

Les fibres optiques

Un nouvel outil pour le génie civil

Jean-Marie CAUSSIGNAC

Chef de la section Optoélectronique
Service Métrologie et instrumentation

Alain CHABERT

Chef de la section Armatures et procédés de précontrainte
Division Métaux, armature et câbles pour ouvrage d'art

Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Fabien RENAUDIN

Chargé d'études
Groupe Ouvrages d'art

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg

Introduction

On parle souvent de l'expérience du terrain, sous-entendu de l'expérience de l'homme de terrain. Force est de constater qu'une partie non négligeable de notre patrimoine résulte de dispositions constructives établies à partir de règles de dimensionnement et de savoir-faire transmises de génération en génération. Aujourd'hui, l'amélioration des connaissances et la mise à disposition d'outils performants de conception, de fabrication et de contrôle ont contribué à faire évoluer ces pratiques. La demande du « client » se diversifie et les exigences deviennent de plus en plus pointues. À la notion d'objet vient s'ajouter celle de service, de niveau de service et de fonctionnalité. À titre d'exemple, on ne se contente plus d'un matériau « passif » vendu au mètre cube ou à la tonne, mais on souhaite en connaître, à la fois, l'histoire et le devenir, c'est-à-dire l'origine, les procédés de fabrication, le transport, la mise en œuvre, la conformité par rapport aux spécifications imposées, le comportement d'usage à court, moyen et long terme. Le recours à des quantificateurs globaux pour caractériser chaque phase importante du processus fait partie d'une démarche « qualité » d'ensemble exigée maintenant fréquemment dans le cahier des charges.

Pour répondre à ces nouveaux besoins, les outils et moyens d'aide à la gestion et à la décision ont dû s'adapter. On souhaite avoir accès à des informations exploitées, le moyen pour y arriver devant rester transparent pour l'utilisateur. Le capteur devient donc le maillon d'une chaîne plus ou moins complexe auquel on associe : la mise en forme des signaux, leur validation, l'extraction des données pertinentes, le traitement local ou déporté, l'exploitation et l'utilisation de ces informations pour éventuellement commander une action. Il s'agit donc de systèmes.

RÉSUMÉ

Les besoins en matières d'instrumentation performante évoluent rapidement. De nouveaux concepts apparaissent : « capteurs intelligents », « métrologie à demeure », « nanotechnologies » etc. La notion même de mesure, perçue par l'utilisateur d'aujourd'hui ne se limite plus à l'obtention de valeurs délivrées par un (ou des) capteur(s), mais prend en compte l'acquisition, le traitement, la transmission et l'exploitation de la grandeur mesurée. L'accès à une information « digérée », proche de la propriété d'usage, devient donc une exigence à laquelle les nouveaux outils mis sur le marché, les principaux acteurs du génie civil fondent beaucoup d'espoirs sur les capteurs à fibres optiques, confortés en cela par les résultats encourageants d'un certain nombre d'expériences « pilotes » menées à ce jour. Il est proposé de faire le point sur l'état de l'art, les problèmes rencontrés et les perspectives d'application.

MOTS CLÉS : 53 - Fibre optique - Capteur - Mesure - Surveillance - Génie civil - Mise en œuvre (appl.) - Ouvrage d'art (gen) - Appareil de mesure - In situ // Instrumentation.

De fait, l'instrumentation à demeure n'apparaît plus uniquement comme un moyen occasionnel de surveillance de cas « pathologiques », mais comme une aide à l'évaluation « temps réel » de l'état d'un ouvrage au cours de son existence. Selon le niveau de service des outils et des modes d'exploitation choisis par rapport à l'usage envisagé, il est possible de rendre une structure sensible ou de lui affecter une certaine « contrôlabilité » plus ou moins évoluée que certains n'hésitent pas à appeler « intelligence ».

Les besoins

Le contexte

L'instrumentation de génie civil se retrouve généralement liée à la notion de contrôle et de surveillance, le plus souvent dans les cas qualifiés de « critiques » ou susceptibles de le devenir. Comme nous l'avons déjà indiqué, sans qu'il s'agisse d'une véritable remise en cause de ce concept, l'évolution actuelle des besoins et des techniques devrait pouvoir s'appliquer à tous les ouvrages. En fait, l'outil ou le système de mesure moderne, intégré au matériau ou à la structure, peut avoir plusieurs fonctions corrélées ou non :

- fournir les informations nécessaires en phase de construction et vérifier la conformité par rapport à la note de calcul et à la normalisation en vigueur pour les ouvrages neufs,
- offrir la possibilité de suivre un comportement ou un fonctionnement pour les ouvrages en service, à partir d'un état de référence pris comme point 0, par un contrôle continu,
- permettre de faire de la prédiction à long terme, à partir de l'analyse et de l'extrapolation d'un suivi historique, afin de fournir les éléments pour définir une politique d'entretien,
- disposer d'informations « temps réel » capables de dédier une contrôlabilité ou de piloter une action autour d'un état nominal imposé.

Les moyens de mesure classiques, qui répondent aux besoins dans bon nombre de cas, s'avèrent limités pour couvrir les nouvelles demandes résultant de cette évolution. D'où l'effort mis sur le développement de nouvelles technologies pour compléter l'éventail des techniques existantes.

Parmi les outils prometteurs ou en passe de le devenir, utilisés généralement en réseau, tels que : les capteurs activables, les systèmes intelligents miniaturisés autonomes, les nanotechnologies, etc., les fibres optiques offrent des potentialités intéressantes. Actuellement, la connaissance acquise à partir des diverses expérimentations sur site réalisées ici ou là, permet d'apprécier, au stade des progrès atteints, les

performances et les limites de ces techniques en condition réelle d'emploi, sachant que les principes de mesure ont été pour la plupart largement validés en laboratoire.

Les exigences

L'essentiel du cahier des charges d'une instrumentation développée dans le cadre d'une structure contrôlée s'appuie sur le schéma présenté sur la figure 1.

Le ou les systèmes utilisés doivent permettre de répondre à certains critères :

- choix pertinent des paramètres à mesurer et des performances des capteurs associés à mettre en œuvre,
- accès à des quantificateurs globaux proches de la propriété d'usage envisagée,
- absence de perturbation sur les phénomènes, liée à la présence de l'instrumentation,
- interrogation des capteurs et recueil des informations à la demande ou en temps réel avec possibilité de traitement local à partir de logiques miniaturisées proches de l'élément sensible de saisie,
- insensibilité aux parasites extérieurs,
- possibilité de mise en réseau et de multiplexage des capteurs,
- existence d'un système d'exploitation fondé sur un modèle de comportement.

