

Critère pratique pour identifier la rupture d'un monopieu rigide chargé latéralement

Hussein BAKRI¹

¹Navier, Ecole des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Marne-la-Vallée, France

RESUME : Les éoliennes offshore constituent l'une des principales solutions adoptées pour répondre au besoin d'énergies décarbonées. Pour des raisons économiques et pratiques, les monopieux sont couramment utilisés comme fondation de ces structures. L'augmentation des dimensions des éoliennes impose un changement de la forme et des propriétés de ces fondations, qui évoluent vers un élancement plus petit et donc un comportement plus rigide. Actuellement, une bonne compréhension des comportements monotone et cyclique de ce type de fondation et le développement d'une méthode de conception conservative et raisonnable restent des enjeux majeurs. Une des méthodes prometteuses concerne l'identification de lois empiriques capables de prévoir la réponse cyclique en fonction du nombre de cycles et des caractéristiques du chargement. Le niveau du chargement est normalisé par rapport à la capacité ultime sous chargement monotone, qui dépend du critère de rupture adopté. La fiabilité de la généralisation de ces lois dépend donc de l'aptitude du critère de rupture utilisé à assurer une évaluation satisfaisante de la capacité ultime des monopieux. Dans cette communication, les aptitudes des critères de rupture conventionnels sont discutées et un nouveau critère pratique est proposé et validé.

Mots-clés : monopieu rigide, critère de rupture, loi empirique, chargement cyclique, chargement latéral

I. INTRODUCTION

Le réchauffement de la planète, le changement climatique et la durabilité des sources d'énergie sont les principaux défis environnementaux auxquels les gouvernements sont confrontés. L'énergie éolienne est l'une des solutions qui peut être adoptée pour répondre, en partie, au problème de la durabilité des sources d'énergie. Les éoliennes offshore constituent actuellement 17,5% (Wind Europe, 2020) de la production mondiale de ce type d'énergie. Contrairement aux éoliennes terrestres, les installations offshore peuvent atteindre de très grandes dimensions et permettent d'occulter les problématiques de pollution sonore. Selon les publications de *Offshore Renewables Energy Strategy (ORES)*, l'Union Européenne a pour ambition de construire 300 GW de capacité d'éolienne offshore pour 2050 (Wind Europe, 2020). Plusieurs fondations sont adoptées pour les éoliennes offshore, cependant les monopieux sont majoritaires, représentant environ 80% des fondations des éoliennes installées (Wind Europe, 2020). L'augmentation des dimensions des éoliennes impose un changement significatif du diamètre (D) et de l'élancement (L/D) des monopieux conçus. En effet, ils ont actuellement un diamètre allant jusqu'à 8 m, avec un élancement

compris entre 3 et 6 (Schroeder et al., 2015 ; Sorenson et al., 2017), alors que le diamètre de la prochaine génération d'éoliennes offshore devrait dépasser 10 m (Richards, 2019). Ce type de fondation est caractérisé par un comportement rigide, dépendant principalement de son élancement (Dietrich, 1982 ; Peralta et Achmus, 2010). Plusieurs projets ont été lancés pour mieux comprendre leurs comportements sous chargements monotone et cyclique et pour proposer une méthode de conception conservative et raisonnable : PISA (Byrne et al., 2017) ; Solcyp+ (Dupla et al., 2019) ; PICASO (Abadie et al., 2020). Le comportement sous chargement cyclique est assez complexe et gouverné par le couplage de plusieurs phénomènes physiques : accumulation des déplacements ; évolution de la rigidité de la fondation ; densification du sol autour du monopieu... La méthode de conception conventionnelle (méthode p-y : Cox et al., 1974 ; Reese et al., 1974), développée en se basant sur des monopieux flexibles, est donc limitée par l'effet des nouvelles composantes de la réaction du sol qui ne sont plus négligeables : force horizontale et moment à la base, ainsi que cisaillement vertical à l'interface (Byrne et al., 2017). De plus, les simulations numériques 3D par la méthode des éléments finis sont limitées à cause du temps de calcul. Une des méthodes prometteuses réside alors dans le développement de lois empiriques capables de prévoir la réponse cyclique en fonction principalement du nombre de cycles et des caractéristiques du chargement. Ces lois peuvent être extraites d'essais expérimentaux réalisés sur des modèles réduits 1g (LeBlanc et al., 2010) et en centrifugeuse (Klinkvort et Hededal, 2013). La loi proposée par LeBlanc et al. (2010), pour estimer l'accumulation de déplacement d'un monopieu rigide dans un massif sableux, est présentée ci-dessous :

