

MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS DU COMPORTEMENT DES PIEUX À L'ARRACHEMENT CYCLIQUE

FINITE ELEMENT MODELLING OF THE BEHAVIOUR OF PILES SUBJECTED TO CYCLIC TENSION

Marc BOULON¹, Suriyavut PRA-AI²

¹ Université Grenoble Alpes, Laboratoire 3SR

² ATTDC, School of Engineering, Université de Phayao, Thaïlande

RÉSUMÉ – Un outil original de modélisation simplifiée, mêlant logiciel éléments finis (Plaxis) et données essentielles de cisaillement direct cyclique sol-structure, développé dans le cadre du PN SOLCYP, est présenté. On modélise le comportement des pieux sous chargement cyclique axial, de l'installation à la dégradation cyclique du frottement latéral. Les résultats sont comparés à ceux d'un essai de pieu foré réel.

ABSTRACT – A special simplified modelling tool, mixing finite element software (Plaxis) and essential data of soil-structure cyclic direct shear, developed in the framework of the French national program SOLCYP, is presented. The behaviour of piles subjected to cyclic axial loading is modelled. The mechanism of installation and the cyclic degradation of friction are treated. The results are compared with the test of a real bored pile.

1. Introduction et bref état de l'art

La modélisation du comportement des pieux sous chargement cyclique est ici envisagée par la méthode des éléments finis. La prise en compte de l'accumulation (des déformations ou des pressions interstitielles) peut être abordée par le biais de deux méthodes que Wichtman et al (2005) désignent par méthodes « implicites » et « explicites », et qu'ils combinent. Avec les méthodes implicites chaque cycle est calculé pas à pas à l'aide d'un modèle constitutif : modèles élasto-plastiques (Prevost, 1977; Mroz et al, 1978; Chaboche 1994) ; modèles endochroniques (Valanis and Lee, 1984) ; modèles hypoplastiques (Gudehus, 1996, Niemunis et al, 1997). L'apport des surfaces de charges emboîtées a été exploré par Papon (2010), Dafalias et al (1982) tandis que les modèles à surfaces multiples de charge à écrouissage cinématique ont été examinés par Al Tabbaa (1987) et Grammatikopoulou (2004). La procédure implicite s'avère peu applicable au-delà d'un certain nombre de cycles en raison d'une part des temps de calcul, et d'autre part des erreurs accumulées par les modèles. Les approches explicites sont plus efficaces pour simuler l'effet d'un grand nombre de cycles. L'accumulation des déformations permanentes est traitée comme un problème de pseudo-fluage (Boulon et al, 1984). Le bilan des cycles est défini par des algorithmes externes et injecté dans le calcul à des étapes particulières : Wichtman (2005), Dyaljee et al (1982), Boukoulas et al (1984), Kaggawa et al (1991), Gotschol (2002)-. Papon (2010) et Cao et al (2012) ont exploré respectivement la technique d' « homogénéisation temporelle » et celle des « sauts de cycles ».

2. L'approche SOLCYP

L'approche proposée dans le cadre SOLCYP est une approche explicite simplifiée alliant l'outil éléments finis et les résultats expérimentaux essentiels du comportement des interfaces sol-structure en cisaillement cyclique (Pra-ai, 2013). On décrit l'évolution

moyenne au cours des cycles (pseudo-fluage cyclique dans lequel le nombre de cycles agit comme un temps fictif). On privilégie l'interface sol-pieu car la diffusion des contraintes dues au chargement du pieu s'opère en $1/r$ à partir du fût (r distance à l'axe du pieu). Le sol contigu confine le pieu (et l'interface), selon la rigidité normale du massif de sol, $k_n \approx 2G/R$ (G module de cisaillement local du sol, R rayon du pieu, Boulon et Foray, 1986). Les chemins de cisaillement cyclique mobilisés le long du pieu sont à rigidité normale imposée -essais dits CNS - (Pra-ai et al, 2016). Cette rigidité est généralement faible, de l'ordre de 200 à 1000 kPa/mm pour les pieux courants. Les essais cycliques CNS sont toujours contractants, conduisant à une diminution de contrainte normale sur le pieu. La dégradation du frottement correspond à une réduction du niveau de contrainte normale (cyclique moyenne) le long du fût, qui est retenue essentiellement comme effet des cycles.

