

CFA/VISHNO 2016

Rayonnement des ondes élastiques lors d'un battage de pieu : étude expérimentale à échelle réduite

J. Van De Loock^a, J. Laurent^a, J. De Rosny^a, C. Prada^a, D. Décultot^b, F. Léon^b, F. Chati^b, D. Cathie^c, D. Clorennec^d et T. Folegot^d

^aInstitut Langevin, UMR 7587 CNRS ESPCI PSL Research University, 1 rue Jussieu, 75238 Paris Cedex 05, France

^bLOMC UMR CNRS 6294, Université du Havre, 75 rue Bellot, 76600 Le Havre, France

^cCathie Associates SA/NV, J.E. Mommaertsiaan 22, Park Hill, 1831, 1831 Diegem, Belgique

^dQuiet-Oceans, 65, place Nicolas Copernic, 29280 Plouzane, France
julien.van-de-loock@doct.univ-lehavre.fr



LE MANS

L'installation d'éoliennes posées en mer nécessite dans la très grande majorité des cas, le battage de leur fondation (monopieu ou jacket). Cette opération est réalisée au moyen d'un marteau hydraulique qui vient battre le ou les pieux de la fondation en tête afin de les enfoncer dans le substrat. Une fraction de l'énergie est transmise dans l'eau et dans le sédiment. Les niveaux de bruit perçus dans la colonne d'eau peuvent alors potentiellement altérer les capacités auditives de la faune marine. Ce papier présente une étude expérimentale en laboratoire à l'échelle 1/400 d'un battage de pieu dans le but de mieux comprendre la génération et la propagation du bruit rayonné par les ondes élastiques guidées dans la coque cylindrique. Le relevé de la pression dans la colonne d'eau permet de visualiser les différents fronts d'onde rayonnés. Le contenu spectral de la pression mesurée est analysé au regard des caractéristiques vibratoires de la coque, des différents modes guidés dans le tube et de leurs couplages avec les fluides extérieur et intérieur. L'incidence des propriétés du fluide intérieur sur le bruit rayonné est alors mise en évidence. Ces résultats sont confortés par une modélisation en éléments finis.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet RESPECT financé par Eoliennes en Mer Dieppe Le Tréport (EMDT).

1 Introduction

Toutes les fondations d'éoliennes offshore autres que gravitaires ou flottantes nécessitent l'utilisation de pieux. Cela représente 90 % des cas [1]. Le dimensionnement de ces coques cylindriques est déterminé à partir de la taille de la turbine et des conditions liées à l'emplacement de la fondation : hauteur d'eau, type de sol... Comparativement, une fondation monopieu possède un seul pieu de diamètre de 5 à 8 m, alors qu'une fondation jacket possède quatre pieux de plus faibles diamètres (1.5 à 2.5 m).

L'enfoncement d'un pieu est réalisé par un marteau hydraulique (Figure 1). Le battage de pieu se caractérise par une suite de brèves impulsions très intenses (durée comprise entre 5 et 10 ms). L'énergie mécanique est convertie en une onde de compression qui se propage le long du pieu et rayonne dans l'eau. Une autre partie de l'énergie est transmise dans les sédiments sous forme d'onde de cisaillement et de compression, et rayonne dans l'eau au niveau de l'interface eau/fond marin.



Figure 1: Marteau hydraulique à côté d'un pieu (<http://www.offshore-technology.com/contractors/dredging/menck/>).

Pour un pieu de 5 m de diamètre, l'énergie d'un battage de pieux se situe principalement dans la gamme de fréquences 100 Hz - 2000 Hz avec un maximum vers les 100 - 300 Hz [2].

Les niveaux de bruit perçus dans la colonne d'eau peuvent avoir un impact sur la faune marine (marsouins, phoques...) comme le montrent plusieurs études [2] [3]. D'autre part, la génération de bruit sous-marin fait l'objet depuis 2008 d'une réglementation européenne avec la Directive Cadre Sur le Milieu Marin (DCSMM) [4]. En matière de protection, l'Allemagne a pris les devants en imposant aux constructeurs des normes pour le battage de pieux [5].

