

CFA/VISHNO 2016

La physique des galeries des murmures

V. Gibiat^a, D. Cassereau^b et P. De Guibert^a

^aLaboratoire PHASE, Université Paul Sabatier, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse
Cedex 4, France

^bLaboratoire d'Imagerie Biomédicale, 15 rue de l'École de Médecine, 75006 Paris,
France

vincent.gibiat@univ-tlse3.fr



LE MANS

Le phénomène physique des galeries des murmures peut être observé en différents lieux dans le monde, tel que par exemple le dôme de la cathédrale St-Paul de Londres. Différentes interprétations physiques de ce phénomène ont été proposées par Lord Airy et Lord Rayleigh au XIX^{ème} siècle, telles que des réflexions multiples de l'onde de volume dans la cavité, ou des ondes de surfaces se propageant le long de l'interface air/solide du dôme.

Dans cet article, nous présentons diverses modélisations numériques qui permettent de mieux comprendre la physique complexe de la propagation d'une onde à l'intérieur d'une cavité concave, incluant l'onde de surface générée sur la surface solide délimitant la cavité. Nous observons en particulier comment l'énergie incidente est canalisée à l'intérieur de la coque solide. Des mesures expérimentales ont été réalisées avec une cavité partiellement fermée, constituée de plaques incurvées de plâtre de 5 cm d'épaisseur. Des microphones sont placés en différentes positions à proximité de la paroi solide.

Nous présenterons des comparaisons entre résultats numériques et expérimentaux, qui permettent d'appréhender la grande complexité des mesures réalisées.

1 Introduction

Le phénomène de galeries aux murmures est un phénomène acoustique assez surprenant que l'on peut observer en divers endroits célèbres dans le monde. Parmi ces sites, on peut citer le dôme de la cathédrale St-Paul à Londres : en se promenant sous le dôme, on peut chuchoter à proximité de la paroi ; un autre visiteur, situé à un tout autre endroit sous le dôme, pourra dans certains cas entendre ce que l'on a chuchoté, et ce malgré la grande distance (40-50 m) séparant les deux personnes. Dans le même genre, on peut mentionner le Tabernacle à Salt Lake City (monument mormon), la Galerie des Cariatides au musée du Louvre à Paris, ou encore l'Abbaye de la Chaise-Dieu en Auvergne. Certaines stations de métro présentent également cette caractéristique acoustique très particulière.

Un point commun de ces différents sites est que l'on considère une source acoustique à l'intérieur d'une cavité réfléchissante concave.

Dans cet article, nous proposons une modélisation numérique du phénomène, associée à des mesures expérimentales réalisées à échelle réduite. Nous verrons que l'on peut ainsi mettre en évidence des phénomènes de type ondes de surface se propageant le long de la paroi, susceptibles d'expliquer le phénomène des galeries aux murmures.

2 Quelques rappels historiques

Ce phénomène a été observé au XIX^{ème} siècle sous le dôme de la cathédrale St-Paul à Londres :

- 1871 : Lord Airy, astronome royal officiel de la cour de Grande Bretagne (1835-1881), donne une interprétation physique en terme d'acoustique géométrique, et de réflexions multiples des échos sur les parois de la cavité concave,
- 1896 : Lord Rayleigh conteste l'explication d'Airy et interprète le phénomène en terme de modes dans la cavité, associés à l'apparition d'ondes de surface se propageant le long de la paroi,
- 1904, 1910 : Rayleigh réalise une mesure expérimentale à échelle réduite dans son laboratoire,
- 1922 : Raman et Sutherland confirment l'interprétation donnée par Rayleigh.

Une des questions posées par cet article est alors la suivante : que mesure-t-on réellement dans une expérience

telle que celle de Rayleigh ? Sachant que l'on dispose aujourd'hui de moyens expérimentaux beaucoup plus performants que Rayleigh au début du XX^{ème} siècle. Nous disposons également de moyens de modélisation numérique.

3 L'expérience de Rayleigh

L'expérience à échelle réduite menée par Rayleigh au début du XX^{ème} siècle est illustrée sur la figure 1, elle est réalisée à l'aide d'une plaque de métal cylindrique de 2 m de diamètre. Un appeau (B) est utilisé comme source (aux alentours de 4 kHz ; l'appeau se comporte ici comme un tuyau d'orgue miniature) et une flamme manométrique (F) comme détecteur. En préambule à l'expérience, il a été vérifié qu'aucune onde directe entre la source et le récepteur n'était détectable par la flamme manométrique.

