

SPECTROSCOPIE MOYEN INFRAROUGE DÉPORTÉE À BASE DE FIBRES CREUSES ANTI-RÉSONANTES

Simon Le Méhauté¹, Loïc Bodiou¹, Xavier Insou^{1,4}, Joël Charrier¹, Thierry Chartier¹, Adil Aboucha², Laurent Provino², David Méchin², Lionel Quétel³, Sébastien Claudot⁴, Monique Thual¹

¹ Univ Rennes, CNRS, Institut FOTON - UMR 6082, F-22305 Lannion, France

² Photonics Bretagne, 4 Louis de Broglie, 22300 Lannion, France

³ IDIL Fibres Optiques, Espace Corinne Erhel, 4 Rue Louis de Broglie, 22300 Lannion, France

⁴ SOURIAU, ITD, Eaton, 89 Route de Saint-Hubert, 72470 Champagné, France

RÉSUMÉ

Nous proposons l'utilisation des fibres creuses anti-résonantes afin de déporter des mesures spectroscopiques en infrarouge moyen notamment au sein d'environnements sévères. Une fibre spécialement développée dans le cadre de ce projet montre une atténuation linéique inférieure à 1 dB/m dans la bande 3,7-4,8 μm . Une mesure du CO_2 autour de 4,3 μm est présentée à titre d'illustration.

MOTS-CLEFS : fibre anti-résonante ; spectroscopie ; moyen infrarouge

1. INTRODUCTION

La spectroscopie d'absorption laser est une technique communément utilisée afin de mesurer la composition de gaz de combustion [1]. Une telle donnée s'avère utile pour optimiser la consommation de carburant et prévenir le vieillissement prématuré d'un moteur. Une meilleure connaissance des émissions polluantes permet également d'en limiter l'impact sur la santé humaine et l'environnement. La gamme moyen infrarouge (MIR) est d'un intérêt particulier car elle contient les raies d'absorption les plus intenses de produits de combustion communs comme les CO_x (4-5 μm) ou les NO_x (5-7 μm). En pratique, l'utilisation de fibres optiques permet de concevoir des capteurs spectroscopiques intrinsèquement alignés, mécaniquement stables, compacts et par conséquent adaptés à la mesure en conditions sévères (haute température, pression et présence de polluants) comme rencontrées au sein de moteurs. Bien que les fibres optiques en chalcogénures par exemple soient tout à fait à même de conduire un signal autour des bandes d'absorption des CO_x ou NO_x dans le MIR, elles peuvent difficilement opérer au delà de 200 °C sans refroidissement actif [2]. Les fibres en saphir peuvent quant à elles endurer une température jusqu'à 2000 °C mais leur atténuation augmente drastiquement après 4 μm .

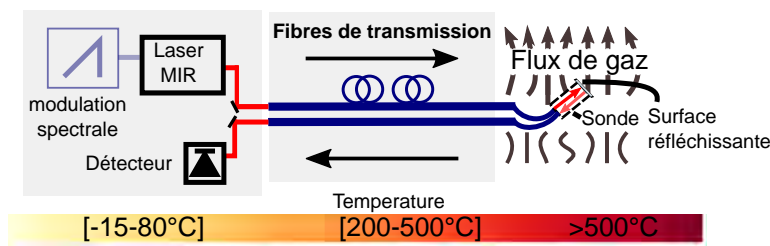


FIGURE 1 : Architecture envisagée pour un capteur spectroscopique moyen infrarouge dédié à la caractérisation de gaz de combustion

Cette étude vise à étudier des fibres creuses anti-résonante (AR) en verre comme canal de transmission pour des capteurs spectroscopiques dans le MIR. Ces fibres constituent une solution montrant une bonne transmission dans le MIR et pouvant supporter une température jusqu'à 1000 °C [3]. L'architecture envisagée pour la caractérisation de flux d'échappement est montrée en FIGURE 1. Elle comprend

un laser MIR modulé en fréquence et un lien de transmission fibré afin d'acheminer le signal vers une sonde située dans le flux de gaz. Un lien similaire permet de retourner la lumière vers un photodétecteur afin de réaliser l'analyse de la composition du mélange. En environnement avionique par exemple, ce lien pourrait localement être soumis à une température avoisinant les 500 °C.

2. CARACTÉRISATION DE L'ATTÉNUATION D'UNE FIBRE ANTI-RÉSONANTE

Une fibre optique AR en silice, au sein de laquelle sont agencés 8 capillaires identiques de diamètre $d=52,7 \mu\text{m}$, a été fabriquée par la méthode "stack-and-draw". Une image est présentée en FIGURE 2a. Les capillaires délimitent le coeur d'un diamètre $D=118,5 \mu\text{m}$. Au fil des années, un tel design souvent désigné comme "revolver nodeless" [4] s'est imposé puisqu'il s'avère optimal pour améliorer le confinement en ajustant notamment l'espace δ (ici $8,4 \mu\text{m}$) entre deux capillaires voisins.

