

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



Dispositifs acoustiques pour la furtivité et la discrétion

A.-C. Hladky-Hennion^a, M. Tran Van Nhieu^b, M. Pham Thi^c, L. Divay^c, B. Dubus^a, C. Croënne^a, J. Roland^d, R. Lardat^e, G. Maze^f, F. Leon^f et F. Chatif^f

^aUniv. Lille, CNRS, Centrale Lille, ISEN, Univ. Valenciennes, UMR 8520 - IEMN, F-59000 Lille, France

^bThales Research@Technology/IEMN CNRS 8520, 10 rue des Prés, 91120 Palaiseau, France

^cThales Research@Technology, 1 Avenue Auguste Fresnel, 91767 Palaiseau, France

^dIEMN. UMR CNRS 8520, Laboratoire Central - Cité Scientifique - Avenue Poincaré, 59652 Villeneuve D'Ascq Cedex, France

^eThales Underwater Systems, 525 Route des Dolines, 06901 Sophia Antipolis, France

^fUniversité du Havre, LOMC UMR CNRS 6292, 75 rue Bellot, 76058 Le Havre, France
anne-christine.hladky@isen.fr

Disposer de revêtements acoustiques performants pour des applications sous-marines est d'un intérêt majeur, en particulier pour réduire le bruit rayonné dans l'eau. Ce papier se concentre sur la problématique de la furtivité et de la discrétion passive en acoustique aux très basses fréquences, en vue de réduire l'index et les échos temporels d'une cible. La structure étudiée est une coque de véhicule sous-marin, équipée de raidisseurs périodiquement répartis afin de tenir la pression hydrostatique. Ces raidisseurs périodiques peuvent donner naissance à des phénomènes caractéristiques de diffusion acoustique aux basses fréquences et permettre ainsi la détection et l'identification de ces véhicules (ondes de Bloch-Floquet et diffractions de Bragg). Les résultats présentés sont issus des projets FARAON (Furtivité Acoustique par des RAidisseurs résONnants) puis RAMSES (Rayonnement Acoustique Maitrisé par des Systèmes résonants) projets financés par la DGA via l'ANR/Astrid et visent à brouiller les réponses de ces structures.

1 Introduction

D'une part, la furtivité représente la capacité d'un navire exposé à une onde acoustique incidente à ne pas générer d'écho réfléchi. D'autre part, la discrétion représente sa capacité à ne pas rayonner vers le milieu extérieur l'énergie vibratoire créée par des sources internes.

La solution classique pour améliorer la discrétion d'un bâtiment en acoustique sous-marine consiste à revêtir la coque d'un matériau dit de masquage, classiquement assez épais, de l'ordre de 5 cm au minimum, et collé sur l'ensemble du bâtiment. Ces matériaux de masquage ne remplissent que la fonction de discrétion (limitation du rayonnement) et n'assurent pas du tout la fonction de furtivité (limitation de la réflexion d'une onde plane incidente). Les solutions de traitement classiques pour la furtivité consistent à revêtir la coque de couches de matériaux anéchoïques mais qui n'assurent pas la fonction de discrétion acoustique.

Par ailleurs, les coques des véhicules sous-marins sont équipées de raidisseurs répartis périodiquement à l'intérieur de la coque afin de tenir la pression hydrostatique. Ces raidisseurs périodiques sont à l'origine de phénomènes caractéristiques de diffusion acoustique aux basses fréquences qui contribuent significativement à la détection et l'identification de ces véhicules. On distingue en particulier les effets de diffraction de Bragg et ceux liés à l'existence d'ondes de Bloch-Floquet dans la coque raidie. La diffraction de Bragg est un effet visible dans le cas de la furtivité. Elle correspond à l'interaction de l'onde acoustique incidente avec le réseau périodique de diffraction constitué par l'ensemble des zones de la coque munies de raidisseurs. Cette interaction génère un fort coefficient de réflexion pour des angles d'incidence spécifiques, dépendant uniquement de la fréquence et de l'écart inter-raisseurs. A l'inverse, les ondes de Bloch-Floquet dépendent également des caractéristiques de la coque. En effet, on considère dans ce cas l'interaction entre les modes propagatifs dans l'eau (incidents et réfléchis dans le cas de la furtivité, rayonnés dans le cas de la discrétion) et les modes se propageant dans la coque munie de raidisseurs. Celle-ci constituant un système périodique, ces modes sont nécessairement de type Bloch-Floquet.

