaxation (Lemaître et Chaboche 2009), sont présentées à l'échelle locale. Une comparaison entre des résultats expérimentaux issus d'essais sur modèles réduits centrifugés pour quatre pieux soumis à des charges cycliques et des résultats numériques obtenus au moyen de cette nouvelle loi est ensuite proposée. Cette comparaison concerne l'évolution du déplacement en tête de pieu en fonction du nombre de cycles. Une discussion des résultats est ensuite présentée de manière à mieux cerner l'influence de chaque paramètre de la nouvelle loi t-z cyclique développée et à esquisser les développements futurs à mener.

## 2 MISE AU POINT D'UNE LOI T-Z CYCLIQUE

### 2.1 Principes

Dans sa version la plus générale, la loi t-z cyclique entre le frottement  $q_s$  et le déplacement tangentiel  $u_t$  est traduite par l'équation 1. Les neuf paramètres de cette loi sont présentés dans le tableau 1.

$$q_s(u_t) = q_{s,i} + A(-1)^{n_{\text{cyl}}+1} \left[ \left( q_{s,0} + \Delta q_s \left( 1 - e^{-\frac{u_{t,i}}{\alpha}} \right) \right) \left( 1 - e^{-R \left| \frac{u_t - u_{t,i}}{\alpha} \right|} \right) + \left[ \beta e^{-\frac{u_{t,i}}{\alpha}} |u_t - u_{t,i}|^\delta e^{-\left| \frac{u_t - u_{t,i}}{\gamma} \right|^\delta} \right] \right] \quad (1)$$

Les paramètres auxiliaires A et R sont définis de la manière suivante :

- le paramètre A contrôle l'augmentation de la raideur de l'interface sol-pieu lors des déchargements. Cette augmentation est d'autant plus importante que le déchargement est réalisé à un niveau de chargement élevé ;
- le paramètre R gère l'augmentation de la raideur de l'interface sol-pieu à chaque inversion de cycle. Il comprend les paramètres  $\rho$  et  $\xi$  définis dans le tableau 1.

Lors du premier cycle de chargement, la relation entre le frottement  $q_s$  et le déplacement relatif  $u_t$  peut être simplifiée :

$$q_s = q_{s,0} \left( 1 - e^{-\frac{u_t}{\alpha}} \right) + \beta u_t^\delta e^{-\left( \frac{u_t}{\gamma} \right)^\delta} \quad (2)$$

Le second terme comprenant les paramètres  $\beta$ ,  $\delta$  et  $\gamma$  traduit le durcissement monotone. Il est maximal lorsque le

déplacement relatif  $u_t$  atteint la valeur  $\gamma$ . En l'absence de durcissement, la relation se simplifie sous la forme suivante :

$$q_s = q_{s0} \left( 1 - e^{-\frac{u_t}{\alpha}} \right) \quad (3)$$

On peut remarquer que le paramètre  $\alpha$  correspond au déplacement relatif de l'interface sol-pieu permettant de mobiliser environ 63 % du frottement maximal en l'absence de durcissement. Pour des chargements monotones, les paramètres  $q_{s0}$  et  $\alpha$  peuvent être déterminés respectivement selon la norme française d'application de l'Eurocode 7 (AFNOR 2012) relative aux fondations profondes et selon les lois de Frank et Zhao (1982) (Figure 1). Les autres paramètres sont à caler sur des essais cycliques de chargements de pieu. Actuellement, ils ne peuvent pas être déduits à partir de propriétés usuelles du sol comme le module pressiométrique, la pression limite ou la résistance de cône.

