EVOLUTION DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN MODELE REDUIT D'EOLIENNE EN MER SOUS SOLLICITATION CYCLIQUE

EVOLUTION OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF AN OFFSHORE WIND TURBINE'S SCALED MODEL UNDER CYCLIC LOADING

Laura KERNER[1], Jean-Claude DUPLA[1], Gwendal CUMUNEL[1], Jean CANOU[1], Jean-Michel PEREIRA[1], Pierre ARGOUL[2]
[1] *Laboratoire Navier (IFSTTAR, CNRS, ENPC), Champs-sur-Marne, France*
[2] *IFSTTAR, Laboratoire MAST-EMGCU, Champs-sur-Marne, France*

RÉSUMÉ – Les éoliennes en mer sont des structures soumises à divers chargements latéraux cycliques représentant 10^7 cycles lors de leur exploitation pendant 20 ans. Cette étude présente un dispositif expérimental permettant d'appliquer une telle sollicitation sur un modèle réduit d'éolienne offshore en suivant l'évolution du déplacement, de la rotation et de la première fréquence propre du modèle.

ABSTRACT – Offshore wind turbines are slender structures submitted to various cyclic lateral loadings representing 10^7 cycles during its operation in 20 years. The present study deals with an experimental procedure allowing to apply a cyclic loading on an offshore wind turbine's scaled model and to measure displacement, rotation, and first natural frequency of this structure.

1. Introduction

Le développement des éoliennes en mer s'est accru de façon exponentielle ces dernières années, en particulier en Europe du Nord. Suite au Grenelle de l'environnement, la France s'est engagée à installer 6 GW d'éoliennes en mer à l'horizon 2020. Ces structures étant récentes, il existe peu de retour d'expérience sur leur comportement à long terme.

Une éolienne en mer est soumise à divers chargements cycliques dynamiques tels que la houle, les courants et le vent. La fréquence de ces sollicitations est inférieure à 0,2 Hz, comme présenté sur la Figure 1. En considérant les caractéristiques typiques d'une éolienne offshore de 5 MW définies par Jonkman et al. (2009), illustrées sur la Figure 1, la fréquence du rotor, notée *1P*, varie entre 0,12 et 0,2 Hz tandis que la fréquence de passage des pales au niveau du mât, notée *3P*, est comprise entre 0,36 et 0,6 Hz. Pour éviter tout phénomène de résonance qui viendrait sévèrement endommager la structure, les éoliennes sont dimensionnées afin d'avoir leur première fréquence propre dans l'intervalle compris entre les fréquences *1P* et *3P*. Ces éoliennes sont appelées « soft-stiff », structures caractérisées par un mât élancé (soft) et une fondation rigide (stiff). Dans cette étude, seules les éoliennes fondées sur monopieu sont considérées car elles représentent actuellement plus de 80 % des éoliennes installées.

Il convient ainsi d'évaluer très précisément la première fréquence propre d'une éolienne en mer mais aussi l'évolution de cette fréquence. De fait, selon LeBlanc et al. (2010a), une éolienne est soumise à 10^7 cycles de chargement pour une utilisation de 20 ans. Ce grand nombre de cycles va influer la densité du sol, l'affouillement et donc l'interaction sol-structure qui est un paramètre majeur dans l'évaluation de la première fréquence propre de l'éolienne. Ces cycles vont aussi engendrer le déplacement latéral et la rotation de la structure. Pour une exploitation optimale de l'éolienne, les limites en déplacement, en rotation et la première fréquence propre imposée par l'Etat Limite de Service (ELS) ne doivent pas être atteintes.