Si l'atténuation des ondes de Bloch-Floquet et de la diffraction de Bragg peut bénéficier de l'existence de matériaux fortement atténuants à moyenne ou haute fréquence, elle reste beaucoup plus problématique dans le cas des très basses fréquences (de l'ordre du kHz). Dans ce cas, une solution alternative consiste à modifier la structure spatio-temporelle du champ acoustique réfléchi ou rayonné dû aux raidisseurs pour minimiser la probabilité de détection ou d'identification de la cible. Une solution consiste à espacer les raidisseurs de façon quasi-périodique

avec une faible variation aléatoire autour de la position moyenne de chaque raidisseur [1, 2]. Cette solution est cependant très coûteuse et complexe à réaliser car elle implique une modification de la structure même du navire. Plus récemment, un nouveau dispositif a été proposé pour supprimer ou réduire significativement les échos associés aux ondes de Bloch-Floquet et à la diffraction de Bragg créés par les structures munies de raidisseurs sans modifier leur positionnement [1-3]. Ce dispositif associe des systèmes résonants à une partie ou à la totalité des raidisseurs et a fait l'objet d'un brevet déposé par Thales [4]. C'est ce système qui est étudié dans ce papier. On s'intéresse ici à des maquettes d'une échelle de l'ordre d'un centième de celle des bâtiments réels, translatant ainsi la zone principale d'intérêt pour la furtivité dans la gamme 50-100 kHz. De plus, de manière à limiter les coûts de fabrication, les coques cylindriques raidies sont dans cette étude remplacées par des plaques rectangulaires raidies, et la géométrie des raidisseurs est nettement simplifiée. Dans une première partie, le système résonant est présenté. Puis, son efficacité est évaluée par le biais de résultats numériques et expérimentaux sur une plaque équipée. Les diagrammes obtenus en furtivité mettent en évidence l'efficacité du système à brouiller la signature des véhicules. Ensuite, un algorithme d'optimisation est utilisé afin de proposer un choix de positionnement de résonateurs qui réponde à une fonction objectif donnée. L'extension de ce concept à la discrétion des véhicules est également discutée.

2 Les systèmes résonants

La maquette simplifiée comporte un ensemble de raidisseurs sous forme de barres d'acier inoxydable de 3mmx3 mm de section. Les systèmes résonants sont placés directement sur ces barres, sur l'ensemble de leur longueur. Chacun est composé d'une couche intermédiaire de matériau élastique à très faible impédance acoustique et d'une contre-masse métallique (Fig. 1). Il permet, au voisinage de sa fréquence de résonance, de modifier le comportement vibratoire de la coque, par le biais d'une déformation en dilatation/compression de la couche souple. Pour plusieurs épaisseurs différentes de contre-masse, une variation d'un facteur trois de l'épaisseur de la couche souple permet de couvrir la bande 36-108 kHz dans le cas du plexiglas et la bande 90-270 kHz dans le cas du plomb (Fig. 1). Cette variation peut être prédite par un modèle analytique simple avec une précision meilleure que 10% dans toute la bande.

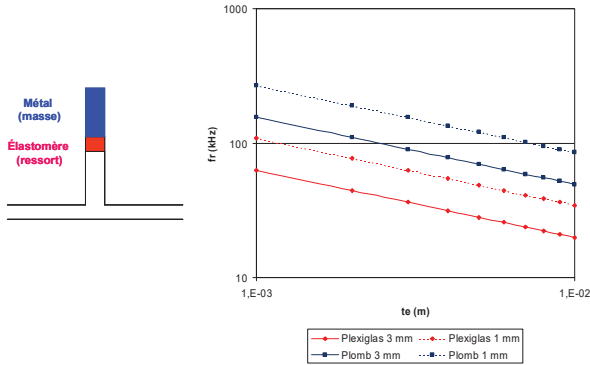


Figure 1 : gauche : Vue schématique en coupe de la plaque avec un raidisseur (en blanc) sur lequel on a placé un résonateur constitué d'une couche souple surmontée d'une contre-masse. Droite : Variation des fréquences de résonance en fonction de l'épaisseur de couche intermédiaire souple pour deux matériaux et deux épaisseurs de contre-masse différents.

