

# CISAILLEMENT DIRECT CYCLIQUE SOL-STRUCTURE EN VUE DU CALCUL DES PIEUX

## SOIL-STRUCTURE CYCLIC DIRECT SHEAR TESTS FOR PILE DESIGN

Suriyavut PRA-AI<sup>1</sup>, Georgios PITTOS<sup>2</sup>, Marc BOULON<sup>3</sup>, Alain PUECH<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ATTDC, School of Engineering, Université de Phayao, Thaïlande

<sup>2</sup> Société OTM, Athènes Grèce

<sup>3</sup> Université Grenoble Alpes, Laboratoire 3SR

<sup>4</sup> FugroGeoConsulting, Nanterre

**RÉSUMÉ** – On présente ici les résultats de travaux réalisés dans le cadre ANR et programme national SOLCYP : d'une part, une campagne d'essais de cisaillement direct cyclique sol-structure, et d'autre part leur formulation en vue d'un calcul simple du comportement des pieux sous chargement axial cyclique. Le sol est le sable de Fontainebleau NE34, et la structure une plaque d'acier rendue rugueuse (sable collé).

**ABSTRACT** – This paper presents the results of a research work made in the framework of the ANR and national French program SOLCYP: on one side a campaign of cyclic soil-structure direct shear tests, and on the other side their formulation for a simple calculation of the behavior of piles under cyclic axial loading. The soil is the Fontainebleau NE34 sand and the structure a rough steel plate (sand glued on the plate).

### 1. Introduction

La première partie de cet article donne un aperçu d'un ensemble cohérent d'essais cycliques de cisaillement direct sol-structure, à grand nombre de cycles (Pra-ai, 2013). En seconde partie on présente les traits essentiels et les résultats de la formulation de ces résultats (Pittos, 2014) en vue d'une application directe au calcul du comportement des pieux sous sollicitation axiale cyclique (Abchir et al, 2016 ; Boulon et al, 2016).

L'expérimentation des géo-matériaux sous sollicitation cyclique à grand nombre de cycles est relativement rare. Dans ce domaine, on peut citer bien qu'il ne s'agisse pas d'interface sol-structure, la campagne très complète d'essais triaxiaux cycliques de Wichtmann (2005).. Cet auteur a d'ailleurs utilisé ses résultats dans des calculs éléments finis (Wichtmann et al, 2005). Dans le cadre des interfaces sol-structure sous sollicitation cyclique, quelques résultats sont disponibles, concernant l'expérimentation et la modélisation (Rezaie, 1994 ; Shahrour et al, 1997 ; Mortara et al, 2002). Les essais décrivent essentiellement le faible nombre de cycles, avec ses caractères classiques. Pour des cycles à seuils de contrainte de cisaillement imposés, il s'agit d'adaptation, ou d'accommodation, ou de rochet. Dans le cas de cycles à seuils de déplacement relatif tangentiel imposés, on constate soit un durcissement cyclique progressif, soit un adoucissement. Les modèles ci-dessus sont mis en œuvre par intégration numérique pas à pas tout au long de chaque cycle.

Dans le cadre SOLCYP, le grand nombre de cycles a été privilégié, et plutôt que la description du détail de chaque cycle, celle de l'évolution au cours des cycles, en s'attachant aux valeurs moyennes cycliques (c'est à dire au milieu de chaque cycle). Par ailleurs, étant donné le constat expérimental concernant la dégradation cyclique du frottement le long des pieux sous chargement cyclique (Boulon et al, 1986), les auteurs se

sont principalement attachés à décrire le phénomène à l'aide d'essais de cisaillement direct cyclique sol-structure. Ces essais exhibent une chute de contrainte normale sur des chemins particuliers de contraintes (à rigidité normale imposée, CNS), plutôt qu'une chute éventuelle, marginale, de coefficient de frottement (Hoteit, 1990). Les chemins de contraintes les plus représentatifs sont les chemins CNS, mais les chemins à contrainte normale imposée constante (CNL) sont également utiles.

