



**HAL**  
open science

# OBSERVATION DE LA DIFFUSION BRILLOUIN DE SURFACE DANS UNE FIBRE OPTIQUE A CRISTAL PHOTONIQUE

Joël Cabrel Tchahame, Jean-Charles Beugnot, Kien Phan Huy, Vincent Laude, Alexandre Kudlinski, Thibaut Sylvestre

► **To cite this version:**

Joël Cabrel Tchahame, Jean-Charles Beugnot, Kien Phan Huy, Vincent Laude, Alexandre Kudlinski, et al.. OBSERVATION DE LA DIFFUSION BRILLOUIN DE SURFACE DANS UNE FIBRE OPTIQUE A CRISTAL PHOTONIQUE. Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG'36) , Jul 2016, Bordeaux, France. hal-01609155

**HAL Id: hal-01609155**

**<https://hal.science/hal-01609155>**

Submitted on 3 Oct 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# OBSERVATION DE LA DIFFUSION BRILLOUIN DE SURFACE DANS UNE FIBRE OPTIQUE À CRISTAL PHOTONIQUE

Joël Cabrel Tchahame<sup>1</sup>, Jean-Charles Beugnot<sup>1</sup>, Kien Phan Huy<sup>1</sup>,  
Vincent Laude<sup>1</sup>, Alexandre Kudlinski<sup>2</sup>, Thibaut Sylvestre<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Laboratoire PhLAM, IRCICA, UMR 8523 CNRS, Université de Lille 1, Villeneuve D'Asq, France

thibaut.sylvestre@univ-fcomte.fr

## RÉSUMÉ

Dans cet article, nous rapportons l'observation originale d'un nouveau mode de diffusion Brillouin de la lumière induite par des ondes acoustiques de surface dans une fibre optique à cristal photonique. Cette observation est confirmée par une simulation numérique de l'équation élasto-dynamique. Cet effet pourrait être exploité pour concevoir des capteurs optiques très sensibles et des fonctions optiques avancées basées sur les ondes acoustiques de surface, ou encore pour mesurer l'uniformité des fibres optiques microstructurées.

**MOTS-CLEFS :** *Fibres optiques, Diffusion Brillouin; Ondes acoustiques de surface*

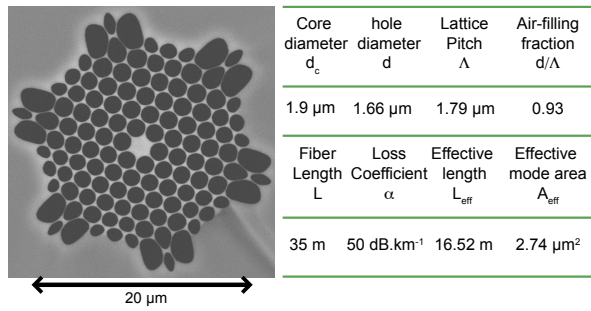
## 1. INTRODUCTION

Connue depuis les années 1970, la diffusion Brillouin de surface (DBS) est généralement utilisée comme une méthode très performante de mesure sans contact des propriétés élastiques de couches minces, d'interfaces ou encore de matériaux opaques multi-couches [1]. Contrairement à la diffusion Brillouin dite de volume, la DBS provient essentiellement de phonons présents à la surface des matériaux. Ces phonons se déplacent avec une faible amplitude, créant ainsi une légère corrugation de surface, qui va diffracter la lumière incidente avec un décalage en fréquence lié à la vitesse acoustique de surface. Bien qu'elle soit principalement présente à la surface de matériaux opaques, la DBS vient récemment d'être observée dans les microfibres optiques effilées [2]. La lumière qui s'y propage y est tellement confinée qu'elle peut générer et interagir avec des ondes acoustiques localisées sous la surface du guide. Ces ondes se réfèrent plus particulièrement à des ondes de Rayleigh lorsque qu'elles atteignent la vitesse de phase ultime, vallant par exemple  $3400 \text{ m.s}^{-1}$  pour la silice [3]. Leur fréquence acoustique dépendent également de l'indice de réfraction, et ces ondes peuvent être éventuellement amplifiées et contrôlées par la pression de radiation [2].