La modélisation est axisymétrique avec éléments de volume, et d'interface sol-pieu. Le pieu est sollicité par une force en tête. Le modèle constitutif du pieu est élastique, celui du sol élasto-plastique de Mohr Coulomb, excepté dans une fine couche de très faible épaisseur (éléments de contrôle, EDC) jouxtant l'interface sol-pieu le long du fût, où la loi est plus élaborée, avec module d'Young fonction de la contrainte moyenne, et limitation de la dilatance.

L'ensemble des cycles imposés en tête de pieu est divisé en plusieurs séries. Pour chaque série, les éléments finis fournissent une approximation -supposée acceptable- des chemins cycliques locaux d'interface, par calcul pas à pas d'un cycle entier. Un module externe (CCN, comme chute de contrainte normale) détermine la distribution de la chute le long du pieu en fonction des paramètres des cycles locaux. Cette distribution de chute est transmise aux EDC pour un calcul pas à pas de l'évolution cyclique moyenne. Pour chaque série, le calcul non linéaire est agencé ainsi pour un pieu foré:

- a - Initialisation géostatique, selon un état K_0 , pour le sol environnant le pieu.
- b - Installation du pieu.
- c - Traitement du premier cycle de la série (S) de cycles, comportant N_s cycles identiques en tête-. Application pas à pas de la charge nominale (moyenne) en tête.
- d - Chargement pas à pas : charge maximum, minimum, puis nominale moyenne.
- e - Extraction, depuis les éléments d'interface, des paramètres locaux des cycles.
- f - Calcul, dans le module CCN, des chemins CNS correspondant aux paramètres extraits en e), et de la distribution de chute de contrainte normale due aux N_s cycles.
- g - Calcul, par la méthode des coefficients d'influence, de la distribution de variation de volume dans les EDC, générant la distribution de chute de contrainte normale souhaitée.
- h - Calcul pas à pas, en éléments finis, de la phase de pseudo-fluage cyclique modélisant les N_s cycles de la série (S), à charge nominale moyenne en tête constante.

3. Exemple du pieu foré F2 de Loon-Plage (cadre des essais SOLCYP)

3.1. Le pieu et le sol environnant

Le pieu F2, foré de type CFA, en béton armé (diamètre 420 mm, longueur 10.5 m), est fiché dans une couche de sable dense ($I_D = 0.8$) surmontant une couche d'argile raide (figure 1a). Le poids volumique en place est de 20 kN/m³. Le toit de la nappe phréatique est en surface. Les propriétés mécaniques préliminaires proviennent d'essais in situ (pénétrromètres statiques et pressiomètres) et de laboratoire (Benzaria, 2013). Le module pressiométrique E_m supposant un coefficient de Poisson égal à 0.3 vaut, dans le sable, en surface 1 MPa, gradient 2 MPa/m, et dans l'argile, à la profondeur 12m, 2 MPa, gradient 0.875 MPa/m). Les angles de frottement valent 38.1° dans le sable, et 26.8° à l'interface

sable-pieu. Dans l'argile, la cohésion non drainée est $C_u = 50$ kPa à la profondeur 12m, avec un gradient de 11.7 kPa/m.

