

| Le point sur l'holographie acoustique

Bernard Béguet,
MICROdB,
7B, allée Claude Debussy,
69130 Ecully,
Tél. : 0472 18 01 00,
Fax : 04 72 18 01 09

Cet article présente l'état de l'art concernant l'holographie acoustique, nouvelle technique utilisée en acoustique. Cette technique a été développée dans le but de localiser sur une structure les zones les plus émissives d'un point de vue acoustique.

À partir de l'acquisition de la pression acoustique pour un réseau plan de capteurs (typiquement 16 x 16 points de mesure obtenus en déplaçant une ligne de microphones), le traitement consiste à recalculer la pression acoustique ou l'intensité dans un plan tangent aux sources.

Le traitement des données est basé sur une décomposition du champ acoustique sur une base d'ondes planes et permet une focalisation du champ acoustique.

Cette technique de mesure est complémentaire :

- de l'intensimétrie acoustique, la rétropropagation apportant une meilleure localisation des sources mais avec l'inconvénient de nécessiter une bonne stationnarité des sources,
- des mesures vibratoires. L'holographie a l'avantage de pouvoir faire des mesures pour des pièces tournantes et de séparer dans le champ vibratoire les ondes propagatives, ayant une contribution dans le rayonnement acoustique, et les ondes "évanescentes" ne transférant pas de bruit en champ lointain.

L'application de cette technique à l'analyse du bruit émis par un moteur monté au banc d'essais met en lumière les intérêts opérationnels comme la quantification du bruit émis par une courroie d'accessoires et le rayonnement d'un mode de carter.

Principe de l'holographie acoustique

La technique d'holographie acoustique nécessite de faire des mesures sur un ensemble de capteurs répartis sur un plan. D'un point de vue pratique, on utilise la plupart du temps une antenne linéaire de microphones que l'on déplace à l'aide d'un robot.

Le système d'acquisition permet d'enregistrer les autospectres pour tous les points de mesure et les interspectres de ces points avec un ou plusieurs capteurs de référence permettant de resynchroniser en phase toutes les mesures. L'objectif opérationnel de cette technique est de localiser sur une machine les zones ayant la plus forte émission sonore. D'un point de vue scientifique, l'holographie acoustique permet, à partir de mesures sur une surface, de recalculer pression acoustique, vitesse particulière et intensité sur une surface parallèle. Pour des questions de simplicité, les développements présentés ici sont en géométrie plane. Le traitement des données permettant de calculer la pression acoustique dans un plan différent du plan de mesure suit trois étapes :

- la première étape consiste à décomposer le champ acoustique sur une base d'ondes planes. La transformée spatiale du champ acoustique consiste à additionner les capteurs avec des retards de phase. On conçoit facilement que si on ajoute tous les capteurs on privilégie l'onde plane parallèle à l'antenne;
- la seconde consiste à rétropropager les différentes ondes jusqu'au plan où sont supposées être localisées les sources. Notons que l'opérateur de rétropropagation peut prendre deux formes selon le signe de $k_z^2 = k_0^2 - k_x^2 - k_y^2$:
 - si $k_z^2 > 0$, l'opérateur traduit le caractère propagatif des ondes,
 - si $k_z^2 < 0$, l'opérateur traduit la décroissance exponentielle des ondes évanescentes.

Formulation mathématique (voir [1])

Soit x et y les coordonnées dans le plan de l'antenne et z la normale à l'antenne. Soit z_0 la cote de l'antenne et z_c la cote du plan de calcul.

