

# CENTENAIRE DE LA DÉCOUVERTE DE L'EFFET BRILLOUIN

Jean-Charles BEUGNOT<sup>1\*</sup>, Philippe DJEMIA<sup>2</sup>, Jérémie MARGUERITAT<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut FEMTO-ST, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UMR 6174, Besançon, France

<sup>2</sup> LSPM, CNRS-3407, Université Sorbonne Paris Nord, Villetaneuse, France

<sup>3</sup> Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon1, CNRS, Institut Lumière Matière (ILM) UMR 5306, Villeurbanne, France

\*jc.beugnot@femto-st.fr

En 1922, Léon Brillouin publie seul et en français, dans les comptes rendus de physique un article sur la diffusion de la lumière par des ondes acoustiques d'origine thermique. Il démontre que ces ondes acoustiques induisent un décalage en fréquence de la lumière diffusée. L'invention des lasers a rendu cette diffusion très efficace et permis de nombreux développements technologiques et industriels en spectroscopie des matériaux, microscopie médicale, lasers et capteurs distribués à fibres optiques.

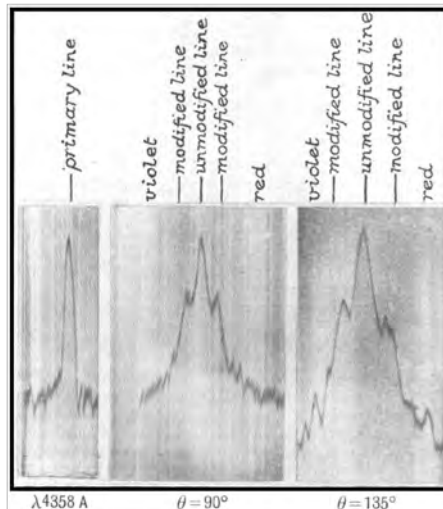
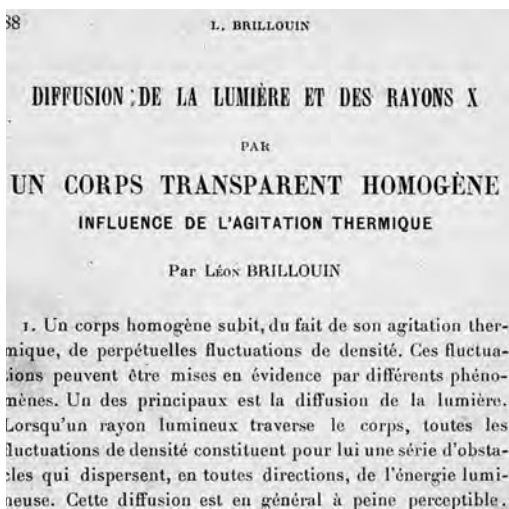


Figure 1 : À gauche, copie de la première page de l'article publié par Léon Brillouin en 1922 [1]. À droite, vérification expérimentale de la diffusion Brillouin dans le benzène par E. Gross en 1930. Source [2], avec autorisation ©Nature.

<https://doi.org/10.1051/photon/202211426>

Deux ans après la publication de sa thèse, Léon Brillouin publie son travail sur la diffusion de la lumière par des ondes acoustiques d'origine thermique [1]. Ce

travail théorique dont on trouve des traces dans les notes de Brillouin dès 1914 [2], avait pour objectif initial de compléter la théorie d'Einstein sur les solides avec le modèle spécifique de température de Debye dans le but de définir un solide parfait (en

analogie aux gaz parfait) [3]. Dans cet article, il pose la question comment la présence d'une onde élastique dans un milieu transparent trouble-t-elle la propagation d'un rayon lumineux ? Il aborde cette question *via* la notion d'ondes et une construction

géométrique de l'interaction. Il propose une relation analytique qui lie la fréquence de la lumière diffusée à la longueur d'onde de la source et à la vitesse des ondes élastique (voir encart). Léon Brillouin écrit à la fin de son introduction (Fig. 1) que ce phénomène est à peine perceptible et la vérification expérimentale est très difficile de par le très faible écart en fréquence entre les deux ondes optiques (quelques GHz) et de la nécessité d'une source de lumière intense pour générer des ondes acoustiques dans un matériau. Six ans plus tard, le physicien indien C. V. Raman observe une diffusion inélastique à plus haute fréquence due aux vibrations moléculaires de la matière, puis en 1930, le physicien Russe Evgueni Gross valide finalement la théorie de Brillouin en mesurant la diffusion dans des liquides [2]. La qualité de la mesure est impressionnante pour l'époque car les ondes diffusées dans le Benzène pour des angles de diffusion de 90° et 135° sont décalées respectivement de 4.7 pm (5 GHz) et 6.3 pm (6.6 GHz) par rapport à l'onde incidente. Cette mesure du spectre diffusé en fonction de l'angle de diffusion ( $\mathbf{k}$ ,  $\mathbf{k}_s$ ) par Gross démontre sans ambiguïté que les prédictions de Brillouin sont correctes.