$$\frac{\Delta\theta(N)}{\theta_s} = T_b(\zeta_b, I_d)T_c(\zeta_c)N^\alpha \quad \alpha = 0.31 \quad (1)$$

Où $\Delta\theta(N)$ est la différence de rotation du monopieu entre le cycle N et le cycle 1, θ_s est la rotation du monopieu sous chargement monotone (ou premier cycle), T_b et T_c sont des fonctions qui introduisent l'effet des caractéristiques du chargement (ζ_b et ζ_c) et les propriétés du sol (indice de densité I_d dans ce cas). Les paramètres ζ_b et ζ_c définis par LeBlanc et al. (2010), où ζ_b , nommé niveau de chargement cyclique, normalise le chargement cyclique maximal appliqué (M_{max}) par rapport à la capacité ultime du monopieu (M_{ult}). Aujourd'hui, de nombreuses lois, inspirées de ce travail, ont été développées dans la littérature. Un des défis principaux est l'identification de la capacité ultime et son effet sur ce paramètre. Plusieurs critères ont été adoptés pour identifier la rupture d'un monopieu rigide, dont les plus communs sont : (i) un déplacement à la surface du sol égal au dixième du diamètre $0,1D$ ou (ii) une rotation égale à 2° (Byrne et al., 2017). L'application de ces critères à des monopieux d'élancements différents mène à l'identification de capacités ultimes non-équivalentes. Pour illustrer cela, trois essais in-situ réalisés dans le cadre du projet PISA sont présentés dans la **Figure 1**. Ces trois essais sont réalisés sur trois monopieux ayant le même diamètre ($D=762$ mm), mis en place dans le même massif de sable, chargé à la même excentricité, et ayant trois élancements différents. L'application du critère $0,1D$ sur les trois réponses monotones montre que ce critère ne permet pas d'assurer une évaluation équivalente de la capacité ultime dans les trois cas. Cela pose la question de la fiabilité de la généralisation des lois empiriques développées pour un élancement donné à d'autres élancements, surtout pour la prochaine génération de monopieux.

Pour répondre à cette problématique, dans le cadre de ma thèse, une campagne expérimentale a été réalisée au laboratoire Navier de l'École des Ponts. Un des objectifs de ce travail est de discuter l'aptitude des critères de rupture conventionnels à identifier la capacité ultime des monopieux rigides pour différents élancements. L'interprétation des résultats obtenus a permis de proposer et de valider un nouveau critère simple.

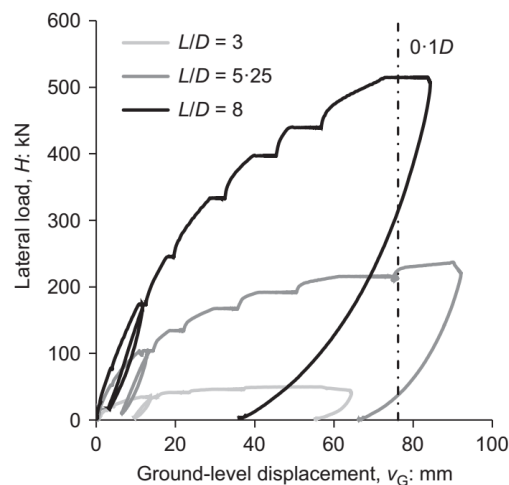


Figure 1. Essais in situ réalisés dans le cadre du projet PISA (McAdam et al., 2020)