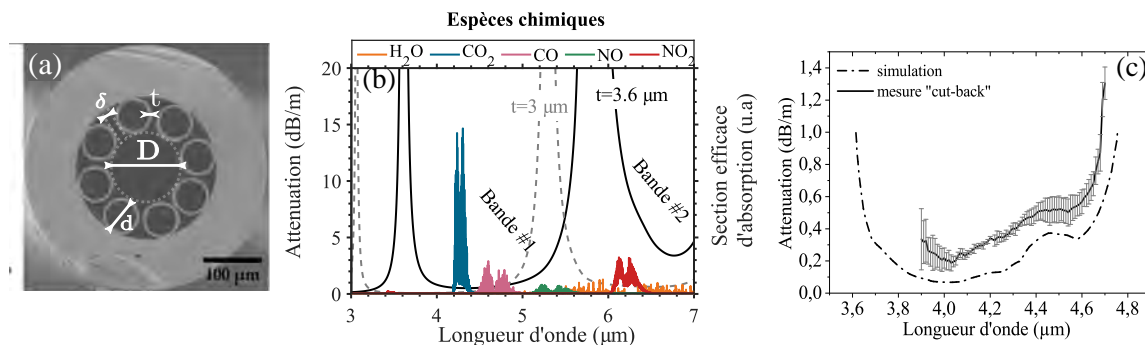


FIGURE 2 : (a) Image de la fibre AR obtenue au microscope (b) transmission théorique pour différentes épaisseurs de capillaires $t=3.6 \mu\text{m}$ (courbe noire) et $t=3 \mu\text{m}$ (courbe grise) comparée aux sections efficaces d'absorption de produits de combustion entre 2 et 7 μm (c) atténuation mesurée par la méthode cut-back pour une fibre AR avec $t=3.6 \mu\text{m}$ (courbe pleine) et simulation numérique par la méthode des éléments finis (courbe pointillée)

Le modèle analytique présenté par Bache et al [5], qui permet de calculer l'atténuation des fibres anti-résonantes, est utilisé afin de concevoir une fibre transparente dans la gamme 4-5 μm . Le résultat du calcul est tracé FIGURE 2b (courbe noire pleine) pour $t=3.6 \mu\text{m}$ et également pour $t=3 \mu\text{m}$ (courbe grise pointillée) afin d'illustrer l'influence de l'épaisseur des capillaires. Les sections efficaces d'absorption de produits de combustion (500 K, 2 atm) sont montrées conjointement (courbes de couleur). La "Bande #1" entre 4-5 μm présente un recouvrement entre les bandes d'absorption de CO et CO₂ et une faible atténuation de la fibre pour $t=3.6 \mu\text{m}$. Pour confirmer ces simulations, une mesure de l'atténuation a été réalisée par la technique "cut-back" entre 3.9 μm et 4.7 μm dans une fibre purgée (capillaires d'épaisseur 3.6 μm) afin d'éviter la forte absorption du CO₂ à 4.3 μm . Les résultats (FIGURE 2c) sont cette fois-ci comparés à des simulations numériques nécessitant plus de ressources (éléments finis) réalisées pour le mode fondamental. On constate à la fois une atténuation en deçà de 1 dB/m (en particulier 0,35 dB/m à 4,26 μm et 0,54 dB/m à 4,58 μm autour des résonances respectives de CO₂ et CO) et un accord satisfaisant entre le modèle et les mesures. De telles valeurs sont comparables ou inférieures à l'état de l'art [6]. Le décalage entre la courbe simulée et l'expérience peut s'expliquer par un couplage d'une partie du champ incident vers des modes d'ordre élevé qui possèdent une forte atténuation.

3. SPECTROSCOPIE D'ABSORPTION DU CO₂

En parallèle, nous avons réalisé des mesures de spectroscopie d'absorption du CO₂ en utilisant un QCL émettant dans une fenêtre de transmission de la fibre AR ($\lambda=4,3 \mu\text{m}$). Le laser est modulé en longueur d'onde (excursion spectrale de 0,45 nm) autour d'une raie d'absorption du CO₂. Le faisceau est dirigé vers une cellule de gaz de longueur 10 cm remplie d'un mélange CO₂/N₂ dont les fractions volumiques peuvent être modifiées à l'aide de contrôleurs de débit. Après mesure de l'intensité laser

transmise $I_T(t)$, la ligne de base $I_0(t)$ est déduite par un ajustement polynomial hors absorption. L'absorbance est alors définie par l'équation ci-après. Les courbes expérimentales obtenues pour différents débits de CO_2 (ajustées avec un modèle théorique) sont présentées FIGURE 3.

