Bulletin de la Sabix

Société des amis de la Bibliothèque et de l'Histoire de
l'École polytechnique

32 | 2002

Les polytechniciens et la musique

Musique et holographie

Holger Vach

Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/sabix/388>

DOI : 10.4000/sabix.388

ISSN : 2114-2130

Éditeur

Société des amis de la bibliothèque et de l'histoire de l'École polytechnique (SABIX)

Édition imprimée

Date de publication : 1 décembre 2002

Pagination : 15-22

ISBN : ISSN N° 2114-2130

ISSN : 0989-30-59

Référence électronique

Holger Vach, « Musique et holographie », *Bulletin de la Sabix* [En ligne], 32 | 2002, mis en ligne le 16 juillet 2010, consulté le 18 septembre 2020. URL : <http://journals.openedition.org/sabix/388> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/sabix.388>

Ce document a été généré automatiquement le 18 septembre 2020.

© SABIX

Musique et holographie

Holger Vach

Introduction

- 1 L'holographie est surtout connue pour son rendu esthétique dans l'enregistrement d'images en trois dimensions. Cependant, dans le contexte des mesures scientifiques, elle joue souvent le rôle d'un instrument à la fois précis et simple d'emploi, par exemple pour les mesures de tout petits déplacements, ou de changements d'index de réfraction, ou bien d'amplitudes de vibration. Dans ce dernier cas, l'hologramme d'un objet en vibration présente l'objet en trois dimensions superposé à un système de franges, qui ressemblent à des lignes d'altitude sur une carte de randonnée, chaque frange correspondant à un changement de hauteur de l'ordre du micromètre (10^{-6} m). Par une heureuse coïncidence de la nature, certains phénomènes acoustiques présentent des modes vibratoires dont l'amplitude est aussi de l'ordre du micromètre. Cette coïncidence ouvre des grandes possibilités à l'étude par holographie des vibrations acoustiques, et plus particulièrement à l'étude de la génération du son dans les instruments de musique.
- 2 Depuis une dizaine d'années, nous nous efforçons de proposer une approche originale à l'enseignement expérimental de l'holographie, en encourageant les élèves à établir leurs propres sujets de recherche. Parallèlement à l'enseignement de la physique et des techniques de l'holographie, nous montrons aux élèves l'utilisation des ressources documentaires de la bibliothèque (comme les « Physics Abstracts », les CD ROMS et les outils de recherche bibliographique sur Internet) afin de les aider à définir un sujet de recherche nouveau et original sur le plan international. Cette ouverture au « monde de la recherche » réalisée grâce à des projets inédits, mais accessibles aux élèves de la deuxième ou troisième année, a été encore renforcée par l'esprit des MODEX (Modules d'enseignement expérimental), qui ont été introduits dans l'enseignement à l'Ecole Polytechnique il y a quatre ans. En particulier, nous avons créé un MODEX intitulé « Holographie et Acoustique » au cours duquel les élèves sont encadrés par deux enseignants : un opticien et un acousticien. Grâce à cette synergie entre deux domaines

de la physique, ainsi qu'entre l'enseignement et la recherche, les élèves se sont montrés très créatifs quant au choix du sujet d'étude. Dans ce qui suit, nous allons résumer trois études originales que nous avons réalisées avec des élèves et qui sont liées - plus ou moins - à la musique.

Etudes de vibrations acoustiques

Vibrations d'une cloche

- 3 Cette première étude concerne un instrument de musique présent dans presque toutes les cultures mondiales au cours de l'histoire : la cloche. Bien que les vibrations d'une cloche aient déjà été étudiées en détail dans les laboratoires spécialisés en acoustique musicale, notre approche présente deux aspects originaux. Tout d'abord, démontrer qu'une telle étude peut être effectuée dans le cadre d'un enseignement expérimental et avec des moyens assez élémentaires ; deuxièmement, enregistrer simultanément les déformations vibratoires de la face avant et de la face arrière de la cloche. En effet, tous les résultats présentés ici ont été obtenus avec un simple laser HeNe d'une puissance de 10mW, qu'on trouve facilement dans la plupart des centres de Travaux Pratiques. L'étude simultanée des deux côtés de la cloche a été réalisée grâce à un miroir placé à l'arrière de celle-ci (voir Figure 1). Ceci est un vrai défi expérimental, considérant que la longueur de cohérence de notre laser est aussi courte qu'une dizaine de centimètres (ce qui, en principe, impose que la différence de chemin optique entre les faisceaux qui produisent l'hologramme soit inférieure à la dizaine de centimètres). Cependant, les élèves peuvent facilement réussir cette épreuve une fois qu'ils ont bien compris la notion de lumière cohérente [1].

Fig. 1 Montage expérimental pour enregistrer simultanément un hologramme de l'avant et de l'arrière d'une cloche ; « L » : laser HeNe, « M » : miroir, « SF » : filtre spatial, « D » : diffuseur, « BS » séparatrice, « B » : cloche et « P » : plaque holographique.

Fig. 2 Photos des hologrammes d'une cloche qui vibre à sa fréquence fondamentale (370Hz) ; dans (b), on peut voir la face avant de la cloche et son image dans le miroir placé à l'arrière (voir figure précédente)

- 4 Dans La Figure 2, nous montrons notre résultat pour la fréquence fondamentale de la cloche. Ensuite, avec le même arrangement expérimental, les élèves ont pu aussi visualiser des modes vibratoires correspondants à des fréquences plus élevées (voir Figure 3). Nous avons identifié les modes vibratoires affichés dans la Figure 3 comme de modes (m,n) où $2m$ représente le nombre de lignes nodales perpendiculaires au cercle principal et n est le nombre de cercles nodales [2].

