
Transparence acoustique de revêtement type Alberich sous forte pression d'eau : méthode de simulation couplée

J.-B. DUPONT^a, P. LAMY^b, Y. RENOUC^c

a. Vibratec, 28 chemin du Petit Bois, CS80210 69134 Ecully Cedex, France
(jean-baptiste.dupont@vibratec.fr)

b. SMAC, 66 impasse Edouard Branly ZI Toulon EST, BP 119 83079 Toulon Cedex 9,
France (pierre.lamy@smac.fr)

c. Naval Group Research, Technopôle de la Mer, 199 Avenue Pierre-Gilles de Gennes, 83190
Ollioules, France (ygaal.renou@naval-group.com)

Résumé :

Une démarche de modélisation éléments finis est mise en œuvre pour calculer la transparence acoustique de panneaux hyper-viscoélastiques à double périodicité (panneaux de type Alberich) sous forte pression d'eau. La méthode comporte deux étapes. Tout d'abord, le comportement statique non-linéaire sous forte pression d'eau est estimé grâce à un solveur éléments finis non-linéaire. Le modèle inclut en particulier les contacts, les grandes déformations et les propriétés hyperélastiques du matériau (Mooney-Rivlin). Un modèle éléments finis acoustique est alors construit sur la base des résultats statiques (déformation statique, viscoélasticité), de sorte que la transparence acoustique du panneau puisse être calculée en fonction de la fréquence, de la pression d'eau et de la température. Grâce à cette méthode de simulation, les performances acoustiques d'un revêtement peuvent être optimisées et l'influence des conditions environnementales sur les propriétés acoustiques peut être étudiée : comportements basses et hautes fréquences, comportement modale.

Abstract:

A complete finite element approach is implemented in order to simulate the acoustic transparency of doubly periodic hyperviscoelastic panels (such as Alberich anechoic coatings) under high water pressure. This is a 2-step approach. First, the nonlinear static behavior of the panel under water pressure is estimated with the aid of a nonlinear static simulation including hyperelastic material properties (Mooney-Rivlin), large strain hypothesis and contact. A finite element acoustic model is built on the basis of the static results (static deflection and strain, viscoelasticity) so that the acoustic transparency of the panel can be computed as a function of frequency, water static pressure and temperature. With the aid of this simulation methodology, the acoustic performance of the coating can be optimized and the influence of the conditions on the acoustic properties can be investigated: low- and high-frequency performances, modal behavior.

Mots clefs : Transparence acoustique ; Eléments finis ; Alberich ; Statique non-linéaire ; Viscoélasticité ; Hyperélasticité

1 Introduction

Suite à l'évolution des pratiques militaires au cours du XXe siècle, la propagation acoustique dans l'eau et plus précisément la détection sous-marine sont devenus des sujets de première importance. Encore maintenant, la furtivité militaire représente un enjeu important. Elle constitue une préoccupation pour les constructeurs de navires militaires ainsi qu'un défi technologique ambitieux. Au demeurant, ce sujet concerne également la marine civile : les nuisances sonores liées aux installations industrielles off-shore ou au trafic maritime ainsi que leur impact sur la faune sous-marine sont de plus en plus pris en considération.

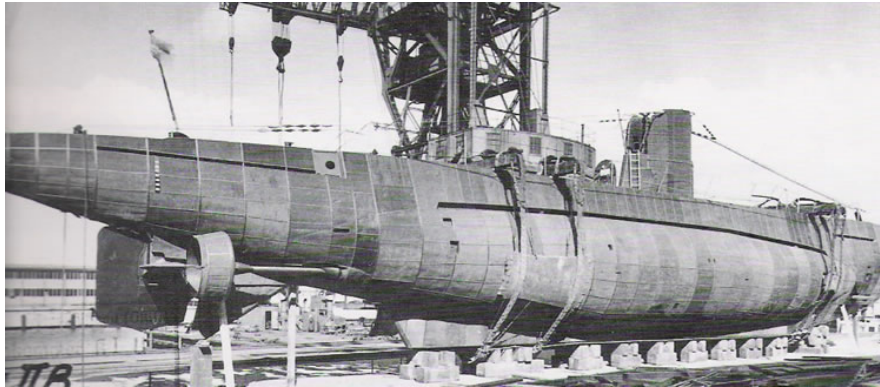


Figure 1 : Revêtement d'un sous-marin par du matériau acoustique

L'enjeu principal de la discrétion sous-marine est de rendre un navire impossible à détecter. Les systèmes acoustiques de détection sous-marine peuvent être de deux sortes : passif (écoute du bruit propre rayonné par la cible dans l'environnement) ou actif (détection de la réflexion sur la cible d'un signal émis).

