HAL
open science

Les capteurs à réseaux de Bragg fibrés, au cœur des matériaux, structures et procédés industriels

Pierre Ferdinand, V. Dewynter-Marty, Sylvain Magne, Laurent Maurin, Guillaume Laffont, Nicolas Roussel, P.J. Daniel, Stéphane Rougeault, Jonathan Boussoir

To cite this version:

Pierre Ferdinand, V. Dewynter-Marty, Sylvain Magne, Laurent Maurin, Guillaume Laffont, et al.. Les capteurs à réseaux de Bragg fibrés, au cœur des matériaux, structures et procédés industriels. C2I 2004 - 3ème colloque interdisciplinaire en instrumentation, ENS Cachan, Jan 2004, Cachan - ENS, France. cea-04106354

HAL Id: cea-04106354

https://cea.hal.science/cea-04106354v1

Submitted on 25 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.

Les capteurs à réseaux de Bragg fibrés, au cœur des matériaux, structures et procédés industriels

P. Ferdinand, V. Marty-Dewynter, S. Magne, L. Maurin, G. Laffont, N. Roussel, P.J. Daniel, S. Rougeault, et J. Boussoir

CEA-List Dimri/Siar Laboratoire de Mesures Optiques
Centre d'Etudes de Saclay
91191 Gif-sur-Yvette Cedex France
pierre.ferdinand@cea.fr

RÉSUMÉ. *Il y a désormais 20 ans que les avantages des Capteurs à Fibres Optiques (CFO) ont été énoncés. Pendant la décennie 80 de nombreuses techniques furent étudiées mais elles ne réussirent pas à s'imposer, pour des raisons de fiabilité, de coût, de conservatisme ... Puis, en 1989, une nouvelle approche fondée sur les réseaux de Bragg, a été proposée. A ce jour, les qualités métrologiques et la tenue aux environnements sévères des CFO à réseaux de Bragg ont été vérifiées, en laboratoire et via des démonstrations de terrain. Certains secteurs industriels commencent même à tirer profit de ce type d'instrumentation, et ce pour de nombreuses grandeurs d'intérêt (déformations, déplacements, température, pression, force, inclinaison, effets des impacts, indice de réfraction, ...). Les principales applications concernent la surveillance des structures et des processus industriels (géologie, génie civil, travaux publics, pétrole, aéronautique, marine, ferroviaire, ...).*

ABSTRACT. *The advantages of the Optical Fiber Sensors (OFS) were stated 20 years ago. During the eighties, many techniques were studied but they did not succeed from the industrial point-of-view, for many reasons: low reliability, high cost, conservatism of end users... Then, in 1989, a new approach based on Fiber Bragg Gratings was proposed. To date, metrological performances and good behaviour of FBG-based instrumentations in harsh environments were verified in laboratory and through many field testing. Some industrial sectors even start to make profit with such kind of instrumentation, through the monitoring of key parameters (strain, displacements, temperature, pressure, force, slope, effects of the impacts, refractive index...). Today, the main applications deal with Structure Monitoring, as well as industrial processes (geology, civil engineering, public works, oil and gas, aeronautics, marine, railway…).*

MOTS-CLÉS : *Fibre optique, réseau de Bragg, Capteur à Fibre Optique, structure, matériau composite, surveillance.*

KEYWORDS: *Optical Fiber, Fiber Bragg Grating, Optical Fiber Sensors, Structure, Composite material, Monitoring.*

1. Introduction et contexte historique

Les Capteurs à Fibres Optiques (CFO) à réseaux de Bragg sont depuis quelques années l'objet de tous les espoirs de la communauté scientifique et technique impliquée dans l'instrumentation à fibre optique. A ce jour, du fait de leurs atouts, ils franchissent enfin le gué entre les laboratoires de R&D et l'industrie, dans le cadre de démonstrations industrielles. En ce qui concerne la France, on peut dire que l'instrumentation à Fibres Optiques revient de loin. En effet, après la décennie 80 animée par quelques pionniers motivés et pleins d'enthousiasme, force est de constater que la percée des CFO si souvent annoncée comme imminente, se faisait toujours désirer, telle l'arlésienne. Les raisons de cette situation tiennent bien entendu, pour partie, au misonéisme des utilisateurs mais également - il faut l'admettre - à la trop faible prise en compte, de la part des développeurs, des critères de choix des utilisateurs finaux ou des règles élémentaires du marché. Si bien que la crise des années 90, fut fatale à plusieurs acteurs Français du domaine, qui pour des raisons diverses durent se recentrer en abandonnant cette activité. Depuis mars 2001, ce qu'il faut bien appeler la 'crise des télécoms' touche cependant assez peu le secteur de l'instrumentation à fibre optique, si ce n'est par la disparition de nombreux fournisseurs de composants mis en œuvre dans ce type de produits.

