

CFA/VISHNO 2016

Utilisation de l'imagerie acoustique pour le diagnostic d'une machine tournante sur banc d'essais

E. Cardenas^a, Q. Leclere^b et N. Hamzaoui^a

^aLVA - Insa de Lyon, 25 bis Av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France

^bLabCom P3A, Bâtiment St. Exupéry 25 bis av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France

edouard.cardenas@insa-lyon.fr



LE MANS

L'imagerie acoustique a de nombreuses applications dans le domaine industriel. La localisation de sources acoustiques est largement utilisée dans l'automobile et l'aéronautique dans le but d'améliorer le confort des passagers. Les méthodes d'imagerie acoustique se sont également révélées efficaces dans le domaine du diagnostic des machines tournantes. Il est courant d'utiliser des accéléromètres pour la surveillance des machines car le diagnostic par analyse vibratoire fait appel à des outils et des indicateurs maîtrisés. Cependant, ce type d'analyse requiert un positionnement stratégique des capteurs qui n'est pas toujours réalisable. De plus, cette approche permet d'analyser les défauts dans les domaines temporel et fréquentiel mais donne peu d'information sur leur localisation spatiale. L'imagerie acoustique peut se défaire de ces contraintes, ce qui lui confère un avantage précieux dans certaines configurations. Elle permet d'avoir une vision globale de la répartition de l'énergie non seulement sur les dimensions temporelle et fréquentielle mais aussi sur la dimension spatiale. L'intérêt de la méthode proposée est de tirer partie des avantages de l'imagerie acoustique précédemment cités en les appliquant au diagnostic des machines tournantes. Le but de notre étude est de visualiser des indicateurs utilisés en diagnostic (analyse d'enveloppe, kurtosis, facteur crête, etc...) plutôt que la pression rayonnée par la machine qui ne permet pas toujours de conclure sur la présence d'un défaut. L'étude présentée propose de tester expérimentalement cette approche à l'aide d'un banc d'essais sur lequel des défauts d'engrenage sont introduits.

1 Introduction

Les méthodes d'imagerie acoustiques se sont largement développées durant les dernières décennies. Les avancées technologiques ont permis d'augmenter considérablement la puissance de calcul disponible et d'obtenir des systèmes d'acquisition plus performants. Ces méthodes ont pour but principal de localiser les sources acoustiques en fonction de l'espace et des fréquences. La complexité géométrique du système identifié influencera directement la forme de l'antenne acoustique ainsi que la méthode d'imagerie utilisée. La forme, la taille, le nombre de microphones et leur espacement sont des paramètres de l'antenne qui déterminent la résolution spatiale et fréquentielle des résultats. La méthode d'imagerie devra également être choisie avec attention. En effet, bien que le problème acoustique à résoudre soit le même, les techniques de résolution sont propres à chaque méthode.

1.1 Généralités

Le problème classiquement posé en imagerie acoustique est indépendant de la méthode choisie. Une antenne de microphones est utilisée pour mesurer le champ acoustique rayonné par une surface S . La figure 1 représente le cas où les surfaces de mesures et d'identification sont planes et espacées d'une distance d . Les pressions acoustiques mesurées en fonction de la fréquence forment un vecteur complexe \mathbf{p} de dimension $m \times 1$. La surface d'identification est généralement discrétisée en agencement de sources élémentaires représentées par un vecteur complexe \mathbf{q} de dimension $n \times 1$. Le modèle acoustique choisi servira à décrire mathématiquement le comportement des sources élémentaires et par conséquent à définir la matrice des fonctions de transfert acoustiques \mathbf{H} de dimension $m \times n$. On peut alors décrire les pressions mesurées par l'équation

$$\mathbf{p} = \mathbf{H}\mathbf{q} \quad (1)$$

Certaines méthodes d'imagerie acoustique se basent sur la pseudo-inversion du problème direct (1). C'est le cas de la méthode des sources équivalentes [4]. La résolution nécessite une étape de régularisation du problème sur-déterminé ($n < m$) à cause du mauvais conditionnement de la matrice à inverser. Ce processus peut être critique quant à la fiabilité des résultats car il repose sur un paramètre de régularisation difficile à estimer. Il existe

