

Résumé de la thèse intitulée “Propagation acoustique dans les mousses liquides et les mousses solides membranaires”, par Camille Gaulon

La pollution sonore est une problématique sociétale et environnementale majeure. L'Organisation Mondiale de la Santé l'a en effet reconnue depuis 2011 comme la deuxième source de pollution en terme d'impact néfaste sur la santé humaine après la pollution atmosphérique. Les conséquences sur la biodiversité sont également fortes puisque des niveaux sonores plus élevés rendent plus difficile la communication entre les animaux, pourtant essentielle à leur survie. Lutter contre les nuisances sonores est un défi à relever auquel les sciences des matériaux peuvent largement contribuer.

Mes travaux de thèse ont ainsi porté sur l'étude d'un type spécifique de matériaux, des mousses, afin de comprendre comment leur microstructure permet d'atténuer le son, dans la gamme de l'audible. Les mousses sont un système complexe composé de bulles de gaz (le plus souvent de l'air) séparées par un squelette (liquide ou solide). Les mousses liquides ont la particularité d'être "fermées" : des membranes liquides, des films de savon, séparent les bulles les unes des autres pour se rejoindre en des arêtes liquides. Le squelette de la mousse est ainsi composé des arêtes et des membranes liquides. Les mousses solides quant à elles, déjà rencontrées dans le domaine de l'isolation phonique telles les mousses de polyuréthane, sont le plus souvent à porosité dite ouverte : aucune membrane ne clôt les pores (les bulles de gaz) qui sont interconnectées entre elles. Pour des applications acoustiques, l'usage est de considérer que les membranes sont "néfastes" car elles risquent d'entraîner des réflexions de l'onde sonore, ruinant tout potentiel d'absorption acoustique.

C'est là l'originalité du début de ma thèse : explorer des mousses ayant des membranes fermant les pores, pour identifier les mécanismes de dissipation acoustique et caractériser l'efficacité de réduction sonore. En effet, les précédents travaux sur les mousses liquides dans le domaine de l'ultrasonore avaient montré les capacités remarquables de ces milieux à réduire l'amplitude sonore [1].

J'ai ainsi commencé par étudier à nouveau les mousses liquides, dans la gamme de l'audible. Mes résultats ont permis de montrer que, contrairement à ce qui avait été invoqué dans de précédentes études, toute la dissipation ne peut pas s'expliquer par des effets thermiques (entre les deux phases liquides et gazeuses). D'autres pertes à l'échelle locale de la mousse, d'origine visqueuse, sont également à prendre en compte. De manière quantitative, cette dissipation est d'un ordre de grandeur comparable à celui précédemment mesuré dans l'étude ultrasonore, suggérant un mécanisme de dissipation robuste dans les mousses liquides à l'œuvre sur une large gamme de fréquences [2].

Ce travail sur les mousses liquides a reposé sur la compréhension des phénomènes physiques à l'échelle locale, grâce aux expérimentations puis à la construction de modèles semi-phénoménologiques. Les performances acoustiques d'une mousse en terme de réduction du bruit dépendent des interactions entre ses constituants élémentaires, bulles de gaz, membranes liquides et arêtes liquides : l'approche est multi-échelle.

Cela m'a ainsi conduit à étudier l'un des constituants élémentaires de la mousse, en réalisant des expériences sur une membrane unique. Cette étude à l'échelle locale a porté sur la réponse acoustique d'une membrane soumise à la vibration d'une onde sonore, pour des films de savon d'une part (en lien avec les mousses liquides) et pour des membranes élastiques d'autre part (en lien avec les mousses solides). Ces expériences ont montré

qu'une seule membrane est déjà source de dissipation, de façon non-anecdotique. J'ai quantifié cette dissipation en fonction de la fréquence et des caractéristiques intrinsèques de la membrane telle son épaisseur, rayon et sa nature même (liquide ou solide). Cette étude à l'échelle locale permet de mieux appréhender le rôle des membranes, qui intervient ensuite dans la réponse vibratoire d'une mousse, en interaction avec ses autres composants.

Cette capacité d'une membrane seule à dissiper le son, en plus des performances acoustiques des mousses liquides dont les pores sont fermés, a inspiré la suite de l'étude autour de mousses solides de polyuréthane ayant également des membranes (solides). Comme mentionné précédemment, ce type de mousse utilisé auparavant en acoustique étaient quasi exclusivement sans membranes [3]. J'ai réalisé une comparaison systématique entre ces mousses dites membranaires avec des mousses à la structure identique mais sans membrane. Les résultats ont mis en évidence une amélioration systématique des performances acoustiques des mousses lorsque celles-ci ont des membranes [4]. J'ai mis ce résultat en regard des théories usuelles dans les matériaux poreux, qui considèrent la propagation acoustique se faisant uniquement dans l'air, à travers les quelques déchirures présentes dans les membranes, et en considérant les membranes comme rigides et immobiles. Puis, je me suis appuyée sur les précédents travaux sur les mousses liquides afin de proposer une approche originale dans laquelle la propagation est transmise à travers les membranes. Cette seconde approche permet bien de capturer le comportement effectif de la mousse observé expérimentalement [5]. Une description plus fine et complète de la propagation acoustique au sein d'une mousse pourra bénéficier des apports de simulations numériques.

La mise en lumière des performances acoustiques de mousse avec membranes ouvre des perspectives pratiques pour utiliser de nouveaux matériaux dans les applications acoustiques. Pour peu que les membranes soient suffisamment souples et déformables, j'ai pu montrer qu'elles jouent un rôle essentiel dans les capacités de dissipation du son.

Or, lors de la fabrication industrielle de mousses solides comme celles de polyuréthane, le matériau est d'abord créé avec des membranes. Puis, ces dernières sont détruites le plus souvent à l'aide d'un gaz chaud. Dans ce contexte industriel, mes résultats sont particulièrement prometteurs puisqu'ils peuvent permettre d'éliminer une étape du processus de fabrication, et de favoriser la recherche autour de mousse dont les membranes sont préservées. Un travail de pair avec des physico-chimistes permettrait d'optimiser les fabrications des mousses de sorte qu'elles aient les propriétés intrinsèques, dont en particulier les caractéristiques des membranes (épaisseur et élasticité), qui maximisent les performances acoustiques.

[1] Pierre, J., Dollet, B. et Leroy, V. *Resonant Acoustic Propagation and Negative Density in Liquid Foams*, Physical Review Letters, 112(14):148307 (2014)

[2] J. Pierre, C. Gaulon, C. Derec, F. Elias, V. Leroy. *Investigating the origin of acoustic attenuation in liquid foams*, The European Physical Journal E 40, 73 (2017)

[3] Johnson, D. L., Koplik, J. et Dashen, R. *Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media*. Journal of Fluid Mechanics, 176:379, (1987).

[4] C. Gaulon, J. Pierre, C. Derec, L. Jaouen, F.-X. Bécot, F. Chevillotte, F. Elias, W. Drenckhan, V. Leroy. *Acoustic absorption of solid foams with thin membranes*, Appl. Phys. Lett 112, 261904 (2018)

[5] C. Gaulon, J. Pierre, C. Derec, F. Chevillotte, F.-X. Bécot, L. Jaouen, F. Elias, W. Drenckhan, V. Leroy. *How to model the acoustic properties of a solid foam with thin membranes?*, Proceedings of Inter-noise 2018, Paper 1542 (2018)