De son côté, le CEA, d'une part en s'appuyant sur sa politique de diffusion technologique résolument tournée vers les besoins des industriels, et d'autre part du fait du choix d'investir dès 1992 dans la technologie des capteurs à réseaux de Bragg, fût très tôt novateur dans les applications qui en découlent. Le choix de la technologie des réseaux de Bragg, justifié par le développement massif des télécommunications sur fibre optique ne pouvait que promouvoir l'instrumentation fondée sur les mêmes types de composants. Cela fût bénéfique comme nous allons le montrer plus loin, en illustrant les applications conduites avec les industriels de nombreux secteurs de l'économie. Au niveau international, d'autres acteurs, confortant ainsi nos options, prirent également cette orientation technique durant la même période. Tant est si bien qu'aujourd'hui, on peut estimer qu'au niveau mondial, 2/3 des activités relatives aux CFO concernent les capteurs à réseaux de Bragg.

De nos jours, du fait de la forte baisse des budgets 'keynésiens' de R&D, les projets tant de développement qu'applicatifs ne peuvent plus qu'être promus par les besoins des utilisateurs industriels finaux : mesures de température, de pression, et de plus en plus de déformations, du fait des demandes croissantes en surveillance des structures. Il faut dire, et c'est une chance pour cette technologie, que les enjeux économiques (gains de maintenance, en termes de sûreté et sécurité des biens et des personnes ...) des applications concernées (ouvrages d'art, structures composites, métalliques, en béton, sous-sols, terrains, ...), justifient les efforts qui leur sont consacrés.

2. Rappels concernant les transducteurs à réseaux de Bragg

Il s'agit d'une µ-structure périodique (de pas Λ) formée par une modulation de l'indice de réfraction du cœur d'une fibre optique monomode, structure qui se comporte quasiment comme un 'miroir' pour une bande spectrale très fine autour d'une longueur d'onde caractéristique « de Bragg » $\lambda_B = 2.n_e.\Lambda$ et reste transparente pour toutes les autres. Compte tenu de cette relation, λ_B dépend de la température et des déformations supportées par la fibre. Il est d'usage de séparer les principales contributions que sont : la température T, les déformations $\varepsilon = \Delta L/L$ selon l'axe et la pression hydrostatique P, selon : $\Delta\lambda_B / \lambda_B = a.\Delta T + b.\Delta\varepsilon + c.\Delta P$.

Les coefficients a, b et c dépendent des caractéristiques de la fibre et en partie de sa température (ils peuvent être assimilés à des constantes sur une gamme importante). Ainsi, une mesure de $\Delta\lambda_B$ (variation de λ_B par rapport à une référence initiale), permet de remonter à l'amplitude de la variation du ou des phénomènes inducteurs, la séparation entre les grandeurs d'influence pouvant s'effectuer par mesure différentielle. Au delà de son rôle de filtre spectral, le réseau de Bragg joue donc également celui de 'transducteur' en transformant les évolutions d'une grandeur d'influence donnée en un décalage spectral directement proportionnel.

Lorsqu'un réseau est soumis à un écart de température, il se dilate ou se contracte ce qui modifie son pas. De plus, l'indice de réfraction de la fibre dépendant aussi de la température, ces deux phénomènes entraînent une variation de la longueur d'onde caractéristique λ_B. Numériquement, 'a' vaut sensiblement 7,8 10^{-6}/°C. La figure 1 illustre l'effet, sur la raie spectrale correspondante, d'une élévation de température sur un réseau de Bragg ; l'effet d'une autre grandeur serait comparable.