3.2. Géométrie et choix techniques éléments finis

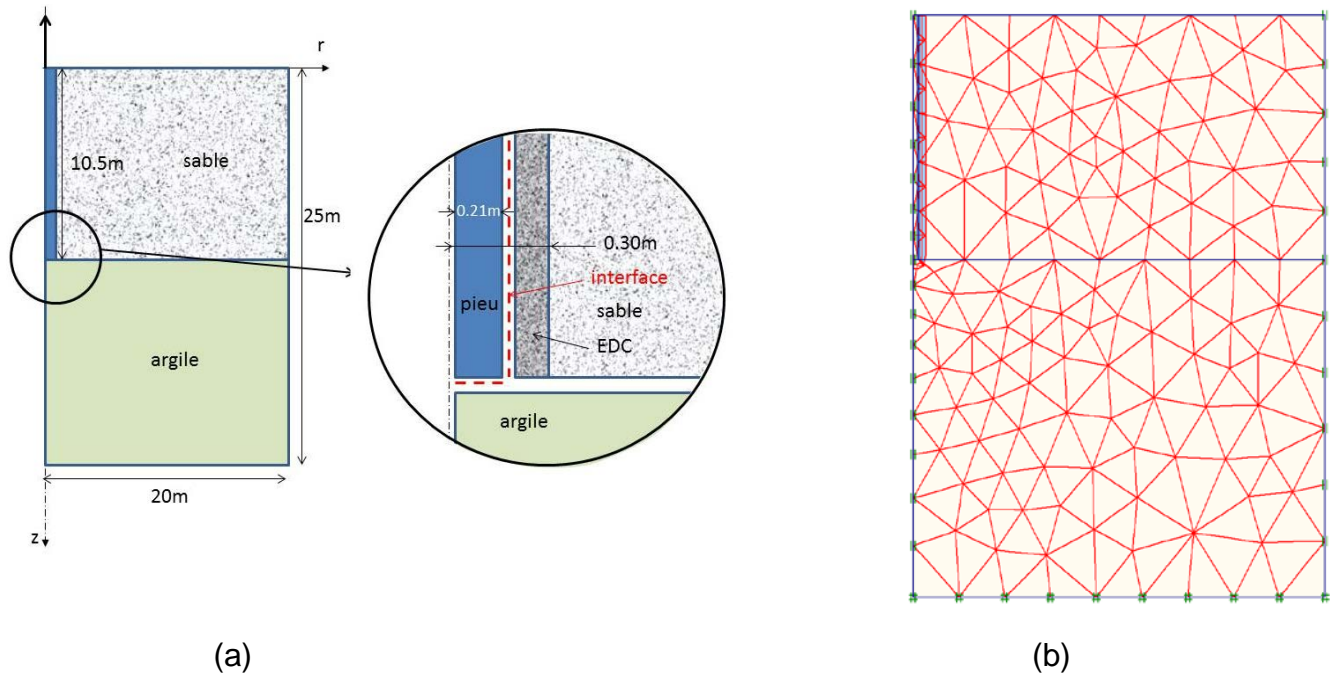


Figure 1. Géométrie et maillage éléments finis.

Le logiciel éléments finis utilisé est Plaxis V8. Le maillage (figure 1b) est composé de 281 éléments T15, dont 20 pour le pieu. Des éléments d'interface isovolume existent au contact sol pieu, ainsi qu'une fine couche de 10 éléments de contrôle (EDC) d'épaisseur 0,09 m. Les conditions aux limites en déplacement sont: frontière inférieure du domaine bloquée et externe glissante verticalement. Le pieu est chargé par une force en tête.

3.3. Affinement des propriétés mécaniques

Vu le faible niveau de déformation, radiale à l'interface sol-pieu, les caractéristiques pressiométriques ne sont pas pertinentes. On majore donc les modules d'Young du sable selon une identification définitive menée en analyse inverse, grâce aux données de l'essai de pieu F1, mené jusqu'à la rupture en arrachement monotone, F1 et F2 étant deux pieux de fabrication identique situés à quelques mètres de distance. Les traits retenus pour l'identification sont le palier de force d'arrachement à la rupture (≈ 800 kN), et la rigidité sécante de la courbe force déplacement en tête, jusqu'au palier (56 kN/mm). Les données de départ sont la distribution pressiométrique du module d'Young du sable, le taux de dilatance, et l'indice des vides maximum dans les EDC. La courbe charge-déplacement obtenue est représentée sur la figure 2. Le module pressiométrique a été majoré dans un rapport 10, L'angle de dilatance est de 9° . Les indices des vides initial et maximum sont de 0,50 et 0,62.