Tableau 1. Définition des paramètres de la loi t-z cyclique

Paramètres généraux	
$i$	nombre d'inversion de cycle de chargement ( $i \geq 1$ )
$q_{s,i}$	frottement mobilisé à l'inversion de charge ( $q_{s,i} = 0$ pour $i = 1$ )
$u_{t,i}$	déplacement relatif de l'interface sol-pieu au cycle $i$ ( $u_{t,i} = 0$ pour $i = 1$ )
$u_{ts} = \sum  u_{t,i} - u_{t,i-1} $	somme des valeurs absolues des déplacements relatifs
Paramètres auxiliaires	
$A = abs \left  \frac{q_{s,i} - (-1)^{(n_{cyl} + 1)} (q_{s0} + \Delta q_s (1 - e^{-u_{ts}/\varepsilon}))}{(q_{s0} + \Delta q_s (1 - e^{-u_{ts}/\varepsilon}))} \right $	
$R = e^{-(n_{cyl}-1)\xi} + \rho (1 - e^{-(n_{cyl}-1)\xi})$	
Mobilisation du frottement sous chargement monotone – 2 paramètres	
$q_{s0}$ [kPa]	frottement mobilisable sous chargement monotone pour de grands déplacements
$\alpha$ [cm]	paramètre de mobilisation du frottement (plus ce paramètre est faible, plus le déplacement pour mobiliser un frottement important est faible et plus l'interface sol-pieu est rigide)
Radoucissement/durcissement monotone – 3 paramètres	
$\gamma$ [cm]	paramètre fixant le déplacement pour laquelle le durcissement est maximal
$\beta$ [kPa]	paramètre contrôlant l'amplitude du durcissement
$\delta$	paramètre de calage égal à 2
Phénomènes cycliques – 4 paramètres	
$\Delta q_s$ [kPa]	amplitude de radoucissement ou de durcissement cyclique
$\varepsilon$ [cm]	paramètre contrôlant la vitesse de radoucissement ou de durcissement cyclique
$\rho$	paramètre contrôlant l'adaptation, l'accommodation et le rochet ou la relaxation
$\xi$	paramètre contrôlant la vitesse d'adaptation, d'accommodation et de rochet ou de relaxation

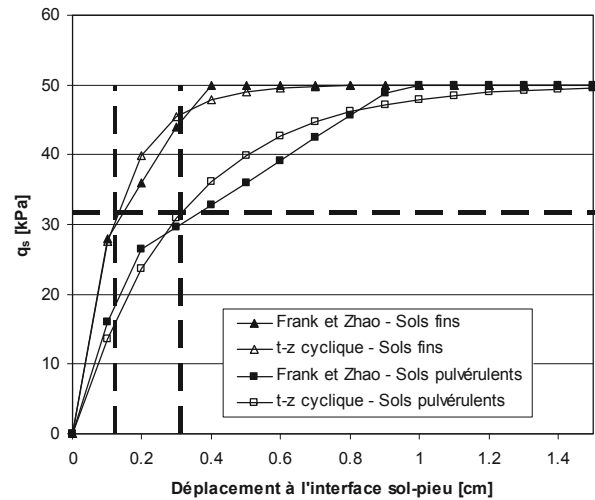
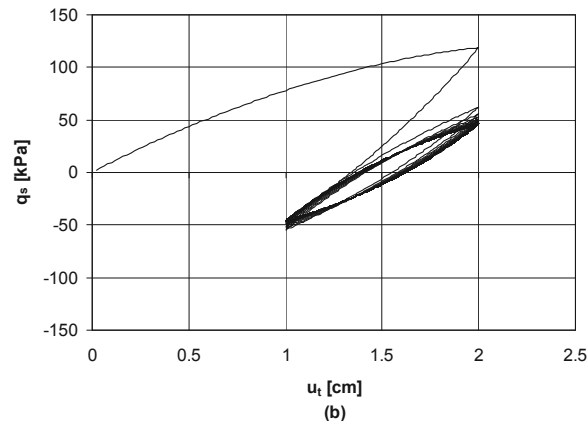
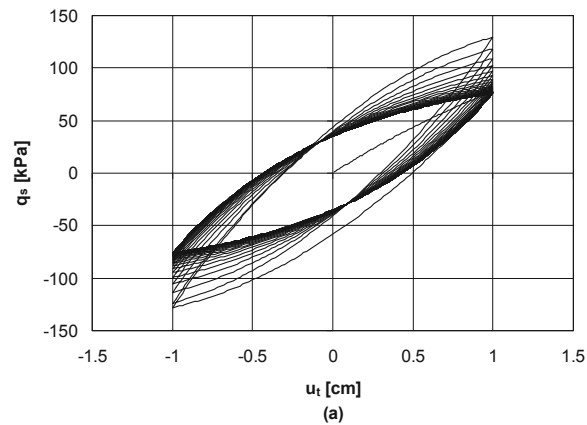