$$A[\lambda(t)] = -\ln\left(\frac{I_T[\lambda(t)]}{I_0[\lambda(t)]}\right) \quad (1)$$

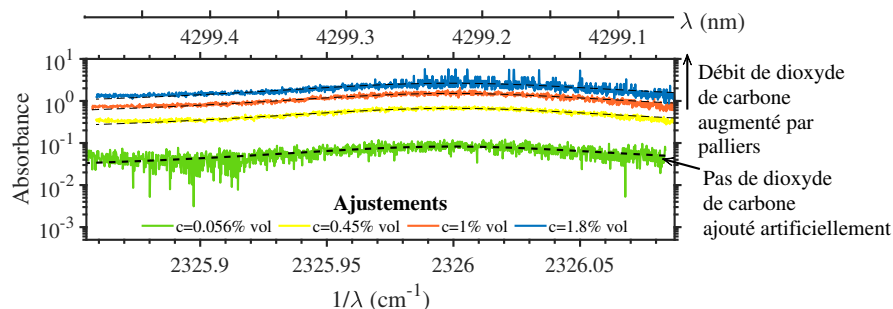


FIGURE 3 : Absorbance au sein de la cellule de gaz mesurée pour différents flux de CO_2 en fonction du nombre d'onde $1/\lambda$

Comme attendu, l'absorbance au sein de la cellule augmente conjointement avec le débit de dioxyde de carbone. Une concentration de 0.056 % vol est mesurée lorsque que la cellule reste ouverte, ce qui correspond à l'ambiante mesurée avec un capteur de CO_2 .

4. CONCLUSION

Nous avons mesuré les pertes de propagation d'une fibre à coeur creux anti-résonante en silice dans la gamme 3.7-4,8 μm . Les valeurs observées s'avèrent conformes à des simulations numériques. Des valeurs de 0,35 dB/m à 4,26 μm et 0,54 dB/m à 4,58 μm où se trouvent les raies d'absorption des CO_x ont été observées. Couplée aux bonnes propriétés thermomécaniques de la silice, une telle atténuation permet d'envisager l'implémentation de ces fibres au sein de capteurs spectroscopiques moyen infrarouge dédiés à la quantifications de ces espèces directement dans les gaz d'échappement.

Les auteurs remercient l'ANRT - CIFRE (2017/0695), la Région Bretagne (projet SMOGLESS 20005593 et CPER SOPHIE), Lannion-Trégor Communauté, l'Agence Nationale de la Recherche (ANR MID-VOC-17-CE09-0028-01), ainsi que Jonathan Lemaitre et Philippe Rochard pour la réalisation du système de purge.

RÉFÉRENCES

- [1] C. S. Goldenstein, R. Spearrin, J. B. Jeffries, and R. K. Hanson, "Infrared laser-absorption sensing for combustion gases," vol. 60, pp. 132–176, may 2017.
- [2] V. Artyushenko, A. Bocharnikov, T. Sakharova, and I. Usenov, "Mid-infrared fiber optics for 1—18 μm range : Ir-fibers and waveguides for laser power delivery and spectral sensing," *Optik & Photonik*, vol. 9, no. 4, pp. 35–39, 2014.
- [3] D. Liu, Q. Wu, C. Mei, J. Yuan, X. Xin, A. K. Mallik, F. Wei, W. Han, R. Kumar, C. Yu *et al.*, "Hollow core fiber based interferometer for high-temperature (1000° c) measurement," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 9, pp. 1583–1590, 2018.
- [4] I. A. Bufetov, A. F. Kosolapov, A. D. Pryamikov, A. V. Gladyshev, A. N. Kolyadin, A. A. Krylov, Y. P. Yatsenko, and A. S. Biriukov, "Revolver hollow core optical fibers," *Fibers*, vol. 6, no. 2, p. 39, 2018.
- [5] M. Bache, M. S. Habib, C. Markos, and J. Lægsgaard, "Poor-man's model of hollow-core anti-resonant fibers," *JOSA B*, vol. 36, no. 1, pp. 69–80, 2019.
- [6] M. S. Astapovich, A. N. Kolyadin, A. V. Gladyshev, A. F. Kosolapov, A. D. Pryamikov, M. M. Khudyakov, M. E. Likhachev, and I. A. Bufetov, "Efficient 4.42 μm raman laser based on hollow-core silica fiber," *arXiv preprint arXiv :1801.01729*, 2018.