

MODELISATION DES PERFORMANCES DE DUREE DE VIE DES MONOPIEUX EOLIEN OFFSHORE

Modelling the Service Life Performance of Offshore Wind Monopiles

Christelle N. Abadie, Byron W. Byrne², Guy T. Houlsby², Harvey J. Burd²,
Ross A. McAdam³, William J. A. P. Beuckelaers⁴

¹ Université Gustave Eiffel, Bougenais, France

² Université d'Oxford, Oxford, Royaume-Uni

³ Ørsted Power (UK) Ltd., Londres, Royaume-Uni

⁴ OffshoreWind.io bv, Tervuren, Belgique;

RÉSUMÉ – Cet article propose une méthode numérique combinant les modèles PISA et HARM pour évaluer la réponse des monopieux aux charges latérales monotones et cycliques sur une longue durée. L'approche est appliquée à un monopieu d'éolienne offshore sous chargement représentant 25 ans de service, précédé d'une tempête violente. Les résultats permettent d'évaluer les performances du pieu sur sa durée de vie en service.

ABSTRACT – This paper introduces a numerical method that combines the PISA and HARM models to assess monopiles' response to monotonic and cyclic lateral loads over an extended period. The approach is applied to a typical offshore wind turbine monopile subjected to a load history representing 25 years of service, preceded by a severe storm. The results enable to evaluate the operational performance of the pile over its service life.

1. Introduction

Les éoliennes offshore sont généralement installées sur des monopieux courts et rigides, caractérisés par un rapport longueur sur diamètre (L/D) typique de 3 à 6 (Figure 1). Ils sont soumis à d'importantes charges latérales, comprenant un moment combiné à une charge horizontale, résultant de l'action conjuguée du vent, des vagues et des courants sur le mât et la superstructure, ainsi que du rotor. En raison de la nature répétitive de ces chargements, le dimensionnement des monopieux doit prendre en compte des scénarios de charge cycliques incluant des paquets de charges de diverses amplitudes et magnitudes (Figure 1), avec un très grand nombre de cycles. Une conception robuste de la fondation nécessite de garantir une capacité suffisante tout en limitant les déformations sur une durée de vie de 25 ans, généralement caractérisée par 10^8 à 10^9 cycles. Cependant, les réponses monotones et cycliques sont fortement non linéaires, et évaluer avec précision la déformation du pieu sur un grand nombre de cycles est un défi numérique significatif.

Par conséquent, les méthodes couramment utilisées pour la conception des pieux (telles que la méthode p - y , DNV, 2014) adoptent généralement des approches simplifiées en se basant sur les hypothèses de modélisation de Winkler (Winkler, 1867). Le pieu est conceptualisé comme une poutre unidimensionnelle, avec la réponse d'interaction sol-pieu représentée par des ressorts non linéaires indépendants sur toute la longueur du pieu. Ces ressorts établissent la relation entre la résistance locale du sol (p) et le déplacement du pieu (y) à chaque incrément de profondeur. Les charges cycliques sont généralement abordées en appliquant des facteurs de dégradation aux courbes p - y monotones, afin de refléter la dégradation des ressorts sol-pieu sous des charges cycliques et d'approximer l'accumulation de déformations permanentes sur un nombre représentatif de cycles. Cette approche offre une grande rapidité numérique et a été adoptée dans l'industrie offshore comme un compromis satisfaisant entre une conception prudente et le temps de calcul.

Cependant, l'optimisation de la géométrie des pieux pour la conception aux états-limites ultimes (ULS) peut entraîner des déformations excessives dues à des charges cycliques de faible amplitude sur le long terme (e.g. Leblanc et al. 2010, Abadie, 2015, Puech, 2017). Ainsi, il est impératif de développer des approches plus précises et rigoureuses pour la conception aux états de service (SLS) et aux états-limites de fatigue (FLS).

La méthode PISA (Byrne et al., 2019) est une référence pour le dimensionnement des monopieux offshore aux charges monotones ultimes. De plus, une nouvelle méthode, HARM (Abadie, 2015 ; Abadie et al., 2017, 2019b ; Houlsby et al., 2017), permet un calcul rapide de la réponse aux charges cycliques à grand nombre de cycles. Cet article présente une approche de modélisation numérique combinant les modèles PISA et HARM, pour prédire les performances du pieu aux états-limites ultimes (ULS), de service (SLS) et de fatigue (FLS). L'efficacité de cette méthode est démontrée sur un monopieu à échelle réelle, installé dans un profil de sol stratifié, soumis à des charges représentatives d'une durée de vie de 25 ans, incluant les conditions de tempête.

