

# Introduction

**Pierre LECOY**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France*

<sup>2</sup>*ETIS UMR 8051, Université de Cergy-Pontoise, France*

## I.1. Présentation de l'ouvrage

Cet ouvrage est dédié aux capteurs à fibres optiques qui, s'ils sont moins connus du grand public que leurs applications en télécommunications, n'en ont pas moins une importance scientifique et industrielle considérable. Il réunit quelques-uns des meilleurs chercheurs francophones dans cet ouvrage collectif.

Après cette introduction qui présentera l'histoire, les avantages et la classification des capteurs à fibres optiques, l'ouvrage est structuré en 7 chapitres.

Le chapitre 1, par Hervé Lefèvre, est consacré au gyroscope à fibres optiques, qui est le plus ancien des capteurs à fibres optiques ayant connu un large développement industriel. La théorie de ce capteur aussi bien que sa mise en œuvre sont exposées en détail et avec de nombreuses anecdotes par l'auteur qui a vécu toute l'histoire de cette technologie dans plusieurs laboratoires industriels.

Les deux chapitres suivants sont construits autour de deux technologies à la base des capteurs distribués, qui sont maintenant opérationnels dans de très nombreux domaines utilisateurs.

Au chapitre 2, les capteurs à base de réseaux de Bragg (*Fiber Bragg Gratings*) par Sylvain Magne et ses collègues du CEA à Paris-Saclay, spécialistes de cette technologie et de sa mise en œuvre principalement, mais pas uniquement, dans le domaine du nucléaire.

Au chapitre 3, les capteurs utilisant des effets de diffusion linéaires (Rayleigh) et non linéaires (Brillouin, Raman) permettant grâce à des méthodes de réflectométrie d'utiliser la fibre comme élément sensible, par Patrice Mégret, chef du département électromagnétisme et télécommunications de l'Université de Mons.

Ensuite l'ouvrage se structure autour de trois domaines majeurs d'utilisation, dans trois chapitres qui associent théorie, mise en œuvre et retour d'expérience.

Au chapitre 4, les milieux radiatifs avec leurs effets sur les fibres, et les moyens de s'en protéger mais aussi de les exploiter pour faire de nouveaux capteurs, par Sylvain Girard et ses collègues du laboratoire Hubert Curien de l'Université de Saint-Étienne, spécialistes de ces questions.

Au chapitre 5, le génie civil, qui est un des domaines d'application les plus anciens et les plus développés, par Aghiad Khadour, spécialiste de ces applications à l'Université Gustave-Eiffel (Paris Est).

Au chapitre 6, l'instrumentation des structures composites notamment dans les domaines ferroviaire et maritime, par Francis Collombet de l'institut Clément Ader (Université de Toulouse) et ses collègues, qui donne un bon exemple de collaboration industrielle.

Enfin, le chapitre 7 est orienté prospective, par Georges Humbert du laboratoire XLIM (Université de Limoges), qui développe en particulier les perspectives prometteuses offertes par les fibres de structure à bande interdite photonique.

### **I.2. Pourquoi la fibre optique ?**

Maîtrisées industriellement dès la fin des années 1970, les fibres optiques ont connu un développement spectaculaire en télécommunications, depuis les réseaux locaux et embarqués jusqu'aux réseaux longues distances et intercontinentaux, en passant par toutes les variantes du FTTx (*fiber to the... home, building, office, etc.*). Au cœur de l'explosion d'Internet et de l'accès de plusieurs milliards d'êtres humains aux échanges numériques, y compris à travers les réseaux de mobiles dont elles constituent l'infrastructure fixe, les fibres optiques apportent leur contribution à la *green IT* grâce à une meilleure efficacité énergétique, à la durée de vie des équipements, et à l'utilisation de matériaux disponibles et peu polluants.