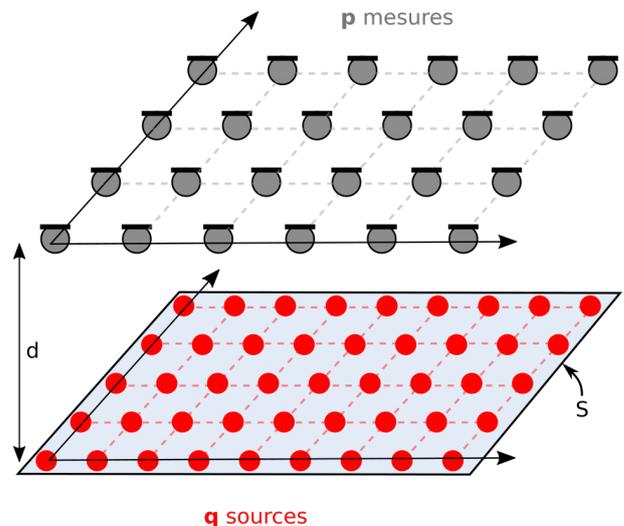


FIGURE 1 – Schéma du problème acoustique considéré

différentes techniques de régularisation qui ont été largement étudiées dans la littérature même dans le cas de problème sous-déterminé ($n > m$) [6, 7, 5].

L'holographie acoustique de champ proche [3] est une autre méthode d'imagerie acoustique qui se base sur la décomposition du champ acoustique mesuré dans l'espace des nombres d'onde avant sa rétro-propagation sur le plan d'identification. Cette méthode souffre également du mauvais conditionnement du problème et par conséquent nécessite une régularisation.

Le beamforming [1, 2], qui est une des premières techniques d'imagerie acoustique développée, utilise un algorithme basé sur le "delay and sum". Cette technique, aussi connue sous le nom de "téléscope acoustique" permet de focaliser numériquement l'antenne dans la direction d'une source. Ainsi, chaque source est identifiée indépendamment des autres. Contrairement aux méthodes précédemment citées, le beamforming n'a pas de limite intrinsèque sur la résolution spatiale affichée : des itérations permettent de balayer une zone d'identification aussi finement que souhaité. De plus, les calculs peuvent directement être effectués dans le domaine temporel et ne nécessitent pas de régularisation. Pour ces raisons, cette méthode est utilisée par la suite.

1.2 Beamforming

Comme indiqué précédemment, la méthode de résolution consiste à focaliser l'antenne sur une source à la fois. Cela revient à écrire le problème (1) de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{1j} \\ \vdots \\ H_{mj} \end{pmatrix} q_j \quad (2)$$

en considérant que l'antenne est focalisée dans la direction de la source q_j . La définition des fonctions de transferts dépend du modèle de source choisi. Ici, le modèle monopolaire de Green est utilisé

$$H_{ij} = j\rho\omega \frac{e^{-jkr_{ij}}}{4\pi r_{ij}} \quad (3)$$

avec r_{ij} la distance entre le point de mesure i et la source j . La résolution du problème par la méthode des moindres carrés donne

$$q_j = w_j \sum_{i=1}^m p_i \frac{e^{jkr_{ij}}}{r_{ij}} \quad (4)$$

$$w_j = \frac{4\pi}{j\rho\omega} \left(\sum_{i=1}^l \left(\frac{1}{r_{ij}} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Effectuer ce calcul pour chaque fréquence et pour chaque source permettra de caractériser entièrement la surface d'identification. Par la suite, les signaux temporels $q_j(t)$ seront requis afin d'appliquer les indicateurs de diagnostic. Une transformée de Fourier inverse est utilisée pour les obtenir.

