HAL
open science

Les fibres optiques en capteurs et en instrumentation

Pierre Lecoy

To cite this version:

Pierre Lecoy. Les fibres optiques en capteurs et en instrumentation. La Revue 3E.I, 2016, 85. hal-01363852

HAL Id: hal-01363852

https://hal.science/hal-01363852

Submitted on 12 Sep 2016

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.

Les fibres optiques en capteurs et en instrumentation

Pierre LECOY, Professeur à Centrale Supélec, chercheur au laboratoire ETIS (CNRS UMR 8051, ENSEA/Université de CERGY-PONTOISE)
Président du club « fibres optiques et réseaux » de la Société Française d'Optique
http://www.sfoptique.org/pages/les-clubs-sfo/club-fibres-optiques-et-reseaux/

Résumé : Dès l'apparition des fibres optiques il y a près de 40 ans, leur utilisation dans le domaine des capteurs et de l'instrumentation a constitué un thème majeur et particulièrement inventif de la recherche aussi bien académique qu'industrielle. Sans atteindre le volume de marché des télécoms et des réseaux, les capteurs à fibres optiques n'en sont pas moins devenus une réalité industrielle dans des domaines très variés (génie civil, énergie, aéronautique, automobile, médical, sécurité, production industrielle …). Cet article expose les principes et les applications des capteurs à fibres optiques les plus utilisés.

1. Introduction

Maîtrisées industriellement dès la fin des années 1970, les fibres optiques ont connu un développement spectaculaire en télécommunications et dans les réseaux, depuis les réseaux locaux et embarqués (voir l'article de Jean-Michel Mur sur les fibres optiques dans l'automobile) jusqu'aux réseaux longues distances et intercontinentaux, en passant par toutes les variantes du FTTx (*fiber to the … home, building, office, etc*…). Au cœur de l'explosion d'Internet et de l'accès de plusieurs milliards d'êtres humains aux échanges numériques, y compris à travers les réseaux de mobiles dont elles constituent l'infrastructure fixe, les fibres optiques apportent leur contribution à la *green IT* grâce à une meilleure efficacité énergétique et à l'utilisation de matériaux disponibles et peu polluants.

Mais la disponibilité à faible coût des technologies fibres optiques (et des composants associés) grâce au secteur des télécom, a ouvert la voie à d'autres utilisations, notamment dans les capteurs et l'instrumentation de mesure, qui ont fait l'objet de nombreux travaux théoriques et expérimentaux dès les années 1980. La principale motivation provenait des avantages spécifiques des fibres optiques, bien connus dans le domaine des communications, et qui sont particulièrement intéressants pour des applications instrumentales qui doivent fonctionner dans des conditions difficiles et/ou être intégrées dans des systèmes ou dans des structures :

- la faible perturbation apportée par les fibres optiques qui sont légères, de petite taille, non sujettes à la corrosion, ne conduisant ni l'électricité ni la chaleur ;
- leur sécurité intrinsèque (absence de courants électriques), cruciale dans les applications médicales ou industrielles, et leur insensibilité aux parasites électromagnétiques, leur permettant de fonctionner de façon fiable dans des milieux fortement perturbés ;
- la possibilité qu'elles offrent d'analyser à distance, et avec une haute résolution spatiale, des milieux d'accès difficile ou dangereux (certains matériaux permettant le fonctionnement dans des environnements fortement radiatifs) ;
- la possibilité d'alimenter électriquement le capteur par la fibre optique elle-même (ou une deuxième fibre dédiée) transportant une puissance lumineuse (fournie par un laser), convertie par un petit récepteur photovoltaïque (technique de l'opto-alimentation, permettant de faire des capteurs totalement isolés) ;
- et enfin, la possibilité d'utiliser la fibre optique elle-même comme élément sensible à un certain nombre de grandeurs physiques. On peut ainsi constituer des capteurs distribués ou des réseaux de capteurs, dans lesquels la fibre optique sert à la fois d'élément sensible et de support de transmission.

Cependant, après une phase de foisonnement dans les laboratoires dans les années 1980 – 1990, seuls certains capteurs à fibres optiques ont atteint la maturité technologique. C'est le cas de ceux où la fibre optique améliore un système de mesure existant sans modifier son principe, mais surtout lorsque la fibre optique permet d'instrumenter l'ensemble d'un système, d'une structure ou d'un matériau en s'y intégrant. Ce n'est plus alors un capteur au sens d'un composant isolé, mais un élément d'un véritable système intelligent. De plus, le développement de la photonique

sur silicium permet de réaliser des microsystèmes intégrant un capteur optique, les interfaces opto-électroniques et les circuits de traitement.