Une première mesure est effectuée avec la paroi métallique libre : la flamme se met à vaciller, mettant en évidence une vibration de l'air ambiant. Une seconde mesure est alors effectuée en ajoutant un écran obturateur (W) sur la plaque : la flamme ne bouge pas.

Rayleigh interprète alors ces mesures par une onde de surface se propageant le long de la paroi et rayonnant en permanence dans l'air. La présence de l'écran obturateur empêche cette onde de surface d'atteindre la flamme, d'où l'absence de mouvements de cette dernière lors de la seconde mesure. Cette expérience valide donc *a priori* l'hypothèse de Rayleigh par rapport à celle d'Airy.

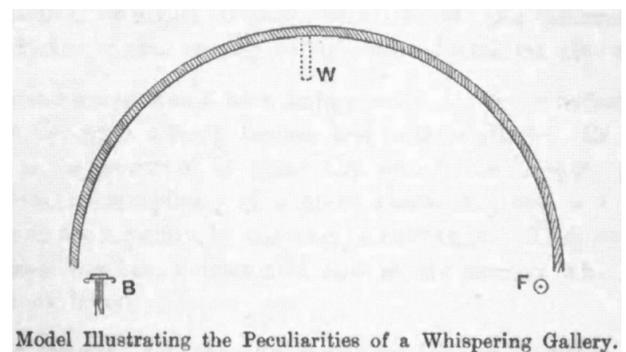


FIGURE 1 – Expérience réalisée par Rayleigh.

3.1 Modélisation numérique

Nous avons utilisé un modèle numérique FDTD (Finite Differences Time Domain) à deux dimensions (SimSonic). La configuration modélisée est illustrée par la figure 2.

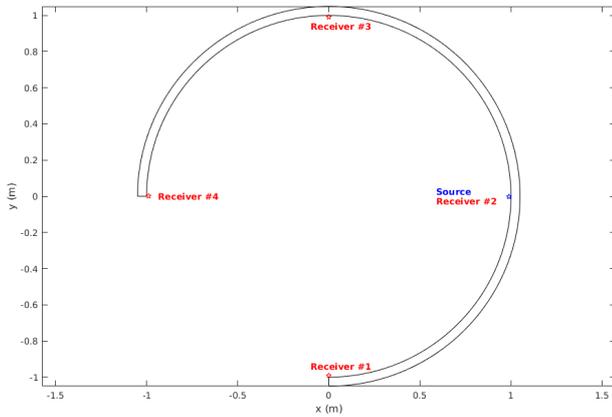


FIGURE 2 – Configuration de modélisation.

La paroi est modélisée par un cylindre de plâtre de 5 cm d'épaisseur, fermé aux 3/4 avec un diamètre de 2 m. L'intérieur et l'extérieur du cylindre sont remplis d'air.

Une source ponctuelle est située à la position repérée en bleu sur la figure 2, à 5 cm de la paroi. Cette source émet une impulsion gaussienne centrée à la fréquence de 4 kHz. Quatre récepteurs sont positionnés à 1 cm de la paroi, en des positions repérées en rouge sur la figure.

Les caractéristiques mécaniques de l'air et du plâtre sont les suivantes :

- air : $c=340$ m/s, $\rho_a=1.2$ kg/m³
- plâtre : $c_l=2400$ m/s, $c_t=1500$ m/s, $\rho_p=2790$ kg/m³

La figure 3 représente des vues instantanées du champ à quatre instants différents :

- sur la figure 3a ($t=0.7$ ms), on identifie le front incident direct qui part de la source vers le haut, ainsi que le front réfléchi par la paroi en bas ; la distance entre la source et la paroi étant très faible, ces deux fronts sont quasiment indissociables ; on voit par ailleurs naître une onde plus rapide à l'intérieur de la coque de plâtre,
- sur la figure 3b ($t=2.5$ ms), l'onde aérienne continue à se propager, tandis que l'onde rapide dans le plâtre continue à prendre de l'avance,
- les figures 3c ($t=4$ ms) et 3d ($t=5$ ms) illustrent l'évolution temporelle de ces divers phénomènes.