Mais la disponibilité à faible coût des technologies fibres optiques (et des composants associés) grâce au secteur des télécoms, a ouvert la voie à d'autres utilisations, notamment dans les capteurs et l'instrumentation de mesure, qui ont fait l'objet de nombreux travaux théoriques et expérimentaux dès les années 1980. La principale motiva-

tion provenait des avantages spécifiques des fibres optiques, bien connus dans le domaine des communications, et qui sont particulièrement intéressants pour des applications instrumentales qui doivent fonctionner dans des conditions difficiles et/ou être intégrées dans des systèmes ou dans des structures :

- la faible perturbation apportée par les fibres optiques qui sont légères, de petite taille, non sujettes à la corrosion, ne conduisant ni l'électricité ni la chaleur ;

- leur sécurité intrinsèque (absence de courants électriques), cruciale dans les applications médicales ou industrielles, et leur insensibilité aux parasites électromagnétiques, leur permettant de fonctionner de façon fiable dans des milieux fortement perturbés ;

- la possibilité qu'elles offrent d'analyser à distance, et avec une haute résolution spatiale, des milieux d'accès difficile ou dangereux (certains matériaux permettant le fonctionnement dans des environnements fortement radiatifs) ;

- et enfin, la possibilité d'utiliser la fibre optique elle-même, ou des dispositifs intégrés dans la fibre, comme éléments sensibles à un certain nombre de grandeurs physiques. On peut ainsi constituer des capteurs distribués ou des réseaux de capteurs, dans lesquels la fibre optique sert à la fois d'élément sensible et de support de transmission.

### 1.3. Bref historique

Avant même l'apparition des lasers semi-conducteurs et les propositions prémonitoires de Charles Kao sur leur utilisation en télécommunications (1966), les fibres optiques ont fait l'objet d'utilisations en instrumentation, pour l'éclairage et surtout pour le transport d'images *via* la fibroscopie et l'endoscopie, bien connues pour leurs applications médicales et aussi industrielles et archéologiques. Ces applications sont d'un intérêt majeur, mais la fibre optique n'y joue qu'un rôle passif et à courte distance.

Dès les années 1970 ont démarré des études visant à exploiter les phénomènes de propagation dans la fibre pour mesurer les grandeurs physiques de son environnement. Ce fut en particulier l'apparition du gyroscope (le premier démonstrateur date de 1976), à la source d'une intense activité scientifique et industrielle. Il s'agit à la base d'un gyromètre (mesure d'une vitesse de rotation), qui fait l'objet du chapitre 1 de cet ouvrage. Ces études, et d'autres, ont montré la nécessité de développer, outre la fibre, toute une série de composants nécessaires à la conception du système capteur : sources, modulateurs, coupleurs, détecteurs, amplificateurs, contrôleurs de polarisation... et un traitement de signal de plus en plus complexe que les progrès continus des processeurs électroniques ont permis.

Dans les années 1980, l'idée a émergé d'utiliser les défauts constatés dans les premières liaisons à fibres optiques, notamment leur sensibilité aux courbures et aux micro-courbures, ou aux défauts d'alignement dans les connecteurs. Elle a donné lieu à de

nombreux prototypes de capteurs principalement mécaniques dont l'avantage, essentiellement économique, est d'utiliser des fibres et des composants d'extrémité disponibles et peu coûteux, et d'être de principe très simple au niveau du traitement du signal, puisqu'il s'agit de détecter les variations de puissance lumineuse transmise. Ils ont trouvé des applications dans des systèmes industriels ou de sécurité, lorsqu'une haute précision n'est pas requise (détection, comptage, transducteurs de vibrations, etc.). Nous décrivons plus loin quelques exemples de ces capteurs. Tous n'ont pas atteint le développement industriel, du fait de leurs performances limitées, mais aussi de difficultés d'intégration dans des matériaux ou des structures, l'interfaçage entre le capteur et son environnement mécanique restant un point délicat ; cette problématique est évoquée au chapitre 6.

Parallèlement à ces capteurs généralement qualifiés d'extrinsèques, sont apparus des capteurs utilisant des phénomènes internes à la fibre : modulation de la phase et/ou de la polarisation de la lumière par des contraintes, champs électromagnétiques ou variations de température. De nombreux capteurs de type interférométriques ont été développés, dont nous donnons plus loin plusieurs exemples dans ce chapitre introductif (notamment les hydrophones et les capteurs de courant). Leurs performances métrologiques sont remarquables mais leur complexité a limité l'étendue de leur marché.