L'outil « fibre optique »

Généralités

On constate que, par leurs spécificités, les fibres optiques satisfont à la plupart des critères énoncés. C'est la raison pour laquelle un grand nombre de recherches, tant au niveau national qu'international, ont été engagées pour étudier les transferts technologiques possibles au génie civil [11]. Cette démarche s'est appuyée sur les résultats encourageants acquis dans certains secteurs de pointe déjà largement utilisateurs, comme l'aérospatial, le médical, etc.

Cependant, ils mettent en évidence la difficulté pour appréhender le comportement extrinsèque de ces capteurs, c'est-à-dire leur réponse dans le milieu d'emploi. Tout le problème est de quantifier le filtrage, occasionné par le conditionnement, le gainage mécanique de la fibre optique, les conditions de mise en œuvre, en bref, toutes les interfaces qui peuvent modifier le transfert convenable de la grandeur d'influence recherchée au paramètre lumineux mesuré en extrémité de guide. Ce point mérite une attention particulière car il incite à réfléchir, dans le cadre d'une opération de suivi, à la fois sur l'étalonnage *in situ* et le choix d'états de référence et de seuils éventuels.

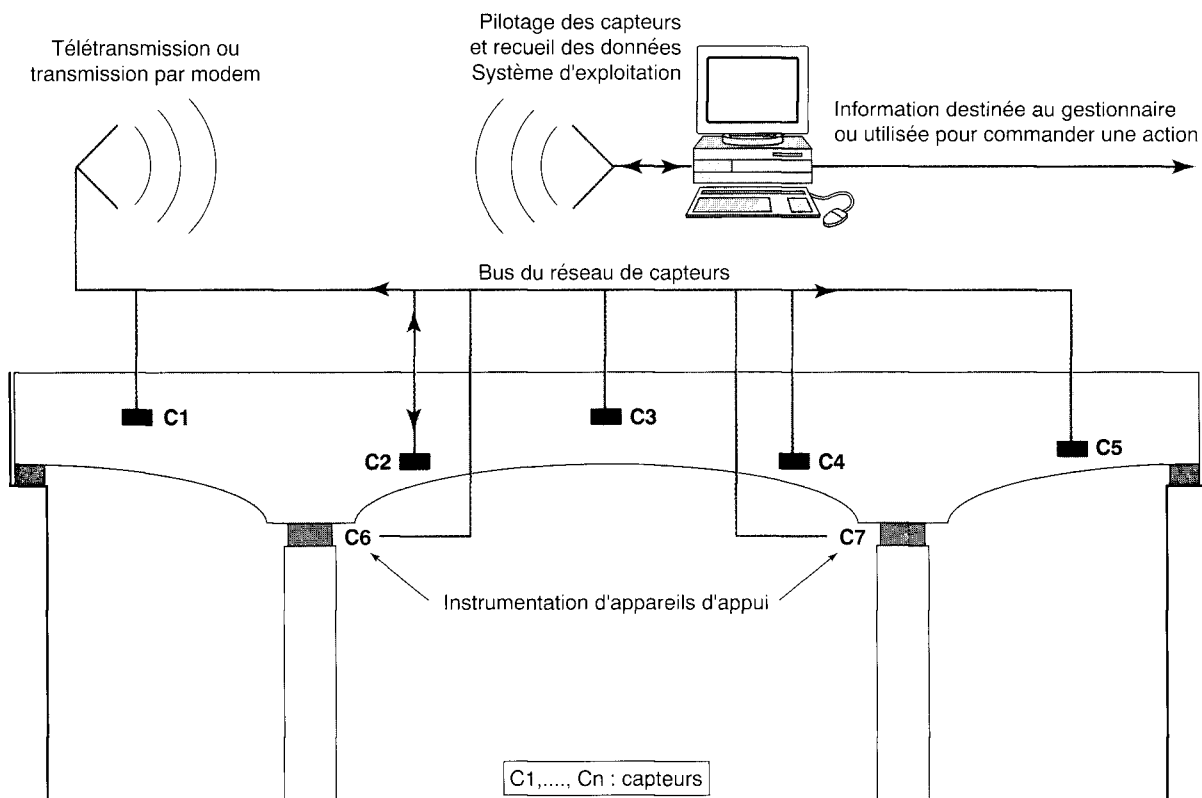


Fig. 1 - Schéma de principe d'une structure contrôlée.

TABLEAU I
Principales réponses des fibres optiques en fonction de leur conditionnement

Grandeur d'influence	Conditionnement ou propriété de la fibre ou principe utilisé	Paramètre lumineux
Grandeurs Dimensionnelles Extensométrie	Microcourbures Réseaux de Bragg Interférométrie Allongement	Atténuation Analyse spectrale Franges (intensité lumineuse) Temps de propagation
Courbures	Interférométrie Fibre à deux cœurs Microcourbures Courbures	Franges (intensité lumineuse) Atténuation - Phase - Temps de Propagation Atténuation Atténuation - Polarisation
Localisation	Rétro réflexion ou rétrodiffusion	Intensité lumineuse
Pression	Microcourbures Biréfringence	Atténuation Franges polarimétriques (intensité lumineuse)
Température	Biréfringence Interférométrie Réseaux de Bragg Rayleigh	Franges polarimétriques (intensité lumineuse) Franges (intensité lumineuse)
Température + Grandeur mécanique	Brillouin	Analyse spectrale Battements hyperfréquences
Intensité électrique	Effet Faraday - Biréfringence	Battements hyperfréquences
Humidité	Gainage de la fibre hydrogel	Franges polarimétriques (intensité lumineuse)
pH	Gainage de la fibre réactif Discontinuité d'indice de réfraction	Atténuation
Grandeurs chimiques	Gainage de la fibre réactif	Atténuation - Polarisation Coefficient de réflexion Atténuation - Polarisation

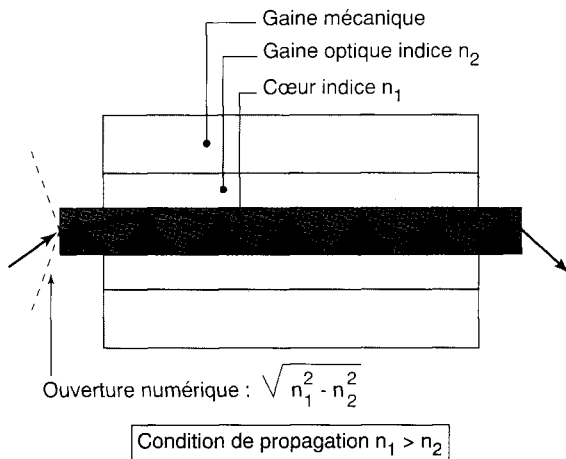


Fig. 2 - Description d'une fibre optique.