2. Méthode de modélisation

La méthode employée dans cet article repose sur l'utilisation du modèle de conception PISA 1D pour obtenir avec précision la réponse monotone, suivie de l'application du modèle

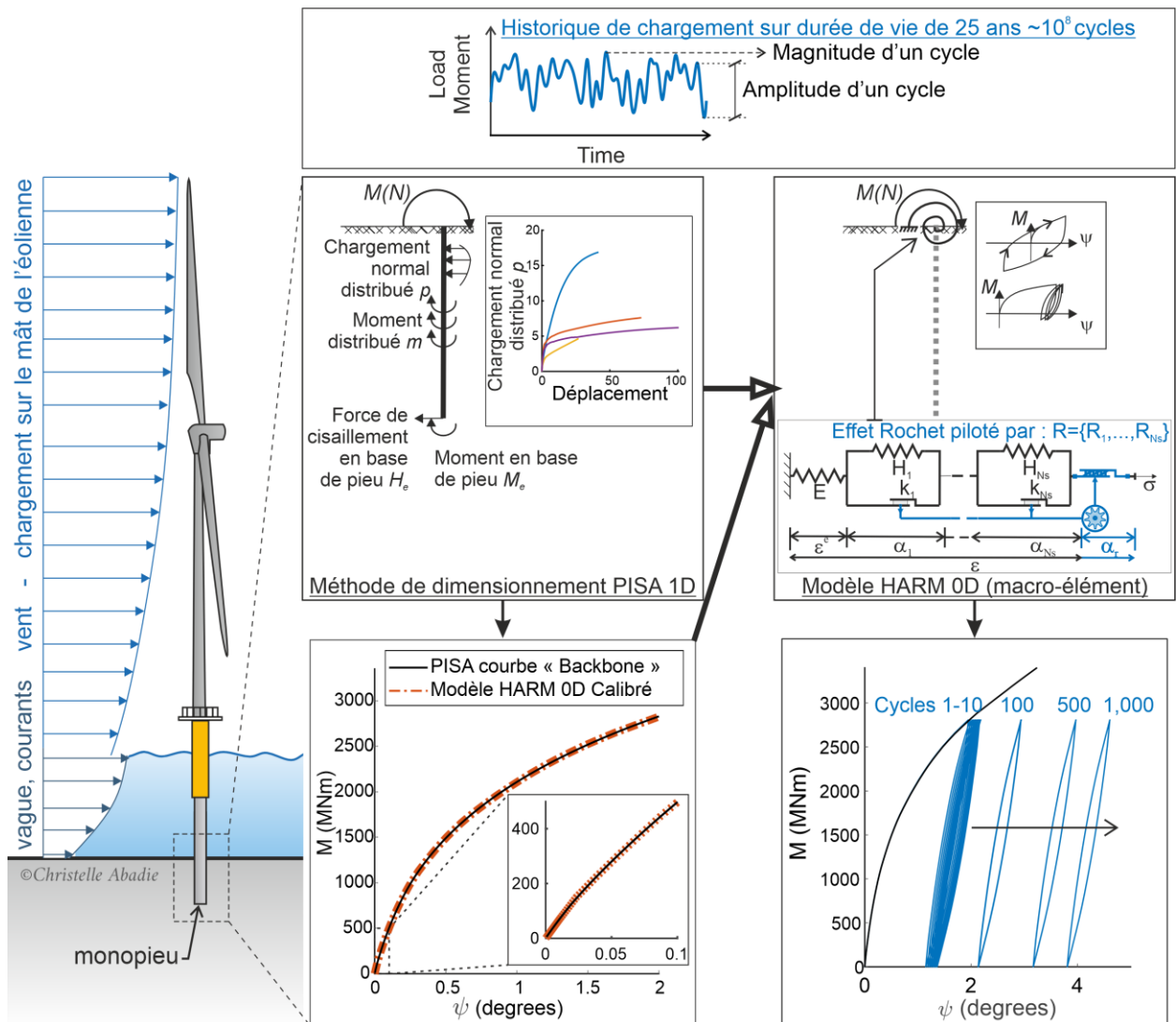


Figure. 1. Méthode de modélisation employée dans cet article (valeurs numériques basées sur la modélisation du profil de sol et de la géométrie de pieu en Figure 2)

macro-élément HARM (0D) pour calculer la réponse cyclique (Figure 1). La réponse monotone est utilisée comme courbe de référence en entrée du modèle HARM. Cette approche présente des avantages en termes de temps de calcul par rapport à un modèle 1D cyclique entièrement intégré (voir Abadie et al. (2023) et Beuckelaers (2017)).