Les années 1990 voient l'apparition de nouveaux concepts et technologies : les réseaux de Bragg, développés au départ pour les besoins télécoms (filtrage, multiplexage en longueur d'onde), ont suscité un développement remarquable de capteurs pour la surveillance des structures dans de très nombreux domaines (génie civil, aéronautique, nucléaire, etc.). Ils sont exposés en détail au chapitre 2. Un de leurs intérêts majeurs est la facilité de mise en réseau d'un grand nombre de ces dispositifs (concept de capteur multipoints). Parallèlement se sont développés les capteurs continûment répartis basés sur la rétrodiffusion Rayleigh, et sur les effets généralement qualifiés de non linéaires : diffusions Brillouin et Raman, qui font l'objet du chapitre 3.

Ces méthodes, parfois complémentaires et parfois concurrentes, ont fait l'objet de nombreuses améliorations dans les années 2000 par la mise au point de systèmes d'acquisition et de traitement de plus en plus complexes et performants (B-OTDR, OFDR, etc.) permettant des mesures distribuées sur des dizaines de kilomètres. Dans la même décennie, l'apparition de nouvelles structures de fibres (bande interdite photonique, cœurs creux, fibres multicœurs, etc.) permet de nouveaux perfectionnements. Depuis, les efforts portent surtout sur l'industrialisation, la fiabilisation et le déploiement à grande échelle de ces capteurs (Udd et Spilmann 2014), en lien avec les nouveaux champs d'application (biomédical, aérospatial, énergie, etc.). L'autre fait marquant de la dernière décennie est le poids croissant de la Chine et de l'Asie dans un paysage initialement dominé par l'Amérique du Nord, le Japon et l'Europe.

## I.4. Classification des capteurs à fibres optiques

Bien que toute classification comporte une part d'arbitraire, on peut classer les capteurs à fibres optiques selon plusieurs critères. Nous laisserons de côté les nombreux dispositifs de mesure optique faite à distance par l'intermédiaire de fibres optiques qui jouent un rôle passif, mais apportent de grands avantages de mise en œuvre : accessibilité, haute résolution spatiale, possibilité de cartographie par déplacement du point de mesure, sécurité, etc., tout en conservant les principes et l'interprétation de ces mesures. Il existe de nombreuses applications opérationnelles en instrumentation physico-chimique (colorimétrie, réfractométrie, spectroscopie) ou mécaniques (capteurs de proximité).

Concernant les capteurs où la fibre optique joue un rôle actif par l'intermédiaire de ses propriétés, on peut distinguer :

- les capteurs extrinsèques (effets aux extrémités ou au raccordement de fibres) et les capteurs intrinsèques (modification des propriétés internes du guide ou de ses matériaux) ; toutefois les capteurs basés sur une déformation externe du guide (courbures) sont à la limite des deux catégories ;

- les capteurs non cohérents (basés uniquement sur la mesure de la puissance lumineuse transmise ou réfléchi ; simples, ils ne sont pas toujours très précis ni très fidèles) et les capteurs cohérents (basés sur la phase ou la polarisation de la lumière, beaucoup plus sensibles, mais demandant un traitement beaucoup plus complexe) ; les capteurs basés sur l'analyse des longueurs d'onde transmises, réfléchies ou rétrodiffusées étant là encore une catégorie intermédiaire ;

- les capteurs ponctuels (basés en général sur un dispositif discret intégré dans ou à l'extrémité de la fibre) et les capteurs répartis (*distributed*), exploitant un phénomène continu de type rétrodiffusion dans la fibre elle-même ; dans le premier cas, on peut les assembler dans un réseau de capteurs multipoints (capteurs à réseaux de Bragg distribués le long de la fibre par exemple), alors que dans le deuxième cas, la fibre est continûment sensible sur toute sa longueur (capteurs à effets Brillouin, Raman et Rayleigh), ce qui dans les deux cas permet la localisation du phénomène à mesurer.