II. METHODE

A. Dispositif et procédure expérimentale

L'essai réalisé consiste à charger latéralement un modèle de monopieu rigide jusqu'à la rupture, en dépassant largement les 2 critères conventionnels $0,1D$ et 2° . Sa réponse monotone est mesurée par un ensemble de capteurs. L'essai est réalisé sur un modèle physique 1g développé dans le cadre de ma thèse, après la proposition d'un ensemble des lois d'échelle représentatif du prototype. Le dispositif expérimental est présenté dans la Figure 2 et la procédure expérimentale est décrite brièvement :

- Formation du massif du sol : une chambre K_0 de diamètre 550 mm ($\sim 7D$) est utilisée pour former un massif de sable de Fontainebleau NE34. La distance entre la base du monopieu et la base de la chambre est conservée égale à 100 mm (méthodologie similaire aux travaux de : LeBlanc et al., 2010 ; Peralta et al., 2010), pour minimiser l'effet des conditions aux limites. La méthode de compactage à sec est utilisée pour contrôler l'indice de densité du sable à une valeur de 0,53.
- Installation par battage : conscient des défis expérimentaux de la modélisation 1g (caractérisée par de faibles contraintes), un système de guidage et de battage a été développé pour assurer une répétabilité de la phase d'installation. Le monopieu utilisé est un tube en inox ayant un diamètre de 80 mm et une épaisseur de 2 mm.
- Chargement à une excentricité (e) de 385 mm ($e/D = 4,8$) : le monopieu est connecté par un fil à un moteur rotatif de capacité 500 N, relié à un capteur de force (Schlumberger U7000) ayant une capacité de 1000 N. Le déplacement est mesuré par deux capteurs lasers (Keyence IL-030), ayant une gamme de mesure de 25 mm et une précision micrométrique.

De plus, la rotation est mesurée par un inclinomètre (Sensel Measurement SM-NA10), ayant une gamme de mesure de $\pm 10^\circ$. La vitesse du moteur est suffisamment lente, pour mesurer avec une bonne précision le déplacement et la rotation. Les sorties de tous ces capteurs sont reliées à un programme d'acquisition développé sur LabVIEW.