2.1. Modèle de Conception PISA 1D pour la Charge Monotone

L'approche de modélisation PISA 1D est décrite dans les travaux de Byrne et al. (2020a, 2020b) et Burd et al. (2020b) pour des profils de sol homogènes sableux et argileux respectivement, avec des détails supplémentaires sur la modélisation des sols en couches dans Burd et al. (2020a). Dans cette méthode, le monopieu est représenté par un maillage linéaire d'éléments finis 1D de type poutre de Timoshenko. La réponse latérale du sol est modélisée via quatre composantes : la charge latérale distribuée p , le moment distribué m , la force horizontale à la base H_B , et le moment à la base M_B (Figure 1). Ces composantes englobent l'action combinée de la résistance latérale du sol et du cisaillement le long du fût et à la base du pieu. Le processus de calibration est dérivé à partir d'analyses par éléments finis 3D (Figure 2b), dont la procédure est détaillée dans les articles susmentionnés pour des argiles glaciaires raides et des sables marins avec des densités relatives variables.

Modifications pour les profils de sol en couches

L'extension aux profils de sol stratifiés est réalisée en supposant que les courbes de réaction du sol calibrées à l'aide de profils de sol homogènes peuvent être directement utilisées pour effectuer des analyses en 1D de monopieux encastrés dans un sol en couches (Burd et al., 2020a). En d'autres termes, l'interaction entre les couches est ignorée dans le modèle 1D. À l'intérieur de chaque couche, les courbes normalisées de réaction du

