



**TECHNIQUES  
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **R6735 V1**

# Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg

Date de publication :  
**10 décembre 1999**

Cet article est issu de : **Mesures - Analyses | Contrôle non destructif**

par **Pierre FERDINAND**

**Pour toute question :**  
Service Relation clientèle  
Techniques de l'Ingénieur  
Immeuble Pleyad 1  
39, boulevard Ornano  
93288 Saint-Denis Cedex

**Par mail :**  
infos.clients@teching.com  
**Par téléphone :**  
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **18/08/2016**  
Pour le compte : **7200034507 - ustl // 134.206.236.106**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

# Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg

par **Pierre FERDINAND**

*Docteur d'État ès sciences*

*Chef de laboratoire au Leti (CEA-Technologies Avancées)*

*Centre d'études de Saclay*

<b>1. Principales caractéristiques des fibres optiques</b> .....	R 6 735	- 3
<b>2. Réseaux de Bragg en optique guidée</b> .....	—	3
2.1 Notion de couplage de modes.....	—	3
2.2 Réseaux de Bragg photo-inscrits.....	—	4
2.3 Transducteurs à réseau de Bragg.....	—	5
2.3.1 Réponse du réseau à une variation de température.....	—	5
2.3.2 Réponse du réseau à des déformations.....	—	6
2.3.3 Réponse du réseau à une déformation longitudinale.....	—	6
2.3.4 Réponse du réseau à une variation de pression.....	—	6
2.3.5 Sélectivité des mesures.....	—	7
2.4 Procédés d'inscription des réseaux de Bragg dans les fibres optiques. Photosensibilité.....	—	7
2.4.1 Procédé holographique transverse.....	—	7
2.4.2 Procédé du masque de phase.....	—	7
2.4.3 Inscription en ligne sur la tour de fibrage.....	—	8
2.5 Composants et dispositifs à réseaux de Bragg.....	—	8
2.5.1 Réseaux à pas variable « chirpés ».....	—	8
2.5.2 Réseaux de Moiré.....	—	9
2.5.3 Interféromètres de Fabry-Perot.....	—	9
2.5.4 Rosettes de jauges de déformations.....	—	9
2.5.5 Réseaux à saut de phase.....	—	9
2.5.6 Réseaux « longue période ».....	—	10
2.5.7 Injecteurs/extracteurs de longueur d'onde.....	—	10
<b>3. Techniques de mesure et de démultiplexage</b> .....	—	10
3.1 Démultiplexage par balayage spectral.....	—	11
3.2 Démultiplexage dynamique.....	—	12
3.2.1 Méthode de discrimination par filtrage linéaire.....	—	12
3.2.2 Méthode du filtre de poursuite.....	—	13
<b>4. Principaux domaines d'application</b> .....	—	13
4.1 Surveillance des structures et contrôle santé des matériaux.....	—	13
4.1.1 Domaine minier et géologique.....	—	15
4.1.2 Structures du Génie civil.....	—	16
4.1.3 Travaux publics souterrains.....	—	17
4.1.4 Matériaux composites.....	—	17
4.2 Autres applications industrielles particulières.....	—	21
4.2.1 Industrie du nucléaire civil.....	—	21
4.2.2 Domaines thermiques extrêmes.....	—	23
<b>5. Conclusion et perspectives</b> .....	—	23
<b>Pour en savoir plus</b> .....	Doc. R 6 735	

**L**a silice, de par de son exceptionnelle résistance à la cristallisation et à la corrosion, présente toutes les vertus pour remplir bon nombre de fonctions optiques du visible au proche IR. De nos jours, les fibres optiques en silice sont largement utilisées dans le domaine des télécommunications et il est devenu presque banal de rappeler l'utilisation massive de ce support de transmission, depuis le réseau local jusqu'aux liaisons intercontinentales. Or, depuis plus de vingt ans, on sait que les fibres optiques peuvent également jouer le rôle d'excellents transducteurs de mesure.

En fait, c'est en cherchant à immuniser les transmissions de données de l'influence de l'environnement qu'apparut l'idée d'employer les fibres optiques comme éléments transducteurs. En effet, si l'environnement (champs électromagnétiques, contraintes...) ne perturbe pas ou peu l'information codée en intensité que la fibre transmet (cas des transmissions numériques codées en 0 ou 1), par contre, celui-ci influe sur d'autres paramètres de l'onde optique tels que de la phase, l'Etat de Polarisation (EdP), etc. Après cette constatation, les développements consacrés aux capteurs à fibres optiques (CFO) débutèrent.

Cependant, bien que les premiers CFO soient apparus au cours des années 70, la prise de conscience de toutes leurs potentialités ne date réellement que du début de la décennie suivante. A cette époque, après des efforts de recherche et développement (R&D) majoritairement consacrés au gyroscope jusque vers 1985, on a pu observer un partage des activités entre plusieurs types de grandeurs (température, pression, rotation, intensité et tension électrique, dose de rayonnements, déplacements/déformations...).

Après vingt ans de recherche et développement, les CFO offrent désormais les mêmes fonctions que les capteurs classiques : mesure, contrôle, détection-alarme, surveillance, tout en présentant des spécificités liées à celles des fibres : faible encombrement et masse réduite, grande bande passante et faible atténuation, immunité aux parasites électromagnétiques, bonne résistance aux effets des rayonnements ionisants, possibilité de multiplexage de nombreux capteurs et de déport important des points de mesure...

Tout cela confère à cette instrumentation des avantages déterminants vis-à-vis des autres technologies de capteurs : faible intrusivité, possibilité d'utilisation en environnements sévères... et bien sûr d'excellentes performances métrologiques en termes de sensibilité, temps de réponse, plage d'utilisation... Par ailleurs – et c'est sans doute leur intérêt majeur –, ces capteurs offrent de nouvelles fonctionnalités sans équivalent : mesure intégrée, différentielle, distribuée, répartie, en réseau. Il faut savoir que la mise en réseau de nombreux CFO (les RCFO – réseaux de capteurs à fibres optiques –) permet, d'une part, de réduire le coût du point de mesure par la mise en commun du système d'interrogation, et d'autre part de fournir, à l'utilisateur, les données relatives à chaque capteur sous une forme homogène.

Les différentes topologies d'interconnexion des points de mesure incluent les **capteurs « répartis »** où la fibre joue le rôle d'élément « continu » sensible, les **capteurs « distribués »** formés de points de mesures le long de la fibre et les **structures de réseaux RCFO** dont les architectures sont multiples. Les systèmes d'interrogation et de démultiplexage (partie optoélectronique de gestion du réseau de mesure) de ces différentes approches ont fait l'objet de développements croissants ces dernières années et certains produits sont déjà commercialisés.

Aujourd'hui, les projets tant de développement qu'applicatifs sont tirés par les besoins utilisateurs : mesures de température, de pression, et de plus en plus de déformations, du fait des demandes croissantes en **surveillance des structures**, avec un très fort engouement pour les capteurs et les réseaux de mesure fondés sur les **transducteurs à « réseaux de Bragg »**, objet de cette présentation. Il faut dire que les enjeux économiques (gains de maintenance, sécurité des biens et des personnes...) des applications (ouvrages d'art, matériaux composites, structures métalliques, en béton, sous-sols, terrains...) justifient les efforts qui leur sont consacrés.

# 1. Principales caractéristiques des fibres optiques

On connaît de longue date la faculté du verre (et de la silice) à être étiré en fils minces et homogènes. Afin de guider convenablement la lumière, la fibre optique se compose en réalité d'un **cœur** entouré d'une **gaine** optique dont les indices de réfraction sont légèrement différents ( $\Delta n = n_c - n_g$  représente la différence d'indice cœur/gaine et  $\bar{n} = (n_c + n_g)/2$  est l'indice moyen dans le guide), le tout étant entouré d'une ou plusieurs gaines de protection lui conférant de bonnes propriétés mécaniques. Le guidage de la lumière dans ce milieu cylindrique fonctionne sur le principe de la propagation par réflexions totales successives le long de l'interface cœur/gaine optique, et ce en vertu de la loi de Descartes sur la réflexion totale. Cependant, tous les rayons parvenant à l'entrée de la fibre ne peuvent y pénétrer. Seuls ceux qui sont assez proches de son axe y parviennent. En fait, on détermine un cône d'acceptance, par symétrie autour de cet axe, et les seuls rayons qui y sont inclus peuvent se propager dans la fibre (figure 1). On définit ainsi l'**ouverture numérique** ON comme l'arc sinus du demi-angle de ce cône, soit :

$$\begin{aligned} \text{ON} &= n_0 \sin \theta = n_c \cos i_{\text{lim}} = n_c \sqrt{1 - \sin^2 i_{\text{lim}}} \\ &= n_c \sqrt{1 - \left(\frac{n_g}{n_c}\right)^2} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} = \sqrt{2\bar{n} \Delta n} \end{aligned}$$

On distingue deux grands types de fibres optiques : les **monomodes** (ou **unimodales**) et les **multimodes** (ou **multimodales**). Dans la première catégorie, le rayon « *a* » du cœur est de l'ordre de 5  $\mu\text{m}$  et l'énergie est transportée par un seul mode de propagation (le mode fondamental). En revanche, pour le second type de fibre, le rayon du cœur vaut typiquement dix fois plus (il est donc beaucoup plus grand que les longueurs d'onde dans le visible - proche IR) et l'énergie s'y répartit entre de nombreux modes. Pour distinguer ces deux types de guide, on introduit le paramètre *V*, appelé **fréquence normalisée** défini par :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \text{ON}$$

avec  $\lambda$  longueur d'onde du rayonnement.

La fibre est monomode lorsque  $V < 2,405$  ; au-delà, le nombre de modes de propagation est approximativement  $V^2/2$ . Il faut savoir que de nos jours la quasi totalité des transmissions sur fibres optiques s'effectuent sur guides monomodes, du fait de leurs incompatibles caractéristiques (portées chiffrées en dizaines de kilomètres, débits de plusieurs dizaines de Gbits...).

L'**atténuation** spectrale est un autre paramètre important de la fibre puisqu'elle caractérise sa capacité à transporter à une certaine distance les ondes optiques... sans trop les atténuer. En effet, les modes en propagation guidée sont sujets à de nombreux types de pertes : connexions ou épissures entre fibres, absorption due aux impuretés ou aux imperfections géométriques du guide, diffusion de Rayleigh due à la non-uniformité de l'indice... Pour caractériser la contribution globale de ces pertes, on introduit le paramètre  $\alpha$  (en dB/km) représentant l'atténuation en puissance par unité de longueur de fibre :

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \left( \frac{P(L)}{P(0)} \right)$$

avec  $P(0)$  et  $P(L)$  respectivement la puissance à l'entrée et celle à la sortie de la fibre de longueur *L*.

Fort heureusement, grâce au procédé industriel dénommé MCVD (*Modified Chemical Vapor Deposition*), on réalise actuellement des fibres en silice dont l'atténuation ( $\sim 0,2$  dB/km à 1,55  $\mu\text{m}$ ) est très proche de la limite théorique (0,18 dB/km imposée par la diffusion

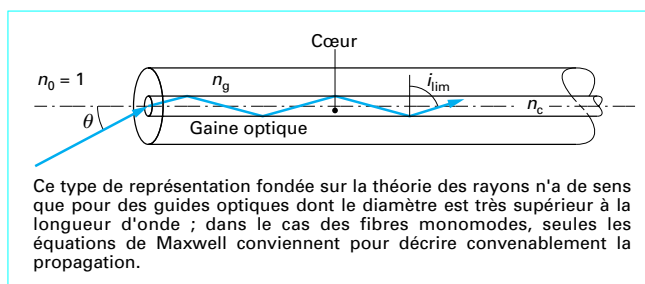


Figure 1 – Propagation des rayons lumineux dans une fibre optique multimode, d'après [1]

de Rayleigh), permettant la transmission de données sur 50 km à 100 km sans répéteur ni amplificateur.

Enfin, une fibre peut être caractérisée par sa **dispersion**. Ce paramètre est une donnée incontournable lorsque l'on s'intéresse à la propagation d'impulsions (cas des transmissions numériques). Il détermine leur élargissement, donc conditionne la bande passante maximale de la transmission. Il en existe deux types : la dispersion « intermodale », due au fait que deux modes de propagation différents ne parcourent pas le même chemin optique (elle est donc exclusivement observée dans les fibres multimodes) et la dispersion « chromatique » provenant principalement de la dépendance spectrale des indices de réfraction du matériau (les modes se déplacent d'autant plus vite que leur fréquence est élevée) et dans une moindre mesure du guide lui-même.

Pour certaines fibres dont la distribution radiale de l'indice dans le cœur est de forme parabolique (fibres à « gradient d'indice »), on peut réduire la dispersion intermodale (en jouant sur le profil d'indice) jusqu'à quelques dizaines de ps/km dans la bande spectrale autour de 1,55  $\mu\text{m}$  ; par comparaison, elle vaut typiquement 20 ns/km à 850 nm pour une fibre à saut d'indice (la valeur de l'indice est constante dans tout le cœur). Quant à la dispersion chromatique, seule contribution dans les fibres monomodes, une valeur caractéristique est typiquement 80 ps/(nm/km) à 850 nm. Or, si la dispersion du guide est en général faible, elle est de signe opposé à celle du matériau pour des longueurs d'onde supérieures à 1,3  $\mu\text{m}$ . Ainsi la dispersion chromatique peut être pratiquement annulée au-delà de cette longueur d'onde et on peut même décaler cette zone de très faible dispersion jusque vers 1,55  $\mu\text{m}$  (*Dispersion shifted fibers*) en modifiant le profil d'indice : 17 ps/(nm/km) est une valeur typique de nos jours à 1,55  $\mu\text{m}$ . Cela explique le choix, pour les télécommunications, des fenêtres spectrales autour des longueurs d'onde 1,3  $\mu\text{m}$  et surtout 1,55  $\mu\text{m}$ , cette dernière étant particulièrement intéressante puisque l'atténuation des fibres en silice y est également minimale.

## 2. Réseaux de Bragg en optique guidée

### 2.1 Notion de couplage de modes

Lorsque l'on considère une fibre optique idéale, la lumière s'y propage suivant différents modes de propagation orthogonaux ; il ne peut y avoir couplage direct entre eux : ce sont les modes propres du guide. Dans une fibre réelle, par contre, un couplage intermodal peut avoir lieu, car aucune fibre, du fait des contraintes technologiques de fabrication, ne possède une géométrie parfaitement cylindrique et son indice de réfraction n'est jamais tout à fait constant longitudinalement. Il s'agit alors d'un couplage « assisté »

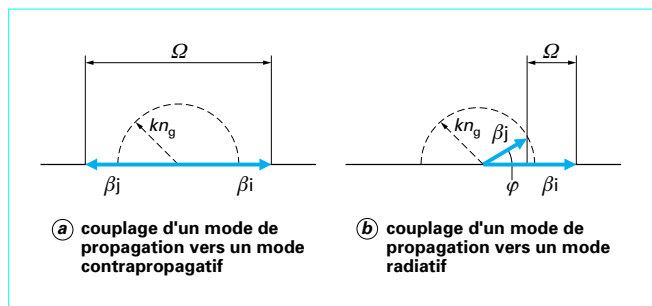


Figure 2 – Couplages de modes dans une fibre optique

par les perturbations du guide : fluctuations d'indice, de diamètre... C'est, comme nous le verrons au prochain paragraphe (§ 2.2), cette variation longitudinale de l'indice qui est mise à profit pour réaliser les réseaux de Bragg. Dans une fibre unimodale, le couplage d'une partie de l'énergie du mode guidé vers un mode radiatif se traduit par une simple atténuation. Ce n'est cependant pas la seule possibilité de transfert énergétique au sein du guide, il peut y avoir couplage avec les modes rétrodiffusés (vers l'arrière), conséquence de la diffusion de la lumière sur les non-uniformités microscopiques de l'interface cœur/gaine et de l'indice de réfraction (la rétrodiffusion de Rayleigh). Or, il se trouve que le couplage entre ces modes contrapropagatifs peut être considérablement accru par une variation périodique induite de l'indice de réfraction, c'est-à-dire par l'intermédiaire d'une structure non uniforme.

Classiquement, si la période spatiale de ces variations est  $\Lambda$ , le nombre d'onde associé vaut  $\Omega = 2\pi/\Lambda$  et pour coupler deux modes  $i$  et  $j$  entre eux,  $\Omega$  doit être égal à la différence de leur constante de propagation, c'est-à-dire :

$$|\beta_i - \beta_j| = \Omega$$

avec comme définition :

$$\beta_i = 2\pi n_i/\lambda$$

Lorsque ces deux modes se propagent dans des sens opposés, on écrit  $\beta_i + \beta_j = \Omega$  du fait que  $\beta_j = -\beta_i$ . Si le couplage a lieu entre des modes guidés, les relations ci-dessus ne sont valables que pour des valeurs discrètes de  $\Omega$ . A contrario, le couplage vers les modes radiatifs est moins strict puisqu'ils forment un continuum. La figure 2 illustre deux cas particuliers de couplage de modes qui vont nous intéresser pour les réseaux de Bragg. Il s'agit du couplage d'un mode de propagation a) vers un mode contrapropagatif et b) vers un mode radiatif (cf. § 2.5.6).

En ce qui concerne le couplage entre modes guidés contrapropagatifs, la condition de couplage est donc  $\beta_i + \beta_j = \Omega$ . En remplaçant ces trois termes par leur définition, on obtient aisément  $\lambda = 2 n_e \Lambda$ , avec  $n_e$  indice effectif du guide pour le mode considéré.

Cette relation définit la longueur d'onde  $\lambda$  à laquelle a lieu le couplage pour  $\Lambda$  une période spatiale de « fluctuation » donnée. Dans le cas du couplage vers un mode radiatif, l'expression illustrée figure 2b devient

$$k n_g \cos \varphi = \beta_i - \Omega$$

avec  $k = 2\pi/\lambda$  vecteur d'onde  
d'où l'on tire

$$\lambda = (n_g \cos \varphi - n_e) \Lambda$$

## 2.2 Réseaux de Bragg photo-inscrits

Un réseau de Bragg dans une fibre (*Fiber Bragg Grating* FBG) dans la littérature scientifique anglo-saxonne) consiste donc en une

structure périodique formée par une modulation de l'indice de réfraction du cœur, structure qui – nous allons le voir – se comporte pratiquement comme un miroir pour une bande spectrale très fine autour d'une longueur d'onde caractéristique  $\lambda_B$  (longueur d'onde pour laquelle il y a accord de phase entre les multiples réflexions au sein du réseau) et reste transparente pour toutes les autres (les multiples ondes réfléchies à ces autres longueurs d'onde n'étant pas en phase, elles interfèrent destructivement et sont donc transmises du fait de la conservation de l'énergie). Cette longueur d'onde caractéristique, appelée longueur d'onde de Bragg, est définie comme au paragraphe précédent (§ 2.1) par :

$$\lambda_B = 2 n_e \Lambda$$

avec  $\Lambda$  pas du réseau d'indice (figure 3 et figure 4).

