

CAPTEURS À FIBRES OPTIQUES

J.-P. GOURE

*Laboratoire Traitement du Signal et Instrumentation, Unité
Associée au CNRS 842, 23, Rue du Docteur Paul Michelon, F-42023
Saint-Etienne Cedex 2, France*

RESUME

L'article fait le point sur le développement des capteurs à fibres optiques et donne quelques indications sur les techniques utilisées. Les caractéristiques optiques des fibres permettent de réaliser des capteurs avec d'excellentes performances qui découlent de l'amélioration technologique. Une revue des principales méthodes actuellement proposées est faite. En pratique, la grandeur physique à mesurer peut moduler soit l'intensité, soit la phase de l'onde électromagnétique transportée dans la fibre. Quelques exemples de capteurs déjà élaborés ou en voie de réalisation sont

SUMMARY**FIBER OPTICAL SENSORS**

This paper gives some indications on the development of fiber optical sensors and presents a short introduction to their principles. The optical characteristics of fiber allow the realization of sensors and these techniques are capable of producing measurements of adequate accuracy and stability. A review of the principal methods actually used is made. In practice, the physical variables to be measured can modulated either the intensity, or the phase of the electromagnetic wave propagated in the fiber. Some examples of fiber optical sensors actually realized are described.

1) Introduction

Les capteurs à fibres optiques se présentent dans une large mesure comme une retombée des recherches en télécommunications optiques. Pour transmettre des signaux sur de grandes distances, on s'est attaché à réaliser des fibres le plus possible insensibles aux phénomènes susceptibles de perturber la transmission. Ainsi une grande connaissance de la sensibilité des fibres vis-à-vis des grandeurs d'environnement a été acquise et est utilisée dans la réalisation de capteurs. Les premiers capteurs et appareillages à fibre ont été élaborés à partir des fibres multimodales ou unimodales en silice dopée étirées pour les télécommunications. Deux tendances nouvelles se font jour. D'une part, on réalise des fibres spéciales pour capteurs appelées parfois "fibres exotiques" (dénomination plus vaste que celle qui recouvre les fibres à maintien de polarisation, les fibres PANDA ou autres) qui sont des composants spécifiques avec des dopages, des dimensions et des formes particulières. D'autre part, on utilise de nouveaux matériaux et en particulier des matériaux plastiques ou des verres spéciaux pour l'Infra-Rouge. Compte-tenu de l'intérêt croissant de l'industrie automobile pour l'optoélectronique, il paraît assez évident que les fibres plastiques se trouvent en terrain très favorable.

Deux types de fibres sont utilisés : les fibres multimodales dont le diamètre de coeur est grand (50-100 μm ou plus pour les fibres silice ou plastique). Elles laissent passer une grande quantité d'énergie et présentent une connectique moins délicate. Les fibres unimodales dont le coeur est plus petit (5-7 μm pour les fibres silice) présentent un intérêt pour les capteurs car elles permettent de travailler sur la phase de l'onde ainsi que sur la polarisation.

De très nombreux articles ont été publiés depuis une dizaine d'années. Le but de cet article n'est pas de citer toutes les possibilités de réalisation et tous les prototypes disponibles mais de donner quelques exemples et idées générales. Le lecteur trouvera de plus amples informations dans les articles de synthèse ou ouvrages cités en référence /1-5/.

2) Définition des capteurs à fibres optiques

Les capteurs sont des éléments essentiels de tout système complexe de contrôle et de mesure. Ils assurent l'acquisition de paramètres externes ou internes au système, donc la surveillance et l'asservissement de ce système. Parmi eux, les capteurs à fibres optiques présentent des qualités remarquables et certains avantages sur les capteurs traditionnels : immunité aux champs électromagnétiques, insensibilité électrique (haute tension, parasites électriques), large bande passante (400 Mhz, 1.5 Ghz), absence de rayonnement du signal à l'extérieur de la fibre, faible poids, dimensions réduites et grande souplesse de configuration géométrique, possibilité de fonctionner à haute température, en milieu corrosif ou explosif, grande sensibilité, inertie chimique. On réalise des capteurs qui, dans certaines applications, sont plus performants que ceux issus des composants traditionnels.

