

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



**Modélisation du rayonnement acoustique sous-marin d'un mât
d'éolienne durant son battage**

F. Chati^a, J. Van De Loock^b, D. Decultot^a, F. Leon^a, J. Laurent^c, J. De Rosny^d, C. Prada-Julia^d, I. Haghighi^e, E. Nicolini^e, D. Cathie^a, D. Clorennec^f et T. Folegot^f

^aUniversité du Havre, LOMC UMR CNRS 6292, 75 rue Bellot, 76058 Le Havre, France

^bLOMC CNRS 6294, 75 Rue Bellot, 76600 Le Havre, France

^cInstitut Langevin, ESPCI Paris, CNRS, PSL Research University, 1 rue Jussieu, 75005 Paris, France

^dInstitut Langevin, ESPCI Paris, UMR CNRS 7587, 1 rue Jussieu, F-75005 Paris, France

^eCathie Associate, Mommaertslaan 22, Park Hill, 1831 Diegem, Belgique

^fQuiet-Oceans, 65 place Nicolas Copernic, 29280 Plouzane, France

farid.chati@univ-lehavre.fr

L'approche utilisée dans ce travail repose sur la création d'un modèle par éléments finis d'un pieu. Trois parties du pieu de fondation sont ainsi modélisées pour représenter sa position lors de son enfoncement. Une première partie émergée est soumise à une force appliquée sur la tête du tube. Une deuxième partie immergée dans l'eau représente la source sonore à caractériser. La troisième partie du pieu modélise la partie enfouie dans le sol. Dans le cadre de cette pré-étude, les dimensions fictives du pieu modélisé sont de 8 m de diamètre et de 64 m de longueur avec une longueur de la partie immergée constante à 28 m.

Les prédictions numériques de la modélisation présentées sont interprétées en identifiant les ondes élastiques générées dans le pieu suite à l'application d'une force. L'uniformité de cette force appliquée sur la circonférence du pieu permet une modélisation axisymétrique. Une analyse des déplacements axiaux et radiaux liés à la propagation des ondes est réalisée en s'appuyant sur les calculs donnés par la théorie de l'élasticité. Les résultats (déplacements et pressions) présentés concernent uniquement les deux parties hautes du tube.

1 Introduction

Les constructions offshore peuvent nécessiter l'enfoncement de pieux de fondation dans le sol par des opérations de battage. Dans le cas de parcs éoliens en mer, ces opérations engendrent des bruits acoustiques sous-marins pouvant s'étaler dans le temps et entraîner des perturbations sur la vie de la faune aquatique [1, 2]. Cette étude liée à la construction d'un parc éolien est menée dans le cadre du projet de recherche RESPECT* financé par Eoliennes en Mer Dieppe Le Tréport (EMDT). Un premier objectif est de modéliser l'opération de battage de pieux de fondation d'éoliennes afin de caractériser les sources sonores sous-marines ainsi générées [3, 4]. Les résultats devront permettre de prédire puis de réduire les niveaux de bruits associés. Le deuxième objectif est de prédire l'impact de la mise en place de solutions de réduction sonore sur les populations de cétacés dans les zones d'implantation des parcs éoliens en mer [5]. Dans cet article seuls les résultats caractérisant la source sonore obtenus avec une modélisation de l'opération de battage par une méthode numérique d'éléments finis sont présentés. Après une présentation de la configuration d'étude, une analyse des déplacements radiaux de la coque est donnée reposant sur la propagation d'ondes longitudinales dans le tube. Puis un relevé des pressions calculées dans la couche d'eau est présenté à deux distances du tube.

*RESPECT: *Réduction des Empreintes Sonores des Parcs Eoliens en mer: Comprendre pour de nouvelles Technologies*

2 Configuration d'étude

Dans cette pré-étude la fondation d'une éolienne est modélisée par un tube en acier inoxydable (figure 1a). Les dimensions retenues pour cette étude sont un tube de rayon externe de 4 m, une épaisseur (h) de 0,08 m et une longueur de 64 m. A noter que le diamètre de ce tube ne correspond pas au diamètre réel. Le tube est en contact avec trois milieux: la partie haute est la partie émergée (H_a); la partie basse qui est la partie dans le sol (H_s), est en contact avec les sédiments; la partie intermédiaire est en contact avec l'eau (H_w). Cette dernière partie est la partie intéressante pour évaluer les niveaux sonores sous-marins émis par l'opération de battage. Les résultats présentés dans ce texte sont calculés pour des conditions d'enfoncement $H_a=28\text{m}$, $H_w=28\text{m}$ et $H_s = 8\text{m}$. La hauteur d'eau de 28m correspond à une limite haute du niveau de la mer communément rencontrée dans la région d'étude.