2. Instrumentation de mesure optique à fibres

Il s'agit de mesures optiques faites à distance par l'intermédiaire de fibres optiques qui jouent un rôle passif, mais apportent de grands avantages de mise en œuvre : accessibilité, haute résolution spatiale, possibilité de cartographie par déplacement du point de mesure, sécurité ... Certains de ces concepts sont relativement anciens, mais ils ont bénéficié des progrès technologiques et des baisses de coût de l'optoélectronique.

De nombreuses applications sont opérationnelles :

- physico-chimie : mesure du pH, colorimétrie, réfractométrie, spectroscopie infrarouge et Raman, vélocimétrie Doppler, absorption infrarouge caractéristique d'une espèce chimique à détecter, fluorescence (temps de décroissance et spectre), avec de nombreuses applications industrielles et médicales ;
- mesure de température par pyrométrie (analyse du rayonnement du corps noir): compte tenu du spectre de ce rayonnement, essentiellement situé dans l'infrarouge, on peut le transmettre par des fibres optiques de silice si la température est supérieure à 300°C, et par des fibres en verres fluorés dès la température ambiante ;
- d'autres types de mesures de température par la réponse optique (absorption, réflexion, photoluminescence, fluorescence …) d'un matériau placé en bout de fibre, depuis les températures cryogéniques (quelques milli-Kelvin) jusqu'à plusieurs centaines de degrés ;
- sans oublier l'endoscopie utilisée depuis longtemps en médecine, mais aussi dans l'industrie, le génie civil, l'archéologie ... même si la miniaturisation des caméras fait reculer son marché.

Des applications plus spectaculaires ont également été développées pour les détecteurs de particules, ou pour l'optique adaptative en astronomie, où la phase de la lumière peut être contrôlée dans les fibres optiques.

3. Les capteurs à fibres optiques

Cette appellation correspond en principe aux capteurs où le phénomène physique agit directement sur la matière ou la structure de la fibre optique, qui peut avoir été modifiée pour être sensible à la grandeur à mesurer, ou au contraire être une fibre télécom standard. Les frontières ne sont bien entendu pas étanches entre ces catégories.

Une première famille de capteurs, développée dans les années 1980, utilisait les défauts constatés dans les premières liaisons à fibres optiques, notamment leur sensibilité aux courbures et aux micro-courbures, ou aux défauts d'alignement dans les connecteurs. Leur avantage, essentiellement économique, est d'utiliser des fibres et des composants d'extrémité disponibles et peu coûteux, et d'être de principe très simple au niveau du traitement du signal, puisqu'il s'agit de détecter les variations de puissance lumineuse transmise. Ils ont trouvé des applications dans des systèmes industriels ou de sécurité, lorsqu'une haute précision n'est pas requise (détection, comptage ...). Par exemple :

- capteurs de micro-déplacements (longitudinaux ou angulaires) par des techniques de type filtrage spatial au raccordement de deux fibres, ou en réflexion à l'extrémité, pouvant être utilisés en capteurs de force ou transducteurs de vibrations ;
- mesure d'indice du milieu extérieur par l'intermédiaire du coefficient de réflexion de Fresnel en bout de fibre, utilisée pour la mesure de niveau ou le comptage de bulles;
- pertes sous courbure ou microcourbures dans une fibre optique soumise à des contraintes ; couplée à la réflectométrie temporelle (OTDR), cette méthode a permis la localisation de contraintes dans les structures où la fibre est intégrée, mais n'étant pas très fidèle et fragilisant la fibre, elle a disparu au profit des capteurs Bragg et Brillouin décrits plus loin.

4. Capteurs de type interférométrique

Ces capteurs sont, eux, basés sur des techniques cohérentes : analyse de la phase, de la fréquence ou de la polarisation de la lumière, principalement dans les fibres optiques monomodes (des capteurs utilisant les interférences entre modes dans les fibres multimodes ont été expérimentés mais sont restés à l'état de prototypes). Ils sont beaucoup plus sensibles que les précédents et ne compromettent pas la fiabilité de la fibre optique, mais sont de mise en œuvre plus délicate et nécessitent des traitements du signal pour obtenir des

mesures absolues (et non relatives) et séparer les effets des différentes grandeurs physiques d'influence (notamment la température).