Des dispositifs de réduction de bruit sont placés autour des fondations afin de diminuer le niveau sonore émis. Différentes technologies sont employées comme les rideaux de bulles d'air ou les batardeaux. Certaines solutions de réduction sont commercialisées, beaucoup d'autres sont en cours de développement [6].

La thématique du battage de pieux est étudiée depuis une dizaine d'années. Des modèles théoriques semi-analytiques ou par éléments finis sont développés pour quantifier ces émissions sonores [7] [8]. Ces modèles sont parfois couplés à des codes de propagation afin d'évaluer le bruit à plus grande distance.

L'originalité de notre étude réside dans l'approche expérimentale en laboratoire sur un modèle à petite échelle.

2 Modèle réduit

2.1 Facteur d'échelle

La taille des éoliennes est croissante, ce qui impose des fondations toujours plus imposantes. La conception de l'expérimentation s'est basée sur un cas de référence : installation d'une fondation monopieu d'une éolienne offshore de 8 MW au large du Tréport. La fondation considérée est une fondation monopieu de 60 m de long, 8 m de diamètre et 8 cm d'épaisseur.

A partir des contraintes expérimentales (taille de la cuve, capteurs disponibles...), une gamme de fréquences d'étude a été déterminée. Nous avons abouti à un facteur d'échelle de 400 qui correspond au rapport des diamètres entre le cas réel et le modèle petite échelle [9]. Le Tableau 1 donne la correspondance entre les deux échelles. Il s'agit d'une situation de fin de battage où le pieu est presque complètement enfoncé.

Tableau 1: Exemple de correspondance entre les cas réel et à l'échelle réduite.

PARAMÈTRES	Echelle réelle	Petite échelle
Bande de fréquence	[50 -500] Hz	[20 -200] kHz
Diamètre, D	8 m	20 mm
Épaisseur, h	8 cm	200 μm
Longueur, L	60 m	150 mm
Hauteur d'eau, H	25 m	62.5 mm
Profondeur d'ancrage, H_s	30 m	75 mm
Partie émergée, $(L-H-H_s)$	5 m	12.5 mm

2.2 Dispositif expérimental

Les mesures sont réalisées dans une cuve en plexiglas de dimension ($L \times l \times h$) 1.3 x 0.38 x 0.5 m, visible sur la Figure 2 où l'on voit également le tube en acier inoxydable planté dans le sédiment et le boîtier jaune contenant le transducteur de contact, collé au tube.

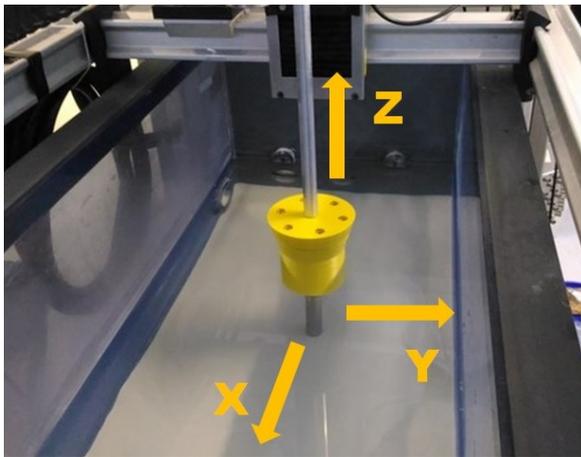


Figure 2: Le tube est planté dans le sédiment. Le boîtier jaune renferme le transducteur de contact.

Le schéma du dispositif expérimental est représenté sur la Figure 3.

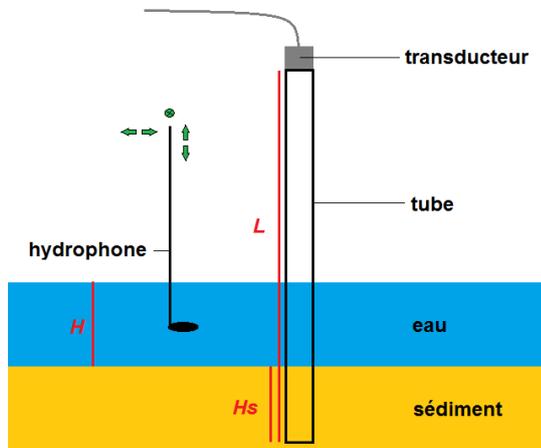


Figure 3: Schéma de l'expérimentation.

