

CAPTEURS A FIBRES OPTIQUES

par G. VIOSSAT,

Ecole Nationale Supérieure de Physique
de Marseille.

L'essor actuel des capteurs à fibres optiques résulte d'un besoin industriel, mais surtout il profite de l'effort exceptionnel concernant les télécommunications optiques. Cet effort a permis de résoudre les problèmes liés tant à la fibre elle-même qu'aux composants d'extrémité (émetteur et récepteur de lumière).

Les nouveaux besoins de la robotique accentuent cette tendance, et le développement de la micro-optique et de l'optique intégrée sera bénéfique pour ces dispositifs.

De nombreuses idées ont été proposées pour des capteurs à fibres. Les principes utilisés paraissent souvent séduisants par leur simplicité, mais nous montrerons sur quelques exemples que des difficultés technologiques ou économiques limitent leur intérêt dans certains cas.

INTERETS DES CAPTEURS A FIBRES OPTIQUES.

On peut les résumer ainsi :

- immunité aux parasites électromagnétiques ;
- possibilité de recueillir l'information sans contact électrique (isolement galvanique) ;
- utilisation dans des milieux hostiles : radioactifs, toxiques... ;
- sécurité vis-à-vis des risques d'incendie ;
- grande sensibilité due à la possibilité d'interaction sur de longues distances avec la grandeur à mesurer ;
- souplesse, poids et encombrement réduits.

Par contre, un grand inconvénient : les fibres optiques sont souvent sensibles simultanément à plusieurs grandeurs physiques et il sera nécessaire de trouver des méthodes pour ne les rendre sensibles qu'à une seule grandeur.

1. CAPTEURS DONT LA ZONE ACTIVE EST A L'EXTERIEUR DE LA FIBRE.

La fibre ne sert qu'à véhiculer la lumière entre la zone active et l'endroit où le signal lumineux est traité. La quasi-totalité

des capteurs qui ont atteint le stade du développement industriel est de ce type.

L'exemple le plus simple est le détecteur de passage qui n'est autre que la barrière photoélectrique (*) classique dont la source et le détecteur sont déportés (fig. 1).

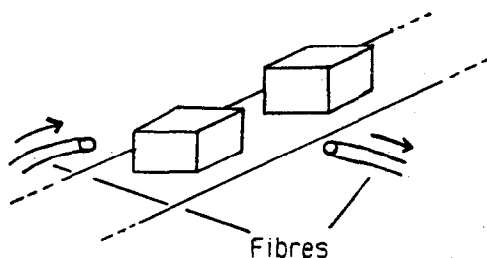


Fig. 1. — Barrière photoélectrique déportée.

Son application au comptage et par extension à la mesure de position angulaire ou linéaire est évidente. Signalons que, souvent, ces barrières fonctionnent dans l'infrarouge, avec une modulation de manière à s'affranchir des perturbations éventuelles de la lumière ambiante.

Un autre exemple est une sonde de température qui connaît un succès commercial certain (fig. 2).

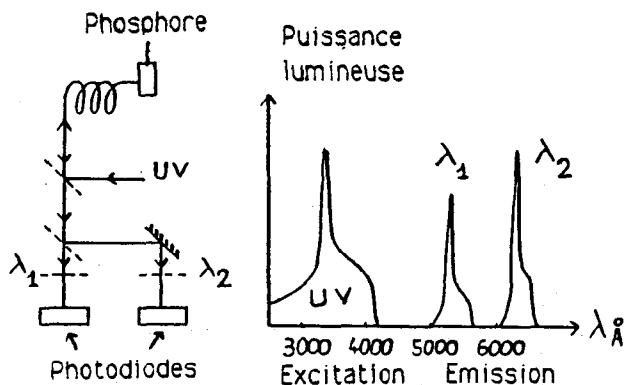


Fig. 2. — Capteur de température.

(*) N.D.L.R. : Détecteur de passage à cellule photoélectrique.

