

CONTRIBUTIONS AU DIMENSIONNEMENT DES PIEUX SOUS CHARGES AXIALES CYCLIQUES

CONTRIBUTIONS TO THE DIMENSIONING OF THE PILES UNDER CYCLIC AXIAL LOADS

Hiba EL ARJA¹, Zineb ABCHIR¹, Sébastien BURLON¹

¹Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement, et des Réseaux (IFSTTAR), Marne la Vallée 77447, France

RÉSUMÉ – Dans les différentes normes relatives au dimensionnement des fondations profondes, il n'existe pas de méthodologie précise pour prendre en compte le caractère cyclique du chargement qui peut aboutir à une rupture éventuelle après un certain nombre de cycles. Le présent article présente deux techniques de modélisation des pieux sous charges axiales cycliques afin d'améliorer leur dimensionnement sous de tels chargements : la méthode des courbes de transfert et la technique du macroélément.

ABSTRACT – No precise procedure taking into account the cyclic contributions of loads exist in the various standards related to the design of deep foundations. In order to improve pile design in such situations, this paper presents two techniques to simulate the cyclic axially pile behaviour: the transfer curve method and the macroelement technique.

1. Introduction

Le terme « chargement cyclique » fait référence à un mode de chargement variable dans le temps. Il s'applique pour un certain nombre de cycles avec une amplitude constante et une période constante. Les fondations profondes peuvent subir selon les structures qu'ils supportent des chargements cycliques dans les directions axiales ou transversales. Néanmoins, les règlements actuels comme l'Eurocode 7 (CEN, 2004) ou l'API (API, 2011), etc. ne prennent pas directement en compte le caractère cyclique du chargement. Deux techniques de modélisation des pieux sous charges axiales cycliques sont utilisées et comparées dans le présent article afin d'améliorer le dimensionnement des pieux sous de tels chargements : la méthode des courbes de transfert d'une part, et la technique du macroélément, d'autre part. La méthode des courbes de transfert met en œuvre une loi t-z cyclique combinée à une méthode de dégradation des frottements axiaux unitaires (modèle ABC). Le macroélément est quant à lui développé selon une loi de comportement élastoplastique incluant des écrouissages isotropes et cinématiques non linéaires.

Le chargement cyclique régulier est caractérisé par la composante moyenne de la charge cyclique appliquée en tête de pieu Q_{moy} , la demi-amplitude de la charge cyclique appliquée en tête de pieu Q_{cyc} , la période des cycles T et le nombre de cycles N .

2. La méthode des courbes de transfert

La méthode "des courbes de transfert" a été décrite la première fois par Coyle et Reese (1966). Le pieu est représenté par une poutre élastique discrétisée en une série de segments avec des propriétés qui évoluent en fonction de la profondeur et l'interaction avec le sol. À chaque élément du pieu est associée une courbe de transfert reliant la contrainte transmise par cet élément à son déplacement w_z . Cette méthode de courbes de transfert est la plus utilisée et elle constitue la base du modèle cyclique présenté dans cet article.

2.1. Modèle T-z cyclique pour la prévision du comportement des pieux sous chargement axial cyclique

Le modèle TZC (Abchir, 2016 ; Burlon et al., 2013) basé sur le principe des courbes de transfert est une extension du modèle statique appelé AB1 (Abchir et al., 2016). Afin de prendre en compte le caractère cyclique du chargement, des paramètres cycliques permettant de prendre en compte la dégradation du frottement axial limite, l'accumulation des déplacements en tête de pieu et la variation de la rigidité du sol sont introduits dans AB1. La chute du frottement axial limite est estimée par la méthode ABC (Jardine et Standing, 2000). La combinaison du modèle TZC et la méthode ABC est appelée TZC-ABC. Le frottement mobilisé au niveau de chaque tronçon est donné par l'équation (1) :

$$\tau_{(w_z)} = \tau_{i-1} + A_i(-1)^{i+1}(q_{s1} + \Delta q_{s(i)}) \left(1 - e^{-R_i R_f \frac{|w_z - w_{zi-1}|}{\lambda_s}} \right) \quad (1)$$