Alimenté par une impulsion de 400V (Sofranel 5077PR), un transducteur de fréquence centrale de 100 kHz (Olympus V1011) génère une onde de compression en tête du tube en acier inoxydable. Cette onde se propage le long du tube et rayonne dans l'eau et le sédiment. Un hydrophone (Onda HNR 1000) mesure alors la pression résultante dans la colonne d'eau. Le signal est amplifié de 40 dB (Sofranel 5676) avant d'être numérisé. Pour chaque position de l'hydrophone, l'acquisition est réalisée 100 fois afin de limiter au maximum le bruit de mesure.

2.3 Caractérisation du sédiment

Le sédiment est modélisé par un milieu de billes de verre (entre 40 et 70 μm de diamètre) saturé d'eau. La masse volumique du milieu a été estimée à 1930 kg/m^3 , à partir des paramètres du verre et de la porosité du milieu, elle-même estimée à partir de la littérature, à 0.38 [10]. Une expérience préliminaire par transmission nous donne une vitesse de l'onde longitudinale de 1750 m/s et une atténuation large bande de 40 dB/m. Ces valeurs sont en accord avec la littérature [10].

3 Résultats

3.1 Fronts d'onde

Une carte 2D du champ de pression a été obtenue par mesure de la pression en chaque point d'une grille XZ [80 x 33mm], avec un pas de 0.5 mm. Les Figures 4 et 5 représentent des images instantanées du champ de pression dans la colonne d'eau respectivement aux temps $T = 30 \mu\text{s}$ et $T = 95 \mu\text{s}$ ($T = 0 \mu\text{s}$ correspond à la génération de l'impulsion). Le tube étant à droite sur les figures, les fronts se déplacent vers la gauche. La hauteur d'eau (H) est de 60 mm, la profondeur d'ancrage (H_s) est de 79 mm. Les mesures ont été limitées à la moitié supérieure de la colonne d'eau. En noir, apparaissent les fronts d'onde déterminés théoriquement à partir de la vitesse de barre dans le tube ($C_B = 5000 \text{ m/s}$), de la vitesse dans l'eau ($C = 1470 \text{ m/s}$) et de la vitesse dans le sédiment ($C_S = 1750 \text{ m/s}$). Cela permet de valider les temps d'arrivée des fronts et de savoir d'où ils proviennent. Dans ce paragraphe uniquement, l'excitation est réalisée au moyen d'un transducteur de 500 kHz afin de faciliter la distinction des différents fronts d'onde.

Sur la Figure 4, le 1^{er} front descendant fait un angle de 17.1° avec la verticale. $\phi_e = \text{asin}\left(\frac{C}{C_B}\right) = 17.1^\circ$. Cet angle est appelé angle du cône de Mach [11]. Même si nous ne voyons pas sur la Figure 4, une onde sphérique est générée quand l'onde de compression dans le tube rencontre l'interface eau – sédiment.

Sur la Figure 5, le 1^{er} front montant provenant de la colonne d'eau et sa réflexion à la surface de l'eau sont visibles à gauche. Le 1^{er} front montant provenant du sédiment est observable vers $X = 75 \text{ mm}$. L'angle qu'il forme avec la verticale est plus grand. En effet d'une part, l'angle du cône dans le sédiment est légèrement différent de celui dans l'eau $\phi_S = \text{asin}\left(\frac{C_S}{C_B}\right) = 20.5^\circ$.

