

Câbles-capteurs à fibres optiques pour les mesures réparties Brillouin, Raman et Rayleigh dédiées à la surveillance des structures

J.C. da Rocha, Pierre Ferdinand, A. Poulain, V. Dewynter-Marty, Marie Giuseffi, Sylvain Magne, Laurent Maurin, Stéphane Rougeault

▶ **To cite this version:**

J.C. da Rocha, Pierre Ferdinand, A. Poulain, V. Dewynter-Marty, Marie Giuseffi, et al.. Câbles-capteurs à fibres optiques pour les mesures réparties Brillouin, Raman et Rayleigh dédiées à la surveillance des structures. CMOI 2011 - 12ème colloque international francophone sur les méthodes et techniques optiques pour l'industrie, Nov 2011, Lille, France. cea-04094910

HAL Id: cea-04094910
https://cea.hal.science/cea-04094910

Submitted on 11 May 2023

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.

Câbles-Capteurs à Fibres Optiques pour les mesures réparties Brillouin, Raman et Rayleigh dédiées à la surveillance des structures

J.C. Da Rocha [(1)], P. Ferdinand [(2)], A. Poulain [(1)], V. Dewynter [(2)], M. Giuseffi [(2)], S. Magne [(2)], L. Maurin [(2)], S. Rougeault [(2)]

[(1)]ACOME, Usine de Romagny, 50140 Mortain
[(2)]CEA, LIST, Laboratoire de Mesures Optiques, Boîte courrier 94, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France

Contacts : sensors@acome.fr – Tél. : +33 (0)2 33 89 31 00 – Fax : +33 (0)2 33 89 31 31
pierre.ferdinand@cea.fr – Tél. : +33 (0)1 69 08 83 39 – Fax : +33 (0)1 69 08 83 95

Mots clés : Capteur à Fibres Optiques, câble, réflectométrie, Brillouin, Raman, Rayleigh, mesure répartie, surveillance des structures

1. Introduction

Ces dernières années, les avancées technologiques dans le domaine de la mesure ont conduit à rendre progressivement disponibles sur le marché des instrumentations optoélectroniques performantes, fondées sur les phénomènes de rétrodiffusion Raman [1 à 3], Brillouin [4-5] et Rayleigh [6-7] dans la silice constituant les fibres. Ces phénomènes physiques, exploités dans des systèmes réflectométriques (en anglais : *OTDR – Optical Time-Domain Reflectometry*), permettent de mesurer le profil des paramètres (température, déformations, courbure, fuite, pression, …) le long de la fibre déployée, sur des portées le plus souvent multi-kilométriques.

Cela étant, une instrumentation complète requiert bien entendu, en complément du système d'acquisition, du ou des "câbles-capteurs" dédiés à chaque application (dimensions, matériaux, sensibilité, mise en œuvre, et prix). Or, jusqu'à ces derniers temps, les utilisateurs étaient relativement limités dans le choix de ces câbles-capteurs et le plus souvent recouraient par défaut à des câbles commercialisés pour le marché des télécommunications, c'est-à-dire à des produits non conçus ni optimisés pour les applications de mesure et de surveillance des structures (Génie Civil, BTP, travaux souterrains [8, 9], ferroviaire, marine, aéronautique, industries diverses …). Or, dans ces différents secteurs, les applications sont de plus en plus motivées par les besoins de sécurité, de maintenance préventive, de qualité de production, … et poussent les maîtres d'œuvres ou d'ouvrages à mieux comprendre le comportement de leurs structures, dès leur fabrication, puis lors de la phase opérationnelle jusqu'à leur démantèlement.

Dans cette publication, nous décrivons le développement [10-12], la qualification métrologique, la fabrication industrielle en très grandes longueurs (10 km) de plusieurs câbles optiques de mesure dédiés. Les contraintes du déploiement de ces câbles en situation réelle (conditionnement, transport, installation, raccordement optique en conditions de terrain) sont détaillées de même que la mise en œuvre des instrumentations optoélectroniques disponibles (dites aussi "systèmes de mesure" ou "interrogateurs").

2. Les technologies et les systèmes de mesure repartie

Les Capteurs et Réseaux de Capteurs à Fibres Optiques [CFO et RCFO] offrent désormais les mêmes fonctions que les capteurs traditionnels : mesure, contrôle, détection-alarme, surveillance, … avec comme avantages supplémentaires les spécificités des fibres optiques [13-15] :

- faible encombrement et masse réduite,
- grande bande passante,
- faible atténuation (déport important de la mesure : plusieurs dizaines de kilomètres),
- bonne résistance aux rayonnements ionisants,
- immunité aux phénomènes électromagnétiques,
- mesure passive, sans alimentation électrique locale (instrumentation déportée).

Cela étant, l'optique étant considérée comme relativement coûteuse, le multiplexage de nombreux capteurs sur un système centralisé, c'est-à-dire la mise en commun du système de mesure (les RCFO), trouve une part importante de sa raison d'être dans la réduction du coût de la voie de mesure, tant il est vrai que le système de mesure et de démultiplexage optoélectronique constitue en général l'une des composantes essentielles du prix global de l'instrumentation. De plus, il faut savoir que l'approche RCFO fournit à l'utilisateur les données de chaque capteur sous une forme homogène (fusion de données intrinsèque). La mise en réseau de CFO conduit donc à des systèmes d'instrumentation optimisés, et donne accès à des fonctions de mesure totalement inaccessibles aux autres technologies (une fibre optique est ainsi équivalente à la mise en série de plus d'une dizaine de milliers de capteurs), il s'agit là des capteurs dits "répartis" où la fibre joue le rôle d'élément 'continûment' sensible en plus tout naturellement de support de transmission.

La base technologique des capteurs répartis repose sur la réflectométrie, en quelque sorte le Radar en optique guidée, c'est-à-dire un procédé de localisation spatiale des "diffuseurs" le long de la fibre, fondé sur la dualité spatio-temporelle (une analyse temporelle est équivalente à une analyse spatiale le long du guide puisque la vitesse c/n de propagation la lumière est connue). En fait, les réflectomètres temporels (*OTDR)* sont des instruments d'usage courant en télécommunications optiques, puisqu'ils permettent de s'assurer de la disponibilité du réseau de distribution (mesure et détection de l'évolution du profil d'atténuation des fibres de ligne, localisation des problèmes ponctuels de type courbure, rupture ou connecteur déréglé …). Depuis longtemps, de nombreux OTDR sont disponibles commercialement et utilisés par les opérateurs de ce secteur.

Ces appareils utilisent la rétrodiffusion de Rayleigh (phénomène de diffusion élastique) dans la silice constituant les fibres. Cependant, comme illustré par la figure 1, les effets Raman et Brillouin peuvent aussi être exploités.

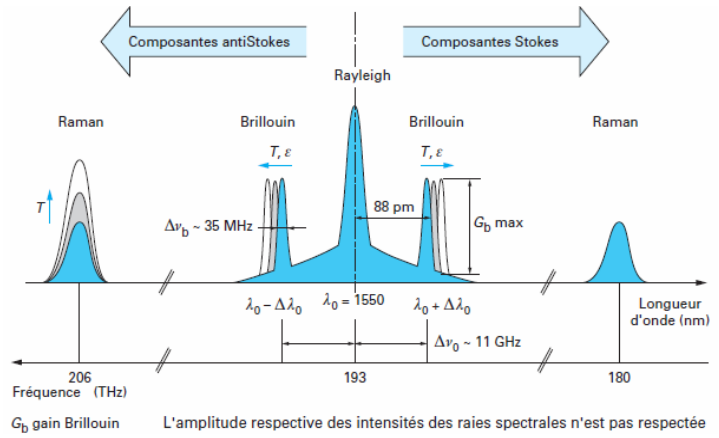


Figure 1 Spectre des phénomènes de diffusion de Rayleigh, Raman et Brillouin dans les fibres optiques, pour une excitation à la longueur d'onde 1550 nm

Réflectométrie Raman

La lumière Raman diffusée subit un décalage fréquentiel d'une centaine de nm par rapport à la longueur d'onde d'excitation. Le mécanisme de diffusion inélastique (échange d'énergie avec les molécules du milieu diffusant, la silice dans le cas présent) conduit à générer deux fréquences (deux longueurs d'ondes) disposées symétriquement par rapport à la fréquence d'excitation ν_0 et appelées respectivement raie Stokes ($\nu_S = \nu_0 - \nu_B$) et raie anti-Stokes ($\nu_{AS} = \nu_0 + \nu_B$), ν_B désignant la fréquence de vibration caractéristique du milieu dans lequel se produit cette diffusion. Les règles de la physique atomique nous apprennent que pour ce phénomène, l'intensité de la raie Stokes est indépendante de la température du milieu, *a contrario* de celle de la raie anti-Stokes liée à la température par l'intermédiaire de la loi de Boltzmann, suivant la relation $\exp(-h\nu_B/kT)$. Une analyse complète du problème montre que le rapport R des intensités optiques diffusées dans ces deux régimes (anti-Stokes / Stokes) est défini par la relation : $R(T) = (\lambda_S / \lambda_{AS})^4 \exp(-h\upsilon_B / kT)$, où h et k sont respectivement les constantes de Planck et de Boltzmann. Une telle expression n'est rigoureusement fonction que du paramètre température, et des caractéristiques vibrationnelles du milieu. Ainsi, toute influence des variations potentielles de la fonction de transfert en intensité du signal (puissance de la source, sensibilité du détecteur, gain des amplificateurs …) est éliminée par le ratio des intensités de ces deux raies [1-3].

Le principal intérêt de la technique Raman réside donc dans le fait que le résultat ne dépend pas de la valeur locale de l'intensité de l'impulsion initiale, et présente une grande insensibilité vis-à-vis des perturbations mécaniques éventuellement appliquées à la fibre, des pertes en lignes, locales ou réparties.

Cette technique, en complément de la réflectométrie précitée fournit donc un moyen de déterminer le profil thermique le long de la fibre (ou du câble), et ce avec un pas de mesure métrique. Plusieurs appareils sont disponibles commercialement.

Réflectométrie OTDR + effet Raman = DTS de température





Capteur réparti : un point de mesure tous les mètres

Mesure répartie de température, résolution spatiale 1 m, thermique < 1°C, temps de mesure plusieurs min, portée > 10 km.
Applications : surveillance thermique de canalisations, *offshore*, détection d'incendie, câbles, surveillances diverses.

Figure 2 Principe et caractéristiques typiques des DTS Raman du marché

Reflectométrie Brillouin

Cette variante de capteurs répartis met en œuvre un mécanisme de diffusion inélastique souvent présenté comme une interaction de l'onde lumineuse avec des phonons d'origine acoustique générés par électrostriction dans la silice. L'intérêt métrologique du phénomène Brillouin réside dans la dépendance de ce décalage avec la température (~ 1 MHz /°C) et les déformations (~ 1 MHz /20 µm/m). Ce décalage en fréquence est cependant cent fois plus réduit qu'en Raman (± 13 GHz de la raie laser, soit spectralement ~ 100 pm pour l'effet Brillouin). La mesure temporellement résolue de ce décalage a conduit à la mise au point de deux techniques cohérentes, désignées par les sigles BOTDA (pour *Brillouin Optical Time Domain Analysis* ; technique dite *stimulée*) [4], et BOTDR (pour *Brillouin Optical Time Domain Reflectometry* ; technique dite *spontanée*) [5].

Dans le cas de l'approche BOTDR, on injecte dans la fibre une impulsion de faible durée (tout comme en réflectométrie OTDR), et l'on mesure l'intensité de l'onde rétrodiffusée à l'aide d'un récepteur cohérent qui effectue le mélange de cette onde avec celle fournie par un oscillateur local : la mesure répartie du spectre Brillouin est alors obtenue soit en faisant varier l'écart entre la fréquence de l'impulsion sonde et celle de l'oscillateur local, soit en balayant la fréquence centrale du filtre électronique à bande étroite utilisé dans le récepteur pour assurer la réjection de la contribution Rayleigh. Pour l'utilisateur, le principal avantage pratique de cette méthode vient du fait qu'elle n'impose pas d'avoir accès aux deux extrémités de la fibre.

Dans le cas de la technique BOTDA, on injecte une impulsion lumineuse 'pompe' à l'une des extrémités de la fibre, tandis que l'autre est utilisée comme point d'entrée d'une onde continue 'sonde'. Lorsque l'écart en fréquence de ces deux ondes contra-propagatives égale le décalage Brillouin dans la fibre à cet endroit, l'intensité de l'onde continue est localement amplifiée par effet Brillouin stimulé. La mesure résolue dans le temps de ce 'gain Brillouin' conduit à déterminer les zones de la fibre pour lesquelles cet accord en fréquence est obtenu ; la détermination complète du profil de déformations / température nécessitant un balayage continu de cet écart sur une certaine plage fréquentielle. L'intérêt de cette seconde méthode Brillouin réside dans le phénomène de gain sur lequel elle est fondée : elle permet d'obtenir avec des puissances continues relativement réduites des signaux utiles dont l'intensité excède de deux ordres de grandeur celle de la diffusion de Rayleigh. Les meilleures résolutions spatiales aujourd'hui obtenues sont de l'ordre du mètre[1], voire en deçà, pour des portées multi-kilométriques, tandis que la précision de détermination des décalages Brillouin avoisine 1 MHz, équivalente à des résolutions de l'ordre de 1°C en température et ± 10 µm/m en déformations.