2 Diagnostic des machines tournantes

Le diagnostic des machines tournantes a pour objectif d'identifier un défaut qui a été détecté dans la phase de surveillance du mécanisme. Il fait appel à des indicateurs mathématiques dont le but est de mettre en évidence l'élément de la machine qui est en défaut. Ces indicateurs sont classiquement appliqués aux signaux mesurés en des points spécifiques de la machine par des accéléromètres.

2.1 L'analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est communément utilisée en diagnostic des machines tournantes pour détecter des défauts [11]. En pratique, elle est effectuée dans une bande de fréquence pour laquelle le rapport signal à bruit est grand. L'étude des harmoniques du spectre d'enveloppe permet de détecter des modulations prédominantes qui peuvent être associées à un défaut de roulement ou d'engrenage. Ici, seule la modulation d'amplitude nous intéresse. Pour l'obtenir, l'algorithme décrit dans la figure 2 est utilisé.

2.2 Le kurtosis

Le kurtosis est un indicateur scalaire qui permet de mesurer l'impulsivité d'un signal. Un signal dont la distribution de l'amplitude est gaussienne aura un kurtosis proche de 3 tandis qu'un signal possédant des impulsions

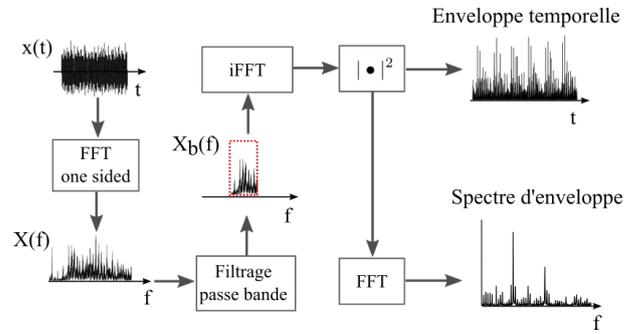


FIGURE 2 – Calcul du spectre d'enveloppe

aura un kurtosis plus élevé. L'équation (9) permet de calculer le kurtosis pour un signal temporel.

$$\kappa_y = \frac{\langle |y(t) - \mu_y|^4 \rangle}{\sigma_y^4} \quad (6)$$

$y(t)$ étant un signal temporel de moyenne μ_y et de variance σ_y^2

Certains éléments de machine comme les roulements ou les engrenages génèrent des signaux impulsifs à l'apparition d'un défaut [8, 10]. Ainsi, le kurtosis est un indicateur permettant de détecter la présence de défauts sur ce type d'élément. Il peut également servir d'outil pour extraire la partie du signal contenant le défaut. Le kurtosis spectral permet de détecter les bandes de fréquences dans lesquelles l'impulsivité est importante [9]. Il peut servir à établir un filtre de Wiener de manière à maximiser le kurtosis du signal de sortie. Dans cette étude, seule le kurtosis scalaire est utilisé.

2.3 Imagerie acoustique appliquée au diagnostic

Le but de cette étude est de combiner l'imagerie acoustique avec des outils de diagnostic des machines tournantes. Certaines études ont démontré que l'imagerie acoustique peut être une approche efficace pour localiser et détecter des défauts [12, 13]. Le beamforming permet d'obtenir les signaux temporels reconstruits à la surface de la machine. Les indicateurs précédemment cités peuvent ensuite être appliqués à ces signaux (figure 3). Les cartographies obtenues décrivent l'évolution de l'indicateur en fonction de l'espace.