Le calcul de la pression dans le plan z_c à partir de la mesure de la pression dans le plan z_0 suit les étapes suivantes :

- décomposition du champ acoustique sur la base d'ondes planes par transformée de Fourier spatiale :

$$P(k_x, k_y, z = z_0) = \int p(x, y, z = z_0) \exp(-jk_x x - jk_y y) dx dy$$

- rétropropagation de ces ondes jusqu'au plan z_c par application de l'opérateur de rétropropagation :

$$G^{-1}(k_x, k_y) = \exp(-j(\omega^2 - k_x^2 - k_y^2)^{1/2}(z_c - z_0))$$

- calcul de la pression dans le plan z_c par transformée de Fourier inverse :

$$p(x, y, z = z_c) = 1/4\pi^2 \int P(k_x, k_y, z = z_0) G^{-1}(k_x, k_y, z_c - z_0) dk_x dk_y$$

Lors de l'opération de rétropropagation, on peut tenir compte des ondes évanescentes pour retrouver la distribution de pression réelle ou les éliminer pour obtenir la distribution de pression responsable du rayonnement en champ lointain;

- la dernière étape consiste à réadditionner les différentes ondes pour obtenir le champ de pression, de vitesse ou d'intensité dans le plan de calcul.

Pour étayer ces formulations, prenons l'exemple de deux enceintes contenant chacune deux haut-parleurs. Des mesures ont été faites en plaçant une ligne de microphones pour synthétiser une antenne totale de 17 x 16 capteurs. Une vue de face du dispositif est donnée sur la figure 1.

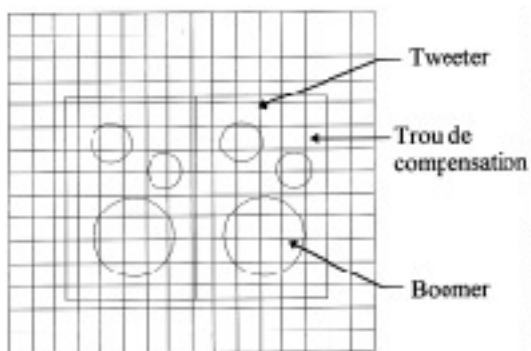


Fig.1 : Vue de face du dispositif.

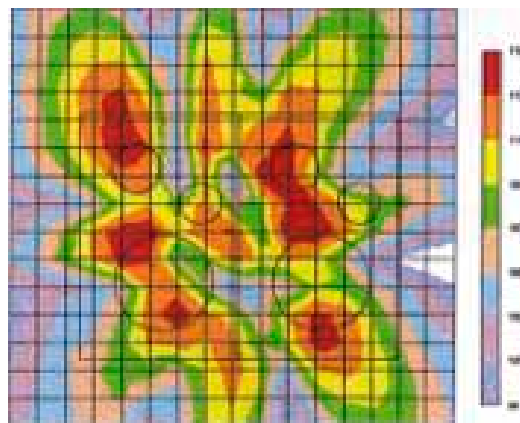


Fig.2 : Pression mesurée 1/3 octave 2500 Hz.

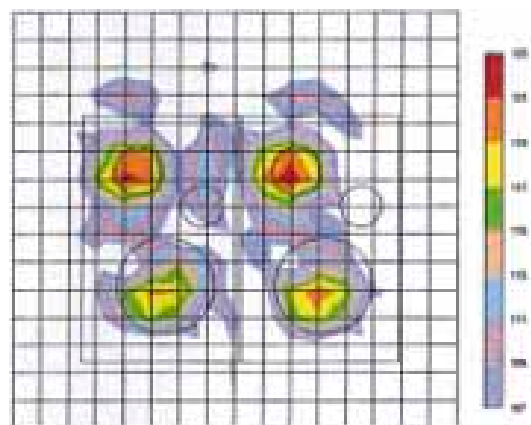


Fig.3 : Pression rétropropagée 1/3 octave 2500 Hz.

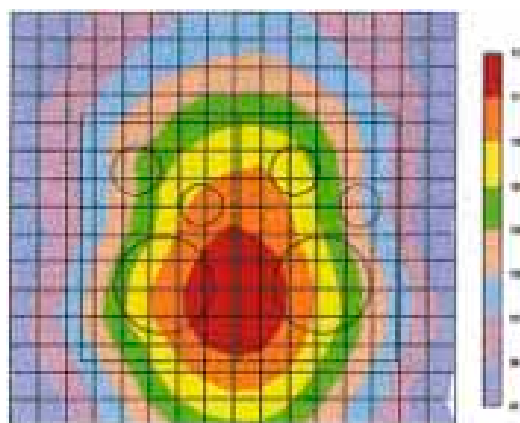


Fig.4 : Pression mesurée 1/3 octave 800 Hz.