Un capteur à fibres optiques est défini comme un système à une ou plusieurs fibres capable soit de transporter l'information recueillie entre l'extrémité des fibres et le milieu extérieur, soit de coder optiquement l'information liée à la grandeur à mesurer, l'influence de celle-ci se réalisant sur une grande longueur. Dans le premier cas, les fibres sont passives : elles ne servent qu'à amener la lumière et/ou à retransmettre le signal fourni par un dispositif de mesure basé sur un autre phénomène physique (capteurs extrinsèques). Dans le second cas, elles seront actives : la grandeur à mesurer agit directement ou indirectement grâce à un revêtement spécial entourant le conducteur de lumière (capteurs intrinsèques) [fig. 1].

Les capteurs colorimétriques, les détecteurs de passage affectés au tri, les proximètres, les capteurs d'identités de phénomènes diphasiques, les pH mètres sont des capteurs à fibre passive. Par contre dans le cas du gyroscope, de l'ampèremètre, de l'hydrophone, du thermomètre, de l'hygromètre, les fibres sont actives.

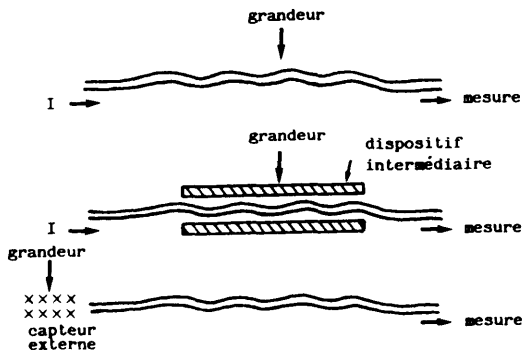


Figure 1

Différents types de capteurs : a) fibre active - b) fibre indirectement active - c) fibre passive

3) Capteurs à modulation d'intensité

Les capteurs à modulation d'intensité ont été développés très tôt. Ils offrent les avantages de la simplicité, de la sûreté, du moindre coût. Cependant pour obtenir une bonne stabilité, il faut s'affranchir des problèmes de variation d'intensité de la source, des pertes variables des fibres. On utilise principalement la modulation par pertes dues aux micro-courbures et la modulation par réflecteur et par masque en mouvement.

Dans le premier cas, des microcourbures sont créées artificiellement en déformant localement la fibre. Une partie de la lumière est transférée dans la gaine : certains rayons parviennent sur l'interface entre la gaine et le coeur avec un angle d'incidence supérieur à l'angle critique et sont en partie réfractés dans la gaine. Le capteur décrit dans la **figure 2** est un capteur de pression ou de déplacement. L'intensité détectée est fonction de la pression exercée. La périodicité de la perturbation est choisie pour un couplage maximum entre les modes radiés.

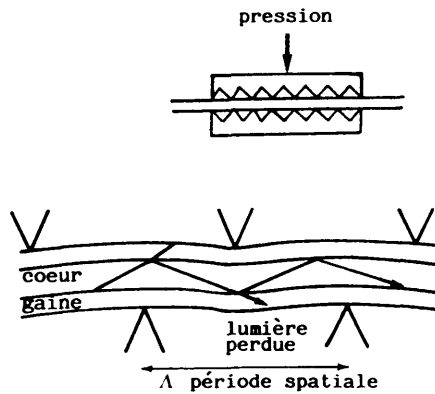


Figure 2

a) lumière perdue - b) lumière guidée

Dans le cas de la modulation externe, on réalise un couplage entre des fibres d'ouverture numérique $\sin \theta$. Une fibre amène la lumière, la seconde en récupère une partie. Un interrupteur optique est constitué par deux fibres couplées avec ou sans optiques. Un masque lié à une pièce mobile coupe une partie du faisceau, [fig. 3]. L'un des plus anciens capteurs à fibres optiques mis au point fut le capteur réflecteur (proximètre) qui peut prendre plusieurs formes, fibre à coeur multiple, à coeur double, une seule fibre munie d'un coupleur. Le paramètre mesuré est le déplacement.