Les premiers chapitres de cet ouvrage sont dédiés aux capteurs à fibres optiques représentant la plus grosse part des travaux de R&D et des déploiements industriels : les gyroscopes (chapitre 1), les réseaux de Bragg (chapitre 2) et les capteurs répartis (chapitre 3). Les chapitres suivants sont centrés sur les domaines applicatifs : milieux radiatifs (chapitre 4), génie civil (chapitre 5), capteurs intégrés dans des structures (chapitre 6) et ils se terminent par une prospective sur les nouveaux principes de capteurs qui pourraient utiliser de nouvelles structures ou matériaux de fibres (chapitre 7).

Mais la variété des capteurs ne s'arrête pas là. Dans la suite de ce chapitre introductif, nous présentons succinctement d'autres principes de capteurs qui, si leur marché est plus limité, n'en présentent pas moins un réel intérêt scientifique et industriel.

## 1.5. Capteurs de type extrinsèque

Ce terme regroupe une grande variété de capteurs, basés sur l'analyse de la lumière transmise entre deux fibres, ou beaucoup plus souvent réfléchi en bout de fibre, qui peut renseigner sur les propriétés mécaniques, thermiques ou chimiques du milieu extérieur à la fibre. Ce sont donc essentiellement des capteurs ponctuels, interrogés en transmission ou en réflexion par des interfaces opto-électroniques d'émission et de réception semblables à ceux utilisés en communications. La cohérence de la lumière n'étant pas nécessaire, et les distances entre le capteur et l'interrogateur étant courtes, ces capteurs utilisent majoritairement des fibres optiques multimodes, dont la connectique et les interfaces sont peu coûteuses.

### 1.5.1. Capteurs de micro-déplacements et applications

Leur principe est la modulation de l'intensité lumineuse transmise entre deux fibres, ou réfléchi sur un objet placé face à l'extrémité de la fibre, lorsqu'un des éléments du montage est en mouvement (figure I.1). Le petit diamètre du cœur fait que des déplacements d'une fraction de micron sont facilement détectés. De nombreuses réalisations ont été faites dans les années 1990, une configuration efficace étant la modulation par une micropoutre de silicium mobile placée entre l'extrémité de la fibre et un miroir fixe (Malki *et al.* 1995). Afin de séparer l'atténuation due au capteur des autres causes d'atténuation le long de la fibre, une longueur d'onde de référence se réfléchissant sur une couche mince à l'extrémité de la fibre fixe peut être utilisée.

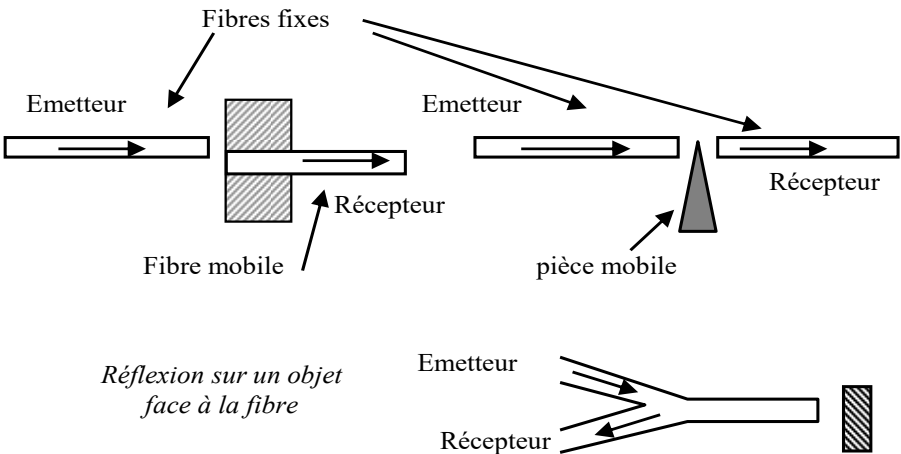


Figure I.1. Capteurs de micro-déplacements

Simplex mais de précision limitée pour mesurer des déplacements, ainsi que des forces et des pressions par leur intermédiaire, ces capteurs sont efficaces en tant que transducteurs de vibrations, par exemple pour la réalisation de microphones à fibres optiques simples et robustes, appréciables en environnements perturbés (Garthe 1991 ; Malki *et al.* 1996a).