A ce jour une demi-douzaine de fabricants propose des produits commerciaux de type BOTDR ou BOTDA. Leurs fonctionnalités et performances diffèrent sur la manière de séparer les paramètres température et déformations, mais aussi en terme de résolutions -tant spatiale que de mesure-, sans oublier l'aspect ergonomie.



Analyse temporelle + effet Brillouin
= capteur réparti de température et déformations



Un point de mesure tous les mètres

Mesure répartie de température et/ou de déformations
Caractéristiques typiques (*variables suivant les produits*) : résolution spatiale 1 m, en température ~ 1°C, en déformations ± 10 µm/m, temps de mesure quelques secondes à plusieurs min, portée 20-30 km.
Applications : surveillance des terrains, ponts, tunnels, barrages, *pipe-lines* …

Figure 3 Principe et caractéristiques des systèmes Brillouin
(Nota : pour l'approche BOTDA, la fibre est bouclée en A/R sur l'instrument)

[1] Certaines techniques, au niveau de la R&D bien qu'un produit commercial soit déjà proposé, offrent une résolution centimétrique sur une portée limitée.

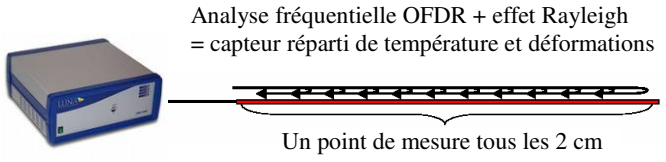
Reflectométrie de Rayleigh

Evoquons maintenant les mesures réparties de déformations/température par rétrodiffusion de Rayleigh. Ce type d'instrumentation, plus récent, met en jeu d'une part le phénomène de diffusion élastique de Rayleigh ainsi qu'une technique de réflectométrie dans le domaine fréquentiel (OFDR : *Optical Frequency Domain Reflectometry*). La technique fréquentielle repose sur l'emploi d'un interféromètre homodyne à balayage (la source est modulée linéairement et répétitivement en fréquence, sous forme de rampes). Au sein du système de mesure, l'onde émise par un laser accordable est séparée en deux demi-faisceaux dont l'un est envoyé dans la fibre de mesure tandis que l'autre l'est dans le bras de référence d'un interféromètre (il s'agit en pratique une configuration de type Mach-Zehnder) [6, 7].

Les deux signaux rétrodiffusées Rayleigh sont ensuite mélangés au niveau d'un système de détection optique composé de deux photodiodes analysant respectivement les deux Etats de Polarisation (EdP). A chaque instant, des franges d'interférence sont ainsi générées à la longueur d'onde instantanée du laser. Celles-ci sont porteuses de la réponse en amplitude et en phase de la fibre testée.

Les interférences se produisant dans le domaine spectral, les données peuvent donc être traitées en utilisant une transformée de Fourier inverse (TF) afin d'en déduire la répartition spatiale. La TF des intensités portées par les deux EdP permet ainsi d'obtenir leurs profils spatiaux le long de la fibre, ainsi que leur moyenne géométrique et le coefficient de réflexion local. Une augmentation locale de température ou de déformation appliquée à la fibre a pour effet de décaler spatialement (ou temporellement) le motif Rayleigh reconstitué qui est ensuite comparé par intercorrélation à une trace Rayleigh de référence. L'ampleur du décalage est ensuite calibrée en température ou en déformation selon l'usage qui est fait de ce procédé de mesure.

Ce système de réflectométrie fréquentielle optique permet l'interrogation équivalente à plusieurs milliers de réseaux de Bragg sur une seule et même fibre optique, rendant la partie sensible peu onéreuse par comparaison à des chaînes de réseaux de Bragg. Par contre, le coût du système est encore à ce jour relativement élevé, il devrait baisser avec une pénétration plus large dans l'industrie. Cette technique permet en fait d'assurer un contrôle santé d'une pièce/structure hôte avec une résolution spatiale centimétrique et une résolution de mesure d'environ 1 µm/m (élongation équivalente de 1 µm rapportée à une longueur de base de 1 m) ou bien encore 0,1°C. Le temps de mesure (durée d'une acquisition), limité par le balayage de la source et la bande spectrale choisie, est d'une dizaine de secondes, lorsque l'on opte pour un traitement du signal *a posteriori*.



Mesure répartie de température et/ou de déformations par rétrodiffusion de Rayleigh
Caractéristiques typiques : résolution spatiale 2 cm, en température ~ 0,1°C, gamme [0 K ; centaines de degrés], en déformations 1 µm/m, Gamme 1,7 %, temps de mesure : ~ 10 s, portée 70 m.
Applications en surveillance à très haute résolution des petites structures : métalliques, composites, etc.

Figure 4 Principe et caractéristiques des systèmes OFDR

En résumé de ce paragraphe, nous pouvons donc affirmer que, d'une part les systèmes DTS Raman fournissent le profil de température de manière très sélective, et que d'autre part les systèmes Brillouin (mesure à longue portée) ou Rayleigh (mesure à courte portée) délivrent le profil thermomécanique de la fibre, sans séparer les paramètres température et déformations. Ces deux dernières approches sont très complémentaires, l'une adressant de grandes longueurs avec une résolution métrique et l'autre une portée plus réduite avec une résolution centimétrique et des résolutions de mesure environ 10 fois meilleures, tant en déformations qu'en température. Précisons que pour séparer les deux paramètres température et déformations, deux inconnues requérant deux équations (donc ici deux mesures), une approche pragmatique consiste souvent à utiliser deux fibres (ou câbles), voire la fibre 'aller' et celle de 'retour' dans le cas du BOTDA, l'une d'elles étant isolée des déformations. Mais, nous découvrirons dans les paragraphes suivants qu'une conception astucieuse du câble de mesure permet également de séparer ces paramètres, voire également d'en mesurer d'autres … paramètres à laquelle la fibre optique seule n'est pas sensible.

3. Etat de l'art des câbles sensibles existants

A partir de 2005, les premières démonstrations industrielles de la métrologie Brillouin ont nécessité des câbles de déformations sensibles et tout naturellement les utilisateurs se sont orientés vers des câbles commerciaux issus des télécoms, qu'ils soient à structure serrée ou libre.

En effet, les fibres optiques sont libres et souvent en sur-longueur dans les câbles télécoms dits à structure libre, protégées à l'intérieur de petits tubes. Ces câbles sont préconisés pour les mesures de température isolées des déformations. En contrepartie, les câbles dits à structure serrée sont tels que la ou les fibres optiques sont enrobées de divers matériaux (polymères, fibre de verre ou de kevlar reprenant les efforts de traction). Les câbles à structure serrée étaient donc potentiellement adaptés aux mesures de déformations à condition toutefois de s'affranchir de la composante thermique, et de valider leur transduction …

Or, très rapidement, les premiers résultats de qualification en laboratoire ont montré que le frottement des fibres dans les structures « libres » par exemple lié à la dilatation thermique différentielle des matériaux constituant le câble et la fibre optique étaient à l'origine de perturbations mécaniques s'ajoutant à la mesurande thermique. Les mesures de températures pouvaient donc être entachées d'erreurs.

En ce qui concerne les câbles à structure « serrée », les expériences ont montré que la transmission des allongements subits par l'enveloppe externe du câble n'était pas transmise en totalité aux fibres sensibles à l'intérieur, *via* les différentes interfaces. Les matériaux d'enrobages des câbles télécoms n'étaient clairement pas de bons transducteurs de déformations.

Malgré ces limitations, des câbles télécoms ont été installés et utilisés sur quelques sites pionniers et ont permis de réaliser les premières mesures Brillouin qualitatives par exemple de glissement de terrain, de déformations de *pipelines* aériens, l'information obtenue se traduisant plutôt en seuil de risque qu'en mesure quantitative [16].

En 2007, on vit apparaître sur le marché les premiers câbles, certes de longueur modeste, mais spécifiquement étudiés et conçus pour les applications de mesure. Ils présentaient un enrobage particulier de la fibre optique améliorant la transduction des déformations : mélange de résine et de fibre de verre, tube métallique régulièrement sertis autour de la fibre optique sensible ... Les qualifications métrologiques en laboratoire sur quelques mètres de long donnèrent de bons résultats pour certains d'entre eux. Cependant, l'inconvénient majeur résidait encore dans les procédés de fabrication à petite échelle, les installations non industrielles et parfois même manuelles ne permettant de produire que quelques dizaines de mètres. Au delà, les relatives courtes longueurs d'utilisation étaient parfois imposées par des pertes optiques élevées induites par une trop forte compression de la fibre optique de mesure, conséquence d'une bonne transduction mécanique. En fonction du matériau transducteur, la gamme thermique d'utilisation était alors limitée par l'ampleur de la dilatation thermique différentielle pouvant conduire à la cassure de fibres (au-delà de 50°C).

Le Laboratoire de Mesures Optiques du CEA LIST s'est donc investi avec la société ACOME dans le développement de câbles sensibles de déformations utilisant des moyens de fabrication industriels sur des portées multi-kilométriques, mono ou multifibres, ces derniers permettant de dissocier les déformations axiales des déformations par courbure.

Aujourd'hui, certains autres produits sont également présents sur le marché, mais encore trop peu présentent des tests de qualification métrologique -en particulier en déformations- imposant aux industriels désireux de les utiliser de réaliser eux-mêmes leurs qualifications ou de s'adresser à des laboratoires spécialisés pouvant les conseiller.

4. Description synthétique des besoins

L'enjeu technico-économique de toutes les applications est immense dans la mesure où un très grand nombre d'ouvrages et de sites -tant naturels qu'industriels- est potentiellement concerné. La surveillance peut en effet être étendue à tous les ouvrages « à risques », qu'ils soient sur terre (ponts, tunnels, bâtiments, aux travaux publics, aux moyens de production énergétique, centrales nucléaires (58 tranches dans l'hexagone[2] et environ

[2] En 2011 la France dispose de 58 réacteurs nucléaires en activité dans 19 centrales nucléaires de production d'électricité, 1 réacteur EPR de 3ème génération est en construction à Flamanville, 12 réacteurs sont arrêtés, 2 centrales sont en cours de démantèlement et 3 centres de stockage de déchets radioactifs sont exploités.

450 en service dans le monde), mines, barrages, falaises, ...), en mer (navires, pipe-lines, plates-formes, ...), en vol (avions, hélicoptères) ou bien encore dans l'espace (satellites, fusées et navettes, station orbitale internationale) ...