Historiquement, l'inscription de réseaux de Bragg, formant des réflecteurs sélectifs en longueur d'onde et localisés à même le cœur d'une fibre, a été initialement proposée en 1978 par K.O. Hill du CRC (*Communication Research Center* à Ottawa-Canada) [6] et reprise, tout d'abord, par l'équipe de G. Meltz et W.W. Morey à l'UTRC (*United Technology Research Center-USA*), qui publia pour la première fois en 1989 [7], puis par plusieurs autres laboratoires ces dernières années dont en France : le CNET Lannion, l'Université de Lille, HighWave Optical Technologies, Photonics et Alcatel Corporate Research Center (pour les télécoms) ; le CEA-Leti Saclay (dans le domaine des capteurs) et dans les pays anglo-saxons Southampton University, Aston University, British Telecom, Lucent, 3M, Innovative Fibers, Kromafibre, IONAS..., sans oublier l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne en Suisse). Les méthodes d'inscription actuelles, dites « transverses », utilisées par toutes ces équipes, sont extrêmement efficaces : elles permettent de créer (grâce à un laser UV émettant à 193 nm ou vers 244 nm) des réseaux fonctionnant à n'importe quelle longueur d'onde (cf. § 2.4) et suivant tout type de distribution spatiale d'indice, a contrario de la première approche « longitudinale » de K.O. Hill (interférences dues aux ondes stationnaires produites par deux faisceaux se propageant en sens opposés dans la fibre) qui ne permettait d'inscrire des réseaux qu'à la longueur d'onde du laser argon utilisé, soit 488 nm. Par ailleurs, on peut remarquer que cette dernière longueur d'onde correspond à un processus d'inscription à « deux photons », ce qui explique son efficacité réduite par rapport au processus à « un photon » dont il est question à 244 nm [8].

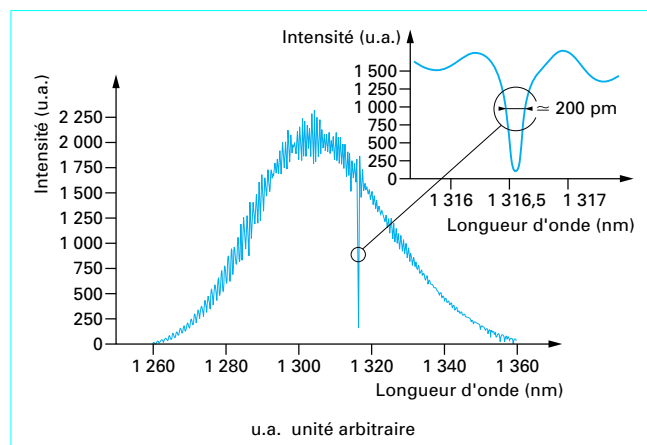


Figure 3 – Illustration de l'effet d'un filtre à réseau de Bragg sur le spectre d'une source large bande (Diode Super Luminescente) après propagation dans une fibre optique contenant un réseau de Bragg ( $\lambda \approx 1316,5$  nm)

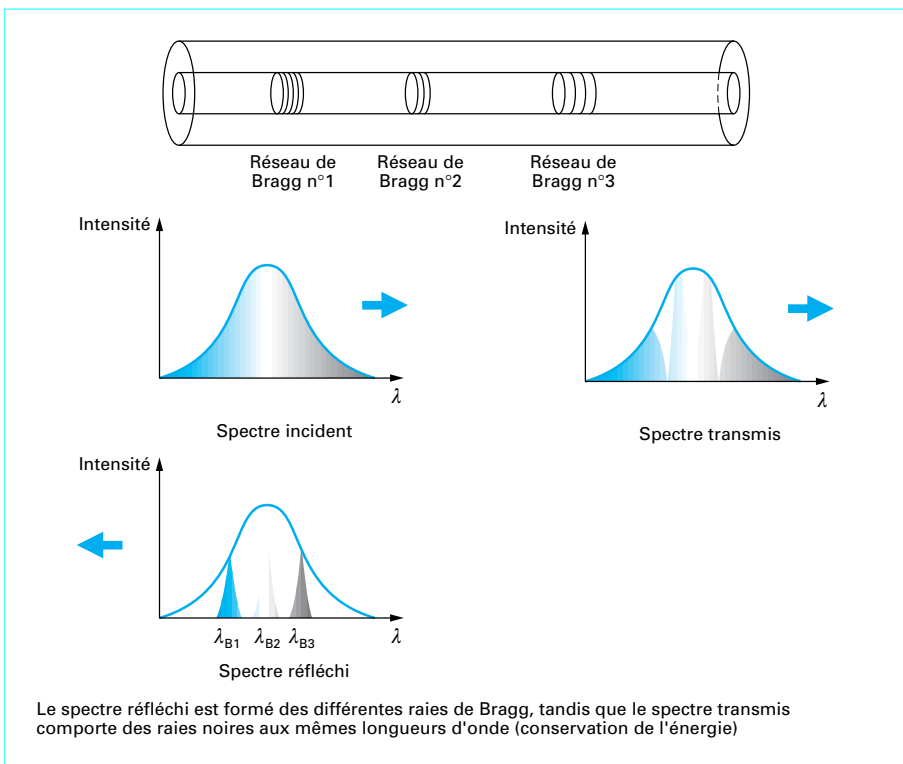


Figure 4 – Filtrage du spectre d'une source large par une succession de réseaux de Bragg

Les caractéristiques finales d'un réseau de Bragg dépendent des paramètres d'inscription comme le type de laser (longueur d'onde, régime de fonctionnement) et la puissance utilisée, la longueur  $L$  sur laquelle il est inscrit, l'indice effectif  $n_e$  de la fibre, l'amplitude de la modulation d'indice  $\Delta n$ , ou encore la période  $\Lambda$  (« pas » du réseau) de cette variation d'indice. Ces paramètres fixent les grandeurs caractéristiques des réseaux, à savoir : la longueur d'onde de Bragg  $\lambda_B$ , la réflectivité  $R_{max}$  à  $\lambda_B$  et la largeur à mi-hauteur du pic, ainsi que sa propension à supporter des températures élevées (cf. § 4.2.2) ou de forts allongements, ce qui est un aspect important pour leur utilisation en tant que transducteurs [9, 71].

### 2.3 Transducteurs à réseau de Bragg

Compte tenu de la relation de Bragg caractérisant un réseau (cf. § 2.2),  $\lambda_B$  sa longueur d'onde caractéristique dépend de la température et de l'état des contraintes ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ) appliquées à la fibre. Il est d'usage de séparer les trois contributions que sont : la température  $T$ , les allongements  $\varepsilon = \Delta L/L$  dans l'axe du guide et la pression hydrostatique  $\Delta P$ , selon :

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = a\Delta T + b\varepsilon + c\Delta P$$

avec  $a$ ,  $b$  et  $c$  coefficients dépendant des caractéristiques de la fibre et dans une moindre mesure de sa température (ils peuvent en pratique être assimilés à des constantes, indépendantes de la température, sur une gamme d'utilisation importante).

Ainsi, une mesure précise de  $\Delta\lambda_B$  (variation de  $\lambda_B$  par rapport à une référence initiale) permet de remonter à l'amplitude de la variation du phénomène inducteur. Au-delà de son simple rôle de filtre spectral, le réseau de Bragg joue donc bien celui de « transducteur » puisqu'il transforme les évolutions d'une grandeur d'influence en un décalage spectral proportionnel (figure 5).

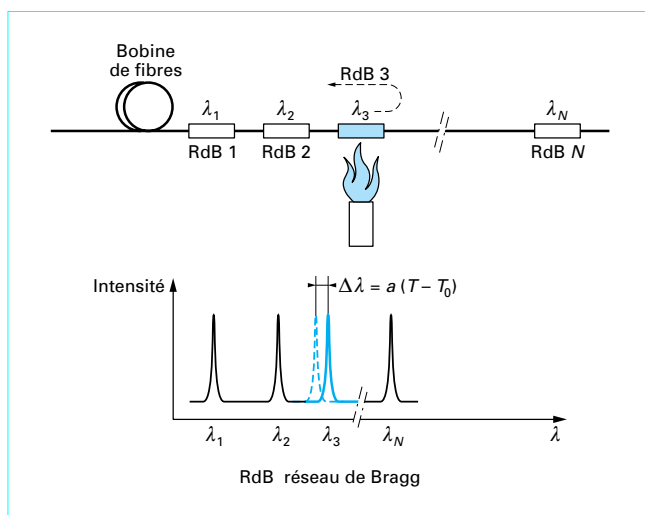


Figure 5 – Effet de la température sur la raie réfléchie par capteur contenant un réseau de Bragg photo-inscrit

#### 2.3.1 Réponse du réseau à une variation de température

Lorsqu'un réseau est soumis à une variation de température, il se dilate ou se contracte, ce qui modifie son pas. De plus, l'indice de réfraction d'un matériau dépendant également de la température,

ces deux phénomènes entraînent une variation  $\Delta\lambda_B$  de la longueur d'onde caractéristique, comme suit :

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n\Lambda)}{n\Lambda} = \left( \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \right) \Delta T = a \Delta T$$

Les termes présents dans la parenthèse font intervenir le coefficient  $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$  ( $\approx 5 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ ) de dilatation thermique au premier ordre et le coefficient thermo-optique de la silice  $dn/dT$  ( $\approx 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ). Numériquement,  $a$  vaut sensiblement  $7,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ .

### 2.3.2 Réponse du réseau à des déformations

Les contraintes sont aussi susceptibles de modifier la longueur d'onde caractéristique du réseau. Pour établir l'expression de ce décalage spectral, considérons une fibre de longueur  $L$  et de diamètre  $D = 125 \mu\text{m}$  soumise à une contrainte  $\sigma$  ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ), (figure 6).

Celle-ci entraîne une déformation  $\varepsilon$  ( $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ ) de la fibre et modifie sa longueur :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} = \varepsilon_z$$

Outre l'effet mécanique, la contrainte modifie également le diamètre de la fibre, ce qui engendre une variation de l'indice. La longueur d'onde de Bragg est donc globalement modifiée comme suit :

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n_e)\Lambda}{n_e\Lambda} = \varepsilon_z + \Delta n_e / n_e$$

Or, à l'aide de  $p_{11}$  ( $\approx 0,113$ ) et  $p_{12}$  ( $\approx 0,252$ ) les coefficients élasto-optiques de la silice,  $\Delta n_e$  s'exprime :

$$\Delta n_e = \frac{-n_e^3}{2} [p_{11}\varepsilon_r + p_{12}(\varepsilon_r + \varepsilon_z)]$$

Des expressions précédentes, on déduit la variation de la longueur d'onde de Bragg :

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \varepsilon_z - \frac{n_e^2}{2} [\varepsilon_r(p_{11} + p_{12}) + p_{12}\varepsilon_z]$$

Nous pouvons appliquer cette relation générale à tout type de contraintes subies par la fibre (traction, pression...), en utilisant la loi de Hooke tridimensionnelle reliant les contraintes aux déformations :

$$E\varepsilon_i = \sigma_i - \nu(\sigma_j + \sigma_k)$$

où  $i, j, k$  représentent les directions  $x, y, z$  (plus les deux autres permutations circulaires) et  $\sigma_i$  la contrainte dans la direction  $i$ . Pour la silice, le module d'Young  $E \approx 70 \text{ GPa}$  et le coefficient de Poisson  $\nu \approx 0,17$ . Dans les paragraphes qui suivent (§ 2.3.3 et 2.3.4), nous appliquons ces relations aux principaux paramètres d'intérêt que sont les déformations longitudinales et la pression.

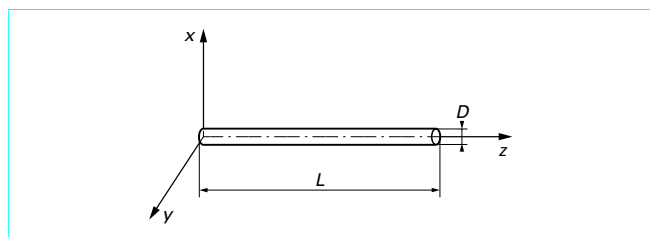


Figure 6 – Fibre optique et référentiel associé

### 2.3.3 Réponse du réseau à une déformation longitudinale

En étirant une fibre dans son domaine élastique ( $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$  de quelques pour-cent, en pratique limité à environ 1 % du fait d'une légère dégradation du niveau de contraintes à la rupture, conséquence du procédé de fabrication, cf. § 2.4) nous obtenons une variation linéaire de l'allongement du réseau et de l'indice par effet élasto-optique en fonction du chargement. Nous pouvons définir la variation de la longueur d'onde de Bragg en fonction d'un allongement en considérant que  $\sigma_x = \sigma_y = 0$ , c'est-à-dire  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_z}{E}$  et

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}. \text{ Donc :}$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left( 1 - \frac{n_e^2}{2} p_{11} - \nu(p_{11} + p_{12}) \right) \varepsilon_z = (1 - p_e) \varepsilon_z = b \varepsilon_z$$

avec  $p_e$  constante photoélastique de la silice ( $\approx 0,22$ ).  
Tous calculs faits,  $b$  vaut environ  $0,78 \times 10^{-6} / (\mu\text{m}/\text{m})$ .

### 2.3.4 Réponse du réseau à une variation de pression

La réponse spectrale de la raie de Bragg à la pression s'écrit :

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = c \Delta P$$

La valeur du coefficient  $c$  dépend du type de pression générée sur la fibre optique. Il peut être calculé à partir des relations définies en amont. Dans le cas d'une pression hydrostatique, on a :

$$P_x = P_y = P_z = -P$$

En utilisant la loi de Hooke indiquée (§ 2.3.2) plus haut, on obtient :

$$\varepsilon_r = -\frac{P}{E}(1 - 2\nu) = \varepsilon_z$$

En injectant cette expression dans la relation décrivant les dérives spectrales de  $\lambda_B$ , il vient :

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -(1 - 2\nu) \left[ 1 - \frac{n_e^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) \right] \frac{P}{E} = c \Delta P$$

Tous calculs faits,  $c$  vaut environ  $-2,87 \times 10^{-6} / \text{MPa}$ .

En résumé, les valeurs des sensibilités des réseaux de Bragg  $\Delta\lambda_B/\Delta T$ ,  $\Delta\lambda_B/\varepsilon$  et  $\Delta\lambda_B/\Delta P$  soit  $a\lambda_B$ ,  $b\lambda_B$  et  $c\lambda_B$  sont regroupées dans le tableau 1, pour les paramètres les plus importants (température, déformations et pression) et ce pour les trois principales longueurs d'onde utilisées.

Tableau 1 – Sensibilités des réseaux de Bragg aux principaux paramètres d'intérêt, pour plusieurs longueurs d'onde			
Sensibilité	$\lambda = 0,83 \mu\text{m}$	$\lambda = 1,3 \mu\text{m}$	$\lambda = 1,55 \mu\text{m}$
Sensibilité thermique ..... (pm/°C)	6,5	10,1	12,1
Sensibilité aux déformations... (pm/με)	0,65	1,01	1,21
Sensibilité à la pression hydrostatique ..... (pm/MPa)	-2,4	-3,7	-4,5

### 2.3.5 Sélectivité des mesures

Un réseau de Bragg est, comme tout transducteur, à la fois sensible aux contraintes de température, d'élongation et de pression. Lorsque ces trois perturbations s'appliquent simultanément, la longueur d'onde de Bragg se décale de la somme algébrique des trois phénomènes pris séparément (cf. § 2.3). La sensibilité en pression est faible (cf. tableau 1) et la température demeure le principal paramètre d'influence dont il convient de compenser les effets (comme pour la majorité des capteurs, quelle que soit leur technologie) puisque par exemple dans le cas des mesures de déformations, un accroissement de 1°C est équivalent à une déformation relative apparente de  $10 \mu\epsilon$  ( $= 10 \mu\text{m}/\text{m} = 10^{-5}$ ).

Pour isoler un des trois effets, par exemple les allongements, il convient de déterminer une seconde information (mathématiquement deux équations indépendantes sont nécessaires). Pour résoudre ce point, de prime importance, de nombreuses propositions ont été formulées et étudiées ces dernières années, citons-en quelques unes :

- deux réseaux de Bragg superposés mais inscrits à des longueurs d'ondes très différentes [10] [11] ;
- un réseau de Bragg standard et un autre de type longue période (cf. § 2.5.6) cascades ou superposés [12] [13] ;
- un réseau de Bragg et un interféromètre de Fabry-Perot cascades [14] [15].

Une présentation exhaustive de ces différentes approches « technologiques » a été récemment établie [25]. Soulignons la solution pragmatique consistant à recourir à une mesure différentielle. Pour cela, on utilise un second réseau de Bragg « standard » placé à proximité du premier et soumis uniquement aux grandeurs d'influence que l'on souhaite compenser (température, pression...) ; la différence entre les déplacements spectraux de ces deux réseaux fournit une mesure parfaitement compensée des effets indésirables.

## 2.4 Procédés d'inscription des réseaux de Bragg dans les fibres optiques. Photosensibilité

L'inscription d'un réseau de Bragg dans un guide d'onde (une fibre, voire un guide planaire en optique intégrée) est obtenue grâce à l'insolation du cœur du guide par une figure d'interférences (succession de franges sombres et brillantes). Celles-ci créent des zones dont l'indice effectif  $n_e$  du mode varie périodiquement avec l'interfrange  $\Lambda$  des interférences. Dans le cas des fibres optiques, il faut savoir que lors de la fabrication de la préforme, la matière est généralement dopée par l'intermédiaire de gaz porteurs de matériaux comme le germanium, le fluor, le bore, le phosphore, l'aluminium... afin, entre autres, d'ajuster le profil d'indice. La silice amorphe pure ne présente qu'une bande d'absorption dans le proche ultraviolet (UV) vers 160 nm, tandis que la silice dopée présente un pic d'absorption supplémentaire dans l'UV, proportionnel à la concentration de dopants [16].

En fait, pour inscrire un réseau de Bragg dans une fibre, on met à profit les propriétés de **photosensibilité** de la silice dopée la constituant ; c'est-à-dire la propension de la matière à subir une modification de son indice de réfraction par insolation UV, via des phénomènes mettant en jeu l'absorption due aux dopants (principalement le germanium) et la création de centres colorés ainsi qu'une certaine relaxation structurale ou « densification » des molécules ; phénomènes complexes dont le développement est hors du propos de cet article. Globalement, du fait du dopage, l'indice devient photosensible et « suit » le profil de concentration du germanium. Des fibres de silice de haute teneur en germanium ( $\approx 25$  % mol) sont un support de choix pour les réseaux de Bragg mais, par ailleurs, il est possible d'augmenter considérablement la photosen-

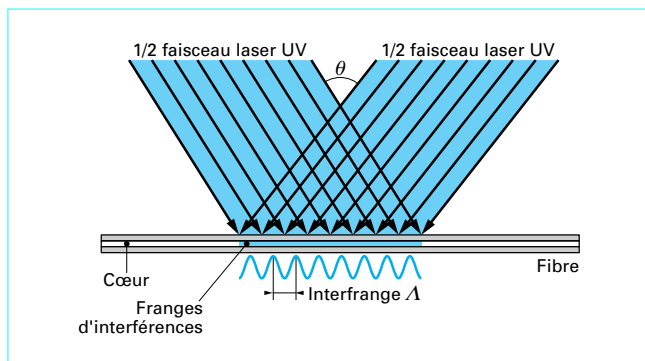


Figure 7 – Inscription d'un réseau de Bragg par la méthode holographique

sibilité d'une fibre faiblement dopée (quelques pour-cent de mole) en faisant diffuser du gaz ( $\text{H}_2$  ou  $\text{D}_2$ ) dans la fibre. Pour ce faire, il suffit de la placer dans une enceinte sous pression (typiquement 200 bar) pendant plusieurs jours. De ce simple fait, des fibres standard peu coûteuses destinées aux télécommunications et contenant seulement quelques pour-cent de  $\text{Ge}$  peuvent être utilisées et les réseaux de Bragg inscrits en quelques minutes, réduisant ainsi leur coût de fabrication. Il existe plusieurs méthodes d'inscription, mais nous ne citerons ici que les deux plus usitées, à savoir la méthode holographique et celle du masque de phase.