La technologie SONAR ayant considérablement évolué, la marine allemande équipa un premier sous-marin de revêtement au milieu du XXe siècle afin d'améliorer la discrétion du navire tant en termes d'anoïse (réflexion des échos sonar) que de masquage (rayonnement dans l'eau de son propre bruit). Ces revêtements de type « Alberich » sont constitués d'une couche de matériau viscoélastique et d'inclusions d'air, périodiquement ou aléatoirement réparties. Les performances acoustiques sont donc multiples, comme décrit par la Figure 2. De bonnes performances de masquage ne permettent pas de présager de bonnes capacités anoïses, même si ces caractéristiques sont liées aux simples coefficients de réflexion et de transmission, comme décrit par Audoly [1-3].

La modélisation et l'optimisation de ces revêtements représentent un défi important pour chaque nouvelle génération de sous-marin. Cet article propose une méthode numérique pour estimer le coefficient de transmission d'un panneau de type Alberich soumis à une forte pression d'eau. Les difficultés liées à ce type de modélisation sont nombreuses :

- Dans la gamme de fréquence considérée, les méthodes d'homogénéisation sont inopérantes et le détail de la géométrie des cavités doit être pris en compte,
- Les performances acoustiques des revêtements sont liées au comportement dynamique linéaire autour de la déformée statique imposée par le milieu,
- Les matériaux utilisés ont des propriétés complexes. Ils sont souvent viscoélastiques (variation des propriétés en fonction de la fréquence et de la température) et hyperélastiques (non-linéarité, influence de la déformation sur les propriétés mécaniques).

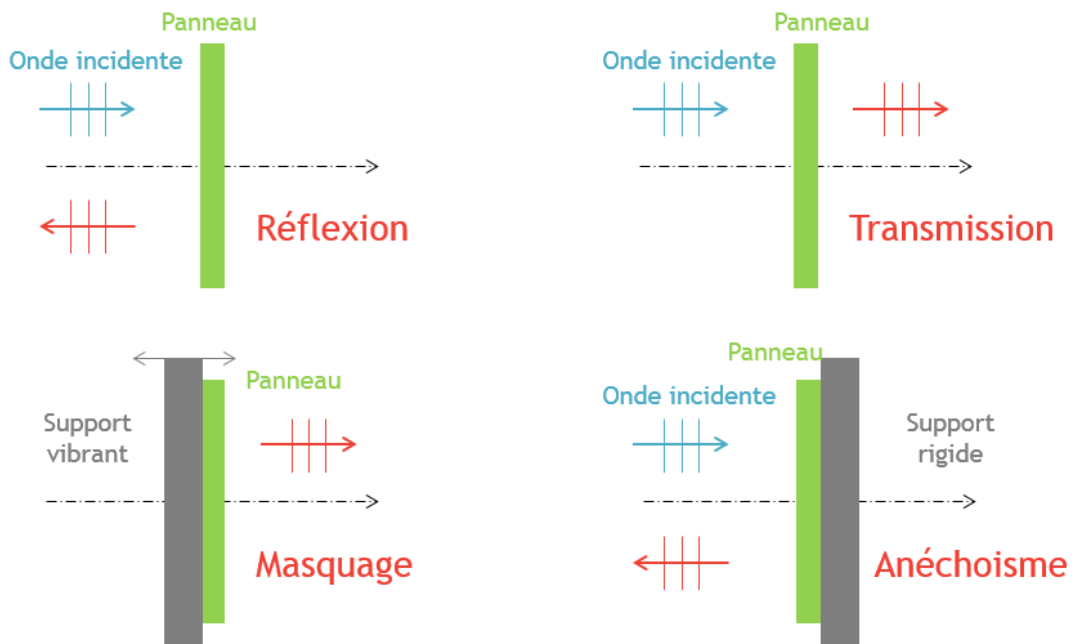


Figure 2 : Performances acoustiques des revêtements [1]

La méthode de simulation proposée comporte donc deux étapes distinctes, chacune s'appuyant sur des outils de modélisation par éléments finis :

- Simulation statique non-linéaire : mise en pression du panneau.
- Simulation acoustique de la transparence du panneau. Les déplacements sont calculés autour de la déformation statique obtenue lors de la première étape.

