HAL
open science

Effet des incertitudes de mesure des vitesses vibratoires sur la localisation des sources mécaniques et acoustiques

Mohamed Cherif Djamaa, Nouredine Ouelaa, Charles Pezerat, Jean-Louis Guyader

To cite this version:

Mohamed Cherif Djamaa, Nouredine Ouelaa, Charles Pezerat, Jean-Louis Guyader. Effet des incertitudes de mesure des vitesses vibratoires sur la localisation des sources mécaniques et acoustiques. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00539659

HAL Id: hal-00539659

https://hal.science/hal-00539659v1

Submitted on 24 Nov 2010

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.

10ème Congrès Français d'Acoustique
Lyon, 12-16 Avril 2010

Effet des incertitudes de mesure des vitesses vibratoires sur la localisation des sources mécaniques et acoustiques

Mohamed Cherif Djamaa[1], Nouredine Ouelaa[1], Charles Pezerat[2], Jean Louis Guyader[3]

[1]Laboratoire de Mécanique & Structures, Université du 8 mai 45, BP.401, 24000 Guelma, Algérie, {mc_djamaa, n_ouelaa}@yahoo.fr
[2]Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen, 72085 LE MANS Cedex9, charles.pezerat@univ-lemans.fr
[3]Laboratoire de Vibrations & Acoustique, INSA de Lyon, 25 bis avenue Jean Capelle, F-69621 Villeurbanne Cedex, guyader@lva.insa-lyon.fr

Ce travail présente une procédure expérimentale pour la localisation des sources appliquées sur une coque cylindrique finie. La méthode proposée est basée sur la mesure des vitesses (déplacements) de structure vibrante par un vibromètre Laser à balayage qui seront injectés dans l'équation de mouvement discritisée en différences finies. Nous allons présenter au départ quelques simulations numériques pour régulariser le problème inverse en se servant des techniques de traitement de signal en particulier le filtrage dans le domaine du nombre d'ondes. Les distributions résultantes des vitesses mesurées, dans toute la bande de fréquence choisie, ne permettent plus de localiser les sources d'excitation mécanique et acoustique car les incertitudes associées à la mesure sont trop importantes. Enfin, nous allons appliquer les critères de régularisation prédéfinis pour filtrer les différents résultats des distributions issues des données mesurées et là les résultats se sont nettement améliorés.

1 Introduction

La recherche des sources d'excitation et des défauts dans les structures mécaniques est un axe récent d'intérêt scientifique fort, développé pour mener une maintenance préventive. La localisation directe des excitations (mécaniques, thermiques, fissures, sources acoustiques, sauts de pressions etc.), appliquées sur une structure vibrante, est extrêmement difficile voir impossible à réaliser en raison de l'inaccessibilité à la source ou l'ignorance de son point d'application. Suite aux limites de cette procédure, les méthodes dites indirectes ou inverses pour la localisation des sources de vibration et de bruit par leurs effets (accélérations, vitesses, déplacements, pressions acoustiques) est souvent le seul moyen permettant de faire un bon diagnostic. La difficulté rencontrée est que la solution est souvent instable suite à la présence des incertitudes dans les données expérimentales qui sont les entrées du problème inverse [1].

Les premières applications des méthodes inverses en vibroacoustique concernent l'holographie acoustique en champs proche (NAH), introduite par Williams *et al.* [2] et par Maynard *et al.* [3], consiste à rétropropager le champ acoustique mesuré sur un hologramme afin de remonter à la source acoustique par calcul de la pression pariétale d'une structure ou de sa vitesse vibratoire. Véroniesi *et al.* [4] introduisent une régularisation par filtrage pour limiter la transformée de Fourier spatiale obtenue dans un domaine stable. Layou *et al.* [5] proposent une méthode utilisant une antenne vibratoire sans contact à base de vibromètre Laser pour la mesure de la déformée vibratoire d'une structure plane. Autre technique basée sur l'intensité structurale a été utilisé pour la localisation des sources dans des structures vibrantes en analysant le chemin parcouru par l'énergie vibratoire à partir du flux de puissance se propageant dans la structure. Zhang *et al.* [6 et 7] comparent deux formulations de l'intensité structurale en introduisant des termes relatifs au cisaillement et à l'inertie rotationnelle. Le calcul de l'intensité et de la distribution de force à partir des données mesurées sur une plaque s'effectue après l'application d'un fenêtrage suivi d'un filtrage dans le domaine des nombres d'onde.

Pezerat *et al.* [8, 9 et 10] proposent la méthode RIFF pour localiser des efforts appliqués sur des poutres et des plaques à partir des déplacements et de l'équation du mouvement discrétisée par un schéma aux différences finies. La présence de bruit dans les données mesurées, amplifié par les dérivées d'ordre quatre, conduit au mauvais conditionnement du problème inverse. La régularisation consiste, donc, à filtrer les nombres d'ondes élevés qui sont affectés par le bruit.