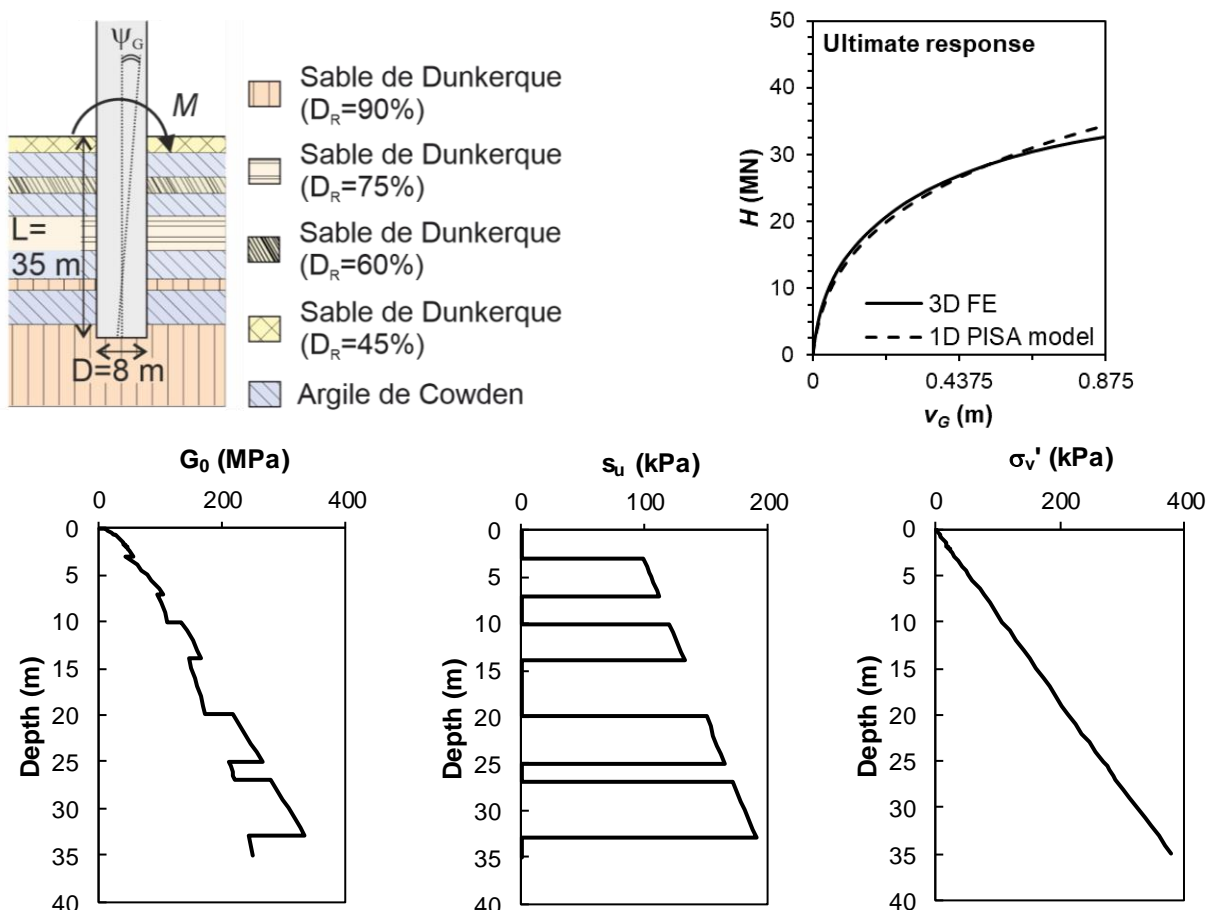


Figure 2. Cas sol en couches F1/E3 (Byrne et al., 2020a, Hamilton and Abadie, 2023)

sol sont calculées en utilisant le cadre approprié du sable ou de l'argile dérivé de la calibration des sols homogènes, ainsi que les valeurs locales du module de cisaillement à petites déformations G_0 , de la résistance au cisaillement non drainé s_u , et de la contrainte effective verticale initiale σ'_v (comme illustré en Figure 2). Des nœuds sont générés à la frontière des couches de sol pour faciliter le changement de couche. La validation de cette hypothèse est démontrée par Burd et al. (2020a), montrant que le modèle PISA 1D fournit des prédictions suffisamment précises pour la plupart des cas de conception pratiques.

La méthode PISA fournit la réponse monotone du pieu au niveau du sol, permettant l'évaluation de la capacité et de la rigidité initiale du pieu. Cette réponse forme également la courbe de référence dans l'approche HARM. L'un des profils de sol et de géométrie de pieu les plus réalistes - cas F1 dans Byrne et al. (2020a) - est utilisé pour l'exemple de calcul présenté dans cet article. Les détails du profil de sol pour F1 sont présentés dans la Figure 2, ainsi que la réponse du pieu, et les profils G_0 , s_u et σ'_v . La géométrie du pieu est fournie dans le Tableau 1. La comparaison avec la réponse calculée par éléments finis 3D montre que, dans ce cas, le modèle 1D permet une excellente précision.

Tableau 1. Dimensions du monopieu utilisé dans cet article

Pieu	D (m)	h (m)	h/D	L (m)	L/D	t (mm)	D/t
D2t	8.75	87.5	10	35	4	150	59

2.2. Macro-élément HARM 0D pour les Charges Cycliques

L'approche HARM, développée par Abadie, 2015 et Housby et al. 2017, se base sur le cadre de la modélisation en hyperplasticité (Housby et Puzrin, 2006), et a pour but le développement d'un modèle constitutif pouvant modéliser l'effet rochet cyclique. La méthode de calibration et des applications à la conception de pieux rigides soumis à des charges latérales cycliques sont détaillées dans Abadie et al. (2019b, 2017).

HARM associe un élément de cliquetis à un modèle de plasticité avec écrouissage cinématique (Figure 1), offrant à la fois l'accumulation de déformation au fil des cycles et le comportement de type Masing couramment observé dans les essais de pieux (Abadie et al. 2019a). La quantité de déformation accumulée par l'effet rochet cyclique au sein d'un même groupe de cycles de même amplitude et magnitude peut être accélérée simplement en multipliant le taux de cliquetis R_n (Figure 1, Section 2.3) par le nombre de cycles à sauter, permettant ainsi un calcul très rapide pour un grand nombre de cycles. Le modèle suit naturellement chaque incrément de charge, indépendamment de l'historique des charges. Cela signifie que, dans le cas de paquets de charges à plusieurs amplitudes, le modèle capture la réponse à des scénarios de charge multi-amplitudes complexes, sans nécessité d'introduire des hypothèses supplémentaires telles que la règle de Miner (LeBlanc et al., 2010 ; Miner, 1945).

Le cadre de modélisation HARM peut être utilisé comme relation constitutive pour la réponse contrainte/déformation à différents niveaux (macro-réponse du pieu ou réponse locale du sol). Ainsi, HARM peut être intégré dans n'importe laquelle des approches de modélisation des monopieux adoptées pour caractériser le comportement cyclique, que ce soit au niveau de l'élément pour la modélisation par éléments finis 3D, la réponse locale pour la modélisation 1D (Beuckelaers, 2020, Abadie et al. 2023), ou la macro-réponse (modèle 0D). Cependant, l'approche la plus simple et la plus rapide reste le modèle 0D, où la réaction de la fondation est modélisée à l'aide d'un ressort macro moment-rotation (Figure 1). Même simplifié en moment-rotation, l'implémentation du modèle 0D offre une liaison très efficace avec l'analyse structurelle, constituant ainsi un outil rapide et efficace pour l'exploration et la modélisation des performances des éoliennes. Pour plus de précision, l'ajout d'un composant "H- v_G " et les termes de couplage croisé induits entre "M" et "H" seraient nécessaires, mais ne devraient pas entraîner de coûts de calcul importants.