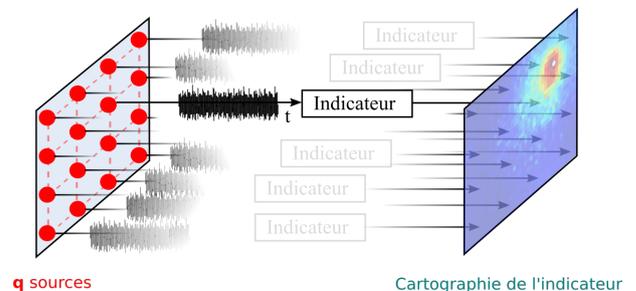


FIGURE 3 – Visualisation des indicateurs de diagnostic grâce au beamforming

3 Mesures sur banc d'essais

3.1 Protocole expérimental

Le système étudié est un banc d'engrenages à simulation de défauts (figure 4). Un moteur asynchrone (1) entraîne en rotation un arbre primaire sur lequel une roue dentée (2) est fixée. Cette dernière entraîne le pignon sain (3) sur l'arbre secondaire. Un frein électromagnétique (5) permet d'appliquer un couple résistant. La roue (2) peut être translattée sur l'arbre de manière à engrener avec le pignon défectueux (4) qui a une dent manquante. Ainsi, une configuration avec ou sans défaut d'engrenage peut-être choisie. De plus, un variateur permet de régler la vitesse de rotation de l'arbre primaire ainsi que le couple résistant.

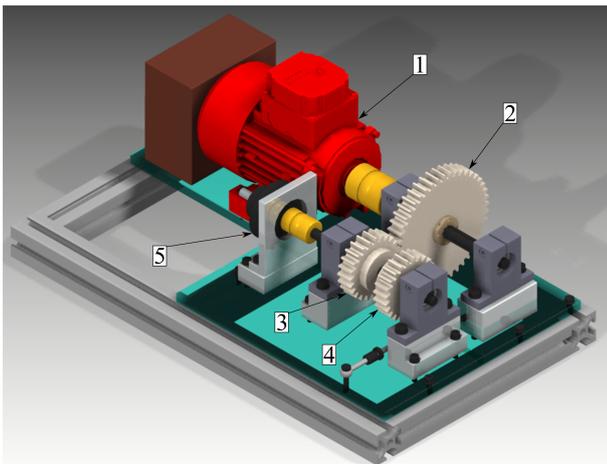


FIGURE 4 – Modèle CAO du banc d'essais

Une antenne acoustique plane rectangulaire composée de 5x6 microphones est placée en face du banc, parallèlement au support (figure 5). Les microphones sont espacés de 10 cm. Des acquisitions temporelles échantillonnées à 51.2 kHz sont effectuées pour les deux configurations : avec et sans défaut d'engrenage. Les résultats obtenus avec le pignon sain serviront d'état de référence. Dans les deux configurations le rapport de réduction est identique et égal à 1.875. Le plan de focalisation est situé à une distance $d = 8$ cm de l'antenne et le pas spatial choisi pour les cartographies est de 1 cm dans les deux directions. Les éléments du banc à engrenages sont schématisés en vue de dessus sur les cartographies.

3.2 Résultats

En imagerie acoustique, il est commun d'analyser les cartographies des pressions rayonnées pour une certaine bande de fréquence. Cela permet d'estimer les zones dans lesquelles l'énergie acoustique est importante. La figure 6 montre la variance des signaux identifiés par le beamforming. Cet indicateur est proportionnel à l'énergie des signaux reconstruits. La comparaison des cartographies montre une coïncidence de la zone à forte variance pour les deux états. De plus, les maximums de variance ne sont pas significativement différents. Ce résultat laisse entendre que la visualisation de la variance, et par conséquent de la pression rayonnée, n'est pas un indicateur fiable pour conclure sur la localisation d'un défaut.

Le premier outil d'analyse des défauts combiné avec l'imagerie acoustique est le spectre d'enveloppe. Il est

