



HAL
open science

Etude de différentes méthodes de prédiction du bruit rayonné d'une structure à partir de données accélérométriques

Matthieu Decaux, Quentin Leclere, Laurent Maxit, Florian Hugues, Valentin Meyer

► **To cite this version:**

Matthieu Decaux, Quentin Leclere, Laurent Maxit, Florian Hugues, Valentin Meyer. Etude de différentes méthodes de prédiction du bruit rayonné d'une structure à partir de données accélérométriques. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. <hal-03847994>

HAL Id: hal-03847994

<https://hal.science/hal-03847994v1>

Submitted on 10 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Etude de différentes méthodes de prédiction du bruit rayonné d'une structure à partir de données accélérométriques

M. Decaux^{a,b}, Q. Leclère^a, L. Maxit^a, F. Hugues^b, et V. Meyer^b

^a Univ Lyon, INSA Lyon, LVA, EA677, 69621 Villeurbanne, France

^b Naval Group, 199 av. Pierre-Gilles de Gennes, 83190 Ollioules, France



La maîtrise du bruit rayonné des navires est aujourd'hui un enjeu majeur. Dans le domaine civil, l'activité humaine s'intensifie et a un fort impact sur l'environnement marin. Dans le domaine militaire, l'amélioration des performances des sonars nécessite de maîtriser plus finement le bruit rayonné. Il est donc nécessaire de pouvoir prédire en temps réel le niveau d'indiscrétion ainsi que la directivité associée, sur une bande de fréquence très large, de quelques Hz à quelques dizaines de kHz. Pour cela, nous disposons d'un réseau d'accéléromètres sur les structures. Plusieurs méthodes de reconstruction utilisant ces signaux ont été identifiées, chacune adaptée à une plage de fréquence et ayant des contraintes différentes. L'objectif de ces travaux est d'explorer trois de ces méthodes afin de définir leur domaine de validité. La première méthode est basée sur une discrétisation de l'intégrale de Rayleigh. La seconde est l'OTPA (Operational Transfer Path Analysis) basée sur des mesures simultanées de pression et d'accélération permettant de construire une matrice de transmissibilité entre les pressions mesurées et les accélérations. La dernière est la DRE (Directional Radiation Efficiency), une méthode énergétique s'appuyant sur l'évaluation du facteur de rayonnement « directif » propre à la structure rayonnante. On présente dans cet exposé le formalisme de ces approches avant de comparer leur performance sur un cas test numérique constitué d'une plaque bafflée simplement supportée et rayonnant dans un demi-espace infini.

1 Introduction

Dans le secteur naval, il est important de pouvoir prédire le bruit rayonné d'un navire [1]. D'un point de vue écologique, l'impact des navires sur la faune maritime peut mettre en danger des écosystèmes fragiles. D'un point de vue militaire, la maîtrise de la signature acoustique représente un avantage stratégique significatif. Pour estimer la pression rayonnée, nous disposons d'un ensemble de capteurs accélérométriques fixés sur la coque du bateau. L'objectif de cette étude est d'évaluer les performances de différentes méthodes permettant de prédire la pression rayonnée en champ lointain à partir de ces données accélérométriques. La plage de fréquence d'intérêt est très large, des basses fréquences de l'ordre de quelques Hz aux hautes fréquences à plusieurs dizaines de kHz. Le nombre et la disposition des capteurs représente une difficulté supplémentaire. En effet, il n'est pas possible d'utiliser un maillage très fin.

Trois méthodes de reconstruction de la pression rayonnée d'une structure sont considérées dans cette étude :

- La première est basée sur la discrétisation de l'intégrale de rayonnement. Elle ne nécessite pas d'autres informations que la position des accéléromètres et les signaux accélérométriques ;
- l'OTPA (Operational Transfer Path Analysis) [2] permet de déterminer la matrice de transmissibilité entre les accéléromètres et les pressions en champ lointain d'intérêt. Pour cela, elle nécessite de connaître les accélérations et les pressions pour différentes conditions opérationnelles.
- La DRE (Directional Radiation Efficiency) [3] est une méthode basée sur des principes énergétiques qu'il reste à consolider. Cette méthode propose d'utiliser le facteur de rayonnement de la structure et d'enrichir l'information qu'il permet d'obtenir en lui associant un coefficient de pondération en fonction de la direction de l'observation.