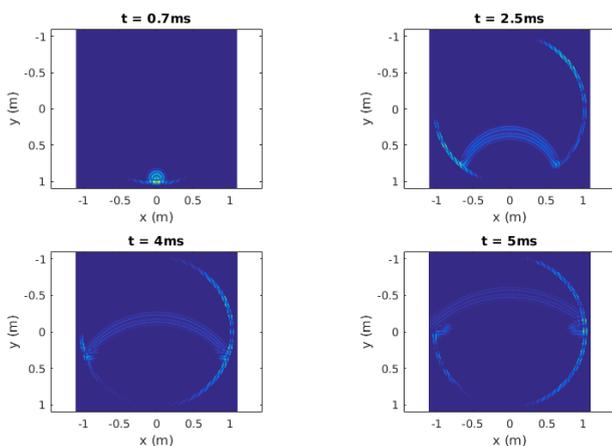


FIGURE 3 – Vues instantanées du champ.

Au bout d'un certain temps, on observe une part assez importante de l'énergie qui est piégée dans la coque de plâtre, faisant des allers-retours multiples entre les deux extrémités. Il est à noter que cette onde rapide rayonne en permanence à l'intérieur du volume d'air de la cavité.

La figure 4 représente les signaux temporels détectés par les quatre récepteurs. Dans tous les cas on observe des signaux assez complexes, avec des composantes variées arrivant à différents instants. Le premier signal visible sur la figure 4b (haut/droite) correspond à l'onde aérienne directe (le récepteur est situé juste en face de la source) ; de même le premier signal visible sur les figures 4a (haut/gauche) et 4c (bas/gauche) correspond à l'onde aérienne directe entre la source et les récepteurs 1 et 3, décalés respectivement de $\pm 90^\circ$ par rapport à la source. Enfin la figure 4d (bas/droite) fait apparaître clairement deux impulsions bien séparées : elles correspondent toutes les deux à l'onde aérienne, la première étant directe de la source au récepteur, la seconde provenant d'une réflexion de cette onde directe sur la paroi, refocalisée vers l'intérieur de la cavité en raison de sa concavité.

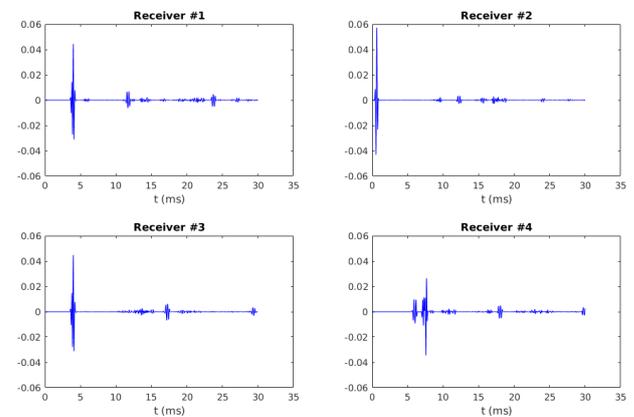


FIGURE 4 – Signaux temporels vus par les récepteurs.

La figure 5 représente un zoom de la partie qui précède immédiatement l'arrivée de l'onde aérienne directe. Le récepteur 2, situé face à la source, ne voit rien de particulier. En revanche, les récepteurs 1, 3 et 4 font apparaître une composante additionnelle, de fréquence apparente plus faible, d'amplitude très faible (environ 1‰ de l'amplitude de l'onde aérienne directe), et correspondant à une vitesse de propagation plus rapide que celle dans l'air.

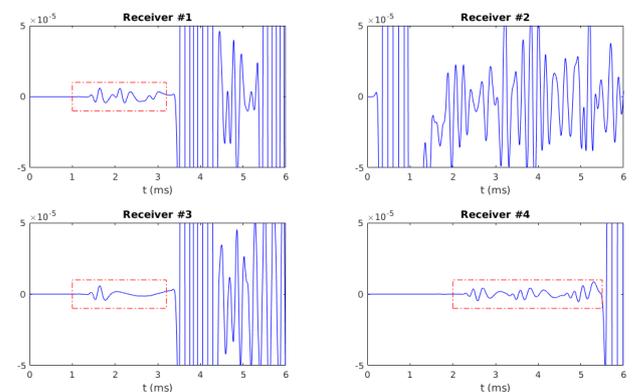


FIGURE 5 – Zoom de la partie précédant l'onde aérienne directe.

