Résumé de thèse

Alireza Morsali

Sujet : Capteur distribué à fibre optique pour la mesure de vibrations basée sur la rétrodiffusion cohérente

La réflectométrie optique en tant que capteur distribué

Les bases de la réflectométrie optique ou Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) ont été posées dès les années 70. F.P. Kapron a montré que la diffusion de Rayleigh est une des sources de pertes les plus importantes dans les guides d'onde optique en silice. Quelques années plus tard Barnoski a développé le premier montage permettant de mesurer l'atténuation optique dans une fibre basée sur la rétrodiffusion. L'expérience réalisée consiste à injecter une impulsion courte de lumière dans une fibre. A une distance L de l'entrée de la fibre, une partie de la lumière est rétrodiffusée vers l'entrée et collectée sur un détecteur comme on peut le voir sur la figure 1. La lumière diffusée est proportionnelle à l'énergie incidente de l'impulsion et dépend en $1/\lambda^4$ par rapport à la longueur d'onde. Seule une infime partie est rétrodiffusée et sa détection ne peut se faire que par moyennage d'un grand nombre d'impulsions.

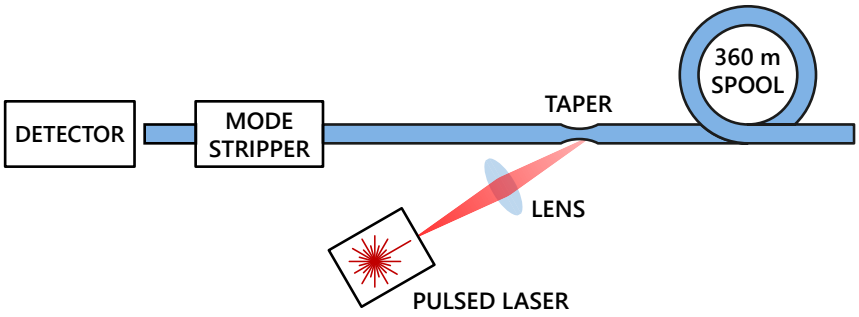

Figure 1. Principe de la rétrodiffusion optique

La technique a été étudiée et améliorée au cours des années. Des instruments capables de mesurer l'atténuation de la fibre, de connecteurs, d'épissures ainsi que les anomalies d'installation ou dans certains cas de rupture de la fibre sur des distances proches de 100 km avec des résolutions de la dizaine de mètres sont couramment proposées sur le marché. D'autres équipes ont également investiguées les possibilités de la technique avec des impulsions extrêmement courtes (quelques ps) permettant de sonder des guides d'onde avec une précision de l'ordre de quelques centaines de µm sur des longueurs limitées à quelques dizaines de cm. Des techniques comme la réflectométrie par polarisation ou Polarisation Optical Time Domain Reflectometry (POTDR) ou encore la réflectometrie par modulation fréquentielle ou Frequency OTDR ont également été explorées.

La question de transformer cet instrument en un capteur de température ou de contrainte distribué tout au long de la fibre s'est posée dans les années 90. Et les principes physiques comme les effets Raman et Brillouin ont aussitôt été identifiés comme des phénomènes

associables à la réflectométrie optique pour transformer l'instrument en un capteur de température distribuée. Associée à l'amplification optique, la réflectométrie a permis de valider ces concepts. La rétrodiffusion classique est basée sur l'utilisation de sources lasers en lumière incohérente afin d'éviter le bruit de phase dans le système. Mais paradoxalement avec l'arrivée de source lasers extrêmement cohérentes ayant des largeurs spectrales inférieures à la dizaine de kHz, il a été démontré que de nouvelles perspectives pour la rétrodiffusion en lumière cohérentes se présentaient. En effet, rien qu'avec l'effet Rayleigh, en superposant l'interférométrie réalisée par les clusters de photons rétrodiffusés (sensibles aux perturbations externes) au signal rétrodiffusé, il est possible de transformer l'instrument en un capteur distribué de vibrations. Différentes approches pour extraire l'information acoustique sont possibles :