### 2.4.1 Procédé holographique transverse

La méthode d'inscription interférométrique, dite encore « holographique » consiste à utiliser un interféromètre à deux ondes [7]. On place la fibre dans la zone d'interférence des deux faisceaux cohérents issus de la source laser UV (de longueur d'onde  $\lambda_0$ ) fonctionnant en régime soit continu soit impulsif. La figure d'interférence est une modulation d'intensité sinusoïdale, périodique de pas  $\Lambda$ . Cette modulation est alors convertie, grâce à la photosensibilité du cœur de la fibre, en une modulation d'indice proportionnelle (figure 7). De cette manière, on inscrit un réseau de phase de pas :

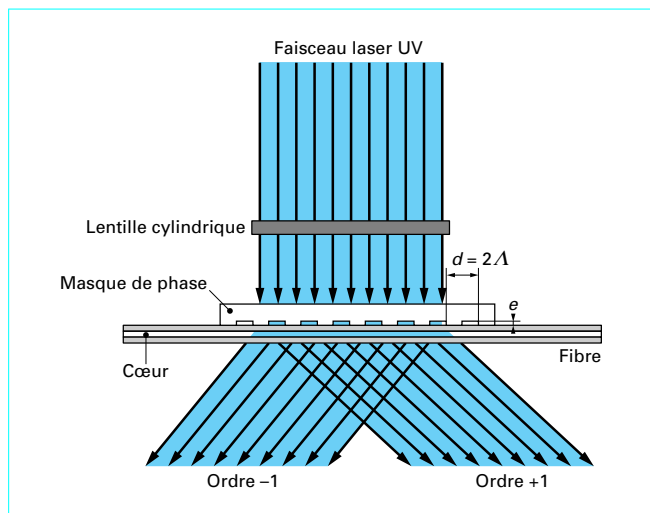
$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2 \sin \theta}$$

Cette technique très souple d'emploi est largement utilisée, car elle permet d'inscrire, en n'importe quel point de la fibre, un réseau de pas donné (et donc de longueur d'onde de Bragg choisie), simplement en ajustant l'angle d'incidence  $\theta$  des deux faisceaux UV. En pratique, pour ajuster  $\lambda_B$  à 100 pm près, la précision de pointage requise sur  $\theta$  est d'environ  $10^{-3}$  degré d'angle.

### 2.4.2 Procédé du masque de phase

La seconde méthode (également de type interférométrique) est celle du masque de phase (figure 8). C'est actuellement la technique la plus employée en production du fait de sa bonne reproductibilité et de la simplicité du montage optique. Le masque de phase est une lame à faces parallèles, réalisée selon les techniques de la micro-électronique dans un verre de silice ultrapur transparent aux UV, sur laquelle sont gravés des sillons espacés régulièrement d'une période  $d$ . Le principe consiste à placer la fibre à insoler au contact du masque selon une direction perpendiculaire aux traits de ce dernier, puis à éclairer l'ensemble à l'aide d'un faisceau UV colli-





**Figure 8 – Inscription d'un réseau de Bragg par la méthode du masque de phase**

maté en incidence normale. En traversant le masque, le faisceau UV est diffracté suivant plusieurs ordres. Or, en jouant sur la profondeur des sillons ( $e$  sur la figure 8) lors de la fabrication du masque, on arrive à concentrer l'énergie dans les ordres impairs ; on obtient ainsi jusqu'à 40 % de l'énergie dans les premiers ordres et seulement quelques pour-cent dans l'ordre zéro. Les faisceaux d'ordre +1 et -1 forment, en interférant, un système de franges qui éclaire la fibre. On inscrit ainsi un réseau de période égale à la moitié du pas du masque ( $\Lambda = d/2$ ). Cette méthode simple ne nécessite pas une source laser très cohérente, ce qui permet l'inscription de réseaux de grande longueur (100 mm par exemple). Cependant, à l'inverse de la méthode précédente, elle ne permet pas d'ajuster la longueur d'onde de Bragg puisque le pas du réseau est fixé par celui du masque. Il faut donc disposer, a priori, d'un masque de phase pour chaque longueur d'onde de Bragg, même si une légère traction appliquée sur la fibre pendant l'inscription permet d'ajuster  $\lambda_B$  à l'intérieur d'une petite plage spectrale. Cette technique est donc moins souple (et plus coûteuse que la précédente si l'on souhaite inscrire des réseaux à différentes longueurs d'onde), mais présente l'avantage d'une bonne reproductibilité intrinsèque, garantie par le pas du masque, ce qui s'avère très utile pour la production en nombre, surtout à des longueurs d'onde « normalisées » (cf. § 2.5.7 à propos de la grille spectrale « ITU » définissant un peigne de longueurs d'onde pour les télécommunications DWDM).

### 2.4.3 Inscription en ligne sur la tour de fibrage

L'intégration industrielle de l'une ou l'autre de ces deux méthodes sur l'outil de fibrage des fibres optiques (la tour de fibrage) permettra très prochainement de réaliser industriellement (c'est déjà démontré au niveau du laboratoire [17]) des réseaux inscrits « en ligne » avant enduction des gaines protectrices de la fibre. De tel réseaux seront d'un coût de production faible et de caractéristiques mécaniques améliorées dans la mesure où disparaîtront les étapes de dégainage et de regainage, indispensables avec l'inscription a posteriori dont il s'agit aux deux paragraphes précédents (§ 2.4.1 et § 2.4.2).

**Nota :** ITU : International Telecommunications Unit. Longueurs d'ondes à utiliser dans les systèmes multiplexés spectralement, d'après les documents Bellcore GR-2818-ILR, « Generic Requirements for SONET Point-to-Point Wavelength Division Multiplexing Systems in the 1 550 nm Region ».

DWDM : Dense Wavelength Division Multiplexing

## 2.5 Composants et dispositifs à réseaux de Bragg

Au-delà de son exploitation pour l'inscription des transducteurs de Bragg simples comme décrits jusqu'alors, le phénomène de photosensibilité peut aussi être mis à profit pour réaliser des dispositifs optiques plus complexes, certains à forte valeur ajoutée. On peut, par exemple, concevoir des filtres optiques large-bande en inscrivant des réseaux de réponse spectrale élargie, ou encore des filtres passe-bande... On peut aussi obtenir des interféromètres du type Fabry-Perot, en inscrivant deux réseaux identiques côte à côte jouant le rôle des miroirs de la cavité... En fait, la combinaison de réseaux de Bragg, dans des configurations du type interféromètres de Michelson [18] ou de Mach Zehnder par exemple, ouvre la voie à des dispositifs intégrés tout-fibre (pas de composants discrets ou d'optique intégrée).

Ces dernières années, toute une gamme de composants évolués fondés sur la photosensibilité des fibres en germanosilicate a donc commencé à se développer, à partir de la première application qui fut très certainement celle des lasers à fibre dans lesquels deux réseaux de Bragg sont utilisés pour fermer la cavité amplificatrice constituée d'une fibre optique dopée terre-rare. Dans cette application, les avantages apportés par les miroirs de Bragg intégrés à la fibre amplificatrice sont nombreux : forte réflectivité et bande passante fine, autoalignement de la cavité, accordabilité par action sur la longueur d'onde de Bragg des réseaux...

Cette voie de recherche très dynamique des filtres de Bragg évolués dans les fibres optiques tire profit des nombreuses possibilités offertes par le phénomène de photosensibilité ainsi que de l'interaction entre ondes guidées en fonction de la structure des réseaux (les modifications apportées dans la structure d'un réseau se répercutent sur sa réponse spectrale). De tels composants permettent d'élargir fortement le champ d'application des réseaux de Bragg aussi bien pour les besoins des télécommunications que pour ceux de l'instrumentation. Dans les sous-paragraphes qui suivent, nous citons les principaux.

### 2.5.1 Réseaux à pas variable « chirpés »

Ils présentent un pas de modulation d'indice continûment variable (*Chirped Grating*) [19]. Leur structure n'étant pas rigoureusement périodique (le pas de la modulation d'indice augmente, par exemple, continûment d'un bord du réseau à l'autre), leur réponse spectrale est élargie, ce qui permet de réaliser des filtres large-bande jusqu'à plusieurs dizaines de nanomètres. En effet, cette variation continue du pas du réseau entraîne un étalement du pic réfléchi [le pas variant de  $\Lambda_{\min}$  à  $\Lambda_{\max}$ , le spectre s'étale de  $\lambda_{\min}$  à  $\lambda_{\max}$  telles que  $\lambda_i = 2 n_e \Lambda_i$  ( $i$  variant de min à max)]. Le spectre de ce type de filtre présente des fronts montant et descendant s'étalant sur plusieurs nanomètres ; il peut être utilisé comme discriminateur de raie spectrale (cf. § 3.2.1).

Ces réseaux peuvent également être mis à profit pour réaliser des compensateurs de dispersion chromatique ; c'est-à-dire pour contrebalancer l'élargissement des impulsions dans les transmissions numériques à haut débit. Comme indiqué au paragraphe 2.2, la dispersion conduit à une redistribution des composantes spectrales lors de la propagation (les composantes hautes fréquences – de plus faibles longueurs d'onde – composent le front des impulsions et réciproquement, suivant une répartition quasi linéaire). Un réseau de Bragg à pas variable permet la compensation de cet effet néfaste. Les longueurs d'onde les plus élevées étant en retard, en les faisant se réfléchir par le début du réseau, on compense leur retard sur les longueurs d'ondes basses présentes dans le front de l'impulsion. Finalement, après réflexion complète dans le réseau, l'impulsion s'en trouve affinée : l'effet de la dispersion a été au moins partiellement compensé. Compte tenu de l'état de l'art actuel, un retard supérieur à 1 ns est compensable par ce procédé.

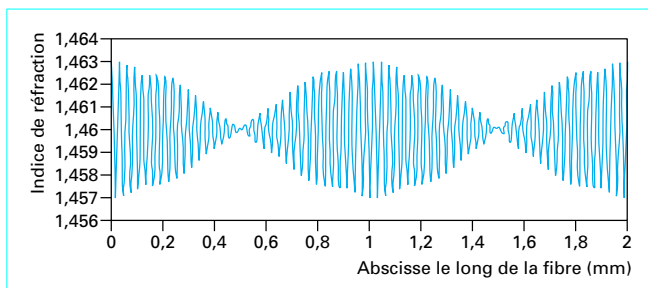


Figure 9 – Répartition longitudinale de l'indice de réfraction photo-inscrit dans un réseau de Moiré à filtres de Bragg, d'après [20]

### 2.5.2 Réseaux de Moiré

L'inscription en superposition de deux réseaux de pas légèrement différents crée un phénomène de battement dans la structure finale du réseau ; sa réponse spectrale est là encore modifiée (filtre de Moiré, figure 9). On peut dans ce cas réaliser un filtre passe-bande en transmission (et non coupe-bande comme le réseau de Bragg classique) [20].

### 2.5.3 Interféromètres de Fabry-Perot

L'interaction de deux réseaux identiques inscrits côte à côte permet de réaliser un composant tout-fibre nouveau. Ici, intervient un phénomène interférométrique du type Fabry-Perot (les deux réseaux formant les miroirs de la cavité) [20] à [22] ; le filtre obtenu est bien plus sélectif que le réseau standard (figure 10).

### 2.5.4 Rosettes de jauges de déformations

L'association de deux, voire trois transducteurs de Bragg, permet de réaliser l'équivalent optique d'une rosette classique de jauges électriques de déformations [23] à [25], (figure 11). Une rosette plane peut être utilisée pour déterminer les deux contraintes principales du plan ainsi que l'orientation du repère principal, la dépendance en température étant compensée par ailleurs (soustraction de la dérive en température par un réseau de référence non contraint, par exemple). Au-delà de l'application traditionnelle des rosettes, il est de plus possible d'exploiter ce concept d'une façon originale [25] afin d'obtenir un capteur de contrainte unique (constituant la majorité des applications industrielles de surveillance de contraintes) insensible aux variations de température et au positionnement angulaire du capteur sur un plan de la structure. Cette conception résout de manière rigoureuse les problèmes de tolérance de positionnement et de dépendance en température. Toute une gamme de capteurs autocompensés en température de mesurandes diverses employant un procédé de transduction adéquat peuvent être imaginés sur ce principe (mesure de champ magnétique en employant un substrat magnétostrictif ou de champ électrique en employant un substrat piézo-électrique, par exemple).

### 2.5.5 Réseaux à saut de phase

Certaines applications en télécommunications et en instrumentation peuvent tirer profit d'un réseau dont la réponse spectrale est maximale dans une bande extrêmement fine située au centre de la raie de Bragg qui normalement conduit à une transmission minimale (figure 12). C'est le cas pour certains lasers ou pour des transducteurs particuliers. Une telle réponse peut être obtenue par l'introduction d'un saut de phase valant  $\pi$  dans la modulation sinusoïdale de l'indice au milieu du réseau [26]. Cette rupture de phase

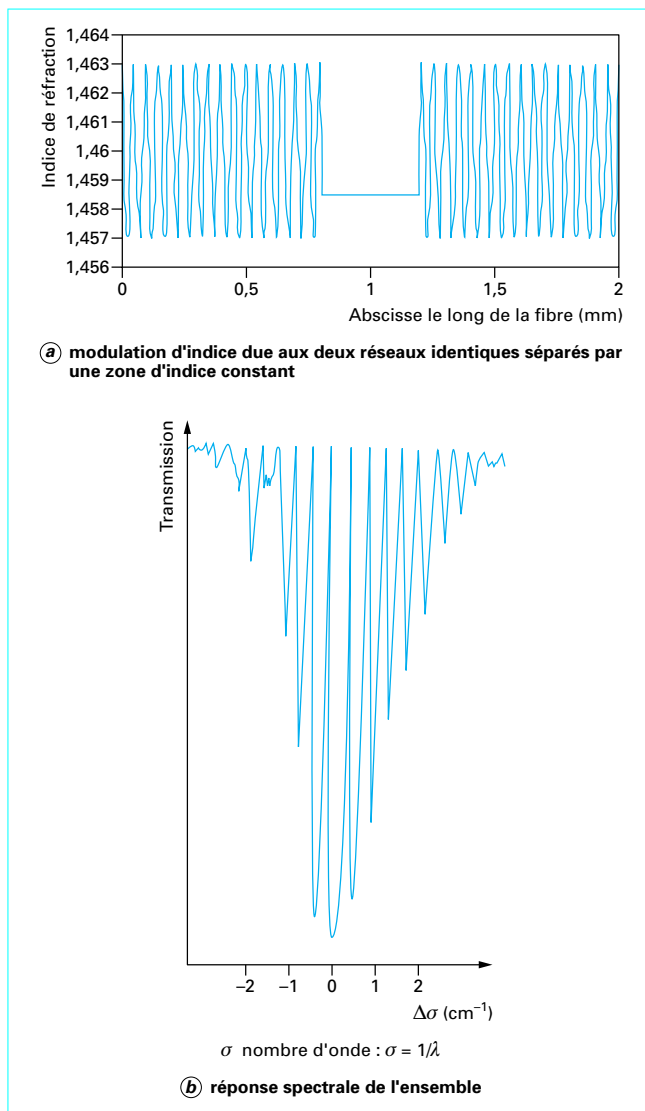


Figure 10 – Réponse spectrale d'un interféromètre de Fabry-Perot à filtres de Bragg, d'après [22]

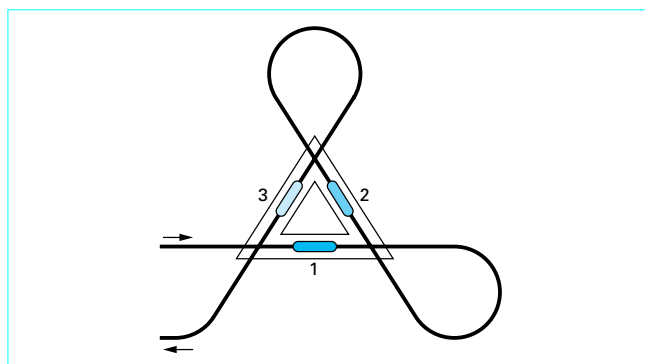


Figure 11 – Rosette à trois réseaux de Bragg, d'après [23] à [25]

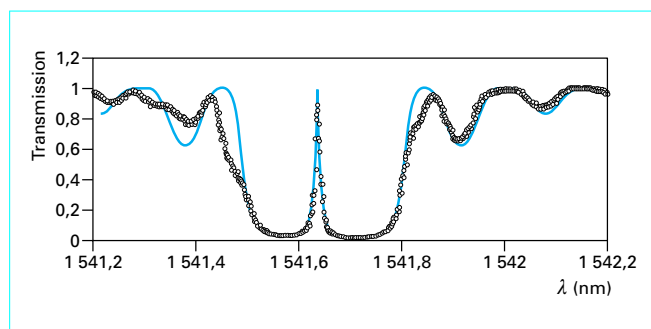


Figure 12 – Réponse spectrale d'un réseau au saut de phase (cas où le saut est égal à  $\pi$ )

place en opposition de phase les ondes correspondant à la longueur d'onde centrale du réseau ; elles interfèrent donc de manière destructive conduisant à l'absence de raie réfléchiée et à une transmission maximale à  $\lambda_B$ . Cette valeur de  $\pi$  n'est qu'un cas particulier, mais très utile. En fait, la valeur du saut de phase détermine la position spectrale de la bande fine de transmission dans le spectre (elle est centrée dans le cas d'un saut de  $\pi$ ) et la position de ce saut de phase, au sein de la structure du réseau, détermine le contraste interférentiel et donc le coefficient de transmission de la bande fine (100 % si le saut est inscrit au centre du réseau).

### 2.5.6 Réseaux « longue période »

Dans le cas d'un réseau de Bragg standard, à pas « micro-métrique » (cf. § 2.2), l'énergie à la longueur d'onde de Bragg est réfléchiée puis rétroguidée dans la fibre : on dit que le mode propagatif a cédé de l'énergie au mode contrapropagatif. Or, ce n'est pas avec ce seul mode qu'il est possible d'échanger de l'énergie, comme indiqué au paragraphe 2.1. En effet, un examen approfondi de la théorie des modes couplés met en évidence la possibilité d'établir un couplage avec les modes de gaine codirectifs (vis-à-vis du cœur de la fibre, ce sont des modes radiatifs – donc non propagatifs – et, en temps normal, on cherche à éviter tout transfert d'énergie vers ces derniers). Cette possibilité de réseau a été proposée pour la première fois en 1996 par A.M. Vengsarkar d'ATT Bell Labs [27].

En première approche, on peut, en partant de la condition de couplage vers ces modes indiquée au paragraphe 2.1, estimer la relation entre la longueur d'onde de Bragg et la période spatiale des fluctuations de l'indice de réfraction. En effet, si l'on remarque que pour ces réseaux le mode « radiatif » considéré est en fait un mode « propagatif » pour la gaine optique, donc s'écartant très peu de l'axe de la fibre, on peut approximer  $\varphi \approx 0$  dans la relation précitée (cf. § 2.1). Ainsi, la longueur d'onde caractéristique prend la forme :

$$\lambda_B = (n_e - n_{eg})\Lambda$$

avec  $n_e$  et  $n_{eg}$  sont respectivement indice effectif du mode guidé dans le cœur et de celui créé dans la gaine.

Comme ordre de grandeur, la parenthèse vaut typiquement l'écart d'indice cœur-gaine  $\Delta n \approx 10^{-2}$  de la fibre. Le couplage peut donc avoir lieu si le pas du réseau est grand vis-à-vis de la longueur d'onde (environ 100 fois plus), soit typiquement 0,2 mm à 0,5 mm (on parle alors de réseau « longue période » ou à « pas long », ou bien encore de LPG pour « Long Period Grating »). Ces réseaux sont assez faciles à réaliser par masquage ou « point-par-point » ; la technique d'insolation s'en trouve simplifiée. En pratique, on peut utiliser deux modes d'inscription : soit l'effet photoréfractif et donc insoler la fibre à l'aide d'un laser UV, soit légèrement diminuer le diamètre de cœur de la fibre à l'aide, par exemple, d'un laser de type CO<sub>2</sub> ou d'un arc électrique.