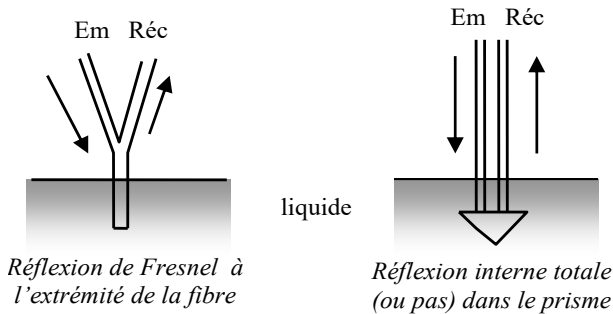
### 1.5.2. Capteurs de niveau

En mesurant l'indice de réfraction  $n_0$  du milieu extérieur par l'intermédiaire du coefficient de réflexion de Fresnel en bout de fibre :

$$R = \left( \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2$$

où  $n_1$  est l'indice du cœur de la fibre.

On peut détecter si cette extrémité est dans l'air ou dans le liquide et donc mesurer son niveau (figure I.2) ; une variante utilise la réflexion interne totale ou non selon l'indice du milieu (Raatikainen *et al.* 1997). Parmi les applications, on peut citer le comptage de bulles (Li *et al.* 2012a), ainsi que l'estimation de la température ou de la composition chimique par l'intermédiaire de l'indice.



**Figure I.2.** Capteurs de niveau

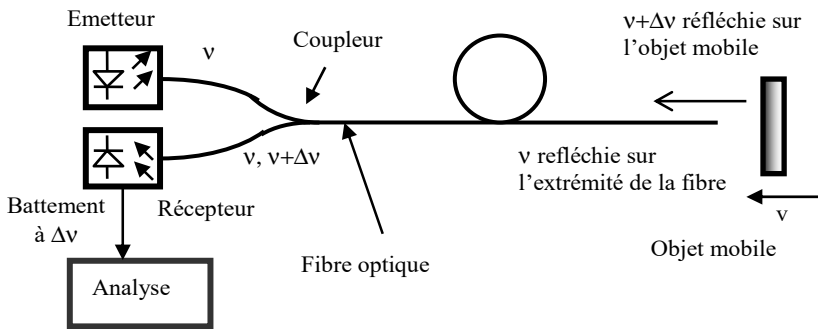
### 1.5.3. Vélométrie laser-Doppler par fibres optiques

Elle utilise le principe bien connu de l'effet Doppler, où la fréquence  $\nu$  d'une onde incidente, se réfléchissant sur un objet se déplaçant à la vitesse  $v$  face à l'extrémité de la fibre (figure I.3), subit un décalage de fréquence de :

$$\Delta v = \frac{2v}{c} \cdot v$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide.

Par battement avec l'onde réfléchie sur l'extrémité de la fibre, on mesure facilement après détection la fréquence  $\Delta v$ , dont l'ordre de grandeur va du kHz au MHz pour des déplacements allant du mm/s au m/s. Le dispositif peut être amélioré par une détection hétérodyne permettant de restituer le signe de  $\Delta v$  donc le sens du déplacement, lorsqu'il n'est pas connu. Ce procédé a fait l'objet d'un certain nombre d'applications industrielles (Li *et al.* 2010) et médicales (Krasovskii 2017).



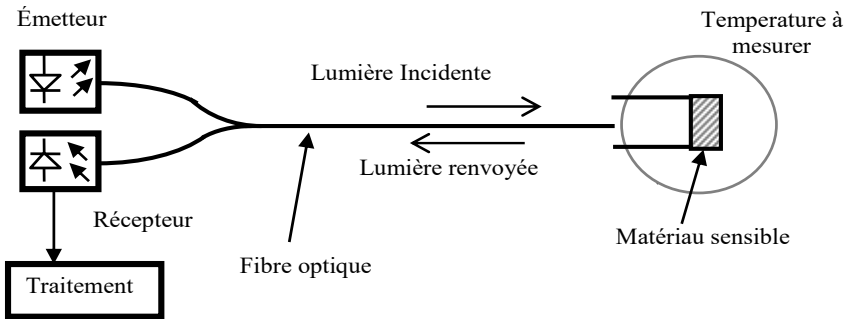
**Figure I.3.** Vélocimétrie Doppler par fibres optiques