Un des plus anciens capteurs de cette catégorie est basé sur l'interféromètre de Mach-Zehnder constitué de deux bras qui sont deux fibres monomodes (ou deux guides en optique intégrée) de longueurs L identiques (figure 1). Le déphasage $\Delta\phi$ entre bras de mesure et bras de référence va être dû à l'allongement d'un bras ou à la variation d'indice Δn, elle-même due le plus souvent à la variation de température ΔT ou à une pression différentielle ΔP (par photoélasticité). Dans le montage classique à fibres et à deux coupleurs, le récepteur reçoit une intensité modulée par $\cos^2 \Delta\phi$; la phase est mesurée à π près et on doit lever l'ambiguïté (par une mesure à deux longueurs d'onde par exemple). Le deuxième montage, qui peut être fait en optique intégrée, crée des franges d'interférence entre les faisceaux sortant des deux guides qui défilent ; on peut ainsi les compter et surtout détecter leur sens de variation.

La principale application qui a été développée est le capteur acoustique, de grande bande passante, utilisé dans les hydrophones. Il s'agit là d'une mesure dynamique et différentielle. Des capteurs chimiques de ce type ont également été réalisés, surtout en optique intégrée, en utilisant la variation de l'indice effectif dans le bras de mesure, sous l'effet d'un corps chimique à son contact.

L'*interféromètre de Michelson*, construit sur un coupleur en X à fibres monomodes ou en optique intégrée sur silicium, permet les mêmes mesures, mais est surtout intéressant pour les mesures de déplacements micrométriques relatifs, par interférométrie en lumière non cohérente.

L'*interféromètre de Fabry* Pérot est constitué de deux miroirs parallèles espacés de L intégrés entre deux fibres optiques, ou face à une fibre optique (dont la face de sortie constitue l'autre miroir de la cavité ce qui permet d'exploiter le capteur en réflexion, facilitant l'accessibilité du point de mesure. Par résonance de la cavité Fabry-Pérot, la puissance est maximale pour un peigne de longueurs d'onde vérifiant : $\lambda = 2\ n.L/p$ où p est entier, et n l'indice de la fibre (ou du matériau entre les fibres). La source est donc non cohérente et fonctionne en continu. L'analyse du spectre, qui peut être faite dans un interféromètre de Fizeau comme dans la technologie WLPI d'Opsens (figure 2), permet d'en déduire le déplacement (ou la variation de pression externe qui l'a provoqué), ou, pour d'autres applications, la variation de l'indice du matériau séparant la fibre et le miroir, et d'en déduire suivant le cas, les variations de température ou de composition chimique. Comme dans les interféromètres précédents, il s'agit d'une mesure indirecte, et le conditionnement du capteur doit être conçu et étalonné pour remonter sans ambiguïté à la grandeur à mesurer.

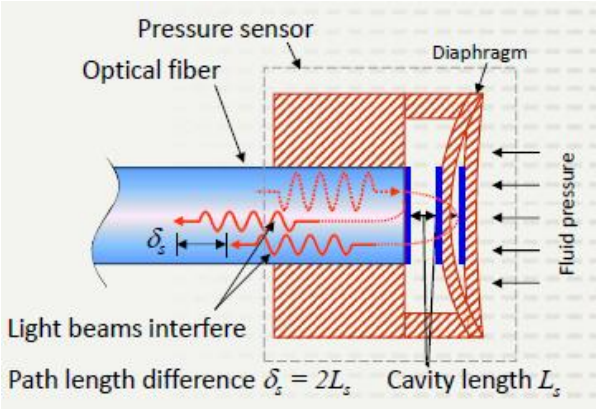

Figure 2. *Interféromètre de type Fabry-Pérot utilisé par la technologie WLPI de la société Opsens. (Document FTMesures)*

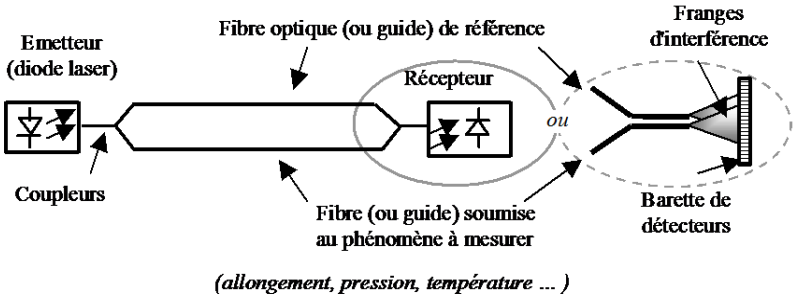

Figure 1. *Interféromètre de Mach Zehnder à fibres ou guides optiques (P. Lecoy)*