3.4. Installation du pieu

A partir de l'état géostatique ($K_0 = 0,5$) dans le sol vierge, l'installation du pieu consiste à placer dans l'emprise du pieu le matériau homogène équivalent au béton armé ($\gamma_d = 25 \text{ kN/m}^3$, $E = 2,43 \times 10^4 \text{ MPa}$, $\nu = 0.4$).

3.5. Modélisation de l'essai cyclique F2 TC1 cycle1 à 367 puis arrachement final

La première étape du chargement consiste à modéliser la courbe force déplacement en tête au cours du premier cycle, avec rechargement jusqu'à la force moyenne (figure 3). Le tableau 1 résume le dialogue éléments finis - module CCN, à diverses profondeurs typiques du fût, selon la modélisation des essais de cisaillement (Pittos, 2014).

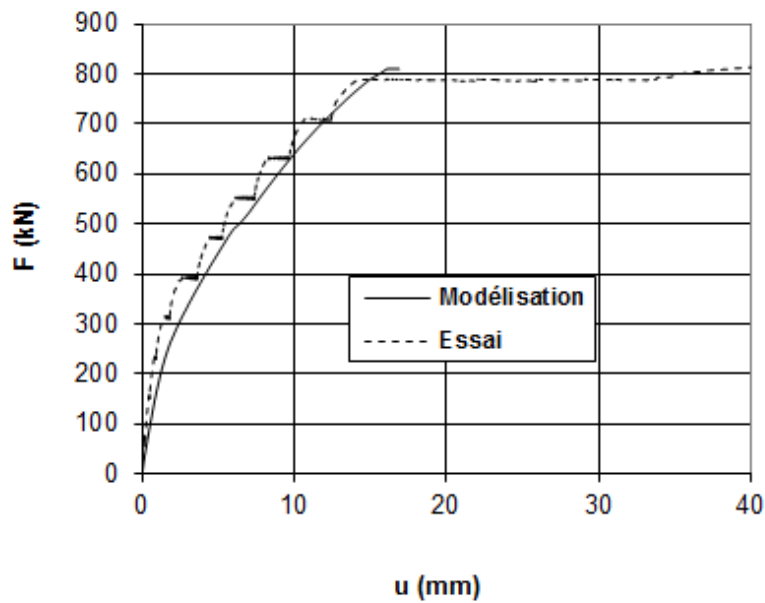


Figure 2. Essai F1, courbes force déplacement en tête, mesures in situ et modélisation.

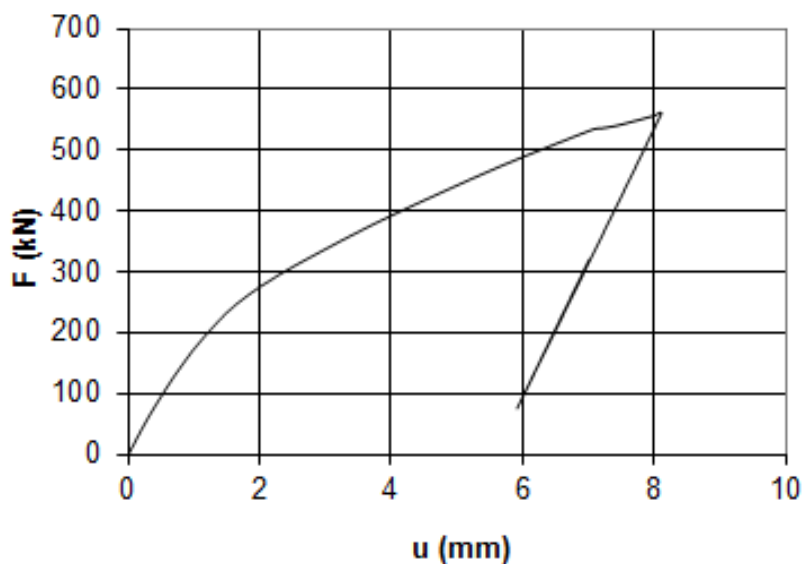


Figure 3. Essai F2 TC1, courbe force déplacement en tête au cours du premier cycle.

Tableau 1. Entrées vers le module CCN (cycle 1) et sortie du module CCN, vers les EDC.