On excite, par l'intermédiaire de la fibre optique, un phosphore déposé à son extrémité sensible, par un rayonnement ultra-violet. On choisit deux raies de fluorescence dont l'efficacité d'émission varie en sens opposé avec la température. Le rapport des intensités de ces 2 raies donne une correspondance directe avec la température qui se mesure ainsi avec une précision de l'ordre du dixième de degré dans une gamme de -50°C à $+250^{\circ}\text{C}$.

2. CAPTEURS DONT L'EXTREMITÉ DE LA FIBRE UTILISE L'EFFET DE FILTRAGE SPATIAL.

Les très faibles dimensions transverses de la fibre procurent ce filtrage.

Comme premier exemple, nous choisirons le capteur de proximité (fig. 3).

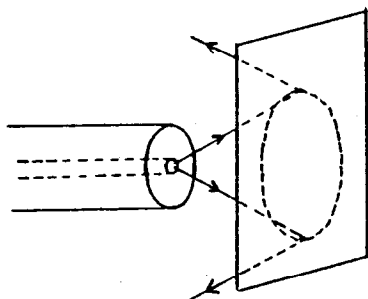


Fig. 3. — Détecteur axial de proximité.

La lumière issue de la fibre en un faisceau divergent est réfléchi sur l'objet dont on veut détecter la présence, vers la fibre dans laquelle elle est réinjectée. Le coefficient de recouplage, proche de 100 % au contact, n'est plus que très faible pour un éloignement de quelques diamètres de cœur.

L'interface entre deux fibres mises bout à bout constitue de même un capteur de déplacement extrêmement sensible (fig. 4).

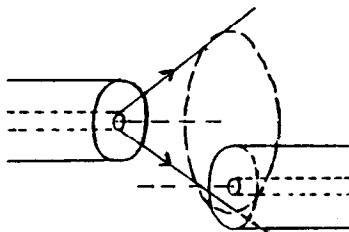


Fig. 4. — Détecteur transversal de proximité.

La perte d'insertion de la connexion optique ainsi constituée, nulle en principe lorsqu'elles sont parfaitement alignées, devient pratiquement infinie pour un désaxement supérieur à un diamètre de cœur. Une résolution du micron pour une fibre multimode et du $1/100^{\text{e}}$ de micron pour une fibre monomode est ainsi obtenue.

Ce type de capteur a été adapté à la mesure des accélérations et des vibrations (fig. 5).

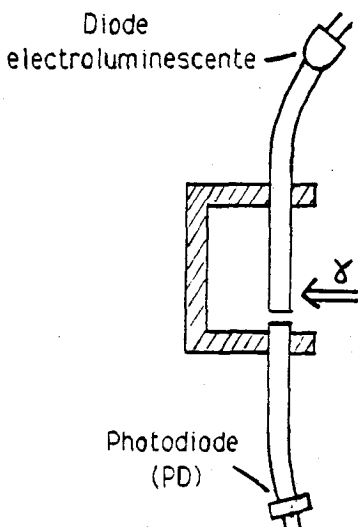


Fig. 5. — Accéléromètre.

Une fibre est montée de façon rigide alors que l'autre est positionnée en porte-à-faux. Cette dernière constitue sa propre masse d'épreuve et se déplace sous l'action d'une accélération transverse avec une fréquence de résonance élevée. Une masse supplémentaire peut être ajoutée pour augmenter la sensibilité aux dépens de la bande passante. Doté d'un diaphragme, un dispositif de ce type constitue également un excellent microphone.

Les capteurs de cette seconde catégorie sont, avant tout, extrêmement sensibles et de la plus grande simplicité. Ils peuvent être réalisés sous un volume et à un coût très réduits. Par contre, la mesure effectuée est celle d'une variation de puissance optique qui est une *fonction non-linéaire du déplacement à mesurer*.