La configuration d'étude modélisée est présentée sur la figure 1b. Le modèle en 2D-axisymétrique est réalisé avec le logiciel ANSYS. L'analyse est menée dans le domaine

temporel avec un échantillonnage de calcul de 0,01 ms. La surface de l'eau est considérée comme parfaitement réfléchissante. Les conditions d'impédance sont appliquées sur les autres limites du domaine de l'eau (sol et limites du modèle) afin de s'approcher d'un domaine infini. Sur ces limites, l'amplitude des ondes réfléchies est considérée comme négligeable. Le profil de la vitesse du son dans l'épaisseur de la couche d'eau est considéré comme constant. La valeur de cette vitesse est de 1500 m/s et la densité de l'eau est de 1025 kg/m³. Les conditions fluide/structure sont appliquées aux interfaces tube/eau et eau/sol et les caractéristiques du tube en acier retenues pour le calcul sont $\rho^p = 7850\text{kg/m}^3$, $E^p=200\text{GPa}$ et $\nu^p=0,3$.

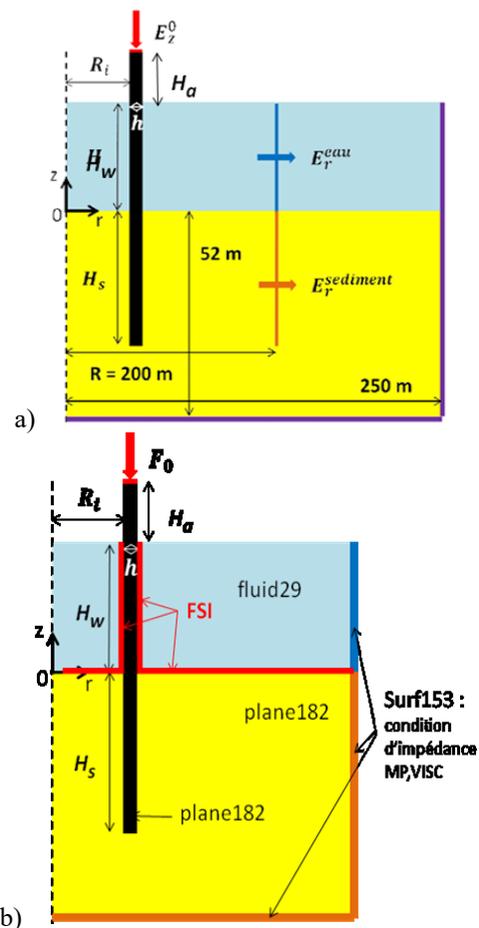


Figure 1- a) Dimensions de l'étude; b) Schéma de la modélisation.

Le sol est considéré comme un matériau élastique (E^s , ρ^s , ν^s) et modélisé avec les éléments PLANET182 [6]. Les valeurs E^s et ν^s retenues pour le sable et la craie sont issues des vitesses de compression et transversale données dans la

référence [7]. L'atténuation est introduite par l'atténuation de Rayleigh [6] et est calculée à partir des atténuations de compression et transversale en considérant un fluide équivalent. L'atténuation liée à la perte d'énergie lors de la friction du pieu sur le sédiment n'est pas prise en compte dans le modèle. Le tube et le sol partagent les mêmes nœuds de maillage, aucun glissement entre les deux n'est possible. La limite radiale du maillage est à 250 m de l'axe de symétrie du tube. La fenêtre temporelle utilisée est choisie pour éviter les ondes réfléchies sur les limites du domaine modélisé. La limite basse du modèle est de 16 m au-dessous du tube ($z=-52\text{m}$). La taille d'un élément du maillage est de 20 cm. Aussi la fréquence maximale d'étude est de 1,25 kHz pour respecter un minimum de six éléments par longueur d'onde.