2 Problème considéré et indicateurs de performance

Pour évaluer les performances de ces méthodes, nous considérons le cas d'une plaque bafflée simplement appuyée en aluminium. Les réponses vibratoires de la plaque ont été calculées par la méthode de superposition modale en utilisant une formulation analytique. Ainsi nous disposons d'une solution analytique de référence pour la pression rayonnée. La plaque étudiée représentée sur la figure 1 a une longueur de 48cm pour une largeur de 42cm, son épaisseur est de 3mm. Son amortissement est fixé à 1%. La fréquence critique dans l'air est d'environ 4 000Hz. Le maillage d'accéléromètres est une grille de 4 × 4. Deux configurations sont considérées :

- un maillage régulier des capteurs ;
- un maillage pseudo régulier où l'on considère une variable aléatoire de 1 cm par rapport à la configuration précédente.

La masse des accéléromètres est négligée dans le modèle. L'excitation est une force ponctuelle placée en (0.08,0.12) avec une amplitude de 1N. Les pressions sont calculées en 400 points sur une demi-sphère en champ lointain (R=1 000m) afin de s'assurer de la convergence de la puissance. Elles sont repérées notamment par l'angle θ avec la normale de la plaque.

Afin de comparer les performances de reconstruction des méthodes, il est nécessaire de définir des indicateurs. Dans un premier temps, nous utilisons la puissance rayonnée. Cette grandeur globale permet de s'affranchir des phénomènes locaux qui pourraient exister. Son expression générale est exprimée par le produit de la pression p et du conjugué de la vitesse acoustique v

$$W = \frac{1}{2} \iint_S p v^* dS \quad (1)$$

En faisant l'hypothèse de champ lointain, nous pouvons considérer que les ondes acoustiques se comportent comme des ondes planes. Il existe donc une relation entre la vitesse acoustique et la pression. Cela nous permet d'écrire la puissance uniquement en fonction de la pression. Nous

évaluons cette intégrale en la discrétisant et en supposant que la pression quadratique estimée est représentative de la pression moyenne sur la surface. Nous obtenons finalement l'expression de la puissance suivante

$$W \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{|p_i|^2}{\rho c} \Delta S_i \quad (2)$$

où c et ρ sont la vitesse acoustique et la masse volumique du milieu fluide, ΔS_i est la surface associée à la pression p_i en champ lointain. La puissance est un indicateur global qui ne permet que de juger du niveau d'énergie rayonnée. Cet indicateur ne permet pas de considérer la répartition de la pression.

Afin de tenir compte des aspects directifs, cet indicateur peut être calculé pour une partie de la demi-sphère. Ainsi nous avons divisé la demi-sphère en trois surfaces définies par l'angle par rapport à la normale : $[0, \pi/6[$, $[\pi/6, \pi/3[$ et $[\pi/3, \pi/2]$. Nous notons W_k la puissance passant par chacune de ces surfaces. La somme de ces trois contribution vaut donc la puissance totale W .