3 La plaque équipée

La plaque comporte 20 raidisseurs espacés de 15 mm. Ils sont conçus de façon à présenter différentes fréquences de résonance dans la gamme 50-100 kHz avec une contre-masse d'acier identique. De façon à maintenir les épaisseurs de couches intermédiaires dans un intervalle compatible avec la fabrication, un polymère plus rigide est choisi pour les résonateurs de plus haute fréquence. En pratique, les deux matériaux retenus sont les polymères Quadrant Ketron Peek (QKP : masse volumique 1320 kg/m³, module d'Young : 4,3 GPa, coefficient de Poisson : 0,4) et Ketron Peek (KP : masse volumique 1400 kg/m³, module d'Young : 9,2 GPa, coefficient de Poisson : 0,4). Cinq résonateurs différents ont été fabriqués par TRT, dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques des 5 résonateurs
 $E(\text{CM})$ = Épaisseur de la contre-masse
 $E(\text{P})$ = Épaisseur Polymère

N°	Fréquence (kHz)	$E(\text{CM})$ (mm)	Polymère	$E(\text{P})$ (mm)
1	45	3	QKP	3
2	50	3	QKP	2.4
3	57	3	QKP	1.8
4	65	3	QKP	1.4
5	79	3	KP	2

Les résonateurs sont collés aux 20 raidisseurs de la plaque, suivant une certaine distribution parmi les 5 résonateurs fabriqués. En premier lieu, on s'intéresse à l'effet de distributions aléatoires sur la signature fréquentielle du système. Dans le cadre du projet FARAON, un nombre limité de tirages aléatoires exploitant les 5 résonateurs du tableau 1 a été réalisé manuellement. Cette étude a conduit à la sélection de la distribution suivante pour les 20 fréquences des résonateurs (en kHz) : 50, 45, 65, 79, 57, 79, 57, 50, 45, 65, 65, 79, 50, 45, 57, 57, 50, 79, 65, 45. Une photographie de la plaque de 20 raidisseurs équipée des résonateurs correspondants est présentée à la figure 2.

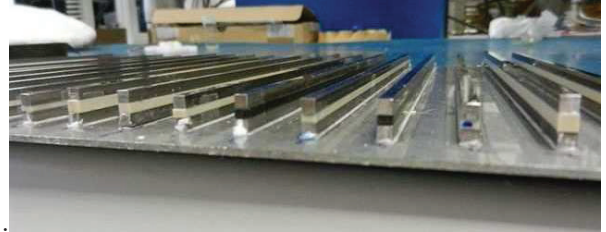


Figure 2 : haut : plaque vierge, bas : plaque avec les 20 raidisseurs, chacun équipé d'un résonateur spécifique.

4 Mesures en cuve

Les mesures ont été menées dans le bassin d'essais acoustiques (6 m de long, 4 m de large, 3 m de profondeur) de l'Université du Havre. Les ondes de Bloch-Floquet étant fortement influencées par la présence d'un fluide lourd d'un côté de la plaque seulement, il est nécessaire pour ces expériences d'utiliser un caisson étanche en PVC pour isoler la plaque de l'eau côté raidisseurs. Deux plaques ont été testées, l'une avec des raidisseurs vierges, l'autre avec des raidisseurs équipés des résonateurs. La méthode expérimentale est présentée dans les références [5, 6]. La figure 3 présente le diagramme de diffusion acoustique pour les deux plaques. Par ailleurs, des simulations numériques exploitant la méthode des éléments finis (logiciels ATILA [7] et COMSOL) ont été réalisées pour les deux structures, en complément des expériences. Dans le cas de la structure avec résonateurs, les résultats numériques et expérimentaux de la Figure 3 montrent clairement le brouillage des points les plus brillants dans la gamme de fréquences 50-100 kHz. On note non seulement un brouillage important pour les signaux liés aux ondes de Bloch-Floquet, mais aussi un effet non négligeable sur certains points brillants liés à la diffraction de Bragg. Globalement, cette solution présente deux avantages importants. D'une part, le dispositif peut s'appliquer aux raidisseurs d'une structure existante. D'autre part, les couches d'élastomère sont situées à l'intérieur de la coque et ne sont donc pas soumises à la pression hydrostatique et à la température extérieure.