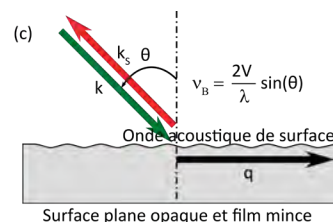
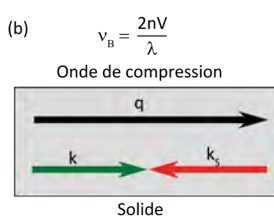
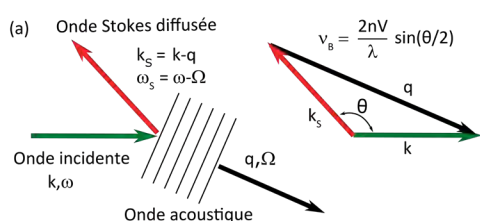
Ainsi, une mesure précise des fréquences des ondes diffusées permet de déterminer la vitesse du son et les constantes élastiques qui régissent la cohésion du matériau (voir encart). Tout d'abord réservée aux milieux transparents (solide et liquide) via l'utilisation des ondes acoustiques de volume (compression et cisaillement), la diffusion Brillouin a pu être utilisée avec des ondes acoustiques de surface pour des milieux plus opaques aux ondes électromagnétiques. L'onde de surface la plus rencontrée est l'onde de Rayleigh qui se propage parallèlement à la surface d'un milieu semi infini ou épais, avec une vitesse plus faible que la vitesse du son transverse. La pression et la température peuvent aussi être modifiées et étudiées lorsqu'une enclume diamant, un cryostat/four est couplé au spectromètre Brillouin. R. Vacher du laboratoire Charles Coulomb à Montpellier a fortement participé aux développements de ces méthodes.

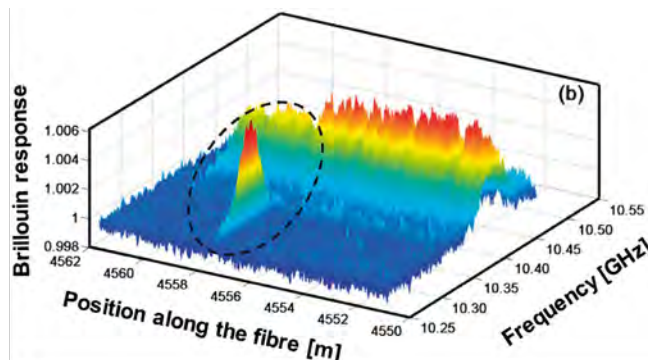
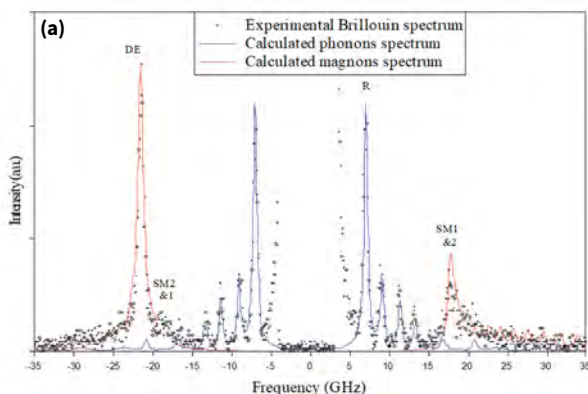
Avec l'invention des lasers dans les années 1960, les phénomènes de diffusion de la lumière (Rayleigh, Brillouin et Raman) se sont imposés comme des outils puissants pour la caractérisation des propriétés optiques, élastiques et chimiques dans

la matière condensée. La possibilité d'utiliser des sources monochromatiques puissantes permet d'observer plus directement le caractère non linéaire des interactions. Chiao et Townes ont démontré en 1964 ce que l'on appelle l'effet Brillouin « stimulé » [4]. C'est à dire la possibilité de générer de manière cohérente une onde acoustique hypersonore en illuminant un matériau avec une seule onde optique incidente. Sous certaines conditions, toute la lumière peut être réfléchiée dans le régime de « miroir Brillouin ». L'arrivée des fibres optiques dans les années 70 où les ondes optiques sont guidées et interagissent avec la matière sur de très grandes longueurs ont rapidement montré que la puissance optique était limitée à quelques milliwatt pour les transmissions optiques longue distance à cause de cet effet de miroir Brillouin. Pour des sources de lumière continue ou pour des impulsions supérieures à quelques nanoseconde (temps de vie de l'onde acoustique dans la silice), la lumière transmise est saturée et toute la lumière est réfléchiée. Cet effet est encore aujourd'hui très limitant pour les lasers et les lidars à fibres optiques. Néanmoins, l'onde stokes rétrodiffusée possède une meilleure ●●●