De Araújo *et al.* [11] et Antunes *et al.* [12] proposent une méthode expérimentale pour identifier des forces d'impact à partir des mesures espacées de la réponse vibratoire d'une poutre puis ils régularisent le problème par une technique de traitement du signal qui rend possible la séparation des ondes réflectives de celles directes en utilisant l'information fournie par un nombre limité d'accéléromètres.

Les travaux de recherche qui visent l'identification et la localisation des sources dans le cas des coques cylindriques par des méthodes indirectes sont, à notre connaissance, très peu nombreux comparativement à ceux qui ont été faits sur des poutres et des plaques. Dans la référence [13], l'auteur emploie l'intensité vibratoire d'une coque cylindrique pour localiser des sources. Une étude préliminaire initié par Ouelâa *et al.* [14] avait pour objectif la localisation des sources agissant sur une coque cylindrique finie en présence d'un fluide extérieur au repos et intérieur en mouvement uniforme. L'idée s'est basée sur l'utilisation de la méthode des moindres carrés pour recalculer les amplitudes modales à partir des vitesses pariétales de la coque issues du problème direct. Djamaa *et al.* [15] font une extension de la méthode RIFF aux coques cylindriques où ils montrent que la localisation des sources mécaniques est possible en dessous de la fréquence d'anneau sans négliger aucun terme de l'opérateur de la coque et au-dessus de cette fréquence uniquement à partir des déplacements radiaux.

2 Formulation du problème inverse

L'équation de mouvement d'une coque cylindrique finie dans le vide, excitée avec une source mécanique ou acoustique selon le rayon de la coque a est donnée sous la forme développée suivante :

$$\frac{Eh}{1-\nu^2}\left(-(\frac{\nu}{a}\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{1}{a^2}\frac{\partial v}{\partial \theta}+\frac{w}{a^2})+\frac{h^2}{12}\nabla^4 w\right)+\rho h\omega^2 w=-F \quad (1)$$

$$\nabla^4=\frac{\partial^4}{\partial z^4}+\frac{2}{a^2}\frac{\partial^4}{\partial z^2\partial\theta^2}+\frac{1}{a^4}\frac{\partial^4}{\partial\theta^4} \quad (2)$$

Où : E est le module de Young, ν est le coefficient de Poisson, ρ est la masse volumique, h est l'épaisseur de la coque, (u, v et w) sont les déplacements, ω la pulsation d'excitation et F l'effort d'excitation.

La méthode proposée permet l'approximation des dérivées spatiales du déplacement radial de l'équation (1) par un schéma aux différences finies centré au point d'indice (i,j) de la manière suivante :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial z^4}\Leftrightarrow\frac{1}{\Delta_z^4}\left(w_{i+2,j}-4w_{i+1,j}+6w_{i,j}-4w_{i-1,j}+w_{i-2,j}\right)$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4}\Leftrightarrow\frac{1}{\Delta_\theta^4}\left(w_{i,j+2}-4w_{i,j+1}+6w_{i,j}-4w_{i,j-1}+w_{i,j-2}\right)$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial z^2\partial\theta^2}\Leftrightarrow\frac{1}{\Delta_z^2}\frac{1}{\Delta_\theta^2}\begin{pmatrix}w_{i+1,j+1}-2w_{i+1,j}+w_{i+1,j-1}-2w_{ij+1}+4w_{i,j}\\-2w_{i,j-1}+w_{i-1,j+1}-2w_{i-1,j}+w_{i-1,j-1}\end{pmatrix} \quad (3)$$

Δ_z et Δ_θ représentent la distance entre deux points consécutifs, respectivement le long de la direction longitudinale et circonférentielle.

En substituant (3) dans l'équation (1) et en introduisant l'amortissement structurale, la distribution de force peut être calculée par l'expression suivante :

$$F_{ij}=\frac{E(1+j\eta)h}{1-\nu^2}\left(\frac{\nu}{a}\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{1}{a^2}\frac{\partial v}{\partial\theta}+\frac{w_{ij}}{a^2}-\frac{h^2}{12}(\delta_{ij}^{4(z)}+\frac{2}{a^2}\delta_{ij}^{4(z,\theta)}+\frac{1}{a^4}\delta_{ij}^{4(\theta)})\right)-\rho h\omega^2 w_{ij} \quad (4)$$

La présence des déformations $\partial u/\partial z$ et $\partial v/\partial\theta$ dans l'équation (1) pose un sérieux problème car ces quantités doivent être mesurées dans tous les points du maillage, ce qui rend difficile la réalisation de la procédure expérimentale. Une des propositions est de négliger ces termes. Cette supposition est s'avère vrai au dessus de la fréquence d'anneau de la coque, mais en dessous de cette fréquence, il est impératif de mesurer ces déformations ou leurs déplacements équivalents [16]. Dans ce cas, la distribution de force ne dépend que des déplacements radiaux.

$$F_{ij}=\frac{E(1+j\eta)h}{1-\nu^2}\left(\frac{w_{ij}}{a^2}-\frac{h^2}{12}(\delta_{ij}^{4(z)}+\frac{2}{a^2}\delta_{ij}^{4(z,\theta)}+\frac{1}{a^4}\delta_{ij}^{4(\theta)})\right)-\rho h\omega^2 w_{ij} \quad (5)$$