	Structures concernées	Besoins	Paramètres recherchés	Points spécifiques
Génie Civil et structures en béton	- ponts, passerelles - tunnels - immeubles, tours - ouvrages d'art divers - tirants de précontraintes - Bâtiments Réacteurs des centrales nucléaires - tours aéroréfrigérantes - barrages hydrauliques	- prise du béton - détection des dégradations internes - suivi post maintenance - sécurité des biens et des personnes	- déformation déplacements - tassements - courbures - température - détection, suivi de fissures - humidité, - pression, - corrosion *in situ*, - positionnement (verticalité, horizontalité...) - etc.	- capteurs dimensionnés pour le besoin, en surface pour l'existant, *in situ* pour les nouvelles constructions, - gigantisme de certains ouvrages, - compensation des effets thermiques sur ~ 100°C - techniques d'installation, et de SAV des câbles - ergonomie et robustesse de l'instrument, et des câbles
Travaux publics et travaux souterrains	- tunnels (lors du creusement, en service) - parois moulées - tabliers et piles de ponts	- détection de fontis - surveillance de parois - détection de tassements et fontis lors des creusements - positionnements tabliers de ponts	- courbures, déformations - déformées	- mise en place des câbles capteurs en forage (dirigés) - ergonomie et robustesse de la technique
Structures naturelles, géologiques	- mines souterraines - sites stockage souterrains - tunnels - falaises, barres rocheuses - digues - fond de la mer	- sécurité (population, travailleurs) - sécurité - sécurité des zones environnantes - // - // - détection des tsunamis	- déplacements, - déformations, température - fontis, convergence - glissements de terrain - érosion, fuite, mouvements	- conditionnement robuste des câbles sensibles - techniques d'installation, et de SAV - très grandes longueurs en mer
Domaines pétrolier et gazier	- pipelines/canalisations - réservoirs - plates-formes	- production interrompue - santé structurelle - détection incendie - détection de fuites - sécurité de l'ouvrage	- temp., déformation, pression, et courbures - élévation de la température - variation locale de temp. - déformation anormale des tendons d'ancrage	- conditions environnementales difficiles (si milieu marin ou *offshore*) - déploiement des câbles sensibles sur grandes longueurs (dizaines de km) - insertion des câbles sensibles dans les tendons
Câbles d'énergie	- lignes aériennes THT - câbles enterrés THT	- ne pas détériorer les câbles par échauffement local - assurer un transport optimal de l'énergie - accroître la sécurité du réseau	- profil de température, des déformations le long du câble	- câbles sensibles disposés au plus près des câbles - environnement évolutif - mise hors tension pour le déploiement des câbles
Télécom-munications	- câbles optiques du réseau de distribution	- contrôle de fabrication et de pose	- profil de température	
Moyens de transport et mobiles	- navires - ferroviaire - avions - hélicoptères - satellites	- santé/intégrité structure détection houle, - surveillance voies (fontis) - amélioration qualité des pièces (composites) santé structure, alarme incendie - température, déformations	- déformations, - température, - délaminages, défauts divers, ... - détection et effets des impacts, - état de santé global	- environnements difficiles - composites : 'sortie' des fibres de la structure en phase industrielle - changements de direction des fibres *in situ* - réparations
Sécurité - des sites sensibles - des biens, et des personnes	- barrières (grillages divers) - frontières et zones interdites/protégées - tunnels - tout type d'ouvrage	- détection périmétrique - détection d'incendie	- déformations/courbures de la barrière - élévation anormale de la température	- déploiement des câbles sur différents supports parfois âgés - détection depuis le sol
Energies Nouvelles et Renouvelables	- Pompes à chaleur, réseaux de transport de chaleur - Economies d'énergie dans le bâtiment	- température le long des échangeurs horizontaux/verticaux - échanges thermiques / isolation du bâtiment	- profils thermiques en surface - profils thermiques en sub-surface	- mise en place des câbles lors de la construction - *idem*, mais aussi à l'aide de câbles télécoms en place

Tableau 1 Analyse des principaux domaines de surveillance des structures par capteurs distribués à fibre optique

La grande majorité des besoins industriels est pratiquement couverte par le large potentiel des mesures réparties, qu'il s'agisse des approches Raman, Brillouin, ou Rayleigh, pour les mesures de déformations, courbures, température, fuites, incendie, etc. Par contre, certains besoins sont encore mal couverts à ce jour pour la détection d'autres paramètres tels que le givre, l'humidité voire la corrosion, pour lesquels la recherche se poursuit.

5. La conception des câbles capteurs à fibres optiques

Une fibre optique est 'naturellement' sensible à la température et aux déformations qu'elle subie (et dans une moindre mesure à la pression, que nous négligerons dans cette analyse).

Néanmoins, afin d'être avantageusement utilisée dans des conditions dites de terrain, il est nécessaire de protéger la fibre optique des agressions extérieures, afin que celle-ci mesure bien l'effet des contraintes induites par ces mêmes agressions sur la structure à surveiller. Les fibres optiques sont donc intégrées dans des structures câbles.

La mesure de température est possible dès lors que le contact thermique entre la fibre et le matériau est parfaitement établi. Dans le cas contraire, la mise en température de la fibre sera plus longue (inertie thermique de la structure), mais *in fine* la mesure sera possible, la conséquence pourra être une faible cadence de mesure, voire une moindre qualité de la mesure.

Pour la mesure des déformations, la fibre (et plus généralement le câble qui la contient) doit être mécaniquement liée au matériau ou à la structure, et ce dans toute la plage de fonctionnement recherchée en température et en déformation. Tout défaut de continuité dans la 'fixation' rendra la transduction inopérante, impactant la mesure de déformation.

La fibre étant *a priori* sensible aux deux paramètres :

- une mesure de température impose que la fibre soit libre pour éviter les effets croisés (T° - déf.),
- la détermination des deux paramètres (température et déformations) impose une double mesure, avec par exemple deux fibres dont l'une est isolée des déformations.

Ainsi, le type de mesure à réaliser, les conditions environnementales de l'application visée, les conditions de fabrication et de conditionnement, puis ultérieurement son mode de déploiement sur, ou au sein de la structure hôte à mesurer/surveiller conditionnent directement le cahier des charges du câble sensible (choix de la structure, des matériaux). D'un point de vue fonctionnel, un câble sensible doit en fait répondre à un cahier des charges comportant plusieurs critères parfois contradictoires.

En effet, l'utilisation en tant que capteur réparti, de déformation ou de courbure, impose une parfaite adhésion des fibres aux matériaux du câble, afin de transmettre fidèlement le profil des déformations de la structure à surveiller. Cette adhésion implique donc leur maintien au sein du câble, adhésion qui, dans le cas de capteurs à portée multi-kilométrique, doit tout naturellement être assurée et homogène tout le long du câble.

Mais, dans le même temps comprimer transversalement les fibres et employer des matériaux non adaptés à la plage de fonctionnement du capteur induit des pertes optiques par micro-courbures, réduisant alors la portée de la mesure potentiellement multi-kilométrique.

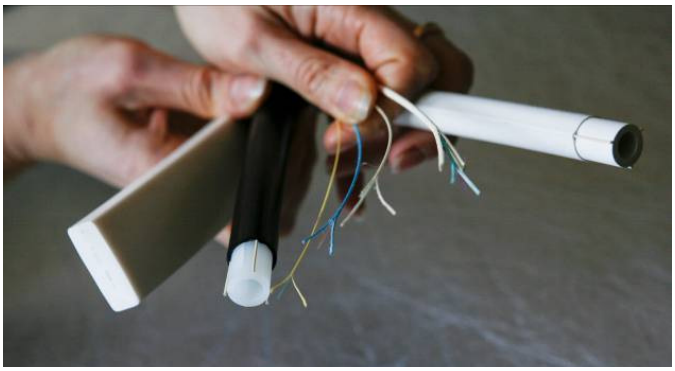


Figure 5 Câbles optiques sensibles élaborés par la société ACOME, dont les câbles 3D réalisés sous brevet CEA LIST [12] (photo CEA/C. DUPONT)

De plus, dans l'hypothèse où plusieurs fibres sont nécessaires pour la mesure, une bonne stabilité et une bonne précision dimensionnelles -tant radialement qu'angulairement- sont requises pour garantir la précision des mesures.

La performance d'un câble CFO résulte donc d'une bonne connaissance de l'environnement de l'application, d'un compromis technique entre la structure de câble-capteur retenue, les matériaux d'enrobage, et de la qualité des liaisons thermiques et mécaniques des fibres au câble.

A chaque nouveau câble dédié, plusieurs prototypes ont été réalisés dans des conditions industrielles (répétables) par la société ACOME et leurs performances métrologiques ont finalement été validées au sein du Laboratoire de Mesures Optiques du CEA LIST. Leur sensibilité Brillouin sous déformation axiale a été déterminée à 502 MHz/%, valeur identique à celle d'une fibre monomode sans revêtement, témoignant ainsi de l'intégralité de la transduction des efforts au travers dudit revêtement.

5.1 Cas d'un câble optique de mesure multiparamétrique

L'objectif est d'intégrer plusieurs fibres au sein d'un même câble, paramétrable notamment en termes de diamètre et nombre de fibres, de manière à offrir à l'utilisateur la possibilité de mesurer simultanément plusieurs paramètres physiques, à savoir :

- Le profil d'allongements (déformations positives),
- Le profil de compressions (déformations négatives),
- Le profil de température,
- Le profil de courbures,
- Le profil d'orientation des courbures (plan des courbures),

L'intérêt technico-économique est évident puisqu'un seul câble sensible permet d'avoir accès à des milliers de points de mesure de ces cinq paramètres, réduisant d'autant les coûts d'installation par comparaison à des mesures distinctes et les coûts de traitement (fusion de données par une seule instrumentation de lecture).

D'un point de vue fonctionnel, les tractions et compressions 'pures' que subit un tel câble sont tout naturellement obtenues par la mesure du décalage Brillouin commun aux trois fibres. Par contre, dans le cas où ce câble subit des courbures (en pratique souvent superposées à des allongements), le comportement du câble est illustré Figure 6 : sa partie supérieure subit une compression et sa partie inférieure une traction. La mesure du rayon de courbure R_c est simplement obtenue grâce à celle des déformations $\Delta L/L$ au sommet du câble de rayon r, puisque $R_c = r / (\Delta L/L)$. On montre ensuite que la déformée du câble est simplement reliée aux déformations mesurées par une relation de type dérivée seconde, et que seul un câble comportant *a minima* 3 fibres optiques placées en périphérie, et idéalement à égales distances radiales, permet d'obtenir la valeur de la courbure et son orientation par rapport au câble sensible.

L'intérêt de cette approche réside dans l'ajustement de la sensibilité aux courbures du câble proportionnellement à son diamètre. L'influence de la température peut également être obtenue dès lors qu'une quatrième fibre, par exemple insérée au centre du câble, est sensible à ce seul paramètre (Fig. 7).

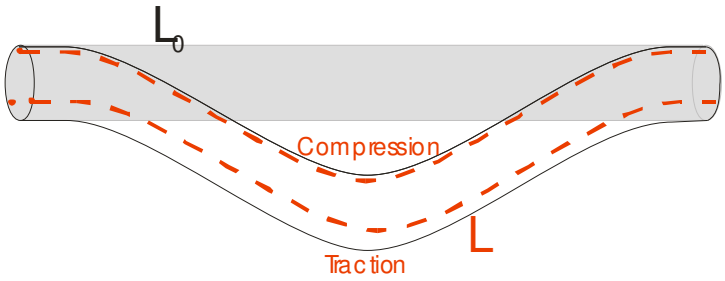


Figure 6 Principe de la mesure par câble multifibres

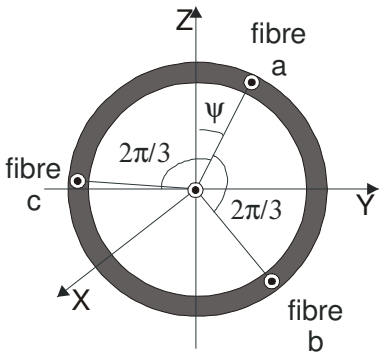


Figure 7 Section du câble sensible à 3 fibres optiques ; dit câble '3D'

Rappelons que lorsque la technique d'interrogation est de type Brillouin, ses caractéristiques sont :

a. Une mesure en continu sur de grandes longueurs de fibre optique (multi-kilométriques),
b. Une résolution spatiale métrique,
c. Une résolution en température d'environ 1°C et en déformations de l'ordre de ± 10 µm/m.

Ainsi, le bruit de mesure Brillouin étant fixée à 20 µm/m, le rayon de courbure maximal mesurable $R_{c\text{-}max}$ par un câble '3D' est entièrement défini par le rayon dudit câble, puisqu'en supposant un rapport signal sur bruit unitaire, il suffit d'écrire 20 µm/m = 2.10^{-5} = $r/R_{c\text{-}max}$. Autrement dit : $R_{c\text{-}max} = 0{,}5.10^{+5}.r$. A titre d'exemple, un câble de rayon 1 cm présente pour limite de détection une courbure de rayon $0{,}5.10^{+5}.1.10^{-2}$ = 0,5 km.

6. Fabrication et caractérisation/qualification des câbles-capteurs

Afin d'être avantageusement utilisées en tant que capteurs, les fibres optiques sont donc protégées par l'extrusion d'une ou plusieurs couches de matériaux thermoplastiques dont les propriétés thermomécaniques sont adaptées à l'application métrologique.

6.1 L'extrusion

L'extrusion est un procédé de fabrication de pièces de section droite constante. La mise en forme des matériaux constituant les câbles est le plus souvent effectuée à l'aide d'extrudeuses monovis. Rappelons qu'une extrudeuse a pour fonction de plastifier la matière (sous forme de granulés) afin de la pousser dans la tête d'extrusion (ou de conformation), et de la déposer à la sortie d'un poinçon sur la ou les fibres optiques qui traversent la tête d'extrusion. La forme extérieure et le dimensionnel du dépôt de matière sont obtenus par la présence d'une filière dédiée dans la tête d'extrusion.

Cependant, l'extrudeuse seule ne suffit pas à garantir la qualité du produit. D'autres éléments intervenant le long de la ligne de fabrication ont un rôle important à jouer. En plus du groupe d'extrusion (extrudeuse et tête), on retrouvera, dans toutes les lignes, des dévidoirs, des bacs de refroidissement, des éléments de tirage (cabestan, chenille, …), des éléments de mesure de diamètre et des bobinoirs. Température et pression dans le groupe d'extrusion, vitesse et tension de ligne, température de refroidissement, dimensionnel, sont autant de paramètres à mesurer et à asservir pour atteindre des cadences de production élevée et garantir une homogénéité des performances sur toute la longueur fabriquée du produit.