w_z est le déplacement vertical au niveau de chaque tronçon, i est le nombre du demi-cycle considéré (demi-cycle de chargement ou demi-cycle de déchargement) et λ_s est un paramètre qui contrôle la rigidité initiale du sol situé à l'interface sol-pieu. A_i et R_i (Équation 2 et Équation 3) sont des paramètres qui contrôlent la rigidité du sol lors des déchargements et la variation de la raideur des courbes avec le nombre de cycles :

$$A_i = \left| \frac{\tau_i}{q_s} - (-1)^{i+1} \right| \quad \text{et} \quad R_i = e^{-(i-1)\xi} + \rho(1 - e^{-(i-1)\xi}) \quad (2) \text{ et } (3)$$

ξ est un paramètre qui contrôle la vitesse d'augmentation du paramètre R_i pour atteindre sa valeur limite ρ . R_f est égale au rapport du frottement axial limite avant le chargement cyclique q_s et le frottement axial limite q_{sN} au cycle N. Afin de reproduire la variation des contraintes à l'interface sol-pieu au cours d'un chargement cyclique, un procédé d'actualisation a été mis en place. Le même modèle TZC est utilisé pour modéliser le comportement à la base du pieu en chargement monotone et cyclique (Équation 4) :

$$q_{(w_b)} = q_{i-1} + A_{bi}(-1)^{i+1}(q_b + \Delta q_b) \left(1 - e^{-\frac{|w_b - w_{bi-1}|}{\lambda_b}} \right) \quad (4)$$

2.2. Données et critère de stabilité

Ce modèle a été préalablement testé en traction cyclique répétée (Abchir, 2016). L'objectif est de tester l'outil de calcul en compression répétée et en chargement alterné. Le pieu utilisé dans ces calculs, appelé pieu R3, est un pieu ouvert en acier battu dans le sable relativement dense du site de Dunkerque. Il a été testé par l'I.C.L. dans le cadre du projet GOPAL (Jardine et Standing, 2000). Dans le cadre de ces calculs, plusieurs combinaisons de Q_{moy} et Q_{cyc} ont été appliqués au pieu R3. Les propriétés du pieu R3 sont présentées dans le tableau 1.

Les paramètres statiques et cycliques du modèle TZC ont été déterminés par calage avec les mesures des essais en traction monotone et cyclique (tableau 2). La méthode ICP (Jardine, 2005) est utilisée pour le calcul des frottements limites axiaux initiaux q_s et la résistance de la pointe R_b . Les paramètres cycliques A, B et C sont issues d'essais de cisaillement simples cycliques (Jardine et Standing, 2000) : A=-0.083, B=-0.06 et C=0.355.

Les critères de stabilité du pieu sous charges cycliques ont été définis différemment par plusieurs auteurs. Jardine et Standing (2012) considèrent que le comportement stable est défini par une faible vitesse d'accumulation des déplacements sans atteinte de rupture après 1000 cycles. Un comportement métastable est défini par une accumulation des déplacements à des vitesses modérées, et la rupture est observée pour un nombre de

cycles compris entre 100 et 1000. Le comportement instable est défini par une rapide accumulation des déplacements conduisant à une rupture pour un nombre de cycles inférieur à 100.

La rupture est définie par deux aspects. La rupture en déplacement définit par un déplacement en tête de pieu supérieur à la valeur conventionnellement autorisée égale à 10% du diamètre du pieu et la rupture par défaut d'équilibre entre les efforts appliqués au pieu et sa résistance..