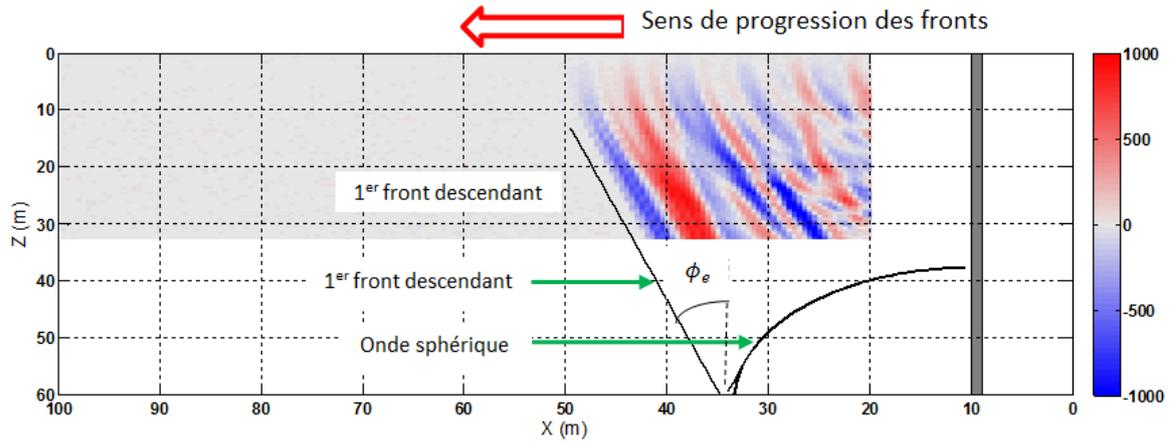


Figure 4: Champ de pression mesuré à l'instant $T = 30 \mu s$. L'échelle de pression est en Pascal. $H = 60 \text{ mm}$. $H_s = 79 \text{ mm}$.

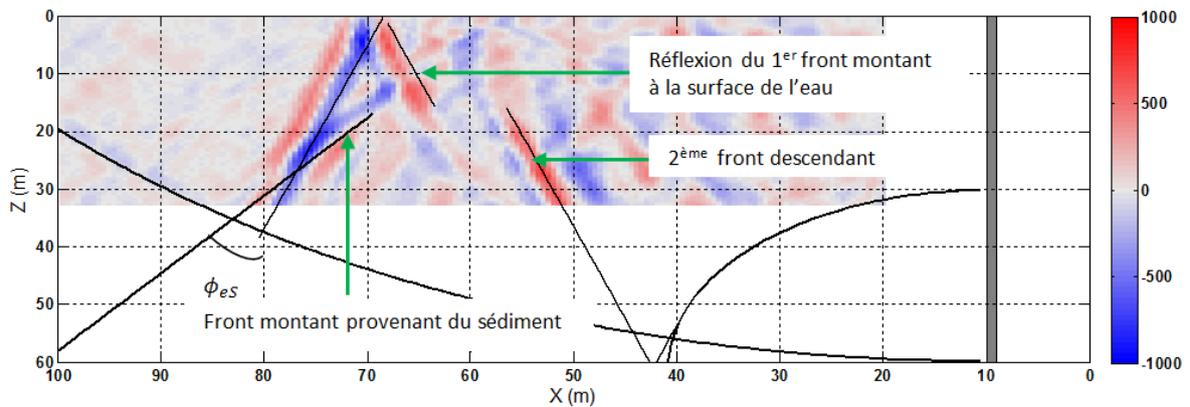


Figure 5: Champ de pression mesuré à l'instant $T = 95 \mu s$. L'échelle de pression est en Pascal. $H = 60 \text{ mm}$. $H_s = 79 \text{ mm}$.

D'autre part, à l'interface avec le sédiment, l'onde est réfractée. D'après la loi de Snell-Descartes, le nouvel angle du front est $\phi_{eS} = 90 - \text{asin}\left(\frac{C}{C_S} (90 - \phi_s)\right) = 38.1^\circ$. Le 2^{ème} front descendant est également visible sur la figure.

3.3 Contenu fréquentiel

Une caractéristique importante du bruit émis est son contenu fréquentiel. Pour obtenir des informations en fréquence sur la pression mesurée, nous appliquons une transformée de Fourier aux signaux temporels. La Figure 6 représente la moyenne des spectres des points situés sur la même verticale à 10 mm de la surface du tube.