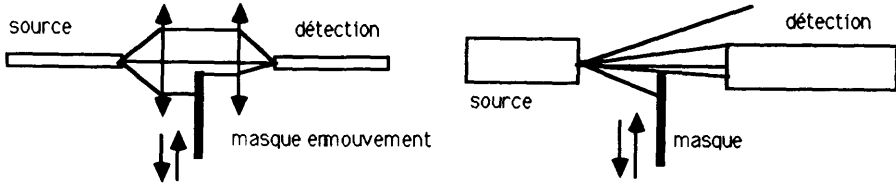


Figure 3

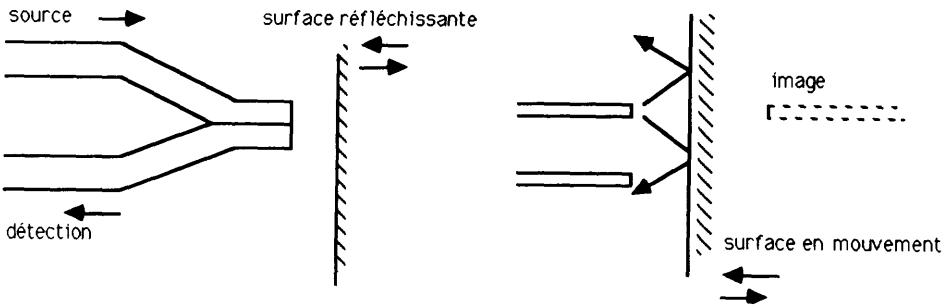


Figure 4

4) Capteurs à modulation de phase

Les capteurs interférométriques à fibres optiques sont des instruments de mesure très sensibles (plus performants que la plupart des autres capteurs). Ils ont de plus une bonne dynamique. On a ainsi réalisé des hydrophones, des magnétomètres, des accéléromètres, des jauges de contraintes, des thermomètres.

En général, la phase $\phi(\tau)$ d'une onde lumineuse se propageant dans une fibre optique est plus sensible à des influences extérieures que n'importe quel autre paramètre de propagation. Ainsi les capteurs à fibres optiques qui utilisent la variation de phase sont capables des plus hautes sensibilités. Dans cette catégorie de capteurs, nous trouvons ceux qui reflètent la perturbation de la phase absolue et qui sont appelés capteurs interférométriques aussi bien que ceux qui reflètent le déplacement relatif de la phase de deux modes polarisés et qui sont appelés capteurs polarimétriques. Comme chaque mode de propagation permis dans une fibre possède sa propre phase et ses propriétés de polarisation, c'est uniquement avec une fibre monomode qu'une phase définie et des états de polarisation existent en chaque point le long de la fibre (quoiqu'ils puissent varier d'un point à un autre) et que l'on peut s'attendre à extraire de manière optimale, à partir de chaque sorte d'état, l'information imposée sur la lumière propagée par les champs que l'on essaie de mesurer. Les capteurs interférométriques et polarométriques de cette classe sont essentiellement basés sur un interféromètre Mach-Zehnder, c'est-à-dire sur des "ponts" de phase optique permettant la détection de la perturbation en comparant les phases dans les deux "bras" [fig. 5].

Les deux ondes E_1 et E_2 sont représentées par : $\tilde{E}_1 = E_{01} e^{i\omega t}$ et $\tilde{E}_2 = E_{02} e^{i[\omega t - \varphi(t)]}$ où $\varphi(t)$ représente le déphasage de l'onde E_2 sur l'onde E_1 . L'onde résultante en un point r de l'espace est donnée par $\tilde{E} = \tilde{E}_1 + \tilde{E}_2$ et l'intensité correspondante par : $I = \tilde{E} \tilde{E}^*$ où le symbole * représente le nombre complexe conjugué.

Il vient :

$$I = \tilde{E}_1 \tilde{E}_1^* + \tilde{E}_2 \tilde{E}_2^* + \tilde{E}_1 \tilde{E}_2^* + \tilde{E}_1^* \tilde{E}_2$$

$$I = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} (e^{i\varphi(t)} + e^{-i\varphi(t)})$$

et dans le cas où $I_0 = I_1 = I_2$:

$$I = 2I_0 [1 + \cos(\varphi(t))]$$

La variation d'intensité δI est liée à la variation de phase $\delta\varphi$ par $\delta I = 2I_0 \sin \varphi(t) \delta\varphi(t)$. On voit aisément que le maximum de sensibilité sera obtenu pour $\sin \varphi(t) \approx 1$, c'est-à-dire si les deux bras de l'interféromètre sont en quadrature. On devra donc intégrer un modulateur qui remplira ce rôle. Le montage de la **figure 5** est un montage homodyne. Dans un montage hétérodyne le faisceau est décalé en fréquence en passant à travers une cellule de Bragg [fig. 6].