Profondeur (m)	Entrée éléments finis vers CCN (cycle 1)				Sortie CCN vers éléments finis
	σ_{ncm} (kPa)	τ_{cm} (kPa)	$\Delta\tau$ (kPa)	k_n (kPa/mm)	Chute de contrainte normale au cours des cycles 2 à 367, selon méthode SOLCYP, par module CCN, $\Delta\sigma_n$ (kPa)
1	28,3	3,4	24,3	308	-17
3	54,6	13,0	30,4	471	-32
5	81,4	25,3	33,3	591	-38
7	103,5	35,8	35,1	690	-38
9	140,4	41,2	38,5	777	-43

Les entrées fournies par le module éléments finis vers le module CCN sont : les contraintes normale et de cisaillement cycliques moyennes, l'amplitude de cisaillement cyclique, et la rigidité normale. La sortie du module CCN en vue de l'actualisation par éléments finis, est la chute de contrainte normale cyclique moyenne (ici 367 cycles).

La comparaison essai-modélisation fait l'objet des figures 4 (force - déplacement en tête) et 5 (déplacement cyclique moyen en tête - nombre de cycles). On constate une similitude très satisfaisante entre la modélisation cyclique et les résultats expérimentaux :

- La rupture (définie pour un déplacement relatif en tête du pieu égal à $B/10$, soit 42 mm) sous le chargement cyclique imposé est obtenue pour un nombre de cycles très voisin (Figure 5) ;
- Les déplacements sont faibles sous les 200 à 250 premiers cycles, et s'accroissent au-delà de 300 cycles.

Par contre, la modélisation de l'arrachement post-cyclique suggère une perte d'environ 20% de la capacité limite du pieu sous chargement monotone, inférieure à la perte observée expérimentalement (environ 40%).

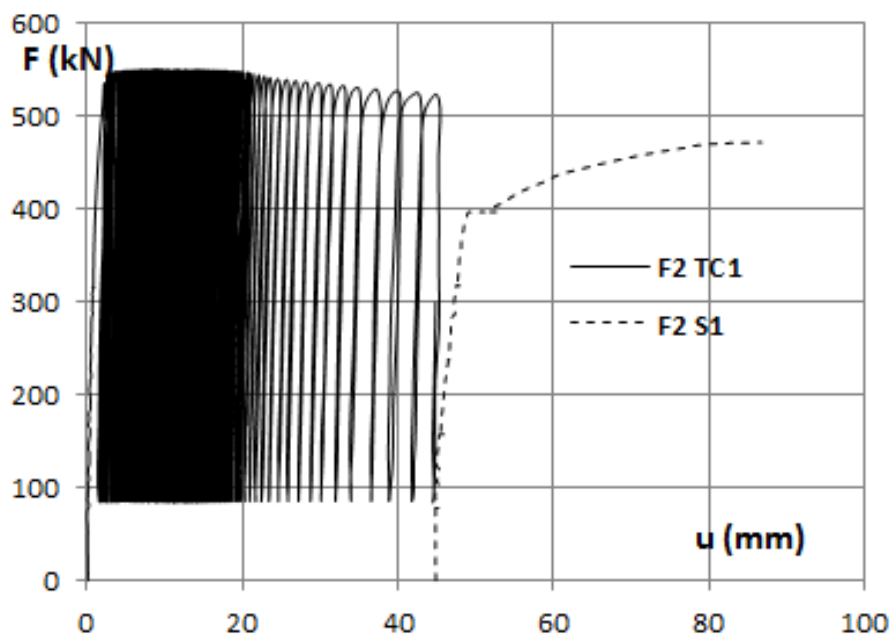


Figure 4a. L'essai F2 TC1, force déplacement en tête, 367 cycles puis arrachement final.