D'un point de vue fonctionnel, un tel réseau ne crée donc aucune raie spectrale en réflexion, mais des pertes dans la bande spectrale de transmission. Les réseaux LPG peuvent, par exemple, être mis à profit pour réaliser des filtres biréfringents dans les fibres à conservation de polarisation linéaire (ou HB pour *High Birefringence*) du fait des écarts d'indice élevés auxquels ils donnent accès, ainsi que des capteurs de type réfractométrique dans la mesure ou la bande de perte créée est sensible à l'indice de réfraction du milieu environnant la fibre. Dans les fibres de type « télécom », leur sensibilité à la température ( $\approx 40$  pm/°C à 60 pm/°C) est sensiblement cinq fois celle des réseaux à pas « court », tandis que leur sensibilité aux allongements est très variable (de quasi nulle à relativement élevée) selon l'ordre du mode considéré, la température et la provenance de la fibre utilisée, mais pas du mode d'inscription. Par ailleurs, ce type de réseau est également sensible aux courbures de la fibre, a contrario des réseaux standard.

### 2.5.7 Injecteurs/extracteurs de longueur d'onde

Les récents progrès dans le domaine de l'amplification optique ont conduit aux procédés de transmissions multiplexées en longueur d'onde. En effet, il est plus aisé de mettre au point une transmission de données véhiculant 10 ou 20 signaux par fibre optique (chacun d'eux étant codé spectralement, c'est-à-dire véhiculé par une porteuse optique centrée sur une longueur d'onde bien définie), signaux modulés à 2,5 ou 5, voire 10 Gbits qu'un seul signal à 100 Gbits ou plus. L'objectif étant, in fine, d'augmenter les capacités de transmission au moindre coût ; c'est de là qu'est né le concept nommé DWDM (cf. § 2.4.2). Le principe de ce type de codage repose sur la transmission d'un spectre optique (dans la bande 1,55  $\mu$ m, comme indiqué précédemment) partagé en canaux spectraux dont l'espacement est normalisé (soit 32 canaux séparés de 100 GHz, ou 0,8 nm, soit 64 canaux séparés de 50 GHz, ou 0,4 nm, suivant la grille spectrale « ITU » qui se met en place au niveau international). Le prix à payer pour cette approche étant induit par la nécessité de recourir à des dispositifs permettant d'injecter ou d'extraire une raie spectrale particulière parmi toutes les autres. C'est la fonction d'injecteur/extracteur de canal (ou encore de multiplexeur à injection-extraction, *Add Drop* dans la littérature anglo-saxonne).

Ce type de fonction peut être obtenu avec des dispositifs contenant des réseaux de Bragg accordés sur les raies à extraire ou à injecter. Plusieurs réalisations sont possibles : soit à l'aide de circulateurs, soit avec des coupleurs dans un montage de type interféromètre de Mach Zehnder équilibré à deux fibres séparées (figure 13), (cf. par exemple Innovative Fiber - Canada), soit dans une fibre spéciale « bicœur » comme le propose la société Française *HighWave Optical Technologies* à Lannion [28] (cf. § 2.1). Des produits sont déjà commercialisés et peuvent être mis à profit pour le démultiplexage dans les réseaux de capteurs de Bragg.

## 3. Techniques de mesure et de démultiplexage

La détermination des mesures de chacun des capteurs à réseaux de Bragg connectés sur une ligne de mesure nécessite primo d'identifier chaque capteur (information sur leur adresse le long de la fibre) et secundo de mesurer précisément sa longueur d'onde (information de mesure). Suivant que le démultiplexage s'effectue séquentiellement (en série) ou simultanément (en parallèle), les informations sont acquises plus ou moins rapidement et la complexité du système varie.

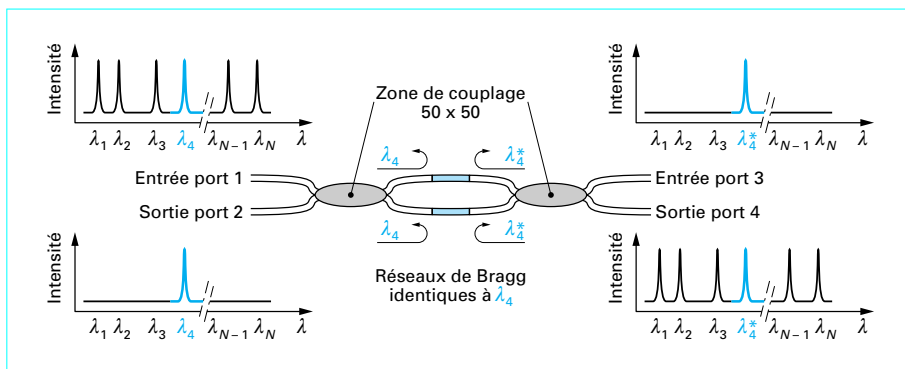


Figure 13 – Injecteurs/extracteurs à réseaux de Bragg

Tableau 2 – Principales techniques de mesure et de démultiplexage d’un réseau de capteurs à transducteurs de Bragg

Méthode	Moyen d’analyse des déplacements spectraux des réseaux de Bragg	Source optique utilisée	Distribution spectrale des réseaux sur une ligne de mesure	Nombre de capteurs par ligne de mesure <i>N</i>	Cadence typique des acquisitions par ligne de mesure <i>B</i>	Résolution en mesure de déformations <i>R</i>
0	Source fine accordable	Diode à cavité externe ou DBR	λ <sub>B</sub> toutes différentes	≈ 20	10 <sup>-3</sup> Hz (pas-à-pas) à ≈ 0,5 Hz par balayage continu	1 με
1	Fabry-Perot à balayage	Diode électro luminecente (DEL) ou source superluminescente (DSL ou fibre)		≈ 15	10 à 100 Hz	10 με
2	Asservissement ou balayage de : <i>N</i> sources			1 kHz		
2 bis	<i>N</i> réseaux de Bragg			100 Hz	10 με à 100 με	
3	Filtre linéaire d’analyse	Capteur fibre laser déclenché	Forte réflectivité		qq. 10 kHz	
4	Fabry-Perot dans une cavité en anneau			10 Hz	10 με	
5	Mach Zehnder en optique intégrée (TDM)	Diode laser (DL) impulsionnelle	λ <sub>B</sub> différentes, Faible réflectivité	≈ 20	qq.kHz (1)	10 με
6	OTDR/TDM		λ <sub>B</sub> identiques, Faible réflectivité	100 (1)	0,1 Hz	qq. 10 με

TDM Time Division Multiplexing  
(1) estimation

On distingue plusieurs techniques de mesure de ces longueurs d’onde soit par défilement d’un filtre spectral : balayage [29] [30] ou asservissement (méthode de poursuite) [31] [32], soit par filtrage linéaire [33]. Dans le cas du défilement, le démultiplexage et la mesure s’effectuent simultanément tandis qu’un démultiplexage préalable (séparation des canaux) est nécessaire dans le cas du filtrage linéaire. Cette dernière technique consiste, via le flanc d’un filtre optique linéaire, à transformer les déplacements de longueur d’onde en variations d’intensité (le résultat est ensuite avantageusement normalisé par un signal de référence) (cf. § 3.2.1). La technique la plus répandue est néanmoins celle du défilement qui se présente sous diverses variantes (cf. § 3.1). Elle peut employer des capteurs passifs (qui se contentent de réfléchir une faible portion de la lumière incidente d’interrogation) ou des capteurs laser (actifs) qui émettent en régime continu [34] voire impulsionnel [35]. Pour comparer leurs performances, on peut classer toutes ces méthodes en plusieurs catégories (tableau 2), elles sont donc fondées sur :

a) un démultiplexage et une analyse spectrale : soit en sortie via un échantillonnage par interféromètre de Fabry-Perot à balayage (méthode 1), soit en entrée à l’aide d’une (méthode 0) ou plusieurs

(méthode 2) sources accordables, soit en sortie par filtres de Bragg asservis (méthode 2 bis) ;

b) un démultiplexage spectral et une analyse en intensité à l’aide d’un filtre linéaire (méthode 3),

c) un démultiplexage temporel : soit par analyse spectrale via un interféromètre de Fabry-Perot opérant comme filtre en réflexion accordable et assurant le déclenchement d’un laser à fibre (méthode 4), soit à l’aide d’un interféromètre de Mach Zehnder en optique intégrée (méthode 5), soit par réflectométrie temporelle OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*) et analyse en intensité (méthode 6).

### 3.1 Démultiplexage par balayage spectral

Une première solution consiste à réaliser simultanément le démultiplexage et la mesure spectrale. Pour ce faire, il convient d’acquérir et d’échantillonner le spectre (transmis ou réfléchi), ce

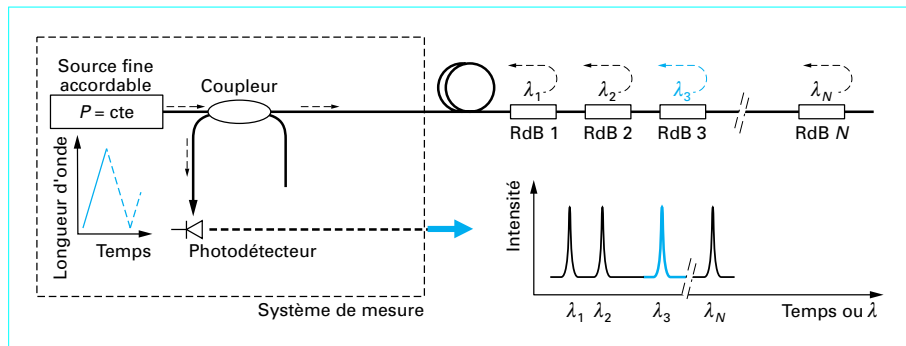


Figure 14 – Démultiplexage par source accordable

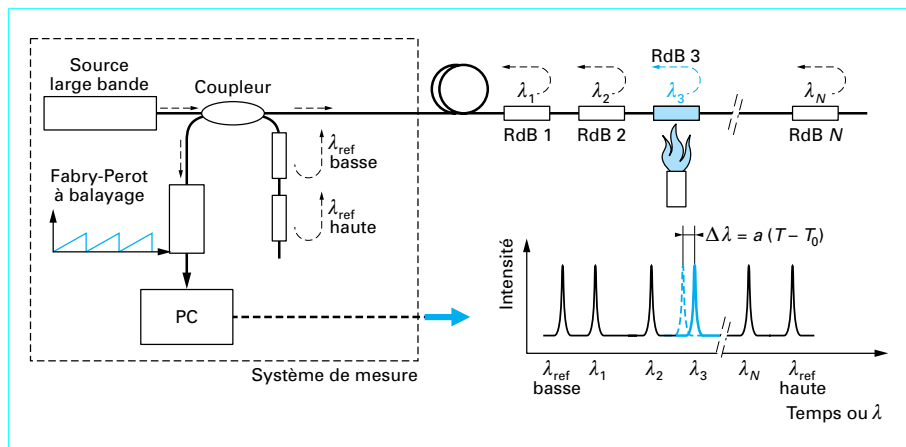


Figure 15 – Principe du système de mesure du CEA Leti pour l'analyse de transducteurs à réseau de Bragg, d'après [46]

qui peut se faire directement en utilisant une source monochromatique accordable ; une simple photodiode placée en sortie de fibre est alors suffisante. Le démultiplexage s'effectue donc en amont « côté source » (figure 14). Une forte contrainte technique repose sur la source à balayage : elle doit être totalement exempte de « saut de mode » lors des balayages afin d'éviter des erreurs dans l'acquisition des spectres.

A contrario, si on a recours à une source optique spectralement large, il convient d'introduire un élément dispersif dans le montage [spectrophotomètre, interféromètre de Fabry-Perot de grande finesse ( $\approx 10\,000$ ) à balayage, filtre accordable...] afin de balayer le domaine spectral autour des longueurs d'onde de Bragg recherchées. Cette fois, le démultiplexage s'effectue en aval « côté détection ». Ainsi, par exemple, le système de type 1 fondé sur l'analyse spectrale par Fabry-Perot à balayage développé au CEA-Leti donne les résultats suivants :  $1\ \mu\text{e}$  de résolution en mesure de déformations (de l'ordre d'1 pm dans le domaine spectral) ou  $0,1\ \text{C}$  de résolution thermique (figure 15) pour un temps de mesure d'environ 1 s, une quinzaine de réseaux de Bragg étant multiplexables par ligne de mesure [29] [30].

De surcroît, il faut noter que l'approche « spectrale » présente, du point de vue industriel, un certain nombre d'avantages décisifs :

- insensibilité de la mesure aux fluctuations d'intensité, toujours possibles à long terme (connecteur dérégulé, forte courbure...);
- possibilité de relier des capteurs de différents types ( $P$ ,  $T$ ,  $\Delta L/L...$ ) à la centrale d'acquisition ;
- de nombreux capteurs multiplexables (typiquement une quinzaine par ligne de mesure et jusqu'à une centaine de lignes de mesure, si besoin est) ;
- sécurité de la mesure, même en cas de rupture de fibre, via l'interrogation de la fibre par chaque extrémité ;

- topologie d'implantation du réseau de mesure flexible vis-à-vis des besoins (série, étoile, hybride...);
- reconfiguration du réseau de mesure (changement de topologie, de type de capteur...).

Les deux procédés de démultiplexage mentionnés ci-dessus (source accordable ou Fabry-Perot) offrent une cadence d'acquisition limitée à environ 1 Hz, voire au mieux quelques dizaines de hertz, du fait des balayages à effectuer. La bande passante des mesures que l'on peut réaliser se situe donc dans le domaine quasi statique.

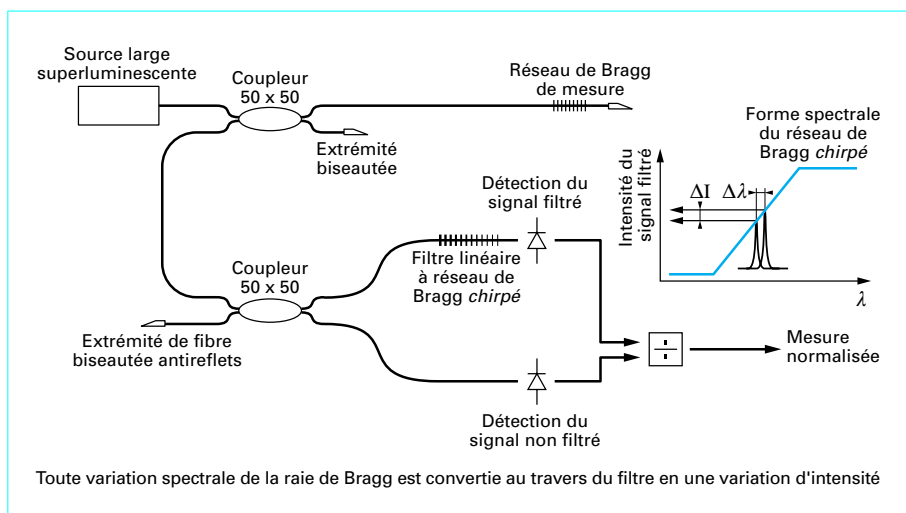
Un système comparable est commercialisé, outre-Atlantique, par Micron Optics (cf. § 4.1). Il est fondé sur un interféromètre de Fabry-Perot « tout-fibre » (les miroirs de la cavité sont formés par les extrémités réfléchissantes de deux fibres placées face à face) dont la finesse  $\approx 1\,000$ , est moindre que celle d'un interféromètre composé de deux miroirs traités avec des couches minces. La cadence des acquisitions est un peu plus élevée qu'avec le système précédent, mais la résolution de mesure est inférieure.

### 3.2 Démultiplexage dynamique

Il existe différentes façons de déterminer la longueur d'onde d'un réseau de Bragg en dynamique, c'est-à-dire avec une cadence de un à quelques kHz. Analysons deux de ces méthodes : celle du filtrage et celle dite de « poursuite ».

#### 3.2.1 Méthode de discrimination par filtrage linéaire

Dans ce procédé (figure 16), un signal lumineux large bande est envoyé au réseau de Bragg par l'intermédiaire d'un coupleur



**Figure 16 – Méthode de mesure par filtre discriminatoire linéaire**

50 × 50. Le pic réfléchi par le réseau de Bragg repasse dans le coupleur puis est séparé en deux signaux par un second coupleur. L'un d'eux parvient directement à un premier détecteur tandis que l'autre traverse un filtre optique avant d'être détecté à son tour. Le spectre du filtre est utilisé sur la partie linéaire d'un de ses fronts (§ 2.5.1). La normalisation de la mesure permet de s'affranchir des fluctuations de puissance et a une importance certaine pour les mesures à long terme (de quelques jours à plusieurs années). Elle s'obtient par l'intermédiaire du ratio des deux signaux acquis. On a ainsi accès à la longueur d'onde du pic réfléchi par la simple mesure d'un signal électrique. La société Canadienne Electro Photonics commercialise un système de mesure nommé FOGSI (*Fiber Optic Grating Strain Indicator*) fondé sur ce principe (cf. § 4.1.4.3 et § 4.1 [42] [43]).

Plusieurs types de filtres discriminatoires peuvent être utilisés : un filtre coloré, de type multicouches diélectriques, mais aussi un filtre à réseau de Bragg à pas variable (figure 16), (cf. § 2.5.1). L'avantage de ce dernier, par rapport à un filtre massif, vient du fait qu'il n'induit pratiquement pas de pertes en transmission. Par ailleurs, ce système est plus facilement intégrable.

La résolution atteignable avec ce type de filtre est conditionnée par la linéarité de sa réponse, mais aussi par sa pente. En effet, plus celle-ci est importante, plus le minimum de déplacement spectral détectable est petit. Cependant, si la pente est grande, alors la plage spectrale couverte par la partie linéaire du filtre s'en trouve réduite. Un compromis entre résolution et dynamique de mesure est donc à rechercher en fonction de l'application. La résolution typique de ce système est de quelques dizaines de  $\mu\epsilon$  (soit quelques  $10^{-5}$ ) pour une gamme de mesure en allongements d'environ 1% (ou 10 000  $\mu\epsilon$ , soit environ 10 nm spectralement).

### 3.2.2 Méthode du filtre de poursuite

Il s'agit d'une approche de type « maître-esclave ». Le filtre esclave (situé dans le système de démultiplexage) cherche continuellement à se placer en superposition spectrale avec son maître (le filtre de mesure). Cette méthode de poursuite (« tracking ») utilise donc un actionneur, de type piézo-électrique par exemple, auquel est fixée une fibre contenant un réseau de Bragg, elle-même reliée à une simple photodiode de détection. Le déplacement de l'ensemble esclave doit être dimensionné pour couvrir la plage spectrale du capteur de Bragg correspondant (figure 17).

On peut généraliser cette méthode à plusieurs capteurs, associés chacun à un réseau « récepteur » (ou « esclave ») et à une photo-

diode. Il est possible de détecter des déformations de l'ordre de la microdéformation ( $10^{-6}$ ) avec cette approche.

Les méthodes de poursuite utilisant des céramiques piézo-électriques couplées avec des réseaux de Bragg procurent une meilleure résolution que celles de filtrage, mais leur électronique est un peu plus complexe et plus lente puisqu'un asservissement y est inclus.

Chacune de ces approches tente d'optimiser les caractéristiques de la mesure (résolution, cadence...) et du démultiplexage (nombre de capteurs interrogés par unité de temps...).