3 Simulations numériques

Les simulations numériques ont été réalisées avec des déplacements calculés par la méthode modale dont le nombre de modes doit être suffisamment grand pour assurer la convergence. Le maillage joue un rôle très important car l'ensemble des recommandations préconise qu'un maillage de six éléments par longueur d'onde est largement suffisant pour présenter des résultats corrects. Pour une coque en acier (E=2.058 $10^{11}N/m^2$, ν=0.29, ρ=7850kg/m^3), de 3mm d'épaisseur et pour une fréquence d'analyse maximale de 4000Hz, la longueur d'onde de flexion λ_f =0.213m et par conséquent, le pas de maillage dans les deux directions doit être inférieur à $\lambda_f/6$ = 0.0355m.

3.1 Simulations avec des données exactes

La distribution de force sur une partie de la surface de la coque qui couvre une longueur de 0.6m par un angle de 90°. Nous avons choisi deux domaines fréquentiels en dessous et en dessus de la fréquence d'anneau, estimée à 2128Hz.

Sur la figure 1 et 2, on présente la distribution de force, calculée par l'équation (4) et par (5) respectivement, lorsque la coque est excitée à 160Hz.

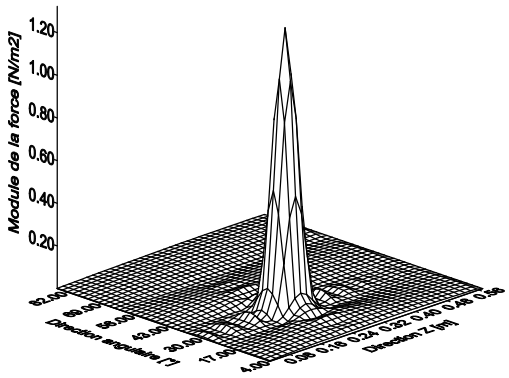

Fig. 1 Distribution de la force reconstruite à 160Hz à partir des déplacements exactes (équation 4)

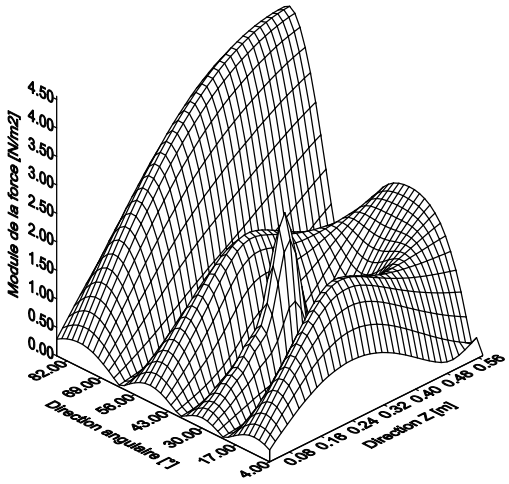

Fig. 2 Distribution de la force reconstruite à 160Hz à partir des déplacements exactes (équation 5)

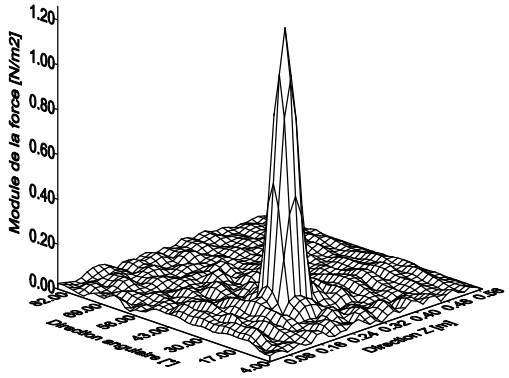

Fig. 3 Distribution de la force reconstruite à 4000Hz à partir des déplacements exactes (équation 5)

Dans le premier cas, un pic apparaît à la position exacte où la force est appliquée. Par contre, dans le second cas, la distribution de force présente une très grande distorsion. Ce qui s'explique par un couplage de plus en plus fort entre le mouvement radial et celui longitudinal lorsque la fréquence décroît et le fait de négliger les déformations conduit forcément à des fausses distributions ne pouvant pas aboutir à localiser des efforts sources. A 4000Hz, en se servant de l'équation (5), la force apparaît à la bonne position.

3.2 Simulations avec des données bruitées

Pour simuler des déplacements entachés d'incertitudes, (déplacements mesurés), nous avons procédé au bruitage volontaire des déplacements exacts.

$$w_{ij}^{bruité} = w_{ij}^{exact}(\Delta_w + e^{j\Delta_\varphi}) \qquad (6)$$

Δ_w et Δ_φ sont deux différents nombres réels arbitraires.

La figure 4 présente le résultat de calcul de la distribution de force à 160Hz à partir des déplacements bruités.