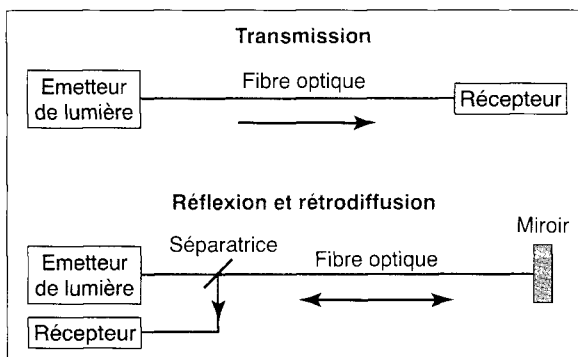


Fig. 3 - Modes d'utilisation d'une fibre optique.

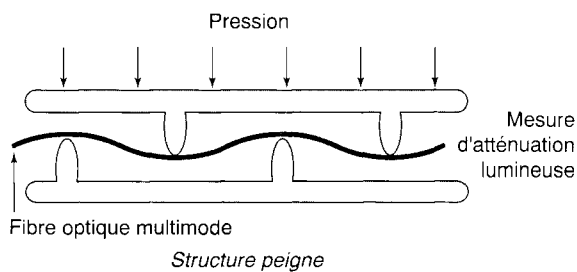


Fig. 4 - Conditionnement en microcourbures.

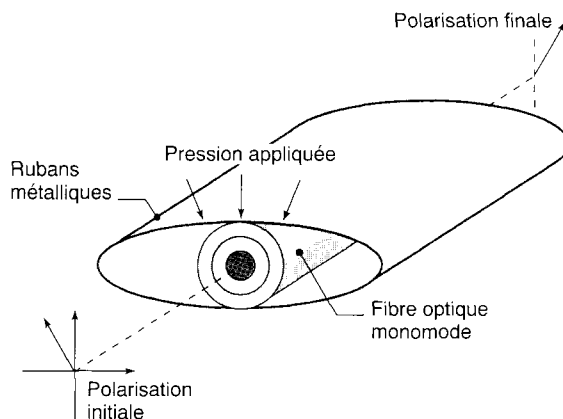


Fig. 5 - Principe du conditionnement en polarisation.

Les spécificités

Les capteurs à fibres optiques [2], [4] et [5] diffèrent de l'instrumentation classique par certaines spécificités. La saisie et la transmission de l'information qui se font simultanément sur le même support physique, en l'occurrence le guide de lumière, constitue la première d'entre elles. Plusieurs types de mesure peuvent être effectués sur une fibre. Cela signifie qu'une sollicitation extérieure agissant sur la propagation de l'onde dans le guide, quelle qu'en soit sa nature, va modifier l'ensemble des paramètres lumineux accessibles. Pour adapter la réponse de l'élément sensible à une seule grandeur d'influence, un conditionnement est apporté à la fibre. Une liste non exhaustive des correspondances entre la grandeur d'influence et le paramètre lumineux mesuré est présentée au tableau I.

Néanmoins, bien que les principes de mesure aient été validés en laboratoire, les moyens disponibles sur le terrain restent pour le moment limités à quelques grandeurs.

Rappel des principes

Le guide d'onde

Une fibre optique est un guide d'onde constitué d'un cœur, d'une gaine optique et d'une gaine mécanique (fig. 2) dont la propagation lumineuse confinée au centre est régie par les équations classiques de l'électromagnétisme dans les milieux matériels.

Les propriétés de guidage dépendent principalement de la géométrie (diamètre du cœur) et des indices de réfraction respectifs cœur-gaine optique. Une modification de l'une ou de l'autre de ces caractéristiques, liée à une perturbation interne ou externe, dégrade les performances intrinsèques de la fibre. La mise en évidence de cette évolution se fait par la mesure d'un paramètre lumineux en extrémité de fibre.

Les modes de fonctionnement

Il existe deux types de fibre optique, respectivement monomode (diamètre de cœur compris entre 5 et 10 μm) et multimode (diamètre de cœur supérieur à 50 μm). Dans chaque cas, l'interrogation de l'élément sensible peut s'effectuer soit par transmission, soit par rétrodiffusion ou rétroréflexion (fig. 3).

Les conditionnements usuels

Comme nous l'avons évoqué précédemment, une fibre optique est influencée par toutes les sollicitations, quelle que soit leur nature. Pour réaliser un capteur, il est donc indispensable d'apporter un conditionnement qui permette de relier un paramètre lumineux mesuré à un seul type d'action [2] et [5]. Nous allons présenter, ci-après, les plus courants.

Microcourbures

Ce premier cas adapté aux mesures de sollicitations mécaniques (pression, déplacement, déformation, etc.) consiste à disposer la fibre entre deux peignes décalés d'une demi-période l'un par rapport à l'autre, dont le pas correspond approximativement à la période spatiale des modes de propagation, typiquement de l'ordre de 1,3 mm pour les fibres multimodes standard. Lorsqu'une pression s'applique sur un tel système, les microcourbures [3], qui se créent au voisinage des points de contact, modifient l'atténuation du guide (fig. 4).

Polarisation

Ce type de conditionnement s'applique essentiellement à des fibres monomodes. Un des principes utilisés consiste à insérer la fibre entre deux rubans sertis sur les bords, afin de sensibiliser le guide selon une contrainte uni-axiale (fig. 5), [13]. Généralement, la température et la pression sont les deux types de paramètres accessibles. L'action extérieure qui induit, ici, dans la fibre, une biréfringence a pour effet de modifier la polarisation d'une onde lumineuse initialement polarisée. On montre que la phase de l'onde est directement proportionnelle à la différence des contraintes principales dans la fibre selon l'expression :

$$\Phi = [2\pi C (\sigma_1 - \sigma_2) e] / \lambda$$

dans laquelle :

➤ C : constante photoélastique de la silice,

- e : longueur de fibre sollicitée,
- $(\sigma_1 - \sigma_2)$ différence des contraintes principales,
- λ : longueur d'onde lumineuse.

La mesure est basée sur la comparaison entre les directions de polarisation d'entrée et de sortie. Concrètement, l'analyse de la lumière transmise par l'analyseur de sortie montre une succession de minima et maxima d'intensité (franges polarimétriques) qui met en évidence la rotation de phase de $n \times 2\pi$. La charge appliquée au capteur se déduit du comptage des franges.

Réseaux de Bragg

Comme il est indiqué sur la figure 6, des strates d'indice de réfraction sont gravées au cœur du guide. Cette configuration a pour effet de réaliser un filtrage spectral par interférométrie (effet Bragg), sur une onde qui se propage, pourvue d'un spectre large [10]. Le pas du réseau peut être déduit directement par la mesure de la longueur d'onde transmise ou réfléchie. Il s'agit donc d'un extensomètre à référence « absolue ».