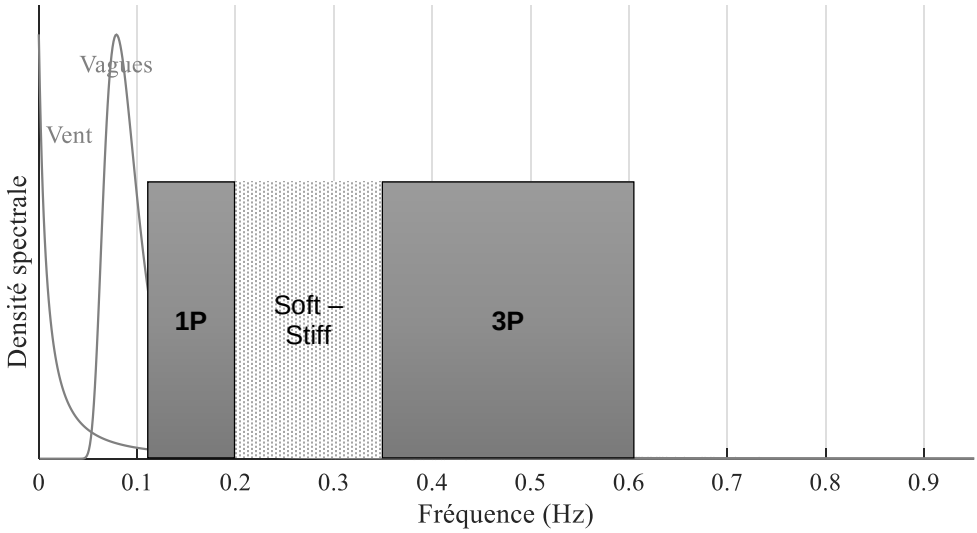


Figure 1 - Ensemble des fréquences agissant sur l'éolienne NREL 5 MW

A l'ELS, selon les guides de référence API (2000) ou DNVGL (2016), la rotation maximale d'une éolienne offshore est de 0,25° lors de l'exploitation de l'éolienne. Concernant le déplacement latéral de l'éolienne, la limite est de 0,20 m en se situant au niveau de la surface de sol, d'après Arany et al. (2014). Pour la première fréquence propre de la structure, une marge de sécurité de 5% entre celle-ci et les fréquences d'excitation doit être observée.

Le travail introduit ici se concentre sur l'étude d'un modèle réduit d'éolienne offshore à l'échelle 1/120, installé dans un massif de sable de Fontainebleau NE34, soumis à 10^6 cycles de chargement latéral. Ces sollicitations sont représentatives du chargement induit par le vent, la houle et les courants sur une telle structure. En se basant sur l'ELS, le déplacement et la rotation de la fondation de type monopieu sont étudiés ainsi que l'évolution de la première fréquence propre de la structure globale constituée du mât et du monopieu.

Dans une première partie, le dispositif expérimental mis en place pour conduire ce type d'essai est décrit en mettant en exergue l'instrumentation et le pilotage développé sur LabVIEW[1]. Un essai typique est ensuite présenté et les résultats obtenus sont discutés vis-à-vis de l'ELS.

2. Dispositif expérimental

Ayant pour objectif d'étudier un modèle réduit 1g d'éolienne offshore soumis à des sollicitations cycliques, un dispositif expérimental a été développé permettant de suivre l'évolution du déplacement, de la rotation et de la première fréquence propre d'une telle structure.

2.1. Principe[2]

L'essai développé consiste, à l'aide d'un pot vibrant, à appliquer à la fois un chargement cyclique sur le modèle réduit et à mesurer, lors de l'essai, la valeur de la première fréquence propre du modèle réduit.

Le modèle réduit est constitué de deux éléments en acier inoxydable : un monopieu ayant un diamètre de 30 mm, une fiche de 300 mm pour une épaisseur de 2 mm et un mât de 20 mm de diamètre, de 530 mm de hauteur et de 2 mm d'épaisseur. Le modèle est installé par

[1] Logiciel de développement de systèmes pour les applications de test, de mesure et de contrôle
[2] Pour plus de détails concernant le dimensionnement du modèle réduit et son installation voir Kerner (2017)

battage manuel dans un massif de sable de Fontainebleau NE34 (Tableau 1), massif mis en place par pluviation avec un indice de densité de 0,7.