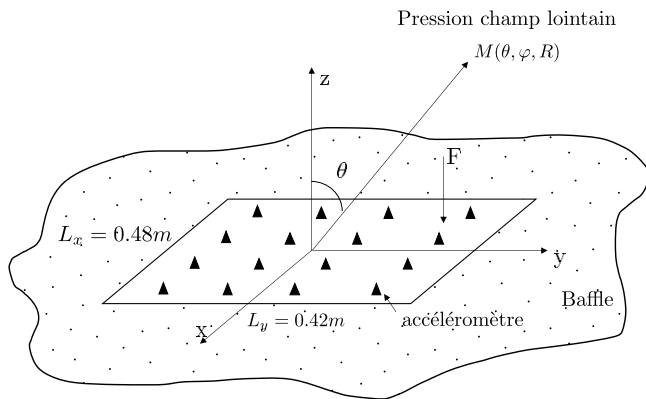


FIGURE 1 – Schéma du système considéré

3 Méthodes de reconstruction

3.1 Discrétisation de l'intégrale de rayonnement

Pour notre cas d'étude, nous nous intéressons à une plaque mince insérée dans un baffle. Son rayonnement s'obtient à partir de l'intégrale de Rayleigh [4] qui est un cas particulier de l'intégrale de Kirchhoff-Helmholtz. Elle s'écrit avec la dépendance temporelle $e^{-j\omega t}$

$$P(x, y, z) = -j\omega\rho \iint_S v(x', y') \frac{e^{jkR}}{2\pi R} dx' dy' \quad (3)$$

où $R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}$ représente la distance entre le point d'observation et le point d'intégration de la plaque et v est la vitesse de la structure au point (x', y') . Nous disposons d'un nombre fini de capteurs, l'intégrale (3) doit donc être discrétisée. En considérant la méthode des

rectangles, celle-ci s'écrit

$$P(x, y, z) \approx -j\omega\rho \sum_{i=1}^N v_i \frac{e^{jkR}}{2\pi R} \Delta S'_i \quad (4)$$

où la surface S de la plaque est discrétisée en N surfaces élémentaires auxquelles on associe une vitesse v_i et une surface $\Delta S'_i$. Nous pouvons ainsi estimer le champ de pression rayonné à partir de la vitesse mesurée sur la plaque.

3.2 Operational Transfer Path Analysis (OTPA)

L'OTPA [5] est une méthode très utilisée dans l'industrie automobile pour identifier les chemins de passage de vibration. La méthode consiste à construire une matrice de transmissibilité reliant des grandeurs d'entrées aux sorties. Dans notre cas d'application, les entrées sont des accélérations et les sorties des pressions. La matrice de transmissibilité représente donc un opérateur de rayonnement [6]. Considérons le système linéaire entre les mesures de pressions $P(N_p \times 1)$ et les vitesses $V(N_v \times 1)$

$$P = \mathbf{T}V \quad (5)$$

où \mathbf{T} est la matrice de transmissibilité de taille $(N_p \times N_v)$. La résolution de ce système linéaire peut être obtenue par différentes méthodes. L'OTPA repose sur des mesures en situations opérationnelles. Il est dans un premier temps nécessaire de disposer d'un nombre d'états vibratoires suffisamment linéairement indépendants entre eux et au moins égal au nombre d'entrées. Cette condition permet de s'assurer que la matrice à inverser soit de rang plein. Notons qu'au cours d'une passe de mesure, si des sources sont décorréélées alors le contenu fréquentiel est la superposition d'états vibratoires. Ainsi, le nombre de mesure n'est pas nécessairement le nombre d'états vibratoires. En pratique, ces conditions peuvent être obtenues par des montées ou descentes en régime [7]. Si l'on écrit le système pour N situations opérationnelles, nous obtenons le système suivant

$$\begin{bmatrix} p_1^1 & & p_1^N \\ \vdots & \dots & \vdots \\ p_{N_p}^1 & & p_{N_p}^N \end{bmatrix}_{N_p \times N} = [\mathbf{T}]_{N_p \times N_v} \begin{bmatrix} v_1^1 & & v_1^N \\ \vdots & \dots & \vdots \\ v_{N_v}^1 & & v_{N_v}^N \end{bmatrix}_{N_v \times N} \quad (6)$$