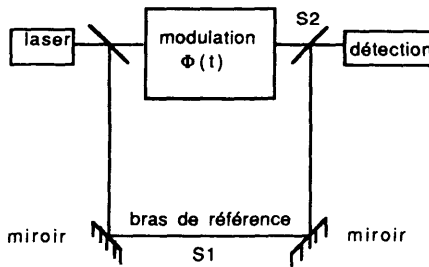


Figure 5
Principe d'un interféromètre de Mach Zehnder

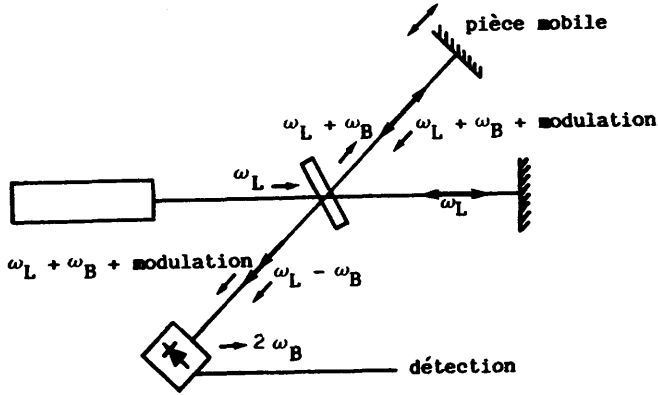


Figure 6
Montage hétérodyne

Si les amplitudes dans les deux bras sont égales, l'amplitude résultante est :

$$\tilde{S} = E_0 e^{i(\omega_L - \omega_B)t} + E_0 e^{i[(\omega_L - \omega_B)t - \varphi(t)]}$$

Le signal issu du détecteur est donné par $I = \tilde{S} \tilde{S}^*$. Ceci se transforme et on obtient $I = E_0^2 [1 + (2 \omega_B t - \varphi(t))]$. On augmente ainsi le rapport signal/bruit.

La variation de phase peut être due à plusieurs grandeurs par exemple à une variation de température qui change l'indice de réfraction et les dimensions d'une fibre monomode en silice de longueur L .

$$\text{On a } \delta\Phi = (2\pi L / \lambda_0) \left\{ \alpha + \partial n / \partial t \right\} \partial T.$$

Avec pour la silice pure : $\alpha = 5,5 \cdot 10^{-7} / ^\circ\text{C}$ et $\partial n / \partial T = 0,68 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$. On obtient une variation de phase de 106 radians par mètre et par degré. De même une variation de pression entraîne une variation de phase :

$$\delta\Phi = (2\pi L / \lambda_0) \left\{ \epsilon_1 - n^2 / 2 (P_{11} + P_{12}) \epsilon_r + P_{12} \epsilon_l \right\}$$

où P_{11} et P_{12} sont les constantes photoélastiques de la silice, ϵ_r et ϵ_l les contraintes radiale et longitudinale. On peut ainsi obtenir dix radians par changement de pression de 1 Bar.

Dans les montages polarimétriques, les deux bras sont constitués à partir des deux modes polarisés d'une fibre monomode et la différence de phase introduite $\varphi(\tau)$ est déduite de l'état de polarisation résultant. Un exemple d'un tel appareillage est le moniteur de courant à haute tension [fig. 7]. L'induction B créée par le courant i fait tourner d'un angle θ la lumière polarisée rectilignement transportée par la fibre (effet Faraday).