Tableau 1 - Propriétés du sable de Fontainebleau, Feia et al. (2016)

D_{50} (mm)	C_u	e_{min}	e_{max}	ρ_s (g/cm^3)
0,21	1,5	0,56	0,88	2,65

Une baudruche en néoprène, placée en tête du massif, permet d'appliquer une contrainte verticale effective de 10 kPa sur le massif de sable. Cette contrainte permet de minimiser la variabilité des mesures et de stabiliser les caractéristiques du système sol-pieu en accord avec Thomassen et al. (2010). La Figure 2 illustre cette première phase d'installation de l'essai.

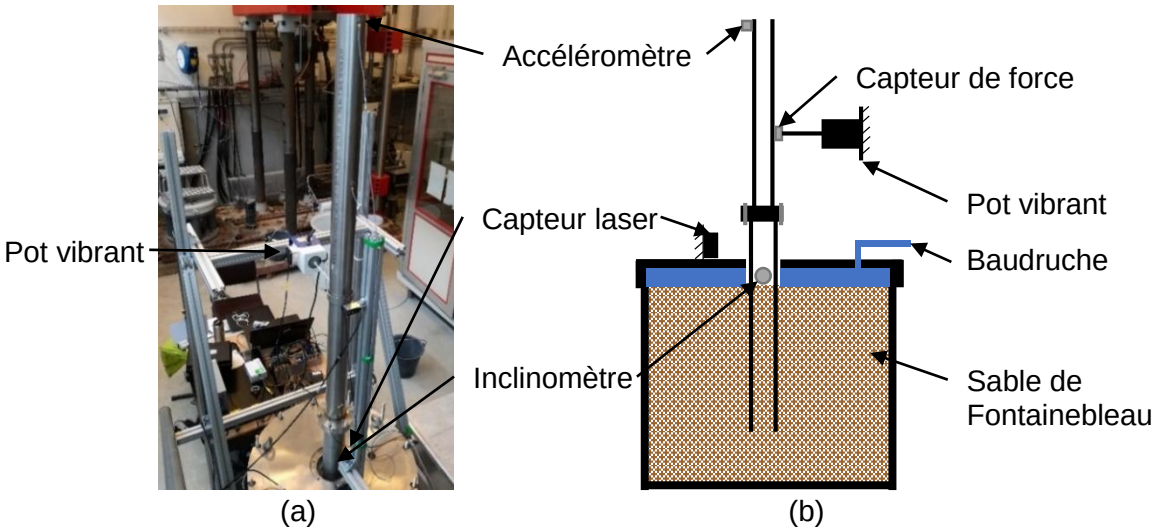


Figure 2 – (a) Photo et (b) schéma du dispositif expérimental

Illustrés sur la Figure 3, les paramètres pris en compte pour la définition du chargement cyclique sont : le nombre de cycles, la fréquence des cycles *f*, la valeur moyenne du chargement statique appliqué, F_{stat}, et l'amplitude de la composante cyclique, F_{cyc}. Ces paramètres permettent ainsi de modéliser différents cas de chargement : vent seul, houle seule, vent et houle combinés, tempête, … Le pot vibrant permet par ailleurs d'appliquer une sollicitation impulsionnelle au modèle réduit, soit un signal sinusoïdal comprenant une seule période (entre –π/2 et 3π/2). Cette sollicitation brève permet la vibration libre de la structure, enregistrée par un accéléromètre, et ainsi d'évaluer la première fréquence propre du modèle réduit.