Pour estimer la matrice de transmissibilité \mathbf{T} , nous pouvons utiliser les matrices interspectrales $\mathbf{S}_{\mathbf{p}\mathbf{v}} = \langle \mathbf{P}\mathbf{V}^* \rangle$ et $\mathbf{S}_{\mathbf{v}\mathbf{v}} = \langle \mathbf{V}\mathbf{V}^* \rangle$, $\langle \rangle$ représentant un moyennage sur plusieurs réalisations. En multipliant l'équation (6) à droite par la transposée conjuguée de la matrice des vitesses \mathbf{V}^* , nous obtenons le système suivant

$$\mathbf{S}_{\mathbf{p}\mathbf{v}} = \mathbf{T}\mathbf{S}_{\mathbf{v}\mathbf{v}} \quad (7)$$

La matrice de transmissibilité est obtenue en inversant la matrice interspectrale des vitesses. Cette formulation permet de diminuer l'effet du bruit sur les voies de sorties [8]. A priori, dans notre cas d'application, les voies de pressions seront plus sensibles que les accélérations. En effet, le bruit marin mesuré est affecté par des bruits ambiants beaucoup

moins présents dans la mesure accélérométrique. Une fois que la matrice de transmissibilité a été obtenue, l'équation (5) permet de prédire la pression en champ lointain à partir des données vibratoires mesurées par les capteurs.

3.3 Directional Radiation Efficiency

La DRE (Directional Radiation Efficiency) est une méthode basée sur le facteur de rayonnement σ . Cet indicateur permet de relier la puissance acoustique W à la vitesse quadratique moyenne $\langle v^2 \rangle$ de la structure

$$\sigma = \frac{W}{\rho c S \langle v^2 \rangle} \quad (8)$$

Cet indicateur ne permet de remonter a priori qu'à la puissance globale. Nous associons à cette grandeur un coefficient directif μ_k qui correspond au rapport d'énergie rayonnée dans un secteur angulaire sur l'énergie totale

$$\mu_k = \frac{W_k}{W} \quad (9)$$

4 Application numérique

4.1 Discrétisation de l'intégrale de Rayleigh

Sur la figure 2, nous comparons la puissance reconstruite par la discrétisation de l'intégrale de Rayleigh (en trait pointillé fin) et celle obtenue par la solution analytique (3) (en trait épais). Pour ces calculs, le maillage pseudo-régulier de capteurs a été considéré. On peut observer que la puissance est correctement estimée tant que nous nous trouvons en basses fréquences. En particulier, les pics de résonances sont correctement estimés contrairement aux anti-résonances. En hautes fréquences la discrétisation tend à surestimer la puissance. La fréquence limite de

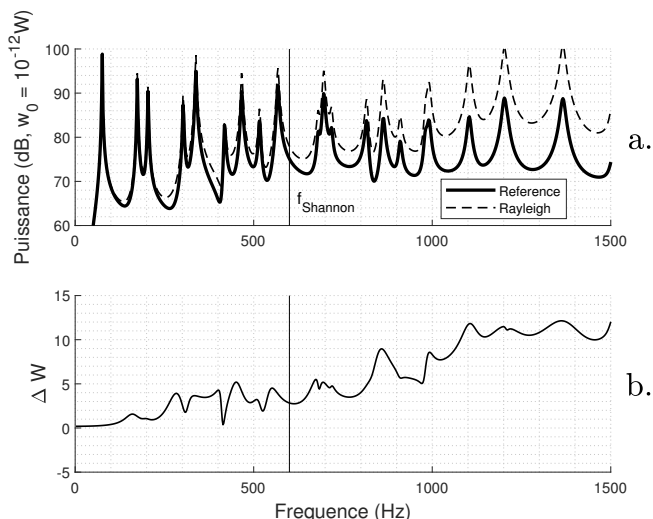


FIGURE 2 – Comparaison de la puissance analytique (trait épais) avec sa reconstruction par l'intégrale de Rayleigh discrétisée (trait fin), a. Puissance, b. Différence entre la reconstruction et la référence

reconstruction est la fréquence de Shannon. Nous pouvons estimer cette limite en utilisant la longueur d'onde de flexion de la plaque et en imposant un minimum de 2 capteurs par longueur d'onde. Nous obtenons la formule suivante

$$f_s \approx \frac{\pi d}{2} \sqrt{\frac{D}{\rho_s h}} \quad (10)$$

où d est la densité d'accéléromètres en nombre de capteur par mètres carrés, D est la rigidité de flexion de la plaque, ρ_s sa masse volumique et h son épaisseur. Dans notre cas d'application avec 16 accéléromètres cette fréquence est évaluée à 600Hz, représentée par un trait vertical sur la figure 2.