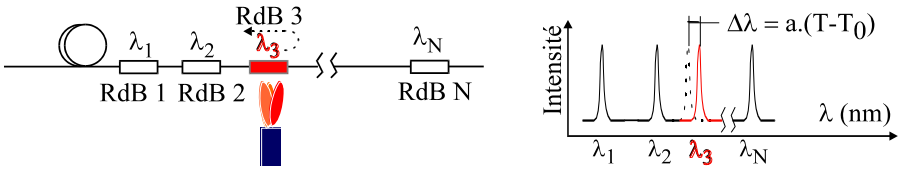

Figure 1. *Effet de la température sur la raie réfléchie par un réseau de Bragg*

Les contraintes d'origines autres que thermique modifient également la longueur d'onde caractéristique du réseau. Outre l'effet mécanique, les contraintes modifient le diamètre de la fibre, ce qui engendre aussi une variation de son indice. Dans le cas des allongements relatifs (traction ou compression), 'b' ~ 0,78 10^{-6}/(µm/m), tandis que pour une pression hydrostatique, 'c' vaut environ - 2,87 10^{-6} /MPa.

En résumé, les sensibilités ($\Delta\lambda_B/\Delta$grandeur) des réseaux de Bragg sont en température : ~ 12 pm/°C ; en déformations : ~ 1,2 pm/µε, et à la pression hydrostatique : - 4,5 pm/MPa.. Ces valeurs sont données à 1,55 µm, une règle de trois pouvant s'appliquer pour toute autre longueur d'onde d'utilisation.

3. La surveillance des structures et le 'contrôle santé des matériaux'

La surveillance des structures est presque devenue une spécialité à part entière et les méthodes optiques, externes ou internes, globales ou locales, y sont particulièrement présentes. Ceci tient à l'accroissement des besoins en mesures fiables et précises requises par l'homme de l'art désireux de mieux connaître l'évolution des efforts subis par les matériaux qu'il emploie et l'état de santé, actuel ou prévisionnel, des structures qu'il construit ou exploite. Ainsi, les demandes vont croissantes pour la mesure des principaux paramètres d'intérêt que sont les déformations/contraintes, les déplacements, la température, les impacts, etc.

Le tableau 1 présente les différents domaines de la surveillance des structures et leurs spécificités. Les paragraphes suivants illustrent quelques-unes des nombreuses actions menées dans ces différents domaines industriels.

	Domaines	**Applications**	**Paramètres recherchés**
Matériaux composites : carbone, verre, hybrides ...	- aéronautique, - spatial, - défense, - industrie nucléaire, - structures allégées des transports modernes.	- amélioration du processus de fabrication, - contrôle qualité, - surveillance de l'intégrité en usage.	- déformations, - température, - délaminages, défauts divers, ... - détection des impacts, - état de santé global.
Structures géologiques	- mines souterraines, - tunnels, - falaises, digues, ...	- amélioration de la productivité, sécurité des personnels.	- déplacements, tassements, glissements de terrain, déformations, pression.
Structures métalliques	- ponts, tours, - navires, trains, rails, - réservoirs, tuyauteries, - câbles, plates-formes.	- surveillance pour la sécurité des biens et des personnes, - maintenance.	- déformations, dilatations - ruptures de brins, - température, - pression, ...
Structures en béton du Génie Civil, et des Travaux Publics	- ponts, ouvrages d'art, - immeubles, - tunnels, - tirants de précontraintes, - centrales nucléaires, - barrages hydrauliques.	- prise du béton - détection des dégradations internes, - restauration, - maintenance, - sécurité des biens et des personnes.	- déformation, déplacement - température - détection, suivi de fissure - humidité, - pression, - corrosion *in situ*, - verticalité, horizontalité...
Structures souples	- ballons, tissus, - combinaisons, - réservoirs, ...	- sécurité, - surveillance.	- déformations, - enfoncements, - pression.

Tableau 1. Domaines de la surveillance des structures par réseaux de Bragg

A ce jour, deux domaines applicatifs dominent. Il s'agit d'une part du Génie Civil et des Travaux Publics, et d'autre part des différents secteurs d'emploi des matériaux et des structures composites. L'enjeu technico-économique est immense

puisque la quasi-totalité des ouvrages et des sites - tant naturels qu'industriels - est potentiellement concernée.

La surveillance peut en effet être étendue à tous les ouvrages « à risques », qu'ils soient sur terre [ponts : (Meier *et a*l., 1994) (Maaskart *et al*., 1998) (Magne *et al*., 2003), mines et tunnels : (Ferdinand *et al*., 1994), bâtiments, moyens de production énergétiques, centrales nucléaires : (Ferdinand *et al.,* 1996), barrages, falaises, ...], en mer [navires : (Pran *et al.,* 1999), pipe-lines : (Kersey, 2000), plates-formes, ...], en vol [avions : (Ball, 1998), hélicoptères] ou bien encore dans l'espace [satellites, fusées, navettes].