Une validation du calcul acoustique est tout d'abord proposée par comparaison à des résultats publiés par Hladky en 1991 [4] et faisant office de référence (mais sans prise en compte de la pression statique). Puis le calcul complet est décrit et les résultats analysés.

2 Validation de la simulation acoustique

La Figure 3 illustre le revêtement considéré. Il est équivalent à celui considéré par Hladky [4]. Le revêtement viscoélastique a une épaisseur de 4 cm, les inclusions d'air sont des cylindres de hauteur 2 cm, de diamètre 1,5 cm. La périodicité des inclusions est de 5 cm. La Figure 4 donne une vue du modèle éléments finis d'une période du revêtement. Ce modèle inclut des volumes d'eau en amont et en aval du revêtement dont la transparence acoustique est évaluée. Les propriétés du matériau viscoélastique sont identiques à celle utilisées dans la publication de référence [4], il s'agit d'un matériau de type polyuréthane. La périodicité du revêtement permet de ne considérer qu'une seule cellule. L'échantillon est placé dans un conduit rigide. L'excitation est réalisée en amont grâce à une onde plane d'amplitude unitaire ($p^i = 1$). Des conditions anéchoïques sont appliquées à chaque extrémité du conduit afin d'éviter toute réflexion. La donnée de sortie est l'amplitude de l'onde plane transmise p^{tr} . L'équation (1) donne le coefficient de transmission du revêtement.

$$T = 20 \cdot \log \left(\frac{p^{tr}}{p^i} \right) \quad (1)$$

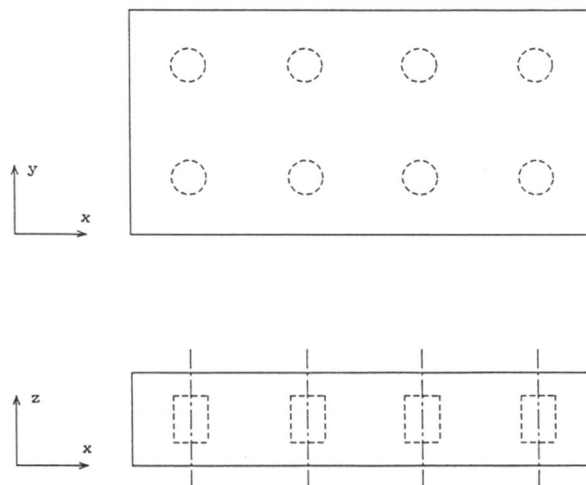


Figure 3 : Revêtement type « Alberich » proposé par Hladky [4]

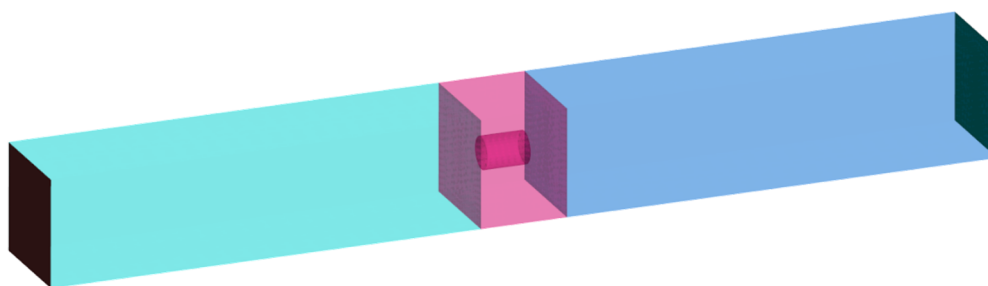


Figure 4 : Modèle éléments finis pour le calcul de la transparence acoustique du revêtement