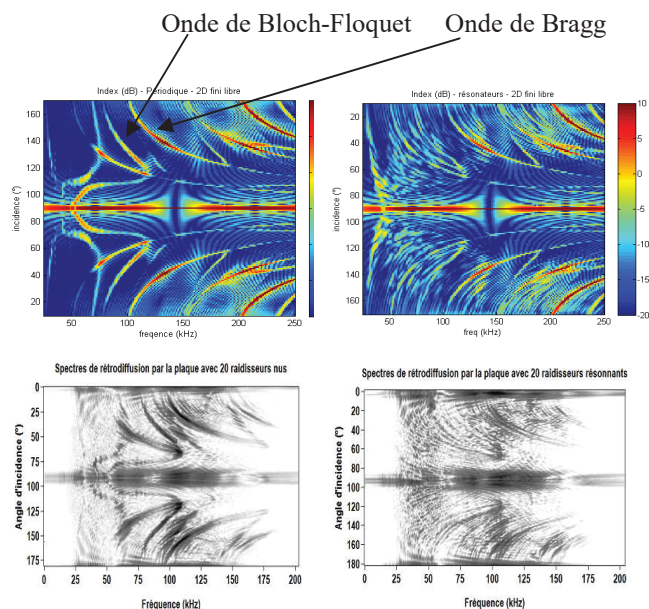


Figure 3 : Diagramme de diffusion acoustique : (gauche) plaque contenant 20 raidisseurs ; (droite) plaque contenant 20 raidisseurs, chacun muni d'un système résonant. Première ligne : résultats numériques (FEM), deuxième ligne : résultats expérimentaux.

5 Optimisation de la plaque

Afin d'aller plus loin dans le brouillage des caractéristiques de diffusion acoustique pour la furtivité, un algorithme d'optimisation a été utilisé pour le choix des résonateurs attachés aux raidisseurs. Nous considérons donc l'optimisation d'une plaque comportant 20 résonateurs dont le choix des fréquences de résonances est laissé libre. L'efficacité d'une telle plaque, en termes de furtivité dans un premier temps, dépend du choix de ces fréquences.

Pour une sélection de fréquences et une distribution données, il est possible d'utiliser un modèle analytique [1, 2] pour obtenir les spectres de diffusion acoustique et ainsi évaluer les performances. Les temps de calcul nécessaires à la résolution du problème analytique permettent d'envisager une procédure d'optimisation, qui serait inaccessible dans le cas d'une modélisation numérique (par exemple par MEF). Néanmoins, étant donné la taille de l'espace de recherche, une exploration exhaustive des solutions possibles est à exclure. En effet, dans un premier temps, la recherche est restreinte à l'ensemble de 5 fréquences choisies lors de cette première étude. L'utilisation de 5 fréquences implique que la cardinalité de l'espace de recherche est égale à 5^{20} . Dans l'éventualité où l'évaluation d'une solution ne prendrait qu'une micro-seconde, une recherche exhaustive nécessiterait 3 années de calculs. En pratique la résolution du modèle de calcul dépasse la minute sur un ordinateur muni de 2 processeurs octocoeur à 1,7 GHz. C'est pourquoi, une approche d'optimisation basée sur les méta-heuristiques est considérée.