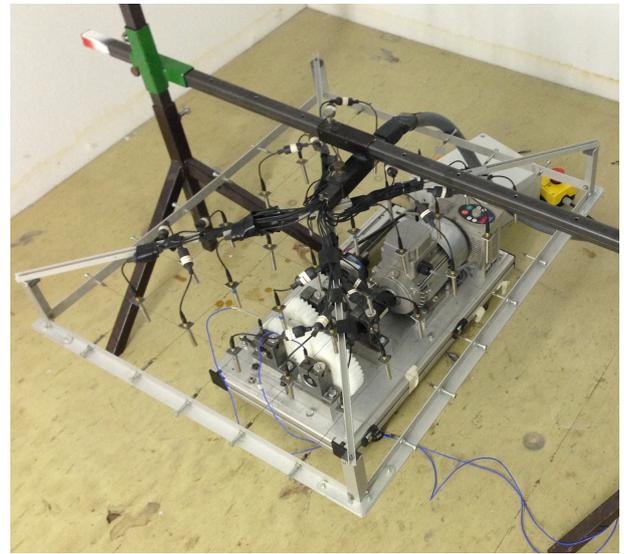


FIGURE 5 – Dispositif expérimental

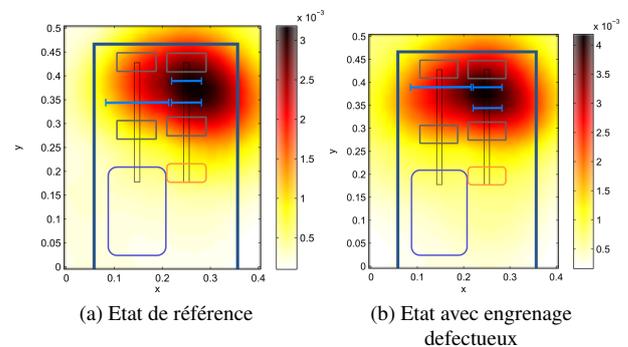


FIGURE 6 – Cartographies de la variance

important de noter que la visualisation spatiale du spectre d'enveloppe n'est possible qu'à une fréquence donnée. Les grandeurs apparaissant sur les cartographies correspondent donc à l'amplitude du spectre d'enveloppe à la fréquence sélectionnée. Dans cette étude, les spectres d'enveloppe sont calculés entre 50 et 10000 Hz.

Le défaut présent étant un défaut de dent d'engrenage, il est judicieux d'étudier le spectre d'enveloppe à la fréquence du défaut. Ici, cette fréquence est égale à la fréquence de rotation de l'arbre secondaire puisque la dent cassée est sur le pignon. Pour augmenter les chances de réussite du diagnostic, les cartographies sont moyennées sur les harmoniques de la fréquence du défaut. Ainsi, la valeur affichée au point j est calculée de cette façon

$$S_j(f_d) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_j(kf_d) \quad (7)$$

avec S_j le spectre d'enveloppe de la source q_j , f_d la fréquence du défaut et N la dernière harmonique prise en compte dans le moyennage. En pratique, les 60 premières harmoniques sont retenues car les suivantes ont une amplitude négligeable.

De plus, la question de la normalisation de ces spectres se pose. En effet, les amplitudes sont proportionnelles à l'énergie du signal. Les zones à plus forte énergie rayonnée seront donc privilégiées. Les cartographies de la figure 7 montrent l'amplitude du spectre d'enveloppe non normalisé pour la fréquence du défaut et ses harmoniques. Ces

cartographies apportent les mêmes conclusions que celles de la variance présentées précédemment. La localisation des zones à forte énergie est mise en avant et est coïncidente spatialement dans les deux états. Bien que les niveaux soient plus importants pour l'engrenage défectueux, il est difficile de tirer une conclusion de ces résultats.

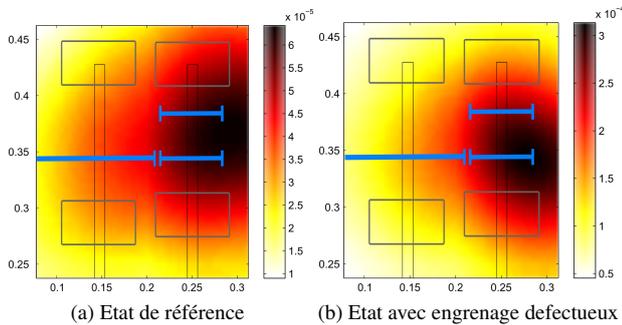


FIGURE 7 – Spectres d'enveloppe moyennés sur les harmoniques du défaut

Un moyen de se défaire de ce problème est de normaliser chaque spectre d'enveloppe par l'énergie moyenne du signal, c'est à dire par l'amplitude de sa composante à la fréquence nulle. Cela permettra d'afficher la profondeur de modulation à une fréquence donnée sans tenir compte de la pondération par l'énergie des signaux. La normalisation suivante est appliquée pour chaque point j en amont de l'équation (7)