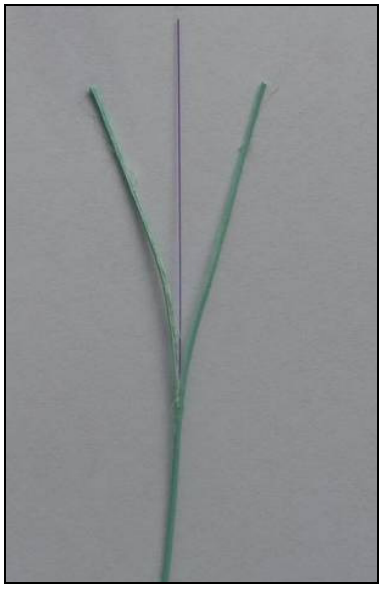


Figure 8 Elément sensible inséré au sein d'un câble optique (photo ACOME)

La figure 9 ci-dessous schématise les éléments d'une ligne d'extrusion.

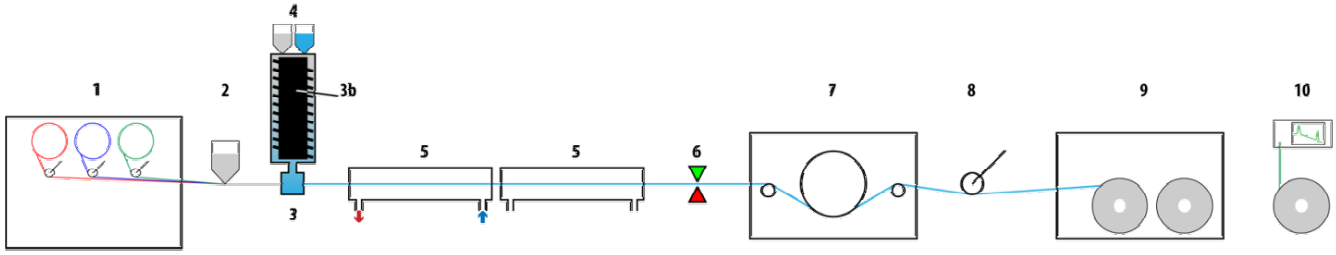


Figure 9 Ligne d'extrusion schématisée (d'après société ACOME)

1. Dévidoirs de fibres optiques (jusqu'à 24 bobines)
2. Dépôt couche intermédiaire
3. Tête d'extrusion
3b. Vis d'extrusion
4. Alimentation en granulés de matière plastique et de colorant
5. Bacs de refroidissement à eau, bacs de séchage à air
6. Contrôleurs optiques de diamètre et de forme
7. Cabestan d'entraînement de la ligne / Chenille de tirage
8. Pantin asservi de réglage de la tension
9. Emmagasinage automatisé sur bobine
10. Contrôle optique

6.2 Industrialisation et différenciation retardée

Comme indiqué plus en amont, la structure des câbles CFO dépend de l'application à couvrir. Aussi, l'industrialisation des câbles capteurs est réalisée, selon les structures, selon deux principes de fabrication.

<u>Premier principe de fabrication (procédé traditionnel)</u>

Le 1er principe est un procédé de fabrication qui se déroule en deux phases (Fig. 10). Dans un premier temps, une fibre optique est enrobée dans un cylindre polymère (diamètre = 900 µm) ayant la particularité d'adhérer parfaitement à la fibre, d'être compatible avec la connectique existante, tout en permettant une facilité d'accès à la fibre optique sur quelques dizaines de centimètres par une ouverture longitudinale aisée.

Etape 1 : Fabrication de l'élément sensible



Etape 2 : Fabrication du câble à fibres optiques par assemblage et gainage

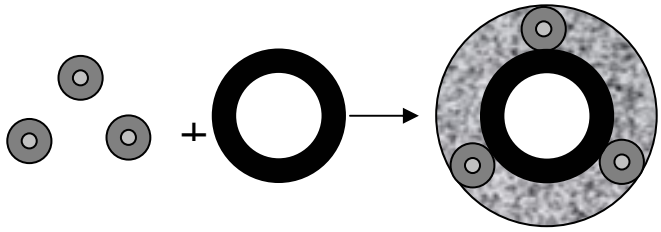


Figure 10 Illustration de la fabrication du câble en deux étapes

Dans un second temps, plusieurs éléments sensibles sont assemblés autour d'une structure porteuse donnant au câble son diamètre définitif. Différents sections/dimensions de câble peuvent être réalisées, jusqu'à 150 mm de diamètre. La figure 11 illustre le cas d'un câble 3D ($Ø_{ext}$ = 15 mm), et d'un câble plat (30 * 15 mm²).

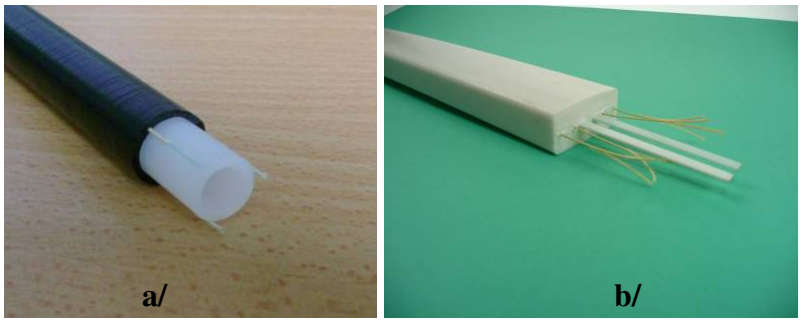


Figure 11 Câbles optiques sensibles réalisés selon le procédé de fabrication traditionnel
a/ Câble sensible contenant 3 fibres optiques de diamètre 17 mm, positionnement à 120°
b/ Câble plat (30 mm x 15 mm) à 4 fibres sensibles

Second principe de fabrication (procédé ACOME)

Ce principe de fabrication a été a mis au point et implémenté par ACOME, dans son usine de Mortain (50).

Les trois grandes étapes de production d'un câble capteur sont réduites à une seule étape au cours de laquelle les trois gaines sont extrudées simultanément (on parle alors d'extrusion "triple couche"). Cette ligne constitue une chaîne de production optimisée pour la fabrication du câble capteur. Une fibre optique (diamètre 250 µm) est donc recouverte de trois couches périphériques en une seule et même opération.

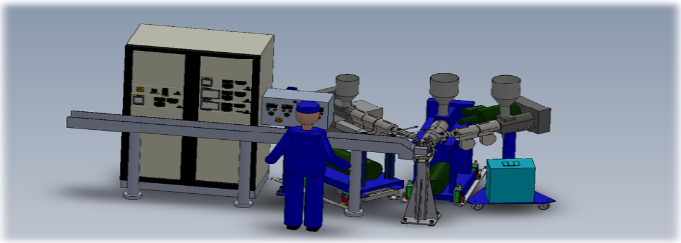


Figure 12 Vision macroscopique de l'extrusion triple couche

Pour cela, trois extrudeuses sont associées (Cf. figure 12) qui convergent vers un bloc de distribution présenté en détails figure 13. La fibre optique pénètre dans le bloc de distribution sur la partie droite et après dépôt des trois couches de matière sur la fibre optique, dans le bloc de distribution. Le câble capteur ainsi obtenu traverse le bac de refroidissement situé à gauche de ce même bloc. Le processus de fabrication est continu et ne nécessite pas d'intervention humaine une fois stabilisé.

Les trois extrudeuses sont positionnées afin de converger physiquement sur le bloc de distribution. Chaque extrudeuse reçoit et prépare (thermiquement et mécaniquement) un matériau associé à une gaine et l'injecte dans le bloc de distribution.

- L'extrudeuse N°1 injecte la matière nécessaire à la réalisation de la gaine de ‘contrainte’,
- L'extrudeuse N°2 injecte la matière nécessaire à la réalisation de la gaine de ‘renforcement’,
- L'extrudeuse N°3 injecte la matière nécessaire à la réalisation de la gaine ‘extérieure’.

Le bloc de distribution assure la diffusion de ces matières simultanément mais séparément autour de la fibre afin d'obtenir le câble capteur. L'ensemble des figures 13 à 15 détaille la fabrication d'un câble capteur à une fibre optique ayant 3 couches de protection concentriques. La fibre optique (figures 13 et 15) entre sur la partie droite de l'ensemble d'extrusion (figure 13) et ressort sur la partie gauche, alors entourée des trois gaines concentriques formant ainsi le câble capteur fini (figures 13 et 14).

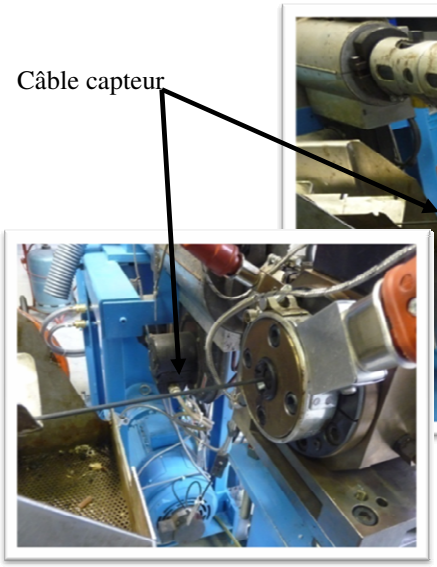


Figure 14 Câble capteur gainé sortant de l'extrudeuse

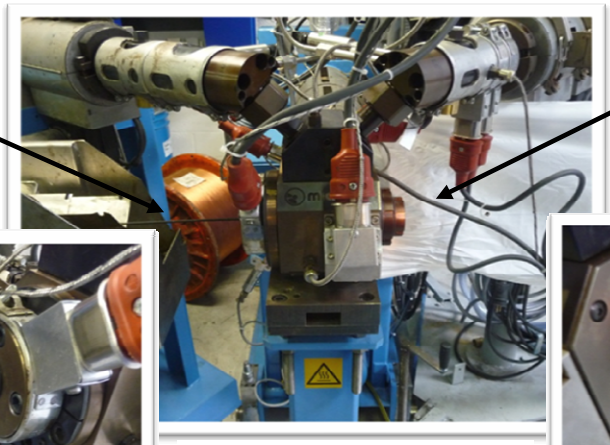


Figure 13 Ensemble d'extrusion en fonctionnement

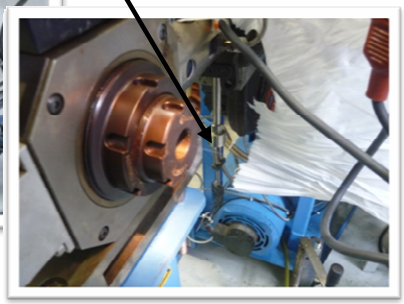


Figure 15 Fibre optique nue entrant dans le bloc de distribution

6.3 Contrôle, suivi et caractérisation des produits en production

Lors de leur développement, les câbles capteurs sont caractérisés du point de vue mécanique et thermique selon les mêmes essais que les câbles de télécommunications à fibres optiques, en faisant référence à la norme internationale CEI 60794.

Par ailleurs, des essais spécifiques aux câbles capteurs complètent ce dispositif d'essais :

- Sensibilité à la température,
- Sensibilité à la déformation,
- Mesure de l'adhérence fibre à la structure,
- Sensibilité en courbure pour les câbles multifibres.

Lors de la fabrication des câbles sensibles, tous les paramètres d'extrusion sont mesurés tout au long de la production et enregistrés par l'automate de ligne.

Chaque fibre des câbles, à chaque étape de fabrication, est contrôlée en réflectométrie (OTDR) Rayleigh pour vérifier que les étapes de fabrication n'ont pas généré de contraintes sur les fibres. La variation de l'atténuation linéique (à 1550 nm dans le cas de fibre monomode) est contrôlée d'une étape de fabrication à l'autre, et celle-ci doit rester dans des proportions compatibles avec l'application du produit (typiquement, l'atténuation ne doit pas excéder 0,5 dB/km).

Enfin, les opérations de contrôle de fin de production consistent :

- en une mesure de l'atténuation linéique à 1310 nm et 1550 nm, sur bobine de conditionnement, qui permet de vérifier que le produit reste dans des plages d'affaiblissement compatibles avec les portées multi-kilométriques recherchées,
- en une mesure de la signature Brillouin du produit sur son conditionnement (Fig. 16).

6.4 Exemple de qualification en courbure

L'une des utilisations d'un tel câble '3D' de diamètre de 15 mm est la détection de fontis sur une étendue spatiale d'une vingtaine de mètres par exemple, tandis qu'un câble de plus gros diamètre (typiquement 150 mm de diamètre), donc dix fois plus sensible, permet la mesure millimétrique de tassements sur plusieurs dizaines de mètres. De tels câbles ont ainsi été qualifiés sur un banc composé de 20 modules à crémaillères d'un mètre de long chacune, permettant d'imposer divers profils au câble en test.