Les pics du spectre dans la bande [0 - 80 kHz] correspondent à des résonances causées par les allers-retours de l'onde $L(0,1)$ (appelé aussi mode $n=0$ de l'onde A_0) dans la longueur L du tube. Elles apparaissent pour des nombres d'onde k particuliers : $k = m^* \frac{\pi}{L}$, avec $m^* = m - 0.5$ (m est un entier). Les fréquences de résonance se calculent alors par la relation suivante [12]:

$$F_m = k \frac{C_{L01}(k)}{2\pi} \tag{1}$$

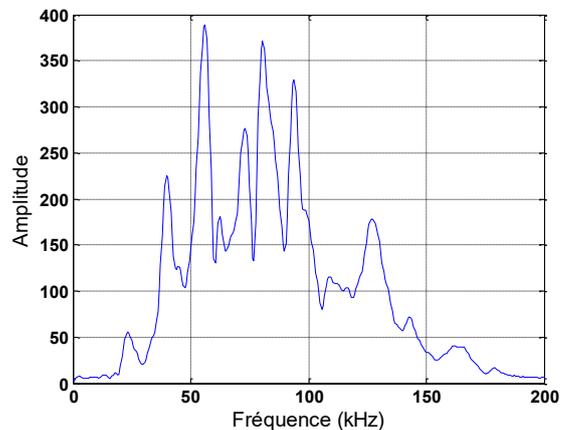


Figure 6: Moyenne des spectres sur 130 points situés à la même distance $X = -10 \text{ mm}$ de la surface du tube. $H = 75 \text{ mm}$. $H_s = 45 \text{ mm}$.

Avec $C_{L01}(k)$ la vitesse de phase de l'onde $L(0,1)$. Dans la bande [0 - 50 kHz], cette onde circule à une vitesse constante appelée vitesse de barre : 5000 m/s. C'est cette vitesse qui est utilisée pour les calculs de temps de propagation dans le tube.

L'essentiel de l'énergie est contenu dans la bande de fréquences [20 - 170 kHz]. Cela correspond pour le cas réel à la bande [50 - 425 Hz].

3.4 Aspect énergétique

La Figure 7 présente l'énergie rayonnée par le tube dans la colonne d'eau en fonction de la distance au tube et de la profondeur. L'énergie décroît avec l'éloignement au tube par divergence géométrique. Nous remarquons aussi que l'énergie est faible dans la zone d'ombre supérieure. Vu l'inclinaison des fronts, peu d'énergie arrive dans cette zone.

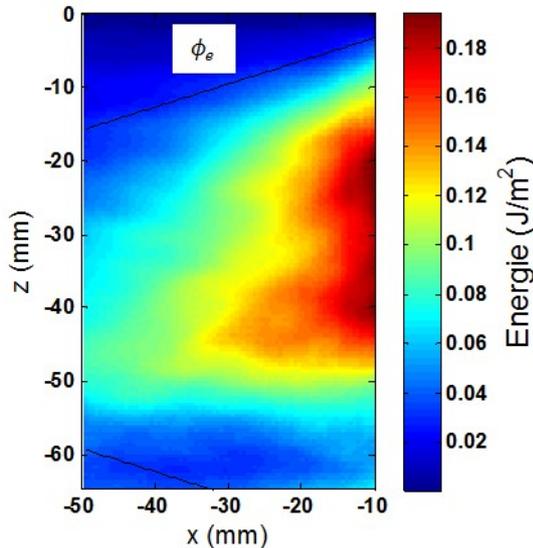


Figure 7: Energie rayonnée par le tube. $H = 75$ mm. $H_s = 45$ mm. Les lignes noires représentent les limites d'influences des fronts. $\Phi_e = 17.1^\circ$.

La Figure 8 affiche l'énergie intégrée autour du tube (multiplication par un facteur $2\pi R$). Cela revient à corriger la divergence géométrique. Un faisceau incliné vers le fond apparaît alors. Cela montre qu'en moyenne plus d'énergie provient des fronts descendants que montants.