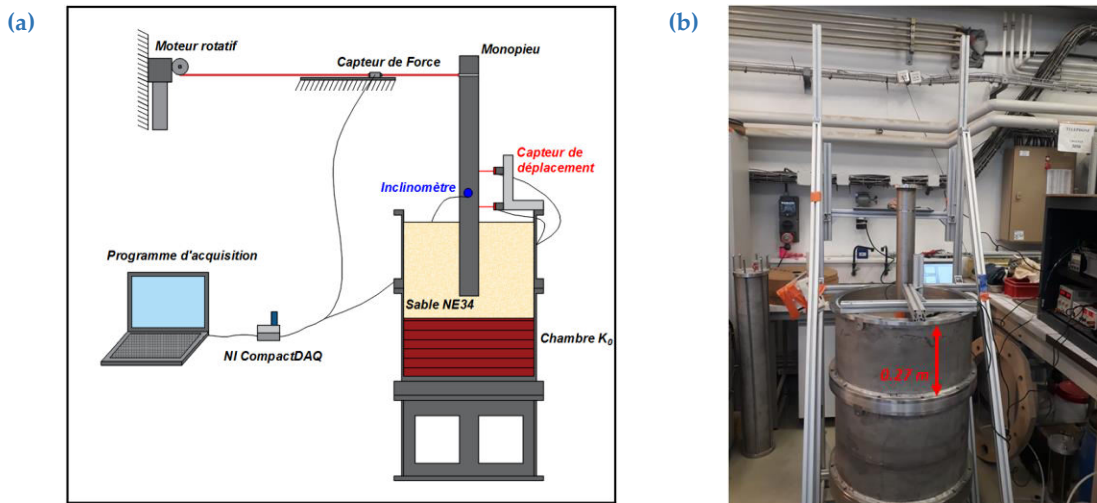


Figure 2. (a) Schéma et (b) photo du dispositif expérimental

B. Programme d'essais

La campagne expérimentale réalisée dans ma thèse étudie l'effet de la variation de plusieurs paramètres d'un monopieu sur l'aptitude d'un critère de rupture à identifier une capacité ultime équivalente : l'excentricité (e/D), l'indice de densité (I_d), et l'élancement (L/D). Les résultats obtenus montrent la dominance de l'effet de l'élancement. Le programme d'essais étudiant ce paramètre est présenté dans le **Tableau 1**. Les élancements choisis couvrent la gamme des élancements actuels et prévus. Chaque essai est réalisé deux fois pour vérifier la répétabilité.

Tableau 1. Programme d'essais pour déterminer la réponse monotone sous les conditions suivantes

Essai	Indice de densité I_d (-)	Excentricité e/D (-)	Elancement L/D (-)
M-1-1 / M-1-2	0.53	4.8	2
M-1-3 / M-1-4			3
M-1-5 / M-1-6			4
M-1-7 / M-1-8			5

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Fiabilité des résultats

La fiabilité des résultats obtenus est justifiée en vérifiant (i) la répétabilité et (ii) l'accord avec les résultats des travaux pertinents de la littérature. En termes de répétabilité, la répétition de chaque essai mène à des réponses monotones très proches (**Figure 3.a**), qui montrent la très bonne performance de la procédure expérimentale suivie. Les réponses monotones obtenues sont normalisées par rapport au déplacement à la surface et à la force correspondant au critère de rupture $0,1D$. La comparaison avec les résultats des travaux de LeBlanc et al. (2010) et Abadie (2015) montre un très bon accord pour les essais ayant des élancements similaires (**Figure 3.b**).

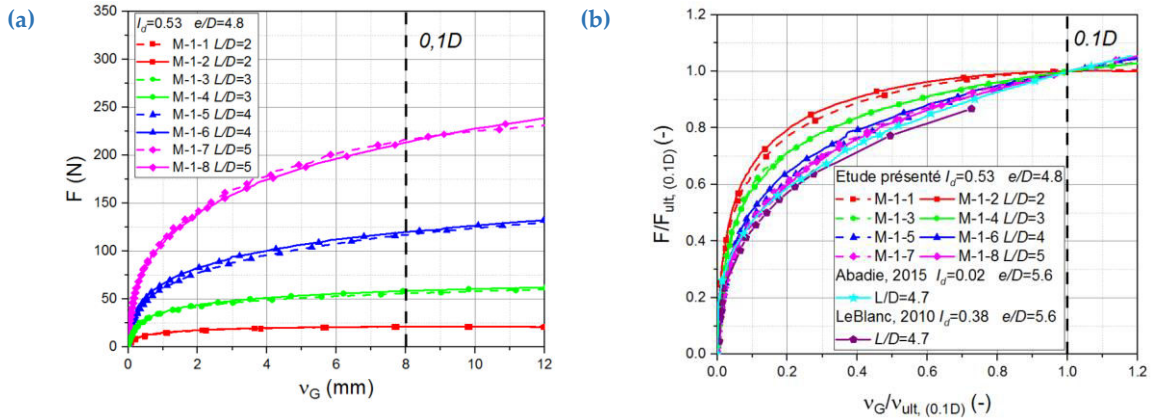


Figure 3. Vérification de la fiabilité des résultats obtenus : (a) répétabilité et (b) accord avec les résultats des travaux pertinents de la littérature (LeBlanc et al., 2010 ; Abadie, 2015)

B. Evaluation des critères de rupture conventionnels (0,1D et 2°)

Pour chaque essai, la capacité ultime est déterminée par le critère de rupture 0,1D. Puis les réponses monotones sont normalisées par rapport à la force et au déplacement correspondants. Les résultats normalisés sont présentés dans la Figure 4.a. La même observation que sur la Figure 1 est faite : la capacité ultime définie correspond à la résistance maximale pour les faibles élancements ($L/D = 2$) contrairement au cas des élancements plus élevés.