Tableau 1. Caractéristiques du pieu R3

Longueur (m)	Diamètre extérieur B_{ext} (m)	Diamètre intérieur B_{int} (m)	Résistance à la traction R_s (kN)	Résistance de la pointe R_b (kN)	Capacité portante en compression R_c (kN)
19.24	0.457	0.4235	2315	941.82	3259

Tableau 2. Paramètres monotones et cycliques du modèle TZC

e (m)	Sol	n_{couche}	Rhéologie	ρ	ξ	λ_s	λ_b
0.5	Sables	37	grenu	20	1	0.3	1
0.247	Sables	3	grenu	20	1	0.3	1

2.3. Développement d'un diagramme de stabilité

Une concordance entre les résultats du modèles TZC-ABC et l'état d'art a été mise en évidence pour les différents types de chargements cycliques appliqués sur le pieu R3 (Abchir, 2016). Il s'ensuit qu'il est possible de proposer un diagramme de stabilité permettant d'estimer le comportement du pieu sous charges axiales cycliques, le nombre de cycles nécessaires pour atteindre la rupture ainsi que le mode de rupture qui peut avoir lieu (figure 1). Ce diagramme correspond aux pieux battus dans le sable. Le nombre de cycles pour atteindre la rupture a été estimé par extrapolation pour les chargements en traction et compression alternées où l'outil de calcul présente quelques limitations.

Les lignes en pointillées limitent les trois zones caractérisant le comportement du pieu R3 sous chargement cyclique stable, métastable et instable. Les deux lignes DE et DF séparent entre les chargements cycliques alternés ($Q_{cyc} > Q_{moy}$) et les chargements cycliques répétés ($Q_{cyc} < Q_{moy}$). Les lignes BA et BC correspondent aux combinaisons nécessaires pour atteindre la rupture sans dégradation de la capacité portante ($Q_{max} = R_c$ ou $Q_{min} = -R_s$). Chaque point correspond à un chargement cyclique défini par une charge moyenne et une amplitude cyclique normalisées par la capacité portante du pieu. Le nombre de cycles nécessaire pour atteindre la rupture est mentionné à côté de quelques points. Dans la zone stable, le nombre > 1000 indique que le pieu a été testé pour un nombre de cycles supérieur à 1000 et qu'aucune rupture n'est pas observée.

D'après ce diagramme, lorsque le niveau de contrainte imposé est inférieur à un certain seuil, les déplacements permanents se stabilisent et le pieu présente un comportement stable. Lorsque la charge moyenne ou l'amplitude cyclique augmentent et s'approchent de la capacité portante du pieu, les déplacements permanents s'accumulent et la portance du pieu se dégrade plus rapidement. Le comportement du pieu passe d'un état stable à un état métastable puis instable. Plusieurs auteurs confirment que les chargements répétés sont moins défavorables à la capacité portante du pieu par rapport aux chargements cycliques alternés (Jardine et al, 2012 ; Poulos, 1989 ; Poulos, 1988).

À l'issue des essais de traction réalisés à Dunkerque, Jardine et Standing (2012) ont proposé un diagramme de stabilité cyclique. La figure 2 illustre la comparaison des zones de stabilités en traction dans les deux diagrammes proposés afin de comparer les

résultats expérimentaux et calculés. Concernant les zones en compression, des essais sur des pieux battus ont été réalisés à Loon Plage caractérisé par un sol similaire, mais suite à des difficultés expérimentales les résultats obtenus n'étaient pas aisément interprétables.

Dans la zone de traction répétée, les zones instables coïncident. La zone stable résultant du modèle TZC - ABC est plus étroite que celle proposée par Jardine et al. (2012). Les calculs dans cette région sont plus conservatifs. Pour la région de traction alternée, les zones stables coïncident alors que les limites des zones métastables sont différentes. Une zone métastable plus large résulte des calculs du modèle TZC – ABC.