## 2. Les essais de cisaillement direct

Les essais de comportement d'interface sol-structure, ont été réalisés à partir d'une boîte de cisaillement monodirectionnel, modifiée afin de produire tous les chemins de cisaillement possibles (Pra-ai, 2013), caractérisés par la rigidité normale ( $k_n = \Delta\sigma_n/\Delta[u]$ ,  $\sigma_n$  contrainte normale,  $[u]$  déplacement relatif normal) imposée à l'échantillon pendant le cisaillement. Ces chemins sont à contrainte normale constante (CNL,  $k_n = 0$ ), à volume constant (VC,  $k_n \rightarrow \infty$ ), et à rigidité normale imposée (CNS,  $0 < k_n < \infty$ ). Le matériau de structure est constitué d'une plaque métallique rigide, rendue très rugueuse (selon les critères classiques de rugosité) par collage de sable à sa surface. Le sable est le sable de Fontainebleau NE34, de  $d_{50}$  égal à 0,3 mm. La campagne d'essais de cisaillement direct cycliques a été conduite selon la procédure dite des plans d'expérience, étant donné le nombre élevé (6) de paramètres ( $I_{D0}$  indice initial de densité du sable,  $\sigma_{ncm0}$  contrainte normale cyclique moyenne initiale,  $\tau_{cm}$  contrainte de cisaillement cyclique moyenne (constante),  $\Delta\tau$  amplitude cyclique (constante, à laquelle correspond éventuellement l'amplitude de contrainte normale cyclique  $\Delta\sigma_{ncm}$ , selon le chemin),  $k_n$  rigidité normale imposée,  $N$  nombre de cycles). Les paramètres déduits des précédents ( $\eta_{cm}$ , cisaillement moyen normalisé par la contrainte normale cyclique moyenne, et en particulier  $\eta_{cm0}$  cisaillement cyclique moyen initial normalisé, et  $\Delta\eta$  l'amplitude cyclique normalisée) sont aussi utilisés (figure 1). Le tableau 1 résume le programme d'essais (une centaine), avec le choix des paramètres correspondant à chacun d'eux, menés jusqu'à 10000 cycles chaque fois qu'il l'était possible. Chacun de ces essais, piloté à la vitesse de déplacement relatif tangentiel de 0.5 mm/minute, a duré environ une semaine.

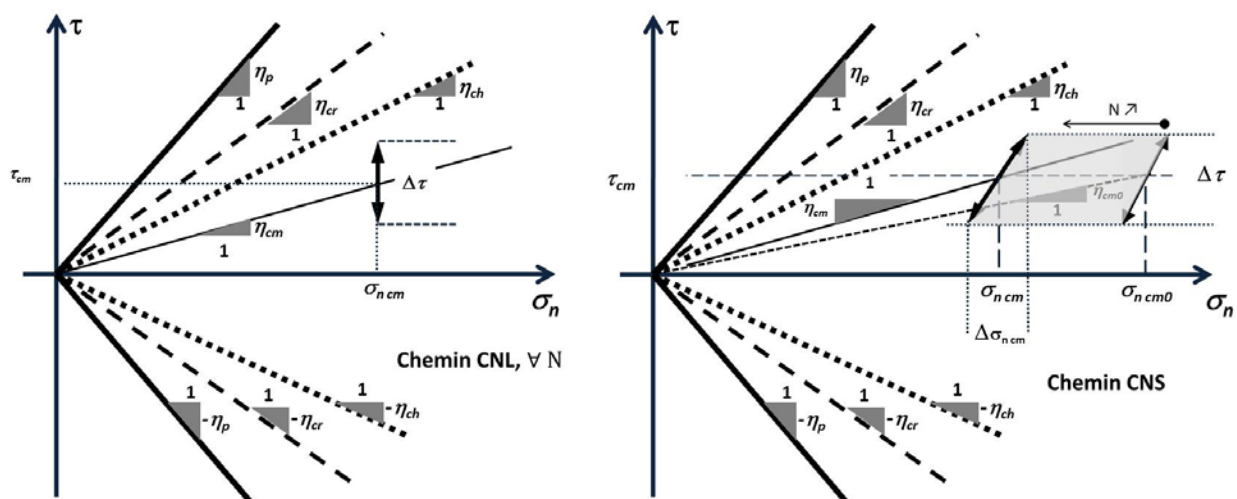


Figure 1. Plan des contraintes, paramètres constitutifs caractéristique, critique, de pic, et caractérisation des cycles, sur chemins CNL et CNS.

Tableau 1. Paramètres du programme d'essais de cisaillement direct cyclique sol-structure (plaque rugueuse-sable de Fontainebleau NE34), chemins CNL et CNS.