Les données géotechniques sont utilisées pour déterminer la force à appliquer sur la tête du pieu. Le logiciel commercial GRLWEAP [8] nous a permis de calculer la force nécessaire pour notre étude. Le signal temporel de la force appliquée sur la tête du tube est présenté sur la figure 2a et le spectre correspondant sur la figure 2b.

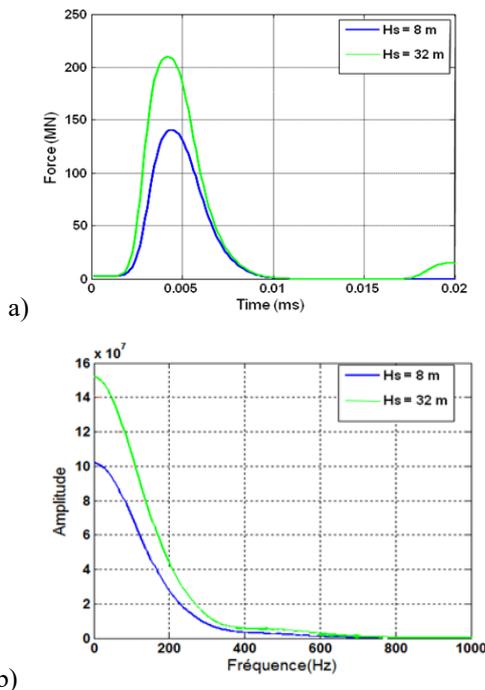


Figure.2- Force appliquée sur la tête du pieu pour deux situations d'enfoncement; a) Signaux temporels; b) Spectres associés.

3 Propagation des ondes acoustiques

La force appliquée en tête du tube génère des ondes se propageant sur la longueur du tube. La configuration du modèle retenu est axisymétrique, aussi seules les ondes dont le mode de vibration circonférentiel n est égale à 0 peuvent se propager. Dans ces conditions les courbes de dispersion des ondes existantes dans la gamme de fréquence étudiée sont calculées à partir de la matrice de diffusion [9] pour un tube de longueur infinie. Les courbes des vitesses de phase et de groupe du mode circonférentiel $n = 0$ calculées pour un tube de rapport des rayons $b/a = 0,98$ (b rayon interne et a rayon externe) placé dans le vide sont tracées sur la figure 3. La fréquence pointée par une

flèche indique la valeur de la fréquence d'anneau du tube. Cette fréquence est donnée par la relation $f_r = Cp/(2\pi a)$, ce qui correspond pour notre tube à une valeur de 208 Hz (Cp étant la vitesse de plaque et a le rayon du tube). Une première onde est calculée avec une vitesse de phase pour les basses fréquences de 5045 m/s. Cette valeur correspond à la vitesse de barre obtenue également avec la relation $C_B = \sqrt{E^p / \rho^p}$. Cette onde notée A_0 sur la figure 3 présente un minimum de vitesse de phase autour de la fréquence d'anneau. Après la fréquence d'anneau, cette onde a un comportement proche de l'onde antisymétrique A_0 d'une plaque. Une deuxième onde notée S_0 montre une fréquence de coupure proche de la fréquence d'anneau et se stabilise à une vitesse de phase proche de la vitesse de plaque. Les vitesses de groupe de ces deux ondes sont présentées sur la figure 3b. Autour de la fréquence d'anneau l'onde A_0 passe par une vitesse de groupe nulle.

Les résultats du calcul des déplacements radiaux de la coque obtenus avec le modèle par éléments finis (figure 1) sont présentés sur la figure 4 pour les deux parties supérieures du tube (partie émergée: 28m et partie immergée: 28m). Les signaux temporels des déplacements radiaux relevés sur la longueur du tube font apparaître deux comportements distincts pour ces deux parties supérieures du tube. Les courbes de dispersion des nombres d'onde sont présentées sur les figures 5a et 5b pour respectivement la partie émergée et la partie immergée.