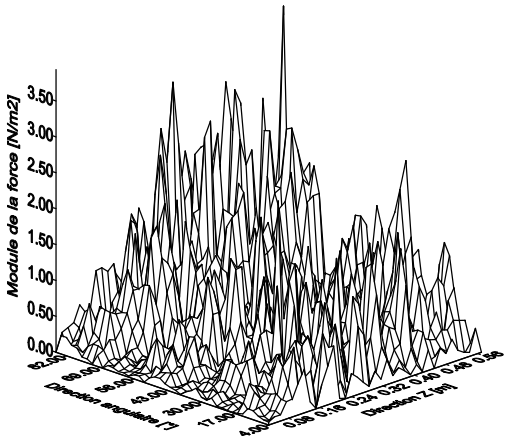

Fig. 4 Distribution de force reconstruite à 160Hz à partir des déplacements bruités à 1% en module

3.3 Procédure de régularisation

La technique de régularisation est basée sur le filtrage de la distribution de force issue des déplacements bruités en utilisant un filtre passe-bas idéal pour supprimer les composantes affectées par le bruit. Sa fonction de transfert est une fonction porte, centrée à l'origine et limitée par son nombre d'onde de coupure ($k_c = 2\pi/\lambda_c$) [17]. Le nombre d'onde de coupure k_c est défini de sorte que les informations gardées sont celles où les distributions de force bruitée et exacte coïncident.

La réponse spatiale bidimensionnelle des deux filtres est définie comme le produit de deux sinus cardinaux résultant du produit de la transformée de Fourier inverse le long des deux directions.

$$h(z,\theta) = \frac{1}{4\pi^2}\int_{-k_{cz}}^{+k_{cz}}\int_{-k_{c\theta}}^{+k_{c\theta}} \hat{h}(k_z)\hat{h}(k_\theta)e^{jk_z z}e^{jk_\theta a\theta}dk_z dk_\theta \qquad (8)$$

$$= \frac{\sin(k_{cz}z)\sin(k_{c\theta}a\theta)}{\pi^2 z a\theta}$$

Le filtrage consiste, donc, à faire un produit de convolution de la distribution de force calculée à partir des déplacements bruités avec la réponse spatiale du filtre.

$$F_{ij}^{Fl} = a\Delta_\theta\Delta_z \sum_{k=0}^{N_z-2}\sum_{l=0}^{N_\theta-2} F_{kl}^{br} h((i-k)\Delta_z, (j-l)a\Delta_\theta) \qquad (9)$$

Cherchons maintenant le domaine du nombre d'onde le plus affecté par le bruit en traçant la transformée de Fourier bidimensionnelle spatiale de la distribution de force telle qu'elle est régie par l'équation 11.

$$\hat{F}(k_m, k_n) = a\Delta_\theta\Delta_z \sum_{i=0}^{N_\theta-2}\sum_{k=0}^{N_z-2} F_{ik} e^{-j\frac{2ni}{N_\theta}} e^{-j\frac{2\pi mk}{N_z}} \qquad (10)$$

Avec $k_m = \frac{m\pi}{l}$ et $k_n = \frac{n}{a}$

La figure 5 illustre la transformée de Fourier de la distribution de force calculée à partir des données bruitées en excitant la coque à 160Hz.

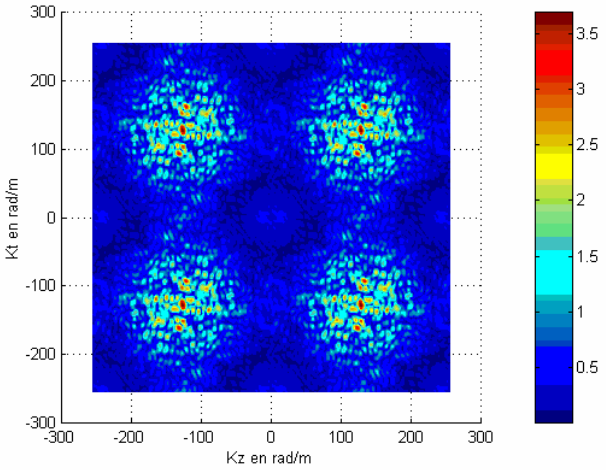

Fig. 5 Transformée de Fourier bidimensionnelle spatiale de la distribution de force (celle de la figure 4)

On remarque que le bruit se situe dans le domaine des nombres d'onde élevés et c'est eux qui posent problème lors de la reconstruction des sources.

Nous présentons sur la figure 6, le résultat du filtrage de la distribution de force bruitée représentée par la figure 4.