Chemin de cisaillement	$I_{D0}$ (%)	$\sigma'_{n\text{cm}0}$ (kPa)	$\eta_{\text{cm}0}$ (-)	$\Delta\tau$ (kPa)	$k_n$ (kPa/mm)
CNL	30 et 90 %	60	$0, \approx \frac{\eta_p}{2}, \approx \frac{9\eta_p}{10}$	10	0
		120	$0, \approx \frac{\eta_p}{2}, \approx \frac{9\eta_p}{10}$	10	
		310	$0, \approx \frac{\eta_p}{2}, \approx \frac{9\eta_p}{10}$	10, 20, 40	
CNS	30 et 90 %	100	$\approx \frac{\eta_p}{2}$	10 et 20	1000, 2000 et 5000

La figure 2 montre l'évolution des déplacements relatifs cycliques moyens - normal et tangentiel - d'un ensemble d'essais CNL, à la contrainte normale cyclique moyenne de 60 kPa. On constate l'influence de la densité initiale (faible, forte), du niveau de cisaillement cyclique moyen normalisé (faible, moyen, proche de  $\eta_p$ ), et de l'amplitude des cycles (10 ou 20 kPa). Les chemins à cisaillement cyclique moyen faible ou  $\approx \eta_p/2$  sont contractants et à déplacement relatif tangentiel limité, tandis que les chemins à cisaillement cyclique moyen élevé sont dilatants jusqu'à l'état critique. Ces résultats désignent bien l'état caractéristique (Luong, 1980). Les essais à cisaillement cyclique moyen élevé conduisent rapidement à un déplacement relatif tangentiel cyclique moyen très élevé.

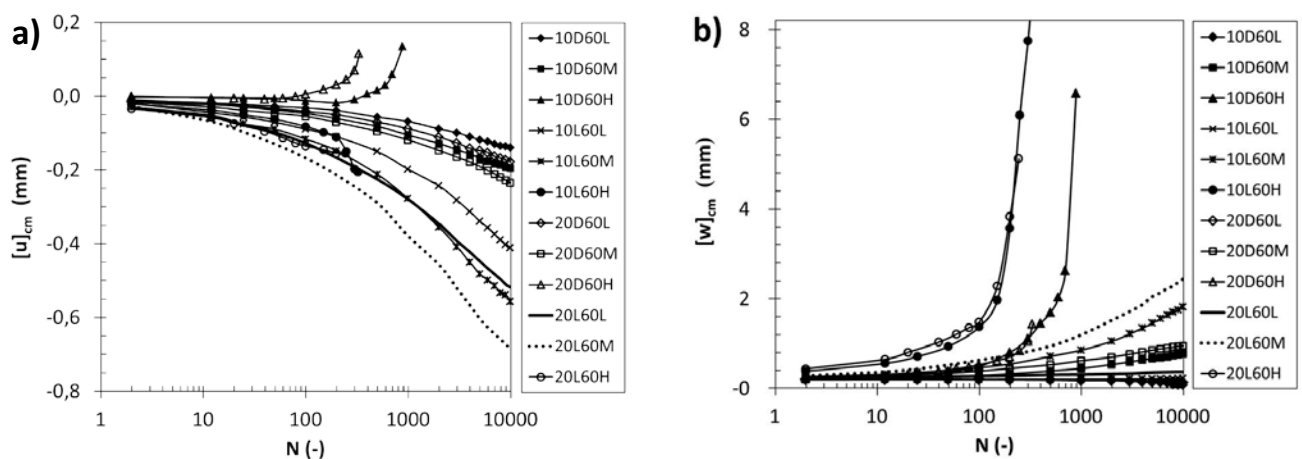


Figure 2. Cisaillement direct cyclique CNL sol-structure. Déplacements relatifs a) normal et b) tangentiel fonction du nombre de cycles,  $\sigma_{n\text{cm}} = 60$  kPa,  $\Delta\tau = 10$  et 20 kPa,  $I_{D0} = 30$  et 90%. Code des essais représentés: amplitude de cisaillement (kPa) ; D = Dense, L = Lâche ; 60 = contrainte normale cyclique moyenne ; cisaillement cyclique moyen L = faible, M = moyen, H = élevé.

Une particularité des essais cycliques CNS est leur contractance, quels que soient les paramètres courants d'essais, car l'échantillon subit des cycles en cisaillement associés à des cycles en contrainte normale (, un outil de compactage idéal). Sur la figure 3, est représenté un essai typique CNS à contrainte normale initiale élevée. On présente figure 4 une comparaison de deux essais CNS mettant en évidence l'effet du niveau de contrainte normale initiale sur le nombre de cycles à la rupture. Il existe plusieurs fins possibles pour un essai :

- L'essai proprement dit cesse lorsque les boucles cycliques atteignent l'état critique. Au-delà, il n'est plus physiquement possible de respecter la consigne de rigidité normale, ce qui donne alors lieu à un chemin non cyclique, en état critique, en direction de l'origine des contraintes, et à de grands déplacements relatifs tangentiels (figure 3 et figure 4 pour  $\sigma_{n\text{ cm}0} = 310$  kPa). C'est le cas à densité faible et contrainte normale initiale élevée.
- Le matériau d'interface se compacte peu sous l'effet de la sollicitation cyclique, car sa densité initiale est élevée, et/ou l'amplitude cyclique est faible. On observe alors une stabilisation des cycles, même pour un très grand nombre de cycles (jusqu'à 18000 dans cette campagne).
- Le matériau d'interface possède une résistance suffisamment faible pour donner lieu à de grands déplacements relatifs tangentiels dès le début de l'essai (figure 4 pour  $\sigma_{n\text{ cm}0} = 60$  kPa). L'essai prend fin car le déplacement relatif tangential est limité par l'équipement ( $\pm 15$  mm).