Le gyroscope est basé sur un interféromètre de Sagnac qui utilise une seule fibre monomode. Les deux bras sont constitués à partir des directions opposées de propagation [fig 8]. Un faisceau est envoyé sur les deux extrémités d'une boucle de fibre optique de rayon R . Lorsque la boucle tourne avec une vitesse angulaire Ω , les deux faisceaux qui se propagent en sens inverse présentent une différence de phase $\delta\phi$. Une explication sommaire peut être donnée de la manière suivante. Dans un référentiel fixe (par exemple avant tout mouvement), le temps de parcours τ de l'onde et le trajet Δl parcouru par la lame séparatrice pendant τ ont pour valeur si l'on était dans le vide :

$$\tau = 2\pi \frac{R}{c} \text{ et } \Delta l = R\Omega \tau$$

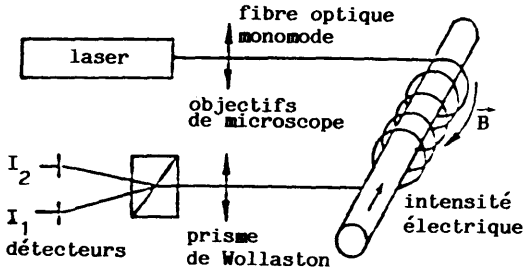


Figure 7
Ampèremètre à fibre

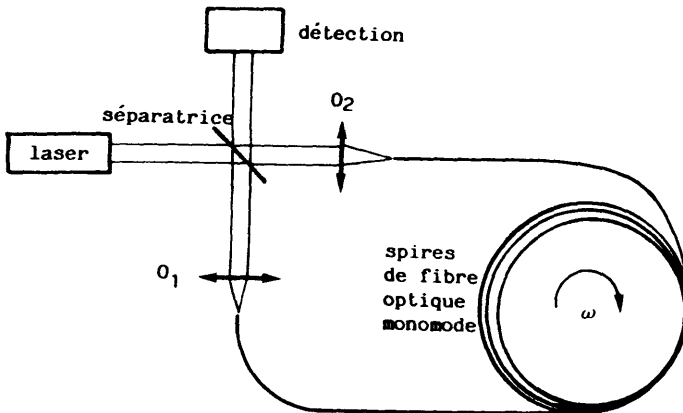


Figure 8
Principe du gyroscope à fibre

La différence de trajet entre les deux ondes circulant en sens inverse est donnée par $L_1 - L_2 = 2\Delta l$.

Le signal qui va en sens contraire à la rotation imposée Ω arrive avant l'autre (à vitesse

constante) et la différence de temps est : $\Delta\tau = \frac{L_1 - L_2}{c} = \frac{4\pi R^2 \Omega}{c^2}$

Dans un milieu d'indice $n = c/v$ et pour N tours on a : $\Delta\Phi = 4\pi \frac{NR^2}{v^2} \omega \cdot \Omega$

On arrive ainsi à obtenir 10^{-7} radian avec de 1 km de fibre de silice enroulée sur un tambour de rayon $R = 10$ cm. On utilise en pratique un grand nombre de spires. L'avantage de ce montage réside dans le fait que les deux faisceaux (référence et mesure) transitent dans une seule et même fibre, que seule la différence de phase recherchée est obtenue en principe et que les autres effets (température...) sont éliminés. Les inconvénients sont les suivants : le laser est sensible par sa position face au faisceau de retour ce qui augmente le bruit ; la fibre monomode transporte en fait deux modes dégénérés HE_{11} . La qualité de la réjection unimodale nécessaire à assurer la réciprocité doit être suffisante pour éviter les dérives des biais. On emploie des fibres biréfringentes à conservation de polarisation et des diodes superluminescentes, ce qui permet de résoudre le problème de la réciprocité de la polarisation. L'ensemble est donc un capteur compliqué.

Lorsque l'on éclaire une fibre fortement multimode en lumière cohérente, on observe en sortie de fibre une granularité due aux interférences intermodales ce qui conduit en champ lointain à la présence d'une figure de speckle. Nous supposons que la fibre est parfaite et n'est pas courbée. En sortie de fibre à la distance z et en un point de coordonnées cylindriques (r, φ) , l'amplitude du champ résultant $E(r, \varphi)$ est la superposition de chaque mode propagé dans la fibre.

$$E(r, \varphi, z, t) = \sum_{m=0}^{N-1} \tilde{E}_m(r, \varphi) e^{-i(\omega t - \beta_m z)} e^{-i\psi_m}$$

$\tilde{E}_m(r, \varphi)$: amplitude complexe de chaque mode m pour un point (r, φ)

ω : pulsion imposée par la source

β_m : constante de propagation du mode m

ψ_m : phase à l'origine ($z = 0$) du mode m .