Nous présentons figure 3 les puissances relatives aux 3 secteurs angulaires définis par $[0, \pi/6[$, $[\pi/6, \pi/3[$ et $[\pi/3, \pi/2]$. Nous pouvons noter que la reconstruction de la puissance partielle est légèrement moins bonne que la puissance totale mais suit les mêmes tendances. Nous retrouvons le décrochage autour de la fréquence de Shannon. Contrairement aux deux méthodes suivantes, aucune phase

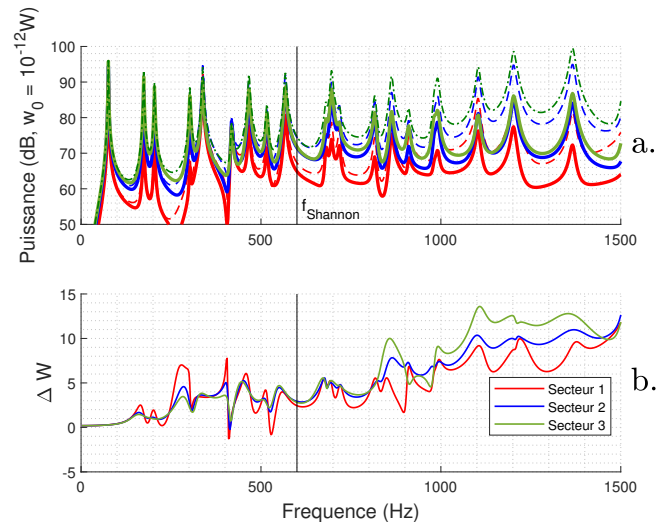


FIGURE 3 – Comparaison de la reconstruction de la puissance par la méthode de Rayleigh pour 3 secteurs angulaires $[0, \pi/6[$, $[\pi/6, \pi/3[$ et $[\pi/3, \pi/2]$, numérotés respectivement de 1 à 3, a. Puissance relative à chaque secteur angulaire, b. Différence entre la référence et la reconstruction

d'apprentissage n'est nécessaire. Cependant, le domaine de validité de la méthode de discrétisation est restreint aux basses fréquences car nous ne disposons que d'un nombre limité d'accéléromètres.

4.2 OTPA

Nous nous intéressons maintenant à la méthode OTPA. La matrice de transmissibilité \mathbf{T} a été obtenue à partir des accélérations et des pressions obtenues pour 32 forces ponctuelles décorréllées positionnées aléatoirement sur la plaque. La figure 4 compare les résultats pour 2 maillages ayant le même nombre d'éléments. Dans un premier cas, en trait discontinu, le maillage 4x4 est placé régulièrement

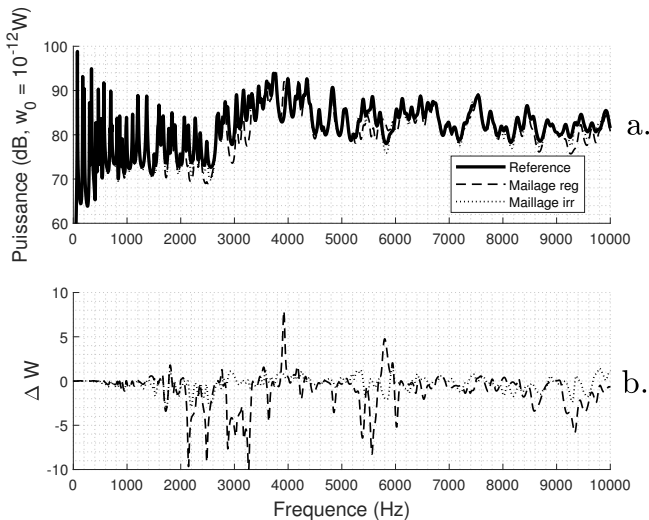


FIGURE 4 – Comparaison de la reconstruction de la puissance par la méthode OTPA dans le cas de 2 maillages : trait tiré maillage régulier, trait pointillé maillage irrégulier, référence en noir ; a. Puissance totale, b. Différence entre la reconstruction et la référence