Gainage réactif

Pour ce qui concerne la détection de grandeurs physico-chimiques ou chimiques [12], c'est principalement le gainage de la fibre muni de propriétés particulières, en réagissant avec l'environnement extérieur qui va jouer le rôle d'élément sensible (fig. 7). À titre d'exemple, une gaine hydrogel qui présente du gonflement sous l'action d'une hydratation va se trouver nécessairement sensible à la teneur en eau du milieu en contact. Ce comportement volumique induit des contraintes mécaniques dans le cœur modifiant ainsi les caractéristiques de propagation. L'atténuation lumineuse de la fibre peut devenir ainsi le paramètre lumineux influencé par la teneur en eau. Cette conception de capteur avec gainage réactif se retrouve également pour la détection de certains éléments chimiques.

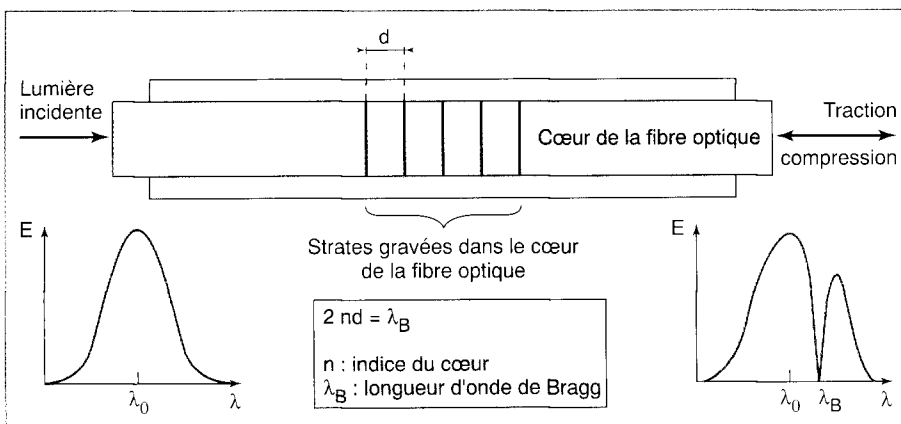


Fig. 6 - Conditionnement par Réseau de Bragg.

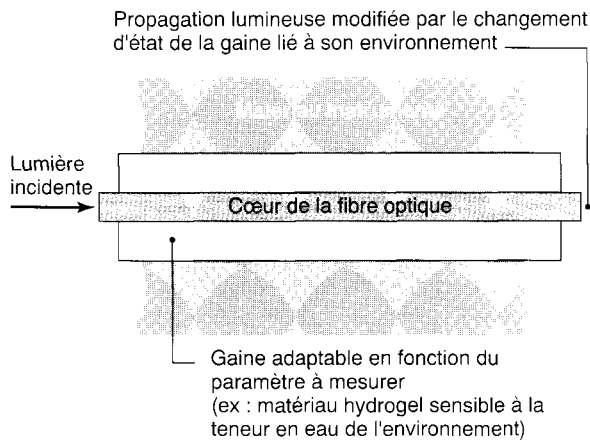


Fig. 7 - Conditionnement par Réseau de Bragg.

Fibres spéciales

Pour compléter cette énumération non exhaustive, il existe des fibres optiques spéciales qui, par des dopages spéciaux du cœur ou de la gaine mécanique, présentent des propriétés de fluorescence ou favorisent, sous certaines conditions, des diffusions de type Brillouin ou Rayleigh. La fluorescence sera plutôt adaptée pour la détection de rayonnement nucléaire tandis que la température affectera principalement la diffusion Brillouin ou Rayleigh. Dans ces deux cas, la lumière véhiculant l'information, guidée par le cœur, est détectée en extrémité de fibre.

Les montages interférométriques

Parallèlement, au conditionnement apporté à la fibre, il existe deux possibilités de mise en œuvre :

➤ soit la fibre est utilisée de façon autonome en tant que capteur seul,

➤ soit elle est intégrée dans un montage interférométrique qui lui confère d'autres performances.

Trois schémas interférométriques sont les plus courants :

- Fabry-Pérot [15] et [16],
- Michelson,
- Mach-Zehnder (fig. 8).

L'intérêt est de pouvoir disposer à la fois d'une référence absolue, en l'occurrence la longueur d'onde lumineuse, mais aussi de performances accrues par la résolution métrologique qu'elle procure. La mesure revient à détecter et à exploiter des franges d'interférence (alternance de maximum et de minimum d'intensité lumineuse transmise en fonction de la sollicitation appliquée). Étant donné qu'il s'agit d'une mesure différentielle où l'état de la fibre sensible est comparé à celui d'une fibre de référence, l'accès au zéro de la méthode se fait généralement par une démodulation de la phase en lumière blanche.

Remarques. Quel que soit le principe retenu, les capteurs disponibles actuellement sont pratiquement tous corrigés des effets de température, soit par l'adjonction d'une fibre ou d'un élément de référence, soit par un traitement de signal approprié associé à une mesure complémentaire.

Cependant, comme nous allons le voir par la suite, en fonctionnement opérationnel dans un environnement déterminé, la correction intrinsèque de température du capteur ne doit pas masquer la correction globale de l'effet de température qu'il y a lieu d'appliquer à l'information délivrée par la fibre optique pour prendre en compte le comportement en température du couplage « milieu d'emploi-capteur ».

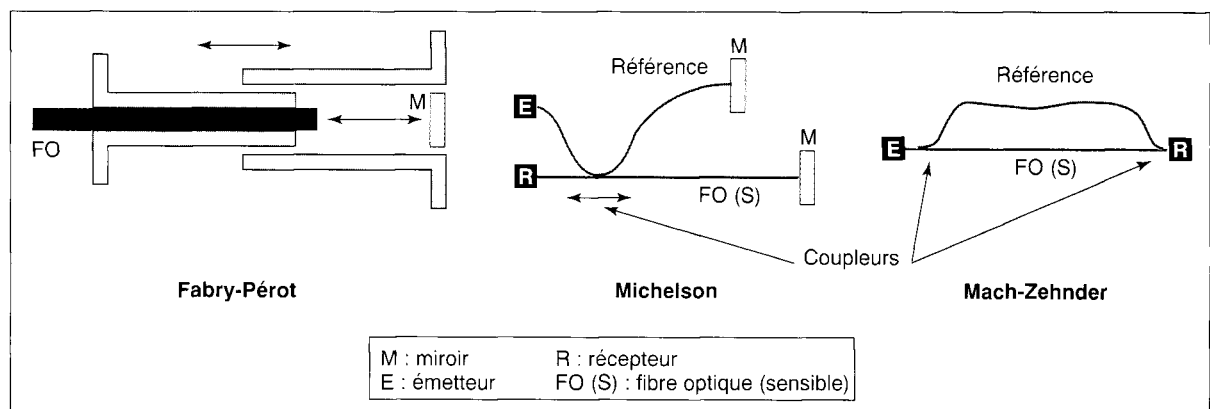


Fig. 8 - Schémas de montage interférométrique.