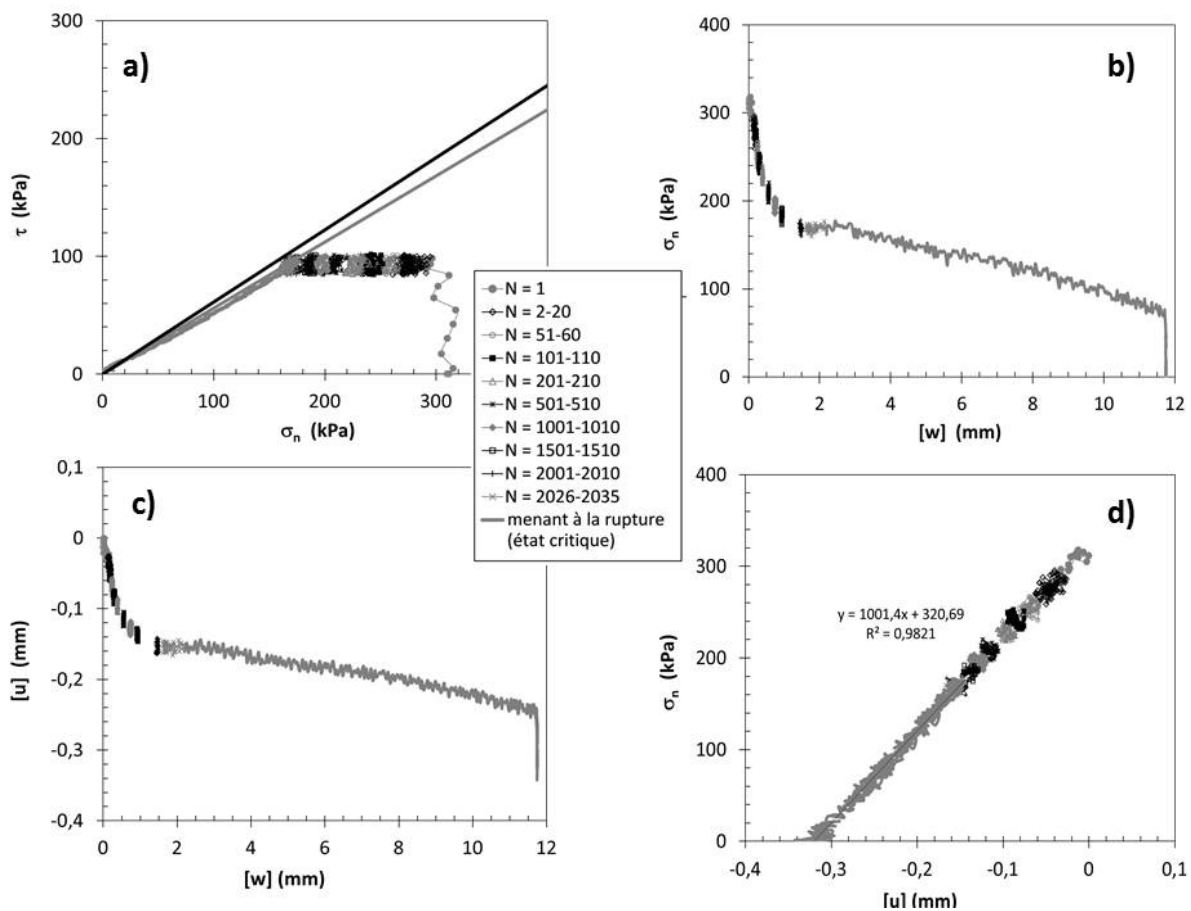


Figure 3. Cisaillement direct cyclique CNS sol-structure. a) plan de contraintes ; b), c) respectivement : contrainte normale et déplacement relatif normal (cycliques moyens) au cours des cycles, en fonction du déplacement relatif tangential cyclique moyen (cumulé);

d) plan de rigidité normale.  $\sigma_{n\text{cm}0} = 310$  kPa,  $\Delta\tau = 10$  kPa, sable lâche ( $I_{D0} = 30\%$ ).  $k_n = 1000$  kPa/mm.