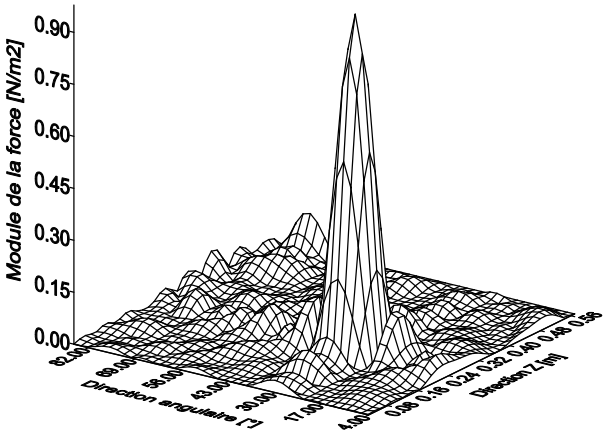

Fig. 6 Distribution de force après filtrage global pour un nombre d'onde de coupure de 65 rad/m

Bien que la force soit parfaitement localisée, des efforts résiduels sont observés aux limites de la distribution de force résultante du filtrage suite de la limitation du domaine spatial. Ces efforts peuvent avoir des amplitudes importantes puisqu'ils dépendent du niveau du bruit mais ils peuvent être adoucies par un fenêtrage avant le filtrage.

4 Validation expérimentale

Il est intéressant de tester et valider l'approche proposée sur une structure vibrante réelle où les données du problème sont mesurées. Le système de mesure est composé de la tête laser à balayage de type Polytec OFV056 permettant la mesure, sans contact, des vitesses radiales sur une partie de la coque cylindrique. La tête Laser est placée à une distance de 1.8*m* par rapport à la structure et reliée avec un contrôleur de type OFV3001S. Ce dernier est connecté d'une part avec un boîtier de jonction de Polytec PSV-Z-040-U et d'autre part avec un PC doté d'un logiciel qui permet à la fois le pilotage du faisceau laser, l'amorçage de l'excitation et l'acquisition des mesures.

La coque cylindrique de 1.75*m* de longueur, de 0.8*m* de diamètre et d'une épaisseur de 1*mm*, est posée sur le sol sur des appuis amortissants. Les limites de la zone de mesure (figure 7) sont ajustées en se servant de la caméra et de la qualité du signal du faisceau laser. Après plusieurs réglages réalisés, une surface de 0.20*m* ($\cong 29°$) selon la courbure et de 0.44*m* selon la longueur de la coque, est maillée en 945 points résultant de 21 points selon la direction angulaire et 45 points le long de l'axe du cylindre dont la taille d'une maille carrée est de 0.01*m*.

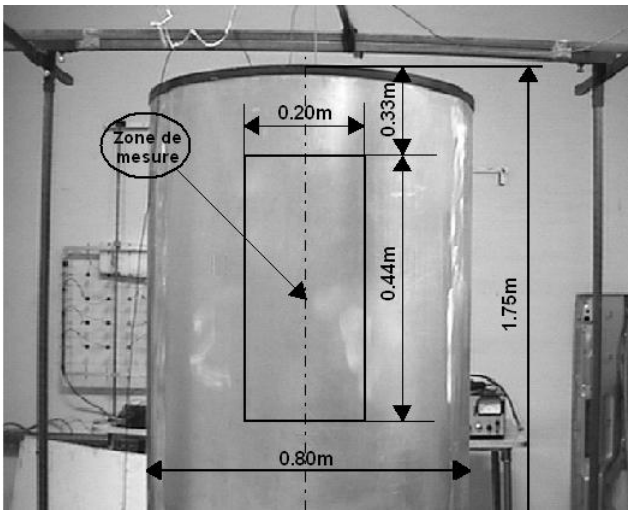

Fig. 7 délimitation de la zone de mesure sur le cylindre

Une fois le maillage généré, l'excitation est amorcée et le laser commence l'acquisition point par point.

Sur la figure 8, nous présentons quelques points particuliers de la zone de mesure.

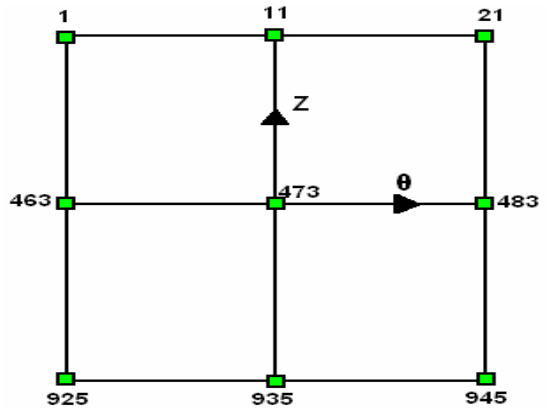

Fig. 8 Noeuds particuliers sur la surface de mesure

Deux séries de mesure ont été réalisées en fonction de la nature de l'excitation. Lors de l'excitation mécanique, la coque cylindrique est excitée de l'intérieur par un pot vibrant type 4809, placé approximativement au centre de la zone de mesure. Ce dernier génère une force de type bruit blanc dans une bande de fréquence de 0 à 3200Hz.

Pour mesurer la force d'excitation, un capteur de force ayant une sensibilité égale à 100*mv/N* est placé sur la tige du pot vibrant. Le capteur est relié au boîtier de jonction de Polytec (PSV-Z-40-U) à travers un amplificateur de charge.

La force mesurée au noeud central N°473 (figure 9) présente une amplitude maximale à des basses fréquences mais elle décroît pour se stabiliser au-delà de 1000Hz.

