



Analyse d'enveloppe des champs vibratoires pour l'identification des propriétés géométriques et dynamiques des matériaux architecturés

Quentin Leclere, Kerem Ege, Philippe Duvauchelle, Valérie Kaftandjian,
Mohamed Tahraoui

► To cite this version:

Quentin Leclere, Kerem Ege, Philippe Duvauchelle, Valérie Kaftandjian, Mohamed Tahraoui. Analyse d'enveloppe des champs vibratoires pour l'identification des propriétés géométriques et dynamiques des matériaux architecturés. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03848279

HAL Id: hal-03848279

<https://hal.science/hal-03848279>

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.



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

Analyse d'enveloppe des champs vibratoires pour l'identification des propriétés géométriques et dynamiques des matériaux architecturés

Q. Leclère, K. Ege, P. Duvauchelle, M. Tahraoui, V. Kaftandjian.
Univ Lyon, INSA Lyon, LVA, EA677, 69621 Villeurbanne, France.



La conception de matériaux architecturés est un domaine d'application en plein essor situé au carrefour de l'ingénierie mécanique, des matériaux et des procédés. Ces matériaux sont généralement développés dans le but d'optimiser leurs performances selon différents critères dépendants de l'application visée, comme par exemple le compromis raideur/masse dans les problématiques d'allègement des structures ou le pilotage de l'amortissement dynamique pour une bande fréquentielle donnée. Une fois réalisé, l'échantillon de matériau doit être caractérisé expérimentalement de manière à vérifier a posteriori son comportement. Sa caractérisation vibratoire permet ainsi par exemple d'identifier des courbes de dispersions permettant d'accéder à des paramètres homogénéisés d'un matériau équivalent. La caractérisation géométrique de la structure hétérogène peut rester cependant dans certains cas difficile à faire au travers d'essais vibratoires. Elle peut être par contre plus facilement obtenue par d'autres approches comme l'imagerie par rayonnement ionisants. L'objectif de cette communication est de proposer une caractérisation géométrique de la structure grâce à l'analyse d'enveloppe du champ vibratoire. Le spectre d'enveloppe est une technique largement utilisée en traitement de signal pour mettre en évidence les modulations d'amplitudes, permettant par exemple de détecter des défauts sur machines tournantes. Appliquée au champ vibratoire, l'analyse d'enveloppe met en évidence les modulations d'amplitudes spatiales générées par l'hétérogénéité de la structure, permettant le cas échéant d'accéder à certaines propriétés de périodicité géométrique. La méthodologie sera illustrée sur une structure de type sandwich nid d'abeille (aluminium-nomex-aluminium), et les résultats seront comparés à une approche basée sur l'imagerie par rayons X.

1 Introduction

L'architecture des matériaux offre de multiples possibilités pour l'optimisation des propriétés mécaniques. Une large classe de matériaux architecturés repose sur une structuration périodique, ce qui confère au matériau des propriétés spécifiques qui peuvent être observées en dynamique via la propagation d'ondes [1, 2]. Les propriétés dynamiques sont souvent déterminées expérimentalement via une vision homogénéisée du matériau. La détermination des paramètres géométriques de la structure peut être plus complexe à réaliser lorsque les longueurs d'ondes observées sont plus grandes que les périodes spatiales du matériau. Cependant, il est possible de s'affranchir des composantes harmoniques d'un champ vibratoire via l'analyse de son module, dans le but de mettre en évidence les périodicités spatiales énergétiques générées par les effets locaux de la structure périodique.

En traitement de signal, l'analyse par spectre d'enveloppe [3] permet de mettre en évidence les fluctuations périodiques de l'énergie d'un signal. Transposé au cas d'analyse d'un champ vibratoire, l'analyse d'enveloppe revient à analyser le contenu périodique du module du champ (la distribution de vitesse quadratique). L'objectif de ce travail est d'illustrer cette analyse dans le cas d'une plaque composite constituée de deux plaques d'aluminium autour d'un cœur en nid d'abeille. On montre que l'analyse d'enveloppe du champ vibratoire permet d'accéder à des informations sur la géométrie du cœur similaires à celles apportées par imagerie par rayon X.