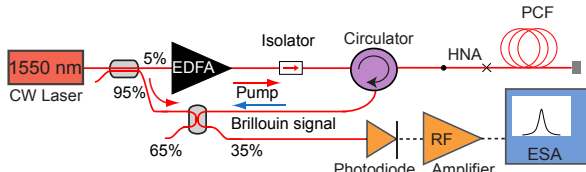
Dans cette communication, nous montrons que la diffusion Brillouin de surface existe également dans les fibres optiques microstructurées (FOM), dont la taille du coeur est proche de la longueur d'onde optique et dont le taux de remplissage d'air est relativement important, de manière à limiter les pertes élastiques dans la gaine microstructurée. Nos résultats de mesures montrent la génération de nouvelles fréquences dans le spectre Brillouin autour de 6 GHz, en bon accord avec les calculs de vitesse de phase et les simulations numériques de l'équation élasto-dynamique. Nous présenterons également des mesures de sensibilité à la température de ces ondes surfaciques pour des applications aux capteurs optiques.

## 2. EXPÉRIENCES

La figure 1(a) montre une image MEB de la section transverse de la fibre PCF conçue et fabriquée au laboratoire PhLAM à Lille pour observer les ondes de surface. Le tableau résume ses principaux paramètres opto-géométriques, dont son diamètre de coeur  $d_c=1,9 \mu\text{m}$  et sa fraction d'air  $d/\Lambda=0,93$  importante, qui lui confère des propriétés opto-acoustiques inédites. Le dispositif expérimental, présenté sur la figure 1(b), est basé sur une technique de détection hétérodyne, dans laquelle un laser DFB continu à  $1,55 \mu\text{m}$  est amplifié puis couplé de façon cohérente avec la lumière rétrodiffusée par la fibre PCF. On



(a) Photonic crystal fiber cross-section and parameters



(b) Experimental setup

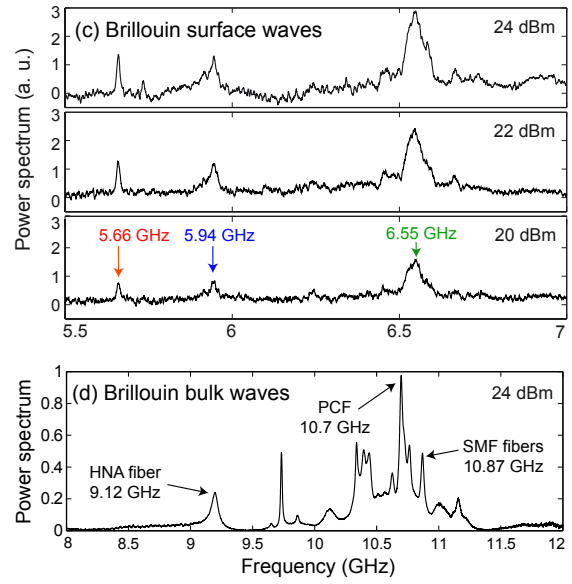


FIGURE 1 : (a) Image de la section transverse de la fibre à cristal photonique et ses paramètres opto-géométriques. (b) Dispositif expérimental pour mesurer la rétrodiffusion Brillouin. HNA : fibre a forte ouverture numérique. (c) Spectres Brillouin en fonction de la puissance optique montrant 3 ondes de surface dans la gamme 5-7 GHz. (d) Spectre Brillouin dans la gamme 8-12 GHz montrant les ondes de volume dans la PCF, ainsi que celles dans la fibre à forte ouverture numérique (HNA) et les fibres standards (SMF).

vient ensuite détecter le battement entre ces 2 ondes à l'aide d'une photodiode rapide et d'un analyseur de spectre électrique [4].