sur la plaque. Nous pouvons noter que localement la reconstruction a plus de 10dB d'écart par rapport à la référence. Cela peut s'expliquer par le placement des accéléromètres sur la plaque. En effet, sur cette plage de fréquence nous trouvons les fréquences propres de modes ayant 8 demi-longueurs d'onde dans une direction. En particulier, nous pouvons identifier les modes (8,1) à 2142Hz, (8,3) à 2485Hz, (2,8) à 2873 Hz et (4,8) à 3266Hz. Cela implique que la plupart des accéléromètres sont sur un nœud de vibration à ces fréquences. La quantité d'information mesurée est donc très faible, il est difficile d'obtenir une matrice de transmissibilité représentative du système. Néanmoins, hormis ces fréquences difficilement reconstruites, la méthode permet d'obtenir des différences en puissance inférieures à 3dB. Afin d'éviter ces phénomènes nous proposons l'utilisation d'un maillage presque régulier : un léger décalage aléatoire autour du maillage régulier est effectué pour chaque accéléromètre. La courbe pointillée nous permet de constater que cette simple précaution nous a permis d'améliorer le résultat puisque la puissance est maintenant toujours reconstruite avec une différence inférieure à 5dB sur toute la plage de fréquence d'étude. En pratique, le placement des accéléromètres ne peut pas être parfait, les résultats seront plus proches de ceux de ce maillage même si le maillage est supposé être régulier.

Dans la figure 5 nous nous intéressons à la puissance relative à chaque secteur angulaire dans le cas du maillage pseudo-régulier. La directivité est très bien reconstruite avec une différence de moins de 5dB sur toute la gamme de fréquence étudiée, à l'exception localement à 2 000Hz, 5 000Hz et 8 200Hz une différence supérieure à 5dB mais restant inférieure à 10dB. Notons que le maximum de puissance mesuré pour le secteur n°3 est proche de la fréquence critique : il y a une direction privilégiée rasant

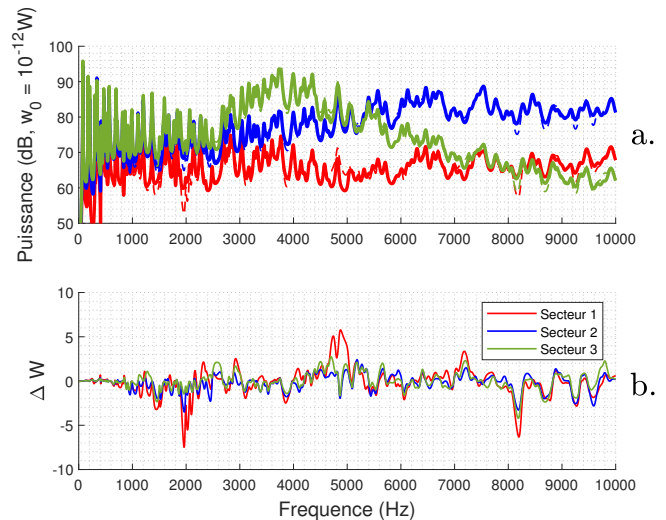


FIGURE 5 – Comparaison de la reconstruction de la puissance par la méthode OTPA pour 3 secteurs angulaires $[0, \pi/6[$, $[\pi/6, \pi/3[$ et $[\pi/3, \pi/2[$, numérotés respectivement de 1 à 3, a. Puissance relative à chaque secteur angulaire, b. Différence entre la référence et la reconstruction

le baffle. Plus la fréquence augmente, plus cette direction privilégiée tend à se rapprocher de la normale à la plaque. Ainsi nous pouvons noter une légère augmentation du niveau de puissance dans le secteur n°2. La plage de fréquence n'est pas suffisante pour observer le phénomène pour le secteur n°1, autour de la normale à la plaque.