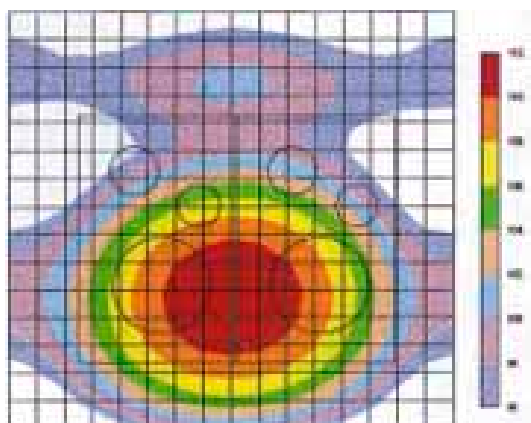


Fig.5 : Pression rétropropagée 1/3 octave 800 Hz.

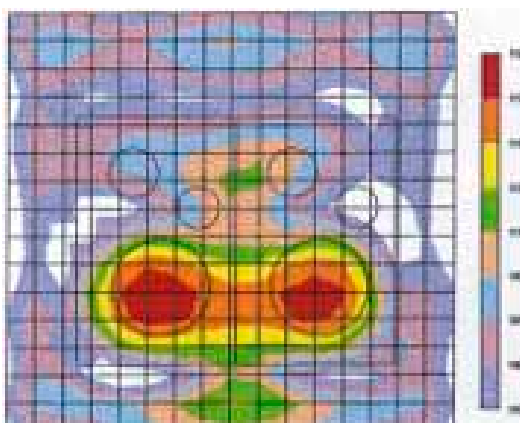


Fig.6 : Pression rétropropagée avec filtre de Wiener.

Chaque point du quadrillage correspond à un point de mesure. Le pas du maillage est de 4 centimètres et la distance entre le plan des sources et le plan d'antenne est d'environ 10 centimètres.

Sur les figures 2 et 3, nous présentons la carte de pression mesurée sur l'antenne et la carte de pression recalculée dans le plan tangent aux haut-parleurs, sans prendre en compte les ondes évanescentes, pour le 1/3 d'octave 2500 Hz. Les figures sont présentées avec une dynamique de 16 dB, c'est-à-dire que la différence de niveau entre la couleur rouge et la couleur blanche est supérieure à 16 dB. Alors qu'il est impossible de déterminer le nombre et la position des sources sur l'hologramme mesuré, les quatre sources apparaissent clairement sur l'hologramme rétro-propagé. Dans cette bande de fréquence, l'émission des tweeters est supérieure à celle des boomers.

En haute fréquence, la technique est remarquable. Par contre, la résolution se dégrade lorsque la fréquence diminue. Ainsi, sur les figures 4 et 5, sont présentés les résultats obtenus dans les mêmes conditions dans le 1/3 d'octave 800 Hz. L'analyse rapide conclut à une source placée au centre des boomers.

Différentes options de traitement [2] ont été développées pour améliorer ces résultats, en prenant en compte dans le traitement les ondes évanescentes. Notons que cette prise en compte peut conduire à faire diverger les algorithmes de traitement dès qu'il y a du "bruit de mesure". La meilleure solution (meilleure résolution sans divergence) est donnée par l'utilisation d'un filtre de Wiener [3].

Le résultat obtenu dans le 1/3 d'octave 800 Hz en utilisant un tel filtre est donné sur la figure 6. On peut remarquer que dans cette bande de fréquence l'émission des boomers est largement prédominante.

Pour clore ce paragraphe sur les principes, notons que la méthode, utilisant une acquisition séquentielle, nécessite une bonne stationnarité des sources. Typiquement, avec les moyens actuels, l'acquisition pour une grille de 16 x 16 capteurs nécessite environ 30 minutes. Des développements scientifiques [4] ont été réalisés pour adapter cette technique au cas de sources non stationnaires.