On tient compte de la symétrie de la fibre en écrivant la relation suivante :

$$\tilde{E}_m(r, \varphi) = E_m(r) e^{-i\nu_m \varphi}$$

$E_m(r)$ est l'amplitude radiale (réelle) de chaque mode m et ν_m est un nombre entier représentatif de la dépendance azimutale du champ du mode m . L'intensité pour cette fibre sans contraintes est alors donnée par : $I = E(r, \varphi) E^*(r, \varphi)$.

Si on impose ensuite un mouvement sinusoïdal à la fibre, il s'ensuit une variation dans la propagation, ce qui revient à ajouter une phase supplémentaire dans l'expression des champs des différents modes. On supposera que la contrainte est suffisamment faible pour ne pas changer l'amplitude $E_m(r)$. L'intensité totale sous contrainte I_c au point (r, φ) en sortie de fibre est alors donnée par :

$$I_c = \sum_{m=0}^{N-1} E_m^2(r) + 2 \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} E_m(r) E_n(r) \cos \left[(\beta_n - \beta_m) z + \psi_m - \psi_n + (V_m V_n) \varphi + (\alpha_n \alpha_m) \right]$$

$n \neq m$

Ainsi une variation de paramètres extérieurs (vibrations...) se traduit par une modification du guide optique et il en résulte un changement de la figure de speckle. On peut donc imaginer de réaliser ainsi un capteur. Ce phénomène peut être utilisé pour détecter approximativement la localisation d'une contrainte imposée en un point donné (capteur de présence).

5) Capteurs chimiques

De nombreux capteurs chimiques ou biologiques sont en cours d'étude (mesure de PH, de concentration de gaz, de liquide...). Il est difficile dans un tel article de les citer, nous donnerons simplement quelques exemples .

Capteurs à modulation d'intensité :

Un capteur a été réalisé à l'aide d'un capillaire revêtu d'une couche absorbant le gaz recherché et placé dans l'atmosphère à analyser. On injecte de la lumière provenant d'une D.E.L. modulée. Par suite de la variation de l'indice de gaine, on observe des pertes qui dépendent du gaz et de sa concentration. Le signal est reçu sur un phototransistor et démodulé. La longueur du capillaire est de 90mm. Ce conduit est donc un cylindre permettant d'obtenir environ 600 réflexions. La surface extérieure est recouverte avec une couche de colorant oazine perchlorate ; le gaz absorbé et mesuré est l'ammoniac [fig. 9]. On observe une variation de transmittance à 566 nm de 0,08% à 0,5% pour une variation de 10 à 1 000 ppM de NH_3 . Un dispositif identique permet de mesurer la proportion de CH_4 . D'autres composés ont été testés : benzène, acétone, ...

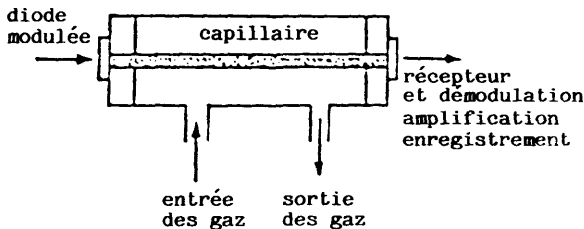


Figure 9
Capteur de gaz

Capteurs à modulation de phase :

Un dispositif sensible à l'hydrogène est obtenu en revêtant une fibre optique d'une couche de palladium (10 μm d'épaisseur et 3 cm de long) par pulvérisation cathodique. La fibre est l'un des bras d'un interféromètre. En présence d'hydrogène, il y a formation d'hydruide de palladium. Ce produit provoque des contraintes axiales et longitudinales qui modifient la phase de l'onde. On a un déplacement des franges (3 pour 0,6% d'hydrogène).

Capteurs extrinsèques :

- dispositifs à extinction de fluorescence : une première fibre amène la lumière excitatrice sur un indicateur, une seconde fibre reprend l'émission de fluorescence :
- dans le cas du capteur d'oxygène, l'indicateur est le pérylène dibutyralé, la lumière excitatrice dans le bleu, la lumière émise dans le vert,
- dans le cas du détecteur de PH, l'indicateur est la fluoresceïnamine ; la source est une lampe blanche (250W - 5 000 lumens) ; la fibre a un diamètre de 45 mm. Un filtre d'émission fonctionne à 520 nm avec une bande de 8,2 nm.