La mise en œuvre

L'installation

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la notion générale de structure ou de matériau contrôlé est étroitement associée à celle de capteur, de réseaux de capteurs ou d'instrumentation intégrée. Cette intégration peut se réaliser soit au cœur ou en surface du matériau, soit au cœur ou en surface d'équipements annexes à la structure.

Très réceptifs aux techniques innovantes, les principaux secteurs de l'aéronautique et du spatial ont été « pilotes » pour la conduite des premières applications opérationnelles des fibres optiques. La priorité a été mise sur l'instrumentation de matériaux composites, qui entrent pour une large part dans les structures d'avions et de sondes spatiales.

Aujourd'hui, bien que les secteurs précités restent très demandeurs, on constate une réelle diversification des applications, parfois fort inattendues (par exemple, implantation de fibres optiques sur les limites d'un court de tennis pour la détection des balles « out »).

Ces précisions étant données, revenons au génie civil [7] et [9]. Les premières expériences dans le béton étaient destinées à étudier la faisabilité des fibres optiques comme moyen de détection « tout ou rien » de la fissuration (la transmission lumineuse étant interrompue dès la rupture de la fibre) [1]. Depuis, bien que ce mode de travail soit encore très employé, les progrès réalisés ont eu pour objet d'exploiter, autant que faire se peut, le signal lumineux délivré par le capteur avant extinction.

L'extensométrie sur grande base, en surface de structure, au cœur du matériau ou le long de tirants d'ancrage [3], [15] et [16] donne lieu maintenant à un certain nombre d'expérimentations « tests » sur site. Par ailleurs, des efforts importants sont faits, notamment par le Japon [8], pour étudier les possibilités d'emploi des fibres optiques à la fois pour le contrôle de structures dans le cadre des risques sismiques, mais aussi pour les mines et la surveillance d'ouvrages en terre [8].

Exemples d'applications

Au sein du réseau des LPC, deux applications sont en phase « prototype » :

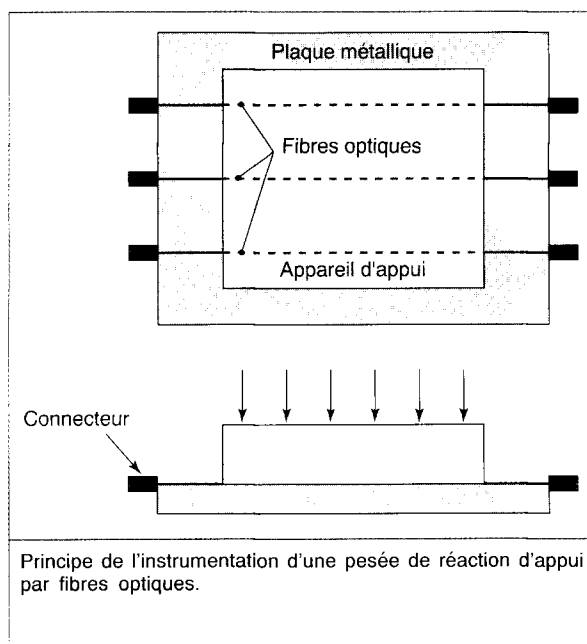
- la pesée de réactions d'appui d'ouvrages d'art [6],
- le pesage en marche de véhicules routiers [13],

et une application est en phase de faisabilité : la détection de fissuration et/ou l'extensométrie en surface et/ou à cœur de béton [14] et [9].

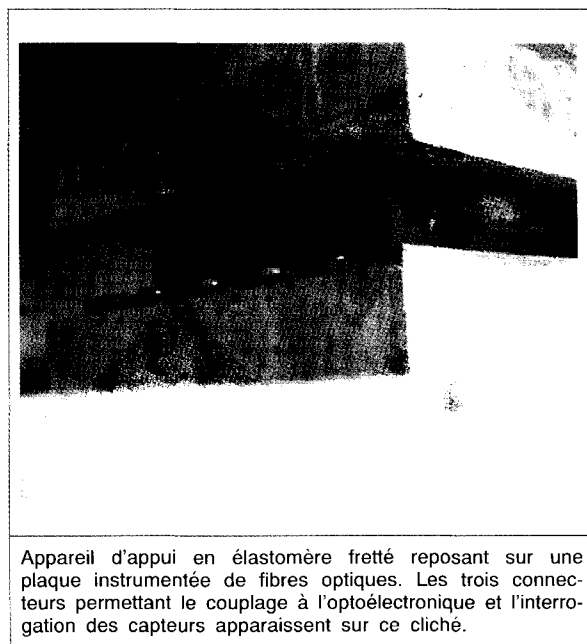
Les deux premières sont présentées ci-après.

Réactions d'appui d'ouvrage d'art

La méthode développée, conjointement par le LCPC et la Société Freyssinet-International [6], consiste à équiper la plaque métallique sur laquelle repose l'appareil d'appui de plusieurs fibres optiques conditionnées en microcourbures (fig. 9). Ces capteurs, sollicités en compression et étalonnés préalablement en laboratoire, permettent d'accéder à la charge par une mesure d'atténuation lumineuse.



Principe de l'instrumentation d'une pesée de réaction d'appui par fibres optiques.



Appareil d'appui en élastomère fretté reposant sur une plaque instrumentée de fibres optiques. Les trois connecteurs permettant le couplage à l'optoélectronique et l'interrogation des capteurs apparaissent sur ce cliché.

Fig. 9 - Pesée de réaction d'appui d'ouvrage d'art par fibres optiques.

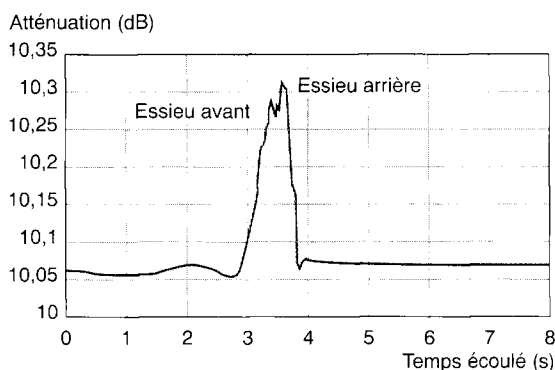


Fig. 10 - Enregistrement de l'atténuation de la fibre optique centrale de l'appareil d'appui, correspondant à la surcharge dynamique créée par un poids lourd traversant l'ouvrage à 30 km/h.