Aspects pratiques

Le pouvoir de résolution du système acoustique, c'est-à-dire la capacité à distinguer deux sources acoustiques, est faible comparativement au pouvoir de résolution dans le domaine optique. On est conduit à vouloir optimiser cette résolution. Pour cela le choix des paramètres d'acquisition et de traitement est important. Nous listons ci-dessous ces paramètres, la façon de les régler et la résolution qui en résulte.

Pas d'échantillonnage sur l'antenne

La distance entre deux points de mesure est liée au théorème de Shannon : elle doit être inférieure à 1/2 longueur d'onde, pour la longueur d'onde la plus courte (incluant les ondes évanescentes). En pratique, il est suffisant de prendre

une 1/2 longueur acoustique pour la fréquence d'analyse la plus élevée. Si la bande de fréquence d'intérêt va jusqu'à 4 000 Hz, le pas d'échantillonnage doit être 4 cm.

Taille de l'antenne

Deux arguments doivent être mentionnés sur ce point. D'un point de vue scientifique, la taille de l'antenne doit au moins être égale à la longueur d'onde acoustique pour la fréquence d'analyse la plus basse. De plus, la taille de l'antenne doit être au moins 2 fois supérieure à la taille de la source.

D'un point de vue pratique, cette recommandation ne peut pas souvent être tenue. En tout état de cause, il n'est pas recommandé d'utiliser la rétropropagation si le niveau sur l'hologramme mesuré est maximum sur le bord.

Distance entre l'antenne et la source

Le premier argument est de mettre l'antenne le plus près possible de la source, et les conditions pratiques fixent la plupart du temps cette distance. Il doit être noté que, d'un point de vue scientifique, cette distance ne doit pas être inférieure au pas d'échantillonnage.

Choix du rapport signal/bruit pour le filtre de Wiener.

C'est ce paramètre qui permet d'obtenir la meilleure résolution sans divergence des algorithmes. Ce ratio dépend de la distance source-antenne et du bruit de mesure. Lorsqu'on est dans le cas optimal (distance source-antenne égale au pas d'échantillonnage), un rapport signal/bruit de 15 dB donne les meilleurs résultats.

Résolution du système

La résolution est la capacité à séparer deux sources. Dans le cas où les ondes évanescentes sont filtrées, cette résolution est égale à 1/2 longueur d'onde. Elle dépend donc de la fréquence. Dans le cas où l'on prend en compte les ondes évanescentes en utilisant les meilleurs paramètres explicités ci-dessus, cette résolution devient égale à 2 fois le pas d'échantillonnage et ne dépend plus de la fréquence.

Positionnement de la méthode par rapport à l'intensimétrie et aux mesures vibratoires

Intérêt de l'holographie par rapport à l'intensimétrie

L'intensimétrie acoustique a souvent été présentée comme une méthode permettant de localiser les sources de bruit. On peut alors se poser la question de l'intérêt supplémentaire apporté par l'holographie.

Synthétisons d'abord l'intérêt de l'intensimétrie. Cette technique, basée sur la mesure d'un flux d'énergie, a vu son essor car elle permet de quantifier la puissance acoustique d'une machine dans un local quelconque, c'est-à-dire avec un certain degré de réverbération et éventuellement des sources parasites [5].