2 Cas du nid d'abeille

2.1 Structure périodique et spectre en nombre d'ondes

La structure alvéolaire du nid d'abeille est périodique dans l'espace, on peut la représenter sous la forme d'un motif en forme de Y périodisé selon deux directions, tel que

représenté sur la figure 1. Cette périodisation s'écrit comme

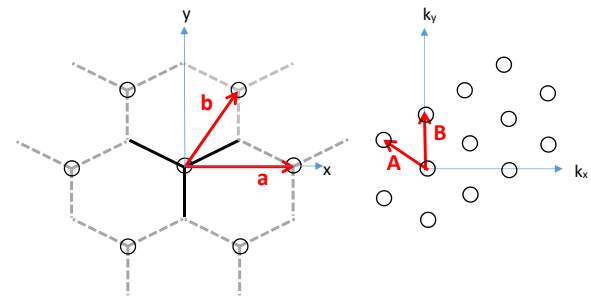


FIGURE 1 – Structure périodique du nid d'abeille (gauche), points de discrétisation du spectre en nombre d'onde (droite).

une convolution du motif de base en forme de Y noté $Y(x, y)$ par un peigne de Dirac bidimensionnel :

$$F(x, y) = Y(x, y) * \sum_{m,n} \delta_{m\mathbf{a}+n\mathbf{b}} \quad (1)$$

où **a** et **b** sont les vecteurs générant la structure périodique (cf. fig. 1) :

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \bar{a} [\cos(\alpha) ; \sin(\alpha)] \\ \mathbf{b} &= \bar{b} [\cos(\beta) ; \sin(\beta)] \end{aligned}$$

Dans le domaine de Fourier 2D, cette convolution est équivalente à une discrétisation du spectre de $Y(x, y)$, par un peigne de Dirac bidimensionnel :

$$\hat{F}(k_x, k_y) \propto \hat{Y}(k_x, k_y) \times \sum_{m,n} \delta_{m\mathbf{A}+n\mathbf{B}} \quad (2)$$

où **A** et **B** sont des vecteurs définis par

$$\mathbf{A} = \frac{2\pi}{\bar{a} \sin(\beta - \alpha)} [-\sin(\beta) ; \cos(\beta)]$$

$$\mathbf{B} = \frac{2\pi}{\bar{b} \sin(\beta - \alpha)} [-\sin(\alpha) ; \cos(\alpha)]$$

Notons que pour le cas particulier de la cellule parfaite (les trois branches du motif Y de mêmes longueurs $\bar{c}$, et les trois angles égaux à 120°) on a

$$\bar{a} = \bar{b} = \bar{c} \sqrt{3},$$

$$\bar{A} = \bar{B} = 4\pi/(3\bar{c}).$$

2.2 Analyse d'une image obtenue par rayons X

Un échantillon de plaque composite sandwich, constituée d'un coeur de type Nomex encapsulé entre deux toiles d'aluminium, a été testé en imagerie par rayons X. La source utilisée est une source industrielle standard et le détecteur placé juste derrière l'échantillon est un panneau dont la résolution est de $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ par pixel. La distance source détecteur est d'environ 2m. Une image d'une partie de l'échantillon est donnée en figure 2 (haut). La structure en nid d'abeille visiblement imparfaite apparaît clairement, on peut voir également des percages de l'échantillon sur les bords et un certain nombre d'artefacts en noir dus à des éléments positionnés en surface. Cette image est analysée dans le domaine des nombres d'ondes en calculant sa transformée de Fourier 2D. Le résultat, proposé sur la même figure (bas) fait clairement apparaître la nature discrète du spectre du nid d'abeille induite par son caractère périodique. On constate que les propriétés du nid d'abeille se rapprochent d'une structure "parfaite". La position des pics sur l'image permettent d'identifier les vecteurs $\mathbf{A}$ et $\mathbf{B}$:

$$\bar{A} \approx 1122 \text{ rad/m} ; \bar{B} \approx 1118 \text{ rad/m}$$

$$\alpha \approx 1.0^\circ ; \beta \approx 62.3^\circ$$

Les paramètres se rapprochant des paramètres d'une cellule "parfaite" telle que définie plus haut, on peut donner une estimation de la longueur moyenne des branches du motif Y : $\bar{c} \approx 3.7 \text{ mm}$.

2.3 Analyse du champ vibratoire

L'échantillon déjà testé par rayons X est soumis à un test vibratoire. La plaque sandwich est excitée en son centre par une source de type piézoélectrique large bande (1-100kHz). Le champ vibratoire est mesuré par vibrométrie laser à balayage avec une résolution spatiale de 2mm. Des cartographies en partie réelle sont tracées sur la figure 3 pour différentes fréquences.