La méthode OTPA permet donc de reconstruire la directivité et plus globalement la puissance rayonnée tant que le nombre d'états vibratoires utilisés pour générer la matrice de transmissibilité est suffisant. Des études utilisant moins d'états vibratoires sont en cours.

4.3 DRE

Dans un premier temps, nous déterminons le facteur de rayonnement à partir des mêmes états vibratoires que pour l'OTPA. Nous vérifions figure 6 que la puissance totale est correctement reconstruite. Nous pouvons noter qu'en dessous de la fréquence critique (environ 4 000Hz), la reconstruction a une différence de plus de 5dB par rapport à la référence. En effet, la méthode du facteur de rayonnement est une méthode énergétique. Sous la fréquence critique le facteur de rayonnement peut varier significativement. Au-delà il tend vers 1 quelque soit l'excitation et permet alors de reconstruire au mieux la puissance. La figure 7.a compare la puissance de référence et la reconstruction calculées pour chacun des 3 secteurs angulaires ($[0, \pi/6[$, $[\pi/6, \pi/3[$ et $[\pi/3, \pi/2[$). La figure 7.b est la différence entre la reconstruction et la référence. Nous retrouvons les mêmes tendances que pour la puissance totale, à savoir une reconstruction dégradée en basses fréquences et au-delà de la fréquence critique une différence de moins de 5dB.

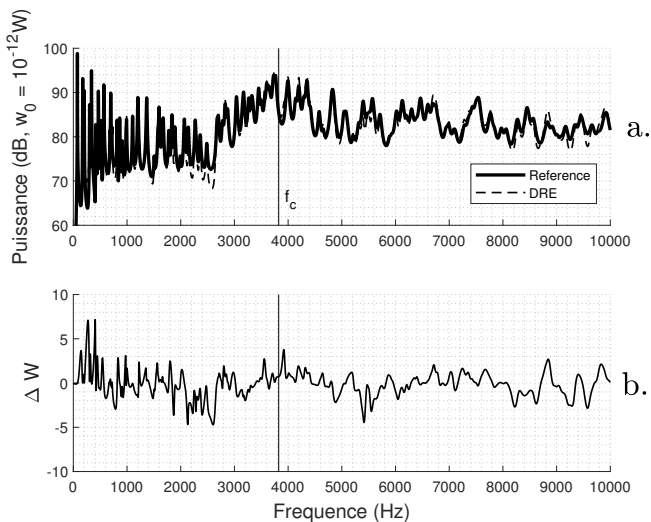


FIGURE 6 – Comparaison de la puissance analytique (trait épais) avec sa reconstruction par le facteur de rayonnement (trait fin), a. Puissance, b. Différence entre la reconstruction et la référence

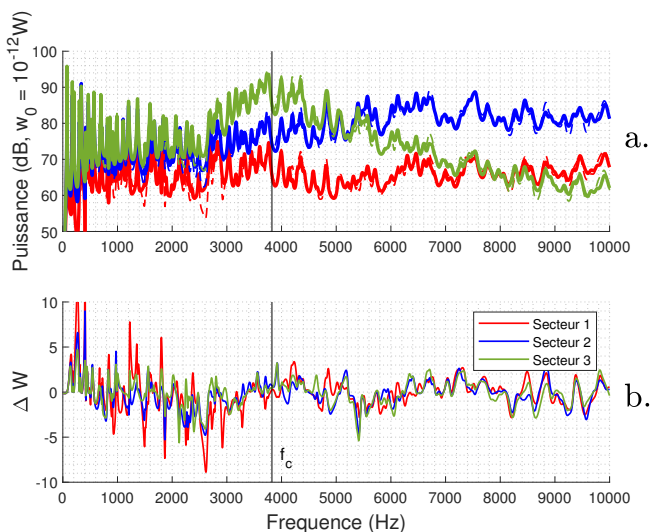


FIGURE 7 – Comparaison de la reconstruction de la puissance par la méthode DRE pour 3 secteurs angulaires $[0, \pi/6]$, $[\pi/6, \pi/3]$ et $[\pi/3, \pi/2]$, numérotés respectivement de 1 à 3, a. Puissance relative à chaque secteur angulaire, b. Différence entre la référence et la reconstruction