La diffusion inélastique de la lumière par des ondes acoustiques se caractérise par un décalage de la fréquence de l'onde diffusée dans la gamme du GHz à quelques centaines de GHz (i. e.  $<1\text{cm}^{-1}$  à  $5\text{cm}^{-1}$ ). Lorsqu'une onde incidente est diffusée par une onde acoustique, l'onde Stokes est diffusée et décalée en fréquence par effet doppler. Dans le cas général (a), le décalage en fréquence dépend de la vitesse des ondes acoustiques mises en

jeu, de la longueur d'onde de la source et de l'angle de diffusion entre l'onde incidente ( $\mathbf{k}$ ) et l'onde diffusée ( $\mathbf{k}_s$ ). Dans un solide ou un guide d'onde, représenté dans le cas (b), la géométrie de rétro-diffusion impose un angle plat entre les ondes électromagnétiques et les ondes acoustiques de compression. Il est également possible de mettre en jeu des ondes acoustiques de surface dans des films minces ou des matériaux opaques (c).





cohérence que l'onde incidente grâce à l'inertie de l'onde acoustique. Cet effet de laser Brillouin est très largement mis à profit pour améliorer les performances des lasers.

Au début des années 70, John Sandercock développe considérablement la spectroscopie Brillouin en concevant un spectromètre basé sur le balayage de l'espace d'une cavité Fabry-Pérot qui permet un très bon filtrage des raies Brillouin [5]. En d'autres termes, pour chaque longueur d'onde transmise, les photons sont détectés par un compteur de photons et l'obtention d'un spectre peut nécessiter plusieurs heures d'acquisition si la réponse du milieu est faible. Néanmoins le tandem Fabry-Pérot offre une réjection de la raie élastique inégalée et la possibilité d'explorer de larges gammes de fréquences (de qqz GHz à 1500 GHz), ce qui en fait toujours un outil de choix pour l'étude des matériaux solides tels que les couches minces, les membranes et même les nanoparticules. Plus étonnamment, les propriétés magnétiques (anisotropies magnétiques, aimantation, facteur

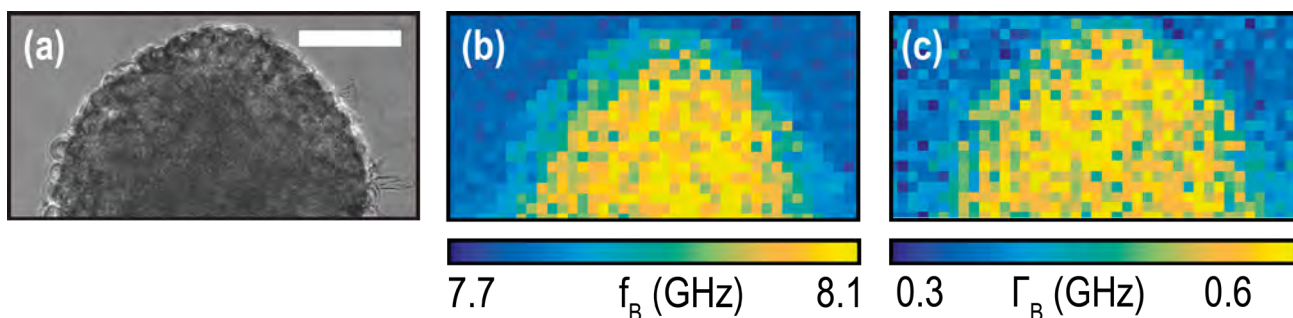
**Figure 2 :** (a) Rétrodiffusion Brillouin par des ondes acoustiques (R:Rayleigh) et de spin (DE: Damon-Eshbach) de surface dans un alliage ferromagnétique  $Fe_{80}Ni_{20}$  d'une épaisseur de 323 nm. (b) Mesures distribuées de la rétrodiffusion Brillouin le long d'une fibre optique, le spectre entouré correspond à un point chaud. DOI : 10.1109/JLT.2010.2073443 avec autorisation © OSA.

gyromagnétique) peuvent également être étudiées par diffusion Brillouin. Cette fois-ci, c'est le couplage magnéto-optique de la lumière avec les ondes de spin (fluctuation de l'aimantation) qui provoque le déplacement de la fréquence Brillouin (Fig. 2a). Il se trouve que ce couplage est extraordinairement fort et a favorisé l'essor rapide dans les années 80 des études de films minces, bicouches et multicouches qui sont utilisés dans les dispositifs magnéto-résistifs (prix Nobel 2007 Gründberg & Fert). Récemment, la diffusion Brillouin est devenue l'outil idéal pour quantifier l'interaction Dzyaloshinskii-Moriya à

l'interface entre un métal et un matériau ferromagnétique.