La position de la source est clairement visible, ainsi que les fronts d'ondes propagés pour lesquels la longueur d'onde est clairement identifiable. On note une certaine orthotropie du matériau, les fronts d'ondes décrivant non pas des cercles concentriques mais des ellipses. Il est possible à partir de ce type de mesure d'accéder aux paramètres "équivalents" de la

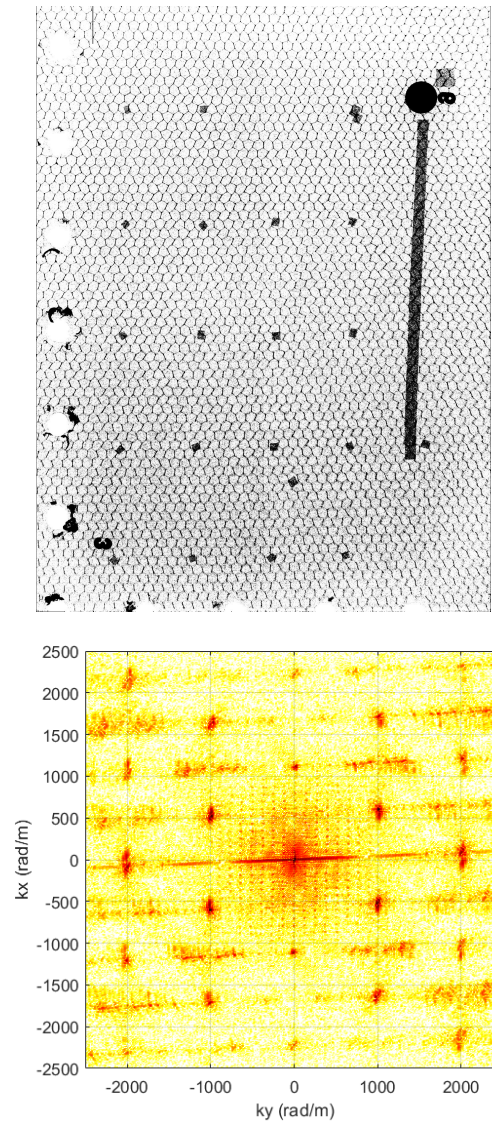


FIGURE 2 – Image de l'échantillon obtenue par rayons X (haut), et représentation dans le domaine des nombres d'ondes (bas).

structure composite, c'est à dire les paramètres d'une plaque homogénéisée présentant le même comportement vibratoire à une fréquence donnée [4]. La structure du coeur en nid d'abeille, intimement liée à ce comportement vibratoire et aux paramètres équivalents, reste cependant caché dans ces cartographies (la structure n'apparaît pas directement dans la représentation spatiale du champ vibratoire). On distingue cependant une certaine modulation d'amplitude qui peut être imputée à l'effet du coeur.

Les représentation dans le domaine des nombres d'ondes du champ vibratoire sont tracées sur la figure 4 aux mêmes fréquences.

On voit principalement sur ces cartographies les ellipses centrées sur 0 qui représentent le nombre d'onde de flexion. On voit également, pour les fréquences les plus élevées, une autre ellipse plus petite, également centrée sur 0. Cette seconde ellipse traduit l'apparition de la contribution