5 Conclusion

Trois méthodes d'estimation de la puissance rayonnée à partir de données accélérométriques ont été étudiés sur un cas test académiques. On a pu observer que la méthode de discrétisation de Rayleigh permettait une bonne estimation en dessous de la fréquence de Shannon. L'OTPA permet une très bonne estimation de la puissance rayonnée sur toute la bande de fréquence d'intérêt (quand le maillage de capteurs n'était pas strictement régulier sur ce cas de plaque rectangulaire). On souligne néanmoins que le nombre

d'états vibratoires considérés pour déterminer la matrice de transmissibilité était deux fois supérieur au nombre d'accéléromètres. En pratique, la matrice S_{vv} n'est pas forcément de rang plein. Il est donc nécessaire d'appliquer la méthode avec précaution. Une première approche peut être la Truncated Singular Value Decomposition (TSVD) [9] [10]. L'approche diminue l'effet du bruit et ne conserve que les valeurs propres significatives. Cependant il n'est pas toujours évident de définir le critère sur le nombre de valeurs significatives à conserver. D'autres méthodes de résolution sont envisageables comme par exemple la régularisation de Tikhonov. Ces méthodes feront l'objet d'études plus approfondies, notamment en utilisant des données expérimentales. Enfin, la DRE permet une très bonne estimation au dessus de la fréquence critique alors que des écarts de l'ordre de 5dB ont pu être observés en dessous de celle-ci. Ces premiers résultats obtenus à partir de simulations numériques de champ vibratoire et acoustique vont être détaillés dans un futur proche à partir de mesures en laboratoire.

Références

- [1] J. M. Ginoux, M. Bertinier, La maîtrise de la discrétion acoustique dans un programme de navire. *Acoustique & techniques*, (66), 32-40 (2011)
- [2] M. V. van der Seijs, D. de Klerk, et D. J. Rixen, General framework for transfer path analysis : History, theory and classification of techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 68, 217-244 (2016).
- [3] W. J. Jung, J. J. Lee, M. H. Kang, et J. J. Jeon, A New Extraction Method for the Radiation Efficiency and Radiation Directional Coefficient. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 24(2), 93-101 (2014).
- [4] J. W. S. B. Rayleigh, *The theory of sound*, Macmillan (1896).
- [5] D. De Klerk ; A. Ossipov, Operational transfer path analysis : theory, guidelines and tire noise application. *Mechanical systems and signal processing*, 24(7), 1950-1962.(2010).
- [6] A. Nejade, A prediction method for separating and quantifying noise contributions from casings and other plate like components in complex machines. *Journal of sound and vibration*, 331(23), 5028-5039 (2012).
- [7] P. Gajdatsy, K. Janssens, W. Desmet, et H. Van der Auweraer, Application of the transmissibility concept in transfer path analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(7), 1963-1976 (2010).
- [8] Q. Leclere, N. B. Roozen, et C. Sandier, On the use of the Hs estimator for the experimental assessment of transmissibility matrices. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 43(1-2), 237-245 (2014).
- [9] E. Cardenas Cabada, *L'imagerie acoustique au service de la surveillance et de la détection des défauts mécaniques*, Thèse de doctorat, Lyon (2017).
- [10] W. Cheng, Y. Chu, X. Chen, G. Zhou, D. Blamand, J. Lu, Operational transfer path analysis with crosstalk cancellation using independent component analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 473, 115224 (2020).