La même procédure est appliquée pour le critère de rupture 2° pour des réponses moment-rotation (Figure 4.b). Une tendance similaire, mais moins sévère, est remarquée concernant l'effet de l'élancement sur l'identification de la capacité ultime. Cette tendance peut être justifiée par la capacité de ce critère à considérer la variation de l'élancement par la variation de la profondeur du centre de rotation du monopieu. L'usage de ce critère est donc plus raisonnable que celui du critère 0,1D, bien qu'il existe toujours une limitation à assurer une identification équivalente de la capacité ultime pour différents élancements.

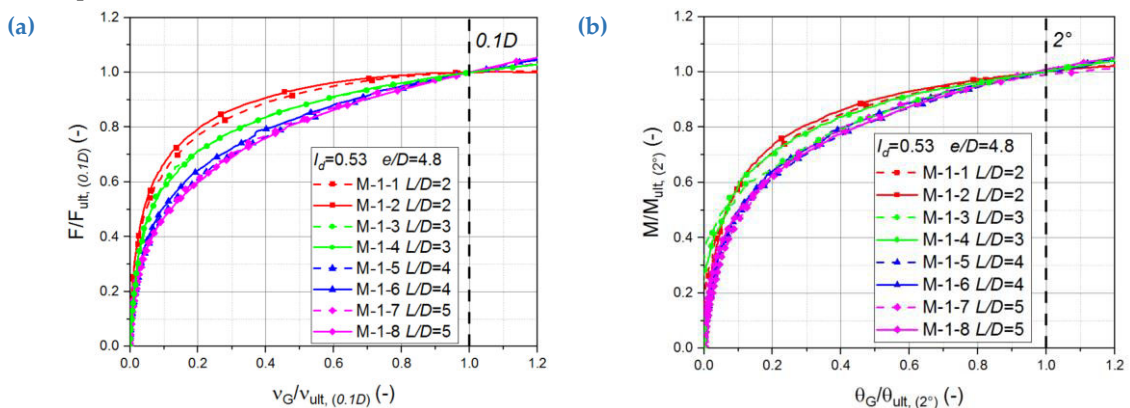


Figure 4. Réponses normalisées du monopieu étudié pour différents élancements avec les critères de rupture : (a) 0,1D et (b) 2°

C. Discussion et proposition d'un nouveau critère

Afin de déterminer la résistance maximale, le critère proposé par Manoliu et al. (1985) est introduit : approche de la réponse monotone d'un monopieu par une fonction hyperbolique. La résistance maximale correspond alors à l'asymptote horizontale de la courbe (Figure 5.b). En se basant sur

cette approche, la réponse sera tracée dans le plan $(v; v/F)$, v : déplacement et F : force) où la résistance maximale est égale à l'inverse de la pente de la régression linéaire de cette courbe. Une application légèrement modifiée de cette méthode consiste à appliquer la régression seulement à la partie linéaire de la courbe (Figure 5.a), permettant alors d'obtenir une prédiction plus proche de la résistance maximale du monopieu rigide (Figure 5.b).