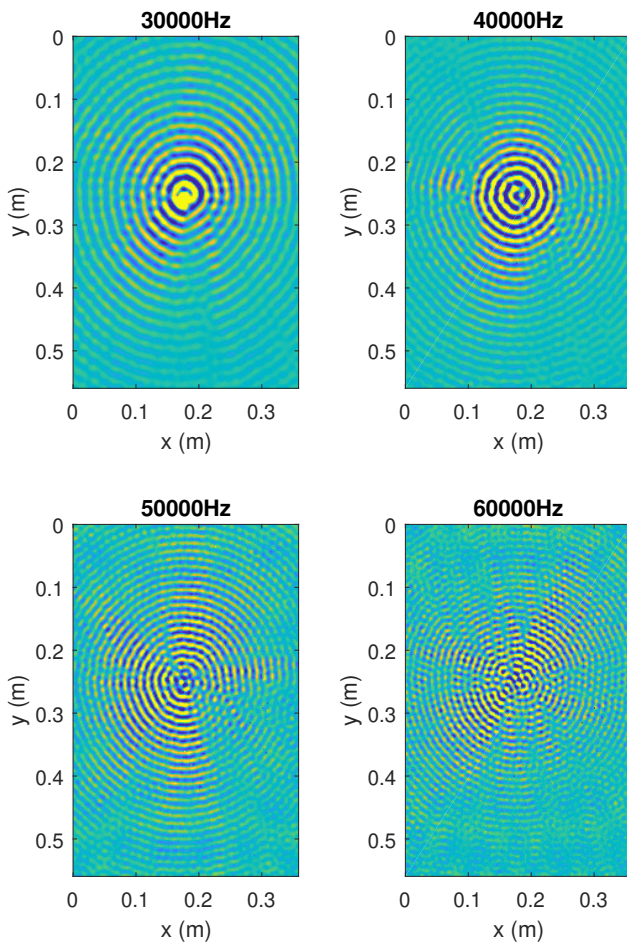


FIGURE 3 – Partie réelle du champ vibratoire mesuré à différentes fréquences.

d'ondes de membrane (on peut les distinguer également sur les cartographies spatiales, avec des longueurs d'ondes plus grandes). Mais l'effet de modulation du à la structure du coeur en nid d'abeille apparaît aussi, sous la forme d'une périodisation de l'ellipse principale : on distingue en partie 6 ellipses centrées sur des points liés aux propriétés périodiques du coeur. La résolution spatiale de la mesure ne permet pas d'en voir davantage.

Cet effet de modulation peut être mis en évidence via l'analyse d'enveloppe, qui est l'objet même de cette communication. L'analyse de Fourier 2D n'est alors plus réalisée sur le champ vibratoire complexe, mais sur le module du champ vibratoire, éventuellement intégré en fréquence. Le module du champ vibratoire est tracé sur la figure 5 en valeur rms sur la bande 30k à 70kHz. La modulation d'amplitude apparaît plus clairement sur cette cartographie en énergie du champ vibratoire. La structure périodique de cette modulation est mise en évidence par le spectre d'enveloppe, tracé sur la figure 6 (en haut).

La structure périodique apparaît maintenant clairement, et correspond parfaitement à la représentation qui avait été

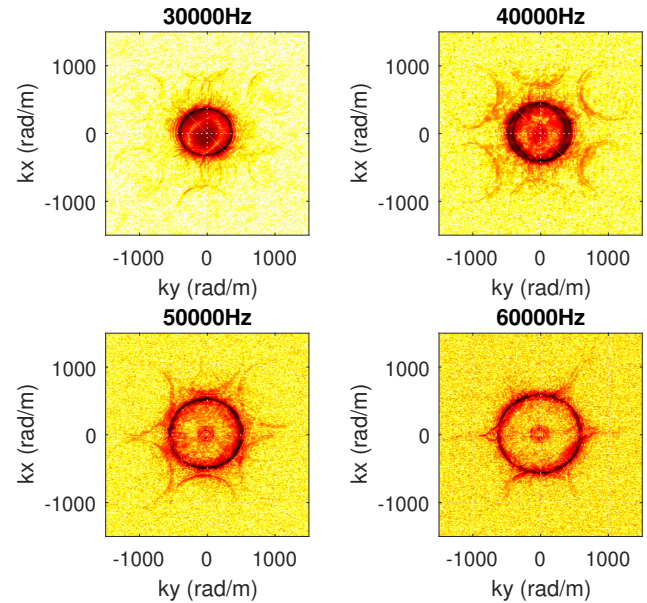


FIGURE 4 – Spectres en nombres d'ondes des champs vibratoires à différentes fréquences.

obtenue à partir de l'imagerie par rayons X (représentée sur la même figure en bas, zoomée sur la même zone du plan des nombres d'ondes. En relevant la position des pics, on obtient des valeurs similaires à celles obtenues à partir de l'imagerie rayons X :

$$\bar{A} = 1118 \text{ rad/m} ; \bar{B} = 1104 \text{ rad/m}$$

$$: \alpha \approx 0.6^\circ ; \beta \approx 62.1^\circ.$$

On notera sur le spectre obtenu à partir de l'image par rayon X la contribution d'autres phénomènes périodiques de nombres d'ondes plus bas, il s'agit ici de l'effet des artefacts parasites apparaissant sur l'image spatiale, (cf. Fig. 2) générés par les perçages et autres éléments positionnés en surface de la plaque. Ces éléments ne gênent cependant pas pour l'interprétation des résultats.