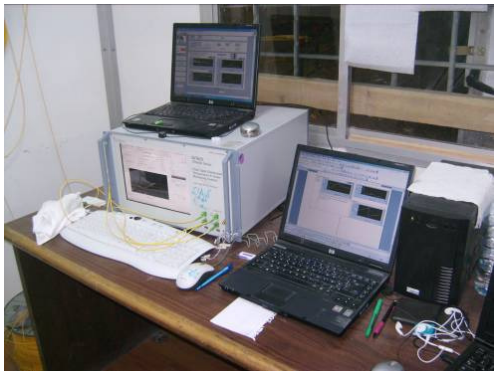


Figure 16 La chaine de mesure Brillouin de type BOTDA du CEA LIST-LMO

A titre d'exemple, la figure 17 illustre la détection par le câble de 15 mm de diamètre d'un fontis d'amplitude 17 mm. Le profil imposé (courbe jaune - triangles) est mesuré à l'aide d'une règle graduée située au niveau de chaque module par rapport à une position de référence. Les déformations maximales dues à la courbure du câble sont mesurées par BOTDA (Brillouin, courbe bleue) et permettent *via* une double intégration de déterminer le profil du câble (courbe rose). Un fontis de ce type induisant sur le câble des déformations de faible amplitude (60 µm/m au maximum, rapport signal / bruit ~ 3).

La Figure 17 montre que le profil d'amplitude du fontis a été correctement reconstitué avec une erreur de seulement 4 mm sur l'amplitude maximale.

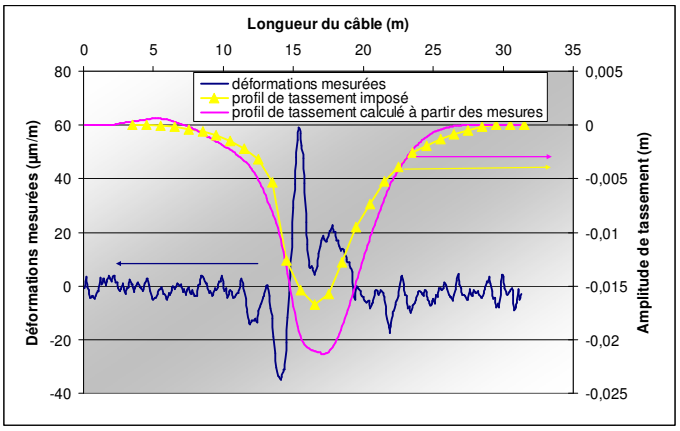


Figure 17 Détection d'un fontis d'amplitude 17 mm avec un câble ϕ 15 mm

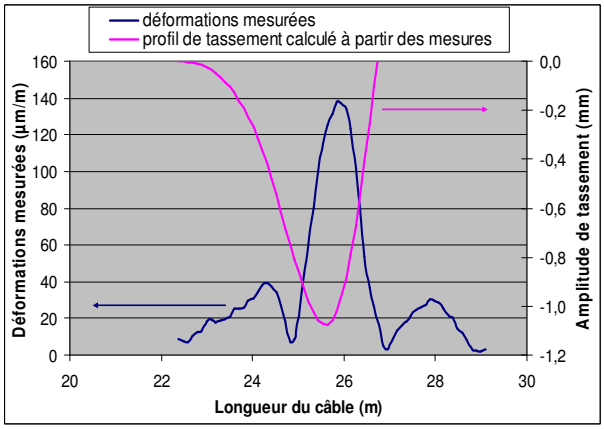


Figure 18 Détection d'un fontis d'amplitude 1 mm avec un câble ϕ 150 mm

7. Projets applicatifs

Abordons maintenant quelques thématiques ou projets applicatifs récents concernant les mesures réparties. Pour l'effet Raman, les deux principaux secteurs d'applications, sont comme indiqué en amont, la surveillance des *pipelines* et *risers* pétroliers d'une part, et la surveillance incendie dans les tunnels d'autre part. Cela étant, bon nombre d'applications, correspondant à ce jour à des marchés plus restreints, commencent progressivement à voir le jour ; citons la détection de fuites, la surveillance thermique dans le secteur des énergies nouvelles (pompes à chaleur, habitat ...), sans oublier un certain nombre d'applications dédiées à améliorer la sûreté des centrales nucléaires. Pour en savoir plus, sur ce dernier point, tout lecteur intéressé aura avantage à se reporter à la publication dédiée présentée dans cette même conférence [17]. En ce qui concerne les mesures réparties de type Brillouin, le champ d'application est également vaste, couvrant le Génie Civil, les travaux publics, la sécurité … A titre d'illustrations des potentialités de ces deux approches, complémentaires, plusieurs projets tirant profits des câbles optiques sensibles sont présentés ci-dessous.

7.1 Quelques applications de mesures réparties par effet Raman

7.1.1 Détection incendie dans les tunnels

La société moderne apporte chaque jour son lot de risques pour les personnes et les biens, risques qui doivent être combattus efficacement. Il en va ainsi du risque incendie. Les incendies dévastateurs qui ont eu lieu en tunnels ces dernières années (tunnel sous la Manche, Mont Blanc …) ont montré qu'il est souvent nécessaire d'améliorer les systèmes de détection existants, et les conditions d'évacuation, tout en créant des structures dédiées, efficaces et rapides de lutte anti-incendie.

Au niveau des équipements de détection, les besoins portent sur des systèmes passifs, capables de fournir précocement des informations de surveillance, qui une fois l'alarme déclenchée, permettront au PC de crise de mieux la gérer, à savoir : interdire l'accès, faciliter l'auto-évaluation des usagers, et permettre un travail plus sûr des pompiers et sauveteurs, tout en protégeant l'ouvrage.

Il faut savoir que de nombreux tunnels ne sont pas surveillés (pour des raisons économiques). Cette problématique concerne donc prioritairement les tunnels surveillés, mais il n'est pas exclu que les nouvelles solutions technologiques –comme les fibres optiques- rendent économiquement viable la surveillance incendie de tunnels qui ne l'étaient pas jusqu'alors.

Les particularités des tunnels sont bien connues : il s'agit d'ouvrages linéaires de (très) grandes longueurs, et l'environnement y est agressif et variable (tunnel routier, ferroviaire, galerie technique, etc.) ainsi que leur usage (transport de matières inflammables, de véhicules …). Par ailleurs, il faut savoir que pour la plupart des incendies, l'inflammation est spontanée et que la puissance dégagée peut être considérable (2 MW à 200 MW !). D'où l'importance d'une détection précoce, localisant l'événement, en particulier pour gérer le désenfumage et donc la ventilation, qui joue un rôle crucial.

A titre d'exemple, l'incident du Mont Blanc le 24 mars 1999 dura près de 53 h, tua 39 personnes et entraîna la fermeture du tunnel pendant 3 ans, après qu'un camion frigorifique semi-remorque transportant de la margarine et de la farine prit feu ce jour là vers 11 h à 7 km de l'entrée française. Le procès qui suivi établit que les procédures d'urgence ainsi que les mesures de sécurité n'avaient pas été respectées depuis de nombreuses années. Depuis la législation a évolué imposant plusieurs surveillances de types différents, pour accroître la redondance, et éviter les modes communs entre les systèmes de détection.

Afin de mieux cerner cette question, les spécialistes ont défini des "incendies de référence". Ainsi, pour un tunnel routier, les paramètres sont : diamètre ~ 8 m ; vitesse de l'air 5 m/s en début de sinistre, avec en aval du foyer : 15 ppm de CO [émission des véhicules], une visibilité faible [opacité de 15 à 70.10^{-3}/m], et une élévation de température à détecter de seulement 4°C. Le plus souvent, pour accroitre la probabilité de détection et réduire les fausses alarmes, la bonne démarche consiste à croiser plusieurs facteurs. Ainsi classiquement, des systèmes vidéo sont utilisés, de même que des capteurs de détection de fumée (opacité, gaz toxiques), des détecteurs thermiques, de flamme, … Naturellement, en ce qui concerne les tunnels les plus "sensibles", la redondance s'impose.

En résumé, les spécifications requises en termes de fonctionnalités sont globalement les suivantes :

1/ fiabilité de la détection (bonne détectivité, mais peu de fausses alarmes),

2/ robustesse de l'installation,

3/ rapidité de détection,

4/ possibilité de localiser l'événement.

Les systèmes de surveillance incendie reposent sur des capteurs de fumée et de flammes dans le but de détecter précocement un début d'incendie. En effet, l'élévation de température est parfois considérée comme un paramètre tardif. En outre, les détecteurs de température classiques utilisés (dits thermo-vélocimétriques) sont d'une maintenance délicate. Ce manque de fiabilité a pour conséquence que ces capteurs ponctuels de détection des variations thermiques sont peu prisés, et que la mesure de température seule soit peu retenue. Cela étant, désormais, la disponibilité de recourir à des CFO répartis capables de fournir de manière spatialement continue le profil de température de long d'un simple câble mono-fibre peut conduire à rediscuter cette orientation.

Pour les professionnels de ce secteur, la détection incendie *via* la mesure de la température le long d'une fibre optique est un moyen relativement nouveau au service de la sécurité de leurs tunnels, mais force est de

constater qu'ils ont néanmoins commencé à se l'approprier. Aussi, cette dernière décennie, des systèmes de mesure répartis par DTS-Raman ont été déployés, au sein d'un millier de tunnels dans le monde. Ces systèmes permettent en pratique de détecter toute élévation anormale de la température d'un câble optique placé en partie haute du tunnel, et de la localiser à 2 ou 3 m près, en quelques dizaines de secondes. Des installations d'importances stratégiques ou de grandes valeurs sont donc la cible de cette surveillance spatialement continue depuis une base arrière.

L'installation d'un tel système de surveillance incendie est relativement simple : il s'agit principalement de déployer un câble à fibre optique tout le long de la zone à surveiller. La maintenance est réduite car, même s'il faut vérifier régulièrement l'état mécanique du câble, toute détérioration de la fibre est immédiatement détectée, et localisée, par le système DTS. De plus, à la différence des systèmes de détection habituels, on évite l'étalonnage et la maintenance individuelle de chaque détecteur.

Les DTS actuellement utilisables présentent plusieurs modes opératoires : la possibilité de balayages successifs du profil thermique de la fibre, d'autres pour déterminer et localiser uniquement certaines zones où la température dépasse des seuils prédéfinis, ou bien des balayages visant à déterminer et localiser les points ou une évolution rapide de la température a lieu.

Pour la surveillance incendie dans les tunnels, cette technique de détection répartie (continue) de température par effet Raman présente en fait plusieurs avantages déterminants :

- détermination de l'état d'avancement du sinistre, en précisant son ampleur, sa position et sa direction, ce qui permet d'organiser au mieux les interventions des services d'urgence,
- mesure de température continue tout au long de la fibre optique à la différence des systèmes traditionnels (thermocouples par exemple) qui fournissent une information par transducteur,
- les signaux sont totalement insensibles aux perturbations électromagnétiques, ce qui permet de réduire les fausses alarmes ; la mesure ne nécessite aucun câble électrique au niveau des câbles sensibles, et fonctionne donc sans alimentation dans le tunnel,
- le système surveille sans interruption l'intégrité de la fibre, détermine et localise une éventuelle dégradation du câble, permettant sa réparation rapide par les services de maintenance.

Précisons également que si les fibres optiques monomodes (standard télécommunications) sont abondamment utilisées pour cette application en vertu de la portée de mesure et de la résolution temporelle, des fibres multimodes sont également utilisables. Ces dernières présentant un diamètre de cœur plus important (50 µm au lieu de 10 µm) et conduisent *in fine* à une mesure un peu plus performante en terme de résolution thermique (du fait d'un meilleur rapport signal-sur-bruit à la détection).

En ce qui concerne les temps de réponse des instruments DTS, il faut quelques minutes pour obtenir le profil thermique complet de température d'une fibre mais seulement quelques secondes dans les deux autres modes de balayages. La résolution de mesure est meilleure que le degré Celsius.

Enfin, les systèmes optoélectroniques DTS Raman sont relativement onéreux, mais ce coût –qui baisse progressivement– doit être mis en perspective avec celui d'une instrumentation électrique équivalente pouvant gérer jusqu'à plusieurs milliers de capteurs (!). De surcroît, le coût du câble-capteur est relativement faible en comparaison de son équivalent électrique. Enfin, dans l'analyse économique, il y a lieu d'inclure les coûts d'installation, de maintenance et de traitement/analyse des données, ce qui *in fine* conduit à un résultat au bénéfice de la technologie optique.