Le même calcul a alors été refait en positionnant une

multitude de récepteurs le long de la paroi, à 1 cm de cette dernière. Le résultat ainsi obtenu est illustré sur la figure 6, en représentation espace/temps et une échelle logarithmique de couleurs.

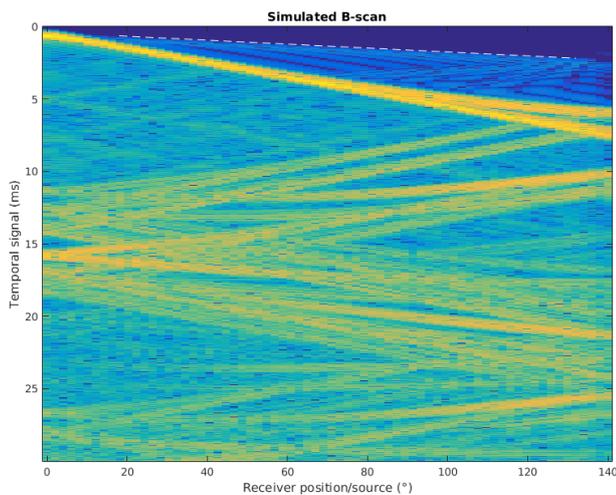


FIGURE 6 – Représentation espace/temps pour une multitude de récepteurs.

On observe très clairement un front d'onde dominant courbe qui correspond simplement à l'onde directe dans l'air entre la source et les différents récepteurs. Une analyse géométrique très simple permet de comprendre l'effet de courbure de ce front d'onde, représentatif de la variation de distance source/récepteur en fonction de l'angle du récepteur par rapport à la source.

Au-delà de ce front principal on voit une structure d'ondes multiples, mêlant ondes directe et réfléchies dans l'air, et rayonnement de l'onde de plaque de plâtre vers l'air.

Cette figure fait également très clairement apparaître une contribution qui démarre plus tôt que l'onde directe. La relation entre temps et position du récepteur est strictement linéaire. Les récepteurs étant ici repérés par leur angle par rapport à la source, une telle linéarité ne peut s'expliquer autrement que par une onde qui se propage sur la surface courbe de la paroi de plâtre.

Une évaluation de la pente, représentée par les pointillés, permet de calculer la vitesse équivalente, que l'on a trouvée égale à environ 1286 m/s, soit une vitesse légèrement inférieure à la vitesse des ondes transverses dans le plâtre (ce qui est conforme à l'hypothèse d'une onde de type Rayleigh).

3.2 Mesures expérimentales

Un dispositif expérimental a été élaboré conformément au modèle numérique présenté dans le paragraphe précédent. Ce dispositif est illustré par les figures 7 (vue générale du dispositif de mesure) et 8 (vue de détail, avec la source utilisée, ainsi qu'un ensemble de 4 récepteurs que l'on peut déplacer le long de la circonférence du cylindre de plâtre).

Les données expérimentales collectées sont représentées sur la figure 9 dans une représentation espace/temps. On identifie clairement le front d'onde courbe correspondant à l'onde aérienne directe, tel que prévu par le modèle numérique. On observe également que les signaux mesurés présentent une structure temporelle très complexe.

Les figures 10a (haut/gauche) et 10b (haut/droite)



FIGURE 7 – Dispositif expérimental, vue générale.



FIGURE 8 – Dispositif expérimental, vue de détail.

représentent les signaux mesurés en deux positions particulières des récepteurs : juste en face de la source (10a) et avec un décalage de 64 mm (10b). Les figures 10c (bas/gauche) et 10d (bas/droite) représentent des zooms de ces deux signaux, dans la portion qui précède immédiatement l'onde aérienne directe.

Hormis la composante très basse fréquence qui correspond à un bruit de mesure (~ 50 Hz), on observe que rien ne précède l'onde aérienne directe pour le récepteur situé face à la source. On voit en revanche très clairement un signal de faible amplitude pour le récepteur décalé de 64 mm.