3. CAPTEURS DONT LE PARAMETRE A MESURER MODIFIE LES CONDITIONS DE GUIDAGE DE LA LUMIERE DANS LA FIBRE.

Le confinement de la lumière dans le cœur de la fibre peut être effectué soit par la déformation du dioptre, soit par la modification relative des 2 indices.

La déformation du dioptre est utilisée en particulier dans la jauge de contrainte à micro-courbures (fig. 6).

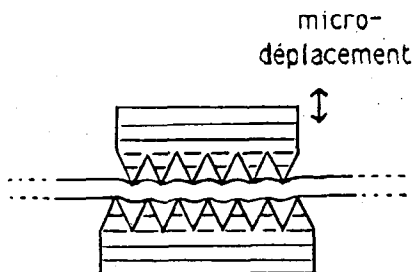


Fig. 6. — Jauge de contraintes.

La déformation de la fibre entraîne l'apparition de très faibles rayons de courbure et la fuite de la lumière dans la gaine. On peut montrer que, dans une fibre à gradient d'indice, on peut augmenter considérablement la sensibilité d'un tel dispositif en choisissant convenablement la période spatiale de la dentelure.

Dans le contrôleur de batterie, la gaine de la fibre est supprimée de manière à mettre en contact direct le cœur avec l'électrolyte (fig. 7).

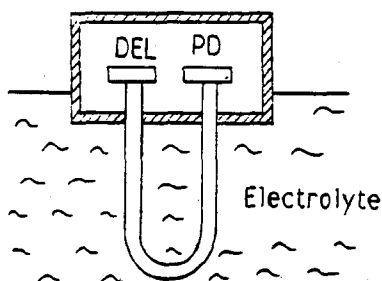


Fig. 7. — Contrôleur de batterie.

L'indice de réfraction de l'électrolyte dépend de sa densité, donc de l'état de charge de la batterie.

4. CAPTEURS UTILISANT LES MODIFICATIONS DE PROPAGATION DE LA LUMIERE DUES A L'INTERACTION DIRECTE DE LA GRANDEUR A MESURER AVEC LA MATIERE CONSTITUANT LA FIBRE.

4.1. Montages non interférométriques.

Une forte augmentation de l'absorption des fibres optiques se produit sous l'influence de rayonnement nucléaire à haute énergie. Cet effet, renforcé par la présence de certaines impuretés dans la fibre, peut être mis à profit pour fabriquer un dosimètre très simple puisqu'il suffit de mesurer sur une longueur de fibre la perte de transmission, car cette perte est irréversible.

La détection de particules relativistes peut également se faire dans une fibre par la lumière émise par effet Cerenkov et guidée par la fibre elle-même jusqu'au détecteur qui peut être situé loin de la zone d'interaction.

L'un des capteurs à fibre les plus intéressants est l'ampèremètre à fibre optique. En effet, la mesure de fortes intensités sous de hautes tensions pose de difficiles problèmes de transformateur d'intensité et de transformateurs d'isolement (fig. 8).

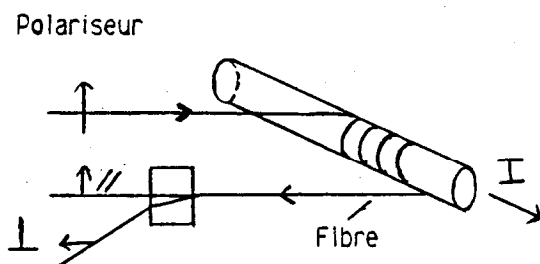


Fig. 8. — Ampèremètre à effet Faraday.

Le principe de cet appareil est très simple. On entoure le câble électrique avec une fibre monomode. Le courant traversant le câble crée un champ magnétique colinéaire avec la fibre et ce champ engendre un pouvoir rotatoire (effet Faraday). La mesure de l'angle de rotation de la polarisation de la lumière est proportionnelle à l'intensité électrique.

Pour $\lambda = 633 \text{ nm}$, $\theta = 0,26^\circ \cdot \text{kA}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ de la fibre.