2.3. Calibration

La quantité de déformation accumulée en raison de l'effet rochet et pendant chaque cycle de déchargement-rechargement peut être contrôlée en ajustant la calibration des paramètres d'effet rochet, indépendamment de la calibration de la courbe monotone, également connue sous le nom de « Backbone ».

Le modèle s'appuie donc sur une prédiction précise de la courbe monotone, obtenue ici à l'aide du modèle PISA 1D. Cette courbe de référence est utilisée comme entrée pour calibrer les paramètres du modèle HARM, et elle est ajustée pour prendre en compte le phénomène de rochet (Abadie et al., 2019b). Cela permet d'obtenir la réponse monotone illustrée dans la Figure 1, correspondant à celle obtenue à partir du modèle de conception PISA en 1D dans la Figure 2.

La calibration de l'effet rochet est réalisée en ajustant le taux de rochet, appelé R_n , selon la méthode de calibration décrite dans Abadie et al. (2019b). La même méthodologie et le même ensemble de paramètres de rochet utilisés par Abadie et al. (2019b) et Abadie et al. (2023) sont appliqués ici. Ce choix permet au taux de rochet de diminuer avec l'accumulation de cycles de charge et d'augmenter avec l'amplitude de charge.

3. Modélisation des performances à vie dans un sol en couches

3.1. Historique de Chargement

Le cadre susmentionné est appliqué au pieu spécifié dans le Tableau 1, pour le profil de sol en couches de la Figure 2, afin d'explorer les performances sous un chargement représentatif d'une durée de vie d'éolienne de 25 ans, précédée d'une forte tempête (Tableau 2). La réponse monotone calculée avec le modèle PISA 1D prédit une capacité ultime de $M_R=3045$ kNm, atteinte pour un déplacement maximal au niveau du sol de $V_{G,R}=0.875$ m=10% D, et une rotation de $\psi_R=2.43$ degrés.

Le signal (Figure 3(a)) comprend environ 3×10^8 cycles, constitués de 65,534 paquets de charge individuels, se produisant dans un ordre aléatoire. Cela est modélisé à l'aide d'un programme d'accélération qui calcule le premier cycle de chaque paquet de charge de manière incrémentale, tandis que le reste de chaque série de chargement est accéléré par un facteur égal au nombre de cycles de la série moins 2. Le dernier cycle de chaque paquet de charge est calculé de manière incrémentale. Le premier cycle doit être calculé de manière incrémentale pour préserver le comportement de type Masing et ne pas déformer la courbe de référence ; le reste de la série peut être accéléré sans perte de précision. Calculer le dernier cycle de manière incrémentale permet d'obtenir indépendamment la réponse cyclique à la fin de chaque paquet de charge. Cependant, cela est inutile si la

Table 2. Caractéristiques de chargement

	Chargement cyclique de durée de vie	Tempête courte en début de signal
Moment maximum [MNm]	1,270	2,250
M_{max}/M_R	0.42	1/1.35=0.74
M_{min}/M_{max}	-0.97	-0.37
No. de cycles	2.6503×10^8	150
No. de « paquets de cycles »	65,534	150
Type de modélisation	Accélérée	Incrémentale
Nombre de cycles modélisés	187,459	150
Temps de calcul (0D, 500 incr.) (Intel® core i7- 13800H, 32GB RAM)	633 s.	0.03 s.

réponse intermédiaire n'est pas nécessaire, permettant une petite économie de temps de calcul. Le calcul a pris environ 10 minutes sur un ordinateur portable standard (Tableau 3). Une réduction supplémentaire du temps de calcul peut être obtenue en réduisant le nombre d'incrément.

Le signal cyclique long terme est précédé d'un événement de tempête extrême (Figure 3(b)), comprenant 150 cycles d'amplitude aléatoire, tous modélisés de manière incrémentale. La charge maximale de ce signal est égale à $M_{max}=M_{ULS}/1.35=0.74 \times M_{ULS}$. Ceci permet d'évaluer la durée de vie restante de la fondation de l'éolienne, dans le cas « le pire » où elle serait frappée par une tempête en sortie d'installation.