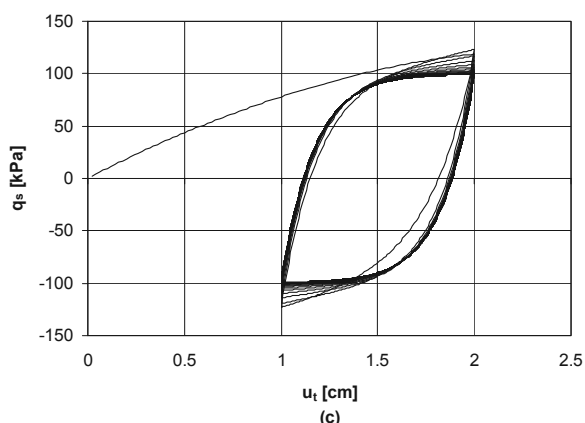
Figure 1. Comparaison entre la loi de Frank et Zhao et la loi t-z cyclique pour une sollicitation monotone.

### 2.2 Potentialités de la loi t-z cyclique

La loi t-z cyclique a été élaborée de manière à rendre compte les principaux phénomènes cycliques observés lors d'essais de cisaillement cyclique en laboratoire :

- le durcissement ou le radoucissement cyclique pour des essais de cisaillement en déplacement symétrique (Figure 2a) ;
- la relaxation ou non pour des essais de cisaillement en déplacement non symétrique (Figures 2b et 2c) ;
- le rochet plus ou moins important pour des essais de cisaillement en contrainte non symétrique.





Figures 2. Modélisation d'essai de cisaillement suivant différentes conditions (a : déplacement symétrique, b : déplacement non symétrique – relaxation, c : déplacement non symétrique – relaxation nulle)

### 2.3 Comportement de la base du pieu

La loi utilisée pour modéliser l'enfoncement de la base d'un pieu  $u_p$  a été développée sur le même modèle que la loi précédente. Elle est formulée directement en termes d'effort axial mobilisable sous la base du pieu et comprend neuf paramètres dans sa version la plus évoluée. Pour des chargements monotones, les paramètres  $Q_{p0}$  et  $\alpha$  sont toujours calés respectivement selon la norme française d'application de l'Eurocode 7 relative aux fondations profondes (AFNOR 2012) et selon les lois de Frank et Zhao (1982).

Un paramètre complémentaire  $p_r$  (variant entre 0 et 1) a été introduit de manière à prendre en compte le fait que la pointe d'un pieu sollicitée axialement peut se trouver au-dessus de sa position d'origine. Plus il est faible, moins l'effort mobilisé sous la pointe du pieu, tant que ce dernier est au-dessus de sa position initiale, est important (Figure 3).