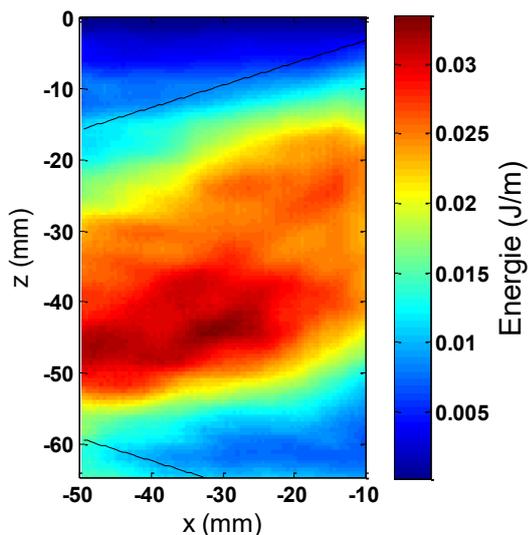


Figure 8: Energie intégrée autour du tube. $H = 75$ mm. $H_s = 45$ mm. Les lignes noires représentent les limites d'influences des fronts.

D'autre part, le maximum d'énergie n'est pas situé près du tube. En s'éloignant du tube, la contribution de la portion du pieu dans le sédiment devient plus importante. Son influence s'étend jusqu'à une distance de

$$R_{\max} = \frac{H_s}{\tan(\phi_s)}$$

(en considérant une unique couche de sédiment).

4 Modélisation

La modélisation est effectuée à l'aide du logiciel d'éléments finis ANSYS. Le modèle utilisé dans notre étude est 2D axisymétrique. Le sédiment est modélisé par un fluide. Le signal d'excitation provient d'une simulation de battage réalisée au moyen du logiciel GRLWEAP (Figure 9). Celle-ci considère une fondation de 8 m de diamètre et 64 m de long, battue dans un sol du type de celui rencontré au large du Tréport. La source principale de l'amortissement de l'onde dans le pieu est la friction entre le pieu et le sédiment au niveau du fut et de la pointe du pieu. Elle est prise en compte par un amortissement équivalent dans la portion du pieu qui est en contact avec le sédiment [7].

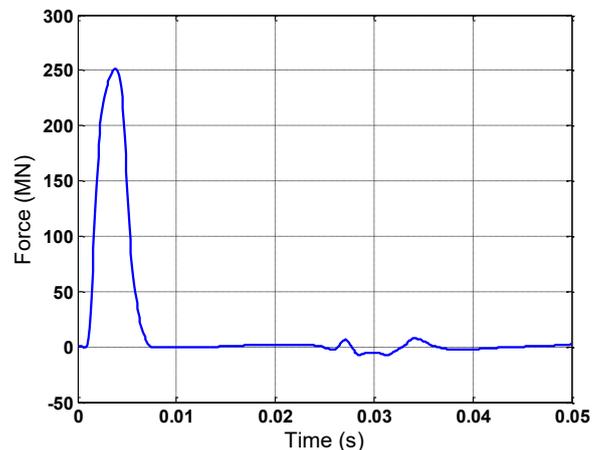


Figure 9: Signal de force du marteau appliqué en tête du pieu.

La Figure 10 présente les courbes de dispersion calculées à partir d'un relevé de pression le long d'un transect vertical situé à 1 m de la surface du pieu.

L'identification des différentes ondes présentes est réalisée par comparaison des courbes de dispersion issues des résultats numériques avec les courbes théoriques issues de la théorie de l'élasticité.

L'essentiel de l'énergie se trouve dans la bande de fréquences : $[0 - 200$ Hz]. Cette bande est plus étroite que celle déduite expérimentalement $[50 - 425$ Hz] car l'excitation par le marteau est moins large bande. Dans cette zone, nous retrouvons, comme pour le cas expérimental, les résonances causées par les allers-retours de l'onde $L(0,1)$ (entourées en vert). Toujours dans cette zone $[0 - 200$ Hz], nous notons la présence de l'onde A qui a une vitesse inférieure à la vitesse de l'eau. Elle est évanescence et s'atténue très rapidement avec la distance au tube ; elle ne se propage pas.

Au-delà de 200 Hz, les zones d'intensité importante (entourées en rouge) proviennent du couplage des modes de couche d'eau (causées par la colonne d'eau à l'intérieur du

pieu) entre eux ainsi qu'avec l'onde L(0,2) (appelé aussi mode n=0 de l'onde S0).