Ces mesures expérimentales sont plutôt conformes aux modélisations numériques réalisées.

4 Conclusion

En guise de première conclusion, il apparaît clairement des modélisations numériques et des mesures expérimentales que les signaux sont de nature très complexe, avec des contributions d'ondes aériennes multiples (directe et réfléchies, refocalisées par des effets liés à la courbure concave de la paroi). Par ailleurs, la mesure expérimentale constitue un défi très important, cette mesure étant perburgée par le bruit ambiant et les conditions de mesure. Il est également important de noter que l'effet que l'on essaie de mettre en évidence est d'amplitude très faible, ce qui rend plus difficile encore sa détection expérimentale.

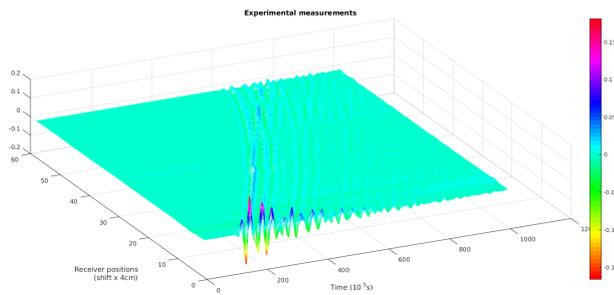


FIGURE 9 – Mesures expérimentales, en représentation espace/temps.

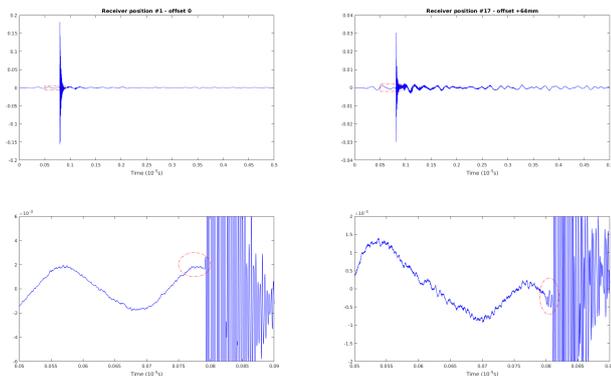


FIGURE 10 – Signaux mesurés en deux positions particulières des récepteurs.

Dans cet article, on a clairement mis en évidence l'existence d'une onde rapide qui rayonne dans le fluide, cette onde étant interprétée comme une onde de surface se propageant le long de la paroi concave. La mise en évidence numérique de cette onde ne pose pas de difficultés particulières, la mesure expérimentale est évidemment significativement plus complexe.

Il reste à améliorer encore le dispositif expérimental, que l'on pourra compléter par des modélisations supplémentaires, ce qui devrait nous permettre de mieux appréhender les phénomènes physiques complexes qui entrent en jeu dans ce problème.

Références

- [1] G. B. Airy, *On Sound and Atmospheric Vibrations, with the Mathematical Elements of Music* (London, MacMillan), p. 145 (1871),
- [2] J. W. Strutt, Baron Rayleigh, *On the Whispering Galleries in Theory of Sound* **2**, pp. 127-129 (1896),
- [3] J. W. Strutt, Baron Rayleigh, *The Problem of the Whispering Gallery*, *Philosophical Magazine* **20**, pp. 1001-1004 (1910),
- [4] J. W. Strutt, Baron Rayleigh, *On shadows*, *Royal Institution Proceedings* (1904),
- [5] J. W. Strutt, Baron Rayleigh, *Further Applications of Bessel's Functions of High Order to the Whispering Gallery and Allied Problems*, *Philosophical Magazine* **xxvii**, pp. 100-109 (1914),
- [6] C. V. Raman and G. A. Sutherland, *On the Whispering-Gallery Phenomenon*, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 100, No. 705, pp. 424-428 (1922),
- [7] H. G. Dorsey, *Acoustics of Arches*, *J. Acoust. Soc. Am.* **20**, p. 597 (1948),
- [8] W. C. Sabine, *Collected papers on acoustics*, Cambridge Harvard University, pp. 255-269 (1922),
- [9] E. Bossy, <http://www.simsonic.fr>.