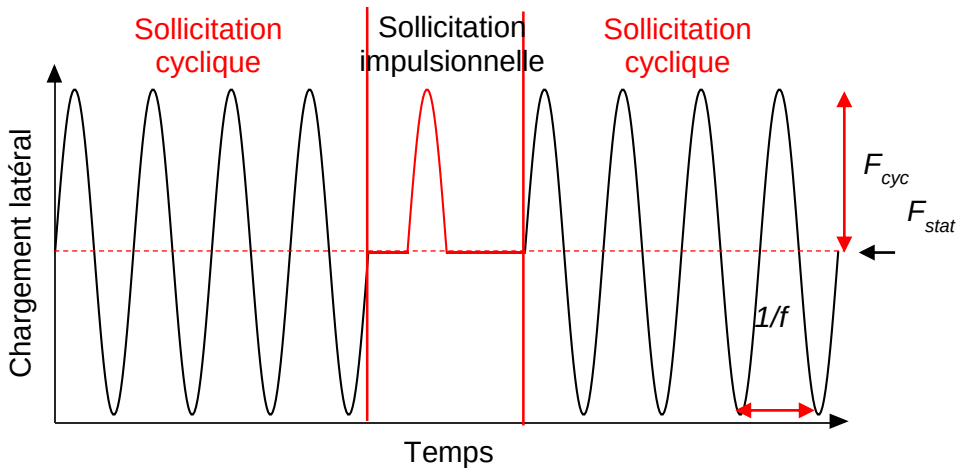


Figure 3 - Sollicitations appliquées par le pot vibrant

Le principe de l'essai est ainsi d'appliquer une sollicitation cyclique sur la structure et, tous les *i* cycles, d'évaluer la réponse dynamique du modèle à l'aide d'une sollicitation impulsionnelle. Ce principe est illustré sur la Figure 3. Pour l'essai typique, présenté dans la partie suivante, une sollicitation impulsionnelle est appliquée tous les 10^3 cycles, avec 10^6 cycles au total, soit 10^3 sollicitations impulsionnelles réalisées lors de l'essai.

Lors d'un essai, le déplacement et la rotation de la fondation à la surface du sol sont mesurés à l'aide d'un capteur laser et d'un inclinomètre, comme représentés sur la Figure 2. Le capteur de force, placé à l'extrémité du pot vibrant, permet de mesurer la sollicitation appliquée. Un accéléromètre, placé en tête du mât, relève l'accélération de la structure lors de la vibration libre engendrée par une sollicitation impulsionnelle. La transformée de Fourier du signal de ce capteur permet donc d'évaluer la première fréquence propre du modèle réduit. L'ensemble de ces capteurs et leur utilisation sont décrits dans le paragraphe suivant.

2.2. Instrumentation

L'instrumentation est divisée en deux catégories dans ce dispositif : les éléments en lien direct avec les sollicitations, c'est-à-dire le pilotage du programme LabVIEW, et les capteurs en lien avec l'acquisition des données (déplacement, rotation, accélération).

Le pot vibrant (Modal Shop 2004E) est muni d'un embout taraudé permettant d'insérer une tige filetée afin d'appliquer la sollicitation sur la structure. La tige est fixée sur le modèle réduit par l'intermédiaire du capteur de force, lui-même relié à la structure par un anneau de fixation comme illustré sur la Figure 4. Le capteur de force (FUTEK LCM 100), ayant une capacité en traction et en compression de 44,5 N, a été choisi afin de piloter le pot vibrant.

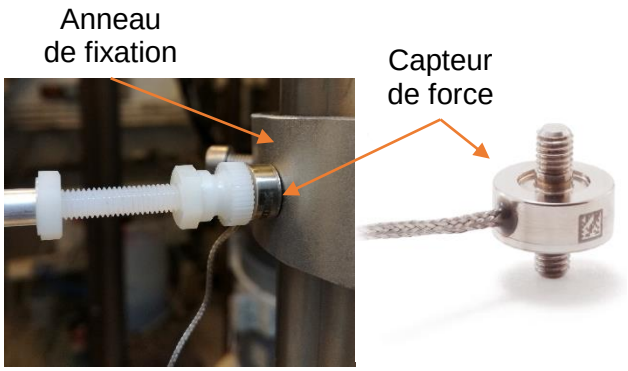


Figure 4 - Installation du capteur de force

(a) (b) (c)

Figure 5 - (a) Capteur de déplacement laser Keyence IL-030, (b) inclinomètre Sensel Measurement SM-N10 et (c) accéléromètre Brüel et Kjær 4507 B004

Lors de la phase de sollicitation cyclique, la force appliquée par le pot vibrant est mesurée grâce au capteur de force. Le déplacement et la rotation de la structure au niveau de la

fondation sont mesurés, respectivement, à l'aide du capteur laser et de l'inclinomètre illustrés sur la Figure 5 (a) et (b). Lors de la phase de sollicitation impulsionnelle, un accéléromètre (Brüel et Kjær 4507 B004), fixé en tête du mât, enregistre la réponse libre de la structure (Figure 5 (c)).