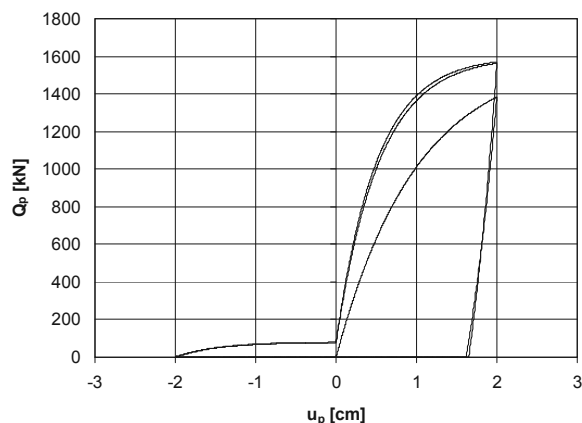


Figure 3. Modélisation de la mobilisation de l'effort de pointe

## 3 PRÉSENTATION DES ESSAIS EN CENTRIFUGEUSE

Le modèle réduit considéré, à l'échelle du  $1/23^{\text{ème}}$ , est soumis à une accélération centrifuge de  $23 \times g$ . Les propriétés du sable sont les suivantes (Jardine *et al.* 2009, Andria-Ntoanina *et al.* 2010) :  $\rho_{\text{dmin}} = 1395\text{-}1408 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{dmax}} = 1755 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ ,  $d_{10} = 0,15 \text{ mm}$ ,  $d_{50} = 0,207\text{-}0,210 \text{ mm}$ ,  $d_{60} = 0,23 \text{ mm}$  et  $CU = 1,49\text{-}1,43$ . Le pieu modèle a les caractéristiques suivantes : forme cylindrique « pointe » plate, diamètre de 18 mm, longueur de 590 mm, fiche de 560 mm, barreau d'aluminium de masse totale 0,405 kg, rugosité à l'état « neuf » définie par  $R_t = 112 \mu\text{m}$ ,  $R_a = 25,9 \mu\text{m}$  soit  $R_t/d_{50} = 0,54$  et  $R_a/d_{50} = 0,13$ , rugosité à l'état « usé » (après 10 essais) définie par  $R_t = 90 \mu\text{m}$ ,  $R_a = 23,9 \mu\text{m}$  soit  $R_t/d_{50} = 0,44$ ,  $R_a/d_{50} = 0,12$ . Les massifs sont

reconstitués par pluviage de sable sec dans un conteneur double (Figure 4).

Les expérimentations réalisées comprennent deux séries d'essais monotones permettant de déterminer la résistance ultime du pieu en compression ( $Q_p$ ) et en traction ( $Q_s$ ). Quatre essais cycliques ont ensuite été réalisés : la charge atteint d'abord la valeur  $V_m$  puis oscille entre  $V_{\text{max}} = V_m + V_c$  et  $V_{\text{min}} = V_m - V_c$  (Tableau 2).

Tableau 2. Programme de chargement des essais cycliques

	$V_m/Q_p$	$V_c/Q_p$
Essai 1 (traction cyclique)	-0,33	0,05
Essai 2 (traction cyclique)	-0,133	0,133
Essai 3 (cyclique alterné – compression dominante)	0,3	0,4
Essai 4 (cyclique alterné)	0	0,133

## 4 ANALYSE DES RÉSULTATS OBTENUS

### 4.1 Présentation des résultats

Les paramètres de calcul (Tableau 3) sont calés sur les deux essais monotones en traction (Figure 4) et en compression (Figure 5) en supposant le module de Young du pieu égal à 10 GPa et sur l'essai cyclique 3 qui présente le comportement *a priori* le plus complexe à modéliser.

Tableau 3. Propriétés des paramètres de la loi t-z pour le frottement axial et pour la résistance de pointe

Frottement axial		Résistance de pointe	
$q_{s0}$	102 kPa	$Q_{p0}$	1615 kN
$\alpha$	1 cm	$\alpha$	0,1 cm
$\beta$	30 kPa	$\beta$	
$\gamma$	1,8 cm	$\gamma$	
$\delta$	2	$\delta$	
$\Delta q_s$	- 83 kPa	$\Delta Q_p$	300 kN
$\varepsilon$	25 cm	$\varepsilon$	5 cm
$\rho$	20	$\rho$	6
$\xi$	0,05	$\xi$	0,1
		$p_r$	0,05