### I.5.4. Mesure extrinsèque de température par fibres optiques

Ces capteurs détectent une propriété optique, dépendant de la température, d'un matériau placé en bout de la fibre optique (par exemple sous forme de dépôt d'une couche mince). Le schéma général est celui de la figure I.4. Le phénomène optique utilisé peut être :

- la photoluminescence : le matériau réémet, lorsqu'il est éclairé, une lumière dont le spectre dépend de la température (Wade *et al.* 2003) ;
- la fluorescence : cette fois, le temps de décroissance de la lumière réémise dépend de la température (Grattan *et al.* 2020) ;
- l'absorption d'un semi-conducteur près de sa longueur d'onde de coupure, qui varie fortement avec la température (Omega 2016) ;
- la fréquence de résonance d'un plasmon de surface généré dans une couche mince d'or déposée sur l'extrémité de la fibre (Velazquez-Gonzalez *et al.* 2017) ;
- la réflectivité d'un matériau dont l'indice dépend de la température.

De nombreux capteurs de ce type ont été commercialisés, avec diverses gammes de sensibilité et de précision. Ils ont pour intérêts principaux leur petite taille ainsi que leur isolation électrique et aussi thermique, ce qui est déterminant en cryogénie. Ils se prêtent bien à leur intégration dans un réseau interrogé par réflexion.

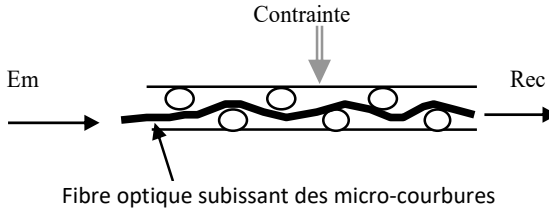


**Figure I.4.** Capteur extrinsèque de température par fibres optiques

Un principe sensiblement différent est la pyrométrie par fibres optiques. Il s'agit d'analyser le rayonnement thermique d'un matériau pour en déduire sa température par la loi de Wien (Nuñez-Cascajero *et al.* 2020). C'est un dispositif entièrement passif et sans contact, qui permet une cartographie de la température avec une haute résolution. Compte tenu du spectre de ce rayonnement, essentiellement situé dans l'infrarouge, on peut le transmettre par des fibres optiques de silice si la température à mesurer est supérieure à 300 °C, et par des fibres en verres fluorés, transparentes jusqu'à environ 5  $\mu\text{m}$ , dès la température ambiante (Thevenet *et al.* 2008).

## I.6. Capteurs par courbures et micro-courbures

Un des plus anciens principes utilise les pertes sous courbure ou micro-courbures d'une fibre optique (figure I.5). Ces pertes sont liées à la fois à la déformation du guide et aux contraintes internes créées dans le matériau de la fibre. L'intérêt principal de ces capteurs est de pouvoir être intégrés dans des structures (mécaniques, aéronautiques, ouvrages d'art, etc.) et d'y localiser les contraintes, par réflectométrie (Dakin 1990). Il s'agit alors d'une mesure répartie qui peut être sensible, mais pas toujours très fidèle car dépendant beaucoup de la façon dont la contrainte externe déforme la fibre, et qui pose un problème de résistance mécanique de la fibre. Aussi, malgré de nombreux travaux (Li *et al.* 2008), cette méthode de mesure répartie des contraintes a cédé la place dans la plupart des installations opérationnelles aux méthodes basées sur les réseaux de Bragg ou sur la diffusion de Brillouin.



**Figure I.5.** Capteur de contraintes par micro-courbures de la fibre optique

## 1.7. Capteurs interférométriques

Ces capteurs sont, eux, basés sur des techniques cohérentes : analyse de la phase de la lumière, dans un dispositif interférométrique réalisés principalement avec des fibres optiques monomodes, souvent à maintien de polarisation. Des capteurs utilisant les interférences, entre modes dans les fibres multimodes standard ou faiblement multimodes (c'est-à-dire des fibres « monomodes » en dessous de leur longueur d'onde de coupure), ont été expérimentés et ont montré une grande sensibilité aux perturbations (Malki *et al.* 1996b), mais leurs performances métrologiques restent limitées.