En résumé, l'analyse par Fabry-Perot donne les meilleurs résultats en termes métrologiques (résolution et linéarité), mais compte tenu des sources disponibles et des dynamiques recherchées, elle ne permet pas d'adresser plus d'une quinzaine de réseaux de Bragg par ligne, dans le domaine quasi statique. L'analyse via un filtre linéaire et les techniques d'asservissement sont moins résolventes, mais permettent d'accéder à des cadences de mesures bien plus élevées, ce qui est très utile pour l'analyse vibratoire ou l'asservissement dynamique de structures (cf. § 4.1.4.1, *Control Damping*).

L'interrogation par source accordable est attrayante du fait de la résolution atteignable (1 pm), mais la qualité des mesures repose sur la double hypothèse d'un balayage linéaire et exempt de sauts de modes. Quant à l'interrogation par réflectométrie temporelle (OTDR), elle est encore balbutiante, mais pourrait dans l'avenir permettre le multiplexage de nombreux capteurs de Bragg [36].

## 4. Principaux domaines d'application

### 4.1 Surveillance des structures et contrôle santé des matériaux

Désormais, la surveillance des structures est presque devenue une spécialité technique à part entière et les méthodes optiques, qu'elles soient externes ou internes, globales (imagerie, holographie, *Speckle*, Moiré...) ou locales (téléométrie et vibrométrie laser,

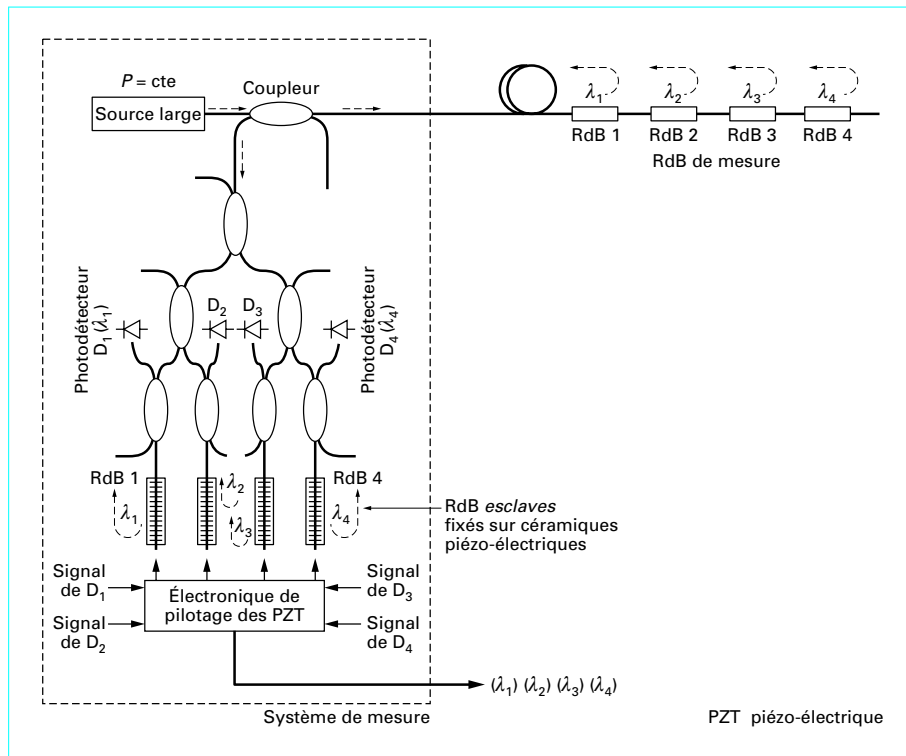


Figure 17 – Principe de la méthode de poursuite dans le cas d'un système à 4 voies

fibres optiques...) y sont particulièrement présentes. Cela 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. Les demandes vont croissantes, les paramètres dignes d'intérêt étant les déformations/contraintes, les déplacements, la température, le pH, les impacts et leurs conséquences...

À ce jour, deux grands domaines applicatifs dominent. Il s'agit, d'une part, du Génie civil et des Travaux publics, et d'autre part des matériaux et structures composites.

L'enjeu technico-économique de toutes ces applications est immense puisque finalement 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, tunnels, bâtiments, centrales nucléaires [4] [37] [38], mines [29] [30], falaises...), en mer (navires, pipe-lines, plates-formes...), en vol (avions, hélicoptères) ou bien encore dans l'espace (satellites, navettes, future station orbitale).

De nombreux principes de mesure par CFO ont été proposés et étudiés durant la décennie passée [39] (réflectométrie temporelle (OTDR, TDM), échométrie fréquentielle (FMCW, OFDR), interférométrie...) sans qu'aucune ne s'impose véritablement.

Nota :

OTDR : Optical Time Domain Reflectometry

TDM : Time Domain Multiplexing

FMCW : Frequency Multiplexing Continuous Wave

OFDR : Optical Frequency Domain Reflectometry

Cependant, les nombreux avantages de l'approche fondée sur les réseaux de Bragg nous conduisent à anticiper sa suprématie prochaine dans de nombreux secteurs applicatifs.

Par ailleurs, le concept de structure « intelligente » fondée sur l'utilisation de fibres optiques est actuellement en passe de devenir

un important axe de développement du domaine des CFO et de révolutionner les matériaux entrant dans la conception des structures les plus exposées : ponts [40] à [43], avions [44] [45], mines [29] [30], barrages (350 en France), centrales nucléaires (55 tranches en France et environ 500 dans le monde)... Dès aujourd'hui, de nombreuses possibilités techniques de réalisation et d'utilisation sont envisageables avec les systèmes à réseaux de Bragg, sinon à grande échelle, au moins dans le cadre de prototypes et de démonstrations industrielles. De nouvelles procédures de surveillance déportée sont dès lors adaptables avec ce nouveau type d'instrumentation (figure 18).

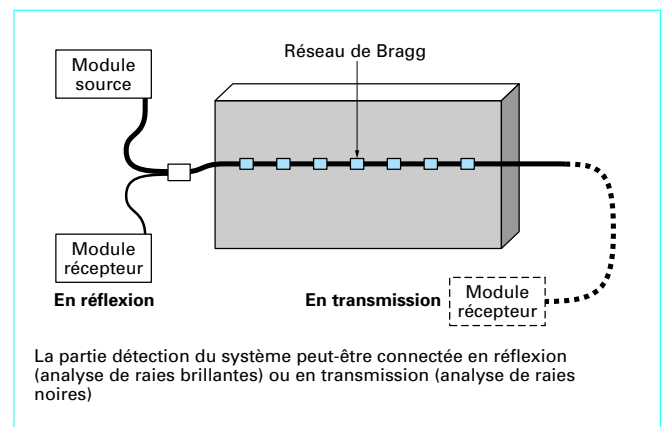


Figure 18 – Architecture de l'instrumentation de surveillance d'une structure par des capteurs à réseaux de Bragg

**Tableau 3 – Analyse de principaux domaines d’applications de la surveillance des structures par CFO à réseaux de Bragg**

Structures	Domaines concernés	Applications	Paramètres recherchés	Problèmes particuliers
<b>Matériaux composites : carbone, verre, hybrides...</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— aéronautique, spatial</li> <li>— défense</li> <li>— industrie nucléaire</li> <li>— structures diverses allégées pour les moyens de transports modernes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— amélioration du processus de fabrication</li> <li>— contrôle qualité,</li> <li>— surveillance de l’intégrité pendant la durée d’utilisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— déformations</li> <li>— température</li> <li>— délaminages, défauts divers</li> <li>— effets des impacts</li> <li>— état de santé global</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— sortie des informations optiques de la structure en phase industrielle (micro-connectivité industrielle),</li> <li>— surveillance de grandes surfaces</li> <li>— changements de direction des fibres au sein des structures</li> </ul>
<b>Structures géologiques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— mines souterraines</li> <li>— tunnels</li> <li>— falaises, digues</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— amélioration de la productivité, sécurité (population, travailleurs)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— déplacements, glissements de terrain</li> <li>— déformations, pression</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— conditionnement particulier des capteurs, placés le plus souvent dans des trous dans la roche</li> </ul>
<b>Structures métalliques</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— ponts, tours</li> <li>— navires, trains, rails</li> <li>— réservoirs, tuyauteries</li> <li>— câbles, plates-formes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— surveillance pour la sécurité des biens et des personnes,</li> <li>— maintenance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— déformations, dilatations</li> <li>— température</li> <li>— pression...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— conditions environnementales</li> <li>— accrochage en surface pour une bonne transduction à long terme</li> <li>— effets thermiques importants</li> </ul>
<b>Béton et Génie civil</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— ponts, ouvrages d’art</li> <li>— immeubles</li> <li>— tirants de précontraintes</li> <li>— centrales nucléaires</li> <li>— barrages hydrauliques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— prise du béton</li> <li>— détection des dégradations internes</li> <li>— restauration</li> <li>— maintenance</li> <li>— sécurité des biens et des personnes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— déformations/déplacements</li> <li>— température</li> <li>— détection/suivi de fissures</li> <li>— humidité</li> <li>— pression</li> <li>— corrosion in situ</li> <li>— verticalité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— capteurs spécifiques, en surface pour les ouvrages existants, in situ pour les nouvelles constructions</li> <li>— intrusivité des capteurs</li> <li>— gigantisme de certains ouvrages</li> <li>— compensation des effets thermiques sur une grande dynamique (≈ 100 °C)</li> </ul>
<b>Structures souples</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— ballons</li> <li>— tissus</li> <li>— réservoirs...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— sécurité</li> <li>— surveillance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— déformations</li> <li>— enfoncements</li> <li>— pression</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— élasticité et limite à la rupture supérieures à celle de la fibre</li> <li>— interface structure/instrumentation</li> <li>— grande cadence d’acquisition</li> </ul>

Le tableau 3 présente les différents domaines de la surveillance des structures et leurs spécificités. Les paragraphes qui suivent illustrent les actions menées et les réalisations dans chacun des ces domaines.

### 4.1.1 Domaine minier et géologique

Ce domaine est le plus mal connu et sans doute celui qui pose le plus de difficultés. Chaque mine, chaque terrain est particulier, aussi bien du point de vue géologique qu’en ce qui concerne les conditions d’accès, de vie en grande profondeur (chaleur, poussière, souvent présence d’eau, faible luminosité, risques divers...) ou les méthodes d’exploitation. Ces dernières tentent d’optimiser sécurité et productivité, car les coûts doivent être continuellement réduits compte tenu de la concurrence des pays producteurs et de la spéculation sur les matières premières. Or, jusqu’à ces dernières années, les technologies nouvelles d’instrumentation n’avaient pas encore pénétré ce secteur traditionnel de l’économie, pour de multiples raisons (absence d’informations, pas de capteurs dédiés, fiabilité non établie, problèmes de coût...).

Dès fin 1992, un consortium de partenaires européens (Pirites Alentejanas au Portugal ; Identity EEIG en Belgique ; CEA Leti Saclay

et Framatome en France ; CSEM en Suisse et GSF en Allemagne) s’est constitué autour d’un projet Brite EuRam nommé **STABILOS**. L’objectif était d’améliorer la sécurité des installations et des personnes ainsi que la productivité des exploitations minières [29] [30].

Cela a conduit le consortium à mettre au point un nouveau type d’instrumentation géotechnique, utilisant des capteurs à réseaux de Bragg, capable d’effectuer en temps réel des mesures de déformations d’un massif minier. Un système optoélectronique fondé sur une analyse spectrale fine a donc été développé jusqu’à l’état de prototype de terrain, principalement par le CEA Leti Saclay et son partenaire Identity, de même que des capteurs de déformations/déplacements spécifiques à ce type d’environnement difficile [46].

Chaque extensomètre est constitué d’une tige métallique centrale à laquelle un réseau de Bragg fibré est attaché, sur une base de 10 cm, par l’intermédiaire d’un ressort permettant de réduire et d’adapter la dynamique des déplacements à mesurer (~ 1 cm/mois) à la plage des allongements supportables par la fibre (< 1 %) (figure 19). Un logiciel dédié pilotant l’instrumentation et réalisant le traitement des signaux en temps réel a également été conçu pour cet objectif applicatif. Il permet la localisation spectrale des raies de Bragg et fournit les mesures sous une forme adéquate pour l’exploitant.



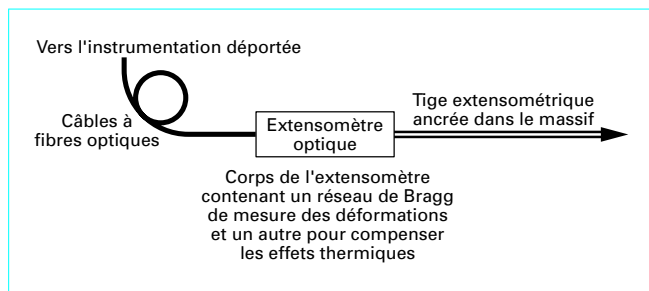


Figure 19 – Vue d'artiste d'un extensomètre géotechnique à réseau de Bragg, d'après [29], [30] et [47]

Un système complet permettant d'interroger de nombreux extensomètres à réseaux de Bragg à été installé en avril 1997 dans une mine de sel en Allemagne, à  $-800$  m de profondeur et, depuis cette date, fournit sans discontinuer des résultats de mesure sur les déplacements des cavités souterraines [47].

Une seconde démonstration a également été conduite dans le cadre de ce projet, les partenaires voulant prouver la possibilité de transposer la démarche minière à la surveillance d'un tunnel routier. Cette démonstration a été menée par le CSEM en Suisse, au niveau du tunnel du Mont Terri sur l'autoroute transjurassienne N16. Dans cette région, le terrain est constitué de marnes qui gonflent fortement en présence d'eau, ce qui contraint radialement et asymétriquement le tunnel et modifie sa section. Pour la plupart des tunnels qui souffrent de ce phénomène, lorsque le niveau des déformations subies est trop élevé, il y a danger et les autorités sont contraintes d'interrompre la circulation pour assurer la sécurité des usagers, tout en appliquant au plus vite des mesures de maintenance corrective. Tout cela induit un impact économique important et la mise en place d'une instrumentation de surveillance, associée à de la maintenance, cette fois prédictive, est donc souhaitable dès que l'ouvrage représente un certain enjeu économique [47]. Ainsi, dans le tunnel du Mont Terri, la démarche a consisté à anticiper l'installation d'une telle instrumentation en réservant, dès la mise en place des voussoirs, un certain nombre de niches dédiées à recevoir les capteurs. Ultérieurement, des capteurs de Bragg de déformations ont été mis en place. Ils sont connectés en série par de la fibre de liaison et chacun d'eux est constitué d'un réseau de Bragg fibré, prétendu, fixé entre deux points séparés d'environ  $50$  cm définissant la base de mesure (figure 20).

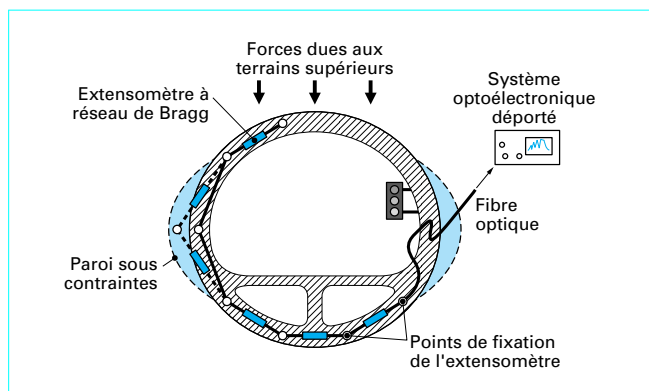


Figure 20 – Instrumentation du tunnel du Mont Terri par des réseaux de Bragg pour les mesures de déformations, d'après [47]

Finalement, le pari initial sous-jacent au projet **STABILOS** a été gagné : il est possible de concevoir, de réaliser puis de mettre en œuvre un système de mesure de haute technologie aux fonctionnalités inédites interrogeant des capteurs à réseaux de Bragg, pour les environnements souterrains très hostiles. Cela ouvre désormais la voie à bien d'autres applications.

#### 4.1.2 Structures du Génie civil

Le Génie civil est un secteur traditionnel où, de nos jours, les hautes technologies ont encore assez peu diffusé. Or, l'optique dans ce domaine, en tant que moyen de mesure non destructif, peut fournir des informations très riches, proches des propriétés d'usage donc du besoin de l'utilisateur, et ce en temps réel pour, par exemple, piloter des appareils ou des machines. Les besoins sont comme toujours sur le terrain : des systèmes fiables, souvent portables, clés en main, dont les fonctions internes sont transparentes aux utilisateurs, et dont le coût (achat + exploitation + effets induits sur la maintenance) peut conduire à réduire les dépenses. Or, cela devient désormais possible, car l'optoélectronique, dont les coûts composants sont tirés vers le bas par le marché des télécommunications, est de plus en plus présente au cœur des systèmes de mesure, en remplacement de l'optique traditionnelle relativement coûteuse.

Le secteur du Génie civil couvre les routes, autoroutes, ponts, tunnels, chaussées, barrages, ouvrages en terre, ainsi que quelques secteurs complémentaires liés à la sécurité routière (météo : brouillard, verglas, neige..., état de la surface de la route : interaction véhicule-chaussée...) et à l'exploitation (évolution du trafic, pesage des véhicules en marche, aide à la conduite...) [48]. Ces différents volets induisent de nombreux besoins encore pas ou mal couverts. En ce qui concerne la surveillance des ouvrages, citons la nécessité d'aide à la conception pour ceux encore en projet, les besoins en moyens de contrôle pour d'autres en voie de construction, l'aide à la maintenance pour ceux en service...

Les approches modernes fondées sur des moyens optiques englobent plusieurs techniques telles que l'imagerie pour la reconnaissance de sites, la robotique de chantier associée aux techniques de vision, la topographie, le guidage par faisceau laser et plus récemment par GPS (*Ground Positioning System*) pour l'alignement et le suivi de cibles, le repérage tridimensionnel... Toutes ces méthodes de mesure, qu'elles soient globales ou externes, ne permettent pas une vision analytique et une détermination des causes locales a fortiori internes des effets qu'elles déterminent. Ainsi, à titre d'exemple, en visée laser la précision n'est que de  $\pm 2,5$  mm à  $100$  m, du fait des fluctuations atmosphériques. Ainsi, mesurer une flèche avec cette méthode ne peut conduire à mieux que  $5\%$  de précision typique, ce qui est insuffisant pour les études de comportement structural. Or, compte tenu de la durée de vie des ouvrages, il y a un besoin croissant de surveillance du fait des agressions diverses que subissent les structures : pollution, pluies acides... aussi bien pour des raisons économiques induites par l'augmentation du trafic et des coûts croissants d'inspection et de maintenance, que du fait que tous ces ouvrages représentent un investissement significatif dans la société d'aujourd'hui.

Un système de surveillance à fibre optique, en particulier à réseaux de Bragg, intégré dans une structure offre la possibilité de surveiller l'évolution de son état durant toute sa vie active, jusqu'à éventuellement sa destruction ou son démantèlement. Il peut même déterminer la répartition des charges, les déformations, la température ou les dégradations et enclencher des alarmes si les mesures dépassent des seuils préfixés. Un tel système de mesure intégré peut également surveiller les divers composants structuraux lors des phases de construction, conduisant probablement à améliorer le contrôle de qualité de leur fabrication (l'aspect surveillance du béton, matériau très largement utilisé en Génie civil, sera abordé au paragraphe 4.2.1.1). Ainsi par exemple dans le cas d'un pont, le système optique de surveillance peut, en plus, être employé pour

produire de l'information sur le trafic lui-même. Il est en effet concevable d'imaginer un tel ouvrage convenablement équipé qui puisse surveiller non seulement le nombre de véhicules par minute, mais également leur poids (même sa distribution pour classifier les véhicules), la direction du flux, voire la vitesse et le poids de chaque véhicule et la détection d'incidents ou d'accidents pour les aspects opérationnels.