Nous proposons ici l'utilisation de méta-heuristiques afin de déterminer un choix de fréquences se rapprochant d'une solution optimale. Les méta-heuristiques sont un ensemble de méthodes génériques d'optimisation permettant de déterminer une ou plusieurs solutions se rapprochant de l'optimum global. En particulier, nous

avons considéré l'utilisation d'un algorithme génétique [8, 9] ainsi qu'un algorithme glouton [10].

Le cas de référence pour la procédure d'optimisation est la distribution de 20 résonateurs choisis parmi 5 types utilisée pour la maquette décrite en section 3. On notera $\langle x^0 \rangle$ le vecteur constitué par les 20 fréquences de résonance correspondantes : 50, 45, 65, 79, 57, 79, 57, 50, 45, 65, 65, 79, 50, 45, 57, 57, 50, 79, 65, 45 (en kHz). Les résultats en furtivité du modèle analytique pour une plaque sans résonateurs ainsi que pour une plaque avec résonateurs de fréquences $\langle x^0 \rangle$ sont présentés en figure 4.

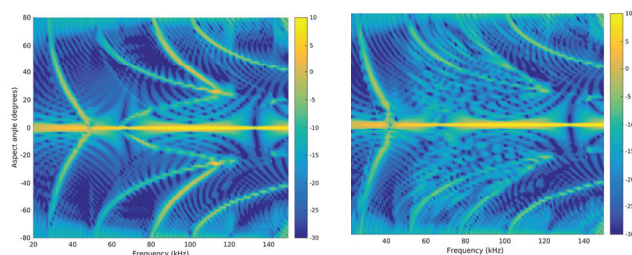


Figure 4 : Résultats analytiques en furtivité pour une plaque sans résonateurs (gauche) et une plaque munie de résonateurs de fréquences $\langle x^0 \rangle$ (droite).

La conception d'un algorithme d'optimisation nécessite la définition d'une fonction objective permettant d'évaluer la qualité des solutions. Aucun critère précis n'ayant été défini au préalable, nous avons décidé d'évaluer une affectation de fréquences par la corrélation entre les résultats du modèle analytique obtenus sans résonateurs et les résultats obtenus avec cette affectation de fréquences. Ce critère doit par conséquent être minimisé. Par exemple, la valeur de la fonction objective en $\langle x^0 \rangle$ est égale à 0,74.

En appliquant un algorithme génétique, nous obtenons la solution suivante (fréquences en kHz): 45, 79, 65, 65, 79, 79, 79, 45, 57, 79, 79, 45, 79, 57, 79, 79, 45, 45, 79, 79 (notée $\langle x^1 \rangle$). Celle-ci permet d'atteindre une corrélation de 0,67. Le résultat est présenté à la figure 5. Nous observons que cette solution permet d'améliorer l'atténuation de la branche présente autour de 80 kHz.

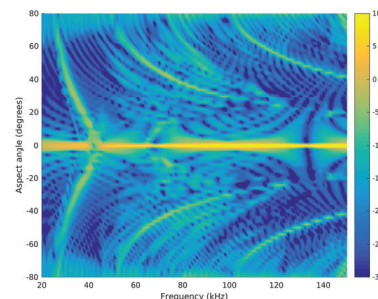


Figure 5 : Résultats analytiques en furtivité pour la solution $\langle x^1 \rangle$.

La même démarche peut être appliquée au cas du rayonnement, pour la performance en discrétion. Elle conduit à une nouvelle solution $\langle x^2 \rangle$ avec la distribution suivante (fréquences en kHz) : 45, 79, 79, 65, 50, 79, 79, 45, 57, 79, 79, 50, 79, 50, 79, 79, 45, 45, 79, 79. Les

résultats du modèle analytique en discrétion pour une plaque sans résonateurs ainsi que pour une plaque avec résonateurs de fréquences $\langle x^2 \rangle$ sont présentés à la figure 6. Dans ce cas, la corrélation est de 0,40 et nous observons un effet significatif dans l'intervalle [40, 120] kHz. Ces premiers résultats sont encourageants et les recherches se poursuivent sur ce sujet dans le cadre du projet RAMSES.