$$S_j(f) = \frac{S_j(f)}{S_j(0)} \quad (8)$$

La figure 8 montre les cartographies du spectre d'enveloppe normalisées par cette méthode. Cette fois-ci, les zones identifiées avec une forte amplitude de modulation sont différentes. L'état sain, qui sert de référence, montre que la zone avec une forte modulation à la fréquence de rotation du pignon est localisée autour du palier supérieur de l'arbre primaire. En revanche, l'état défectueux localise le maximum autour de la position du pignon avec la dent manquante. Dans ce cas, la répartition spatiale de l'indicateur ainsi que son amplitude maximale diffèrent entre l'état de référence et l'état défectueux. Ces résultats montrent l'intérêt de visualiser les modulations d'amplitude à une fréquence donnée en fonction de l'espace pour localiser un défaut.

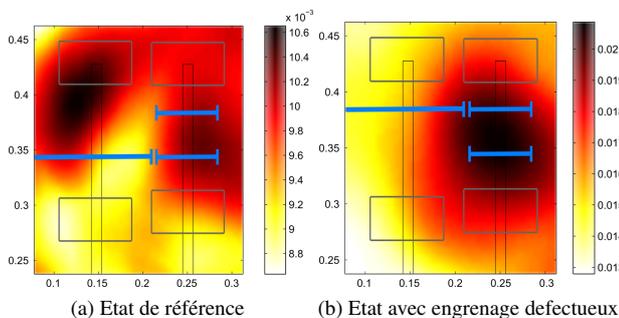


FIGURE 8 – Spectres d'enveloppe normalisés et moyennés sur les harmoniques du défaut

Dans un deuxième temps, le kurtosis des signaux reconstruits est calculé. La figure 9 montre la répartition du

kurtosis en fonction de l'espace pour les deux configurations. Pour cet indicateur, les cartographies du cas sain et avec défaut diffèrent. Comme pour la cartographie de référence de l'analyse d'enveloppe, le kurtosis est important autour du palier supérieur de l'arbre primaire. La coïncidence de ces deux résultats nous laisse penser qu'il y a un dysfonctionnement de ce palier pour l'état de référence. Cependant ce défaut potentiel n'est pas l'objet de l'étude et ne sera pas traité. La cartographie de l'état défectueux montre une concentration du kurtosis autour de l'engrènement entre la roue et le pignon. La localisation spatiale est accrue par rapport aux résultats du spectre d'enveloppe. Il est intéressant de noter que la localisation spatiale du défaut est ici très fine. De plus, les valeurs maximales du kurtosis sont significativement différentes entre les deux configurations : $\kappa_y = 7$ pour l'état sain et $\kappa_y = 11$ pour l'état défectueux. Ainsi la visualisation du kurtosis permet non seulement de détecter la présence d'un défaut grâce à son niveau mais en plus de le localiser dans l'espace et d'en déduire la position de l'élément défaillant.