On obtient des précisions de l'ordre de 1 % pour des intensités variant entre 50 A et 1 200 A.

Une des difficultés de la réalisation est qu'il faut que la fibre n'entraîne un pouvoir rotatoire que sous l'action du champ magnétique. Or, ce n'est en général pas le cas.

En effet, une fibre possède une biréfringence intrinsèque due essentiellement, d'une part, à l'ellipticité du cœur, et d'autre part, aux contraintes dues à la différence de coefficient d'expansion thermique entre le cœur et la gaine. De plus, lorsqu'on enroule la fibre sur un mandrin, il se crée une biréfringence de courbure. Si cette biréfringence était parfaitement contrôlée, on pourrait en tenir compte, mais au prix d'une baisse importante de la sensibilité. Ce n'est malheureusement pas souvent le cas. Toutefois, il existe quelques remèdes pour contourner cette difficulté que nous ne développerons pas.

4.2. Montages interférométriques.

Un bon capteur doit n'être sensible qu'au paramètre à mesurer. Dans les capteurs à fibre, il n'est pas rare que plusieurs paramètres influencent le résultat. Pour s'affranchir de ces grandeurs d'influence, on peut utiliser une méthode interférométrique qui revient à une méthode de zéro. Dans un bras de l'interféromètre, on fait agir tous les paramètres d'influence, et dans l'autre bras, on fait agir, en plus de ces paramètres, la grandeur à mesurer. La comparaison des effets dans les deux bras permet de mesurer le paramètre désiré. Cette méthode possède une très grande sensibilité, car une variation de chemin optique de une longueur d'onde correspond sur un trajet de un mètre à une variation d'indice de l'ordre de 10^{-6} .

Dans le cas de l'hydrophone, une fibre est soumise à une pression hydrostatique, son indice se modifie ainsi que ses dimensions géométriques (fig. 9).

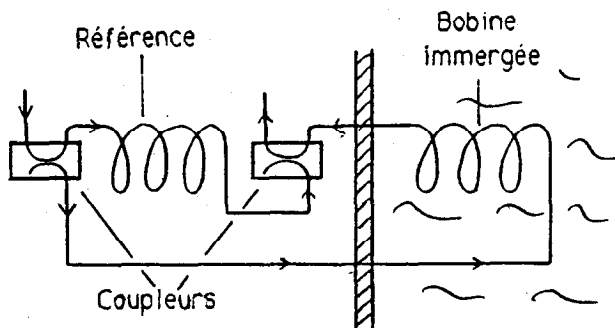


Fig. 9. — Hydrophone à fibre optique.

Il en résulte une variation de chemin optique que l'on compare à celui d'une bobine de référence dans un interféromètre de Mach Zehnder. Le faible effet de la pression peut être

multiplié par un grand nombre de tours. La bobine immergée détecte les ondes acoustiques avec une sensibilité supérieure à celle des meilleurs hydrophones piézoélectriques.

Dans certains montages interférométriques, il faut faire très attention aux variations de température dans chaque branche. En effet, le coefficient d'expansion thermique de la silice est voisin de $5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$, alors que sa variation d'indice de réfraction est de $-10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Un calcul simple montre que la variation

de phase $d\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} d(ne)$ est de l'ordre de $100 \text{ rad.}^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

pour une longueur d'onde $\lambda_0 = 0,633 \mu\text{m}$.

La fibre est donc, avant toute chose, un thermomètre très sensible. Pour l'hydrophone, ce phénomène n'est pas très gênant, car la fréquence des ondes acoustiques est très supérieure à celle des variations de température.

Cet effet sera même strictement insensible dans l'interféromètre de Sagnac, puisque les deux faisceaux parcourent la même bobine de fibre, mais en sens inverse.

5. CAPTEUR DANS LEQUEL LA GRANDEUR PHYSIQUE A MESURER AGIT DIRECTEMENT SUR LA LUMIERE : GYROMETRE A FIBRE OPTIQUE.

La fibre ne sert ici qu'à transporter la lumière dans un interféromètre de Sagnac (fig. 10).