- Détection directe ou détection en amplitude. Cette technique permet d'extraire la fréquence de la vibration mais exige encore des investigations sur la quantification de l'amplitude de vibration. Malgré cette limitation l'instrument est exploitable dans de nombreuses applications.
- Détection par interférométrie Mach-Zehnder à bras multiples. Cette voie est explorée par plusieurs équipes. La technique a été démontrée sur des distances de quelques km mais l'interrogation de distances plus longues représente un défi majeur.
- Détection de la phase. Cette technique est la plus prometteuse que ce soit pour la détection de la fréquence ou de l'amplitude. Elle est également applicable sur des distances de plusieurs dizaines de km, certes avec une dégradation de la résolution. C'est avec cette approche que les travaux de cette thèse ont été menés.

La rétrodiffusion cohérente ou encore Phase Optical Time Domain Reflectometry (Φ-OTDR) présente de nombreux atouts. L'élément sensible reste une fibre monomode de télécommunication classique. Par contre l'interrogateur est d'une très grande complexité. Avec cet instrument il est envisageable de réaliser une suite de capteurs tout au long de la fibre. Pour des longueurs de fibre de 50 km, un potentiel de près de 5000 points de mesures est possible.

Les applications sont nombreuses. Elles vont de la surveillance d'ouvrage d'art (Structural Health Monitoring) comme les ponts, les grands bâtiments, les puits de forage pétroliers ou en géothermie à la surveillance de trafic et la détection d'intrusion en passant par la surveillance d'oléoducs, gazoducs et autres. Dans cette thèse, nous avons avec l'ODTR de phase également démarré l'étude de vieillissement de puits géothermiques.

La rétrodiffusion cohérente ou OTDR de Phase

La première étape a consisté à développer et à optimiser l'instrument avec la perspective d'un produit dépassant le stade d'un simple montage de laboratoire, sachant que cette thèse bénéficiait d'un financement CIFRE avec la société Osmos. La figure 2 montre le schéma de principe du système. La chaîne d'émission comprend un laser d'une longueur de cohérence dépassant la centaine de km. Afin de conserver la cohérence en mode impulsionnel, un modulateur externe basé sur l'effet acousto-optique a été mis en œuvre. L'impulsion générée est ensuite amplifiée par un amplificateur à fibre dopée par erbium (EDFA) dont le bruit

spontané (ASE) est optiquement filtré avant d'être injecté par un circulateur optique dans la fibre. Le signal rétrodiffusé est injecté dans la chaine de détection. L'information est présente dans la phase du signal véhiculée sur une porteuse optique à 1,93 10^{14} Hz. Le signal rétrodiffusé de très faible énergie est amplifié optiquement par un second EDFA. Ensuite, par hétérodynage optique nous avons abaissé la fréquence à 110 MHz permettant ainsi de traiter le signal tout en conservant l'information de phase.