L'*interféromètre de Sagnac* ou interféromètre en anneau est principalement utilisé dans le gyroscope à fibre optique, qui est le plus ancien des capteurs à fibres optiques (le premier démonstrateur date de 1976), à la source d'une intense activité scientifique et industrielle. Il s'agit à la base d'un gyromètre (mesure d'une vitesse de rotation), qui mesure par interférométrie le déphasage entre les deux sens de propagation sur la même fibre optique montée en anneau. L'influence de la température est alors compensée et seuls les effets non réciproques sont détectés. Si le montage tourne autour d'un axe perpendiculaire au plan de la fibre, le déphasage $\Delta\phi$ est proportionnel à la vitesse de rotation Ω :

$$\Delta\phi = \frac{8\pi.NS.\Omega}{\lambda c}$$

où S est la surface de la boucle et N est le nombre de tours, qui peut être très grand, ce qui permet des précisions et des fidélités qui atteignent 10^{-5} degrés/h. En assemblant 3 capteurs selon 3 axes, on peut faire un gyroscope (mesure et conservation d'une direction) beaucoup plus compact et robuste que les centrales inertielles.

Enfin, d'autres capteurs interférométriques sont basés sur la variation de polarisation dans la fibre optique, qui peut être provoquée par des contraintes non isotropes (biréfringence due à la photoélasticité) ou à un champ magnétique longitudinal (effet Faraday, à la base notamment de capteurs de courant). Du fait de leur complexité et de la difficulté de les exploiter à distance, ils n'ont pas été très développés.

Capteurs à réseaux de Bragg

Un des capteurs à fibres optiques les plus répandus actuellement est le capteur à réseau de Bragg (FBG, *Fiber Bragg Grating*), photoinscrit dans la matière du cœur de la fibre. Cette technologie, apparue dans les années 1990, consiste en une modulation périodique et longitudinale de l'indice de réfraction du cœur d'une fibre monomode, de période spatiale Λ, qui provoque la réflexion de la longueur d'onde λ correspondant à des interférences constructives entre les ondes réfléchies (figure 3) :

$\lambda = 2\ \Lambda.n_{1eff}$ où n_{1eff} est l'indice effectif moyen du cœur de la fibre

Cette technologie a été développée pour les communications sur fibres optiques, où elle permet de réaliser des filtres, des multiplexeurs en longueur d'onde, ou encore des compensateurs de dispersion chromatique avec des réseaux chirpés (c'est-à-dire de pas variant lentement le long de la fibre). Elle est maintenant bien maîtrisée et les réseaux photoinscrits présentent une longue durée de vie sous illumination. Très rapidement, elle a fait l'objet de développements pour les capteurs, notamment en France au CEA. En effet, lorsque la fibre subit un allongement relatif ε, qui augmente Λ, on observe une variation de la longueur d'onde réfléchie :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = K.\ \varepsilon + \alpha.\Delta T,$$

où le coefficient K, voisin de 0,8, est dû à la photoélasticité qui diminue légèrement n_{eff}, et ΔT est la variation de température qui fait aussi varier l'indice et dilate le verre (d'où le coefficient α de l'ordre de 6.10^{-6}/°C). Ceci constitue un effet parasite qu'il faut compenser, mais on peut aussi mesurer la température par cet intermédiaire. On peut mesurer cette variation de longueur d'onde à distance avec une parfaite fidélité : la longueur d'onde de la lumière réfléchie, contrairement à son intensité ou à sa polarisation, n'est pas modifiée par sa propagation sur la fibre optique. Une mesure de la longueur d'onde à 1 pm près correspond à un allongement relatif de $0{,}8.10^{-6}$ ou à une variation de température de 0,1°. Une méthode simple pour séparer ces grandeurs consiste à utiliser deux capteurs soumis à la même température, seul l'un d'eux subissant l'allongement.