2.3. Programme de pilotage et d'acquisition

Le programme LabVIEW développé permet à la fois de réaliser le pilotage et l'acquisition des données pendant un essai cyclique. Deux phases sont à distinguer lors du pilotage et de l'acquisition : la partie « sollicitation cyclique » et la partie « sollicitation impulsionnelle ».

Le programme permet de régler les caractéristiques de la sollicitation cyclique : le nombre de cycles, la fréquence de la sollicitation, la force statique et l'amplitude de la composante cyclique. Une boucle d'asservissement permet de contrôler et de corriger la force statique et l'amplitude cyclique toutes les secondes afin d'assurer que la sollicitation cyclique appliquée reste la même pendant toute la durée de l'essai. La mesure réalisée durant cette phase de sollicitation cyclique concerne le déplacement et la rotation de la structure ainsi que la valeur moyenne de la force statique et de l'amplitude cyclique. Ces mesures permettent d'évaluer les variations du chargement cyclique.

Les caractéristiques de la sollicitation impulsionnelle (amplitude, durée) sont réglables dans le programme. Cette sollicitation est réalisée régulièrement après un nombre donné de cycles sur la structure ; ce nombre constitue un autre paramètre du programme. L'acquisition des données lors de la sollicitation impulsionnelle concerne uniquement la mesure de l'accéléromètre lors de la vibration libre de la structure. La mesure dure cinq secondes avec une fréquence d'échantillonnage de 1652 Hz.

3. Essai typique

Un essai typique de sollicitation cyclique réalisé sur le modèle réduit à l'échelle 1/120 est introduit dans cette partie. Un million de cycles ont été appliqués sur la structure. Le déplacement, la rotation et l'évolution de la première fréquence propre sont présentés et discutés.

3.1. Caractéristiques de l'essai

L'essai réalisé est représentatif d'une sollicitation dite « classique » appliquée sur l'éolienne de référence NREL 5 MW (Kerner, 2017). Pour une vitesse de vent moyenne de 15 m/s, le chargement du vent sur la structure est de 1,7 MN. La hauteur de vagues correspondante est ainsi de 5 m pour un chargement de 1,2 MN. La fréquence du chargement induit par le vent est très faible, ce chargement peut donc être assimilé à un chargement statique. La fréquence de la houle est de 0,1 Hz en moyenne, la houle correspond donc à une sollicitation cyclique.

De ce fait, le chargement appliqué sur le modèle réduit est composé d'une force statique, F_{stat}, représentative du vent et d'une force cyclique, F_{cyc}, représentative de la houle. La valeur de ces deux forces est indiquée dans le Tableau 2. La fréquence de la sollicitation choisie correspond à la plus haute fréquence de la gamme *1P* relative à la rotation du rotor. Cette fréquence est la plus proche de la première fréquence propre de la structure et donc, potentiellement, la plus dommageable. Cette fréquence *1P* est de 0,2 Hz pour l'éolienne de référence, ce qui correspond à 34 Hz pour le modèle 1/120.

Tableau 2 - Caractéristiques de la sollicitation cyclique d'après Kerner (2017)

Force statique, F_{stat}	1,1 N	Amplitude cyclique, F_{cyc}	0,7 N
Fréquence, f	34 Hz	Nombre de cycles	10^6

Pour évaluer la première fréquence propre de la structure, une sollicitation impulsionnelle est appliquée tous les 10^3 cycles sur le modèle réduit.

3.2. Résultats obtenus

Les résultats en déplacement et rotation sont présentés sur la Figure 6 (a) et (b) respectivement. Le déplacement latéral de la fondation à la surface du sol est de l'ordre d'une dizaine de micromètres. La rotation maximale enregistrée est de 0,13°. Que ce soit au niveau du déplacement ou de la rotation, aucune stabilisation n'est observée après un million de cycles.