3 Conclusion

Cette communication propose une illustration de l'intérêt que peut avoir l'analyse d'enveloppe des champs vibratoires. Quand l'analyse du champ complexe nous fournit des informations globales sur un comportement homogénéisé du matériau, au travers de l'analyse des ondes propagées, l'analyse d'enveloppe nous fournit des informations géométriques locales à propos de la structuration du matériau. Une perspective de ce travail serait d'être capable, au travers de modèles d'homogénéisation ad-hoc, de faire le lien entre paramètres géométriques et dynamiques extraits à partir des deux types d'analyse.

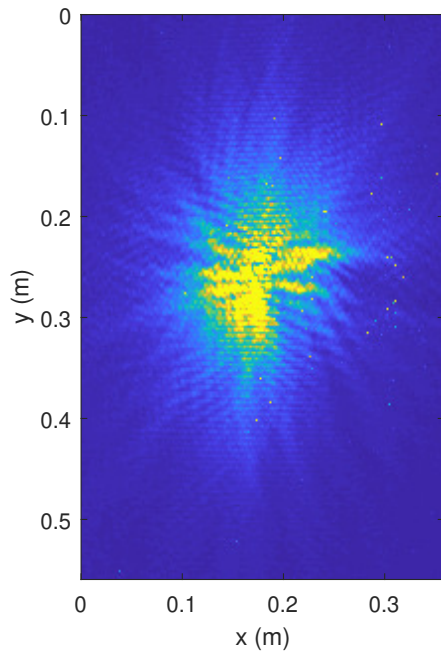


FIGURE 5 – Valeur efficace du champ vibratoire moyenné sur la bande 30kHz-70kHz.

Références

- [1] Justin Dirrenberger. *Propriétés effectives de matériaux architecturés*. Theses, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, December 2012.
- [2] Kevin Billon. *Composites périodiques fonctionnels pour l'absorption vibroacoustique large bande*. Theses, Université de Franche-Comté, November 2016.
- [3] Robert B. Randall. *Vibration-based Condition Monitoring : Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. John Wiley & Sons, 2010.
- [4] Fabien Marchetti. *Modélisation et caractérisation large bande de plaques multicouches anisotropes*. Theses, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA Lyon), December 2019.

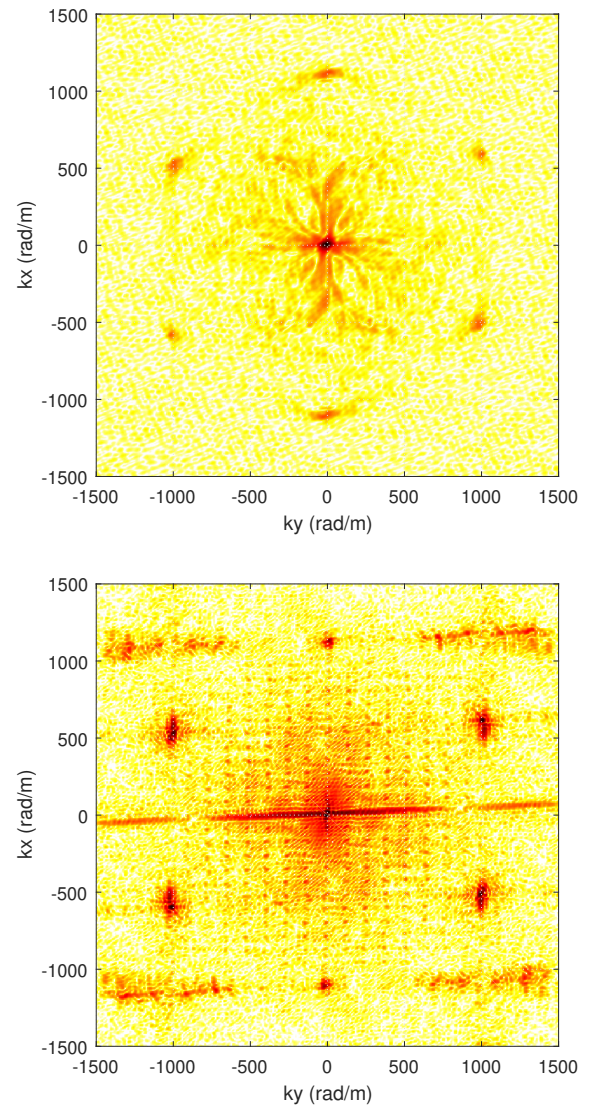


FIGURE 6 – Haut : spectre d'enveloppe en nombre d'onde du champ vibratoire. Bas : spectre de l'image obtenue par rayons X tracé sur la même zone du domaine des nombres d'ondes.