6) Evolution et tendances

Une caractéristique des capteurs futurs est certainement les possibilités énormes que peuvent apporter les circuits en optique intégrée. On sait d'ores et déjà réaliser des interféromètres en optique intégrée. Les avantages de ces technologies résident dans la miniaturisation et dans la suppression des vibrations.

TABLEAU

I capteur à modulation d'intensité ; A capteur fibre active ;
P capteur à modulation de phase ; NA capteur fibre passive.

Grandeur mesurée	Type de capteur	Caractéristiques	Grandeur mesurée	Type de capteur	Caractéristiques
Température	I NA P A	Jusqu'à 1500°C 100°(radian)/m°C	Hydrophone	P A	3 à 10 dB
Déplacement (proximètres)	I NA	0 à 15 cm	pH	I NA	
Niveau	I NA		Concentration (Gaz liquide)	I NA	NH ₃ , CH ₄ , H ₂
Vibration	I A P A	très sensible très sensible	Champ magnétique	P A	0,1 à 10 ⁵ nT
Pression	I A P A	10 radians par bar 11,4 rd par contrainte longitudinale	Intensité de courant	P A	
			Gyroscope	P A	10 ⁻³ à 10 ² deg/h

Parmi les facteurs d'évolution, il est notable que l'on se dirige vers les réseaux de capteurs passifs. En production automatisée, le nombre de capteurs utilisés est en augmentation constante. Les réseaux de capteurs à fibre optique offrent une autre solution au problème de câblage que celle des paires torsadées en utilisant une seule fibre pour connecter au poste de contrôle plusieurs capteurs passifs ; les informations sont envoyées dans cette fibre grâce à des multiplexages soit en longueur d'onde (multiplexage spectral), soit temporel.

La solution à fibre optique peut être moins onéreuse car elle réduit le câblage avec une économie de poids et d'espace. Une autre tendance se fait jour dans des techniques de capteurs répartis. On utilise une fibre spécialement traitée sensible à un paramètre donné sur toute sa longueur. Elle peut ainsi détecter le paramètre (température, vibration, etc...) dans une zone étendue. Ceci offre ainsi la possibilité d'étudier les variations du paramètre le long de la fibre.

7) Conclusion

Cet article donne quelques indications sur le développement des capteurs à fibres optiques. De très nombreux capteurs à fibres ont été pensés, conçus ou réalisés en laboratoire. La plupart sont encore des appareils de laboratoire et n'ont pas encore atteint le stade industriel. Ils se trouvent en concurrence avec d'autres techniques bien établies et souvent économiques. Cependant les capteurs à fibres optiques ont des potentialités d'utilisation importantes. L'une d'entre elle est la spécificité de cette technologie liée à son utilisation dans des atmosphères explosives ou en présence de parasites électriques. Les autres résident dans la dimension, dans les possibilités offertes de mesures sans contact, voire même d'environnement à haute température. Il faut ajouter à cela la précision et les possibilités offertes par le multiplexage. De plus le développement des appareillages à fibre (coupleur, polariseur, amplificateur...) qui pourront se mettre en ligne avec la fibre est un facteur favorable tout comme l'optique intégrée.

REFERENCES

- /1/ CURSHAW, B., "Optical fibre sensing and signal processing" Peter Peregrinus (1984).
- /2/ PITT, G.D., EXTANCE, P., NEAT, R.C., BATCHELDER, D.N., JONES, R.E., BARNET, J.A., PRATT, R.H., Optical-fibre sensors, IEE Proc. 132, Pt J, 4 (1985).
- /3/ SASAYAMAT, T., OHO, S., KUROIWA, H., SUSUKI, S., "Recent developments of optical fiber sensors for automotive use", Fiber and Int. Opt. 7 (1987).
- /4/ JEUNHOMME, L.B., "Single-mode fibre optics", Optical Engineering, Vol 4, Marcel Dekker (1983).
- /5/ BOISDE, G., "Capteurs chimiques à fibres optiques", Mesucora (1988).