Au delà de ces aspects, le concept de structure « intelligente » fondée sur l'utilisation de CFO à réseaux de Bragg et d'actionneurs reliés à une intelligence déportée va très certainement faire prochainement évoluer les matériaux ainsi que la conception et la réalisation des structures les plus exposées.

3.1. Le Génie Civil

Notre laboratoire, en collaboration avec la PME Bordelaise Hydrolog, a récemment réalisé une démonstration à grande échelle, doublée d'un transfert industriel. L'expérimentation a consisté à mettre en place une instrumentation complète à réseaux de Bragg sur le pont Saint-Jean de Bordeaux. Celui-ci, un des premiers ponts à voussoirs et pré-contraintes - sa construction date de 1964 -, mesure 474 m, et ses travées sont de 70 m. Il fait partie d'une génération d'ouvrages pour lesquels l'influence des effets thermiques n'a pas été prise en compte dans les calculs de dimensionnement. De ce fait, les sur-contraintes importantes et non-prévues sont désormais un problème critique. La probable intensification du trafic dans un futur proche nécessitait d'estimer sa solidité.

Compte-tenu de l'état de fissuration de l'ouvrage, des extensomètres à longue base (1 m) à corps d'épreuve en composite verre-époxy (suivi des ouvertures de fissures) ont été installés dans les deux première travées, et d'autres à base courte en acier de 20 cm (suivi de déformations) ont été fixés dans la seconde travée, environ 100 m plus loin. Au total, 11 extensomètres répartis en 4 lignes de mesure ont été mis en place, ainsi que des capteurs associés de température à réseaux de Bragg.

Un chargement normalisé du pont a été effectué dans la nuit du 29 oct. 2001. Il a consisté à déplacer 2 rangées de 4 camions de 26 tonnes (200 tonnes au total), selon une suite de cas normalisés, dans l'objectif de corréler les réactions de l'ouvrage avec l'évolution du chargement. Durant ce test, l'instrumentation optique a été en mesure de suivre parfaitement les déformations du pont. A partir des enregistrements, la ligne de base des déformations d'origine thermique peut aisément être soustraite aux déformations afin d'en séparer celles induites par le chargement sur la structure ainsi que les modes de flexion. Les ouvertures de fissures peuvent ensuite être simplement déduites des mesures de déformations en multipliant par la longueur de base du capteur. Finalement, tant l'installation que la recette, puis l'expérimentation de test de réaction du pont se sont parfaitement déroulées, preuve

s'il en est de la maturité de la technologie de surveillance d'ouvrages d'art par capteurs à réseaux de Bragg.

3.2. Les matériaux composites

Au cours de l'année 2000, le LMO a collaboré avec la société Ratier Figeac (équipementier aéronautique) dans le cadre d'un projet d'assistance à la fabrication de pâles d'hélice d'avion (procédé de *Resin Transfert Molding*, RTM[1]). L'objectif expérimental était de visualiser en temps réel l'avancée du front résine lors de son injection dans le moule, en vérifiant l'absence de zones sèches. Une pâle a donc été instrumentée de 38 capteurs à réseau de Bragg divisés en 8 lignes de mesure de 4 à 5 capteurs chacune, également répartis sur ses deux faces (intrados et extrados). L'instrumentation de mesure mise en œuvre et permettant l'interrogation séquentielle des 8 lignes de mesures (utilisation d'un commutateur optique) est fondée sur le démultiplexage spectral (WDM) (Cf. Fig. 3 gauche). Compte tenu de la stabilité thermique (quelques degrés) de l'ensemble du moule, un seul capteur de Bragg pour chaque face a été conditionné pour n'être sensible qu'à la température, et permettre la compensation de ce paramètre sur les mesures délivrées par les capteurs de déformations. Les expérimentations se sont parfaitement déroulées et la cinétique d'injection reconstituée à partir des mesures optiques [Dewynter, 1999].