Fig. 11 - Installation de capteurs de trafic à fibres optiques sur un site test de la RN 10.

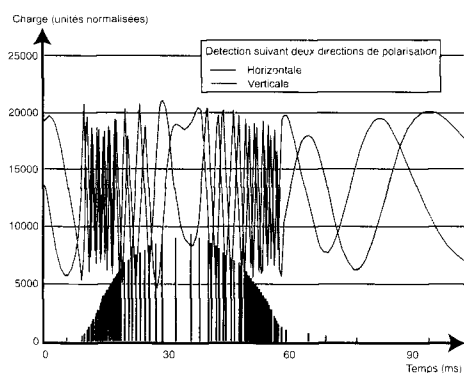


Fig. 12 - Exemple d'une signature de la roue droite avant d'un poids lourd.

Le nombre total de franges est proportionnel à la sollicitation.

Reconstitution du profil de charge en fonction du temps par exploitation du signal fibre.

La mesure d'atténuation lumineuse qui est instantanée permet à la fois des enregistrements de charge ou de variation de charge à la fois en statique et en dynamique. Un exemple de surcharge dynamique au droit des appuis créée par le passage d'un poids lourd sur un ouvrage est présenté sur la figure 10. Il s'agit d'un ouvrage à quatre travées. L'appareil d'appui instrumenté se trouve sur le mur de culée. On constate au passage du véhicule sur les différentes travées l'effet des flèches et contre-flèches sur les descentes de charge. Par ailleurs, l'examen du pic principal met en évidence le passage et la charge des essieux.

Pesage en marche

Cette technique basée, sur la biréfringence induite dans une fibre optique monomode par l'action d'une charge normale à son axe, a été développée dans le cadre de cette application par le LCPC, le CCT de Trappes et le groupe Alcatel [13]. Elle utilise la polarisation de l'onde lumineuse comme vecteur de transport de l'information (cf. paragraphe « Polarisation »). La charge est déduite du signal « fibre » par comptage des franges polarimétriques, l'interfrange correspondant en moyenne à une variation de pression de 0,025 MPa. La figure 11 montre un exemple d'installation de capteurs de ce type sur la grille expérimentale de pesage de la RN10. L'ensemble constitué de deux capteurs inclinés par rapport à l'axe transversal de la chaussée permet de peser séparément les roues, de déterminer la vitesse du véhicule et de permettre une reconstitution de la charge totale par addition de l'ensemble des signaux de roues. Un exemple de signature, avec reconstitution du profil de charge en fonction du temps est présenté sur la figure 12.

L'interprétation et l'exploitation des mesures

Bien que le recul soit encore insuffisant à l'échelle de la vie d'un ouvrage, les expériences menées depuis plusieurs années permettent de tirer certains enseignements sur le comportement et les qualités métrologiques des capteurs installés sur site.

En principe, l'interprétation des mesures fournies par un capteur noyé n'est possible que si l'étalonnage *in situ* a pu se réaliser. Dans le cas contraire, tout dépendra des approximations effectuées, de la représentativité des modèles employés, des hypothèses de base prises en compte, etc. Ce qui signifie que l'intégration d'un capteur dans un milieu matériel modifie ses performances métrologiques.

L'exploitation et l'interprétation des mesures « fibre optique » soulèvent la question de savoir avec quelle fidélité l'information recherchée au sein du milieu d'emploi est reproduite par la fibre elle-même ? En d'autres termes, y a-t-il une rela-

tion connue entre la sollicitation externe du capteur et la traduction interne qu'il en fait ? L'expérience montre que le conditionnement appliqué à la fibre à la fois pour adapter sa réponse à une grandeur d'influence déterminée, mais aussi pour assurer la liaison correcte entre le milieu et le capteur, joue un rôle fondamental sur le résultat. Les interfaces matériau-conditionnement du capteur et conditionnement-fibre optique agissent comme des filtres souvent mal appréhendés par rapport au comportement de l'environnement que l'on cherche à étudier [14] et [16].

À titre d'exemple, si une fibre est fixée au moyen d'une résine sur un support plan, pour en suivre les déformations, le comportement mécanique et l'épaisseur du collage auront nécessairement une influence sur la mesure. Dans la pratique, il est relativement difficile de trouver des matériaux possédant les bonnes propriétés requises par rapport au comportement du matériau primaire que l'on souhaite contrôler.

Il serait évidemment trop long d'envisager toutes les situations susceptibles d'être rencontrées sur site. Aussi, nous limiterons nous volontairement aux effets thermomécaniques et à la grandeur perturbatrice la plus courante à laquelle toute instrumentation sur site se trouve confrontée, à savoir la température. L'expérience montre que, dans bon nombre de cas, l'interprétation des effets thermiques s'avère difficile car l'information globale fournie par le ou les capteurs intègre le comportement à la fois de l'environnement autour du capteur, du capteur et de l'interface capteur-milieu. La multiplication des mesures ou des types de mesure n'est pas toujours suffisante pour lever les indéterminations. Aussi, au moyen de schémas très simples, nous allons tenter d'exhiber certains aspects qui peuvent aider à l'interprétation des mesures « fibres optiques ».

Cependant, les effets de température ne sont pas de même grandeur selon que la fibre est conçue pour être sollicitée transversalement ou longitudinalement.

Fonctionnement transversal

C'est le cas de la plupart des capteurs de pression noyés (ou non). La fibre peut être soit directement soumise à la température, soit sollicitée par le matériau qui se dilate. Pour la fibre optique utilisée dans de telles conditions, la température agit principalement sur les caractéristiques optiques du guide, principalement l'indice de réfraction. Les capteurs opérationnels disponibles sont généralement corrigés de la température, tout au moins dans une étendue de mesure déterminée. De ce fait, si l'on considère la première éventualité, le signal ne variera quasiment pas en fonction de la température, l'intégralité de la mesure sera donc liée aux effets mécaniques.

A *contrario*, si, par son comportement thermique, le matériau vient solliciter la fibre, le signal optique suivra cette évolution dont l'amplitude dépendra du filtrage créé par les différentes interfaces fibre-conditionnement-matériau.

Fonctionnement longitudinal

Examinons le cas d'une poutre en béton, soumise à un cycle de température, munie d'une fibre optique noyée, sensible aux déformations longitudinales. On suppose que les variations de température sont très lentes et homogènes de façon à éviter les effets de gradient. On suppose également que le capteur à fibre optique est lui-même corrigé de façon intrinsèque des effets de température. Cela signifie que le capteur placé dans une chambre climatique contrôlée possède une référence interne ou externe qui lui permet de délivrer un signal constant lorsque la température varie.