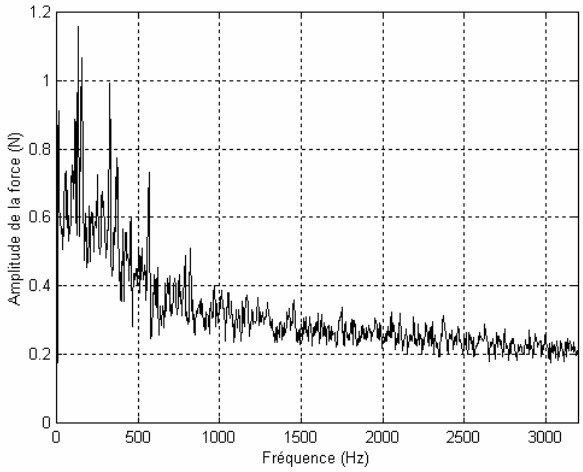

Figure 9 : Force mesurée au nœud N°473

Afin de montrer la qualité des mesures, nous avons relevé les cohérences entre la force excitatrice et la vitesse vibratoire et qui sont calculées par le logiciel de Polytec en tout point du maillage. La figure 10 montre que lorsque le faisceau laser est normal à la surface (nœud N°473), sa réflexion est parfaite et la cohérence à partir de 1000Hz est proche de 1 et les vitesses mesurées au alentour de ce point sont de bonnes qualités.

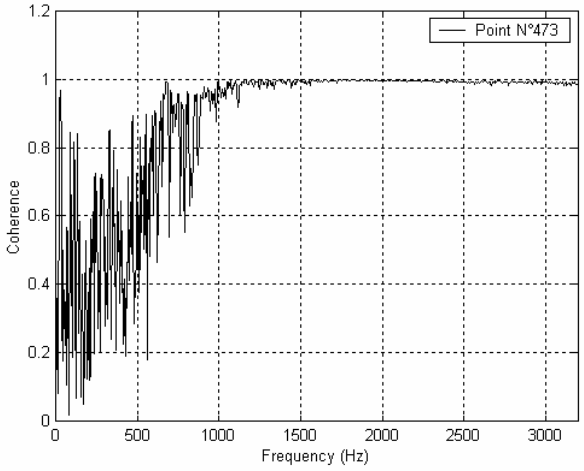

Figure 10 : Cohérence au nœud N°473

Cependant, dès qu'on s'éloigne du centre de la surface (nœud N°483), la réflexion du laser devient de plus en plus mauvaise, la cohérence diminue nettement (figure 11) et la qualité des mesures devient moins bonne que celle du point central.

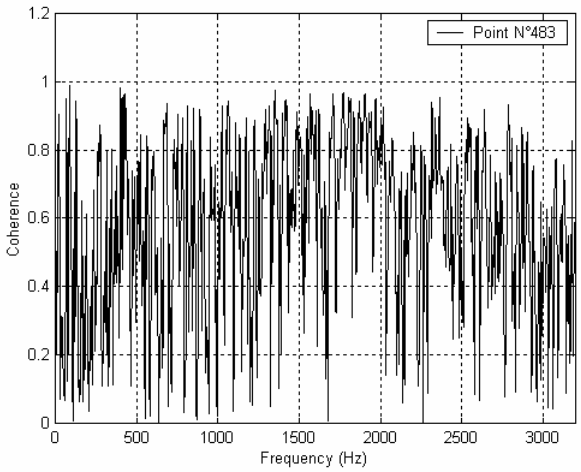

Figure 11 : Cohérence au nœud N°483

La distribution de force reconstruite à partir des vitesses mesurées (figure 12) ne donne aucune possibilité de localiser la force car elle est complètement noyée par le bruit résultant d'une part des incertitudes de mesure et d'autre part de la non régularité des espaces entre les différents points.

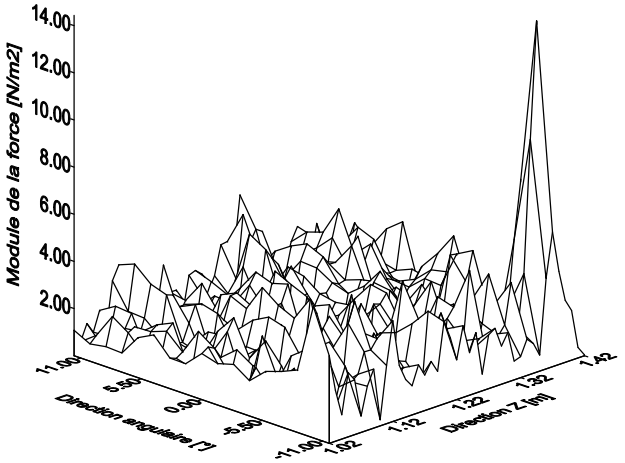

Figure 12 : Distribution de force reconstruite à partir des vitesses mesurées à 3200Hz