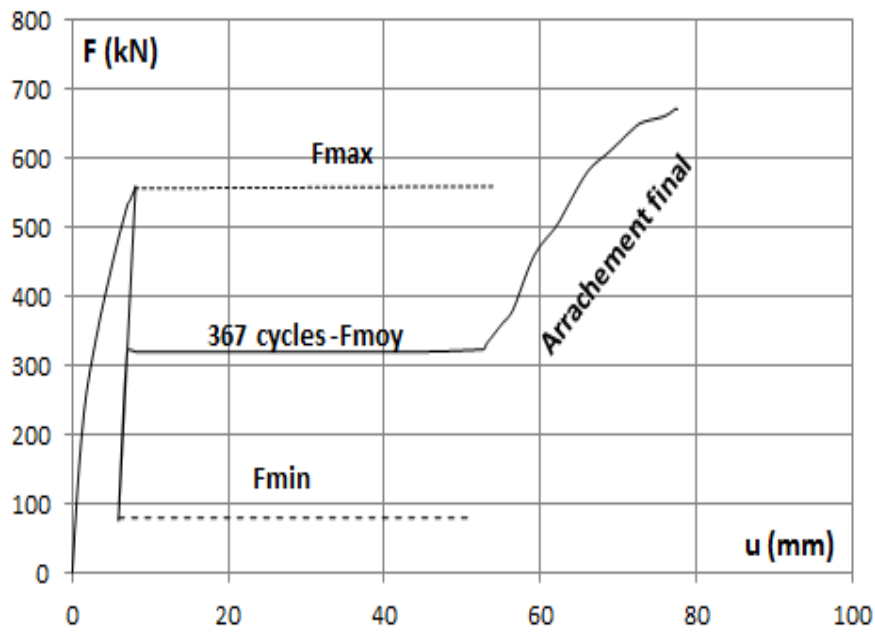


Figure 4b. Modélisation de l'essai F2 TC1, force déplacement en tête, 367 cycles puis arrachement final.

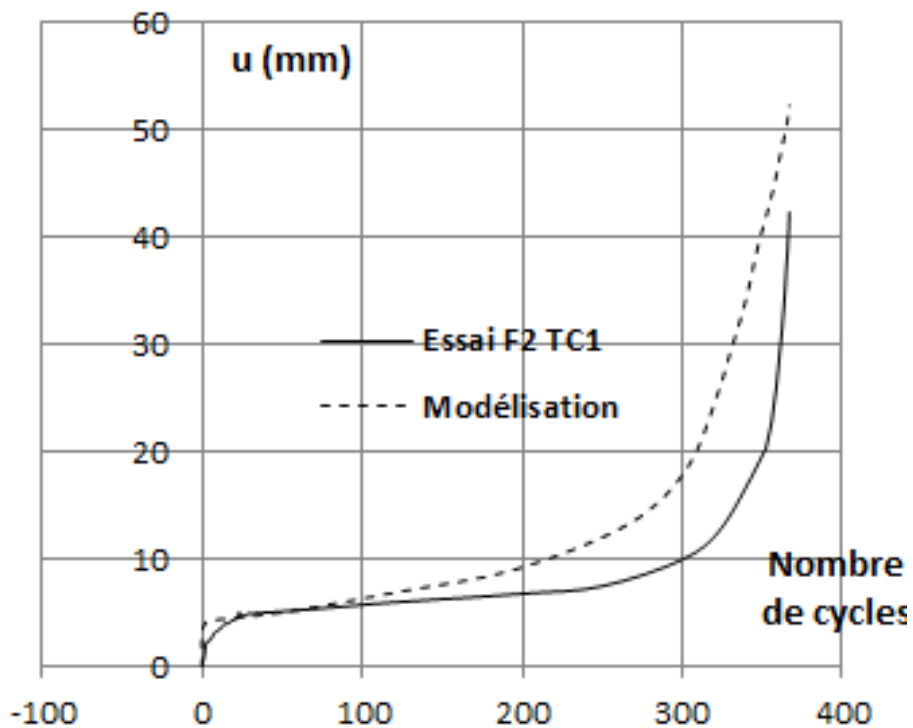


Figure 5. Essai F2 TC1, déplacement en tête, fonction du nombre de cycles.