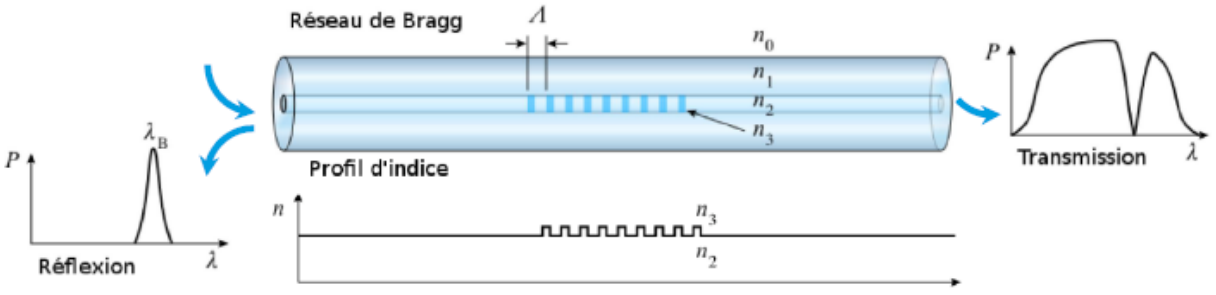

***Figure 3**. Principe du réseau de Bragg. Document Xblue, projet HOBAN*

Ces capteurs, exploités en réflexion, se prêtent bien à une mise en série en décalant les plages de longueur d'onde des différents FBG, et en les interrogeant par réflectométrie avec une source large spectre ou un laser à balayage rapide en longueur d'onde. On réalise ainsi un capteur multipoints (ou distribué) pouvant associer plusieurs dizaines de capteurs élémentaires le long d'une fibre unique. Leur intérêt essentiel est leur facilité d'intégration le long de la fibre, ainsi que leur cadence de lecture élevée (plusieurs kHz). Ils sont très employés pour la surveillance des structures aéronautiques et nucléaires, machines électriques, bâtiments (même des monuments historiques grâce à leur caractère peu invasif), ouvrages de génie civil, digues, mines, ouvrages souterrains ...

5. Capteurs répartis Raman et Brillouin

Cette dernière catégorie de capteurs a pour particularité d'utiliser comme élément sensible la fibre optique elle-même, et d'en faire un capteur continûment sensible donnant un profil de température et/ou de contraintes le long de son parcours, avec l'équivalent de plusieurs milliers de points de mesure élémentaires, ce nombre dépendant en fait de la résolution de la technique d'interrogation. En contrepartie, ils sont plus complexes à exploiter que les réseaux de Bragg, et le temps d'interrogation est plus long (de l'ordre de la minute).

Ils sont basés sur les phénomènes de diffusion (*scattering*) Raman et Brillouin, habituellement classés dans l'optique non linéaire, qui sont en fait des interaction *photon - phonon*, c'est à dire un échange d'énergie entre une onde optique et les vibrations des liaisons moléculaires du matériau (figure 4).

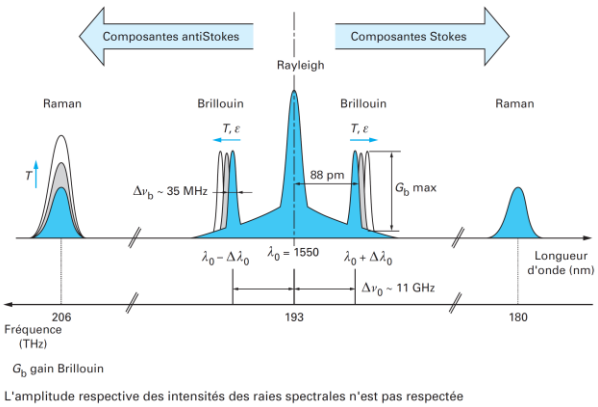

Figure 4. *Diffusion Raman et Brillouin (cité par P. Ferdinand)*

Dans l'effet Raman, lorsqu'une onde pompe de fréquence ν_p interagit avec un matériau, certains photons perdent une partie de leur énergie $h\nu_p$ au profit d'un phonon, particule associée à la vibration de fréquence $\delta\nu$ qui apparaît dans la matière. Ils sont alors diffusés avec une énergie plus faible, autrement dit une longueur d'onde plus élevée, et constituent une onde Stokes de fréquence : $\nu_s = \nu_p - \delta\nu$.

Le décalage de fréquence $\delta\nu$ ne dépend que du matériau, et pas de la longueur d'onde pompe. Le spectre de l'onde Stockes est caractéristique de la composition chimique et du caractère ordonné ou désordonné de la matière, ce qui en fait une méthode d'analyse chimique connue et pratiquée depuis longtemps. La silice présente ainsi un spectre continu relativement large, avec un pic caractéristique à 490 cm^{-1}. En sens inverse, quelques phonons créés par agitation thermique vont céder leur énergie à des photons, qui vont diffuser sous forme d'une *onde anti-Stokes* de fréquence : $\nu_a = \nu_p + \delta\nu$ donc une longueur d'onde plus faible.