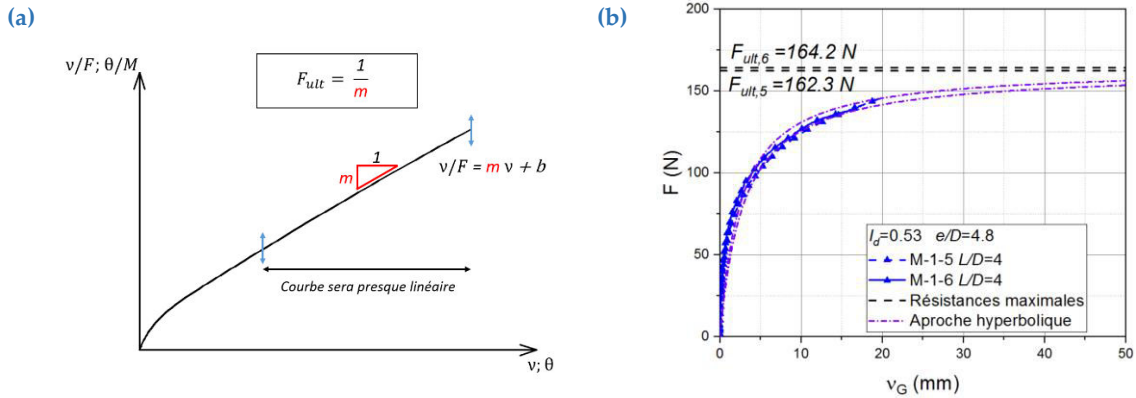


Figure 5. (a) Schéma explicatif et (b) exemple d'application du critère modifié de Manoliu et al. (1985)

Après la détermination de la résistance maximale pour chaque essai, la capacité ultime déterminée par les critères de rupture conventionnels est normalisée par rapport à ces résistances. Les résultats sont présentés dans la Figure 6, où les capacités ultimes à $L/D = 2$ sont proches de 90% de la résistance maximale et ce pourcentage diminue avec l'augmentation de l'élançement pour atteindre une valeur proche de 70% pour un $L/D = 5$.

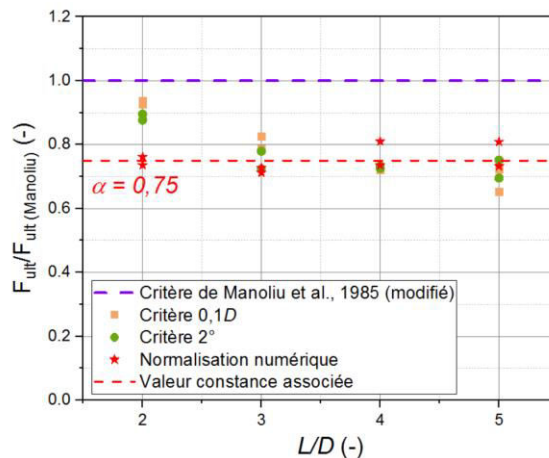


Figure 6. Normalisation des capacités ultimes obtenues par rapport aux résistances maximales

Afin d'évaluer d'une façon équivalente la capacité ultime des différents élançements, une méthode numérique a été développée. La courbe de l'essai M-1-6 ($L/D = 4$) est choisie comme courbe de référence (Figure 7.a) et est normalisée par le critère 0,1D. Pour chacun des autres essais, une normalisation est réalisée pour chaque point $(v_x; F_{ult,x})$ de la réponse et celle minimisant l'erreur avec la courbe de référence est retenue (Figure 7.b). Ces valeurs $(v_x; F_{ult,x})$ sont alors considérées comme étant le déplacement et la force ultimes de l'essai traité (Figure 7.a).

Les rapports entre la capacité ultime obtenue par cette méthode et la résistance maximale de chaque monopieu sont présentés sur la Figure 6. Les valeurs trouvées sont équivalentes, avec une moyenne

voisine de 75% de la résistance maximale. D’où la proposition du critère suivant pour identifier la rupture d’un monopieu rigide :

$$F_{ult} = 0.75 F_{max} \tag{2}$$

où F_{max} est la résistance maximale du monopieu déterminée par le critère de Manoliu modifié, présenté sur la **Figure 5.a**.