3.3. Les mesures d'indice de réfraction

Les réseaux de Bragg en angle constituent une famille spécifique de transducteurs à réseaux de Bragg, et les travaux récemment menés sur ce type de composants ont permis de développer une solution de réfractométrie 'tout fibre'. Ces réseaux, dont la modulation d'indice est inclinée d'un angle θ par rapport à l'axe du guide, ont la propriété de diffracter la lumière guidée vers des modes de gaine voire des modes rayonnés. Ces phénomènes de couplage sont à l'origine de leur grande sensibilité spectrale vis-à-vis de l'indice de réfraction du milieu environnant. *Via* l'utilisation d'une courbe de calibrage préalablement établie, cette sensibilité spectrale est exploitée à l'aide d'une méthode d'analyse numérique adéquate afin de remonter à la valeur de l'indice du milieu extérieur. Cette solution permet d'effectuer des mesures d'indice avec une résolution allant de 10^{-5} à 10^{-4} sur une plage s'étendant de 1,3 à plus de 1,64. La sensibilité croisée à la température est ~ 10^{-5}/°C [Laffont, 2001].

Une telle méthodologie offre de nombreuses possibilités applicatives en chimie et en biochimie. Nous avons pu en démontrer la viabilité dans des cas simples de mesures en solutions aqueuses telle que la mesure de l'indice de solutions salines. On peut

---

[1] Principe de la RTM : Ce procédé consiste dans un premier temps à fabriquer la structure mécanique de la pièce, c'est-à-dire l'empilement des différents tissus ; la pièce est ensuite disposée dans un moule adapté au sein duquel la résine, constituant le liant, est injectée sous pression et pénètre dans toute la structure afin d'y être polymérisée sous l'effet de la température.

également envisager le suivi de réactions biochimiques de type anticorps-antigène. Enfin, par le suivi de réactions de polymérisation des résines des matériaux composites, nous avons également démontré l'intérêt de ces réseaux pour le suivi et l'optimisation de procédés industriels de fabrication.

4. L'instrumentation de mesure à réseaux de Bragg

Depuis 10 ans, le LMO développe des Capteurs à réseaux de Bragg et leurs systèmes d'acquisition associés. Ces instrumentations permettent de suivre la durée de vie des structures, depuis leur étape de fabrication jusqu'à leur surveillance en fonctionnement. Bien entendu chaque paramètre recherché et/ou domaine d'emploi nécessite un conditionnement spécifique des réseaux. Cela étant la démarche est générique, et tous sont compatibles avec les différents systèmes de mesure réalisés.

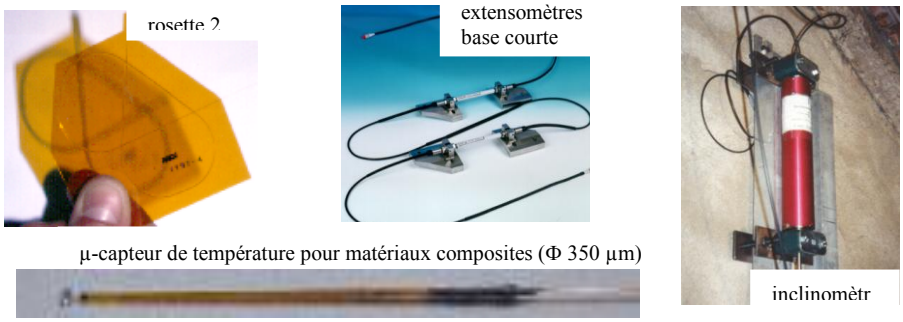

Figure 2. Quelques capteurs à réseaux de Bragg

Ainsi, un système de mesure *Bragg FIT* dédié à la BF (0 à 50 Hz) a été intégré dans un PC industriel avec logiciel conversationnel (Fig. 3, gauche). Huit lignes pouvant contenir ~ 12 capteurs à réseau de Bragg (déformations, température, pression, inclinaison, etc.) sont adressables, la résolution en mesure de déformation est ~ 1 µm/m, et ~ 0,1°C en ce qui concerne la température.

Pour les mesures rapides, nécessaires dans certains domaines (vibrations, ondes de chocs, effet Hopkinson, etc.), un système compact *Bragg Fast* a récemment été conçu par le LMO. Il est intégré sur une carte PCI. Ses performances permettent d'atteindre 0,5 µm/m depuis le régime continu jusqu'à 45 kHz sur chacun des 8 capteurs interrogeables (Fig. 3, droite).