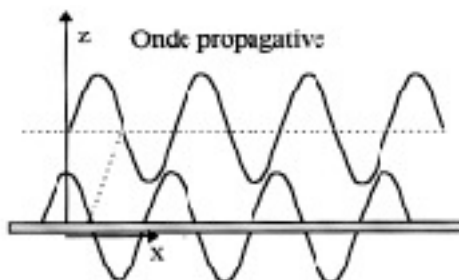
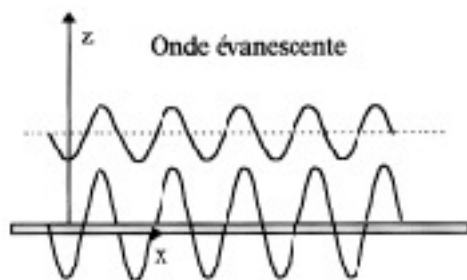
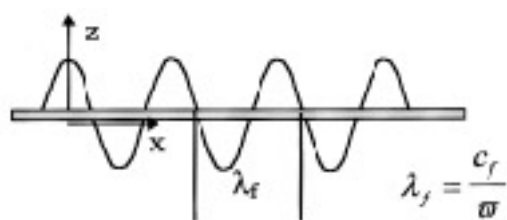
Partant de cette propriété indiscutable, on a souvent essayé de faire dire plus à l'intensité, à savoir localiser les sources de bruit. Il s'agit d'exploiter les cartes d'intensité pour donner un niveau de puissance "partielle" à différents éléments constituant la source. Ceci est viable lorsque les dits éléments sont suffisamment disjoints comme c'est par exemple le cas pour un ensemble motopompe où le moteur et la pompe sont suffisamment disjoints pour être quantifiés de cette manière. Ce n'est plus le cas lorsque les sources de bruit sont différentes parties de la même structure comme c'est le cas pour un moteur thermique.

Est-ce que l'holographie a un avantage dans ce cas ? Il peut être noté que l'holographie inclut l'intensité puisque cet outil permet de calculer des pressions acoustiques ou des intensités. La question peut donc se reformuler ainsi : la capacité de calculer l'intensité dans le plan autre que le plan mesuré présente-t-elle un avantage significatif ?

Objectivement, l'exemple des différents haut-parleurs le prouve clairement. Un raisonnement pourrait consister à dire qu'il suffirait de rapprocher les mesures intensimétriques des sources pour avoir un résultat similaire. Toutefois, la nécessité d'avoir un pas de maillage au plus égal à la distance à la source existe également. Aussi, la volonté de se rapprocher des sources induit la nécessité d'augmenter le nombre de points de mesure. Par simulation avec des monopoles, nous avons montré qu'on obtient des résultats similaires avec l'holographie à une distance d de la source et l'intensimétrie à une distance $d/2$ soit avec 4 fois plus de points de mesure. Et si on utilise l'holographie avec ces dernières mesures, les résultats sont meilleurs encore.

Intérêt de l'holographie par rapport aux mesures de vibration

De nombreux problèmes acoustiques peuvent être résolus par des mesures de vibration. L'objet de ce paragraphe est de montrer les informations complémentaires apportées par l'holographie acoustique. Trois points peuvent être mentionnés :



- Les mesures sont plus faciles.

Cet argument est important lorsqu'on a de nombreux points de mesure et plus particulièrement pour les pièces tournantes.

- Efficacité de rayonnement.

L'efficacité de rayonnement (c'est-à-dire le rapport entre l'énergie acoustique rayonnée sur l'énergie vibratoire de la structure) peut varier beaucoup selon la structure.

Prenons une plaque infinie sur laquelle se propage une onde de flexion à la fréquence f .

Pour les ondes de flexion, une plaque est un milieu dispersif, c'est-à-dire que la vitesse de propagation C_f varie avec la fréquence. En première approximation, la vitesse de propagation est proportionnelle à la racine carrée de la fréquence.

$$C_f = A f^{1/2}$$

Il existe donc une fréquence, appelée fréquence critique, pour laquelle la vitesse de flexion est égale à la vitesse du son dans l'air C_0 .

Cette fréquence f_c sépare le domaine fréquentiel en deux zones :

$f < f_c$: domaine subsonique ou évanescent. Les ondes acoustiques décroissent très rapidement à partir de la structure.

$f > f_c$: domaine supersonique ou propagatif. Les ondes acoustiques se propagent en champ lointain.

À niveau vibratoire égal, le rayonnement en champ lointain est très différent en fonction de la fréquence (différence pouvant dépasser 20 dB). Ce raisonnement devient important lorsqu'un bruiteur est hétérogène comme c'est le cas d'un groupe motopropulseur. Les zones de faible épaisseur comme les carters ont une faible capacité à rayonner comparativement aux zones de forte épaisseur comme le bloc ou la culasse, à niveau vibratoire identique.

- Transfert aérien et transfert solidien.