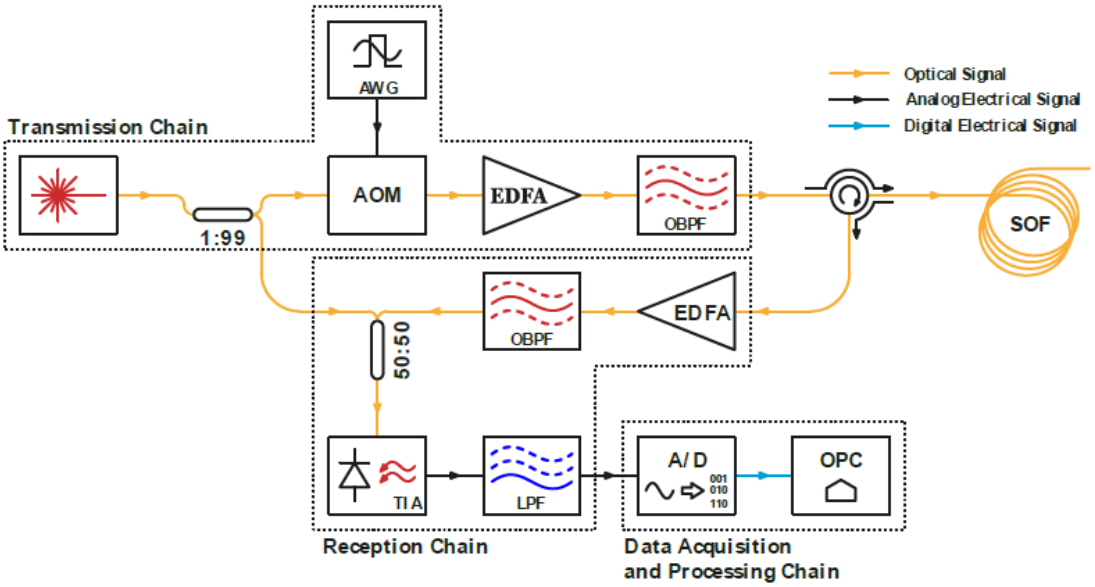

Figure 2. Représentation du système COTDR. AOM : Acousto-optic modulator ; EDFA Erbium Doped Fiber Amplifier ; OBPF : Optical Badpass Filter ; SOF : Sensing optical Fiber ; LPF : Low pass optical filter ; TIA : Tramsimpedance Amplifier ; A/D Analog to digital converter ; OPC Open Platform computer.

La modélisation de la rétrodiffusion prenant en compte le taux d'extinction du modulateur acousto-optique et le bruit de l'EDFA a permis de déterminer le rapport signal sur bruit réalisable en sortie du récepteur. A une distance de 25 km, une vibration de 1Hz a été appliquée à la fibre par un modulateur piézoélectrique. La mesure du rapport signal sur bruit (SNR) a été effectuée à partir d'une impulsion de 75 ns et a montré que le SNR calculé de 12,5 dB est en bon accord avec le SNR mesuré de 13,7 dB. La valeur mesurée a été déterminé après traitement par une moyenne glissante qui a contribué à l'amélioration du SNR d'environs 3 dB. Ce résultat confirme l'importance du taux d'extinction du modulateur acousto-optique. Par la modélisation nous pouvons également constaté qu'il faudra pour des distances plus grandes, travailler avec des impulsion plus larges afin de garantir un certain rapport signal sur bruit. Ces résultats sont en cours de publication.

Résultats de mesures et performances

Le système à OTDR de phase développé peut travailler en détection directe d'amplitude (sans hétérodynage) ou en détection de phase moyennant quelques modifications après le récepteur TIA. Nous avons analysé le système en détection directe d'amplitude et avons obtenu les résultats suivants

- La détection de vibrations de 0,6 Hz et de 10 Hz au-delà de 50 km avec une impulsion large de 500 ns.

- La détection de vibrations de fréquence de 500 Hz à une distance 1620 m.

Ensuite, nous avons mis en œuvre l'hétérodynage optique. Deux solutions de traitement sont possibles. La première aurait consisté à utiliser un système de conversion analogique numérique rapide de 1 GS/s (Gigasamples par seconde) combiné à un récepteur TIA plus rapide, de grande bande passante. Une telle solution conduit à une pénalité de la dynamique du système résultant en une dégradation du SNR. Elle entraîne de fait une diminution de la longueur interrogeable de la fibre. Nous avons privilégié une option permettant la conversion numérique du signal avec un A/D de 180 MS/s. A cette fin un filtre passe-bas a été intégré après le détecteur. Plusieurs résultats importants ont été obtenus :

- Une vibration de 2 Hz appliquée à 4,5 km a été détectée sans difficulté.
- Le signal a été analysé avec une vibration de 1 Hz appliquée à 25 km.