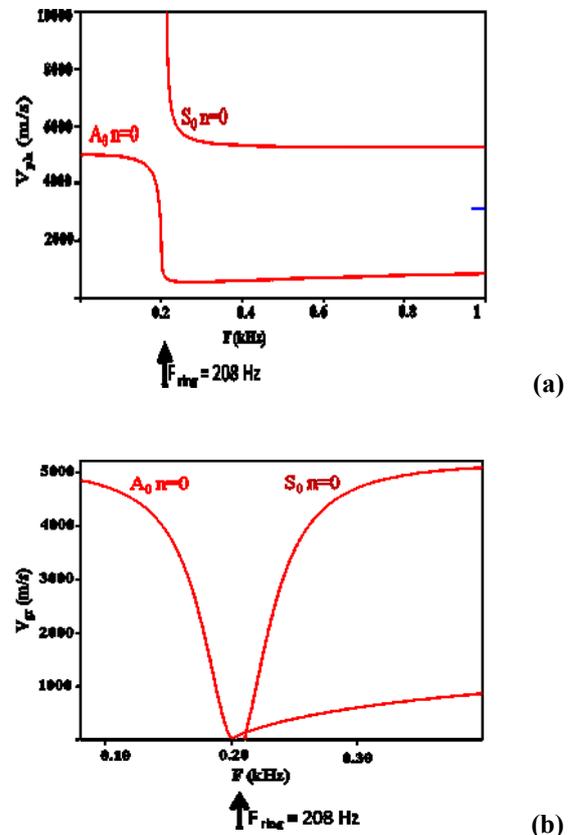


Figure 3- Vitesse de phase (a) et vitesse de groupe (b) des modes $n=0$ pour un tube d'acier inoxydable ($b/a=0,98$, rayon externe $a = 4\text{ m}$)

3.1 Partie émergée

Pour la partie émergée, un déplacement radial de forte valeur est observé pour la fréquence 200 Hz (fréquence d'anneau). Ce phénomène correspond à l'onde A_0 passant par une vitesse de groupe nulle au voisinage de la fréquence d'anneau (figure 3b). Cette particularité fait apparaître un signal temporel entretenu en haut du tube sur la figure 4. Certains auteurs ont mis en évidence une onde de bout sur une plaque et sur un tube pour des fréquences plus élevées correspondant à une résonance pour une fréquence où la vitesse de groupe de l'onde passe par un minimum [10, 11]. Les études correspondantes ont été menées dans le cas d'une réflexion en bout de plaque et de tube. Dans notre étude, l'observation du phénomène est proche de la source, tête du tube où la force d'impact est appliquée.

Pour les fréquences en dessous de la fréquence d'anneau (figure 5a) nous observons une onde dont les caractéristiques de propagation correspondent à l'onde A_0 . La trajectoire de cette onde se poursuit au dessus de 200Hz avec un profil de propagation très différent correspondant à l'onde A_0 de la figure 3a possédant des vitesses de phase plus faible. Sur la figure 5a apparaît également une trajectoire, au dessus de 200 Hz, correspondant à une onde se propageant à une vitesse de phase qui correspond à l'onde S_0 .

3.2 Partie immergée

L'analyse des résultats calculés pour la partie immergée de la figure 5b montre un comportement différent de la partie hors de l'eau. L'onde observée autour de 200 Hz, hors eau, n'est pas visible dans ce cas. Une onde avec des caractéristiques différentes est observée depuis les fréquences basses. Ces trajectoires correspondent à l'onde d'interface A qui apparaît avec la présence de l'eau. On retrouve son comportement sur la figure 4 où le front montre une onde avec une vitesse de groupe très différente de la partie émergée. Cohabite avec cette onde, l'onde A_0 visible avec une trajectoire centrale identique sur la partie émergée et se poursuit pour les fréquences hautes (au-dessus de 200 Hz) avec l'onde S_0 (Fig.5). Les signaux temporels du déplacement radial calculé sur la coque montrent le changement de comportement à la surface de l'eau. Un premier front d'onde avec une vitesse de groupe estimée à 5000 m/s est visible pour la partie émergée. Ce front d'onde perd en amplitude dès qu'il franchit la surface de l'eau. Néanmoins il reste visible avec une caractéristique de vitesse de groupe identique. Lorsque le front d'onde franchit la surface de l'eau un autre front d'onde prend naissance avec une vitesse de groupe beaucoup plus faible estimée à 500 m/s correspondant à l'onde A . [12, 13].

