

Étude comparative des méthodes d'interrogation à simple et double impulsion pour un capteur de vibrations basé sur un réflectomètre sensible à la phase interrogeant une cascade de FBGs

Fourier SANDAH^{*1,2}, Michel DOSSOU¹, Marc WUILPART²

¹Université d'Abomey-Calavi, EPAC (Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi), LETIA, URPHORAN, Abomey-Calavi, 01 BP 2009 Cotonou, Bénin.

²Université de Mons, Faculté Polytechnique, Service d'Electromagnétisme et de Télécommunications, Boulevard Dolez 31, 7000, Mons, Belgique.

*Contacts : Tel: (+32) 496 95 84 70, e-mail : fourier.sandah@umons.ac.be

Résumé :

Une étude comparative de deux techniques d'interrogation de la fibre (interrogations par simple et double impulsion) a été réalisée dans le contexte de la réflectométrie optique sensible à la phase assistée par réseaux de Bragg. Il en résulte que les deux techniques sont efficaces pour la détection des vibrations externes qui sont appliquées sur la fibre. La technique de double impulsion permet cependant de réduire considérablement la longueur d'interaction entre le signal interrogateur et la fibre, ce qui conduit à une réduction du bruit Rayleigh..

Introduction

Ces dernières années, l'émergence des capteurs à fibres optiques en particulier les capteurs distribués (*Distributed Fibre Optics Sensors (DFOS)*) a suscité de l'engouement grâce à une panoplie de domaines d'application [1]. Parmi ces applications, la surveillance des infrastructures de transport telles que les chemins de fer, les barrages, les tunnels, les autoroutes, les ponts, et les pipelines occupe une place prépondérante et suscite beaucoup d'intérêts. En effet, l'avantage de la surveillance des infrastructures ou *Structural Health Monitoring (SHM)* permettrait, non seulement de suivre l'utilisation de ces infrastructures en temps réel mais aussi de détecter à temps leurs défauts afin de prévenir leur effondrement ou tout autre évènement indésirable. Les *DFOS* se basent sur des méthodes de mesure des phénomènes physiques tels que les effets Rayleigh, Brillouin ou Raman. Les réflectomètres sensibles à la phase du signal rétrodiffusé Rayleigh ou (*Phase-Optical Time Domain Reflectometry (ϕ -OTDR)*) permettent de réaliser ce type de capteur. Malheureusement, la rétrodiffusion Rayleigh est faible et ne permet pas d'obtenir un grand rapport signal sur bruit. La fibre peut donc être remplacée par une mise en cascade de réseaux de Bragg (*FBG, Fibre Bragg Grating*) car ceux-ci, possèdent un coefficient de réflexion nettement plus important [2]. Dans ce contexte, deux techniques d'interrogation de la fibre ont été proposées pour interroger une cascade de *FBGs* afin de mesurer les interférences provenant de deux *FBGs* successifs : interrogation à l'aide d'une large impulsion ou d'une double impulsion. Les deux approches sont néanmoins sujettes à des effets indésirables tels que les effets de polarisation et de *spectral shadowing*. Dans le cadre de ce travail, les deux méthodes seront comparées en termes d'implémentation et de rapport signal/bruit.

1- Le banc expérimental

Le banc expérimental est subdivisé en trois parties : la source, le récepteur et la fibre optique sous test. Pour la source, un laser à bande très étroite (*Narrow Linewidth Laser (NLL)*) permet de générer un signal lumineux très cohérent et continu avec une largeur de raie de 0.1 kHz et une longueur d'onde de 1552.5 nm. Ensuite, un générateur de fonction (*Pulse Generator (PG)*) permet de générer les différents trains d'impulsion. La durée d'une simple impulsion est de 130 ns. Pour la double impulsion, une suite de deux impulsions rectangulaires de durée 35 ns chacune espacées de 50 ns a été générée. Un modulateur acousto-optique (*Acoustic Optical Modulator (AOM)*) permet de convertir le signal électrique en un signal optique avec une fréquence de répétition de 20 kHz entre les trains d'impulsion tout en respectant la durée entre les impulsions. Le signal lumineux ainsi généré est amplifié par un amplificateur (*Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA)*). Ensuite, le signal lumineux traverse un filtre passe-bande (*Pass Band Filter (PBF)*) de 1 nm de bande passante et est finalement injecté dans la fibre par un circulateur optique à trois ports. Le signal rétrodiffusé/réfléchi est détecté par le récepteur via le port 3 du circulateur optique. Le récepteur est constitué d'une photodiode (PD) avec une transimpédance d'amplification, d'un amplificateur optique qui amplifie les signaux à la longueur d'onde 1552.5 nm et d'une carte d'acquisition (*Data Acquisition Card (DAQ)*) avec un débit d'échantillonnage de 1 GS/s.