Enfin nous avons étudié le système avec une excitation parfaitement contrôlée. La réponse de la fibre par OTDR de phase a été comparée à la réponse d'un capteur à fibre optique avec un réseau de Bragg ou Fiber Bragg Grating (FBG). La fibre a été fixée sur une barre en inox de 3 m ainsi que le capteur FBG. Une source de vibration basée sur une table de rotation motorisé Newport avec un encodeur de très grande précision garantissant une répétabilité de 2 10^{-2} ° a été réalisé. En parallèle, un système de triangulation laser a permis de mesurer le déplacement de la barre avec une précision de 10 µm. Enfin, nous avons fixé la fibre sur la barre selon un motif en forme de spirale, une autre originalité de ce travail. Cette nouvelle approche de fixation de la fibre a permis de réduire la résolution intrinsèque du système qui est de 7,5 m pour des impulsions de 75 ns à 30 cm et d'étudier l'apport en sensibilité du Spiral Fiber Coil.

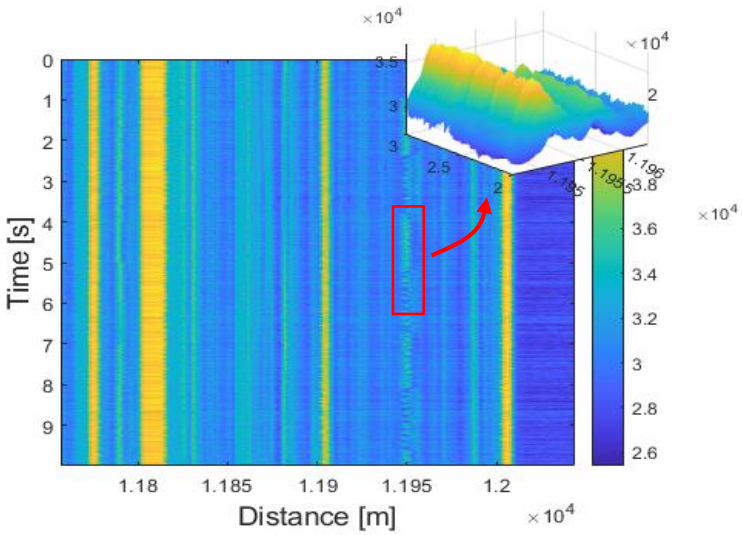

Figure 3. Enregistrement d'une vibration

Les résultats montrent (figure 3) qu'il est possible de détecter des vibrations aussi faibles que 0,3 Hz, de mesurer une élongation de la barre inférieure à 2 µε qui correspond à une vibration d'amplitude de 50 µm crête-crête, le tout à une distance de 12 km. Nous avons également observé des fréquences aux alentours de 20 Hz qui proviennent de l'asservissement

dynamique de la position du moteur utilisé pour la réalisation du vibreur. Pour l'OTDR de phase un ensemble de mesures allant de 300 m à des distances 20 km ont été réalisées (publication en cours de rédaction). Ces derniers travaux ouvrent des perspectives d'application en surveillance des puits géothermiques qui ont été amorcés dans le cadre du labex G-eau-thermie.

Une attention particulière a été apporté au traitement de signal. Une des difficultés consiste à réaliser le traitement en temps réel sachant que des solutions de traitement en temps différé comme celui par transformation par wavelet améliorent les résultats comme nous avons pu le vérifier.

Communications scientifiques

Journal

[1] W. Yu, P. Pfeiffer, A. Morsali, J. Yang, J. Fontaine ; Comb-calibrated frequency sweeping interferometry for absolute distance and vibration measurement, Opt. Lett. Vol. 44, 20, pp. 5069-5072 (2019) https://doi.org/10.1364/OL.44.005069

[2] A. Morsali, S. Lecler, P. Pelletier and P. Pfeiffer ; Significance of Modulators Extinction Ratio in Long Distance Coherent Optical Time Domain Reflectometry, (submitted to Optical Engineering)

Conférences Internationales

[1] A. Morsali, S. Lecler, P.M. Pelletier, P. Pfeiffer ; Significance of High Extinction Ratio Laser Pulse Generation in Coherent Optical Time Domain Reflectometry ;Photonics Europe Digital Forum, 29 March – 2 April 2020

[2] A. Morsali, S. Lecler, P. Pfeiffer, Comparison of Common Optoelectronic Configurations for Distributed Acoustic Sensing using Rayleigh Backscattering from Long Optical Fibers ; EWOFS, Chypre, Octobre 2019