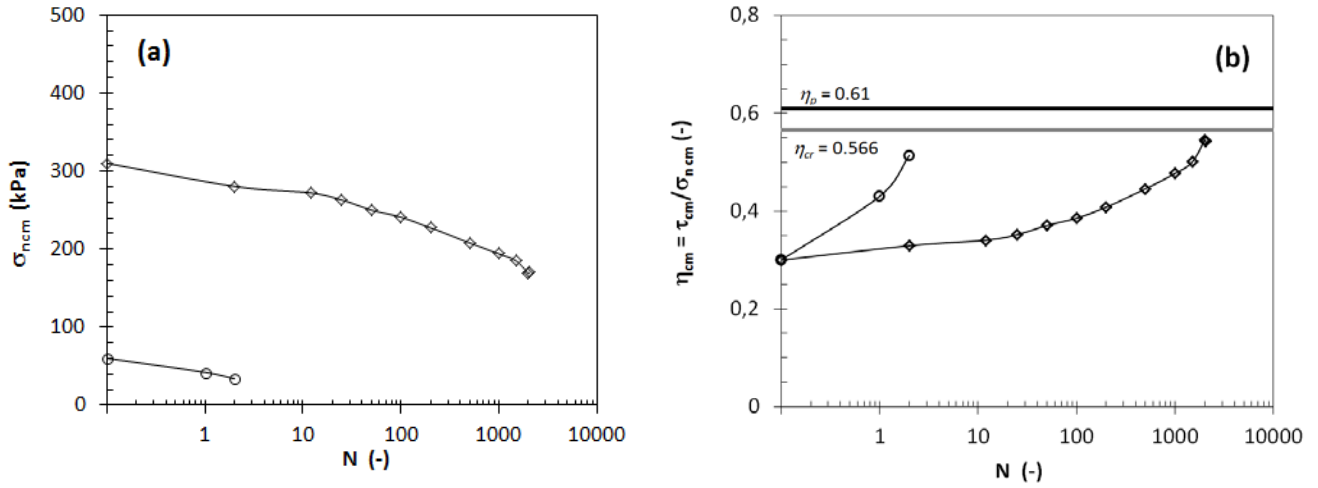


Figure 4. Deux essais CNS ( $I_{D0} \approx 30\%$ ,  $k_n = 1000$  kPa/mm,  $\Delta\tau = 10$  kPa,  $\eta_{\text{cm}0} = 0.30$ ).

Influence de la contrainte normale initiale (  $\ominus$   $\sigma_{n\text{cm}0} = 60$  kPa,  $\diamond$   $\sigma_{n\text{cm}0} = 310$  kPa) sur l'évolution a) de la contrainte normale cyclique moyenne et b) du cisaillement cyclique moyen normalisé.

### 3. Modélisation de $\Delta\sigma_{n\text{cm}}$ , chute de contrainte normale sur chemin CNS

La chute de contrainte normale cyclique moyenne modélisée ( $\Delta\sigma_{n\text{cm}}$ ) correspondant à une série de cycles de caractères identiques, sur chemin CNS, est une fonction de six variables, qui doit prendre en compte l'historique de séries variées de cycles antérieures.

$$\Delta\sigma_{n\text{cm}} = f(I_{D0}, \sigma_{n\text{cm}0}, \eta_{\text{cm}0}, \Delta\eta, k_n, N) \quad (1)$$

#### 3.1. Modélisation pour une série de cycles

La modélisation a suivi une approche phénoménologique, selon laquelle les résultats des essais élémentaires ont été agrégés par étapes. Ces étapes, succinctement décrites, utilisent MATLAB et EXCEL, et des fonctions d'approximation analytiques, à une ou plusieurs déterminations, selon les moindres carrés, l'interpolation étant l'outil principal. Les fonctions sech et Ln sont mises à contribution. Les données de départ sont les essais CNL disponibles (courants dans la littérature), auxquels on adjoint les essais CNS (plus rares, moins connus) afin de modéliser  $\Delta\sigma_{n\text{cm}}$  sur tous les chemins CNS possibles.

En première étape, sont formulées, pour les essais CNL disponibles, les  $M_0$  fonctions décrivant le déplacement relatif normal cyclique moyen  $[u]_{\text{cm}}$  :

$$[u]_{1\text{cm}, kn=0, j} = f_j(I_{D0j}, \sigma_{n\text{cm}0j}, \eta_{\text{cm}0j}, \Delta\eta_j, N) \quad (j = 1, M_0) \quad (2)$$

Puis on formule pour cette série d'essais CNL, l'effet de la contrainte normale cyclique moyenne  $\sigma_{n\text{cm}0}$ , réduisant le nombre ( $M_1$ ) de fonctions:

$$[u]_{2\text{cm}, kn=0, k} = f_k(I_{D0k}, \sigma_{n\text{cm}0}, \eta_{\text{cm}0k}, \Delta\eta_k, N) \quad (k = 1, M_1 \text{ et } M_1 < M_0) \quad (3)$$

Un exemple de données expérimentales traitées lors à cette étape est donné figure 5.