Certaines structures, comme les carters sur les moteurs, peuvent être excitées de deux manières : de manière vibratoire aux points d'accrochage sur le bloc (transfert solidien) et de manière acoustique par les sources situées à l'intérieur du carter (transfert aérien). On peut montrer de manière théorique que les vibrations du carter liées à l'excitation aérienne ont une capacité à rayonner à l'extérieur beaucoup plus grande que les vibrations dues à l'excitation solidienne. Ainsi, en se restreignant à des mesures vibratoires, on mesure de manière privilégiée le transfert solidien.

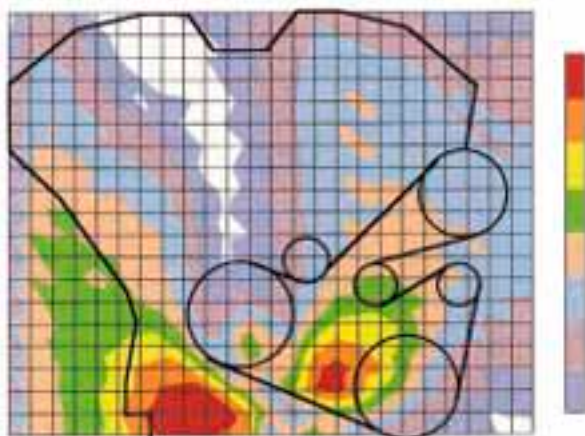


Fig.7 : Etude MICROdB pour PSA.

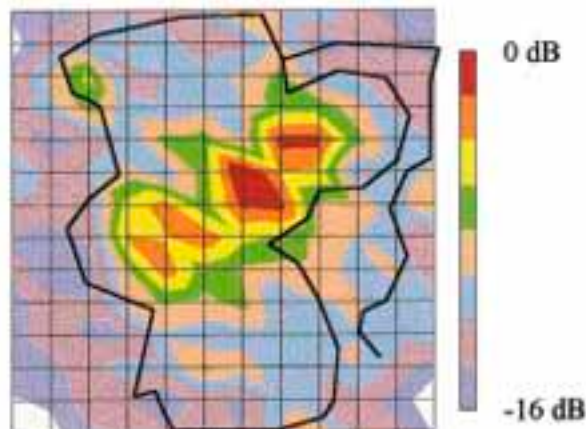


Fig.8 : Etude MICROdB pour RENAULT.

Exemples industriels

Pour clore cet article, nous présentons des résultats obtenus dans des cas industriels. Il s'agit de montrer l'intérêt de la méthode dans le cas de mesures pour des moteurs installés dans un banc d'essais.

Le principal objectif est de visualiser sur le moteur les zones émettrices de manière à hiérarchiser les solutions à mettre en œuvre le cas échéant.

Deux exemples sont donnés sur les figures 7 et 8.

- la figure 7 met clairement en évidence le rayonnement de la courroie d'accessoire, information difficile à obtenir avec des mesures vibratoires,
- la figure 8 met en évidence le rayonnement d'un mode de carter. Notons que dans ce cas, la méthode quantifie le niveau de bruit émis, ce qui peut être différent du niveau de vibration comme nous l'avons vu plus haut.

Références bibliographiques

- [1] JD Maynard, EG Williams, Nearfield acoustic holography : theory of the generalised holography and the development of NAH, JASA 78 (4), octobre 1985.
- [2] JL Chauray, B. Béguet, J. Leuridan, Localisation system for acoustic sources, Euronoise'95, Lyon, mars 1995
- [3] JY der Matheossian, Problème inverse régularisé pour l'holographie acoustique en champ proche : application en milieu perturbé, Thèse université Paris 7, 7 septembre 1994
- [4] KB Ginn, J. Hald, Acoustical imagery of a non-stationary sound field : use of an array and new possibilities for multichannel acquisition, Euronoise'95, Lyon, mars 1995
- [5] JC Pascal, Caractérisation expérimentale du champ rayonné. Intensimétrie et antennes acoustiques in "Rayonnement acoustique de structures", 1988, Eyrolles