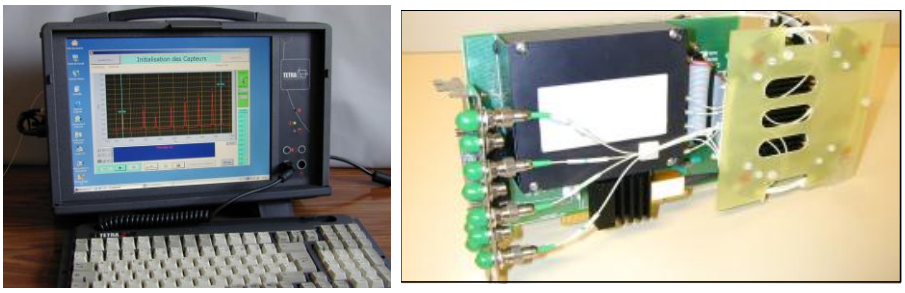

Figure 3. Système de mesure B*ragg-FIF* et *Bragg-Fast* pour capteurs de Bragg

5. Conclusion

En l'espace d'une décennie, le réseau de Bragg est devenu un transducteur incontournable et focalise l'attention, non seulement des développeurs mais également - et c'est là l'aspect le plus remarquable - de plus en plus d'utilisateurs. Le domaine d'excellence de cette technologie d'instrumentation est indubitablement celui de la 'Surveillance des Structures' qui, dans quelques années, va sans nul doute fusionner avec les disciplines connexes traitant des 'structures intelligentes'. Bon nombre d'applications industrielles ont d'ores et déjà été menées à bien dans le Génie Civil (mine, pont, tunnel) ainsi que pour les domaines d'emploi des matériaux composites (panneaux, aile d'avion, porte d'écluse, éolienne, navire). Par ailleurs, des applications dans le domaine pétrolier commencent à voir le jour. Tous ces projets prouvent les capacités de la technologie de réseaux de Bragg à réellement s'appliquer à des problèmes concrets, en conditions extrêmes. Ils peuvent désormais servir de références à la profession pour une utilisation plus intensive de cette technologie.

6. Bibliographie

Ball A., « Monitoring ON-line Integrated Technologies for Operational Reliability (Monitor) », *4th ESSM and 2nd MIMR Conf.*, Harrogate, 6-8 July, 1998, pp. 435-441.

Dewynter-Marty V., Ferdinand P., Bugaud M., Bocherens E., Bourasseau S., Brion P., Brilland L. et Delevaque E., « Quatre Technologies de Capteurs à Fibre Optique pour le suivi de fabrication des matériaux composites » , *19èmes JNOG*, Limoges, 6-8 déc. 1999.

Maaskart R., Alavie A.T. and Measures R.M., « A recent Experience in Bridge Strain Monitoring with Fiber Grating Sensors », *International Workshop on Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges*, New Jersey Inst. of Techn. USA, May 3-6, 1998.

Magne S., Boussoir J., Rougeault S., Marty-Dewynter V., Ferdinand P. and Bureau L., « Health monitoring of the Saint-Jean bridge of Bordeaux, France using Fiber Bragg Grating Extensometers », *SPIE 5050, Smart Materials and Structures*, San Diego, March 2003.

Meier U. and Meier H., « Anchoring Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) cables with gradient materials », *17th SAMPE Conf.*, Basel, Switzerland, 1996, pp. 185-194.

Ferdinand P., Jarret B., Kotrotsios G., Vœt M.R.H., Toscano D. *et al.*., « Mine Operating Accurate STABILity Control with Optical Fiber Sensing and Bragg Grating Technology: the Brite-EuRam STABILOS Project », *J. of Lightwave Technol.*, Vol. 13, n° 7, 1995.

Ferdinand P., Magne S., Dewynter V., Martinez C., Rougeault S., Bugand M., « Applications of Bragg Grating Sensors in Europe », *OFS'12*, Williamsbug, USA, Oct. 97, pp. 14-15.

Ferdinand P., « Capteurs à Fibres Optiques à Réseaux de Bragg »*,, Techniques de l'Ingénieur*, Revue Mesures et Contrôle, R 6735, Déc. 1999.

Kersey, A., Optical Fiber Sensors for permanent Down well Monitoring Applications in the oil and gas industry, *IEICE Trans. Electron*., vol. E83-C, N° 3, 2000, pp. 400-401.

Laffont G. and Ferdinand P., « Tilted short-period fibre-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry », M. Sci. Techn, vol.12, n°7, July 01, 765-770.

Pran K., Havgard G.B., Palmstrom R., Wang G., Johnson G.A., Danver B.A., Vohra S.T., « Sea-test of 27 channel fiber Bragg grating sensor system on air cushion catamaran », *OFS-13*, April 12-16, 1999, Kyongju, Korea, paper W1-3, pp. 145-148.