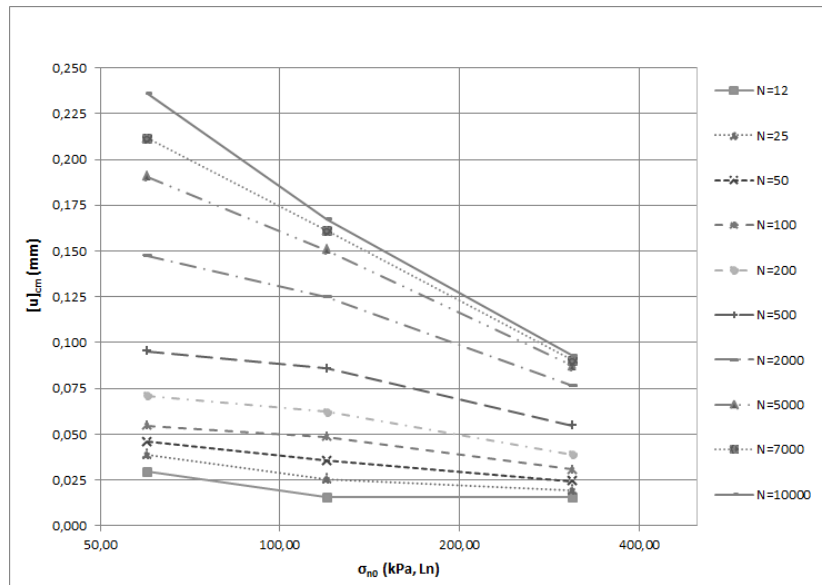


Figure 5. Chemin CNL. Effet de la contrainte normale sur le déplacement relatif normal cyclique moyen  $[u]_{cm}$ . Sable dense,  $\eta_{cm}$  moyen,  $\sigma_{ncm0} = 60, 120$  et  $310$  kPa.

Dans la troisième étape, l'effet de l'amplitude de cisaillement cyclique normalisé  $\Delta\eta$  est prise en compte, d'où les  $M_2$  fonctions :

$$[u]_{3cm, kn=0, l} = f_l(I_{D0l}, \sigma_{ncm0}, \eta_{cm0l}, \Delta\eta, N) \quad (l = 1, M_2 \text{ et } M_2 < M_1) \quad (4)$$

L'objet de la quatrième étape est l'intégration dans la fonction, qui se complexifie encore, du cisaillement cyclique moyen normalisé  $\eta_{cm0}$ . D'où :

$$[u]_{4cm, kn=0, m} = f_m(I_{D0l}, \sigma_{ncm0}, \eta_{cm0}, \Delta\eta, N) \quad (m = 1, M_3 \text{ et } M_3 < M_2) \quad (5)$$

On a pu constater l'importance de la contrainte de cisaillement maximum atteinte lors des cycles ( $\eta_{max0}$ ) -figure 6 (densité élevée, amplitude cyclique  $\Delta\eta$  (ou  $\Delta\tau$ ) constante-. Certains chemins de cisaillement, à cisaillement cyclique moyen très élevé, sont exceptionnellement dilatants, et ne sont pas décrits dans cette analyse.

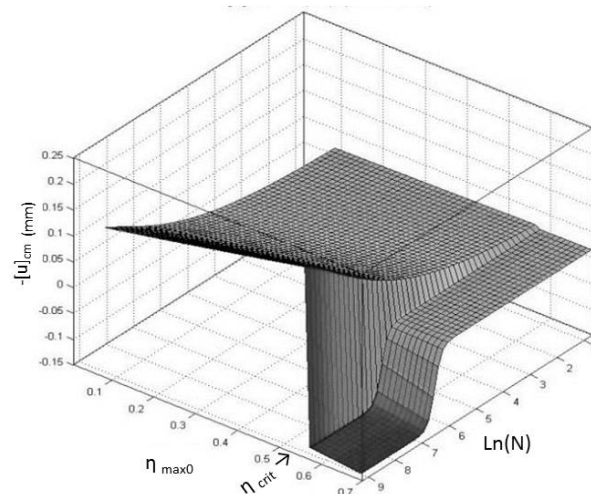


Figure 6. Essais cycliques CNL, densité élevée,  $\sigma_{ncm0} = 310$  kPa,  $\Delta\tau = 10$  kPa, Influence du niveau de cisaillement cyclique moyen  $\eta_{cm0}$ , et donc de  $\eta_{max0}$ .