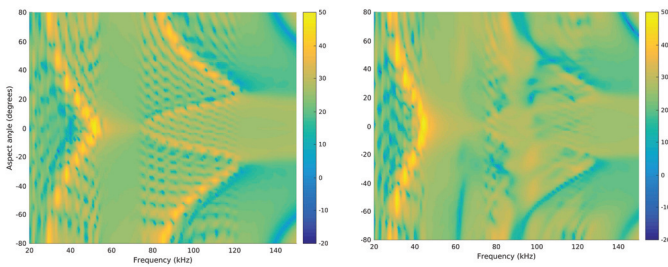


Figure 6 : Résultats analytiques en rayonnement pour une plaque sans résonateurs (gauche) et une plaque munie de résonateurs de fréquences $\langle x^2 \rangle$ (droite).

6 Conclusion et perspectives

Les résultats numériques et expérimentaux sur la plaque raidie équipée de résonateurs spécifiques ont permis de mettre en évidence la pertinence de l'ajout de résonateurs sur les raidisseurs pour le brouillage des spectres de diffusion acoustique. La qualité de ce brouillage peut aussi être améliorée en choisissant les différents résonateurs par des algorithmes d'optimisation. Cette approche permet de définir des solutions intéressantes avec un temps de calcul raisonnable. Néanmoins, le critère de corrélation utilisé pour quantifier l'écart entre les résultats avec et sans résonateurs n'est pas suffisant pour évaluer une notion de « brouillage ». La définition d'autres critères plus étroitement liés à la facilité de détection et d'identification de cibles doit donc être conduite. Enfin, il a été montré que ce concept pouvait être étendu à la discrétion des véhicules. Il conviendra donc ultérieurement de considérer simultanément les critères de discrétion et de furtivité dans l'optimisation dans le but de construire une solution de compromis. Ceci nécessitera la conception d'un algorithme d'optimisation multi-critère adapté à ce problème particulier.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre des projets ASTRID FARAON (Furtivité Acoustique par des RAidisseurs réSONants), 04/2014-09/2016 ANR-13-ASTR-0016 et ASTRID RAMSES (Rayonnement Acoustique Maitrisé par des Systèmes résonants), début 01/2017, Projet ANR- 16-ASTR-0017-01, projets financés par la DGA via l'ANR/Astrid.

Références

- [1] M. Tran-Van-Nhieu, *Scattering from a ribbed finite cylindrical shell with internal axisymmetric oscillators*, J. Acoust. Soc. Am. 112, 2002
- [2] M. Tran-Van-Nhieu, *Resonance from a ribbed finite cylindrical*, Proceedings of the 19th International Congress on Acoustics, Madrid, 2007
- [3] Projet ASTRID FARAON, Furtivité Acoustique par des RAidisseurs réSONants, 04/2014-09/2016 ANR-13-ASTR-0016.
- [4] Brevet "Ensemble de coque métallique pour véhicule discret et furtif", inventeur : Michel Tran Van Nhieu déposé le 25 mai 2012, numéro d'enregistrement national 12/01502, France N° Publication N° : Fr 299 09 25.
- [5] G. Maze, F. Léon, J. Ripoché, H. Überall, *Repulsion phenomena in the phase-velocity dispersion curves of circumferential waves on elastic cylindrical shells*, Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 105, 1695-1701
- [6] F. Léon, F. Lecroq, D. Décultot, G. Maze, *Scattering of an obliquely incident acoustic wave by an infinite hollow cylindrical shell*, Journal of the Acoustical Society of America 91,1388-1397, 1992
- [7] ATILA, Finite-Element Software Package for the analysis of 2D & 3D structures based on smart materials." 2010.
- [8] M. Mitchell, *Introduction to Genetic Algorithms*, MIT press, Ed. Cambridge, MA, USA, 1998. ISBN 0262631857.
- [9] D. Whitley, "A Genetic Algorithm Tutorial", Statistics and Computing, Vol. 4, p 65-85, 1994.
- [10] T.H. Cormen, C.E. Leiserson, R.L. Rivest, and C. Stein, "Introduction to Algorithms", Third Edition, the MIT press, Ed. Cambridge, MA, USA, 2009. ISBN 0262033844 - 9780262033848.