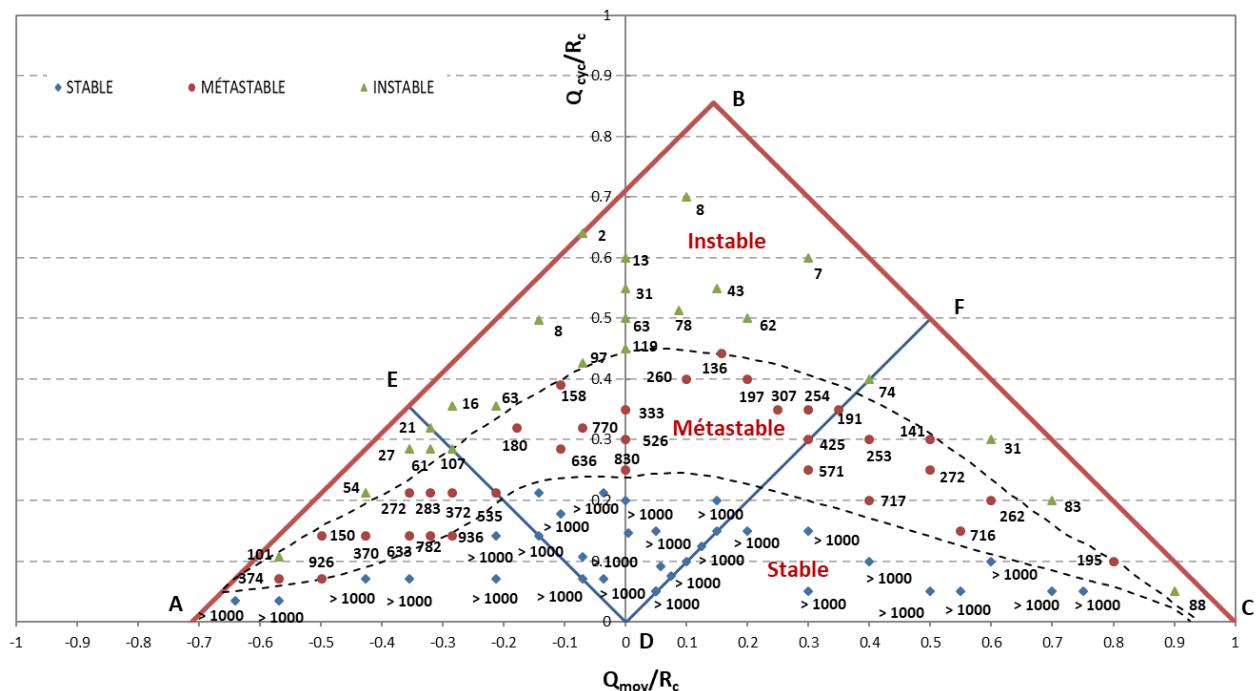


Figure 1. Diagramme de stabilité cyclique obtenu avec le modèle TZC pour les pieux battus dans le sable