Le rapport d'amplitude entre les raies Stokes et anti-Stokes vaut : $\exp \frac{h.\delta\nu}{kT}$

Il ne dépend que de la température, ce qui permet d'utiliser ce phénomène pour connaître la température de la fibre au point de mesure avec une très grande fidélité et une précision de l'ordre de 0,1°C. La localisation de ce point est faite par la classique réflectométrie temporelle (OTDR, *Optical Time Domain Reflectometry* basée sur le décalage temporel entre l'impulsion émise et la réponse, mesurée simultanément aux 2 longueurs d'ondes Stokes et anti-Stokes) ou, pour une plus haute résolution (mais une portée plus courte), par réflectométrie fréquentielle (OFDR, *Optical Frequency Domain Reflectometry*) où le laser est modulé en longueur d'onde (sous forme d'une rampe ou *chirp*) au lieu d'émettre des impulsions. C'est le décalage de longueur d'onde entre la lumière émise et la lumière rétrodiffusée qui permet de connaître la distance. Cette méthode est maintenant utilisée industriellement pour détecter et localiser des points chauds (ou froids, en cas de fuite de gaz par exemple) le long des lignes d'énergie ou de tubes transportant des fluides.

La diffusion Brillouin suit un mécanisme de même nature que la diffusion Raman, mais l'interaction se fait avec des *phonons acoustiques*, c'est à dire des vibrations du matériau provoquées par l'intensité de la lumière, et s'y propageant avec la vitesse V_a des ondes acoustiques, de plusieurs milliers de m/s dans le verre. On observe principalement une rétrodiffusion Brillouin (en sens inverse) avec un changement de fréquence $\delta\nu_B$

déterminé par l'accord de phase entre les ondes optique et acoustique :

$$\delta\nu_B = 2\nu_p \frac{n}{c} V_a$$ qui est de l'ordre de 10 à 13 GHz dans les fibres de silice.

Ce phénomène est principalement utilisé en capteurs, où la variation du décalage de fréquence $\delta\nu_B$, de 10 à 100 MHz, est due aux variations de température ou aux contraintes qui modifient Va. Pour séparer ces deux causes, le câble contient en général deux fibres soumises à la même température, mais l'autre est soumise aux contraintes et l'autre non. Ces variations de fréquence sont mesurées à distance et localisées par une technique de réflectométrie adaptée (battement entre la rétrodiffusion Rayleigh, qui n'est pas décalée en fréquence, et la rétrodiffusion Brillouin). Récemment de nombreux capteurs répartis de ce type ont été installés le long d'ouvrages d'art, de réseaux de transport d'électricité ou de gazoducs, de sites industriels, d'enceintes de confinement nucléaire ...

6. Conclusion

Les capteurs à fibres optiques ont démontré leurs avantages : immunité électromagnétique, faible intrusivité, fonctionnement en environnement difficiles, aptitude à la mise en réseau et aux concepts de capteurs distribués et répartis. 40 ans après l'apparition du gyromètre à fibres optiques, grâce aux progrès des technologies optiques mais aussi électroniques (traitement du signal), et sont devenus une réalité industrielle dans de nombreux domaines : surveillance des structures, transport, énergie, sécurité, contrôle industriel … dans un contexte économique mondial qui a fortement évolué, la Chine et l'Asie en général rattrapant les acteurs historiques (Europe, Amérique du nord et Japon).

7. Quelques références

H. Lefèvre, The Fiberoptic gyroscope, Artech, A993

E. Udd, Fiberoptic sensors, CRC Press, 2006

P. Ferdinand, Réseaux de capteurs à fibres optiques, Mesures et multiplexage, Techniques de l'Ingénieur, R 460v2, mars 2008

P. Ferdinand, Réseaux de capteurs à fibres optiques, Applications, Techniques de l'Ingénieur, R 461, sept. 2008

P. Ferdinand, La saga des Capteurs à Fibres Optiques depuis 35 ans, Colloque 2013 du Club CMOI « Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie » de la Société Française d'Optique, 18-21 nov. 2013, Orléans

P. Lecoy, Communications sur fibres optiques, Lavoisier-Hermès, 2014

Laboratoires et entreprises impliquées

http://www.ifsttar.fr/ (université de Marne la Vallée)

http://www.xlim.fr/ (université de Limoges)

http://laboratoirehubertcurien.fr/ (université de St Etienne)

http://www-leti.cea.fr/

https://www.ixblue.com/

https://www.hbm.com/fr/

http://www.ftmesures.com/

http://www.cementys.com/

http://www.idil-fibres-optiques.com/