7.1.2 Applications pétrolières

Dans le domaine pétrolier, *offshore* en particulier, les besoins sont nombreux et, malgré les conditions extrêmes, attirent les "offreurs de technologies" du fait de la solvabilité de la demande, liée au coût du baril dont la tendance haussière, s'explique par une demande forte des pays émergents, les contraintes géopolitiques, et *in fine* la raréfaction inéluctable de la ressource[3]. Ainsi, du fait de l'accroissement de la demande, le nombre d'installations de production

[3] Les estimations les plus optimistes en termes de réserves ultimes pour la planète avoisinèrent 3 Tbaril, avec 1/3 déjà consommé, 1/3 de réserves prouvées, le reste étant à découvrir, surtout dans les bassins peu exploités ou les zones péri arctiques. Le Golfe possède ~ 60 % des réserves mondiales connues, ce qui correspond à 40-50 ans de production. Lorsqu'on parle de *réserves*, on évoque celles qui sont

offshore, est également en augmentation, et la quête s'étend désormais aux très grandes profondeurs (2000 m et sans doute bientôt 3000 m). Dans de tels environnements, les composants sous-marins et les structures de production sont soumises à des conditions de fonctionnement de plus en plus sévères. D'où la motivation des compagnies pour la surveillance de l'intégrité de ces composants, en utilisant en particulier des CFO, du fait de leurs capacités de déport à très grande distance et de multiplexage, et de leurs bonnes performances même en environnements sévères.

En termes de besoins, on peut citer pêle-mêle pour le secteur des hydrocarbures, et à titre d'exemple : la surveillance des canalisations (*pipes*, *risers* tant rigides que flexibles ...) pour la production, l'imagerie des champs pétrolifères nouveaux ou matures[4], la surveillance des installations en mer (plateforme, barges ...), etc. Dans le domaine *on-shore*, il s'agit de surveiller les puits de production (*smart wells*), et bien entendu les *pipelines* de transport, qui dans les zones inhabitées ou difficiles peuvent subir des dommages divers (glissements de terrain, fuites, sabotages …). En fait, la liste complète de ces éléments structuraux qui nécessitent une surveillance est longue. En plus des *risers* et *flowlines* déjà cités, soulignons également : les cordes d'amarrage / d'ancrage, les câbles divers, les ombilicaux, etc. Tous ces éléments, caractérisés par des limites mécaniques fixées par leurs matériaux constitutifs et leur conception, subissent des efforts d'origines diverses, –lors de l'installation, de la mise en service et surtout en service– et sont donc soumis à des phénomènes de fatigue, ce qui peut réduire leur durée de vie, augmenter les risques de rupture, et *in fine* accroître les coûts d'exploitation. Des inspections périodiques par véhicules télécommandés (ROV : *Remote Operating Vehicles*) sont parfois utilisés pour évaluer l'état de santé structurelle, par exemple des *pipes* sous-marins, cependant ces moyens sont très coûteux et ne permettent pas de contrôle *in situ* et permanent des matériels.

De plus, la 'disponibilité' des *pipelines* assurant la production et le transport des hydrocarbures est une motivation des exploitants. Les compagnies cherchent en effet à connaître, en permanence, l'état de leurs *pipes* et de leurs *risers*, ces 'tuyaux verticaux' qui permettent d'extraire le pétrole depuis le réservoir naturel situé sous le fond de la mer. Les informations requises par les compagnies pour piloter l'exploitation et la maintenir sont typiquement :

- le profil, le long de la colonne, de la température et des mesures de pression pour s'assurer que les bonnes conditions thermodynamiques sont réunies, de manière à éviter la formation d'hydrates au sein de la canalisation (bouchage). C'est ce que les anglo-saxons nomment le *flow insurance* (l'assurance de produire),
- des mesures de déformations dans certaines zones de la conduite (en général à ses extrémités : en fond de mer, et au niveau du raccordement à la barge près de la surface de la mer) soumises à des contraintes mécaniques particulièrement éprouvantes (mouvements de la conduite liés aux courants, à la houle …). Il s'agit de surveiller l'état de fatigue de ces conduites (et plus généralement des installations) pour éviter toute rupture,
- des mesures de courbures sur certaines conduites soumises aux mouvements de la mer,
- etc.

Les *pipelines* de transport, quant à eux, sont déployés sur de très longues distances (approvisionnement des pays consommateurs depuis les pays producteurs), parfois en mer, souvent sur terre, parfois dans des zones reculées touchées par les risques géologiques ou soumises à des conditions environnementales difficiles. Ainsi par exemple ceux en eaux profondes situés dans l'Arctique introduisent de nouveaux défis en termes de gestion de leur intégrité, qui par exemple peut être affectée par l'érosion des fonds marins, et les tassements/effondrements dus à la fonte du permafrost sur lequel ils reposent.

---

prouvées, liées à la possibilité de produire dans les conditions techniques et géologiques actuelles, sans intégrer la découverte de nouveaux gisements ou l'amélioration des techniques d'extraction.
Il y a en fait deux écoles de pensée, les optimistes (les économistes) qui considèrent que les prévisions de raréfaction ont toujours été démenties et que les progrès techniques conduiront à développer de nouveaux gisements, … et les pessimistes (les géologues) qui affirment que les réserves annoncées sont surestimées, qu'il est peu probable que nous fassions de nouvelles découvertes majeures, que l'on assiste à une accélération du déclin des producteurs par accroissement de la productivité, et que la méthodologie de Hubbert permet de prévoir le déclin (Gaussienne dont le sommet [50% consommés] indique que la production décline une fois franchi ; ce pic de production se situera vers 90-100 Mbaril/jour d'ici dix ans).
Finalement, il est assez probable que la production puisse croître au delà de quelques décennies. La date du pic (de Hubbert, dit aussi « *peak oil* ») de production mondiale évolue entre les années 2020 (réserves ultimes ~ 3 Tbaril) et 2030 (~ 4 Tbaril, en intégrant les productions non conventionnelles du Venezuela et du Canada). La manne pétrolière va donc encore durer quelques décennies, peut être ½ siècle, pas plus. Bien sûr, personne ne connaît la date exacte du pic pétrolier mondial, les données réelles sur les gisements étant *ultra confidentielles*. Cela étant, les experts s'accordent sur un pic de production vers 2020 et à cette date un volume ~ 80 Mbarils de pétrole conventionnel extrait chaque jour. Avec le pétrole non-conventionnel ce chiffre pourrait monter à 100-110 Mb/jour. Les experts du secteur (ENSPM, IFP …) anticipent que le prix du baril pourrait atteindre 200 $ à 300 $ dans les années juste avant ou après le pic.
A la lecture de ces chiffres, eux même liés à notre forte dépendance au pétrole, on comprend alors pourquoi les activités pétrolières sont considérées comme 'solvables' par les offreurs de technologies !

[4] Il s'agit de l'imagerie 3D ou 4D fondées, pour l'optique, sur des réseaux d'hydrophones à fibres déployés en fond de mer.

Dans le passé, la surveillance des *pipelines* a souvent été réduite à des contrôles visuels et à des bilans massiques. En conséquence, les défaillances de ces structures étaient, et restent souvent, soient détectées par une diminution du flux de sortie soit, pire, lorsque l'environnement est gravement affecté. De tels événements[5] impliquent des coûts gigantesques tant financiers (pouvant aller jusqu'à la ruine de la compagnie, mais aussi de l'économie locale), qu'écologiques bien évidement, sans parler de l'image dégradée du pétrolier et plus globalement de ce secteur industriel. De fait, l'industrie pétrolière et gazière s'intéresse de très près aux nouvelles technologies de surveillance permanente, et temps réel, à la fois pour ses installations en mer (*offshore*) et sur terre (*on-shore*).

Dans ce contexte, les systèmes de mesures réparties, comme le DTS Raman sont déjà largement utilisés par cette industrie, et ce depuis plusieurs années, pour en particulier déterminer le profil thermique des canalisations. Dans le cas particulier de la détection des fuites (cas des *pipes on-shore,* des réservoirs …) l'exploitant analyse le profil de température d'un câble enterré sous la canalisation. Il peut alors s'agir de détecter l'apparition locale de points chauds ou de points froids, témoins d'une fuite, suivant la teneur du fluide transporté.

Simultanément à la mesure de température par effet Raman, la mesure du profil des déformations d'un câble optique (soit fixé à la canalisation soit enterré près d'elle) obtenu par effet Brillouin peut être utilisé pour détecter et localiser les déformations induites par exemple par les mouvements du sol, permettant ainsi la détection précoce de l'augmentation des contraintes induites par l'environnement (pluies, risques géologiques, glissements de terrain, tassements dus au dégel …).

Dans ces différents contextes, il est clair que les câbles optiques innovants proposés par ACOME, une fois judicieusement mis en place et connecté aux instruments de mesures réparties requis (DTS Raman, Analyseur Brillouin …) répondent parfaitement à bon nombre des besoins mentionnés, qu'il s'agisse de mesure de température, de fuites, déformations, courbures, etc. Naturellement, pour chaque application les besoins sont spécifiques et le choix du câble sensible optimal doit être analysé et sélectionné avec soin, de même que sa procédure de pose. Cela étant, une fois déployés, ces câbles sensibles innovants fabriqués par ACOME, une fois interrogés par un instrument de mesure répartie (DTS Raman, Analyseur Brillouin, réflectomètre …) sont à même de fournir à l'exploitant les informations de surveillance nécessaires à la surveillance et au pilotage temps réel de son installation. Ceci est d'autant plus vrai que les profils de température, de déformations et de courbures sont acquis puis enregistrés à intervalles réguliers dans une base de données, pour être analysés sur place ou de manière distante, en temps réel ou *a posteriori*. Précisons également que dans la mesure où cette surveillance par câbles sensibles est extérieure aux canalisations et structures instrumentées, leur intégrité n'est pas affectée, et la technique est applicable à tout type de canalisation/structure. Il s'agit donc d'une approche parfaitement générique pouvant s'adresser à l'ensemble des installations concernées.

7.1.3 Détection de fuites

Les ouvrages qui bordent différents cours ou retenues d'eau (barrages poids, digues en terre) sont classiquement "vulnérables" à différents phénomènes (érosion, mouvements de terrains …) contribuant à l'accélération de leur défaillance. A ce propos, souvenons-nous de la catastrophe survenue à la Nouvelle Orléans suite au passage de l'ouragan Katrina qui avait submergé la ville le 29 août 2005 et entraîna la mort de 1330 personnes. Le montant des travaux pour la reconstruction ou la consolidation des digues qui avaient cédé, s'éleva à plus de 10 milliards de dollars. La surveillance de ces ouvrages est de fait essentielle pour prévenir d'éventuelles catastrophes.

Le plus souvent, l'érosion interne se manifeste souvent par la présence de fuites, dont les conséquences peuvent aller jusqu'à la rupture. Puisqu'une anomalie thermique caractérise souvent un écoulement d'eau au sein d'une digue, la détection de ces fuites devient alors un indicateur essentiel de l'état des ouvrages. La méthode traditionnelle de contrôle consiste à réaliser ponctuellement, tant dans le temps que dans l'espace, des mesures de température par sonde qu'un technicien place de proche en proche dans le sol [18].

Une avancée majeure pour la surveillance de ce type d'ouvrages de grande dimension linéaire serait bien entendu l'automatisation de moyens de surveillance, temps réel, centralisés permettant de générer des alarmes et d'améliorer les procédures de maintenance, devenue idéalement prédictive. C'est pourquoi le secteur de l'instrumentation par fibres optiques a commencé, ces dernières années, à diffuser pour ce type d'applications,

[5] Cf. en mai 2010, la catastrophe écologique du golfe du Mexique [22 millions de litres de brut déversés en mer] conséquence de la rupture d'une canalisation de BP.

dans la mesure où le coût inhérent à une mesure multipoints devient rapidement prohibitif dans le cas de grands ensembles linéaires, rendant très rapidement la solution par fibre optique économiquement viable.

Dans ce contexte, EDF qui possède plusieurs dizaines de centrales hydrauliques de toutes tailles, se doit de gérer et donc d'entretenir les canaux d'amenée d'eau vers ses centrales puisque leur fonctionnement optimal en dépend. Ces canaux sont parfois très longs (plusieurs dizaines de km, sur ~ 600 km de digues gérées par EDF) et généralement bordés par des digues en terre. Initialement dans le cadre du projet HYDRODETECT [19-20], pour valider cette approche, après avoir qualifié au plan métrologique les performances d'un DTS Raman de son choix, la R&D d'EDF a ensuite installé des câbles optiques en sub-surface de plusieurs de ces digues, et placé une instrumentation DTS Raman à plusieurs kilomètres, au niveau de l'usine hydroélectrique. Les deux principaux sites retenus furent d'abord celui d'Oraison venant de la Durance (Alpes de Haute Provence) puis de Kembs (Grand canal d'Alsace sur le Rhin). Une première faisabilité consistant à associer une baisse locale de température à une fuite a été ainsi démontrée, mais le retour d'expérience a aussi mis en évidence qu'une évolution de la température mesurée entre l'eau et le terrain peut être avoir d'autres origines, telles que les variations thermiques saisonnières, circadiennes, ou d'ensoleillement, le niveau des précipitations, et être influencée par la structure du sous-sol (réponse du terrain, environnement géomécanique, présence de canalisations …). Tout ceci rend assez difficile l'interprétation, en terme de fuite, des profils thermiques acquis.