La figure 6 présente, pour la modélisation, les distributions calculées de contraintes a) normale et b) de cisaillement le long du fût après un cycle et après 367 cycles, au milieu

de chacun de ces cycles (c'est-à-dire la force en tête étant la force nominale moyenne). L'information sur ces distributions est extraite des points de Gauss de l'interface sol-pieu. On constate la diminution générale des contraintes normales, et un transfert de la charge de la tête vers la pointe du pieu.

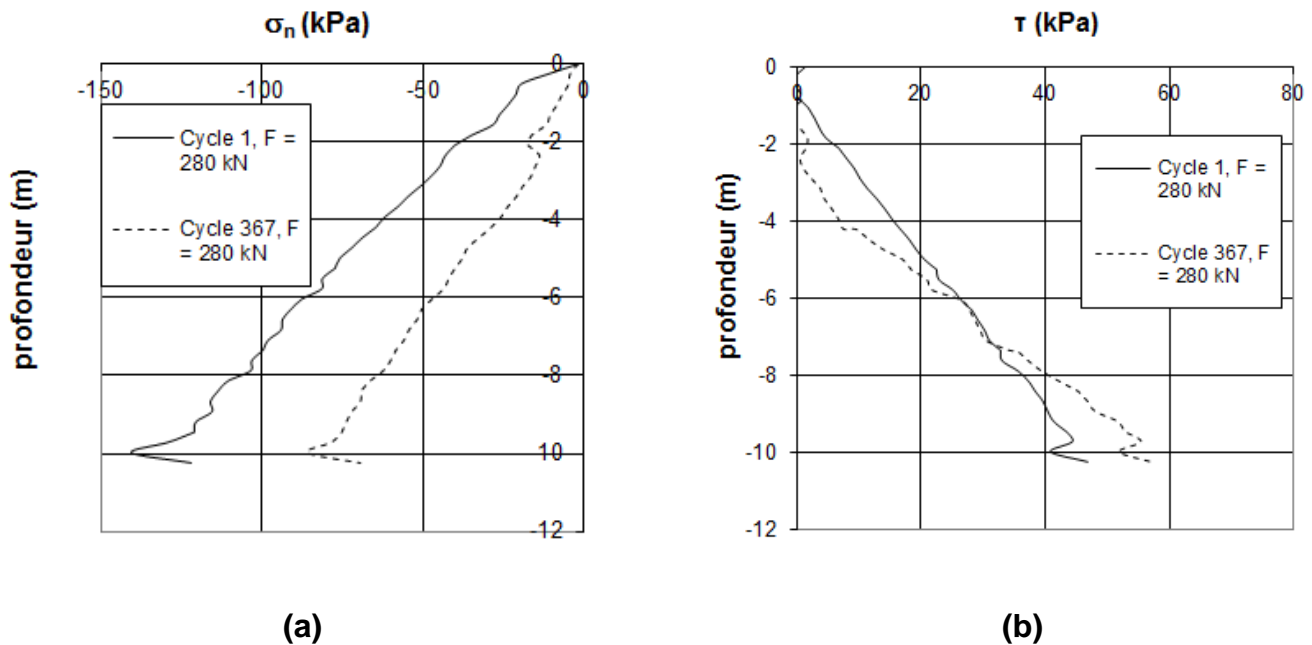


Figure 6. Distribution des contraintes sur le fût du pieu, aux cycles 1 et 367, sous la charge nominale moyenne (280 kN).

4. Conclusions

La méthodologie de modélisation simplifiée du comportement des pieux forés sous chargement axial cyclique telle que proposée dans le cadre du projet SOLCYP, fait appel a) à un logiciel éléments finis non linéaire, b) à une technique schématique (les EDC) permettant d'imposer localement sur le fût une chute de contrainte normale cyclique moyenne, et c) à un ensemble de résultats expérimentaux sur le cisaillement direct sol-structure, à rigidité normale imposée (CNS) notamment. Les résultats obtenus sont encourageants. L'application de la technique des EDC au cas des pieux battus nécessite une réflexion plus approfondie sur la modélisation du mécanisme d'installation.