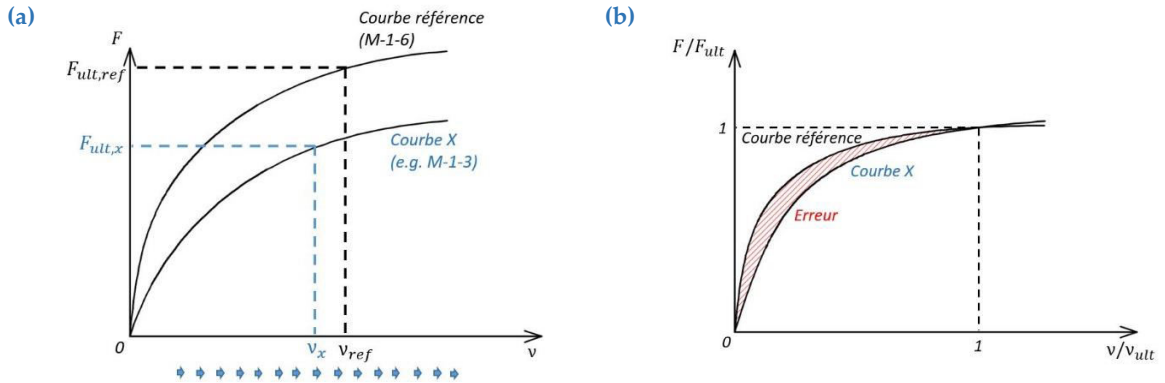


Figure 7.(a), (b) : Méthode numérique pour normaliser les courbes par rapport à une courbe de référence

D. Validation du nouveau critère

Afin de valider le nouveau critère proposé, trois essais in-situ du projet PISA, présentés en introduction, sont normalisés en se basant sur ce critère et le critère conventionnel 0,1D. Les résultats obtenus montrent l’aptitude très satisfaisante du nouveau critère à assurer une évaluation équivalente de la capacité ultime des monopieux, conduisant à une normalisation unique des trois courbes (**Figure 8.a**), ce que ne permet pas le critère 0,1D (**Figure 8.b**). L’essai DM3 ($L/D=8$) n’a pas permis d’atteindre la rupture définie par le nouveau critère, sa réponse a donc été estimée numériquement (**Figure 8.b**; courbe en pointillés).

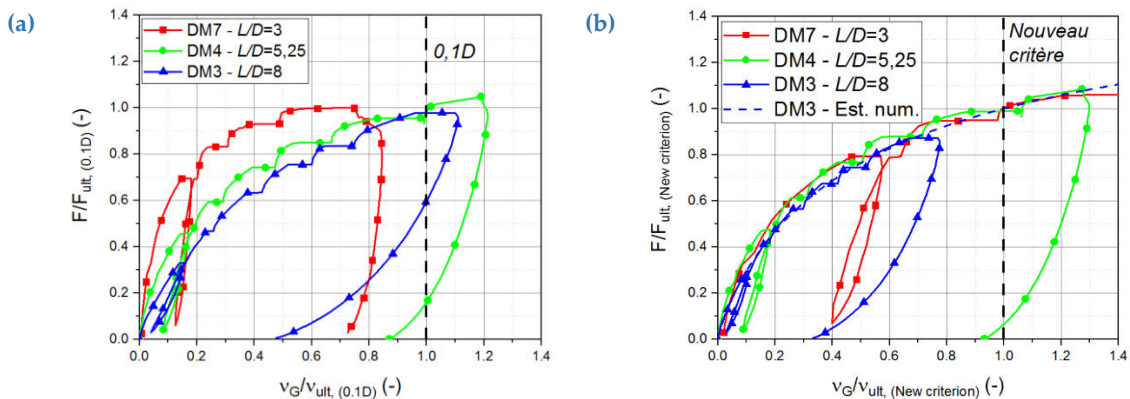


Figure 8. Comparaison entre (a) le critère 0,1D et (b) le nouveau critère proposé appliqués aux résultats obtenus par le projet PISA (McAdam et al., 2020)

IV. CONCLUSION

Après la réalisation d’une campagne expérimentale et l’analyse des résultats obtenus, un nouveau critère de rupture est proposé pour les monopieux rigides. Ce critère est caractérisé par son aptitude à assurer une identification équivalente de la capacité ultime pour différents élancements, au

contraire des critères conventionnels. L'adoption de ce critère permet d'éviter la limitation des lois empiriques, qui prévoient la réponse latérale cyclique d'un monopieu rigide en se basant sur les caractéristiques du chargement. En plus, à l'aide de ce critère, une loi empirique globale peut être élaborée en collectant et ré-analysant des essais existants dans la littérature.