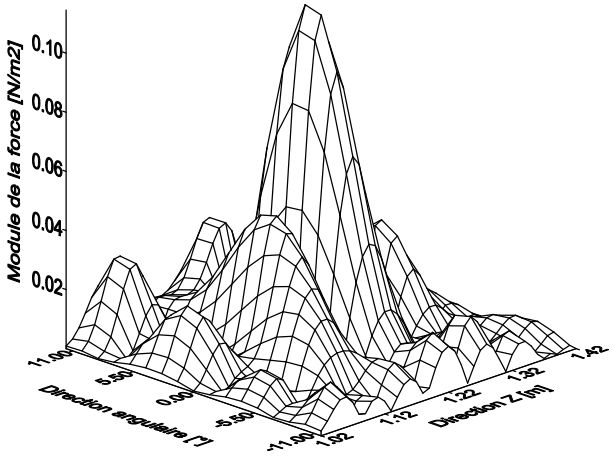

Figure 13 : Distribution de force obtenue après un filtrage global avec $k_{cz} = k_{c\theta} = 65$ rad/m

En appliquant un filtrage global avec un nombre d'onde de coupure de 65 rad/m dans les deux directions, la force apparaît clairement dans sa position exacte au centre de la surface de mesure (figure 13).

Une deuxième série de mesure a été réalisée avec un excitateur électroacoustique qui génère une pression acoustique dans une bande de fréquence limitée à 800Hz. A travers un conduit souple en PVC, on ramène la pression approximativement au milieu de la surface mesurée sur la paroi intérieure de la coque cylindrique. Afin de mesurer la pression développée par l'excitateur, un microphone de sensibilité égale à 3.63*mv/Pa* est placé dans le conduit élastique à 5*mm* de son bout. Ce dernier est relié à un amplificateur de charge qui, à son tour, est relié avec le boîtier de jonction de Polytec (PSV-Z-40-U).

La pression mesurée au noeud N°473 (figure 14) présente une amplitude maximale de 230Pa à 42Hz et qui décroît pour atteindre 15Pa à 800Hz. A la différence de l'excitation par force, le signal de la pression mesurée présente de fortes harmoniques de 84Hz. Cette fréquence fondamentale correspond à la fréquence propre de la membrane du haut parleur qui constitue l'excitateur électroacoustique.

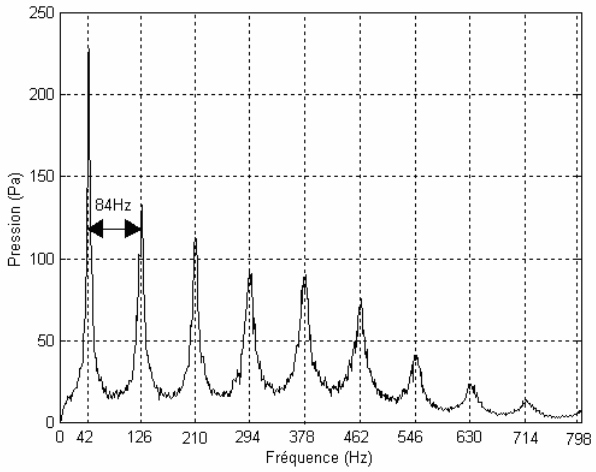

Figure 14 : Pression mesurée au nœud N°473

Pour valider la méthode à la suite d'une excitation acoustique, la bande de fréquence étudiée est limitée par la fréquence maximale de l'excitateur (800Hz). On a calculé la distribution de pression uniquement à partir des déplacements issus des vitesses radiales (figure 15). Il est clair qu'aucune localisation de l'excitation n'est possible car les vitesses mesurées sont trop bruitées.

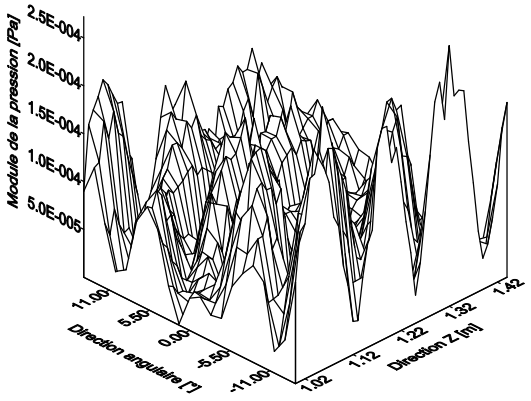

Figure 15 : Distribution de la pression mesurée à 800Hz

Cependant, après un filtrage global et en choisissant un nombre d'onde de coupure de 45 rad/m dans les deux directions, la distribution de pression filtrée à 800Hz s'avère large mais elle entoure l'endroit de l'excitation (figure 16). La régularité de la pression fournie par l'excitateur électroacoustique ainsi que l'énergie développée font que les vitesses radiales mesurées ont des valeurs significatives de manière que l'influence des déformations est devenue presque négligeable.