Les capteurs interférométriques sont beaucoup plus sensibles que les précédents et ne compromettent pas la fiabilité de la fibre optique, mais sont de mise en œuvre plus délicate ; ils nécessitent des sources cohérentes et des traitements du signal pour obtenir des mesures absolues (et non relatives), et séparer les effets des différentes grandeurs physiques d'influence (notamment la température).

### 1.7.1. Interféromètre de Mach-Zehnder

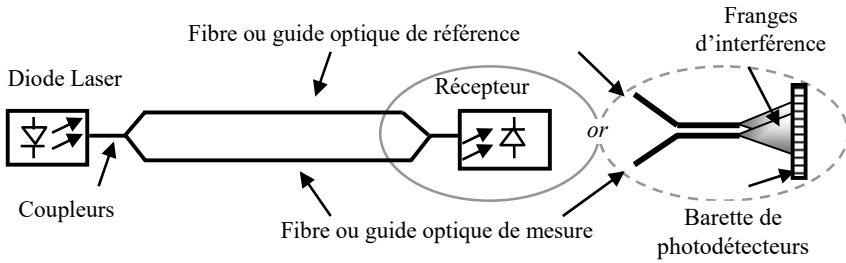
Il est constitué de deux bras qui sont deux fibres monomodes (ou deux guides en optique intégrée) de longueurs  $L$  identiques (figure I.6). Le déphasage entre bras de mesure et bras de référence est dû à l'allongement  $\Delta L$  ou à la variation d'indice  $\Delta n$ , elle-même due le plus souvent à la variation de température  $\Delta T$  ou, par photoélasticité, à une pression différentielle  $\Delta P$ . Des capteurs chimiques et biologiques de ce type ont également été réalisés, surtout en optique intégrée, en utilisant la variation de l'indice effectif dans le bras de mesure, sous l'effet d'un corps chimique à son contact.

Le déphasage  $\Delta\phi$  entre les deux bras est donné par :

$$\Delta\phi = k_0 n_0 \Delta L + k_0 L \left[ \frac{dn}{dT} \Delta T + \frac{dn}{dP} \Delta P \right]$$

où  $k_0 = 2\pi/\lambda$ .

Dans le montage à fibres et à deux coupleurs, le récepteur reçoit une intensité modulée par  $\cos^2\Delta\phi$  ; la phase est mesurée à  $\pi$  près et on doit lever l'ambiguïté (par une mesure à deux longueurs d'onde par exemple). Dans le deuxième montage, qui peut être fait en optique intégrée, l'interférence entre les faisceaux sortant des deux guides crée des franges qui défilent ; on peut ainsi les compter et surtout détecter leur sens de variation.



**Figure I.6.** Interféromètre de Mach-Zehnder à fibre optique

La principale application qui a été développée est le capteur acoustique, de grande bande passante, utilisé dans les hydrophones, qui sont un des plus anciens capteurs à fibres optiques industrialisés (Bucaro *et al.* 1977). Il s'agit là d'une mesure dynamique et différentielle, pour laquelle les variations de température restent lentes par rapport à la fréquence des ondes acoustiques à détecter. La fibre sensible étant disposée sous forme d'une bobine comportant un grand nombre de tours, cet hydrophone peut être très sensible et très directif (dans l'axe perpendiculaire au plan de la bobine).

De nombreux perfectionnements ont été apportés, notamment en utilisant les interférences entre modes de la même fibre (Klima *et al.* 1999), entre le mode de cœur et le premier mode de gaine dans des fibres amincies (Li *et al.* 2012b), ou encore en utilisant des fibres multicœurs (Chen *et al.* 2021). L'utilisation de l'interférométrie à faible cohérence, dans laquelle la différence de chemin optique entre les deux bras de l'interféromètre de mesure est déterminée par un interféromètre à deux bras en réception, a également été proposée (Rao et Jackson 1996).