Dans le cas de notre étude, une fibre de 3 km comprenant quatre FBGs identiques de faible réflectivité (0.04%) a été utilisée. Les quatre FBGs ont les mêmes caractéristiques spectrales et la même longueur d'onde de Bragg (1552.5 nm), avec une largeur de bande de 2 nm et une longueur de 4 mm. Le pas d'inscription des FBGs est de 536.42 nm. Une bobine amorce de 2180 m a été utilisée suivie de la série des quatre FBGs espacés de 10 m (L_{FBG}). La fibre entre le deuxième et le troisième FBG a été maintenue sur un tuyau attaché à un *shaker* (SHR) et permet de générer une vibration de 2 kHz entre le deuxième et le troisième FBG. Le shaker a une accélération de 1g. La figure 1 présente l'installation expérimentale réalisée.

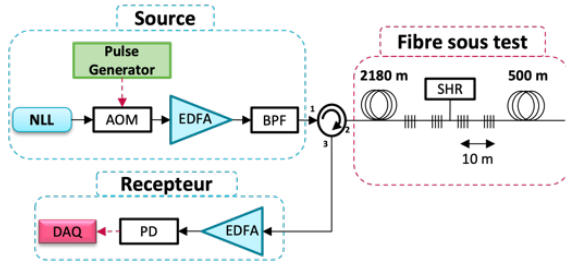


Figure 1 : Installation expérimentale

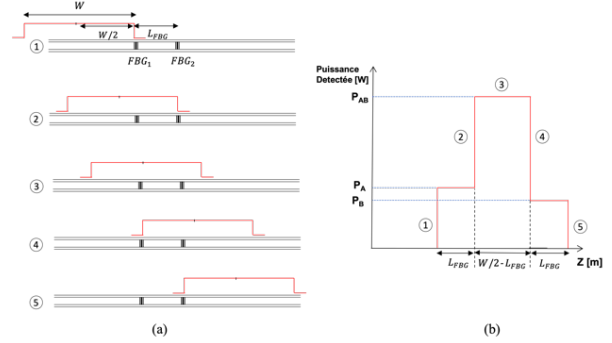


Figure 2 : Technique d'interrogation à simple impulsion

2- Technique à simple impulsion

Soit W la largeur de l'impulsion injectée dans la fibre. Le signal qui revient au ϕ -OTDR est essentiellement constitué des signaux réfléchis par les différents FBGs. L'interférence entre deux FBG est possible si $W/2 > L_{FBG}$ [2]. La figure 2 (a) illustre la propagation d'une impulsion dans une fibre possédant deux FBGs identiques. La figure 2 (b) représente la trace ϕ -OTDR enregistrée. Le ϕ -OTDR détecte les puissances réfléchies P_A , P_{AB} , P_B qui correspondent respectivement au signal réfléchi par le premier FBG, l'interférence entre le premier et le deuxième FBG et le signal réfléchi par le deuxième FBG et zéro partout ailleurs en supposant que la rétrodiffusion Rayleigh est négligée.

3- Technique à double impulsion

La technique de double impulsion [3] se base sur une paire d'impulsions dont le délai spatial entre elles correspond à $2L_{FBG}$ (trajet aller-retour entre deux FBGs). La figure 3 présente la propagation de la double impulsion dans une fibre à deux FBGs. Le ϕ -OTDR détecte les puissances réfléchies P_A , P_{AB} , P_B qui correspondent respectivement au signal réfléchi par le premier FBG, l'interférence des signaux réfléchis par les deux FBGs et le signal réfléchi par le deuxième FBG et zéro partout ailleurs en supposant que la rétrodiffusion Rayleigh est négligée.

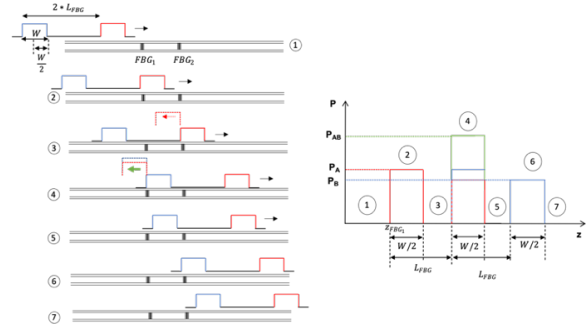


Figure 3 : Technique d'interrogation à double impulsion

4- Résultats et discussion

En interrogeant la fibre par le banc expérimental présenté plus haut avec une large impulsion on obtient, en superposant les traces ϕ -OTDR, la figure 4 (a)-(b). Lorsqu'on se positionne entre le deuxième et le troisième FBG, par exemple à 2212 m, on détecte le signal temporel présenté à la figure 4 (c). En appliquant la Transformée de Fourier Rapide (Fast Fourier Transform (FFT)) sur les signaux détectés on remarque qu'on détecte bien la fréquence de 2 kHz appliquée entre le deuxième et le troisième FBG.