3.2. Réponse du pieu et discussion

La Figure 4 présente la réponse du pieu, illustrant l'évolution de la rotation en fonction du moment et du nombre de cycles. La Figure 4(b) montre l'évolution de la déformation due purement à l'effet rochet, représentant la proportion de déformation permanente causée par le chargement cyclique dans le modèle HARM. Le reste de la déformation est attribué à la

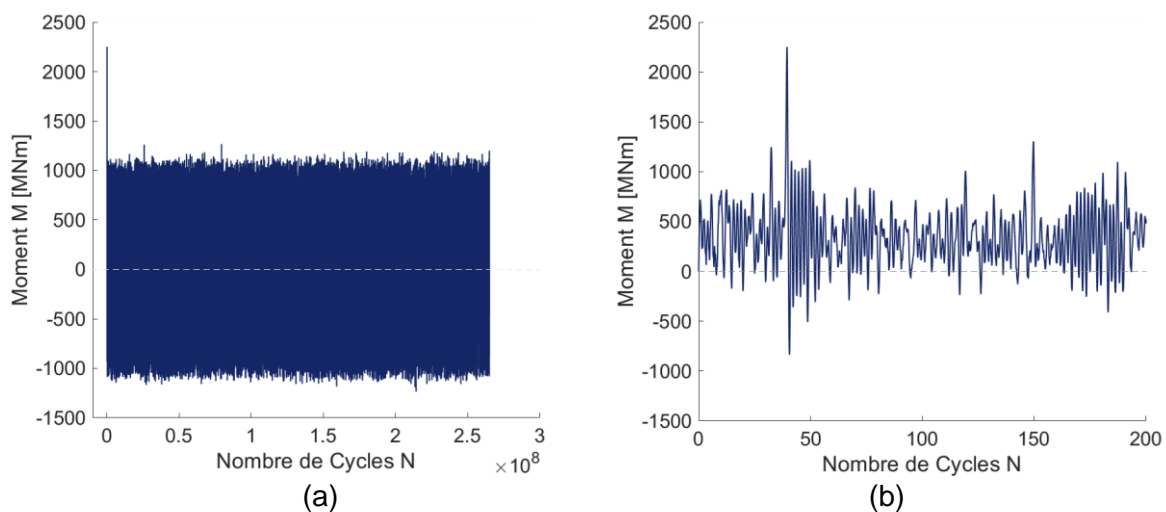


Figure 3. Caractéristiques de charge : (a) histoire de chargement cyclique; (b) tempête initial

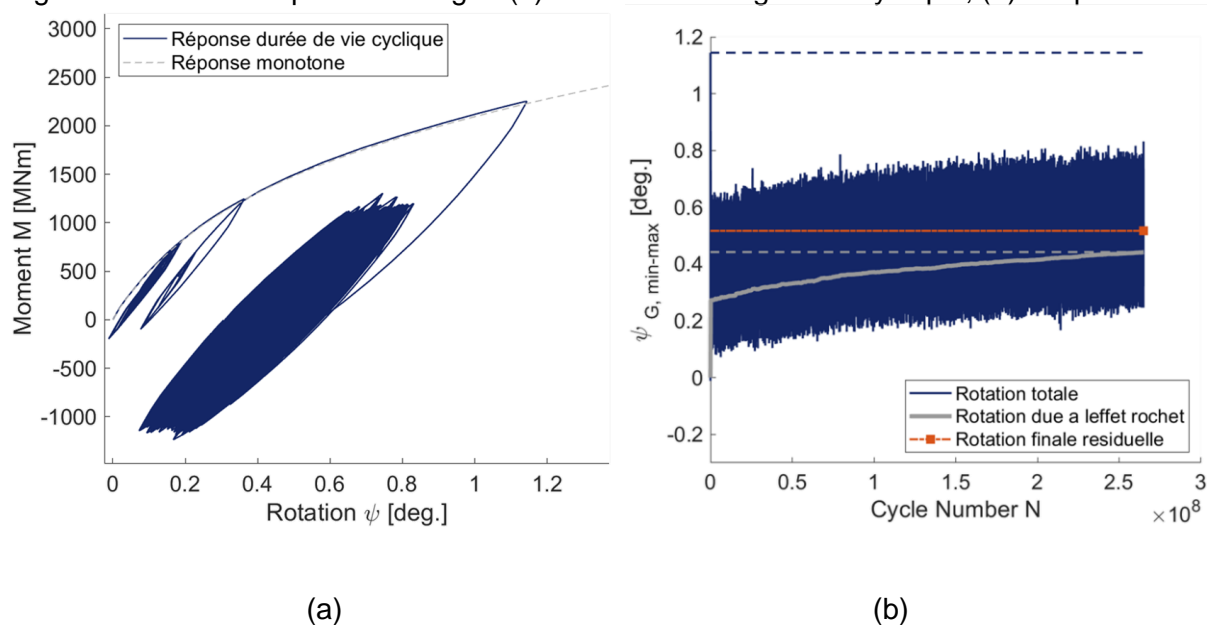


Figure 4. Réponse du pieu: (a) moment-rotation; (b) évolution de la rotation au cours des cycles