Une analyse plus approfondie du traitement du signal a alors été engagée par ces équipes, de manière à extraire les informations pertinentes (positions temporelle et spatiale des fuites), dans le but de s'affranchir des données climatiques (en particulier journalières) dont l'influence dépasse souvent largement celle des fuites recherchées. Le principe du traitement du signal repose sur le concept de séparation de sources (une source correspond à un facteur influençant les mesures). L'une des approches retenues, par exemple dans le cas où le nombre d'acquisitions est limité, consiste à détecter mathématiquement des singularités (exploiter les 'dissimilarités' entre les mesures journalières de température le long de l'abscisse de la fibre) [21].

Ces méthodes de traitement, validées sur des données simulées et/ou de terrain, comme celles acquises précédemment pendant l'expérimentation du Canal d'Oraison, devraient sans doute être testées sur le terrain pour réellement valider l'approche globale. Précisons enfin, que compte tenu de la taille souvent importante des ouvrages, un maillage (transversal et en profondeur) pourrait s'avérer utile. Dans ce cas, à nouveau, la technique répartie par effet Raman permettant d'adresser plusieurs dizaines de kilomètres de fibre, et bien plus avec l'adjonction d'un commutateur, s'avère économiquement pertinente, puisque l'instrumentation Raman peut être mise en commun pour l'ensemble du maillage.

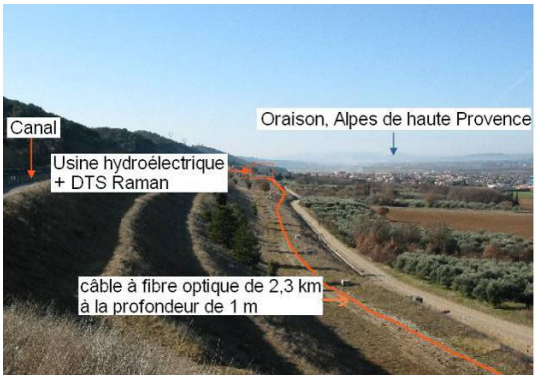


Figure 19 Site d'expérimentation d'Oraison pour la détection de fuite par DTS-Raman (d'après EDF R&D)

7.1.4 Surveillance d'échangeurs enterrés pour pompes à chaleur

Le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) est l'établissement français de référence dans le domaine des Sciences de la Terre. Dans le secteur de la géothermie, ses objectifs sont de comprendre les phénomènes souterrains pour élaborer les outils nécessaires à la gestion du sous-sol et de ses ressources. Dans ce cadre, une plateforme de démonstration sur les pompes à chaleur (PAC) géothermique a été créée à Orléans. Cette plate-forme aborde l'intégration du chauffage d'origine géothermique au bâtiment. Sa vocation première est de décrire le comportement des terrains dans lesquels sont implantés des échangeurs géothermiques (horizontaux, verticaux et semi-compacts) simulant, de manière contrôlée, des demandes de pompes à chaleur (rafraîchissement et chauffage). Les résultats obtenus sont destinés à servir de référence à divers procédés novateurs proposés par les entreprises. Des puits canadiens sont également implantés pour y être étudiés.

Dans le cadre de ce projet, le CEA LIST a mis en œuvre une instrumentation par fibres optiques basée sur l'effet Raman (DTS-Raman). Les différents échangeurs et leur environnement proche ont été instrumentés avec 10 km de câble sensible à fibre optique, permettant d'obtenir une cartographie thermique complète du sous-sol, ce qui s'avèrerait impossible avec des capteurs traditionnels tant du point économique que de la mise en œuvre. La mesure est de plus totalement passive et ne perturbe pas le sous-sol étudié (Fig. 20), [22].

Après une mise en œuvre concluante et des résultats des plus intéressants sur cette plateforme, le partenaire BRGM entend déployer cette technologie à l'échelle du territoire national pour instrumenter divers échangeurs géothermiques innovants de même que les installations qui sont raccordées à ces échangeurs.

7.1.5 Mesure des performances énergétiques des bâtiments

Dans le cadre d'un projet ANR en cours (BATIMETRE), le LMO développe un procédé de diagnostic des performances énergétiques du bâtiment en mettant en œuvre un très grand nombre de points de mesure et un logiciel de simulation. Dans ce cadre, une plateforme expérimentale (INCAS), composée de différents types de bâtiments solaires à usage maîtrisé, est en construction à Chambéry. Les premiers bâtiments sont opérationnels et des mesures en cours. Les premières analyses devraient être effectuées d'ici la fin de l'année 2011. Chaque bâtiment est équipé de plusieurs centaines de capteurs pour le caractériser au mieux et *in fine* en sélectionner un jeu minimal et une méthodologie permettant une « Garantie Résultat Energie ».



Figure 20 Vue d'artiste d'un échangeur horizontal en sub-surface équipé de fibres optiques (BRGM)

Dans ce projet, le CEA LIST met en œuvre une instrumentation par fibre optique de type DTS Raman. Cette approche permet pour la première fois la collecte de plusieurs milliers de points de mesure grâce au simple déploiement quelques fibres optiques au niveau des murs des bâtiments (Fig. 21). Une cartographie thermique complète de chaque bâtiment est ainsi obtenue en temps réel, ce qui s'avèrerait impossible avec des capteurs traditionnels tant du point de vue économique que du fait de la complexité de mise en œuvre avec des capteurs ponctuels traditionnels. Dorénavant, il est donc possible d'envisager l'installation d'une (ou de quelques) fibre(s) optique(s) lors de la construction de bâtiments (avec un surcoût acceptable), puis de réaliser -à distance- des mesures en continu ou à la demande, pour par exemple piloter des fonctions de chauffage ou de climatisation, sans oublier bien évidemment la surveillance incendie.



Figure 21 Illustration du déploiement de câbles optiques sensibles sur et dans les murs d'une maison (projet BATIMETRE)

7.2 Quelques application des mesures réparties par effet Brillouin

7.2.1 Mesures et Surveillance durant les travaux publics

Le câble sensible à fibres optique (câble "3D") a servi par exemple à la détection de tassements de terrain lors du creusement d'un tunnel de métro à l'aide d'un tunnelier. La validation de terrain s'est déroulée sur un chantier de métro, alors que le tunnelier (diamètre ~ 9,5 m) reprenait le creusement (profondeur à l'axe du tunnel 13 m) en sortie de station (Fig. 22). Plusieurs câbles de différents diamètres et longueurs ont été installés dans deux tranchées de longueur d'environ 20 m, l'une longitudinale et l'autre transversale au tunnel, à 4 m au dessus de la voûte. Les mesures ont été enregistrées en temps réel grâce au câble "3D" et à l'instrumentation Brillouin connectée en extrémité. Celles-ci ont été comparées aux contre-mesures obtenues à l'aide de tassomètres verticaux visibles en surface pendant toute la phase de creusement, jusqu'à ce que le tunnelier ait dépassé la zone instrumentée.

La figure 23 illustre la reconstitution des tassements enregistrés dans la tranchée transversale à l'aide de la technique Brillouin. Les tassements ainsi obtenus (< 10 mm) sont en bon accord avec ceux mesurés par les tassomètres disposés le long des tranchées. En effet, les tassomètres T8 et T9 situés au croisement des deux tranchées ont respectivement mesuré des tassements de 8 mm et 7,5 mm. La figure 24 illustre quant à elle la compression du terrain dans la tranchée transversale située au point métrique 18, au fur et à mesure de l'avancée du tunnelier [8, 9, 23].

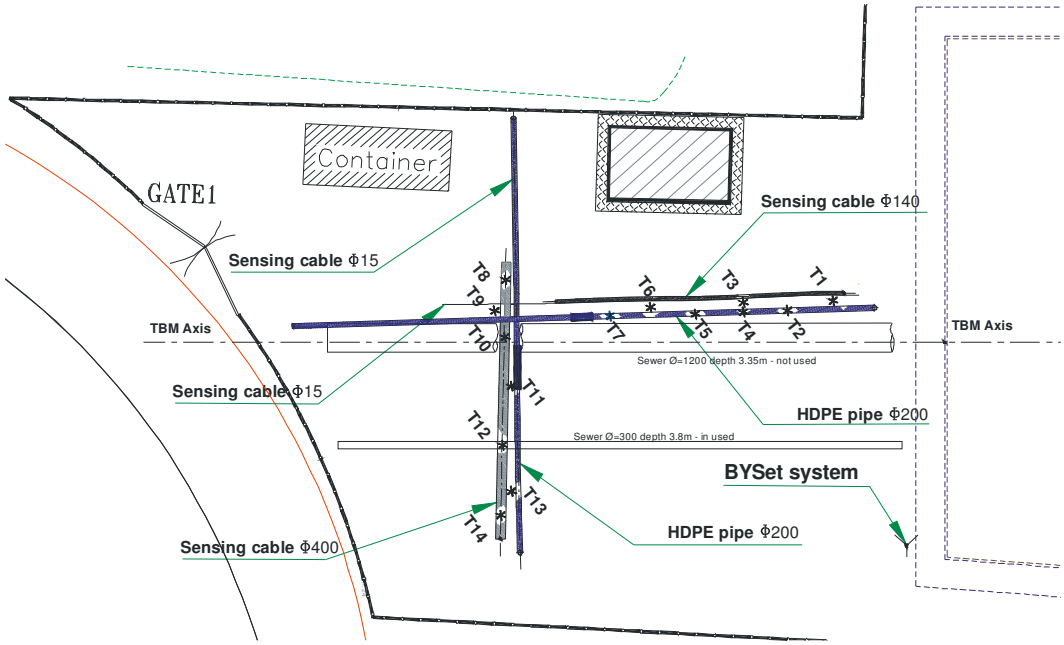


Figure 22 Plan du site instrumenté sur le chantier de métro

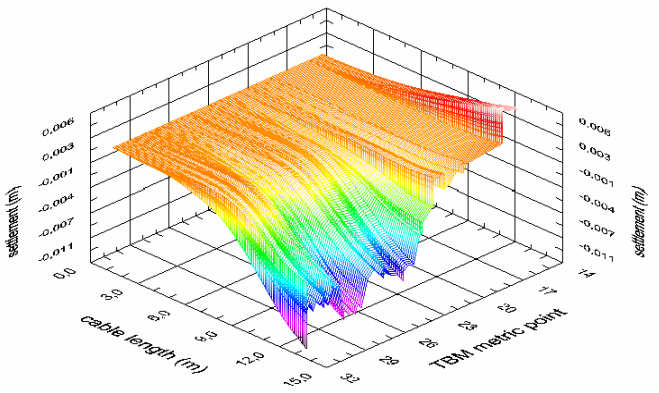


Figure 23 Evolution des tassements de terrain calculés à partir des mesures Brillouin en fonction de l'avancée du tunnelier

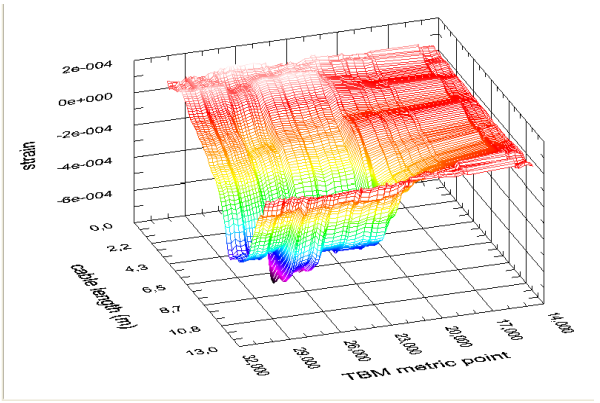


Figure 24 Evolution des déformations axiales du massif en fonction de l'avancée du tunnelier

7.2.2 Surveillance périmétrique

Le projet ANR intitulé SMARTFENCE vise à mettre au point une technologie innovante de détection périmétrique de sites sensibles. Il consiste à développer et intégrer un système de sécurité périmétrique fondé sur des CFO pour la surveillance de zones multi-kilométriques. Ce système vise prioritairement des sites à haut niveau de sécurité tels que les centrales nucléaires, les sites (pétro)chimiques ou industriels, les bases militaires, ambassades, lignes ferroviaires… toute zone ayant une activité stratégique ou exempte de présence humaine. Les principales caractéristiques du système sont d'être opérationnel en permanence, de ne pas subir d'influence environnementale, et d'assurer une localisation métrique de toute tentative d'intrusion sur une portée de plusieurs kilomètres, tout en étant compatible avec les solutions de surveillance existantes.