La figure 1(c) présente les spectres Brillouin mesurés pour 3 puissances différentes, et révélant ainsi la génération de nouvelles raies Brillouin inédites, respectivement à 5,66 GHz, 5,94 GHz, et 6,55 GHz. En calculant les vitesses acoustiques correspondantes à partir de la relation d'accord de phase entre les vecteurs d'ondes optique et acoustique, i.e.  $\beta_{op} = 2\beta_{ac}$  pour une interaction contra-propagative, on peut aisément vérifier que ces raies proviennent effectivement d'ondes de surface. En effet, la vitesse de phase est alors donnée par la relation suivante  $V_S = \lambda v_B / 2n_{\text{eff}}$ , avec  $v_B$  la fréquence Brillouin,  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  la longueur d'onde optique,  $n_{\text{eff}} = 1.3622$  l'indice effectif du mode fondamental (préalablement calculé par une méthode d'éléments finis, COMSOL, cf. Fig. 2). Si l'on prend en exemple la fréquence centrale à 5.94 GHz, cela donne une vitesse de  $3380 \text{ m.s}^{-1}$ , en parfait accord avec la théorie [3]. Ces vitesses sont typiques des ondes de Rayleigh qui combinent à la fois une composante radiale et une autre axiale et qui sont localisées à l'interface entre le coeur et les trous de la fibre. Pour compléter, la figure 1(d) présente un spectre Brillouin dans la gamme 8-12 GHz. On peut y voir un grand nombre de raies Brillouin. Deux d'entre elles proviennent des autres fibres dans le dispositif expérimental (HNA et SMF), alors que les autres sont la signature de plusieurs ondes acoustiques hybrides de volume, comme ceux observés en 2006 par Dainese et al. [5].

### 3. SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Afin de mieux comprendre d'où proviennent ces raies Brillouin, nous avons effectué des simulations numériques basées sur l'équation élasto-dynamique incluant la force électrostrictive :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - [C_{ijkl} u_{k,l}] = T_{ij,j}^{es}, \quad (1)$$

où  $\rho$  est la densité,  $u_i$  sont les déplacements,  $C_{ijkl}$  est le tenseur élastique d'ordre 4.  $T_{ij}^{es} = -\epsilon_0 \chi_{klj} E_1 E_2^*$  est le tenseur électrostrictif, avec  $\chi_{klj} = \epsilon_{km} \epsilon_{ln} p_{mni}$  la susceptibilité et  $p_{mni}$  le tenseur élasto-optique.

$\epsilon_0$  est la permittivité du vide.  $E_1$  et  $E_2$  sont respectivement les champs électriques des ondes pompe et Stokes de fréquences  $\omega_{1,2}$  et vecteurs d'onde  $k_{1,2}$  [6]. En résolvant numériquement cette équation, on obtient la densité d'énergie cinétique et les déplacements induits par l'électrostriction. Les résultats sont tracés sur la figure 2(a) qui montrent en fausse couleur le spectre Brillouin théorique en fonction de la fréquence et du diamètre du coeur de la fibre. Comme on peut le constater, le spectre Brillouin fait apparaître une série de fréquences autour de 6 GHz et d'autres proches de 11 GHz, comme celles mesurées expérimentalement. La figure 2(b) illustre le profil transverse du mode optique fondamental et les densités d'énergie cinétique associées aux ondes de surface  $S_1$  et  $S_2$  et de volume  $H_1$ , indiquées sur la figure 2(a).