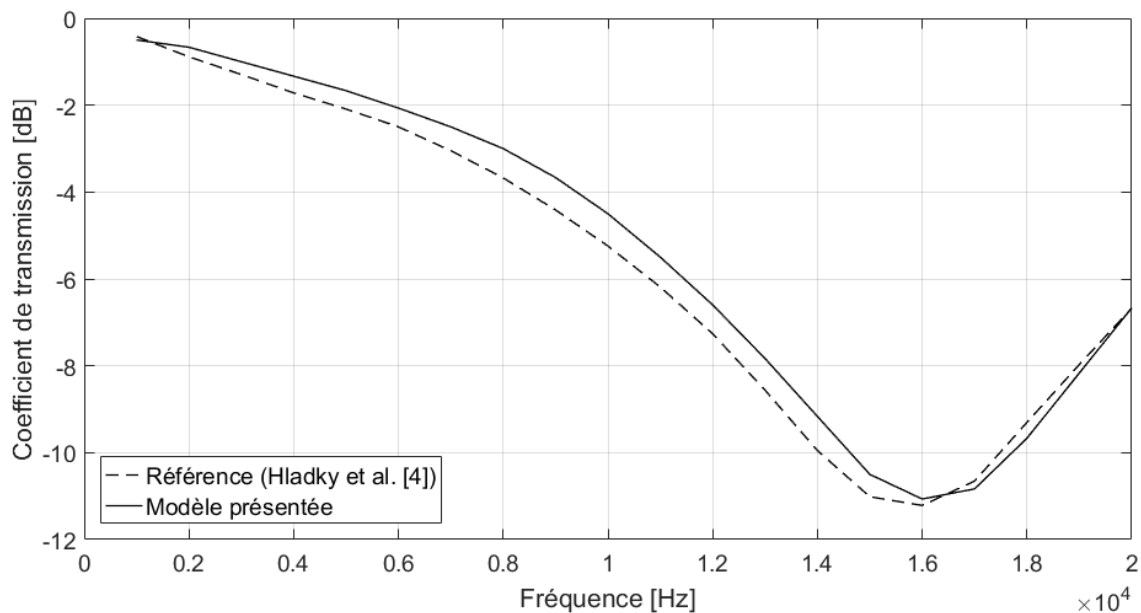


Figure 5 : Coefficient de transmission : comparaison aux résultats de référence

Le solveur utilisé pour la simulation par éléments finis est ACTRAN. La Figure 5 présente les résultats obtenus et les compare aux résultats de référence [4]. La corrélation est très bonne, même si de faibles différences sont observables. Elles ont probablement pour origine la finesse des maillages comme noté par Hladky dans son analyse. Cette comparaison valide donc le calcul de la transparence acoustique du revêtement.

3 Comportement acoustique sous pression et température

La simulation acoustique précédemment présentée ne permet pas de prendre en compte les variations de température et de pression d'eau. Pour prendre en compte ces effets, différentes techniques doivent être considérées :

- Comportement statique non-linéaire sous forte pression d'eau induisant de grandes déformations,
- Prise en compte de la déformation statique dans le calcul de la transparence acoustique,
- Comportement viscoélastique du matériau (dépendance en fréquence et en température),
- Influence de la déformation statique sur les propriétés dynamiques du matériau (matériau hyperviscoélastique).

Une méthode de simulation est donc proposée pour traiter toutes ces difficultés. Elle est présentée Figure 6. Il est à noter que ce type de méthode permettant de prendre en compte les conditions de pression et de température n'apparaît pas dans la littérature.