Une fois noyé dans le béton (fig.13), le cœur de fibre va subir deux actions sous l'action de la température, d'une part, une dilatation propre et, d'autre part, un entraînement lié à la dilatation du béton, mais filtré par le conditionnement de la fibre optique. À la température T_0 , l'extrémité du cœur de fibre se trouve en I_0 . À $T_1 > T_0$, l'extrémité du cœur de fibre devrait se trouver en I_1 , si le capteur n'était pas entraîné par le matériau. En réalité, il s'allonge jusqu'à I_2 . Le capteur va donc détecter l'allongement $(I_2 - I_1)$. Ceci est dû au fait que les deux matériaux béton/silice n'ont pas le même coefficient de dilatation (partie hachurée de la figure 13). L'un est de $10.10^{-6}/^{\circ}\text{C}/\text{m}$ et l'autre de $4,7.10^{-6}/^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

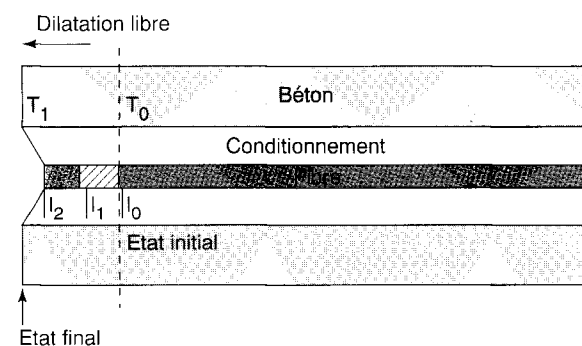


Fig. 13 - Dilatation différentielle entre l'élément sensible du capteur et le matériau.

Comme il est montré sur la figure 13, la sensibilité à la température du capteur noyé va dépendre principalement du comportement thermique et mécanique de la structure du conditionnement, les autres paramètres étant, par ailleurs, maîtrisés. Maintenant, si parallèlement à la température, le corps d'épreuve est soumis à une sollicitation mécanique, la mesure globale délivrée par la fibre prendra en compte les deux effets. Ce qui veut dire que, sans données complémentaires,

l'interprétation peut devenir très rapidement complexe. La solution qui consiste à mettre en parallèle une éprouvette témoin instrumentée avec le même type de capteur, soumise aux effets thermiques mais non soumise aux effets mécaniques, permet de lever les indéterminations. Cette possibilité n'est pas toujours applicable sur site pour des raisons pratiques.

Il existe également des montages mécaniques où une fibre de référence associée à une fibre « capteur » va pouvoir se déformer librement indépendamment de la fibre de mesure et permettre ainsi d'effectuer les corrections nécessaires. C'est le cas, notamment, pour la compensation des capteurs de type Fabry-Pérot. Néanmoins, les problèmes d'interfaces et de conditions d'implantation restent voisins de ceux rencontrés avec les autres types de capteur.

On pourrait évidemment transposer l'analyse qui vient d'être faite au phénomène de fluage.

Comparaison fibres optiques/témoins sonores

Plaçons-nous dans le cas de l'extensométrie classique réalisée sur ouvrage au moyen de témoins sonores et comparons les réponses de deux systèmes en fonction du comportement thermomécanique du matériau.

Un témoin sonore est conçu pour fournir un signal proportionnel à la tension de la corde. Lorsque la corde et son conditionnement métallique se dilatent en fonction de la température, les coefficients de dilatation étant les mêmes, la tension reste constante ; le signal délivré est alors constant. Si, maintenant, cette corde est placée dans un matériau de même coefficient de dilatation et si la dilatation se fait librement, la corde fournira encore un signal constant (cas du béton). Si, maintenant, la dilatation est gênée par la présence d'une précontrainte ou d'un gradient de température au sein du corps d'épreuve, le signal « corde » correspondra à la déformation différentielle entre la corde et le matériau.

Une réflexion analogue faite pour les fibres optiques ne conduit pas nécessairement aux mêmes conclusions. Le principe et le conditionnement du capteur interviennent dans la réponse de l'ensemble, même si globalement la fibre qui répond également à une variation de tension se comporte à peu près de façon analogue à une corde vibrante.

Les différences sont dues essentiellement à deux facteurs, d'une part, l'inégalité des coefficients de dilatation silice-interfaces-matériau et, d'autre part, le type de mesure lié au conditionnement de la fibre. Le tableau II récapitule succinctement les situations pour deux sortes de conditionnement de fibre.

En résumé, l'exemple des fibres optiques qui peut se généraliser à un grand nombre de capteurs, dès que ces derniers fonctionnent dans leur milieu d'emploi, montre, d'une part, l'importance que jouent les interfaces sur la mesure et d'autre part, la nécessité de disposer d'un minimum d'informations sur la conception des capteurs pour les prendre en compte dans l'interprétation des mesures.

Conclusion

Bien que les applications soient pour le moment relativement limitées, l'intérêt d'utiliser les capteurs à fibres optiques en génie civil tient à leurs particularités. En premier lieu, l'introduction de l'élément sensible dans le milieu à contrôler constitue un véritable « nerf du matériau », avec un certain nombre de propriétés (légèreté, peu de perturbations liées à la présence du capteur, insensibilité aux parasites électromagnétiques, réponse en temps réel, capteur et liaison de transmission confondus, etc.). Ensuite, la mesure répartie qui offre une information plus globale traduit un comportement d'ensemble.

Enfin, les possibilités respectivement, d'interrogation des fibres optiques par simple connexion de l'optoélectronique associée, de mise en réseau des capteurs et de multiplexage, de transmission à distance, représentent pour un utilisateur des facilités d'emploi incontestables et l'apport d'une technologie performante. Néanmoins, l'usage de tels outils à des fins quantitatives, nécessite des conditions d'emploi maîtrisées, des modèles d'exploitation et la prise en compte des interfaces « capteur-environnement ».

Les études prospectives sur le sujet, tant nationales qu'internationales, convergent vers la surveillance contrôlée des matériaux et structures, comme axe prévisible de développement. Dans ce contexte, où les besoins d'instrumentation vont très certainement croître, les fibres optiques disposent d'atouts qu'il y a lieu d'exploiter.