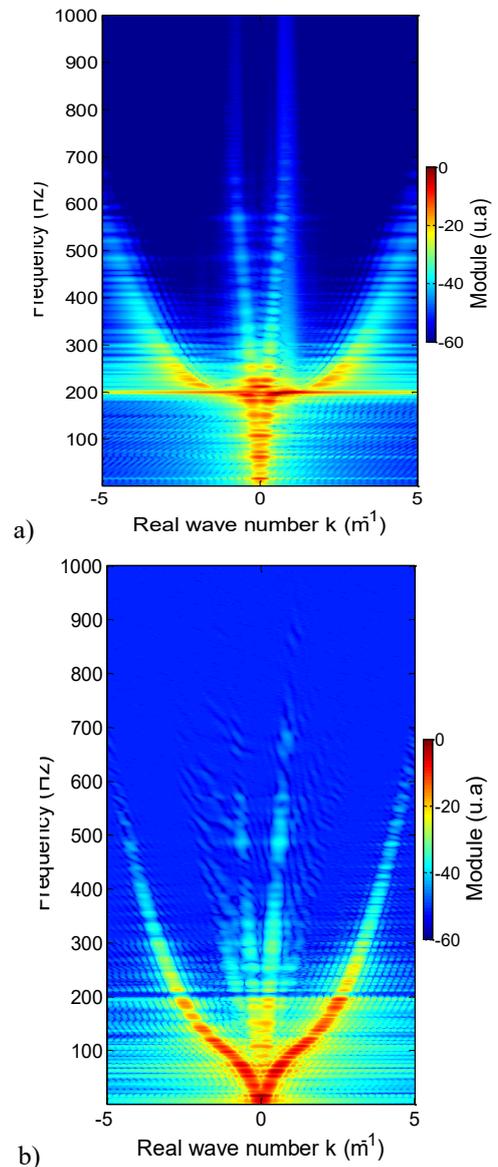


Figure 5- courbes de dispersion du nombre d'onde: a) calculé sur la partie émergée (28 m); b) calculé sur la partie immergée (28m)

4 Pression dans l'eau

La pression calculée dans l'eau pour la profondeur de 28 m est présentée sur la figure 6 pour respectivement la distance de 5m et de 100 m de l'axe du tube. La pression calculée à une distance proche du tube (5m) montre une organisation modale liée aux modes s'établissant sur la longueur du tube pour sa partie immergée. Certains modes sont très visibles. Le signal est principalement observé en dessous de la fréquence d'anneau du tube 200 Hz. Les modes les plus marqués en amplitude sont situés entre 40 et 120 Hz. La pression calculée à 100 m montre la présence de modes dans le même intervalle de fréquence et est lié aux modes s'établissant dans la hauteur du canal de propagation (28 m) [14].