L'évolution de la première fréquence propre est représentée sur la Figure 7 (a). Les sollicitations cycliques ont engendré une diminution de la fréquence propre. Cette décroissance peut être lié à une diminution de la densité du sable autour de la structure et donc à une modification de l'interaction sol-structure. En traçant l'erreur relative entre la fréquence initiale et la fréquence déterminée après *i* cycles, une erreur maximale de 3,3 % est obtenue, comme illustrée sur la Figure 7 (b).

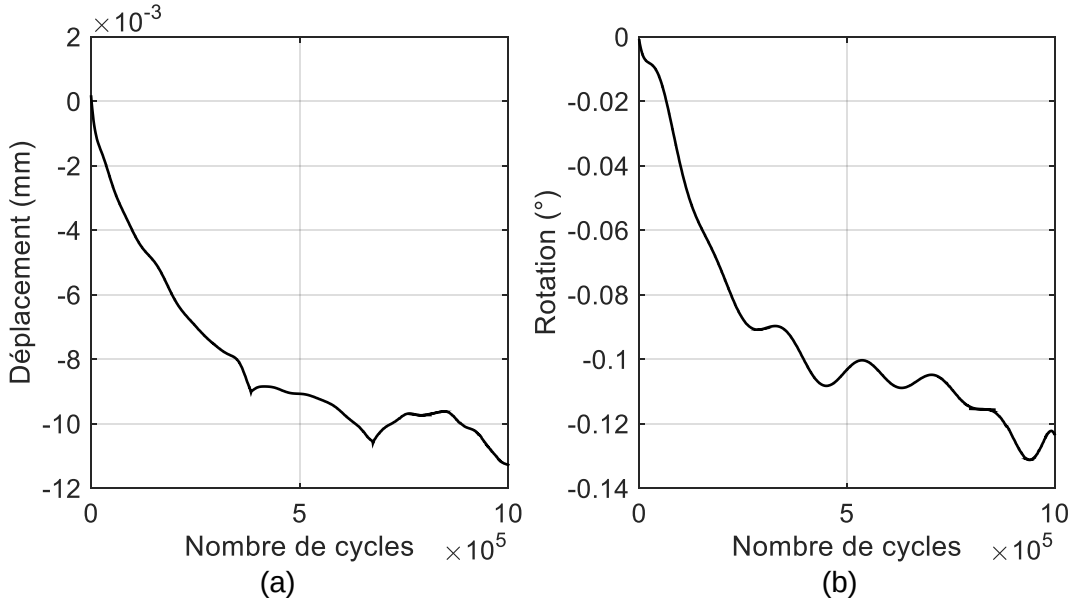


Figure 6 - (a) Déplacement et (b) rotation en fonction du nombre de cycles

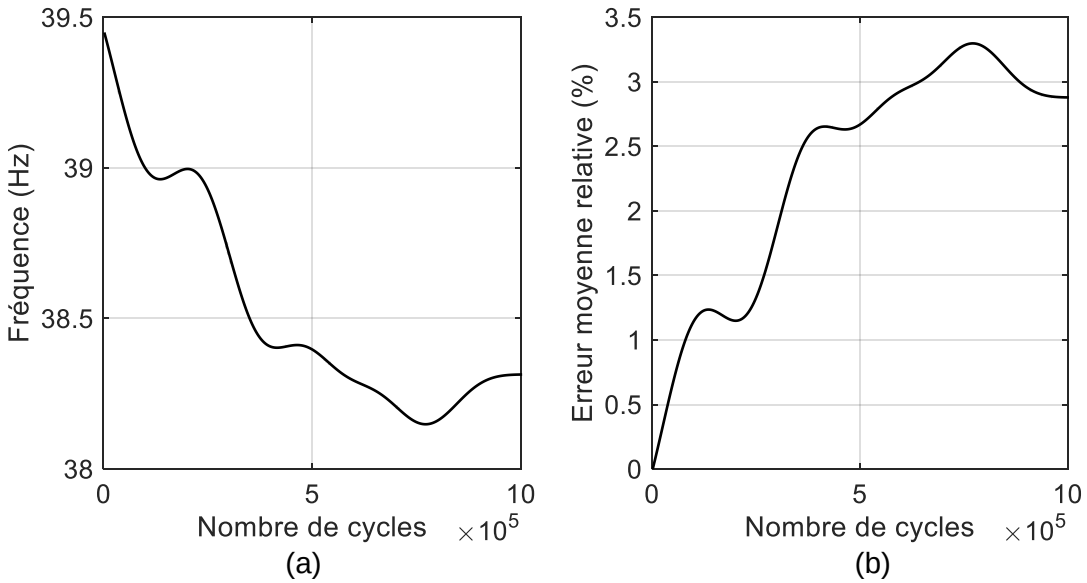


Figure 7 - (a) Fréquence et (b) erreur relative en fonction du nombre de cycles

3.3. Discussion

Comme souligné dans l'introduction, le déplacement maximal admissible à l'ELS, y_{lim}, est de 0,20 m pour l'éolienne de référence NREL 5 MW avec un monopieu de 6 m de diamètre (*D*). En conservant un rapport égal entre le déplacement maximal et le diamètre de la fondation pour le prototype et le modèle réduit, on obtient :

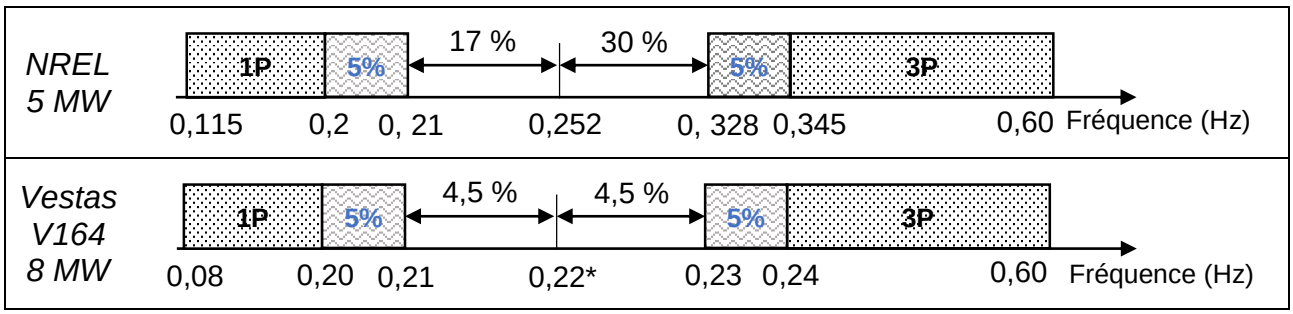
$$\left(\frac{y_{lim}}{D}\right)_{prototype} = \left(\frac{y_{lim}}{D}\right)_{modèle} \quad \text{d'où} \quad y_{lim}^{modèle} = 2{,}67\ mm$$

Le déplacement maximal admissible pour le modèle réduit est donc de 2,67 mm. Compte tenu qu'un déplacement de quelques dizaines de micromètres a été relevé, ce déplacement est très éloigné de la limite imposée par l'ELS.

La rotation étant un paramètre adimensionnel, la limite à l'ELS est identique pour le modèle réduit et le prototype. Cette rotation limite de 0,25° n'est pas atteinte lors de l'essai.

La variation limite admissible à l'ELS pour la première fréquence propre d'une éolienne dépend fortement de l'éolienne considérée. Dans le Tableau 3, sont récapitulées les fréquences *1P*, *3P* ainsi que les marges de sécurité de 5% pour l'éolienne NREL 5 MW et l'éolienne Vestas V164 8 MW. Pour l'éolienne NREL 5 MW, une diminution de 17 % ou une augmentation de 30 % sont acceptables, comme illustré dans le Tableau 3. Les résultats obtenus se situent donc dans la plage de variation admissible à l'ELS. Il semble néanmoins intéressant de souligner que, même si l'erreur relative en fréquence de 3,3 % relevée n'est pas dommageable pour le prototype choisi ici, cette valeur est très proche de la limite imposée pour l'éolienne Vestas V164 8 MW.