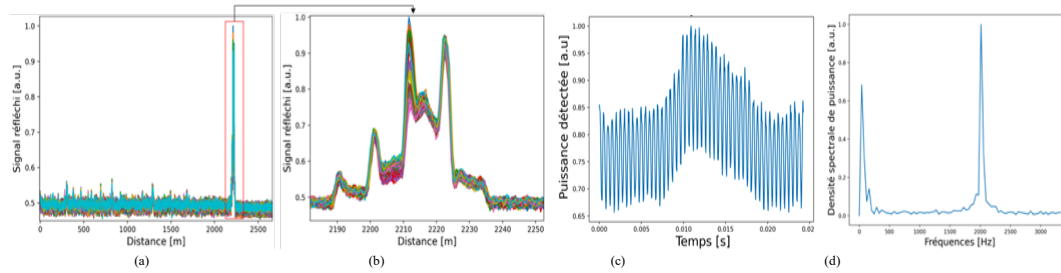


Figure 4 : (a)-(b) Trace ϕ -OTDR (c) Signal temporel et (d) FFT entre le FBG₂ et le FBG₃ à 2212 m pour une interrogation de la fibre par une simple impulsion.

Les figures 5 (a)-(b) présentent une technique d'interrogation de la fibre à double impulsion. Puisque la distance entre les impulsions correspond à $2L_{FBG}$, l'interférence entre deux FBGs successifs a pu être réalisée ce qui a permis de détecter la fréquence de vibration (2 kHz) comme le montrent les figures 5 (c) et (d).

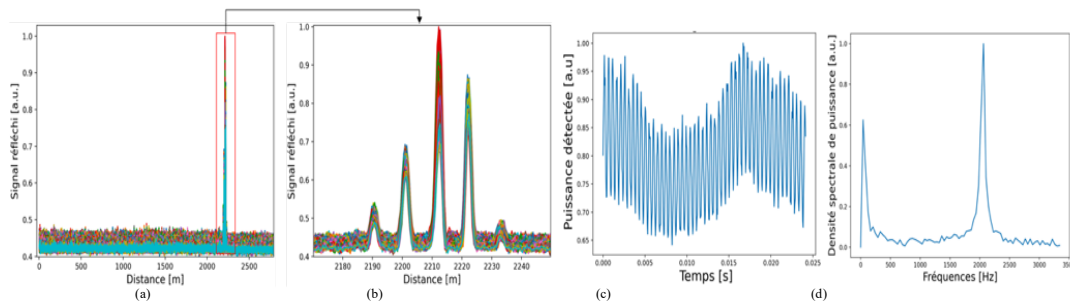


Figure 5 : (a)-(b) Trace ϕ -OTDR (c) Signal temporel détecté (d) FFT entre le FBG₂ et le FBG₃ à 2212 m pour une interrogation de la fibre par une double impulsion.

Dans l'exemple présenté, la double impulsion permet de réduire le bruit Rayleigh de 26 % par rapport à la simple impulsion. La durée d'impulsion utilisée pour la double impulsion (35 ns) est trois fois plus petite par rapport à la simple impulsion (130 ns) pour obtenir des résultats similaires.

Conclusion et perspectives

Un système de ϕ -OTDR assisté par FBG a été réalisé dans le but de détecter des contraintes de vibration externes à la fibre afin de réaliser un capteur de vibration. Les techniques d'interrogation de la fibre à simple et double impulsion ont été utilisées. A la fin de l'étude, les deux techniques se sont montrées efficaces pour la détection des vibrations. Il n'en reste pas moins que la technique de double impulsion permet de réduire considérablement l'interaction entre l'impulsion et la fibre et donc de réduire le bruit Rayleigh tout en utilisant des impulsions qui sont, dans l'exemple présenté, trois fois plus petites comparativement à la technique d'interrogation à simple impulsion.

Références bibliographiques

- [1] Bado Mattia Francesco et R. Casas Joan. "A review of recent distributed optical fiber sensors applications for civil engineering structural health monitoring." *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 5, pp.1818.
- [2] De Miguel Soto Veronica, Jason Johan, Kurtoğlu Deniz et al. "Spectral shadowing suppression technique in phase-OTDR sensing based on weak fiber Bragg grating array". *Optics Letters*, 2019, vol. 44, n°3, pp. 526-529.
- [3] Liu Tao, Wang Feng, Zhou Ling et al. "Phase sensitive distributed vibration sensing using double-pulse for ultra-weak FBG array". In: *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)*, Singapore, 2017, pp. 1-3.