En termes de dégradation, particulièrement de type chimique, il est également envisageable d'être informé par le système de surveillance à fibre, et ce dès le début des dégradations grâce à un conditionnement particulier des réseaux de Bragg, ce qui permettrait des réparations précoces, donc à coût réduit. De plus, rien n'interdit que l'utilisation intensive de tels systèmes de surveillance à fibres optiques intégrées conduise l'exploitant à ausculter plus finement une zone donnée, à des fins d'expertise.

Ainsi, une conférence s'est tenue mi-1998 aux États-Unis au sujet de l'instrumentation des ponts à l'aide de fibres optiques [49]. Il ressort des travaux menés, la nécessité pour les exploitants d'ouvrages d'effectuer des mesures de nombreux paramètres qui sont : les contraintes statiques et dynamiques (de  $10^{-9}$  Hz, pour le suivi pluriannuel, jusqu'à 10 kHz pour le contrôle de chaussée), les gradients de contraintes, les vibrations, la température, l'humidité (ainsi que la présence d'eau liquide et la formation de glace), la corrosion (pH, espèces chimiques, concentration en ions chlore, gradients de moisissure), les forces, la présence de fissures, le pesage en marche. Il ressort également qu'un système unique, capable de mesurer simultanément les déformations en régime statique (afin d'évaluer l'intégrité structurelle d'un ouvrage) et de contrôler en temps réel l'influence du trafic, serait une avancée significative pour ses gestionnaires.

Citons une des premières réalisations allant dans ce sens, réalisée dès 1994 par l'Université de Toronto au Canada, et ayant consisté à instrumenter un pont près de Calgary, en collant directement sur les fers à béton des capteurs laser à réseaux de Bragg (cf. § 4.1.4.3). Ainsi, le système donnait accès à des mesures dynamiques (de l'ordre du kHz) du fait du bon rapport signal sur bruit apporté par l'amplification laser [34] [41], (cf. § 3).

### 4.1.3 Travaux publics souterrains

Le développement des transports en milieu urbanisé requiert la construction de nombreux ouvrages souterrains. Or, le sol est un matériau très hétérogène qui rend l'impact sur l'environnement des travaux difficile à contrôler de façon totalement satisfaisante. Cela est particulièrement critique en zone urbaine où les travaux souterrains engendrent parfois des dommages : édifices fragilisés, voire effondrés lors de travaux à proximité. Des accidents récents et spectaculaires (éboulement d'un tunnel en construction à Toulon, dommages survenus aux immeubles de la rue Papillon à Paris...), ainsi que les surcoûts et délais induits ont contribué à accroître la sensibilisation à ces questions. Bien qu'il n'existe pas encore de norme ou de réglementation concernant ce type de risques, les professionnels ne peuvent plus en différer la prise en compte et une telle situation réclame le développement de nouvelles méthodes pouvant apporter la sécurité indispensable.

Une voie prometteuse dite « d'injection de compensation » développée en Europe et déjà utilisée par la profession du BTP pour compenser les mouvements du sol engendrés par les travaux souterrains, consiste à forer des trous où sont scellés des tubes plastiques munis de *manchettes*, puis par leur intermédiaire à injecter, de manière contrôlée, une boue durcissante (bentonite) pour réaliser une sorte de « radeau hydraulique » supportant les édifices durant les excavations. Les injections sont démarrées progressivement et légèrement devant les travaux et ne sont interrompues qu'à l'issue de la réalisation de la structure finale en béton. Cette méthode permet aujourd'hui de limiter les déplacements des ouvrages existants à au mieux 2 cm. Or, pour être pleinement satisfaisante, cette limite doit être abaissée à moins d'un millimètre.

De l'étude des dispositifs électroniques disponibles, il ressort que les meilleurs capteurs de déplacement utilisables, de type LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) n'autorisent qu'une précision de 0,5 mm (il faudrait 50 fois mieux en terme de mesure pour parvenir à l'objectif précité !). De même, les inclinomètres industriels de type électrolytique présentent une précision de l'ordre de la minute d'arc, ce qui donne une précision finale de 5 mm, après intégration sur une dizaine de mètres. Le besoin dans cette application implique des capteurs 5 fois plus précis, insensibles aux variations de température ambiante. Eu égard à l'ensemble des performances demandées, seuls les CFO à réseaux de Bragg présentent a priori des caractéristiques suffisantes.

C'est dans ce contexte, et dans le cadre d'un projet européen de type Brite EuRam dénommé **COSMUS**, que fin 1996 se sont associés d'une part Solétanche-Bachy, industriel français de renom dans les travaux souterrains, comme utilisateur final et coordinateur du projet et d'autre part le CEA Leti Saclay en tant qu'organisme de recherche spécialiste des capteurs et systèmes à réseaux de Bragg, Glöztel, un industriel allemand, spécialiste de l'instrumentation géotechnique, Tractebel en Belgique, l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne en Suisse et l'Université de Cambridge en Grande-Bretagne.

L'objectif majeur de ce projet est de développer les méthodes et les matériels permettant d'atteindre ces objectifs ambitieux (figure 21). Pour y parvenir, cela exige le développement d'équipements de suivi en temps réel des mouvements de terrain, à savoir en particulier [47] :

- des extensomètres pour mesurer les déplacements verticaux et les déformations des fondations présentant une précision de 10  $\mu\text{m/m}$ . Capteurs qui, installés en forage, auront leur extrémité inférieure fixée profondément pour fournir une référence aux mesures de déplacements des terrains supérieurs ;
- des inclinomètres afin d'accéder aux mouvements différentiels entre couches de terrain : installés en une chaîne continue enserrant la structure, l'intégration des rotations individuelles permettant de remonter aux déformations globales avec une résolution de 10 secondes d'angle.

Le résultat de ce projet est une approche nouvelle de la construction des structures souterraines permettant, d'une part, le contrôle continu des mouvements des édifices avec un objectif de déplacement nul, et d'autre part la maîtrise totale des risques associés à ce type de travaux.

### 4.1.4 Matériaux composites

#### 4.1.4.1 Généralités

Les matériaux composites stratifiés à matrice organique, c'est-à-dire en résine époxyde ou polyester renforcée de fines fibres résistantes de verre, carbone... noyées en couches successives (CFRP *Carbon Fiber Reinforced Plastic*, GRP (*Glass Reinforced Plastic*...)) sont extrêmement attractifs pour les applications de haute technologie (aéronautique, spatial, marine, TGV...). Ils permettent de concevoir des structures performantes destinées à un usage particulier, présentant de très bonnes qualités mécaniques (résistance et rigidité spécifiques rapportées à leur densité) souvent inégalées par la plupart des matériaux métalliques, principalement grâce au choix du type de lamifié, au nombre de plis et à l'orientation des fibres de renfort.

Leur légèreté (1,6  $\text{kg/m}^3$  en moyenne pour les composites contre 2,8  $\text{kg/m}^3$  pour les alliages d'aluminium), à égalité de tenue structurale, les a fait adopter depuis le début des années 60 dans certains domaines. Cependant, l'exploitation massive du potentiel de ces nouveaux matériaux est encore freinée de nos jours par les difficultés qu'éprouve l'homme de l'art à prédire de façon fiable certains défauts internes comme les délaminages (décollements entre plis) pouvant conduire à la ruine de la structure. En effet, cette situation

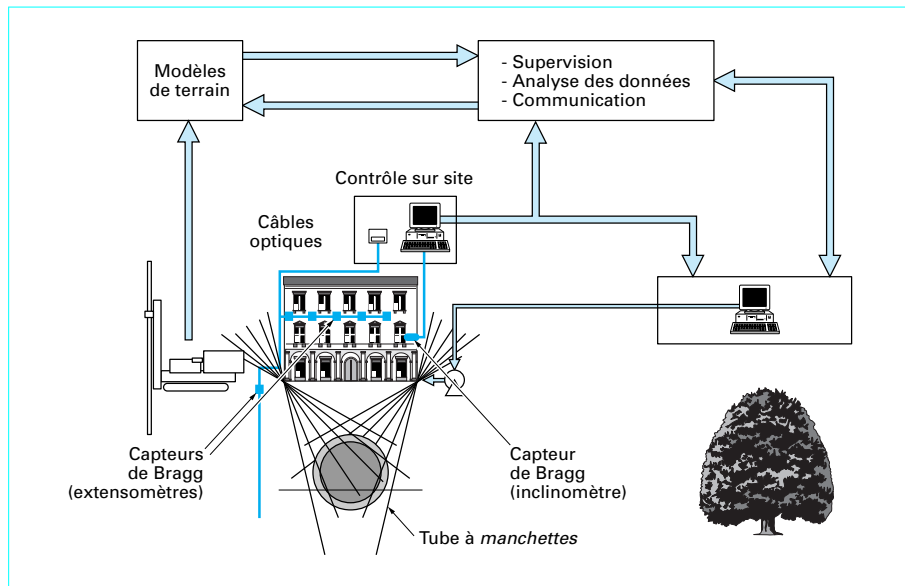


Figure 21 – Concept de travaux souterrains intelligents, d'après [47]

pousse les concepteurs à surdimensionner les parties structurales « travaillantes », ce qui réduit d'autant les gains attendus dans leur utilisation. Pallier cette situation passe nécessairement par une amélioration des connaissances et des capacités d'évaluation de la présence puis de l'évolution des défauts internes aux structures. Cet objectif implique le développement de modèles prédictifs ainsi que de méthodes de mesure des contraintes/déformations et de moyens d'essais de validation pour vérifier l'adéquation des comportements réels aux résultats des modèles [50].

L'instrumentation « idéale » doit pouvoir mesurer in situ les composantes des déformations suivant différents axes, être incorporables au sein des plis aux endroits adéquats au calage des modèles et bien entendu utiliser des capteurs de très petites dimensions, afin de ne pas influencer sur le comportement global de la structure. Les CFO à réseaux de Bragg promettent d'être la meilleure réponse à cette attente. Leur diamètre, celui de la fibre optique soit environ 100  $\mu\text{m}$ , étant du même ordre de grandeur que l'épaisseur des plis, il est prouvé depuis quelques années que leur présence n'influence quasiment pas le comportement de la structure, si leur mise en place est réalisée suivant certaines règles simples. Ainsi, les fibres optiques doivent cheminer parallèlement aux fibres de renfort, le choix du matériau gainant la fibre optique doit être guidé par la compatibilité et l'adhérence avec la matrice hôte... et être capable de supporter les conditions de cuisson ( $\approx 200\text{ }^\circ\text{C}$  sous 5 bar à 10 bar). De ce fait, le polyimide est le matériau le plus couramment utilisé.

Il est maintenant bien établi que les mêmes transducteurs optiques peuvent être employés du début à la fin de vie d'une structure. Ainsi, les gains engendrés peuvent être conséquents et de plusieurs ordres (matière, matériel, main-d'œuvre, maintenance, durée de vie, réduction et meilleure prise en compte des risques...) en se concrétisant à plusieurs stades de son existence.

#### ■ Pendant les phases précédant l'utilisation

● **Au niveau du bureau d'étude** : les transducteurs optiques apportent une aide à la conception et au dimensionnement, d'où un gain de matière première, de poids..., ce qui est extrêmement utile dans certaines applications telles qu'à l'extrême le spatial, où malgré les réserves de poussée des lanceurs modernes, dans le cas d'Ariane par exemple, on estime le coût du kilogramme embarqué à 100 kF en orbite basse et à 400 kF en orbite géostationnaire,

● **A l'atelier de fabrication** : ils contribuent aux améliorations du processus de fabrication impliquant un niveau de qualité accrue. Citons, pour le procédé classique : la vérification du bon état de la cuisson au sein de l'autoclave, la détermination de l'instant où la polymérisation est achevée, l'estimation des contraintes internes puis la mesure du retrait final du matériau... Ou encore, dans le cas du procédé RTM (*Resin Transfert Moulding*), l'optimisation des techniques de moulage, par exemple en suivant l'avancée de la résine en cours d'injection ou la détermination in situ du degré de polymérisation de pièces prototypes... pour parvenir à une meilleure compréhension des phénomènes présents au sein du moule et finalement raccourcir la durée de mise au point du *process*.

● **Au laboratoire de qualification** : ils permettent la mise en place de procédures de qualification ou de contrôle plus performantes, rapides, automatiques... Comme les essais peuvent être de plusieurs types suivant leur finalité, les dimensions de l'échantillon ou de la pièce testée sont variables, il peut s'agir [51] :

- d'échantillons, de petites éprouvettes de taille décimétrique, pour la caractérisation mécanique et la qualification des matériaux, et des méthodes de test ;
- de petits éléments (raidisseurs, jonctions...) afin de valider un concept de dimensionnement ;
- des sous-composants pour la vérification des règles de calculs ;
- des composants complets pour la validation d'une conception globale.

#### ■ Puis après la mise en service

Il s'agit dans ce cas de la mise en place de méthodes de prédiction de l'état de santé des composants de la structure grâce à une surveillance adéquate... d'où une maintenance plus performante. Actuellement, les motivations les plus fortes sont liées à la sécurité. Elles concernent les moyens de prévention de la ruine de la structure, qui peut intervenir de manière extrêmement rapide si des défauts internes (amorces de rupture, fissures, délaminages...) ont pu se propager sans être détectés à temps et qu'un simple contrôle visuel était inopérant. Dans ce cas précis, deux types d'investigation, pas nécessairement concurrentes, sont envisageables : soit une approche globale comme sont les essais de flambage, l'holographie, l'interférométrie de cisaillement (*shearing interferometry*)... lorsqu'il est possible de démonter la pièce incriminée et de

disposer de tout l'équipement nécessaire, soit une approche interne multipointuelle et « portable » fondée sur des fibres optiques noyées, c'est-à-dire une surveillance distribuée au sein du matériau pouvant fournir des informations précises sur son état de santé. Les réseaux de Bragg sont un candidat de choix pour cela.

Cet aspect « multifonctionnel » du procédé de mesure tout au long de la vie d'une structure caractérise les CFO. Notons cependant que malgré de nombreux projets de R & D ces dernières années dans le domaine des matériaux composites, aucune technique n'a encore véritablement percé significativement d'un point de vue industriel. Les problèmes techniques qui demeurent sont surtout liés à l'interface fibre/structure, c'est-à-dire à l'aspect connectique, notamment pour les pièces devant être usinées sur la tranche après cuisson, ce qui proscrit l'usage de fibres amorcées dépassant des panneaux.

#### 4.1.4.2 Aéronautique et structures « intelligentes »

Du fait de l'utilisation croissante de l'informatique et des matériaux composites dans les avions modernes, des problèmes de parasitages électromagnétiques se posent de façon cruciale, ce qui pousse les aviateurs à recourir dès à présent aux fibres optiques comme support physique de communication, et à les envisager sérieusement en tant que capteurs. Tous les points, abordés au paragraphe précédent et relatifs à la conception, la fabrication puis à la qualification des pièces, concernent ce domaine applicatif en priorité.

Plus spécifiquement, les nouvelles fonctionnalités apportées par les mesures in situ (température, déformations...) dans les structures composites formant la voilure et une partie de la carlingue sont de plus en plus étudiées, jusqu'alors principalement pour l'aviation de défense (avions, hélicoptères...).

Dans quelques années, en utilisation réelle, un « diagnostic de santé » des pièces incriminées ou sensibles pourra être réalisé périodiquement ou à la demande, même sur un pont d'envol, grâce aux réseaux de Bragg implantés in situ et aux systèmes portables d'acquisition associés, afin de garantir la conformité des pièces à leurs spécifications. De nombreux travaux vont dans ce sens aujourd'hui, en particulier autour de la détection d'impacts et la détermination de leur conséquences internes. Dans ce domaine, les réseaux de Bragg permettent de mesurer, hors effort, les infimes

variations locales des champs de déformations internes par rapport à une référence initiale. Ces mesures associées à la modélisation doivent permettre d'interpréter ces modifications en terme de risque de délaminage et de ruine de la structure. A cette occasion, citons les divers travaux entrepris en France par l'ONERA, associé à l'Atelier Industriel Aéronautique de Cuers-Pierrefeu (AIA-CP) et au CEA Leti Saclay pour développer une instrumentation intégrée aux radômes aéronautiques [52], par l'Aérospatiale et également le CEA Leti pour la surveillance de réservoirs bobinés en composite de type carbone époxy [53], mais aussi les études conduites aux États-Unis, en particulier par la NASA, qui associée à Lockheed Martin travaille sur le contrôle santé de réservoirs d'oxygène ou d'hydrogène liquide ou bien encore de la NASA-Ames Research Center pour la mesure de pression et de vibrations en extrémité de pales d'hélicoptères (figure 22), sans oublier le Naval Research Laboratory de Washington tant pour ses nombreux travaux autour des systèmes de démultiplexage de réseaux de Bragg que pour les applications de démonstration qu'il mène [18] [31] [32] [36].

Par ailleurs, en Europe, un projet Brite EuRam triennuel dénommé **MONITOR** piloté par *British Aerospace* a été lancé en mai 1996 avec dix autres partenaires du secteur aéronautique. Son objectif est de développer un système de Contrôle Santé capable de mesurer à l'aide de fibres optiques les efforts appliqués sur les structures ainsi que de détecter les impacts qu'elles subissent [54] [55]. Au plan économique, le consortium entend par cette voie réduire de 20 % les coûts d'inspection des structures concernées, et ce dans les 5 ans qui suivront l'achèvement du projet. Cela conduirait à économiser 12 MF par avion équipé sur les 20 ans de sa vie opérationnelle. Cette approche viendra en complément de 'l'auto-surveillance' électronique de tous les systèmes de bord, déjà pratiquée pour réduire les coûts d'exploitation en ligne. Pour parvenir à ces objectifs, plusieurs technologies sont explorées, dont celle des réseaux de Bragg.

En Suède, l'Institut de Recherches Optiques (IOF) est impliqué dans un projet national nommé **SMART** et ce en association avec le FFA (*Flygtekniska FörsöksAnstalten*, Institut Suédois de Recherches aéronautiques) pour développer un système complet à réseaux de Bragg permettant la mesure des déformations et de la température de pièces composites utilisées dans les avions de défense. Leur système est fondé sur le multiplexage temporel des capteurs [56].