Tableau 3 – Récapitulatif des fréquences d'excitation pour des éoliennes de 5 MW et 8 MW



** fréquence estimée*

Que ce soit au niveau du déplacement, de la rotation ou de la première fréquence propre, l'ELS n'est pas atteint. Cet essai n'a donc pas endommagé sévèrement la structure. Pour autant, l'essai a été conduit pour un million de cycles seulement, une éolienne étant soumise à 10^7 cycles lors de son exploitation. L'essai n'a pas abouti à une stabilisation des paramètres étudiés. La limite en rotation, par exemple, pourrait être atteinte, la valeur obtenue étant relativement proche de la limite imposée par l'ELS.

4. Conclusions

Dans cette étude, le protocole expérimental permettant d'analyser le comportement d'un modèle réduit 1g d'éolienne offshore fondé sur monopieu a été introduit. Le dispositif expérimental combiné à un programme de pilotage et d'acquisition, développé sur LabVIEW, permet d'appliquer une sollicitation cyclique sur la structure pour un très grand nombre de cycles. Les paramètres de la sollicitation cyclique sont définis dans le programme LabVIEW et offrent la possibilité d'appliquer différents types de sollicitations cycliques (vent, houle, tempête). Le protocole expérimental mis en place permet, par ailleurs, de suivre l'évolution du déplacement et de la rotation de la structure à la surface du sol ainsi que la première fréquence propre de la structure complète.

Un essai typique retranscrivant les sollicitations du vent et de la houle sur un modèle réduit à l'échelle 1/120 a été introduit. A la lumière des limites imposées par l'ELS, le déplacement et la rotation obtenus sont inférieurs aux limites admissibles. Un résultat analogue est relevé pour l'évolution de la première fréquence propre. Le protocole expérimental permettant d'opérer des essais variés sur le modèle réduit, il conviendra ainsi d'étudier par la suite l'influence des paramètres majeurs de la sollicitation cyclique : fréquence de la sollicitation, nombre de cycles, valeur du chargement du vent et de la houle. Le sable de Fontainebleau, considéré ici, permet de valider une procédure d'essai. Cependant, les résultats étant directement liés au type de sol, une étude comparative entre sol fin et sol grenu ainsi qu'entre sol sec et saturé peut être envisagée par la suite. Des essais sur les sols rencontrés dans les projets de parcs éoliens offshore français seraient particulièrement pertinents.

Les limites de l'ELS sont variables en fonction des guides considérés : la rotation admissible pouvant être de 0,25 ou 0,5° et la marge de sécurité entre fréquence d'excitation et fréquence propre oscille entre 5 et 10 %. Il est donc nécessaire d'exploiter les résultats en les comparant aux divers critères existant pour l'ELS.

Enfin, l'étude des limites imposées par un modèle réduit 1g présente une perspective de recherche plus large autour de cette problématique. Une comparaison entre essais en centrifugeuse et essais 1g en laboratoire serait ainsi un angle d'approche intéressant.

5. Références bibliographiques

API (2000). American Petroleum Institute Recommended Practice 2A-WSD, Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design.

Arany L., Bhattacharya S., Hogan S. (2014). Dynamic soil-structure interaction issues of offshore wind turbines, Proceeding of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2014, pp. 3611 – 3617, Porto, Portugal.

DNVGL-ST-0126 (2016). Offshore Standard: Support structures for wind turbines.

Feia S., Sulem J., Canou J., Ghabezloo S., Clain X. (2016). Changesin permeability during triaxial loading: effect of fine particles production, Acta Geotechnica, vol. 11, n°11, pp. 1 – 19.

Jonkman J., Butterfield S., Musial, Scott G. (2009). Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore system development, National Renewable Energy Laboratory NREL/TP-500-38060.

Kerner L. (2017). Interaction sol-structure sous sollicitations cycliques dynamiques – Application aux éoliennes offshores fondées sur monopieu, Thèse de doctorat, Université Paris Est.

LeBlanc C., Houlsby G., Byrne B. (2010). Response of stiff piles to long-term cyclic loading, Géotechnique, vol. 60, n°12, pp. 79 – 90.

Thomassen K., Roesen H., Ibsen L., Sørensen S. (2010). Small-scale testing of laterally loaded non-slender monopoles in sand, Department of Civil Engineering, Aalborg University, DCE Technical Reports n°90, Aalborg, Denmark.