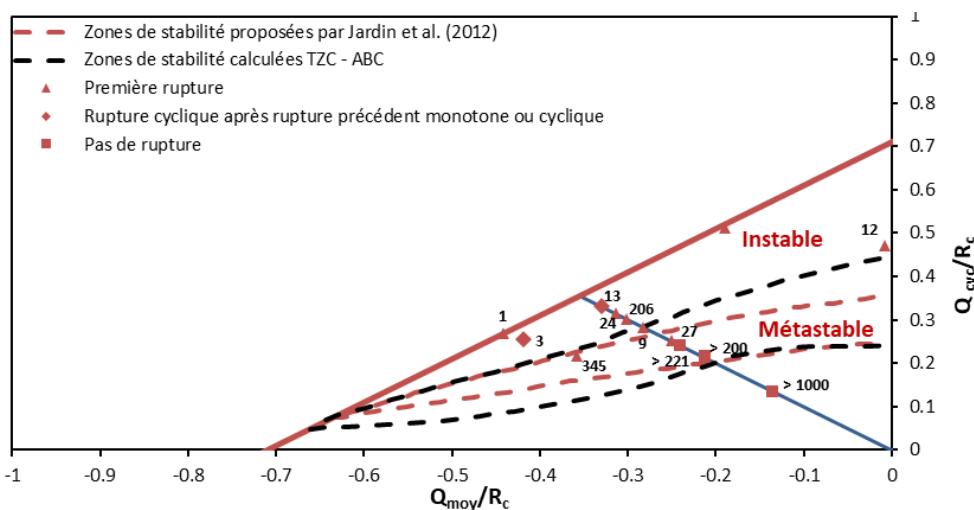


Figure 2. Comparaison des deux diagrammes de stabilité cyclique

2.4. Effet d'une séquence de chargements cycliques

En réalité, les charges cycliques ne sont pas régulières. Dans le but d'étudier la réponse du pieu soumis à une séquence de charge cyclique de différents charges moyennes et amplitudes cycliques, plusieurs séquences de traction répétée ont été appliquées au même pieu R3. La figure 3 illustre l'accumulation des déplacements en tête de pieu normalisés au diamètre en fonction du nombre de cycles appliqués. 'S' correspond à un chargement stable, 'M' est un chargement métastable et 'I' est un chargement instable.

Globalement, les résultats montrent que lorsque le chargement passe d'un niveau de charge élevée vers un niveau plus stable la vitesse d'accumulation des déplacements permanents diminue. Le pieu résiste pour un nombre de cycles plus élevé mais inférieur au nombre de cycles de rupture lorsque le pieu est soumis seulement à la charge du niveau le plus stable. Dans l'ensemble, ces résultats concordent avec les résultats obtenus par Blanc et Thorel (2016) qui ont effectués des essais en traction cyclique de séquences d'ordre différent sur un pieu modèle en centrifugeuse.