Fig.3 Photos des hologrammes d'une cloche qui vibre à des fréquences de (a) 1830Hz, (b) 1918Hz, (c) 1921Hz, (d) 2075Hz et (e) 2575Hz.

Vibrations d'un tambour pré-fractale

- 5 La deuxième étude a été effectuée en collaboration avec le laboratoire de Physique de la Matière Condensée (PMC) de l'Ecole Polytechnique. De telles collaborations sont très précieuses, car elles permettent aux élèves de mieux comprendre les enjeux de la recherche scientifique vis-à-vis des applications industrielles - dans ce cas, l'importance potentielle des structures fractales pour les propriétés acoustiques des bâtiments.
- 6 Les chercheurs du laboratoire PMC avaient réalisé des simulations numériques très perfectionnées sur les modes vibratoires de tambours de forme irrégulière (« pré-fractale »). Or, ils ne possédaient pas la possibilité de vérifier leurs calculs par des méthodes expérimentales. Le Professeur B. Sapoval nous a donc proposé d'explorer, par interférométrie holographique, les modes vibratoires de tambours fabriqués dans son laboratoire. Dans la Figure 4, nous présentons une comparaison entre les simulations théoriques et notre étude holographique. L'accord entre les deux études est tellement frappant que les résultats de ce travail ont mérité d'être publiés dans une revue très renommée [3].

Fig.4 Comparaison entre les modes vibratoires simulés (colonne de gauche) et ceux mesurés avec l'holographie dans le centre de Travaux Pratiques (colonne de droite).

Vibrations d'un verre de vin

- 7 Mozart a composé un de ses premiers morceaux de musique pour un ensemble de verres de vin. Ce sont aussi des verres de vin qui ont stimulé deux de nos élèves - membres actives du Binet œnologie - à se poser la question suivante : « tout le monde arrive à faire 'chanter' un verre de cristal en glissant son doigt sur le bord du verre. En remplissant le verre avec du vin, le son émis par la coupe baisse en fréquence. Ceci est bien connu. Mais est-ce que seulement le timbre varie avec le remplissage ou est-ce que la structure des modes vibratoires, elle aussi, change avec le niveau de vin ? » Autrement dit : Est-ce que la vibration du cristal va s'arrêter au niveau du liquide, ou est-ce qu'il y a une discontinuité dans l'amplitude de vibration ? Ou encore : est-ce que le verre vibre indépendamment de son degré de remplissage ?

Fig.5 Photos des hologrammes d'un verre de vin vibrant à ses fréquences fondamentales : (a) un verre vide, (b) un verre rempli à moitié et (c) un verre rempli complètement.

- 8 Afin de trouver une réponse à cette question bien intrigante, les élèves ont induit des vibrations dans le verre à ses fréquences fondamentales, au moyen d'un haut-parleur connecté à un générateur de basses fréquences. L'étude a été réalisée pour trois différents niveaux de remplissage du verre : (a) vide, (b) rempli à moitié et (c) plein (voir Figure 5). Bien que la fréquence fondamentale diminue clairement avec le degré de remplissage, le verre vibre toujours avec la même allure : les vibrations du cristal ne s'arrêtent pas au niveau du liquide, mais elles continuent bien en dessous de celui-ci [4].

Conclusions

- 9 En résumé, nos études holographiques nous ont permis de conjuguer la beauté émotionnelle de la musique avec d'une part la beauté intellectuelle de la physique, et d'autre part la beauté esthétique de l'holographie. De plus, le contact direct entre des élèves motivés et des chercheurs confirmés conduit à une synergie formidable qui résulte de la rencontre entre l'enseignement et la recherche scientifique. Actuellement, nous avons plusieurs projets en cours avec les élèves : une étude, qui est dans sa dernière phase, concerne la « mesure scientifique » de la « qualité musicale » des anches de clarinette, en collaboration avec deux joueurs professionnels de clarinette à l'Opéra de Paris. Les autres projets en cours concernent la physique du gong, de la scie musicale, du diapason, du violon et des anches de basson. Enfin, je tiens à remercier Serena Bastiani-Cecotti pour son aide précieuse dans la lecture critique du manuscrit.

Références

1. K. Menou, B. Audit, X. Boutillon, et H. Vach *Holographie study of a vibrating bell* Am. J. Phys. 66, 380 (1998).
2. H. Mesnil, Y. Colombe, L.N. Hannez, V. Gibiat, et H. Vach *Visualization of high frequency modes of vibrating bells* Am. J. Phys. 67, 838 (1999).
3. O. Haeberlé, B. Sapoval, K. Menou, et H. Vach *Observation of vibrational modes of irregular drums* Appl. Phys. Lett. 73, 3357 (1998).
4. G. Jundt, A. Radu, E. Fort, et H. Vach *Vibrational modes of wine glasses studied by holographic interferometry* soumis à « American Journal of Physics »

Orchestre de jazz Binet Photo 2002

AUTEUR

HOLGER VACH

Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces Département de Physique. Ecole polytechnique