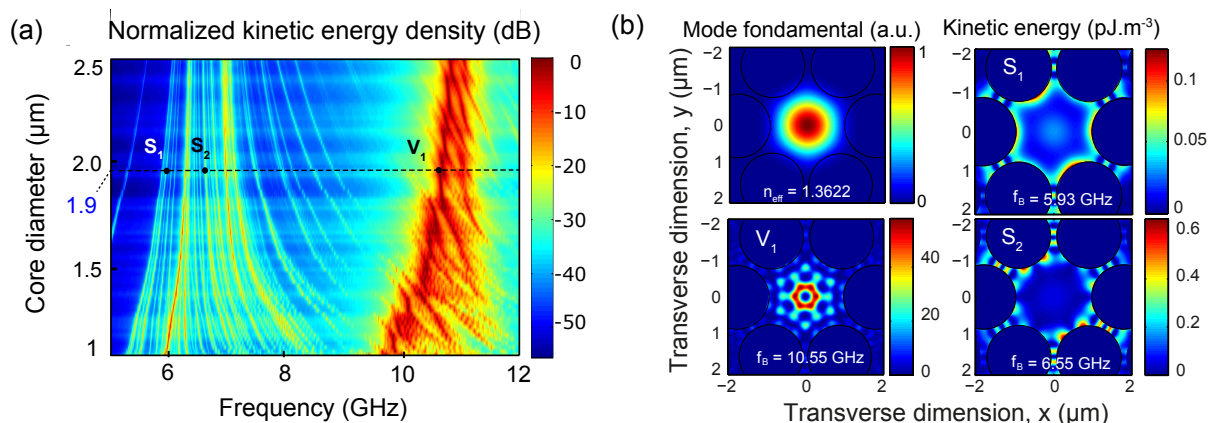


FIGURE 2 : Résultats de simulations numériques : (a) Densité d'énergie cinétique en fonction de la fréquence acoustique et du diamètre de douceur de la fibre PCF montrant les ondes de surface S et de volume V. (b) Profils transverses du mode optique fondamental (module du vecteur de Poynting), et de l'énergie cinétique des ondes de surface  $S_1$  et  $S_2$  et de volume  $H_1$  notée en (a).

## CONCLUSION

En conclusion, en explorant la rétrodiffusion Brillouin dans une fibre optique microstructurée à petit coeur et à haute fraction d'air, nous avons démontré l'existence d'ondes de Rayleigh localisées dans le coeur de la fibre à la périphérie des trous d'air. Sensibles à l'état de surface, ce nouveau mode de diffusion Brillouin pourrait être utilisé pour concevoir des capteurs optiques ou des fonctions optiques pour les télécommunications et notamment le filtrage micro-onde.

## RÉFÉRENCES

- [1] P. Mutti, C. E. Bottani, G. Ghislotti, M. Beghi, G. A. D. Briggs, and J. R. Sandercock, *Advances in Acoustic Microscopy*, ch. Surface Brillouin Scattering—Extending Surface Wave Measurements to 20 GHz, pp. 249–300. Boston, MA : Springer US, 1995.
- [2] J.-C. Beugnot, S. Lebrun, G. Pauliat, H. Maillotte, V. Laude, and T. Sylvestre, “Brillouin light scattering from surface acoustic waves in a subwavelength-diameter optical fibre,” *Nature communications*, vol. 5, 2014.
- [3] R. N. Thurston, “Elastic waves in rods and clad rods,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 64, no. 1, pp. 1–37, 1978.
- [4] J. C. Tchahame, J.-C. Beugnot, A. Kudlinski, and T. Sylvestre, “Multimode Brillouin spectrum in a long tapered birefringent photonic crystal fiber,” *Opt. Lett.*, vol. 40, pp. 4281–4284, Sep 2015.
- [5] P. Dainese, P. S. J. Russell, N. Joly, J. Knight, G. Wiederhecker, H. L. Fragnito, V. Laude, and A. Khelif, “Stimulated Brillouin scattering from multi-ghz-guided acoustic phonons in nanostructured photonic crystal fibres,” *Nature Physics*, vol. 2, no. 6, pp. 388–392, 2006.
- [6] J.-C. Beugnot and V. Laude, “Electrostriction and guidance of acoustic phonons in optical fibers,” *Phys. Rev. B*, vol. 86, p. 224304, Dec 2012.