A ce stade, les paramètres restant à prendre en compte dans la fonction  $[u]_{cm}(N)$  finale, sont : la rigidité normale  $k_n$ , l'indice initial de densité  $I_{D0}$ , et le nombre de cycles  $N$ . Concernant  $k_n$ , à densité  $I_{D0}$  donnée, un essai à rigidité normale imposée ( $k_n$ ) est intermédiaire entre deux extrêmes a) à contrainte normale constante ( $kn=0$ ), décrit par  $[u]_{cm}$ ,  $kn=0$ , et à volume constant (VC,  $k_n \rightarrow \infty$ ,  $[u]_{cm}=0$ ). Une interpolation spéciale (logarithmique) est choisie pour  $[u]_{cm}$ , entre  $kn=0$  et  $kn \rightarrow \infty$  (figure 7). L'interpolation sur  $I_{D0}$  est parabolique.

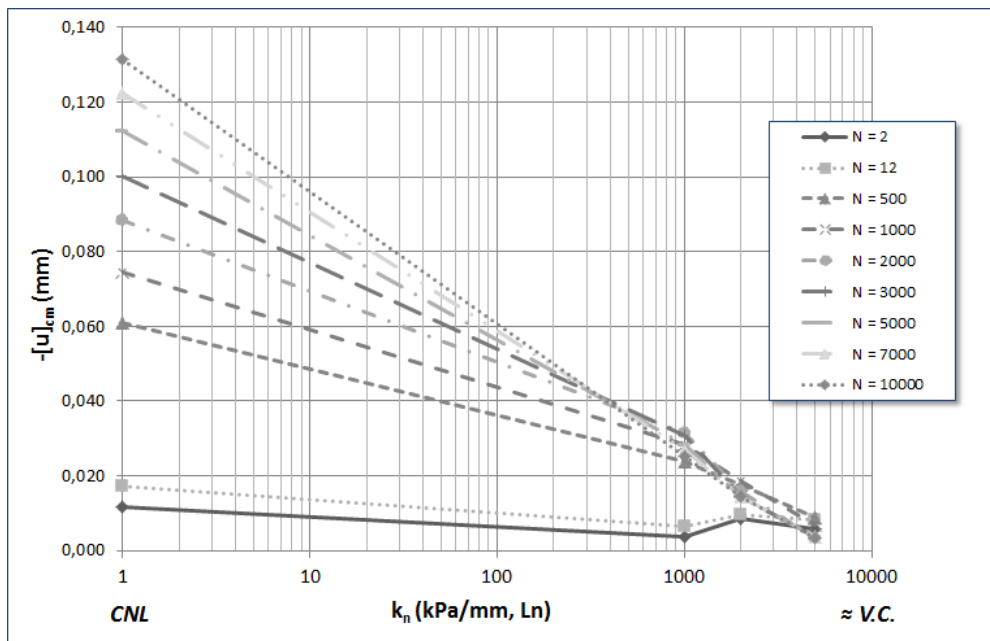


Figure 7. Essais cycliques CNS, densité élevée,  $\sigma_{ncm0} = 310$  kPa,  $\Delta\tau = 10$  kPa, influence de la rigidité normale  $k_n$ .

### 3.2. Abaques de chute de contrainte normale cyclique moyenne

Les résultats sont programmés dans un module 'excel' nommé CCN (comme chute de contrainte normale), et font l'objet d'abaques, dont la figure 8 donne un exemple typique.

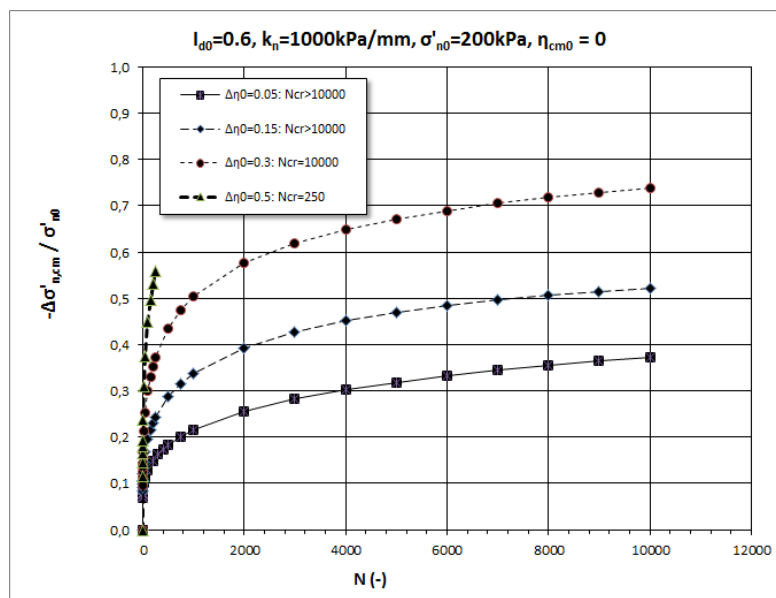


Figure 8. Un abaque de chute de contrainte normale cyclique moyenne utilisable pour le calcul de pieux sous chargement cyclique axial.