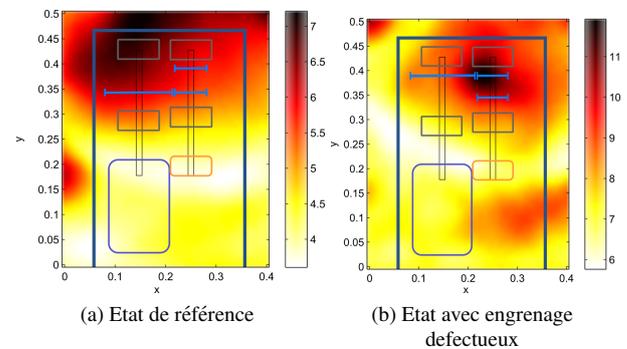


FIGURE 9 – Cartographies du kurtosis

4 Conclusion

L'étude présentée dans cet article a pour but de montrer le potentiel de l'imagerie acoustique appliquée au diagnostic des machines tournantes. Les indicateurs de diagnostic sont classiquement appliqués à des signaux enregistrés par des accéléromètres placés en certains points de la machine. L'information spatiale de cette approche est par conséquent limitée en ces points de mesures. Le beamforming quant à lui permet de reconstruire les signaux rayonnés par une surface de la machine. L'information spatiale est alors augmentée puisque chaque point de reconstruction peut être vu comme le signal enregistré par un accéléromètre en cette position affecté de l'erreur de modèle. Les indicateurs de diagnostic peuvent ensuite être appliqués à ces signaux. Les mesures effectuées sur le banc d'essais ont permis de montrer le potentiel du kurtosis et du spectre d'enveloppe pour la localisation des défauts. Ici, l'état sain a été utilisé comme état de référence pour comparer les cartographies obtenues avec l'engrenage défectueux. La comparaison de ces résultats ont permis de mettre en évidence une différence de la répartition spatiale des indicateurs ainsi que de leur niveau maximal. Ces résultats sont encourageants et montrent le potentiel de la combinaison de l'imagerie acoustique avec des indicateurs de diagnostic.

5 Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Labex CeLya de l'Université de Lyon, géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-10-LABX-0060/ ANR-11-IDEX-0007).

Références

- [1] J. Billingsley et R. Kinns, The acoustic telescope, *Journal of Sound and Vibration* **48(4)**, 485-510 (1976).
- [2] J.J. Christensen et J. Hald, Beamforming, *Briuel & Kjaer Technical Review* **No 1**, 1-18 (2004).
- [3] J. D. Maynard, E.G. Williams et Y. Lee, Nearfield Acoustic Holography : I. theory of generalized holography and the development of NAH, *Journal of the Acoustic society of America* **78(4)**, 1395-1413 (1985).
- [4] P. A. Nelson et S.-H. Yoon, Estimation of acoustic source strength by inverse methods : Part I, Conditioning of the inverse problem, *Journal of Sound and Vibration* **233(4)**, 639-664 (2000).
- [5] Y. Kim et P.A. Nelson, Optimal regularisation for acoustic source reconstruction by inverse methods, *Journal of Sound and Vibration* **275(3)**, 463-487 (2004).
- [6] Q. Leclere, Acoustic imaging using under-determined inverse approaches : Frequency limitations and optimal regularization, *Journal of Sound and Vibration* **321(3)**, 605-619 (2009).
- [7] A. Pereira, J. Antoni et Q. Leclere, Empirical Bayesian regularization of the inverse acoustic problem, *Applied Acoustics* **97**, 11-29 (2015).
- [8] S. Braun, Mechanical Signature Analysis : Theory and Applications, *Academic Press, New York* , 180-196 (1986).
- [9] J. Antoni et R.B. Randall, The spectral kurtosis : application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines, *Mechanical Systems and Signal Processing* **20(2)**, 308-331 (2006).
- [10] R.B. Randall et J. Antoni, Rolling element bearing diagnostics- a tutorial, *Mechanical Systems and Signal Processing* **25(2)**, 485-520 (2011).
- [11] D. Ho et R.B. Randall, Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals, *Mechanical Systems and Signal Processing* **15(5)**, 763-788 (2000).
- [12] P. Coutable, J.-H. Thomas, J.-C Pascal and F. Eveillau, Bearing fault detection based on Near-field Acoustic Holography, *Proceedings of Surveillance 6* (2011).
- [13] Y.-C Choi et Y.-H Kim , Near field impulsive source localization in a noisy environment, *Journal of Sound and Vibration* **303(1)**, 209-220 (2007).