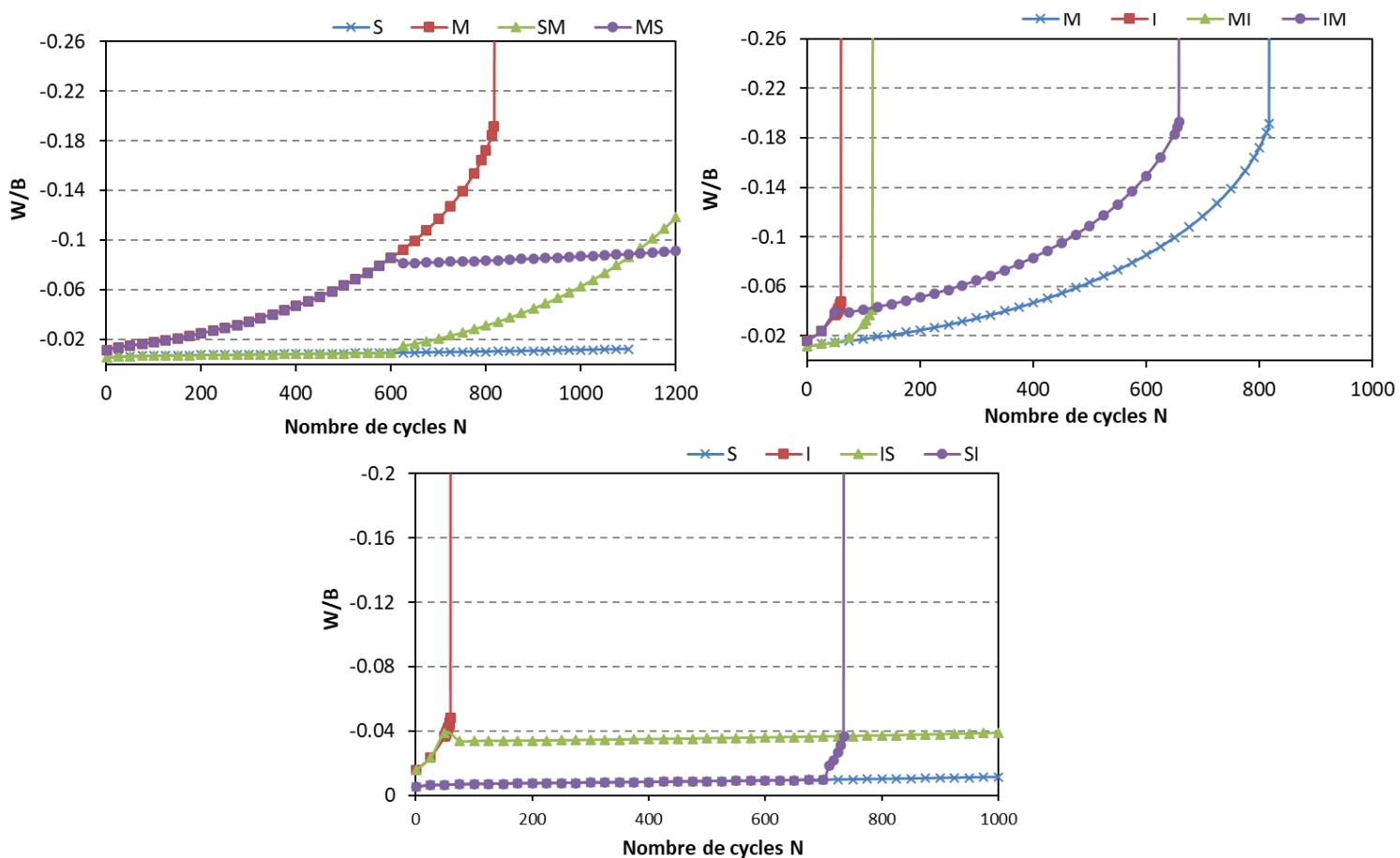


Figure 3. Évolution des déplacements maximaux normalisés pour les différentes séquences de chargement

3. Développement d'un macroélément

3.1. Principe et formulation du macroélément

Le concept du macroélément consiste à remplacer l'ensemble sol-fondation par un seul élément placé à la base de la superstructure avec un nombre de degrés de libertés

correspondants. Il se base sur le développement d'une loi de comportement élastoplastique et une loi d'écoulement qui permettent de modéliser le comportement élastique et plastique de ce système. La combinaison d'un écrouissage isotrope et d'un écrouissage cinématique linéaire est largement suffisante pour tous les cas où le chargement étudié est monotone. Au contraire, en cas de chargements cycliques, ces théories sont insuffisantes (Lemaître et Chaboche, 2001). Cette partie vise à la construction d'un élément d'interface 1D (un seul degré de liberté) capable de modéliser le comportement du système sol-pieu sous charges axiales cycliques.

La surface limite d'élasticité est confondue avec la surface de charge. Cette surface peut évoluer dans l'espace des efforts suivant des lois d'écrouissage de deux types : cinématique non linéaire et isotrope. Le comportement élastique régi par la raideur k^{el} et le critère de plasticité sont définis par les lois suivantes :

$$F^{\text{el}} = K^{\text{el}} \cdot u^{\text{el}} \text{ et } f = |F - X| - R \quad (5) \text{ et } (6)$$

La variable R rend compte de l'écrouissage isotrope. Elle évolue en fonction de la déformation plastique u^p selon l'équation 7. Q est la limite d'élasticité finale, R_i est la limite d'élasticité initiale prise égale à zéro et $b_{\text{écr}}$ est la vitesse d'évolution. La variable d'écrouissage cinématique non linéaire X (équation 8) indique la position actuelle de la surface de charge :

$$R = Q + (R_i - Q) \cdot e^{-b_{\text{écr}} \cdot u^p} \text{ et } dX = c \cdot du^p - \gamma \cdot X \cdot |du^p| \quad (7) \text{ et } (8)$$

c et γ sont des coefficients caractéristiques du système et X est nul dans l'état initial. L'accumulation des déplacements à fur et à mesure des cycles peut être mise en jeu en imposant γ_{inf} élevé de manière à combiner l'effet de l'écrouissage isotrope Q et l'effet de l'écrouissage cinématique non linéaire et ne pas avoir une stabilisation des déplacements. La variation de γ avec les déplacements plastiques est exprimée par l'équation suivante :

$$\gamma_{(u^p)} = \gamma_{\infty} + (\gamma_0 - \gamma_{\infty}) \cdot e^{-\xi \cdot u^p} \quad (9)$$

3.2. Résultats

Le tableau 4 récapitule les paramètres du modèle élastoplastique obtenus par calage de la courbe d'accumulation des déplacements maximaux en fonction du nombre de cycles obtenue par ce macroélément avec celle obtenue par la méthode $\tau - z$ pour le même chargement métastable (Figure 4). Les mêmes paramètres ont été utilisés pour les deux calculs par le macroélément stable et instable dans le but d'examiner sa capacité à reproduire les mêmes résultats observés par la méthode T-z.