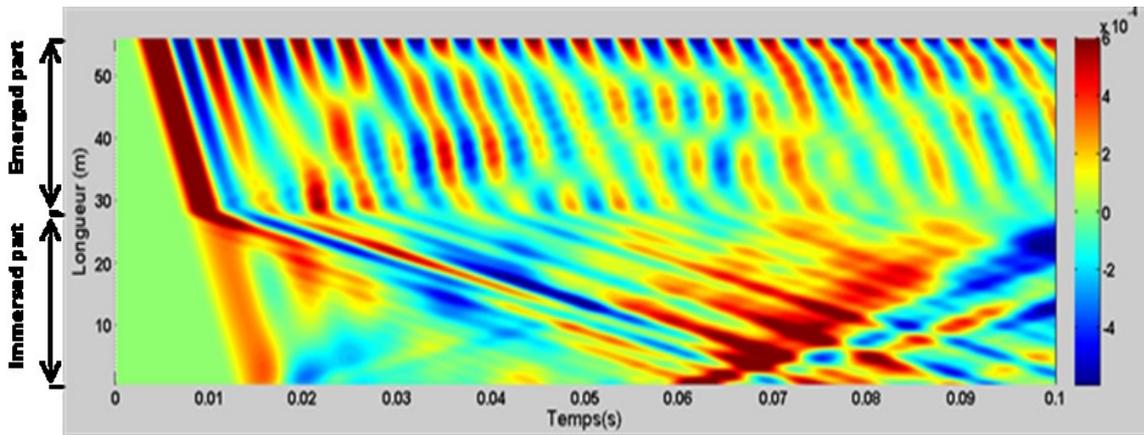


Figure 4 - Signaux temporels du déplacement radial calculé le long de la surface externe du tube pour les parties émergée et immergée dans le cas $H_a=28m$; $H_w=28m$; $H_s=8m$.

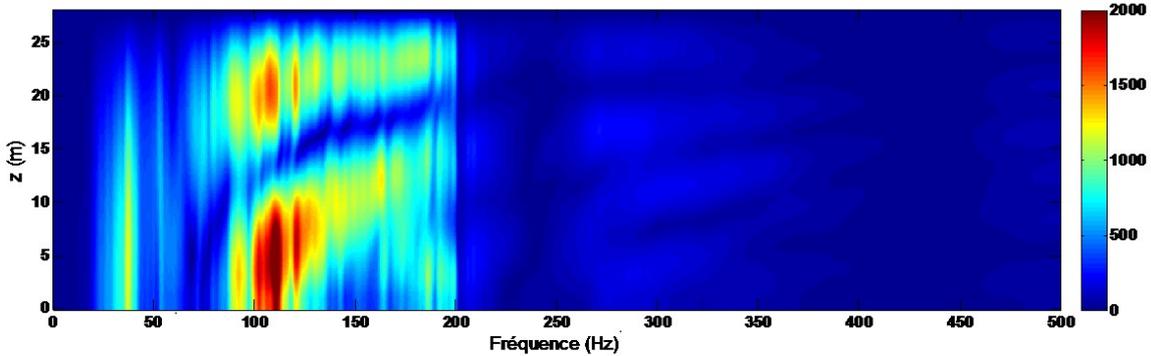
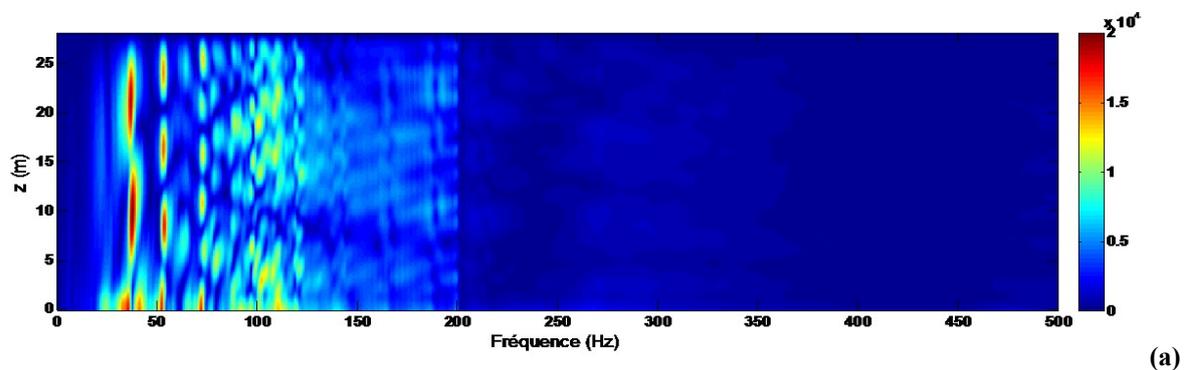


Figure 6- Spectres de la pression calculée dans la couche d'eau du tube à une distance de 5 m de l'axe du tube (a) et à une distance de 100m (b).