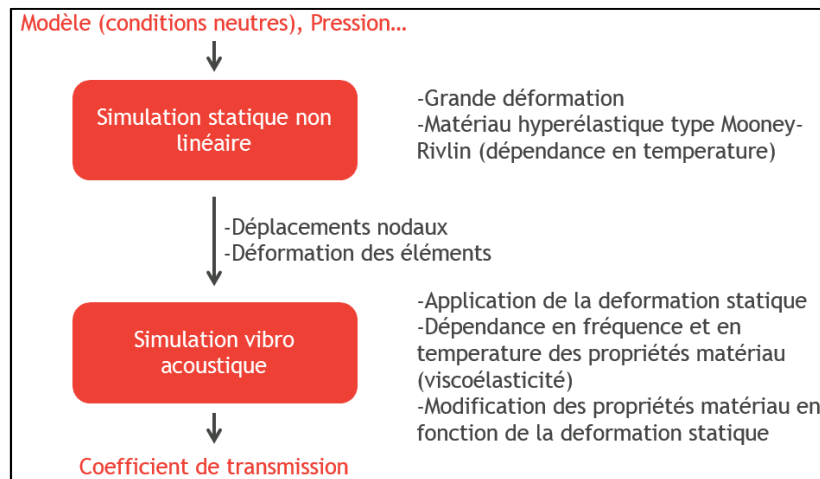


Figure 6 : Méthodologie de simulation couplée

Le calcul statique non-linéaire est relativement classique et peut être mis en œuvre dans différents environnements (comme MSC Marc dans le cas présent). Au-delà des grandes déformations et des propriétés hyperélastiques du matériau, cette simulation doit également tenir compte du comportement pneumatique de la cavité d'air et de la possibilité qu'a le revêtement de rentrer en auto-contact. Cette première étape n'est destinée qu'à alimenter la simulation vibro-acoustique. Le modèle acoustique est déformé par les résultats statiques. La Figure 7 donne une illustration du maillage acoustique sous 20 bar et 25 °C. L'influence de la pression est alors significative.

La viscoélasticité du matériau a pour conséquence une dépendance en temps et en température des propriétés du matériau (module d'Young et amortissement). Les courbes maîtresses décrivant les propriétés pour une température de référence (voir la Figure 8 pour le matériau polyuréthane utilisé) constituent la donnée de base essentielle à partir de laquelle s'applique le principe de superposition temps-température permettant d'obtenir les propriétés matériau pour toutes les fréquences et toutes les températures [5], comme détaillé par l'équation (2).

$$E(T, f) = E(T_0, \alpha_T \cdot f) \quad (2)$$

Où T_0 est la température de référence et α_T est le coefficient de superposition.

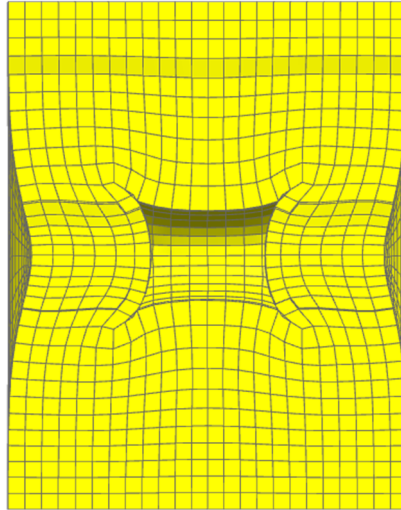


Figure 7 : Maillage acoustique après application de la déformation statique

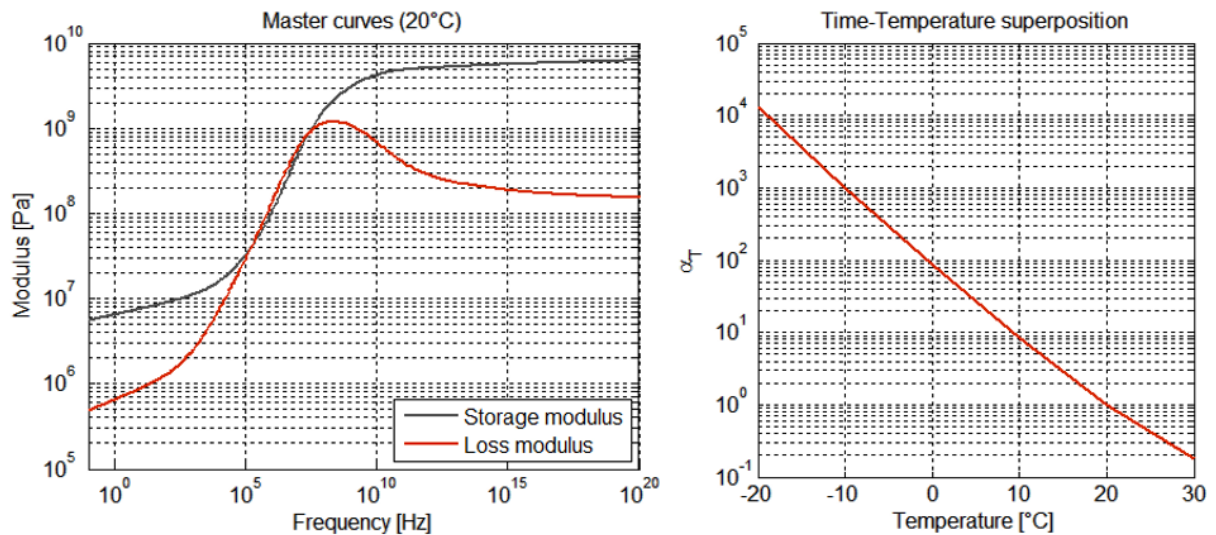


Figure 8 : Courbe maitresse du matériau polyuréthane utilisé

La prise en compte de l'influence de la déformation statique sur l'évolution des propriétés dynamiques du matériau est le point le plus complexe, dans la mesure où il n'a quasiment jamais été traité et n'apparaît pas dans la littérature. La méthode publiée par Saad [6, 7] est appliquée ici. Elle propose de déterminer les modules du matériau sous forte déformation grâce à l'équation (3) :