5. Remerciements

Les travaux présentés ont été effectués dans le cadre du projet de recherche collaborative SOLCYP. Le financement a été assuré par l'ANR (ANR-SOLCYP), douze entreprises des secteurs Génie Civil et Energie, le Ministère du Développement Durable (MEDDE), la FNTP et la Région Pays de la Loire (PN-SOLCYP). C'est l'IREX qui a piloté ce projet.

6. Références bibliographiques

- Al Tabbaa A. (1987). Permeability and stress-strain response of speswhite kaolin. *PhD thesis, Cambridge University*.
- Benzaria O. (2013) Contribution à l'étude du comportement des pieux isolés sous chargements cycliques axiaux. *Thèse, Université de Paris-Est*.
- Boulon M., Puech A. (1984). Simulation numérique du comportement des pieux sous chargement axial cyclique, *Revue Française de Géotechnique*, 26, 7-20.
- Boulon M., Foray P. (1986). Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand, *3rd Int. Conf. on numerical methods in offshore piling, Nantes*.
- Boukoulas G., Whitman R. V., Marr W. A. (1984). Permanent Displacement of Sand with Cyclic Loading. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 110, No. 11, 1606-1623.
- Cao J., Mroueh H. and Burlon, S. (2012). Skipped cycles method for geotechnical structures under large number of cycle loads. *Offshore Site inv. & Geot., SUT, London*
- Chaboche J.L. (1994). Modeling of ratchetting: evaluation of various approaches. *Eur. Journal Mech. A/ Solids* 13, 501-518.
- Dafalias Y.F. and Herman L.R. (1982). Chapter : bounding surface formulation of soil plasticity. *Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads ;, pp 253-282, Wiley & Sons*.
- Diyaljee, V. A., Raymond, G. P. (1982) Repetitive Load Deformation of Cohesionless Soil. *Journ. of the Soil Mech. & Found. Eng. Div., ASCE, GT 10, 1215-1229*.
- Gotschol A. (2002). Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung. *Schrif-tenreihe Geotechnik, Universität Gh Kassel, Heft 12*.
- Grammatikopoulou A. (2004). Development, implementation & application of kinematic hardening models for overconsolidated clays. *PhD th., Imperial College, London*.
- Gudehus G. (1996). A comprehensive constitutive equation for granular materials. *Soil and Foundations, Vol. 36, 1, pp. 1-12*.
- Kaggawa W. S., Booker J. R. and Carter J. P. (1991). Residual Strains in Calcareous Sand due to Irregular Cyclic Loading. *Journ. of Geotech. Eng., ASCE, 117, 2, 201-218*.
- Mroz Z., Norris V. A., Zienkiewicz O. C. (1978). An anisotropic hardening model for soils and its application to cyclic loading, *IJNAMG, 203-221*.
- Niemunis A. and Herle I. (1997). Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, 2(4):279-299*.
- Papon A. (2010). Modélisation numérique du comportement des sols sous très grand nombre de cycles. Homogénéisation temporelle et identification des paramètres. *Thèse, Ecole Centrale de Nantes*.
- Pittos G. (2014). Contribution à la proposition de lois d'interface sol-pieu sous sollicitations cycliques. *Thèse Professionnelle, ENPC – École Centrale Paris*.
- Pra-ai, S. (2013). Essais et modélisation du cisaillement cyclique sol-structure à grand nombre de cycles. Application aux pieux. *Thèse, Université Grenoble-Alpes*.
- Pra-ai S., Pittos G., Boulon M., Puech A. (2016). Cisaillement direct sol-structure en vue du calcul des pieux, *Compte-rendus JNGG2016, à paraître, Nancy*.
- Prevost J.-H. (1977). Mathematical modelling of monotonic and cyclic undrained clay behavior. *IJNAMG, 1, 2, 195-216*.
- Valanis K. C. and Lee C. F. (1984). Endochronic theory of cyclic plasticity with applications. *Journal of Applied Mechanics, 51, pp367-374*.
- Wichtmann, T. (2005). Explicit Accumulation Model for Non-Cohesive Soils under Cyclic Loading. *In Th. Triantafyllidis (Ed.), Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 38*.