Sous un faible chargement, le macroélément est capable de reproduire une faible accumulation des déplacements maximaux et ainsi un comportement stable. Sous chargement instable, les déplacements s'accumulent rapidement mais la vitesse d'accumulation est toujours inférieure à celle observée par la méthode des courbes de transfert (figure 5). Avec cette dernière, la rupture par défaut d'équilibre est atteinte après 26 cycles. Par macroélément, une rupture en déplacement est observée après 363 cycles. En effet, le paramètre γ contribue à l'accumulation des déplacements pour les premiers cycles où la variable d'écrouissage isotrope est faible. Cette incapacité du modèle à reproduire la courbe instable est expliquée par l'idée que la variable d'écrouissage isotrope R atteint sa valeur maximale Q ce qui limite l'accumulation des déplacements et l'atteinte de la plasticité parfaite. L'augmentation de γ ou la diminution de la limite Q entraîne une accumulation très rapide des déplacements et un phénomène de rochet est mis en évidence.

Tableau 4. Paramètres obtenus par calage de la courbe obtenue par le macroélément avec la courbe obtenue T-z pour un chargement métastable

k_{el}	R_i	$b_{écr}$	Q	C	γ_0	γ_{inf}	ξ
800 000	0	10	100	480 000	0	404	1

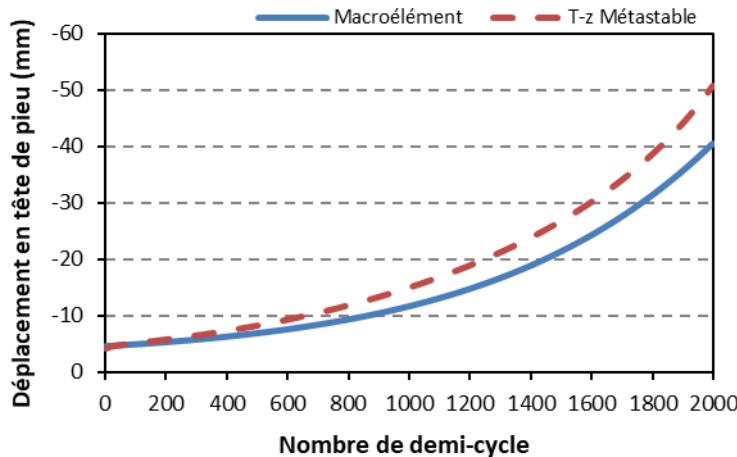


Figure 4. Calage de la courbe d'accumulation des déplacements maximaux pour le chargement métastable