### 4.2 Analyse des résultats

La figure 6 propose, pour les quatre essais, la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques. Expérimentalement, la rupture du pieu est obtenue pour les essais 2, 3 et 4 avec un défaut de résistance à la traction du sol. Pour l'essai 1, alors que l'effort de traction appliqué est plus important de tous les essais réalisés, la rupture n'a pas été atteinte pour le nombre de cycles effectués. Il est néanmoins très probable que le nombre de cycles effectués est insuffisant. Pour l'essai 3, la rupture en compression peut être observée puisque l'enfoncement du pieu est supérieur à 10 % de son diamètre. Les efforts de traction atteints traduisant la rupture du pieu pour les essais 2, 3 et 4 sont très différents : 1204,6 kN, 843,22 kN et 317 kN. Ce résultat montre que le frottement mobilisable le long du fût du pieu, après un grand nombre de cycles de chargement, varie en fonction du chargement appliqué. Dans l'état actuel, la loi t-z proposée n'est pas en mesure de rendre compte ce phénomène car les paramètres  $\Delta q_s$  et  $u_s$  ne traduisent pas suffisamment les effets des cycles sur la résistance de l'interface.

Les résultats obtenus indiquent toutefois que le modèle développé rend compte de manière plutôt satisfaisante des déplacements du pieu lors des premiers cycles de chargement. Pour des nombres de cycles élevés, les tendances restent plutôt bien appréhendées même si les amplitudes de déplacement ne sont pas correctes.