V. REFERENCES

Abadie, C. N. (2015). *Cyclic lateral loading of monopile foundations in cohesionless soils* (Doctoral dissertation, University of Oxford).

Abadie, C., Byrne, B., Houlsby, G., Burd, H., Mcadam, R., Beuckelaers, W., 2020. Modelling of offshore wind monopile lifetime performance, *Frontiers in Offshore Geotechnics IV: Proceedings of the 4th International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG 2020)*, Taylor & Francis Books Ltd

Byrne, B. W., McAdam, R. A., Burd, H. J., Houlsby, G. T., Martin, C. M., Beuckelaers, W. J. P., ... & Plummer, M. A. L. (2017, January). PISA: new design methods for offshore wind turbine monopiles. In *Offshore Site Investigation Geotechnics 8th International Conference Proceeding* (Vol. 142, No. 161, pp. 142-161). Society for Underwater Technology.

Cox, W. R., Reese, L. C., & Grubbs, B. R. (1974, May). Field testing of laterally loaded piles in sand. In *Offshore Technology Conference*. OnePetro.

Dupla, J. C., Palix, E., Damblans, G., Puech, A., Blanc, M., Dano, C., ... & Burlon, S. (2019). Le projet ANR SOLCYP+ pour améliorer le dimensionnement des monopieux utilisés comme fondations d'éoliennes marines. *Revue française de géotechnique*, (158), 4.

Dietrich, T. (1982), Incremental parabolic hardening of psammic material; application to laterally loaded piles in sand, in 'UATAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials, Delft', pp. 13–22.

Manoliu, I., Dimitriu, D. V., Radulescu, N., & Dobrescu, G. H. (1985). load-deformation characteristics of drilled piers. proceedings of the eleventh international conference on soil mechanics and foundation engineering, San Francisco, 12-16 August 1985. *Publication of: Balkema (AA)*.

McAdam, R. A., Byrne, B. W., Houlsby, G. T., Beuckelaers, W. J., Burd, H. J., Gavin, K. G., ... & Zdravković, L. (2020). Monotonic laterally loaded pile testing in a dense marine sand at Dunkirk. *Géotechnique*, 70(11), 986-998.

Puech, A., & Garnier, J. (Eds.). (2017). *Design of piles under cyclic loading: SOLCYP recommendations*.

Peralta, P., & Achmus, M. (2010). An experimental investigation of piles in sand subjected to lateral cyclic loads. In *7th International Conference on Physical Modeling in Geotechnics*.

Schroeder, F. C., Merritt, A. S., Sørensen, K. W., Wood, A. M., Thilsted, C. L., & Potts, D. M. (2015). Predicting monopile behaviour for the Gode Wind offshore wind farm. In *Frontiers in Offshore Geotechnics III: Proceedings of the 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics* (Vol. 1, pp. 735-740).

Sørensen, S. P. H., Augustesen, A. H., Leth, C. T., Østergaard, M. U., & Møller, M. (2017, January). Consequences of py curve selection for monopile design for offshore wind turbines. In *Offshore Site Investigation Geotechnics 8th International Conference Proceeding* (Vol. 1062, No. 1069, pp. 1062-1069). Society for Underwater Technology.

Reese, L. C., Cox, W. R., & Koop, F. D. (1974, May). Analysis of laterally loaded piles in sand. In *Offshore Technology Conference*. OnePetro.

Richards, I. (2019). *Monopile foundations under complex cyclic lateral loading* (Doctoral dissertation, University of Oxford).

Wind Europe (2020, October 25). Extrait de Offshore wind in Europe – key trends and statistics 2020: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/offshore-wind-in-europe-key-trends-and-statistics-2020/>