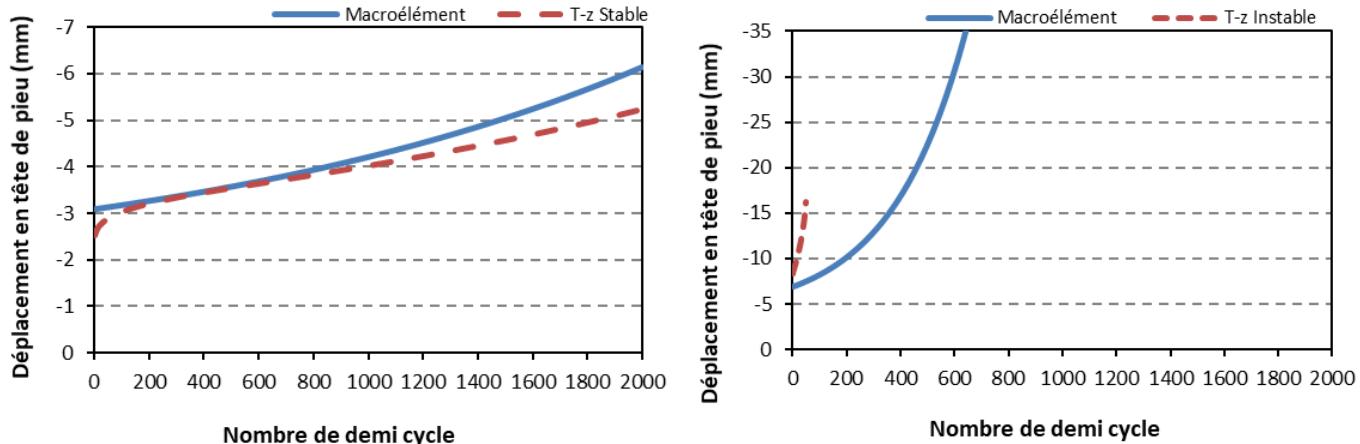


Figure 5. Comparaison des calculs obtenus par le macroélément et la méthode t-z pour les chargements stable et instable

4. Conclusion

Cet article a porté sur l'étude du comportement et le dimensionnement des pieux sous charges axiales cycliques. Dans le but de contribuer à la prévision de la réponse d'un pieu sous charge axiale cyclique, un modèle TZC-ABC basé sur la méthode des courbes de transfert est proposé (Abchir 2016, Burlon et al. 2013). Plusieurs chargements appliqués ont permis d'interpréter la réponse du pieu sous de tels chargements. Selon les caractéristiques du chargement, trois comportements peuvent être observés : stable, métastable et instable. A l'issue des calculs réalisés, un diagramme de stabilité cyclique a

été développé. Ce diagramme permet d'évaluer le comportement du pieu soumis à différentes combinaisons de chargements cycliques.

Un intérêt est porté sur l'effet d'une succession de charges de différentes charges moyennes et amplitudes cycliques. Le modèle TZC-ABC est capable de rendre compte des effets de ce type de chargement.

Les résultats obtenus avec le macroélément sont encourageants mais montrent que ce dernier n'est pas encore capable de reproduire tous les résultats obtenus par la méthode des courbes de transfert. Il est très complexe avec un tel modèle global de modéliser des comportements stables, métastables ou instables.

Références bibliographiques

Abchir Z. (2016). Contribution à l'étude du comportement des pieux isolés soumis à des sollicitations axiales monotones et cycliques dans le sable, Thèse de Doctorat, Université Paris-Est.

API. (2011). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms: Working stress Design, RP 2A-WSD. 21st edition, Washington, DC American Petroleum Institute.

Blanc M., Thorel L. (2016). Effects of cyclic axial loading sequences on piles in sand, Géotechnique Letters 6, 163-167.

Burlon, S., Thorel T. et Mroueh H. (2013). Proposition d'une loi t-z cyclique au moyen d'expérimentations en centrifugeuse, 18th ICSMGE, Paris 2013.

CEN (2004) Eurocode 7 – Part 1: Geotechnical design – Part 1: General rules, EN 1997-1. European Committee for Standardization (CEN), Brussels.

Coyle H.M & Reese L.C (1966). Load transfer for axially loaded piles in clays. Journal of soils Mechanics and Foundations Division, ASCE, 92 (SM2): 1-26.

Jardine R.J., Standing R.J. (2000). Pile Load Testing Performed for HSE Cyclic Loading Study at Dunkirk, France. Two Volumes. Offshore Technology Report OTO 2000 007. Health and Safety Executive, London, 60 p and 200 p.

Jardine R.J., Standing R.J. (2012). Field axial cyclic loading experiments on piles driven in sand, Soils and Foundations, Volume 52, Issue 4, August 2012, pp. 723-736.

Lemaître J., Chaboche J.L. (2001), Mécanique des matériaux solides, 2ème édition, Dunod, Paris.

Poulos H.G. (1988). Cyclic stability diagram for axially loaded piles. Journal of Geotechnical Engineering. 114(8), 877-895

Poulos H. G. (1989). Pile behavior- theory and application, 29th Rankine Lecture, Géotechnique, 39 No. 3, 365-415.