déformation plastique induite par l'écroutissement cinématique. La Figure 4(b) affiche également la rotation résiduelle finale, c'est-à-dire, la rotation après un déchargement complet à zéro. Généralement, la rotation résiduelle du monopieu doit être limitée à 0,5 degré sur l'ensemble de sa durée de vie, avec un maximum de 0,25 degré provoqué par le chargement cyclique (Achmus et al., 2009 ; DNV, 2014 ; Section 10.3.2.6, p. 173).

L'effet rochet sur la réponse se révèle significatif lors du chargement cyclique à long terme à une intensité modérée, comme indiqué par la déformation résiduelle finale due à l'effet rochet, soulignée par la ligne grise en pointillés dans la Figure 4(b). Lors du premier événement de tempête court, l'impact de l'effet rochet sur la réponse globale est limité, en comparaison de la déformation plastique engendrée par le chargement monotone. La réponse est principalement dominée par les déformations provoquées par l'événement de charge le plus important. De plus, la tempête a un effet bénéfique et permet de réduire les effets de rochet cycliques causés par le chargement long-terme survenant après la tempête (Abadie et al. 2023), ce qui correspond aux observations expérimentales (Abadie 2015).

En comparaison avec le comportement obtenu par l'approche cyclique classique des courbes p - y , les principales distinctions sont les suivantes :

- i. L'approche intégrée PISA-HARM permet de modéliser la décharge, et par conséquent, la déformation résiduelle après une série de charges spécifique,
- ii. Le modèle prend en compte le nombre de cycles,
- iii. Le modèle rend compte de la réponse aux paquets de charges de différentes amplitudes et peut refléter le changement de comportement entre le chargement cyclique à long terme d'intensité moyenne, précédé ou suivi d'une tempête,
- iv. Le modèle suit l'évolution de la réponse du pieu au fil du temps/nombre de cycles, offrant la possibilité d'évaluer une extension de la durée de vie pour les monopieux déjà installés si l'historique des charges passées est connu.

4. Conclusions

Cet article expose une méthode de calcul de la réponse des monopieux de grand diamètre soumis à des charges cycliques à long terme, représentatives de la durée de vie d'une éolienne offshore. Le modèle combine le modèle de dimensionnement PISA 1D et le modèle HARM, permettant le calcul de la réponse du pieu pour un très grand nombre de cycles, avec des amplitudes et magnitudes de charge variables.

La méthode est illustrée par la modélisation d'un pieu dans un profil de sol en couches soumis à un signal de charge réaliste représentant une durée de vie de chargement typique d'un monopieu éolien offshore, précédé d'une tempête importante. Les résultats illustrent l'accumulation de déformation permanente sur les 3×10^8 cycles, modélisant à la fois la déformation du pieu causée par le chargement cyclique et la déformation résiduelle après la décharge. Le modèle montre une accumulation progressive de déformation permanente tout au long de la durée de vie de l'éolienne, avec une réponse à la tempête initiale dominée par la réponse monotone à la charge la plus importante.

Ce cadre de modélisation est un outil utile qui permet de mieux comprendre la réponse du pieu au chargement cyclique et peut, par exemple, être utilisé pour étudier l'effet de l'historique des charges sur la réponse du pieu (voir Abadie et al. 2023). Le modèle HARM adopté pour cet exemple ne prend en compte que l'écroutissement cinématique et l'effet rochet, mais d'autres phénomènes tels que la dépendance à la vitesse de chargement et le chargement non-drainé pourraient également être incorporés à l'avenir.

5. Remerciements

Les auteurs reconnaissent le soutien financier et en nature d'Ørsted. Byrne est soutenu par la Royal Academy of Engineering dans le cadre du programme de chaires de recherche et de bourses de recherche senior.