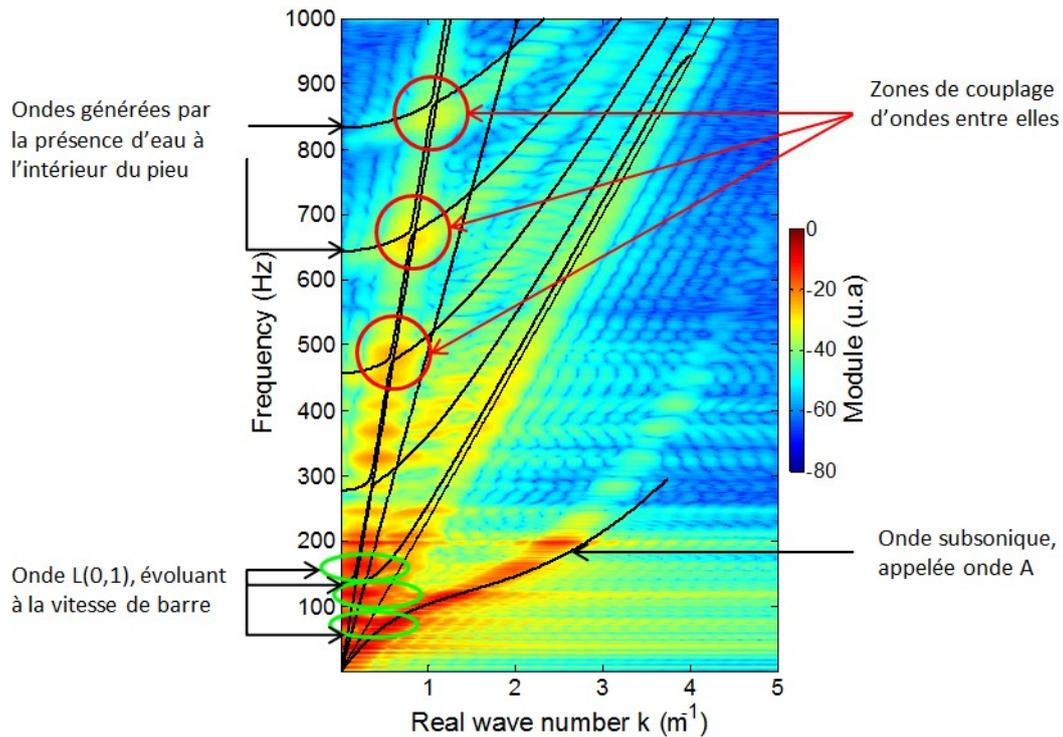


Figure 10: Courbes de dispersion calculées à partir du champ de pression calculé par éléments finis et superposition des courbes théoriques $n = 0$ calculée pour un tube immergé rempli d'eau.

5 Influence du fluide interne

Expérimentalement, l'eau à l'intérieur du tube a été remplacée par un fluide visqueux. Dans cette expérience, le tube est posé sur le sédiment, donc $H_s = 0$. La hauteur d'eau est de 65 mm.

Le fluide visqueux à l'intérieur du tube apporte une réduction importante sur l'énergie rayonnée dans la colonne d'eau (Figure 11).

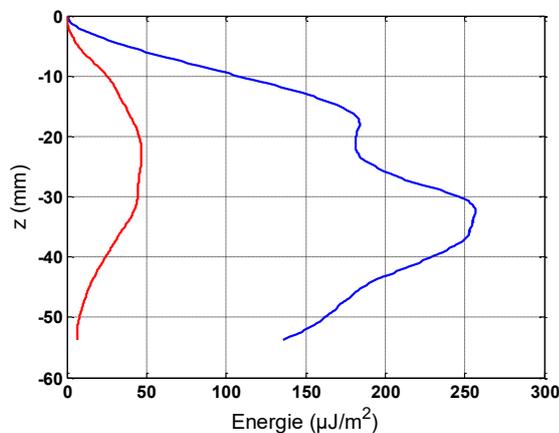


Figure 11: Profil vertical d'énergie à 10 mm de la surface du tube selon le fluide à l'intérieur du tube : eau (en bleu), fluide visqueux (en rouge). $H = 65$ mm.