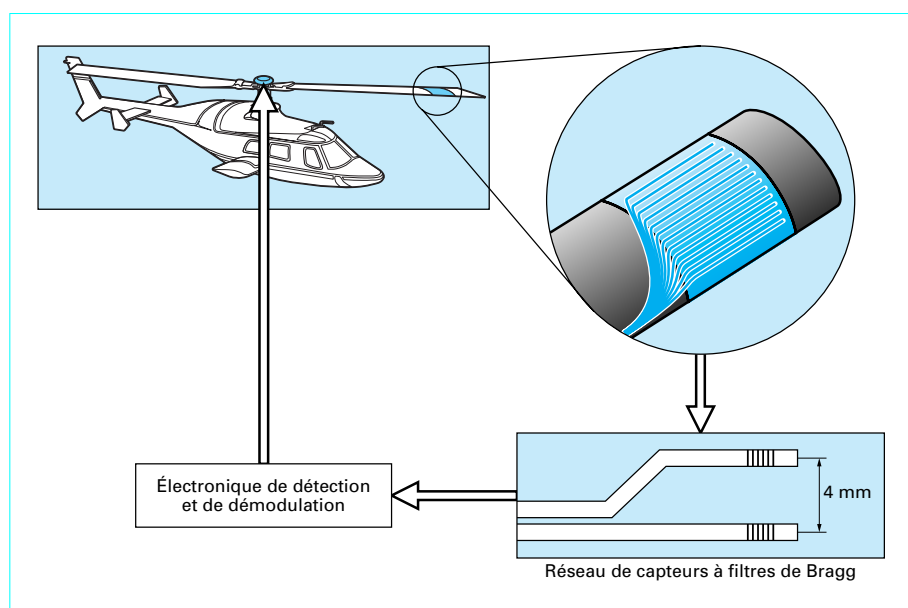


Figure 22 – Mesures de pression/déformations et de vibrations en extrémité de pales d'hélicoptères, d'après doc. NASA

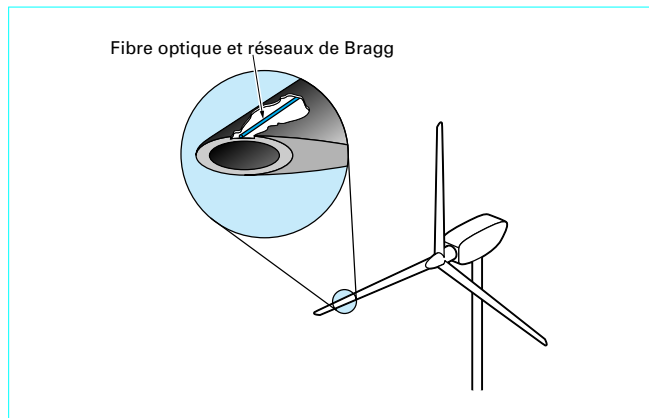


Figure 23 – Pale d'éolienne instrumentée de réseaux de Bragg, d'après [56]

En Espagne, le Laboratoire Aéronautique ETSI *Aeronauticos* de Madrid coordonne, quant à lui, un projet de type JOULE III baptisé **SMART BLADES** dont le but est de mettre au point un système multicapteurs à réseaux de Bragg (également fondé sur un système à balayage spectral, mais cette fois à l'aide d'un filtre passe-bande accordable) destiné au Contrôle Santé de pales composites pour éoliennes (figure 23) [57].

En Allemagne, depuis 1996, le Centre de Recherches de *Daimler-Benz*, ainsi que *Daimler-Benz Aerospace Airbus* et le DLR (*Deutsche Forschungsanstalt für Luft-und Raumfahrt*, Institut Allemand pour les études aéronautiques), ont lancé un projet de 7 ans dont l'objectif est le développement d'une aile d'avion adaptative, c'est-à-dire capable de modifier sa propre forme via des actionneurs pilotés en fonction des informations délivrées par des capteurs de Bragg de déformations et de température, eux-mêmes intégrés à la structure et analysés par une source à balayage (figure 24) [58]. Les motivations sous-jacentes à cette démarche sont relatives à la réduction des coûts opérationnels notamment du poste carburant, par l'optimisation de la portance, donc par l'obtention d'un meilleur aérodynamisme (d'où la notion d'adaptabilité). Ces objectifs semblent accessibles, via la modification en temps réel de l'aérodynamisme des ailes et des volets, tout comme le fait instinctivement un oiseau.]

C'est donc le concept de structure « intelligente » qui est exploré par ces partenaires... ainsi bien sûr que par d'autres laboratoires de R & D et Bureaux d'Études dans le monde. Les travaux qui sont menés vont principalement dans deux directions : il s'agit suivant la bande passante concernée, d'une part du contrôle de forme (c'est le cas du projet ci-dessus) et d'autre part de l'amortissement des vibrations (*Control Damping*). Une des applications opérationnelles concerne la suppression du « flottement structural », ce dangereux couplage entre les déformations d'une voilure « souple » et les forces aérodynamiques induites par ces dernières, et ce non plus uniquement à l'aide d'une gouverne rapide comme actuellement mais également grâce à une déformation « continue » et optimale de la surface de la structure.

Toutes ces approches nécessitent le mariage de trois disciplines : les capteurs, la micro-informatique temps réel (voire l'Intelligence Artificielle) et les actionneurs. Les développements techniques et technologiques conduits de nos jours tendent à intégrer ces trois composantes. Du point de vue système, ces nouvelles approches pourront dans l'avenir fournir au CAG, le Contrôle Actif Généralisé de l'appareil, des informations de mesure complémentaires afin d'optimiser encore plus finement l'aérodynamisme, la stabilité du vol en tangage, la réduction des effets de la turbulence... ou le contrôle des charges structurales particulièrement important dans les besoins nouveaux comme l'hypermanceuvrabilité.

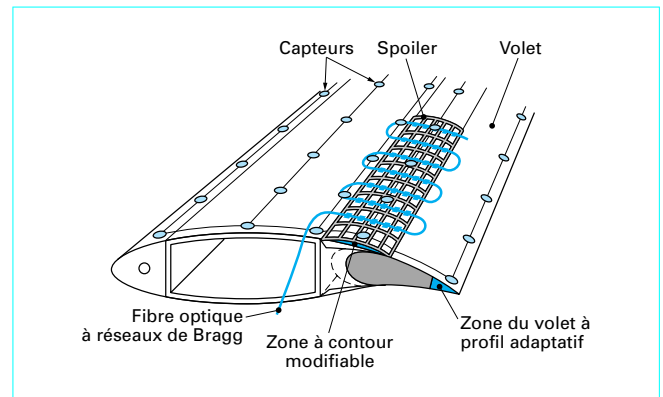


Figure 24 – Aile d'avion adaptative, d'après [58]

Les principales applications potentielles se situent donc bien sûr en aéronautique, tant civile que de défense, mais d'autres verront également le jour dans le spatial (stabilisation d'antenne, de satellite, de station spatiale...).

#### 4.1.4.3 Structures composites innovantes en Génie civil : des portes d'écluse « sensibles »

Un tout nouveau concept de portes d'écluses à matrice de polyester renforcée de tissus de verre (type GRP) a été développé et mis au point par la Direction des Constructions Navales (DCN) de Lorient, pour les Voies Navigables de France (VNF). Alors que les portes d'écluses traditionnelles en bois ou en métal – les plus anciennes ont un siècle – commencent à être remplacées, cette nouvelle conception présente de nombreux avantages, tels qu'une maintenance réduite, une standardisation des vantaux, une facilité de mise en place et d'extraction du fait d'un poids considérablement réduit, une durée de vie accrue liée au bon comportement dans le temps de ces matériaux et une esthétique attrayante. Chaque vantail est constitué d'un panneau composite renforcé par des raidisseurs.

Le CEA Leti Saclay en collaboration avec la DCN a, lors de leur fabrication, équipé l'un d'eux au sein de la structure stratifiée d'une fibre optique contenant cinq réseaux de Bragg (quatre d'entre eux, C1, C2, C5 et C7 étant dédiés aux mesures de déformations et le dernier T1 à la température) (figure 25).

Les mesures de déformations effectuées, tant en bassin d'essai à Lorient que sur voie navigable (à Golbey près d'Epinal dans les Vosges), lors des manœuvres pour le passage des bateaux et péniches, ont montré le bon fonctionnement de l'ensemble et la bonne adéquation entre les mesures optiques et celles fournies par les capteurs de comparaison (figure 26) [59]. Ces données, obtenues in situ, peuvent également servir au Bureau d'Étude pour optimiser la conception par éléments finis lors des prochaines réalisations.

#### 4.1.4.4 Matériaux composites instrumentés pour la réhabilitation d'ouvrages dans le Génie civil

Une autre voie importante d'applications en terme de marché concerne la réhabilitation d'anciennes structures dans le Génie civil. Ainsi, aux États-Unis, 187 000 ponts principalement situés dans le quart nord-est du pays ainsi qu'en Californie, sur les 576 000 construits, sont considérés comme défectueux [60]. En France, la situation est moins dramatique, puisque sur les 150 000 ouvrages à gérer, seulement un à quelques pour-cent semblent défectueux...

Une des techniques classiques de restauration consiste à assembler des plaques de renfort sur la structure défaillante. Or, depuis quelques temps, des plaques de composite carbone (CFRP) fixés

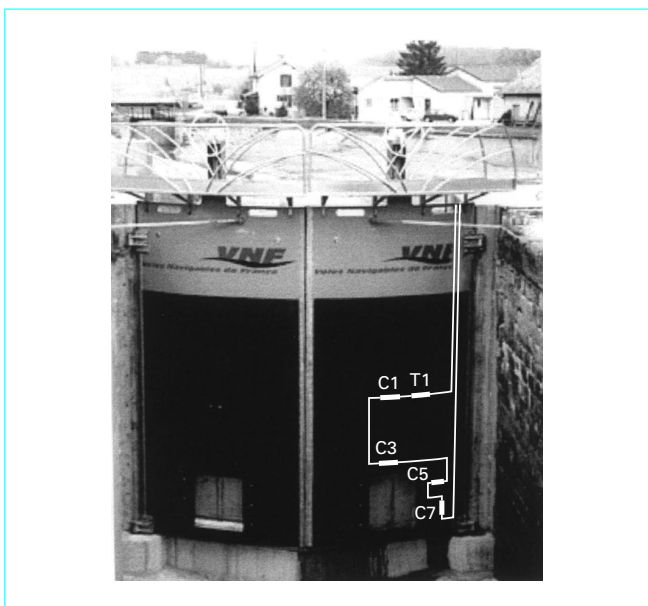


Figure 25 – Porte d'écluse composite instrumentée à cœur d'une ligne de réseaux de Bragg, d'après [59]

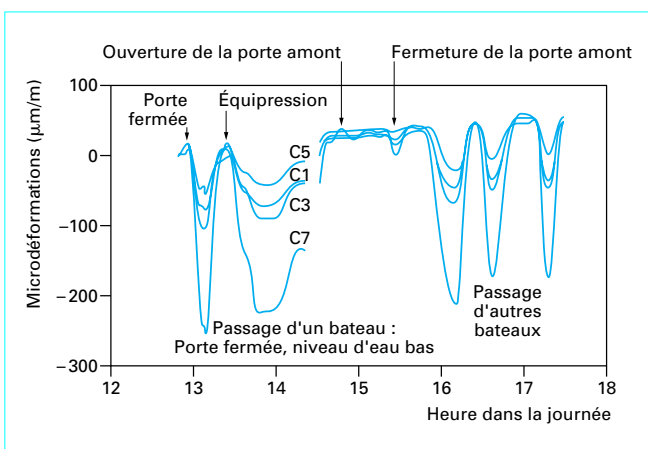


Figure 26 – Exemple de résultat de mesure par réseaux de Bragg sur la porte d'écluse composite, d'après [59]

directement sur le béton commencent à être utilisées en remplacement de l'acier traditionnel. Outre le gain de poids d'un facteur 30, le CFRP résiste mieux à la corrosion. Cela se traduit par des avantages substantiels en terme de coût de main-d'œuvre et de matériel. Ces structures de renfort composites sont disponibles sous diverses formes (plaques, rubans, câbles...). Il est dès lors possible de renforcer des toits, des colonnes, des ponts suspendus... par assemblage de telles pièces (par exemple le pont suspendu de Stork à Wintherthur en Suisse (figure 27) [40]). De plus, ces renforts en CFRP peuvent être avantageusement innervés par des fibres sensibles à réseaux de Bragg, ce qui peut permettre de vérifier sur le long terme l'efficacité des réparations effectuées.

Au Canada, le « Taylor Bridge » à Winnipeg dans la province du Manitoba (165 m en 5 portées), un des plus longs ponts dont une partie complète a été réhabilitée à l'aide de câbles de renforts et de

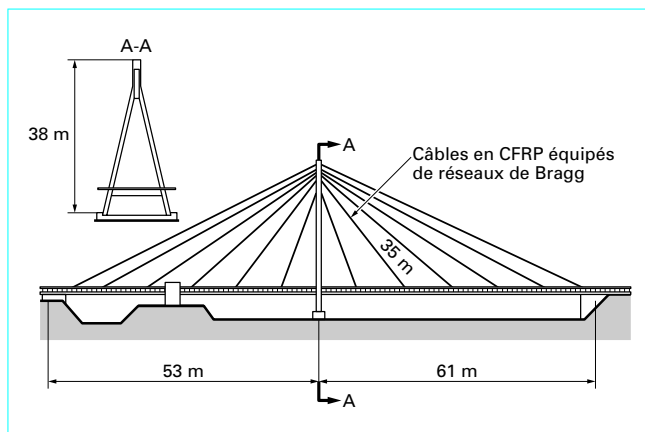


Figure 27 – Instrumentation à réseaux de Bragg sur le pont de Wintherthur (Suisse), d'après [40]

précontraintes en CFRP et FRP (*Fiber Reinforced Plastic*), en plus de ceux en acier, afin d'accroître sa durée de vie d'une nouvelle période de 25 ans, a servi de banc de test pour des capteurs de Bragg. Sur cet ouvrage, 66 capteurs de déformation à réseau de Bragg ont été fixés sur les câbles de précontraintes et le tablier dans le but de surveiller et de suivre à distance, durant plusieurs mois, le comportement du pont après sa réouverture au trafic intervenue en octobre 1997. L'instrumentation, commercialisée par Electro-Photonics, comporte des capteurs de Bragg ainsi qu'un système d'interrogation dénommé FOGSI (*Fiber Optic Grating Strain Indicator*) (réf. FLS 3500R) pour les mesures quasi statiques, équipé d'une unité de démultiplexage externe, fonctionnant sur le principe du filtrage linéaire (cf. § 3.2.1). Les capteurs de température mis en œuvre dans le système FOGSI, pour affranchir les mesures des effets thermiques, sont par contre de type semiconducteur [42] [43]. Compte tenu de l'importance économique de l'entretien et de la réhabilitation des ponts, d'autres actions de ce type (réparations avec des composants en fibres de carbone, évaluation de l'efficacité de l'enrobage des aciers, analyse de moyens de retarder la corrosion...) sont actuellement menées par divers organismes appartenant au réseau national canadien nommé ISIS (*Intelligent Sensing for Innovative Structures* : réseau qui regroupe 12 centres de recherche et universités canadiennes).

## 4.2 Autres applications industrielles particulières

### 4.2.1 Industrie du nucléaire civil

Des mines d'uranium aux sites de stockage des déchets ultimes, en passant bien entendu par la production d'électricité, le cycle du combustible nucléaire offre de multiples possibilités d'applications pour les CFO. Ceux-ci peuvent faire bénéficier toute cette filière énergétique de nouvelles fonctionnalités de mesure. Dans le secteur électronucléaire, tant la remise à niveau de l'outil de production actuel que les nouvelles générations de centrales à construire au début du siècle prochain sont concernées.

L'isolation en haute ou très haute tension et l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques entre les zones de mesure et d'instrumentation rendent les CFO et les RCFO, qui bénéficient de l'isolation galvanique apportée par la fibre, particulièrement attractifs pour cette industrie [4] [38] [61] à [64]. Les besoins sont nombreux, aussi bien pour la sûreté, la sécurité, le diagnostic et la maintenance, qu'en exploitation. Citons, en plus de la surveillance

des structures du Génie civil de cette industrie (cf. § 4.2.1.1) : la surveillance thermique et vibratoire des alternateurs, celle des transformateurs (température, décomposition de l'huile...), celle des lignes aériennes et des câbles souterrains de transport d'énergie, la surveillance des tuyauteries et des structures composites, etc.

Dans les pays où une part importante de l'électricité est d'origine nucléaire (France, USA, Japon), la qualité et l'amélioration de l'instrumentation à toujours été l'un des aspects prioritaires de la R&D, du fait de l'impérieuse nécessité qu'ont les exploitants de garantir la sûreté et la sécurité opérationnelle par la surveillance des matériels. Un certain nombre d'études ont été menées ces dernières années (EPRI aux USA [61] à [63], CEA-EDF-Framatome en France [64]) afin d'évaluer l'impact potentiel de l'utilisation de l'instrumentation à fibre optique dans les centrales électronucléaires de type Réacteur à Eau Pressurisée (filière REP en France et *Pressurized Wapor Reactor* : PWR aux USA). La démarche nationale dénommée CORA2000 a montré que les CFO et les réseaux de mesure associés pouvaient augmenter la disponibilité et la sécurité d'un certain nombre d'équipements stratégiques (alternateur, transformateur...) et de parties structurelles de la centrale (enceinte de confinement, aérorefrigerants, tuyauteries ou pièces en matériaux composites...) [38] [64] [65]. La démarche américaine, quant à elle, a très clairement montré que les capteurs à réseaux de Bragg étaient les candidats de choix pour bon nombre de ces objectifs [66].

**4.2.1.1 Instrumentation de surveillance des bâtiments réacteurs**

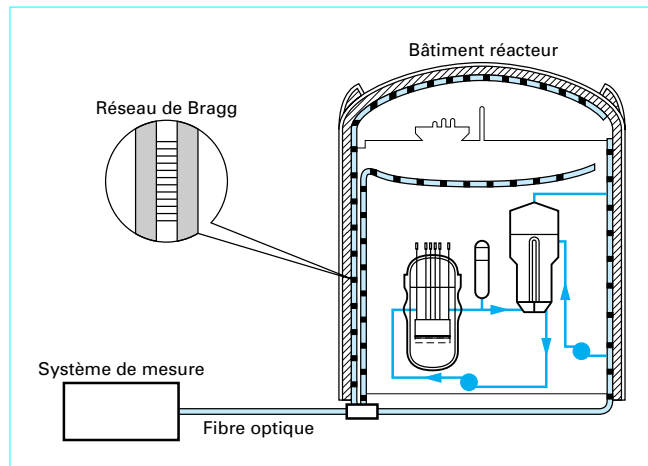
L'enceinte de confinement étant l'ultime barrière, elle est conçue et réalisée de manière à supporter un hypothétique risque d'explosion d'hydrogène en cas d'accident nucléaire majeur. La pression ultime supportable est de 12 bar pour les tranches 900 MW (simple enceinte) et de 9 bar dans le cas des tranches 1 300 MW (double enceinte). Bien qu'un test d'intégrité soit effectué périodiquement afin de vérifier le bon comportement de l'enceinte, une approche complémentaire fondée sur la mise en place d'un système de surveillance par capteurs à réseaux de Bragg, en fournissant à l'exploitant des informations locales, précises, et en continu, permettrait d'améliorer la sûreté et de réduire les coûts de maintenance (figure 28) [38] [65].

En France, un projet lancé conjointement en 1995, par EDF, le CEA et Framatome, porte sur le développement de capteurs à réseaux de Bragg pour la surveillance du béton de telles enceintes, aussi bien placés en surface que noyés lors de leur fabrication. Les extensomètres développés, une fois fixés en surface, sont capables de fonctionner linéairement aussi bien en traction qu'en compression sur une plage de  $\pm 2\,500\ \mu\epsilon$  (soit  $\pm 0,25\%$ ) (figure 29). Une fois connectés au système d'acquisition et de mesure développé par le CEA Leti Saclay (cf. § 3.1), de tels extensomètres présentent une résolution de mesure d'environ  $1\ \mu\epsilon$ . Une campagne de mesure réalisée en 1996, à l'aide de capteurs extensométriques à réseaux de Bragg fixés en surface du béton, a démontré la validité du concept et mis en évidence une reproductibilité des mesures de 0,05 % de la pleine échelle, après 30 s de moyennage (figure 30). Une seconde campagne, menée l'année suivante, avec cette fois des capteurs noyés dans le béton, a fourni des résultats tout à fait satisfaisants, aussi bien en mesure de déformations qu'en détection précoce et suivi de fissures [67].