5 Conclusion

Les résultats présentés dans cette étude ont pour objectif de caractériser la source sonore provoquée par le battage de pieu de fondation d'éoliennes en mer. Le modèle basé sur le maillage d'éléments finis de la configuration d'étude est présenté. Il a permis de mettre en évidence des caractéristiques de la production sonore dans la couche d'eau où se situe l'intérêt de notre étude pour améliorer les connaissances sur l'impact des opérations de battage de pieu sur la faune aquatique (1). Les ondes générées dans le pieu montrent, autour de la fréquence d'anneau, des caractéristiques de propagation variables importantes. La valeur de cette fréquence est directement liée au diamètre du tube (2). A cette fréquence d'anneau, une vibration

importante liée à l'onde de bout est observée à la tête du tube (3). Lorsque l'onde A_0 se propage dans l'eau une deuxième onde de type A est mise en évidence. (4). La pression calculée dans l'eau met en évidence des modes de longueur dans l'épaisseur de la couche d'eau.

Remerciements

Ce travail a pu être réalisé grâce au soutien financier d'EMDT (Eoliennes en Mer Dieppe Le Tréport) dans le cadre du projet de recherche RESPECT.

Références

- [1] H. Bailey, B. Senior, D. Simmons, J. Rusin, G. Picken, and P. M. Thompson, Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals, *Marine Pollution Bulletin* **60**, 888–897 (2010).
- [2] Southall, B.L., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Finneran, J.J., Gentry, R.L., Greene Jr., C.R., Kastak, D., Ketten, D.R., Miller, J.H., Nachtigall, P.E., Richardson, W.J., Thomas, J.A., Tyack, P.L., Marine mammal noise exposure criteria: initial scientific recommendation, *Aquatic Mammals* **33**, 411–521, (2007).
- [3] S. Lippert, M. Nijhof, T. Lippert, D. Wilkes, A. Gavrilov, Heitmann, M. Ruhnau, O. von Estorff, A. Schafke, I. Schafer, J. Ehrlich, A. MacGillivray, J. Park, W. Seong, M. A. Ainslie, C. de Jong, M. Wood, L. Wang, and P. Theobald, COMPILER—A Generic Benchmark Case for Predictions of Marine Pile-Driving Noise, *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 1–11 (2016).
- [4] M. V. Hall, An analytical model for the underwater sound pressure waveforms radiated when an offshore pile is driven, *J. Acoust. Soc. Am.* **138**, 795–806 (2015).
- [5] Sophie Laran, Matthieu Authier, Aurélie Blanck, Ghislain Dorémus, Hélène Falchetto, Pascal Monestiez, Emeline Pettex, Eric Stephan, Olivier Van Canneyt, Vincent Ridoux, Seasonal distribution and abundance of cetaceans within French waters: Part II: The Bay of Biscay and the English Channel, *Deep-Sea Research Part II*, **141**, 31–40 (2017)
- [6] ANSYS, ANSYS Multiphysics, Release 17.0, Help System, ANSYS Mechanical APDL Acoustic Analysis Guide, ANSYS, Inc. (2016).
- [7] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, Springer New York, New York, NY (2011).
- [8] I. Pile Dynamics, GRLWEAP (2010).
- [9] F. Léon, F. Lecroq, D. Décultot, and G. Maze, Scattering of an obliquely incident acoustic wave by an infinite hollow cylindrical shell, *J. Acoust. Soc. Am.* **91**, 1388 (1992).
- [10] M. Cès, D. Clorennec, D. Royer, and C. Prada, Edge resonance and zero group velocity Lamb modes in a free elastic plate, *J. Acoust. Soc. Am.* **130**(2), 689,(2011)
- [11] M. Ratassepp, A. Klauson, F. Chati, F. Léon, and G. Maze Edge resonance in semi-infinite thick pipe: Numerical predictions and measurements, *J. Acoust. Soc. Am.* **124**(2), 875 (2008)
- [12] J. Van De Loock, D. Décultot, F. Leon, F. Chati, G. Maze, D.R. Rajaona, A. Klauson, Acoustic radiation of a submerged cylindrical shell in low frequency *J. Acoust. Soc. Am.* **133**(1), EL26-EL32 (2013)
- [13] Dominique Décultot, Farid Chati, Gérard Maze, Aleksander Klauson, Experimental identification of very low frequency flexural vibration modes of partly submerged plate, 19th International Congress on Acoustics 2007 Madrid, Spain 2-7 September 2007.