6. Références bibliographiques

- Abadie, C.N., 2015. Cyclic lateral loading of monopile foundations in cohesionless soils. DPhil Thesis, University of Oxford. [Lien vers PDF](#)
- Abadie, C.N., Beuckelaers, W.J.A.P., Byrne, B.W., Houlsby, G.T., Burd, H.J. & McAdam, R.A., 2023. Modelling Lifetime Performance of Monopile Foundations for Oshore Wind Applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. Volume 149, Issue 8, <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-9833>
- Abadie, C.N., Byrne, B.W., Houlsby, G.T., 2019a. Rigid pile response to cyclic lateral loading: laboratory tests. *Géotechnique* Volume 69 Issue 10, pp. 863-876 <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.325>
- Abadie, C.N., Byrne, B.W., Houlsby, G.T., 2017. Modelling of monopile response to cyclic lateral loading in sand. *Offshore Site Investigation Geotechnics 8th International Conference Proceedings* 1046–1053. <https://doi.org/10.3723/osig17.1046>
- Abadie, C.N., Houlsby, G.T., Byrne, B.W., 2019b. A method for calibration of the Hyperplastic Accelerated Ratcheting Model (HARM). *Computers and Geotechnics* 112, 370–385. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.04.017>
- Achmus, M., Kuo, Y.-S., Abdel-Rahman, K., 2009. Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load. *Computers and Geotechnics* 36, 725–735. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2008.12.003>
- Beuckelaers, W. J. A. P. 2017. Numerical Modelling of Laterally Loaded Piles for Offshore Wind Turbines. DPhil Thesis, University of Oxford.
- Burd, H.J., Abadie, C.N., Byrne, B.W., et al., 2020a. Application of the PISA design model to monopiles embedded in layered soils. *Géotechnique*. Volume 70 Issue 11, pp. 1067-1082. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.PISA.009>
- Burd, H.J., Zdravkovic, L., Byrne, B.W., et al., 2020b. PISA Design Model for Monopiles for Offshore Wind Turbines: Application to a Marine Sand. *Géotechnique*. Volume 70 Issue 11, pp. 1048-1066. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.P.277>
- Byrne, B.W., Burd, H.J., Zdravkovic, L., Abadie, C.N., Houlsby, G.T., Jardine, R.J, Martin, C.M., McAdam, R.A., Pacheco Andrade, M., Pedro, A.M.G., Potts, D.M., & Taborda, D.M.G. (Year of publication). PISA Design Methods for Offshore Wind Turbine Monopiles (keynote). Presented at the Offshore Technology Conference (OTC), Houston, Texas, pp. 1-20. <https://doi.org/10.4043/29373-ms>
- Byrne, B.W., Burd, H.J., Zdravkovic, L., et al., 2020a. PISA Design Methods for Offshore Wind Turbine Monopiles, in: *Offshore Technology Conference*. Presented at the Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference, Houston, Texas. <https://doi.org/10.4043/29373-MS>
- Byrne, B.W., Houlsby, G.T., Burd, H.J., et al., 2020b. PISA Design Model for Monopiles for Offshore Wind Turbines: Application to a Stiff Glacial Clay Till. *Géotechnique*. Volume 70 Issue 11, pp. 1030-1047. <https://doi.org/10.1680/jgeot.18.p.255>
- DNV, 2014. Offshore Standard DNV-OS-J101, Design of offshore wind turbine structures.
- Hamilton CM, Abadie CN. Seismic excitation of offshore wind turbines and transition piece response. *Earthquake Engng Struct Dyn*. 2023; 52: 2091–2114. <https://doi.org/10.1002/eqe.3872>
- Houlsby, G.T., Abadie, C.N., Beuckelaers, W.J.A.P., Byrne, B.W., 2017. A model for nonlinear hysteretic and ratcheting behaviour. *International Journal of Solids and Structures* 120. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.04.031>
- Houlsby, G.T., Puzrin, A.M., 2006. Principles of Hyperplasticity. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-240-9>
- LeBlanc, C., Byrne, B.W., Houlsby, G.T., 2010. Response of stiff piles to random two-way lateral loading. *Géotechnique* 60, 715–721. <https://doi.org/10.1680/geot.09.T.011>
- Miner, M.A., 1945. Cumulative damage in fatigue. *Journal of applied mechanics* 159–165.
- Puech, A., 2017. Recommandations pour le dimensionnement des pieux sous chargements cycliques projet national SOLCYP.
- Reese, L.C., Cox, W.R., Koop, F.D., 1974. Analysis of laterally loaded piles in sand. *Proceedings of the 6th Offshore Technology Conference*, Houston, Texas.
- Winkler, E., 1867. *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit*. (in German) 1st Edition, H. Dominicus, Prague