Un câble sensible compatible avec la technologie Brillouin a été donc développé spécifiquement pour le projet par la société ACOME et son implémentation particulière sur la barrière brevetée par le CEA LIST. Celui-ci permet la détection de toute déformation de la clôture, induite par lors d'une tentative d'intrusion (Fig. 25). Un algorithme temps réel développé par le CEA LIST la localise et génère l'alarme appropriée selon le type d'évènement : effet de l'environnement, appui ou grimpé sur la barrière. Une interface de plus haut niveau mise en œuvre par le partenaire SITES permet quant à elle d'utiliser le système optoélectronique seul, ou de l'intégrer dans un dispositif de sécurité existant.

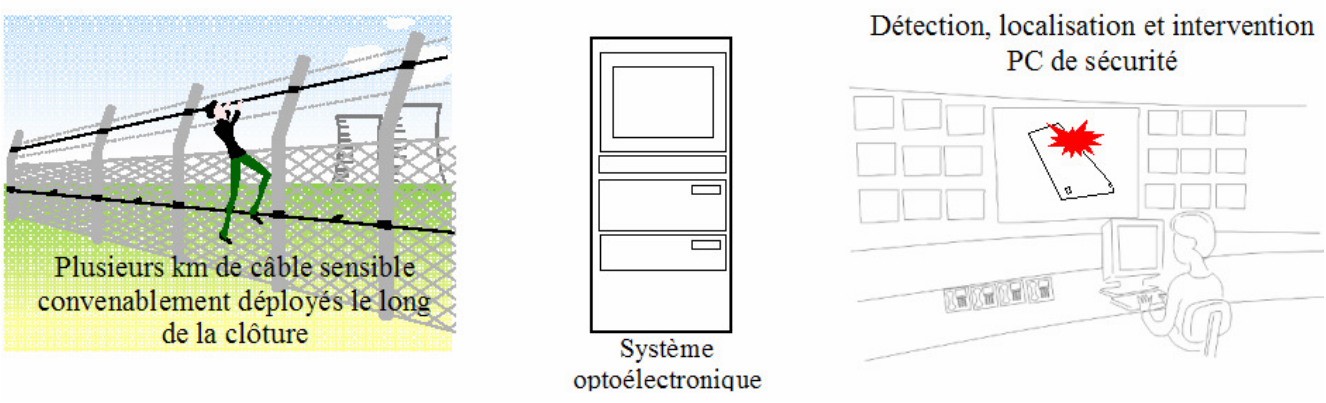


Figure 25 Système de surveillance périmétrique Brillouin

Les premiers travaux réalisés ont consisté à qualifier une portion de barrière type à l'aide dans un premier temps de câbles sensibles à réseaux de Bragg (capteur multi-ponctuel très résolvant), puis dans un second temps à mesurer le décalage spectral Brillouin d'une fibre collée sur la barrière. Ces travaux préliminaires ont permis la définition précise, puis la conception/réalisation d'un câble sensible dédié, ainsi tout naturellement que de l'instrumentation associée [24 à 27].

Un premier essai de qualification sur le terrain a été réalisé sur le site du CEA à Saclay, deux portions de barrières, rigide pour l'une et souple pour l'autre, d'une vingtaine de mètres ayant été instrumentées selon des procédures établies par le partenaire SITES. Puis, ce dispositif a été testé en franchissement par des commandos. Les données caractérisant différents évènements ont alors permis de développer un traitement du signal approprié. Une démonstration sur site industriel est actuellement en cours, puisqu'un poste électrique RTE a été instrumenté pour une durée d'au moins 6 mois. A cette occasion, les câbles optiques Brillouin de surveillance périmétrique, mais également de caméras pour la 'levée de doute' ont été déployés, l'enregistrement vidéo permettant la visualisation de toute tentative d'intrusion. Cette validation de terrain permettra de tester le système de détection Brillouin dans différentes conditions environnementales et assurera un retour d'expérience significatif pour le consortium.

Conclusion

Le constat fait voici 5 ans de la disponibilité d'instruments de mesure répartie et paradoxalement de l'absence de câbles sensibles performants, réalisés industriellement et commercialement disponibles à des prix marchés à débouché sur une collaboration fructueuse entre la société ACOME et le CEA LIST. Ce dernier a ainsi pu valoriser industriellement son savoir-faire et sa Propriété Intellectuelle, dans le cadre de plusieurs projets collaboratifs à vocation applicative.

Cette collaboration sans faille a permis de relever les défis sous-jacents à ces réalisations innovantes internationalement. Ainsi, désormais, ACOME fabrique, tant sur catalogue qu'à façon, des câbles sensibles de grande qualité, faciles d'utilisation et de coûts maîtrisés, pouvant être interrogés par les instruments de mesure répartie disponibles (OTDR, DTS Raman, BOTDR, BOTDA, OFDR Rayleigh). D'ores et déjà un certain nombre d'applications ont vu le jour, d'autres sont en développement ou en projets. Pour parfaire la démarche, dès cette année ACOME a mis en place une structure industrielle permettant d'adresser le marché des CFO pour les besoins de mesure et de surveillance.

Une telle collaboration stratégique entre les deux entités est exemplaire de ce que la R&D appliquée française peut concevoir et *in fine* promouvoir.

Bibliographie

1. A. H. Hartog, *"A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers"*, J. Light. Tech. 1(3), 498–509 (1983)
2. J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby, and J. N. Ross, "*Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector",* Electron. Lett. 21(13), 569 (1985)
3. P. Ferdinand, "*Thermomètres à fibres optiques, Procédés de mesure"*, Techniques de l'Ingénieur, Mesures et Contrôles, R 2800, sept. 2003
4. M. Niklès, "*La diffusion Brillouin dans les fibres optiques : Etude et application aux capteurs distribués"*, Thèse n° 1674, EPFL, Département d'Electricité, 1997

5. H. Naruse, "*Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry System for Monitoring Structures: Development and Field Trials"*, OFS-16, Nara, Japan, 13-17, Oct. 2003, pp. 514-517
6. B.J. Soller, M.E. Froggatt, D.K Gifford, M.S. Wolfe, M.H. Yu and P.F. Wysocki, "*Measurement of Localized Heating in Fiber Optic Components with Millimeter Spatial resolution"*, OFC 2006, Anaheim, California, USA, March 5, 2006
7. A. K. Sang, M. E. Froggatt, S. T. Kreger, D. K. Gifford, "*Millimeter resolution distributed dynamic strain measurements using optical frequency domain Reflectometry"*, OFS-21, 21st International Conference on Optical Fiber Sensors, 15-19 May, 2011, Ottawa, Canada, SPIE Vol. 7753: Editors: Wojtek J. Bock, Jacques Albert, Xiaoyi Bao
8. V. Dewynter, S. Magne, S. Rougeault, N. Le Loc'h, P. Ferdinand, M. Aubrit, M. De Brossia, F. Vallon, L. Avallone, C. Leple, A. Poulain "*Underground tunneling monitoring based on sensitive optical fibre cable and Brillouin reflectometry"*, 3rd Int. Conf. on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Nov. 13-16, 2007, Fairmont Waterfront Hotel, Vancouver, British Columbia, Canada
9. V. Dewynter, S. Rougeault, S. Magne, P. Ferdinand, F. Vallon, L. Avallone, E. Vacher, M. De Broissia, C. Canepa and A. Poulain, "*Tunnel Structural Health Monitoring with Brillouin Optical Fiber Distributed Sensing"*, paper B-44, 5th European Workshop on Structural-Health-Monitoring, 29th June – 2nd July 2010, Sorrento, Naples-Italy
10. C. Lagrève, G. Levesque, "*Câble à Fibres Optiques de structure composite compacte"*, Brevet d'invention WO9913368, date de dépôt : 18 mars 1999
11. P. Lesueur, C. Leplé, A. Poulain et C. Lagrève, "*Elément de câble optique autorenforcé"*, Brevet d'invention FR2904120, date de dépôt : 21 juillet 2006
12. S. Magne, P. Ferdinand, "*Système de mesure distribuée des courbures d'une structure"*, Brevet d'invention n°2,867,561, FR0450495, WO 2005/088375, 11 mars 2004.
13. P. Ferdinand, "*Quid de l'état de l'art des Réseaux de Capteurs à Fibres Optiques, 20 ans après leurs premiers balbutiements* ?", Colloque du Club « Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie », 20-24 nov. 2006, Mulhouse.
14. P. Ferdinand, "*Réseaux de capteurs à fibres optiques, Mesures et multiplexage"*, Techniques de l'Ingénieur, R 460v2, mars 2008
15. P. Ferdinand, "*Réseaux de capteurs à fibres optiques, Applications"*, Techniques de l'Ingénieur, R 461, sept. 2008
16. P. Ferdinand, V. Dewynter, J.-P. Dubois, C. Bento, "*Mesure de gradient thermique par fibre optique et effet Brillouin dans un puits de laboratoire souterrain"*, Colloque 2008 du Club CMOI, 17-21 nov. 2008, Nantes
17. P. Ferdinand et S. Magne CMOI, *"De l'intérêt des Capteurs à Fibres Optiques pour le renforcement de la sûreté des centrales nucléaires*", Colloque 2011 du Club CMOI, 21-25 nov. 2011, Lille
18. J. J. Fry, "*Détection de fuite sur les digues par acquisition de profils de température le long d'une fibre optique. Sécurité des digues fluviales et de navigation"*, Actes de colloque du CFGB, Orléans, France, 2004.
19. J.-M. Hénault, "*Exemple d'application de capteurs à fibre optique ; Détection automatique de fuites dans les digues en terre"*, Salon Mesurexpo – Journée Mesure de température, 17 oct. 2006
20. Cyril Guidoux, "*Développement et validation d'un système de détection et de localisation par fibres optiques de zones de fuites dans les digues en terre"*. Thèse de l'Université Joseph-Fourier de Grenoble I, soutenue le 12 déc. 2007.
21. Amir Ali Khan, "*Séparation de Sources Thermométriques"*, Thèse de l'Institut Polytechnique de Grenoble, soutenue le 27 nov. 2009.

22 M. Giuseffi, P. Ferdinand, A. Vrain, M. Philippe and H. Lesueur, "*Raman Distributed Temperature Sensing in underground GeoExchange System"*, EWSHM, the 5th edition of the European Workshop on Structural health Monitoring Porto, 23 June – 2 July, 2010

23. V. Dewynter, S. Rougeault, S. Magne, P. Ferdinand, F. Vallon, L. Avallone, E. Vacher M. de Broissia, C. Canepa et A. Poulain, "*Métrologie Brillouin à fibres optiques pour la surveillance des tassements de terrain lors du creusement de tunnels par tunnelier"*, Colloque 2009 du Club « Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie » de la Société Française d'Optique, 16-20 nov. 2009, Reims
24. M. Giuseffi, V. Dewynter, P. Ferdinand, S. Magne, S. Rougeault, J.-M. Palut, M. Pinabiau, C. Canepa, J.-C. Darocha, B. Gauvain, A. Le Gall, D. Lenan, R. Blin, S. Piot, J.-F. Sageau, L. Devatine et G. Pasteur, "*Barrière intelligente à haute efficacité de détection et localisation précise d'intrusion à fibres optiques pour la surveillance périmétrique de sites sensibles"*. Conférence WISG'08, 29-30 janvier 2008, Troyes.
25. P. Ferdinand, M. Guiseffi, V. Dewynter, S. Magne, C. Prudhomme, S. Rougeault, J.-M. Palut, M. Pinabiau, C. Canepa, J.-C. Da Rocha, A. Le Gall, S. Cabon, R. Petit, R. Blin, S. Piot, J.-F. Sageau, L. Devatine et G. Pasteur, "*Le projet SmartFence : vers une surveillance périmétrique des sites sensibles par fibres optiques"*, WISG'09 - Workshop Interdisciplinaire sur la Sécurité Globale, Université de Technologie de Troyes, 27-28 janvier 2009, Troyes
26. M. Giuseffi, V. Dewynter, P. Ferdinand, S. Rougeault, J.-M. Palut, M. Pinabiau, C. Canepa, J.-C. Da Rocha, A. Poulain, R. Blin, S. Piot, J.-F. Sageau, L. Gourit, D. Brunet et C. Finck, "*SmartFence : une barrière intelligente au service de la surveillance périmétrique par fibres optiques des sites sensibles"*, WISG'10 - Workshop Interdisciplinaire sur la Sécurité Globale, Université de Technologie de Troyes, 26-27 janvier 2010, Troyes
27. M. Giuseffi, D. Quenson, S. Rougeault, P. Ferdinand, J.-M. Palut, M. Pinabiau, C. Canepa, J.-C. Da Rocha, A. Poulain, R. Blin, S. Piot, J.-F. Sageau, H. Lancon, C.H. Pourchier, H. Fievet, L. Gourit, D. Brunet et C. Finck, "*SmartFence : un système de surveillance périmétrique basé sur des Capteurs à Fibres Optiques répartis par rétrodiffusion Brillouin"*, WISG'11 - Workshop Interdisciplinaire sur la Sécurité Globale, Université de Technologie de Troyes, 25-26 jan. 2011.