TABLEAU II
Comparaison capteur à fibres optiques - cordes vibrantes

Capteur	Condition de déformation	Évolution du signal
Corde vibrante seule	Dilatation libre	Non, car les coefficients de dilatation entre la corde et son conditionnement sont identiques
Corde vibrante noyée dans du béton (suite)	Dilatation libre	Oui légèrement, car les coefficients de dilatation capteur/béton sont très voisins. Le signal traduit la différence des deux comportements
	Dilatation ou déformation gênée (effet mécanique ou gradient de température)	Oui, car développement de contraintes forcées, signal filtré par l'interface capteur/béton (facteur d'inclusion/rigidités)
	Déformation sous sollicitation à Θ constant	Oui : signal filtré par l'interface capteur/béton (facteur d'inclusion/rigidités respectives)
Extensomètre à fibre optique microcourbée seul	Dilatation libre	Non, car les microcourbures de la fibre ne sont pas affectées par sa propre dilatation
Extensomètre à fibre optique microcourbée noyé dans le béton	Dilatation libre	Oui, car différence de comportement thermomécanique entre la fibre et son conditionnement et le matériau
	Dilatation ou déformation gênée (effet mécanique ou gradient de température)	Oui, mais différence de réponse avec le cas précédent car développement de contraintes forcées
	Déformation sous sollicitation à Θ constant	Oui : signal filtré par l'interface capteur/conditionnement/béton (facteur d'inclusion/rigidités respectives)
Extensomètre à Réseaux de Bragg seul	Dilatation libre	Oui, en l'absence de correction, car mesure l'allongement absolu entâché éventuellement d'une erreur liée à la variation d'indice de réfraction de la fibre sous l'action de la température
Extensomètre à Réseaux de Bragg noyé dans le béton	Dilatation libre	Oui, car mesure un allongement absolu signal filtré par l'interface capteur/conditionnement/béton (facteur d'inclusion/rigidités respectives) nécessité d'une correction en température du capteur
	Dilatation ou déformation gênée (effet mécanique ou gradient de température)	Oui, mais allongement absolu mesuré différent du précédent car conjugue les effets du développement de contraintes forcées et le comportement des interfaces capteur/matériau
	Déformation sous sollicitation à Θ constant	Oui : signal filtré par l'interface capteur/conditionnement/béton (facteur d'inclusion/rigidités)

Remerciements

Les études sur les capteurs à fibres optiques et leurs applications sont menées au sein du réseau des LPC dans le cadre de collaborations à la fois :

- *internes :*

LCPC (Métrologie-instrumentation et Ouvrages d'art) - LRPC de Strasbourg - CCT Trappes

- *et externes :*

Société Freyssinet international et Société Alcatel-CIT.

Nous tenons à remercier très sincèrement tous les acteurs impliqués dans ces différents projets qui par l'information qu'ils ont apportée, ont permis la rédaction de cet article.

- [1] ROSSI P., LE MAOU F. (1986), Le contrôle des fissurations, *La Revue des laboratoires d'essais*, juin, pp. 25-27.
- [2] ARDITTY H.J., DAKIN J.P., KERSTEN (1989), Optical Fiber Sensors, Proceedings in Physics, **Vol. 44**, Springer-Verlag Berlin.
- [3] WOLF R., MIESSELER H.-J. (1992), *Monitoring of Prestressed Concrete Structures with Optical Fiber Sensors*, SPIE, **Vol. 1777**, pp. 23-29.
- [4] BESNIER P. (1992), *Synthèse sur les applications des capteurs à fibres optiques*, Rapport du ministère de l'Industrie.
- [5] UDD E. (1992), *Fiber optic sensors*, SPIE, Optical Engineering Press, **Vol. CR44**.
- [6] CHABERT A., CAUSSIGNAC J.-M., MOREL G., ROGEZ P., SEANTIER J. (1992), *Bearings of a bridge fitted with load measuring devices based on an optical fiber technology*, First European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow 1992, Proceedings pp. 207-210, EOS/SPIE and IOP Publishing Ltd.
- [7] FERDINAND P. (1993), La Surveillance des structures par fibres optiques, *Opto*, **70**, janvier-février, pp. 26-36.
- [8] SHIMAZU A., NAEMURA S. (1993), Nouveaux instruments de mesure pour les terrassements routiers, *AIPCR, Bulletin Routes, Roads*, **281**, décembre.
- [9] MOREAU H., GUILLARD Y. (1994), *Application des capteurs à fibre optique aux structures en béton*, Journées Sciences de l'ingénieur du réseau des LPC, **Vol. 1**, octobre, pp. 351-358
- [10] FERDINAND P. (1994), *Mine operating accurate stability control with optical fiber sensing and Bragg grating technology*, SPIE Proceedings of the 10th Optical Fiber Sensors Conference, **Vol. 2360**, pp. 162-166, septembre, Edit. Culshaw/Jones.
- [11] UDD E. (1995), *Fiber optic smart structures*, Joseph W. Goodmann series editor.
- [12] *Chemical, Biochemical, and Environmental Fiber Sensors VIII*, SPIE Proceedings, **Vol. 2836**, 1996, Edit. : Liberman R.A.
- [13] BETTEN E., CAUSSIGNAC J.-M., TERAL S., SIFFERT M. (1995), *Optical sensor system for Weigh-In-Motion and vehicle classification by photoelastic effect*, First european conference on Weigh-In-Motion of road vehicles, ETH Zürich, mars.
- [14] BARBACHI M. (1996), *Comportement de capteurs à fibres optiques noyés dans un matériau diversément sollicité*, Études et Recherches des LPC, série Sciences de l'ingénieur, **S14**, novembre.
- [15] VULLIET L., CASANOVA N., INAUDI D., OSA-WYSER A., VURPILLOT S. (1997), *Development of fiber optic extensometers*, ISSMGE 97, Congrès de mécanique des sols, Hambourg.
- [16] QUIRION M., BALLIVY G., CHOQUET P., NGUYEN D. (1998), *Behaviour of embedded fiber optic strain gauge in concrete: experimental and numerical simulations*, International Symposium on High-Performance and reactive powder concretes, Université de Sherbrooke, Québec, 16-20 août.

ABSTRACT

Optical fibres: a new technique for civil engineering?

J.-M. CAUSSIGNAC, A. CHABERT, F. RENAUDIN

Requirements for high quality instrumentation change rapidly, and new concepts are appearing such as « smart sensors », « instrumentation within materials » and « nanotechnologies ». The very concept of measurement, in the mind of today's user, no longer applies to just obtaining values from one or more sensors but includes the acquisition, processing, transmission and exploitation of the measured quantity.

Access to « digested » information providing a good representation of the investigated property has therefore become a requirement which new tools coming onto the market must meet. Such tools therefore consist of a complete system providing the level of service required by the application. As regards such new technologies, on the basis of encouraging results obtained from a number of pilot studies, civil engineers are placing a great deal of hope in fibre optic sensors. This paper provides an account of the state of the art, the problems that have been encountered and possible applications.