$$G(\omega, \gamma) = h_1(\gamma) + h_2(\gamma) \left(\frac{G_{re}(\omega)}{G_\infty} + i \cdot \frac{G_{im}(\omega)}{G_\infty} \right) \quad (3)$$

Où γ est la déformation statique locale et h_1 et h_2 sont des fonctions qui dépendent du matériau hyperélastique considéré.

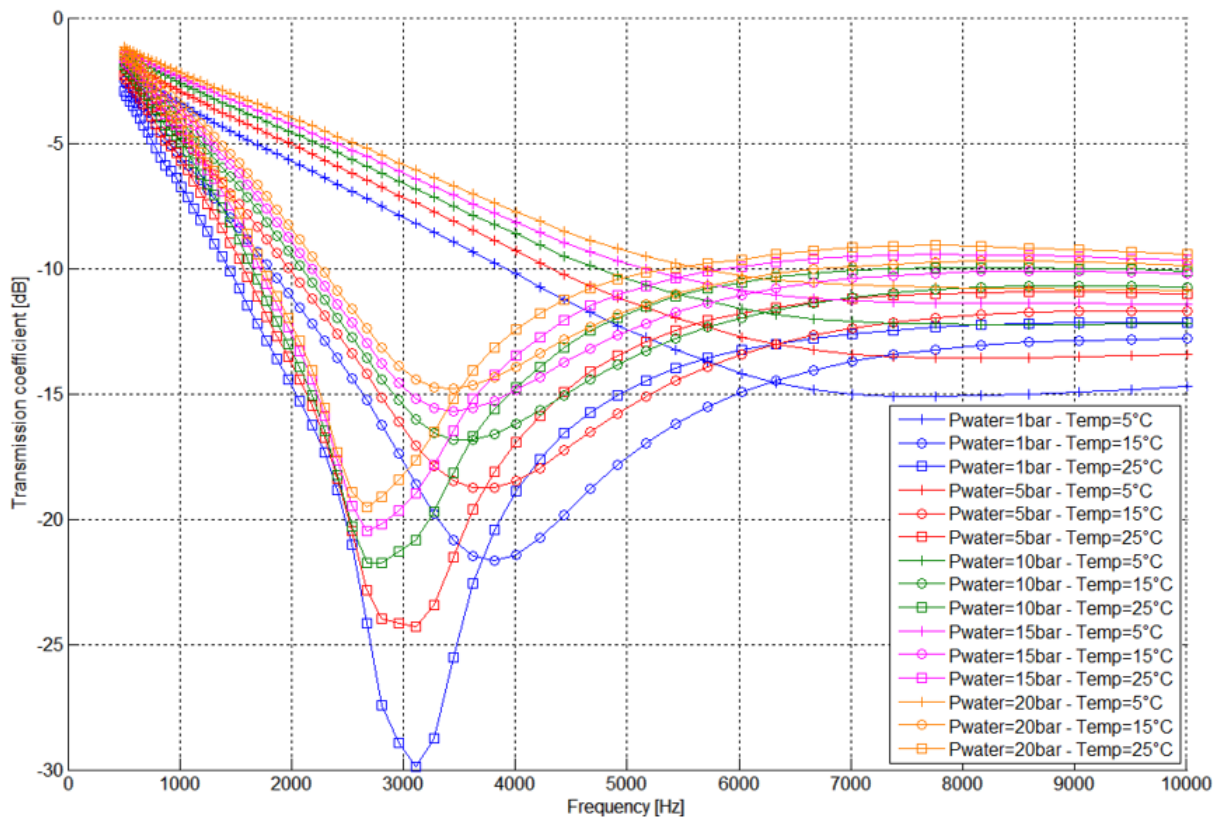
Après application des principes de viscoélasticité et d'hyperélasticité présentés plus haut, la mise en données de la simulation requiert d'écrire une valeur de module complexe du matériau par fréquence et pour chaque élément du modèle (champs spatiaux de module), aboutissant ainsi à une quantité importante de données d'entrée.