En intégrant l'énergie sur un cylindre de rayon 20 mm, nous trouvons que l'énergie totale moyennée sur la colonne d'eau est 6.3 plus faible (-8 dB) en présence du fluide visqueux. Les microbulles d'air piégées dans le fluide visqueux sont responsables de la forte atténuation. C'est d'ailleurs pourquoi elles sont utilisées dans les solutions de réduction de bruit comme les rideaux de bulles.

6 Conclusion

Ce papier a présenté une étude à échelle 1/400^{ème} sur le battage de pieu. Les différents fronts d'onde dans l'eau ont été clairement mis en évidence. Faiblement inclinés, ils restent piégés dans la colonne d'eau et se propagent alors sur de grandes distances. Les fronts dans l'eau proviennent du rayonnement d'une onde de compression le long du tube, identifiée comme étant l'onde L(0,1). Les différents allers-retours créent un état stationnaire responsable des résonances observées dans l'eau. Une partie de l'énergie dans la colonne d'eau provient des fronts émis depuis la portion du pieu dans le sédiment. Cette énergie se retrouve dans la colonne d'eau jusqu'à une distance de l'ordre de 2.6 fois la profondeur d'ancrage.

Une simulation numérique sur un pieu de 8 m de diamètre a confirmé que l'énergie rayonnée était causée par l'onde L(0,1). Cette énergie est concentrée dans la bande [0 -200 Hz]. Cependant, à plus haute fréquence, l'effet du couplage avec le fluide interne a été mis en évidence.

Enfin, la nature du fluide interne a une incidence sur le rayonnement. Expérimentalement, la présence du fluide visqueux à l'intérieur du tube permet d'abaisser l'énergie rayonnée dans la colonne d'eau de 8 dB en comparaison d'une présence d'eau. Cette voie mérite d'être explorée dans l'optique de réduction du niveau sonore.

Références

- [1] EWEA, « The European offshore wind industry - key trends and statistics 2015 », The European Wind Energy Association, (2016).
- [2] H. Bailey, B. Senior, D. Simmons, J. Rusin, G. Picken, et P. M. Thompson, « Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals », *Marine Pollution Bulletin*, vol. 60, n° 6, p. 888–897, (2010).
- [3] M. Dähne, A. Gilles, K. Lucke, V. Peschko, S. Adler, K. Krügel, J. Sundermeyer, et U. Siebert, « Effects of pile-driving on harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) at the first offshore wind farm in Germany », *Environmental Research Letters*, vol. 8, n° 2, p. 025002 (2013).
- [4] DCSMM, *Directive 2008/56/CE du parlement européen et du conseil du 17 juin 2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive-cadre «stratégie pour le milieu marin»)*, p. 19-40 (2008).
- [5] BSH. Standard Ground investigations for offshore wind farms. Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH) <http://www.bsh.de/en/Products/Books/Standard/index.jsp> (2008).
- [6] S. Koschinski et K. Lüdemann, « Development of noise mitigation measures in offshore wind farm construction », Federal Agency for Nature Conservation, Hamburg, Germany (2013).
- [7] M. Zampolli, M. J. J. Nijhof, C. A. F. de Jong, M. A. Ainslie, E. H. W. Jansen, et B. A. J. Quesson, « Validation of finite element computations for the quantitative prediction of underwater noise from impact pile driving », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 133, n° 1, p. 72 (2013).
- [8] T. Lippert et S. Lippert, « Modelling of pile driving noise by means of wavenumber integration », *Acoustics Australia*, vol. 40, n° 3, p. 178-182 (2012).
- [9] W. Soedel, *Vibrations of shells and plates*, 3rd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker (2004).
- [10] M. Kimura, « Velocity dispersion and attenuation in granular marine sediments: Comparison of measurements with predictions using acoustic models », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129, n° 6, p. 3544 (2011).
- [11] P. G. Reinhall et P. H. Dahl, « Underwater Mach wave radiation from impact pile driving: Theory and observation », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 130, n° 3, p. 1209 (2011).
- [12] J. Van de Loock, D. Décultot, F. Léon, F. Chati, G. Maze, D. R. Rajaona, et A. Klauson, « Acoustic radiation of a submerged cylindrical shell in low frequency », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 133, n° 1, p. EL26 (2013).