### 3.3. Enchaînement de deux ou plusieurs séries de cycles, cycles équivalents

Le paramètre de mémoire est le déplacement relatif normal cyclique moyen cumulé  $[u]_{cm}$ . Le matériau d'interface à l'indice initial de densité  $I_{D0}$ , subit une série de  $N_1$  cycles (caractéristiques  $\{\sigma_{n\ cm01}, \eta_{cm01}, \Delta\eta_1, k_{n1}\}$ ), qui l'amènent dans l'état  $\sigma_{n\ cm02}, \eta_{cm02}$  et  $[u]_{cm1}$ . Vient la seconde série,  $N_2$  cycles (caractéristiques  $\{\sigma_{n\ cm02}, \eta_{cm02}, \Delta\eta_2, k_{n2}\}$ ). On cherche sur les abaques le nombre  $N_{21\ eq}$  de cycles de caractéristiques 2, à l'indice initial de densité  $I_{D0}$ , qui aurait produit le déplacement relatif normal  $[u]_{cm1}$ . On enchaîne la seconde série de cycles, au terme de laquelle le matériau aura subi  $(N_2 + N_{21\ eq})$  cycles de caractéristiques 2, et un déplacement relatif normal cyclique moyen cumulé  $[u]_{cm2}$ .

## 4. Conclusions et remerciements

Cet article présente des essais de cisaillement direct cyclique sol-structure à grand nombre de cycles, sur chemins variés (CNL et CNS), et leur modélisation sur chemins à rigidité normale imposée, décrivant la chute associée de contrainte normale cyclique moyenne. Cette chute, caractéristique du contact sol-pieu sous chargement cyclique axial, est utilisée dans deux articles parents (Abchir et al, 2016 ; Boulon et al, 2016).

Ces travaux 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 du Génie Civil et de l'Energie, le Ministère du Développement Durable (MEDDE), la FNTF et la Région Pays de la Loire (PN-SOLCYP). Le Projet a été piloté par l'IREX.

## 5. Références bibliographiques

- Abchir Z., Burlon S., Pittos G., Boulon M., Puech A. (2016). Utilisation d'une loi t-z cyclique pour le calcul d'un pieu isolé soumis à un chargement axial cyclique. *Compte-rendus JNGG2016, Nancy, à paraître*.
- Boulon M., Foray P. (1986). Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand, *3<sup>rd</sup> Int. Conf. on num. methods in offshore piling, Nantes*.
- Boulon M., Pra-ai S. (2016). Modélisation par éléments finis du comportement des pieux à l'arrachement cyclique. *Compte-rendus JNGG2016, Nancy, à paraître*.
- Hoteit N. (1990). Contribution à l'étude du comportement d'interface sable – inclusion et application au frottement apparent. *Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble*.
- Luong M. P. (1980). Stress-strain aspects of cohesionless soils under cyclic loading, *Int. Symp. on Soils under Cyclic & Transient Loading, Swansea, pp. 315–324*.
- Mortara G., Boulon M., Ghionna V. (2002). A 2-D constitutive model for cyclic interface behavior. *I.J.N.A.M.G., n° 26, pp. 1071-1096*.
- 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). Behaviour of soil-structure interfaces subjected to a large number of cycles: Application to piles. *Thèse, Université de Grenoble, Laboratoire 3SR*.
- Rezaie F. (1994). Etude expérimentale et modélisation du comportement d'interface sols-structures sous chargements monotone et cyclique. *Thèse, Université Lille 1*.
- Shahrour I., Rezaie F. (1997). An elastoplastic constitutive relation for the soil-structure interface under cyclic loading. *Int. J. Computers and Geotechnics, 21, n°1, pp. 21-39*.



- Wichtmann T. (2005). Explicit accumulation model for non - cohesive soils under cyclic loading. *Thèse, Ruhr - Universität Bochum, Allemagne.*
- Wichtmann T., Niemunis A., Triantafyllidis A. T. (2005). Strain accumulation in sand due to cyclic loading during drained triaxial tests. *Soil Dynam. & Earthq. Eng'g*, 25, pp. 967-979.