4 Résultats numériques

La méthodologie de calcul présentée au paragraphe précédent a été appliquée au revêtement de référence considéré au paragraphe 2. La transparence acoustique du revêtement a été évaluée pour trois valeurs de température (5°C, 15°C et 25°C) et cinq valeurs de pression (1 bar, 5 bar, 10 bar, 15 bar et 20 bar). La Figure 9 présente les résultats. La couleur de la courbe est relative à la pression alors que le motif est lié à la température.

Le comportement résonnant du revêtement largement évoqué dans la littérature [2,8,9] apparaît clairement, mais l'objectif de cet article n'est pas d'analyser ce phénomène en détail. L'effet de la température sur le coefficient de transmission est net : une diminution de la température a pour conséquence une augmentation du module du matériau, comme établi par ses courbes maitresses (Figure 8). Refroidir le revêtement revient donc à le raidir. Ce raidissement a pour effet de décaler les résonances vers les plus hautes fréquences. Ce décalage est significatif (environ 3 kHz par 25°C, 4 kHz par 15°C et 8 kHz par 5°C).

La pression d'eau a deux influences distinctes. Elle modifie légèrement la fréquence des phénomènes résonnants. Ceci est dû à la plus forte déformation statique du revêtement qui modifie les propriétés dynamiques associées, ainsi qu'à l'évolution de la forme des cavités. Mais l'augmentation de la pression a surtout pour conséquence la dégradation du coefficient de transmission à cause de la diminution du volume apparent des inclusions d'air.



5 Conclusions

Cet article a présenté une nouvelle méthode pour estimer les propriétés acoustiques d'un revêtement acoustique sous-marin en tenant compte de l'influence de la température et de la pression d'eau. Il aborde principalement le coefficient de transmission, mais le même type d'approche peut être utilisé pour déterminer le coefficient de réflexion.

Les principales difficultés techniques levées sont liées à l'association d'une simulation statique non-linéaire grande déformation sur la base d'un matériau hyperélastique et d'une simulation vibroacoustique linéaire avec la prise en compte de la viscoélasticité.

Cette méthode a été appliquée à une géométrie de référence d'un revêtement type « Alberich ». Les résultats montrent une forte influence de la température sur les comportements résonants du revêtement ainsi qu'une nette diminution des performances acoustiques quand la pression d'eau augmente. Dans la perspective de la conception d'un revêtement macro-inclusionnaire pour une application sous-marine, il semble donc indispensable de mettre en place ce type de simulation afin de prendre en compte l'influence des conditions extérieures dans le processus d'optimisation.

Références

- [1] C. Audoly, "Global Characterization of Acoustic Panels at Normal Incidence for Underwater Applications", *Acustica*, 76:129-136, 1992.
- [2] C. Audoly, "Acoustic analysis of panels made with viscoelastic materials containing resonant cavities". *Acta Acoustica*, 2:393-402, 1994.
- [3] C. Granger et al, "Mesure des coefficients de réflexion et de transmission de panneaux en bassin d'essais acoustique", 12^{ème} Congrès Français d'Acoustique, 2014.
- [4] Hladky et al., "Analysis of the scattering of a plane wave by a doubly periodic structure using the finite element method: application to Alberich anechoic coating", *J. Acoust. Soc. Am.* 90(6), 1991.
- [5] R. M. Christensen, "Theory of viscoelasticity: An introduction", New York: Academic Press, 1971.
- [6] Petitjean et al., "Modelling non-linear effects in elastomer components, including uncertainties", Proceedings of ISMA2010, Leuven, Belgium, 20-22 September 2010.
- [7] P. Saad, "Modélisation et identification du comportement non linéaire des cales en caoutchouc", PhD thesis of Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [8] G. Gaunard et al, "Resonance theory of the effective properties of perforated solids", *J. Acoust. Soc. Am.*, 73(5), 1983.
- [9] S. Ivansson, "Sound absorption by viscoelastic coatings with periodically distributed cavities", *J. Acoust. Soc. Am.*, 119(6), 2006.