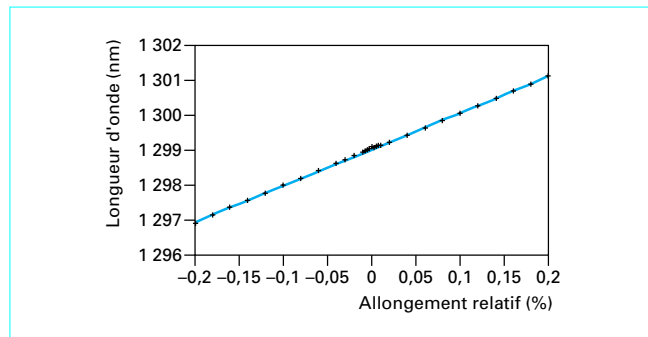
De tels résultats ouvrent la voie à l'instrumentation de nombreuses structures en béton du Génie civil, non seulement dans le domaine du nucléaire civil mais également dans l'ingénierie et les Travaux publics.

**4.2.1.2 Sites de stockage des déchets radioactifs**

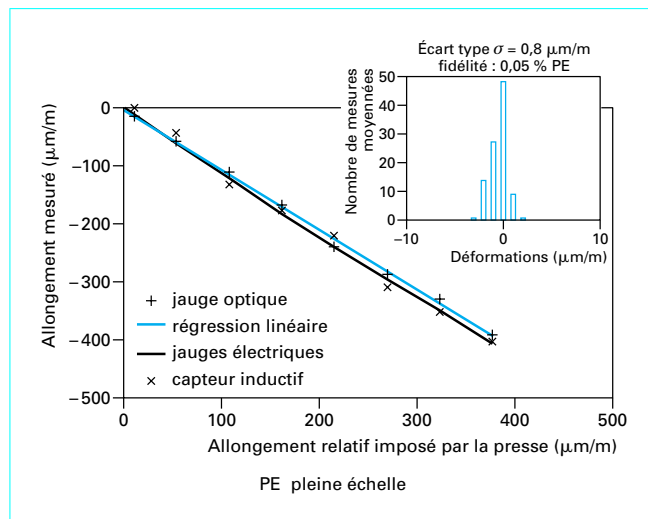
Il existe quatre catégories de déchets radioactifs, classés suivant leur niveau d'activité : très faible, faible, moyen, fort. Dans chaque catégorie, on distingue les déchets à vie courte (période inférieure à 30 ans) et les déchets à vie longue (période supérieure à 30 ans). En France, le Centre de l'Aube situé à Soullaines-Dhuys, que gère



**Figure 28 – Concept de bâtiment réacteur de centrale nucléaire instrumenté de capteurs à réseaux de Bragg, d'après [47]**



**Figure 29 – Réponse spectrale en traction et en compression pures d'un d'extensomètre à réseau de Bragg pour les mesures in situ ou en surface du béton**



**Figure 30 – Mesure type délivrée par un extensomètre à réseau de Bragg pour le béton – Comparaison avec des mesures traditionnelles, d'après [67]**

l'ANDRA (l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs) reçoit les déchets, faiblement ou moyennement radioactifs à vie courte, issus du traitement des combustibles (COGEMA), des centrales nucléaires (EDF), des laboratoires de recherche (CEA et autres), des hôpitaux et d'industries diverses. Pour les déchets de haute activité et les déchets à vie longue, la loi du 30 décembre 1991 a investi l'ANDRA de la mission d'étudier, en collaboration avec les laboratoires scientifiques et particulièrement le CEA, le concept de stockage en couches géologiques profondes, qui sera validé en laboratoires souterrains avant que la décision définitive du type de stockage ne soit prise par le Parlement en 2006. Un site de stockage profond pourrait, par exemple, consister en un réseau de galeries interconnectées et devrait vraisemblablement assurer la réversibilité dudit stockage. De la même manière, un certain nombre de sites sont étudiés par nos voisins européens. Ainsi la Belgique, avec un concept initié par le Centre d'Études Nucléaires (SCK-CEN) de Mol [68], conduit des recherches dans le laboratoire de stockage souterrain HADES. En Suisse, le stockage dans le granite et dans les marnes est étudié, tandis qu'en Allemagne des expérimentations seront certainement engagées prochainement autour du concept de stockage profond dans les mines de sel. La Suède et la Finlande, ainsi que le Canada, concentrent leurs recherches dans le granite.

De telles approches imposent de définir, dès à présent, une instrumentation qui puisse anticiper la prise de futures décisions. Or, les capteurs à réseaux de Bragg, du fait de leurs spécificités (bonne tenue aux radiations ionisantes en particulier [69]) peuvent avantageusement y être mis en œuvre pour le suivi in situ des paramètres géomécaniques et hydrogéologiques.

#### 4.2.2 Domaines thermiques extrêmes

Dans le domaine des températures extrêmes, malgré quelques incursions dans la cryogénie (des chercheurs japonais ont mesuré des températures jusqu'à environ 10 K à l'aide de réseaux de Bragg placés sur un substrat d'aluminium, afin d'augmenter la sensibilité de la mesure normalement nulle vers le zéro absolu [70]) ou vers les hautes températures (en fait pour étudier la durée de vie des réseaux [9]), peu de travaux ont été menés pour caractériser la sensibilité de la longueur d'onde de Bragg  $\lambda_B$  aux très hautes températures. Il faut dire que les fibres en germanosilicate disponibles ne permettent guère d'aller au-delà de 600 °C à 700 °C [71], du fait de l'effacement de la photo-inscription [72]. Une avancée significative a été obtenue par un laboratoire russe avec le développement d'un nouveau type de fibre « dopée azote », grâce au procédé SPCVD (Surface Plasma Chemical Vapor Deposition) [73].

Le comportement en très hautes températures de réseaux de Bragg, inscrits par laser à 193 nm et masque de phase dans plusieurs de ces fibres, a été récemment étudié par le CEA Leti Saclay et l'Université de Lille [74]. En particulier, l'influence de la température sur  $R$  la réflectivité et  $\lambda_B$  la longueur d'onde centrale des réseaux a été décrite, ainsi que la dépendance thermique du coefficient de sensibilité de la raie de Bragg aux déformations.

Il faut retenir de ces études que certains réseaux de Bragg inscrits dans les fibres azotées résistent très bien à la température. Ainsi, comme l'illustre la figure 31, un réseau (dit de « type II ») conserve 90 % de sa réflectivité initiale après quelques heures à 800 °C, ou bien encore 75 % après une chauffe de plusieurs heures à 1 200 °C.

Alors que nous avons considéré jusqu'alors une dépendance linéaire entre  $T$  la température et  $\Delta\lambda_B$  le décalage spectral induit sur la longueur d'onde de Bragg (cf. § 2.3.1), la figure 31 met également en évidence le fait qu'aux températures élevées, la sensibilité thermique de la raie de Bragg ( $\Delta\lambda_B/\Delta T$ , soit le terme  $a$  du § 2.3) d'un tel réseau n'est pas linéaire sur tout le domaine exploré. Un ajustement du second ordre fournit une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux, soit :

$$\Delta\lambda_B = 2,70 \times 10^{-3} T^2 + 11,3 T - 328$$

avec  $\Delta\lambda_B$  en pm et  $T$  en °C ( $\Delta\lambda_B \approx 0$  vers 29 °C, valeur de départ).

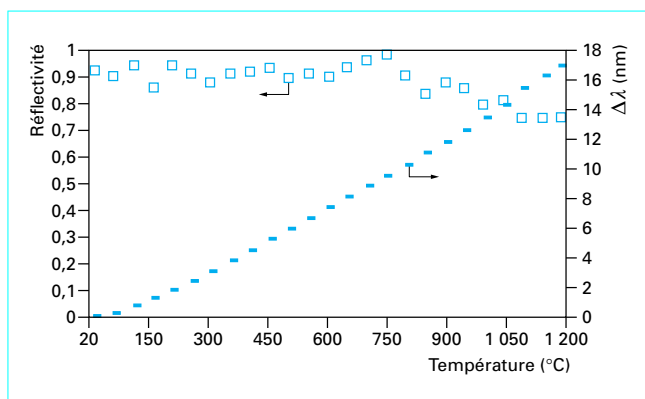


Figure 31 – Mesure de température par Bragg à très hautes températures. Comportement thermique (isochrone) d'un réseau (de type 2) inscrit dans une fibre optique dopée azote

La dérivée de cette courbe permet d'évaluer la variation de cette sensibilité spectrale vis-à-vis de la température. Ainsi, la sensibilité à l'ambiante vaut environ 11 pm/°C comme pour les autres types de réseaux de Bragg et évolue de + 5,4 (fm/°C)/°C au-delà, pour atteindre environ 18 pm/°C vers 1 200 °C.

Par ailleurs, dans une application réelle d'extensométrie à haute température, il est primordial de connaître non seulement l'influence thermique comme nous venons de la déterminer, mais également la sensibilité de  $\lambda_B$  aux déformations ( $b$  du § 2.3) et ce à chaque température de travail. L'évolution de ce paramètre a été déterminée, par les mêmes auteurs, dans la bande spectrale 1,55  $\mu\text{m}$ , dans le cas des réseaux de Bragg azotés jusqu'à des températures de l'ordre de 500 °C [74]. Pour les réseaux testés, à l'ambiante,  $\Delta\lambda_B \approx 1,11$  pm/( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) puis mesurée lors de la montée en température, cette sensibilité décroît linéairement de - 0,23 fm/( $\mu\text{m}/\text{m}$ )/°C pour avoisiner 1 pm/( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) à 500 °C. Ces études prouvent que des réseaux de Bragg inscrits dans les fibres dopées azote présentent une bien meilleure résistance à la température que les réseaux de Bragg inscrits dans les fibres standard dopées au germanium. La connaissance de l'évolution des sensibilités thermiques et aux allongements de ces réseaux permet dorénavant d'envisager des applications métrologiques à très hautes températures.

## 5. Conclusion et perspectives

La technologie de mesure fondée sur les réseaux de Bragg possède de nombreux atouts qui tiennent, d'une part, à leur sensibilité et à la linéarité de leur réponse aux paramètres souhaités par les utilisateurs (température, déformations, pression...), et d'autre part aux possibilités de démultiplexage liées à la finesse des réseaux. En plus des propriétés traditionnelles apportées par les fibres optiques (immunité électromagnétique, faible poids et petites dimensions, résistance aux environnements sévères...), la mesure par réseaux de Bragg présente l'avantage déterminant (par rapport à d'autres méthodes optiques) d'être absolue tout en rendant possible, à tout moment, les déconnexions et reconnexions des capteurs ou du système de mesure, sans nécessiter de recalibrage (contrairement aux mesures interférométriques) puisque la mesure spectrale est une « signature » indépendante des fluctuations d'intensité.

Dès à présent, bien que l'intégration des systèmes de mesure ne soit pas encore très poussée, l'état de l'art de cette technique



permet le multiplexage de nombreux capteurs, permettant de réaliser des acquisitions déportées de qualité, les mesures pouvant s'effectuer par comparaison à un état de référence préenregistré.

De plus, des composants innovants fondés sur la photosensibilité dans les guides optiques sont actuellement en développement. Ils permettront, dans un proche avenir, d'améliorer et d'intégrer plus fortement les systèmes. Ainsi par exemple, un démultiplexage parallèle de plusieurs transducteurs de Bragg est possible à l'aide d'autres réseaux appariés qui, fixés sur des céramiques piézo-électriques, sont continuellement asservis aux premiers.

Finalement, au-delà de la simple utilisation des réseaux de Bragg comme transducteurs de mesure, toute une voie de R & D qui consiste à utiliser la photosensibilité pour réaliser des composants fibrés innovants est actuellement en train de prendre son essor. A ce jour, les instrumentations à réseaux de Bragg trouvent leur principal champ d'application dans les différents domaines industriels de la « surveillance des structures », des plus « basiques » (mines, terrains, béton...) aux plus techniques (composites...), mais d'autres secteurs comme la métrologie des domaines extrêmes (très hautes et très basses température) sont également des domaines applicatifs potentiels. La maintenance conditionnelle des grands sites et réseaux industriels (chimie, pétrochimie, réseaux d'eau et stations d'épuration...) est un autre domaine important à considérer, tandis

qu'à plus long terme l'automobile et le biomédical sont des secteurs d'application pour des systèmes de mesure à capteurs de Bragg économiques.

En attendant, compte tenu des expérimentations déjà réalisées, tant le Génie civil et les mines, que l'aéronautique ou le nucléaire civil sont très certainement les domaines où l'instrumentation à réseau de Bragg effectuera ses premières percées significatives au niveau industriel, et ce pour des raisons qui tiennent à la fois à la sécurité, à la sûreté et aux nouvelles fonctionnalités qu'apporte cette technologie au sein de ces industries. Nul doute que dans l'avenir, un certain nombre de structures rompront avec les concepts traditionnels.

Finalement, il apparaît comme certain que l'intérêt pour la technologie de mesure par réseaux de Bragg ira croissant, sous la double impulsion des gains économiques réalisés, aussi bien au niveau de l'aide à la conception/réalisation, que sur la maintenance ou la durée de vie des structures et matériels, et des considérations sur les conséquences socio-écologiques. Prophétisons que les immeubles, ponts, avions... seront très certainement considérés comme inacceptables s'ils ne possèdent pas de système intégré de contrôle de leur intégrité structurelle et de ce fait puissent mettre en péril des vies humaines ou l'environnement.



**TECHNIQUES  
DE L'INGÉNIEUR**

# L'expertise technique et scientifique de référence

**Techniques de l'Ingénieur** vous apporte une information précise et fiable pour l'étude et la réalisation de vos projets.

Actualisées en permanence, les **ressources documentaires** profitent aujourd'hui à plus de **300 000 utilisateurs** et sont la référence pour tout ingénieur, bureau d'études, direction technique et centre de documentation.

Depuis près de 70 ans, **3 500 experts** contribuent quotidiennement à développer, enrichir et mettre à jour cette documentation professionnelle unique en son genre.

L'intégralité de ces ressources représente plus de **9 000 articles**, répartis dans plus de **430 bases documentaires**, accessibles sur internet, en téléchargement PDF, et sur tablette.

## 4 BONNES RAISONS DE CHOISIR TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

- Une **actualisation permanente** du fonds documentaire
- Un **comité d'experts** scientifiques et techniques reconnus
- Une **collection scientifique et technique incontournable** sur le marché francophone
- L'espace actualité pour suivre les **tendances et innovations** de vos secteurs



## DES SERVICES ASSOCIÉS À CHAQUE ABONNEMENT

- **Service de questions-réponses (1)(2)** : interrogez les plus grands spécialistes des domaines couverts par vos bases documentaires. Votre abonnement vous permet en effet de poser des questions techniques ou scientifiques.
- **Les articles Découverte** : un article vous intéresse, mais ne fait pas partie de votre abonnement ? Techniques de l'Ingénieur vous offre la possibilité de l'ajouter.
- **Le Dictionnaire technique multilingue** : 45 000 termes scientifiques et techniques – avec illustrations et légendes – en français, anglais, espagnol, allemand.
- **Les Archives** : vos bases documentaires s'enrichissent et sont mises à jour en ligne en permanence. Les Archives conservent la mémoire de ces évolutions et vous permettent d'accéder aux versions antérieures de vos articles, ainsi qu'à ceux qui traitent des technologies plus anciennes.

Profitez également de l'impression à la demande <sup>(1)</sup>, pour commander une ou plusieurs éditions papier supplémentaires de vos bases documentaires (sur devis).

(1) Disponible pour la France, le Luxembourg, la Belgique, la Suisse et Monaco.

(2) Non disponible pour les établissements scolaires, écoles, universités et autres organismes de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE :



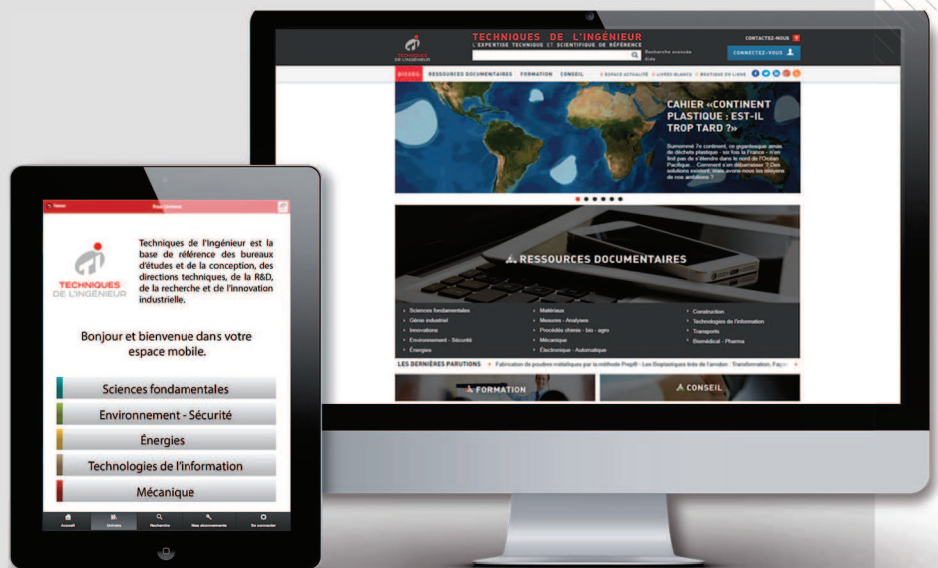
## LES + DES OFFRES PACK

- Un large choix de **+ de 60 thématiques** pour des besoins de contenu plus larges
- Des **tarifs préférentiels sur mesure** adaptés à vos besoins

## LES UNIVERS DOCUMENTAIRES

- Plus de 430 bases documentaires et plus de 9 000 articles en 14 univers

	Sciences fondamentales
	Environnement - Sécurité
	Énergies
	Technologies de l'information
	Mécanique
	Innovations
	Génie industriel
	Biomédical - Pharma
	Procédés Chimie -Bio - Agro
	Matériaux
	Mesures - Analyses
	Électronique - automatique
	Construction
	Transports



## POUR EN SAVOIR PLUS SUR LES OFFRES DE PACKS...

... contactez le service Relation Clientèle  
qui se chargera de vous rediriger vers un chargé d'affaires :

**Tél : +33 (0)1 53 35 20 20**

Email : [infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com)  
[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)

## LES AVANTAGES **TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR**

Le droit d'accès, annuel ou pluriannuel, permet une consultation illimitée des ressources documentaires sélectionnées, ainsi que le téléchargement des versions PDF des articles de référence ou fiches pratiques inclus dans ces ressources. Les droits d'accès sont proposés en monoposte ou multiposte.

### ▪ ACTUALISATION PERMANENTE

Mises à jour permanentes, publication de **nouveaux articles** de références et fiches pratique : un contenu complet sur le sujet qui vous intéresse, des alertes par email.

### ▪ DES SERVICES INCLUS

En plus de l'accès aux ressources documentaires, chaque souscription offre un **accès privilégié** à un **ensemble de services**.

### ▪ MOBILITÉ



Votre abonnement étant **100 % web**, vous pouvez le consulter à tout moment, sur n'importe quel ordinateur ou sur nos versions **iPad et Android**.



Pour accompagner vos équipes et projets,  
**CHOISISSEZ**

les offres de formation et conseil

## MONTEZ EN COMPETENCE

- Des formations personnalisées, réalisées au sein de votre établissement et à vos dates
- Un accompagnement à la mise en conformité réglementaire
- Des missions d'audit et de recommandations techniques

## LES ENGAGEMENTS **TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR**

- Un réseau d'experts reconnus pour vous conseiller
- Une veille scientifique et technique pour mieux décider
- Les dernières obligations HSE pour être en règle
- Les clés en management des hommes et des projets pour gagner en efficacité

Consultez l'intégralité  
des programmes sur le site  
de Techniques de l'Ingénieur,  
espaces **FORMATION** et **CONSEIL**

[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)



RESSOURCES  
DOCUMENTAIRES



FORMATION



CONSEIL