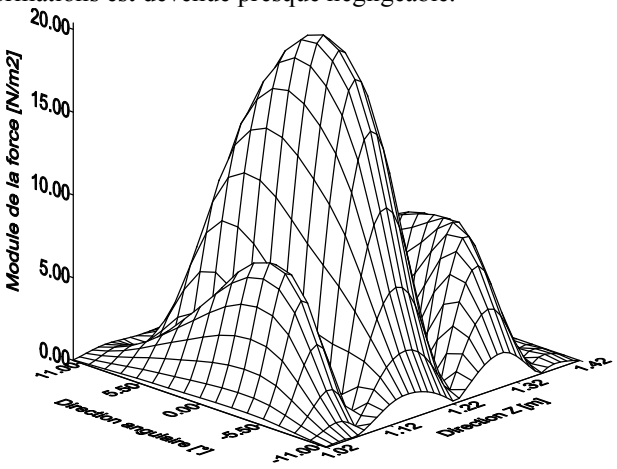

Figure 16 : Distribution de la pression obtenue à 800Hz après un filtrage global avec $k_{cz} = k_{c\theta} = 45$ rad/m

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une démarche numérique et expérimentale qui permet la localisation des sources mécaniques et acoustiques à partir de la mesure des vitesses radiales de la paroi externe de la structure en utilisant un vibromètre laser à balayage. Les résultats obtenus dans toute la bande de fréquence choisie ne donnaient aucun espoir de localisation de l'excitation car les incertitudes associées à la mesure sont trop importantes. Après régularisation du problème inverse, les résultats se sont nettement améliorés et les distributions résultantes après filtrage ont permis de voir apparaître des pics avec des amplitudes dominantes à l'endroit où l'excitation est appliquée.

Références

[1] BUI H.D., "Inverse problems in the mechanics of materials: An introduction", CRC Press, Boca Raton, FL, 224p, 1994.

[2] WILLIAMS E. G., MAYNARD J. D. et SKUDRZYK E., "Source sound reconstruction using a microphone array", Journal of Acoustical Society of America, vol. 78, N°1, 340-344, 1980.

[3] MAYNARD J. D., WILLIAMS E. G. et LEE Y., "Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH" Journal of Acoustical Society of America, vol. 78, N°4, 1395-1413, 1985.

[4] VERONESI W. A. et MAYNARD J. D., "Nearfield acoustic holography (NAH) : II. Holographic reconstruction algorithms and computer implementation", Journal of Acoustical Society of America, vol. 81, N°5, 1307-1322, 1985.

[5] LAYOU T., PASCAL J. C. et CARNIEL X., "Mesure de la déformée vibratoire d'une structure plane par antennerie vibratoire", Journées Imagerie Acoustique: de la théorie à la pratique, 1-2 mars Lyon, France, 1994.

[6] ZHANG Y. et MANN III J. A., "Measuring the structural intensity and force distribution in plates", Journal of Acoustical Society of America, vol. 99, N°1, 345-353, 1996.

[7] ZHANG Y. et MANN III J. A., "Examples of using structural intensity and the force distribution to study vibrating plates", Journal of Acoustical Society of America, vol. 99, N°1, 353-361, 1996.

[8] PEZERAT C. et GUYADER J. L., "Two inverse methods for localization of external sources exciting a beam", Acta Acustica, vol. 3 N°1, 1-10, 1995.

[9] PEZERAT C. et GUYADER J. L., "Identification of vibration sources", Applied Acoustics, N°61, 309-324, 2000.

[10] PEZERAT C. et GUYADER J. L., "Characterisation of vibration sources on a set of plates using the RIFF technique", Noise Control Engineering Journal, vol. 50 N°2, 50-57, 2002.

[11] DE ARAÚJO M., ANTUNES J. et PITTEAU P., "Remote identification of impact forces on loosely supported tubes: Part 1 – Basic theory and experiments", Journal of Sound and Vibration, vol. 215, N°5, 1015-1041, 1998.

[12] ANTUNES J., PAULINO M., et PITTEAU P., "Remote identification of impact forces on loosely supported tubes: Part 2 – Complex vibro-impact motions", Journal of Sound and Vibration, vol. 215, N°5, 1043-1064, 1998.

[13] ANTHONY J. R. et WILLIAMS E. G., "On the use of acoustical holography for the determination of intensity in structures", 4th International Congress on Intensity Techniques, Senlis, France, August 31-September 2, 1993.

[14] OUELÂA N., LAULAGNET B. et GUYADER J. L., "Simulation de la détection de sources internes à partir des vibrations d'une conduite ou du bruit rayonné extérieur", Progrès récents des méthodes de surveillance acoustique et vibratoire, Senlis, France, 27-29 Oct. 1992.

[15] DJAMAA M. C., OUELAA N., PEZERAT C. et GUYADER J. L., "Reconstruction of a distributed force applied on a thin cylindrical shell by an inverse method and spatial filtering", Journal of sound and vibration, Vol.301, N°3-5, 560-575, 2007.

[16] DJAMAA M. C., OUELAA N., PEZERAT C. et GUYADER J. L., "Identification of external forces exciting finite thin cylindrical shell", Acta Acustica united with Acustica, vol. 92, N°3, 398-405, 2006.

[17] KUNT M., "Traitement numérique des signaux", 3ème édition, Paris, Dunod, 402p, 1981.