Les années 90 voient également apparaître la possibilité de stimuler la diffusion Brillouin *via* l'utilisation de deux ondes optiques contra-propagatives. Par exemple, dans une fibre optique dont la fréquence Brillouin est de l'ordre de 11 GHz (pour une onde incidente à 1550 nm), l'avènement des modulateurs électro-optique et des filtres de Bragg a permis le développement des capteurs distribués de température et de contraintes. En effet, la modification locale de la vitesse des ondes élastiques par la température ou par une contrainte

**Figure 3 :** Image en microscopie optique (a) d'un sphéroïde de cellules tumorale et les cartes micro-Brillouin (fréquence de résonance et largeur à mi-hauteur) correspondantes (b et c). DOI : 10.1364/BOE.401087 avec autorisation © OSA.



Au cours des 10 dernières années, la spectroscopie Brillouin dans les matériaux biologiques a pris également une place importante. Il est en effet possible d'extraire de ces mesures la rigidité (position du pic) et la viscosité (largeur du pic) et de suivre l'évolution des propriétés mécaniques d'un milieu biologique en fonction de stimuli externes ou lors de la croissance cellulaire.

mécanique peut être localisée par une mesure de temps de vol de l'onde diffusée et le décalage en fréquence renseigne de manière absolue sur la température ou les contraintes locales (Fig. 2.b).

Au cours des 10 dernières années, la spectroscopie Brillouin dans les matériaux biologiques a pris également une place importante. Il est en effet possible d'extraire de ces mesures la rigidité (position du pic) et la viscosité (largeur du pic) et de suivre l'évolution des propriétés mécaniques d'un milieu biologique en fonction de stimuli externes ou lors de la croissance cellulaire. Ce domaine, aujourd'hui appelé Bio-Brillouin, s'est particulièrement développé, d'une part grâce au développement de la micro-spectroscopie confocale et d'autre part par le développement d'un spectromètre basé sur un élément optique appelé VIPA (Virtual Image Phase Array). Le VIPA est un étalon Fabry-Perot qui disperse spatialement la lumière et offre avec des caméras CMOS des temps d'acquisitions inférieurs à une seconde par spectre dans les matériaux biologiques. Ces très bonnes

performances permettent la cartographie du signal Brillouin dans des milieux biologiques qui peut être corrélée avec les propriétés mécaniques du système et de potentielles modifications induites par des stimuli extérieurs ou une pathologie (Fig. 3).

Après cent ans, l'effet Brillouin est toujours largement utilisé expérimentalement (sources visible, UV, IR, RX) et dans des applications (spectroscopie, microscopie, biologie, lasers, capteurs, mécanique, magnétisme) qui s'étendent bien au-delà de la matière condensée. L'utilisation de lasers et de systèmes de mesures optoélectroniques performants permettent aujourd'hui d'envisager des utilisations conjointes des diffusions Raman et Brillouin pour caractériser la matière de l'échelle microscopique à macroscopique. Ce centenaire est aussi l'opportunité de se rappeler qu'au-delà de cette diffusion qui porte son nom, Léon Brillouin a contribué de manière exceptionnelle à la Science en abordant avec pertinence et originalité la physique des ondes. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] L. Brillouin, *Annales de physique* **9**, 88-122, (1922).
- [2] E. Gross, *Nature* **126**, 201-202 (1930) & *Nature* **129**, 722-723 (1932).
- [3] R. Mosseri "Léon Brillouin à la croisée des ondes," Belin (Paris, 1999).
- [4] R. Y. Chiao, C. H. Townes, and B. P. Stoicheff, *Physical Review Letters* **12**, 592-595 (1964).
- [5] J. R. Sandercock, *Optics communications* **2**, (1970).

# L'OPTIQUE

au service des sciences de la vie



Filtres, objectifs, lentilles et bien plus : composants de précision pour les applications des sciences de la vie

- Un guichet unique avec plus de 34.000 produits différents
- Près de 2 millions de composants en stock pour une expédition rapide
- Assistance et fabrication du prototype à la production
- Des applications pour l'OCT, l'ophtalmologie, l'imagerie par fluorescence, le qPCR, etc.

**EO - Votre partenaire en optique pour les sciences de la vie**

Pour en savoir plus :

www.edmundoptics.fr/  
life-sciences



+33 (0) 820 207 555  
sales@edmundoptics.fr