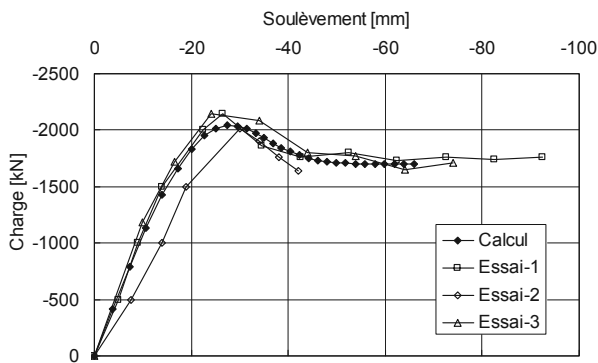


Figure 4. Modélisation de l'essai de traction

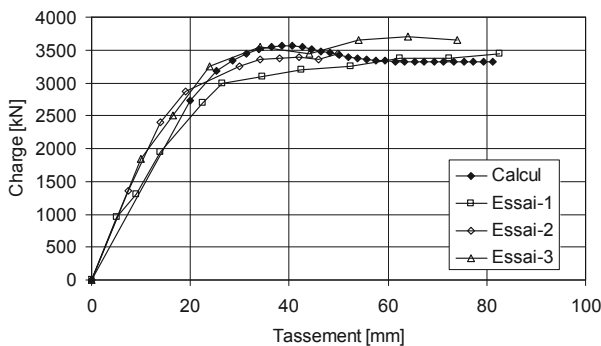


Figure 5. Modélisation de l'essai de compression

## 5 CONCLUSION

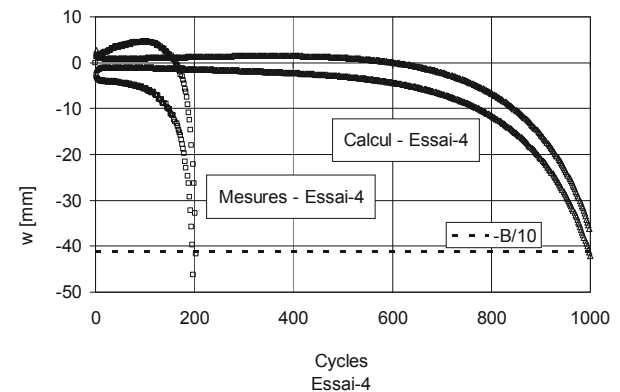
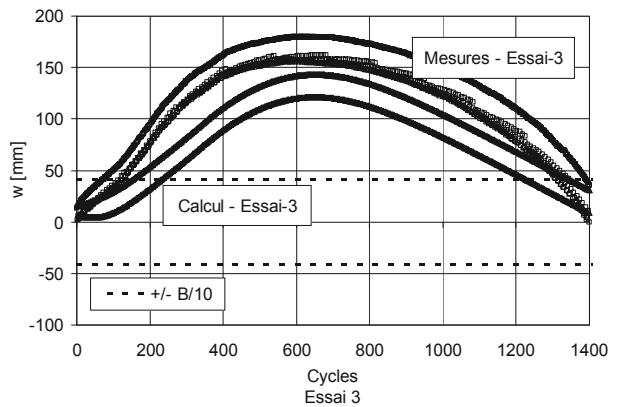
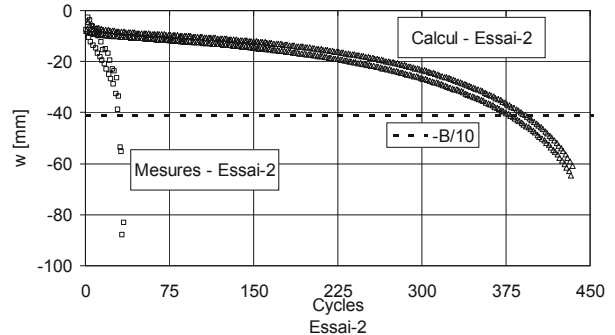
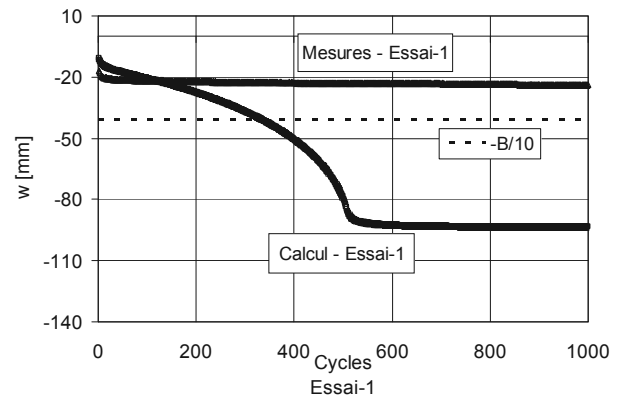
Une loi d'interaction t-z cyclique a été développée pour le calcul des pieux sous charge axiale. Des tentatives de validation ont été effectuées en confrontant des résultats numériques obtenus avec cette loi et des expérimentations en centrifugeuse pour des chargements cycliques en traction et en compression alternés ou non. Des améliorations significatives restent à apporter. Les premiers résultats sont encourageants car ils traduisent au moins dans leurs grandes lignes les principaux comportements du pieu.

## 6 REMERCIEMENTS

Les résultats présentés dans cette communication ont été acquis dans le cadre du Projet ANR et du Projet National Français SOLCYP (SOLlicitations Cycliques sur les Pieux).

## 7 REFERENCES

- Eurocode 7 – Part 1. (2004) *Calcul Géotechnique – Partie 1: Règles Générales*. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles.
- Frank, R. et Zhao, S. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. *Bulletin Liaison Laboratoire Ponts Chaussées* 119 17-24.
- Chin J. T. and Poulos H. G. (1992) Cyclic axial loading analyses: a comparative study. *Computers and Geotechnics*, 13, 137-158.
- Randolph M.F. (1986) RATZ: Load transfer analysis of axially loaded piles, *Report Geo: 86033*, Department of Civil Engineering, The University of Western Australia.
- Lemaître, J. et Chaboche, J.L. (2009). *Mécanique des Matériaux Solides* (éd. 2ème). Paris: Dunod.
- AFNOR. (2012) Dimensionnement des fondations profondes. *Norme NF P 94-292*, Paris.
- Jardine R.J., Zhu B.T., Foray P. & Dalton, C.P. (2009). Experimental arrangements for the investigation of soil stresses developed around a displacement pile. *Soil and Foundations* 49(5): 661-673.
- Andria-Ntoanina I., Canou J. et Dupla J.-C. (2010) Caractérisation mécanique du sable de Fontainebleau NE34 à l'appareil triaxial sous cisaillement monotone. *Rapport SOLCYP*, 23p.



Figures 6. Modélisation des quatre essais cycliques (w : déplacement axial du pieu -> 0 : tassement -< 0 : soulèvement)