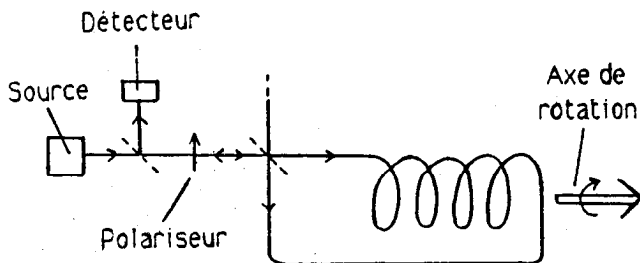


Fig. 10. — Gyromètre à fibre optique.

Si la boucle est en rotation par rapport au repère de référence d'inertie, il s'introduit un décalage temporel entre les ondes circulant dans chaque sens. Ce décalage est proportionnel au flux du vecteur rotation à travers la boucle. Dans une boucle de 1 dm^2 , une rotation de $1^{\circ}/\text{heure}$ provoque un décalage de 2×10^{-24} seconde! La résolution des équations de Maxwell

dans un référentiel en rotation montre qu'au premier ordre, le décalage est indépendant de l'indice du milieu dans lequel se propage la lumière. Ce résultat est important, car il permet de s'affranchir des influences extérieures qui affectent les indices de réfraction.

De nombreux phénomènes viennent perturber les performances d'un tel dispositif. Leur analyse et l'exposé des remèdes qui y sont apportés conduiraient à un développement trop important. Le gyromètre nécessite un ensemble de traitement de signal assez complexe capable de détecter un déphasage de l'ordre du millionième de frange.

Les meilleurs résultats actuels donnent une sensibilité de 10^{-2}° /heure.

Etant donné l'importance du marché potentiel, le gyromètre à fibre optique est en cours d'industrialisation par plusieurs fabricants (dont Thomson-C.S.F.). Un ensemble triaxial (3 bobines, électronique de traitement) peut être contenu dans un volume voisin de 1 décimètre cube.

6. PERSPECTIVES ET EVOLUTION DE CES CAPTEURS.

Jusqu'à présent, les fibres utilisées sont produites pour les télécommunications. On peut espérer que l'ouverture d'un fort marché pour les capteurs à fibres incitera les industriels à créer de nouvelles fibres spécialement conçues pour les capteurs, de manière à augmenter leur sensibilité ou leur intérêt.

Pour les composants optiques nécessaires à la réalisation de capteurs, trois technologies sont utilisables :

- Les composants micro-optiques : classiques, mais de taille très réduite. Leur fabrication industrielle déjà réalisée leur permet un prix de revient faible par quantité, mais leur utilisation, en particulier par alignement optique, augmente par des frais de main-d'œuvre le coût de fabrication.
- Les composants « tout fibre » sont obtenus par modification locale de la fibre. On peut réaliser, par exemple, un coupleur directionnel tout à fait équivalent à une lame séparatrice. Des problèmes de reproductibilité se posent encore.
- L'optique intégrée sera probablement la technologie privilégiée pour les capteurs sophistiqués. Sa mise en œuvre utilise les techniques de photolithographie des circuits intégrés. Elle permet, en plus des fonctions passives comme le coupleur directionnel, d'envisager d'intégrer sur un même substrat électro-actif des fonctions de modulation ou de traite-

ment de signal. Là encore, des problèmes de reproductibilité limitent encore leur développement.

7. CONCLUSION.

Le nombre de brevets déposés dans le monde, par an (300 à 400), montre la vitalité de ce domaine d'études. Si, bien souvent, les principes utilisés sont simples, la réalisation se heurte à de nombreux problèmes.

A ce jour, les capteurs dans un état proche de la commercialisation sont l'hydrophone, l'ampèremètre et le gyromètre.

Le grand espoir de beaucoup d'industriels est l'utilisation de capteurs à fibres dans le domaine grand public.