Le déphasage et sa cause sont déduits de la réponse fréquentielle du capteur, les longueurs d'onde d'interférences constructives et destructives se décalant sous l'effet des interférences, avec des sensibilités de quelques dizaines de  $\text{pm}/^\circ\text{C}$  pour la mesure de température. Bien que la mise en cascade de plusieurs points de mesure ait été démontrée (Liu *et al.* 2018), il s'agit essentiellement d'une mesure ponctuelle.

### 1.7.2. Interféromètre de Fabry-Pérot

Il est constitué de deux miroirs parallèles espacés d'une distance  $L$ , qui peuvent être intégrés entre deux fibres optiques (Bai *et al.* 2016), ou plus couramment de la cavité formée par un miroir fixe face à l'extrémité d'une fibre optique, dont la face de sortie semi-réfléchissante constitue l'autre miroir de la cavité (Rao *et al.* 2017). Cette configuration permet d'exploiter le capteur en réflexion, facilitant l'accessibilité du point de mesure (figure I.7).

Par résonance de la cavité Fabry-Pérot, la puissance transmise est maximale (et donc la puissance réfléchie minimale) pour un peigne de longueurs d'onde vérifiant :  $\lambda = 2 n.L/p$  où  $p$  est entier, et  $n$  l'indice du milieu séparant les deux miroirs. L'intervalle spectral libre entre deux raies vaut alors  $\Delta \lambda = \lambda^2 / 2nL$ . La source est donc non cohérente et fonctionne en continu. L'analyse du spectre, qui peut être faite dans un interféromètre de Fizeau comme dans la technologie WLPI (*White Light Polarization Interferometry*), permet d'en déduire le déplacement, ou la variation de pression externe qui l'a provoqué (Yu et Zhou 2011). D'autres applications mesurent la variation de l'indice du matériau séparant la fibre et le miroir (fixes dans ce cas), et en déduisent, suivant le cas, les variations de température ou de composition chimique (Opran *et al.* 2010).

Comme dans les interféromètres précédents, il s'agit d'une mesure indirecte, et le conditionnement du capteur doit être conçu et étalonné pour remonter sans ambiguïté à la grandeur à mesurer. En particulier, l'effet de la température doit être soit compensé par des dispositifs mécaniques (dilatation du support compensant la diminution de l'indice avec la température), soit par une mesure et un traitement (Poeggel *et al.* 2015).

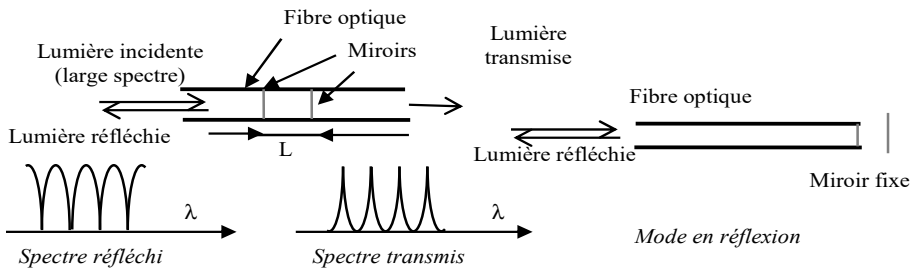


Figure I.7. Interféromètre de Fabry-Pérot à fibre optique

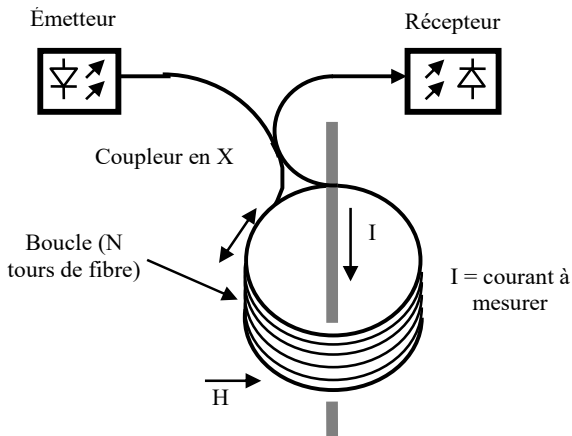
### 1.7.3. Interféromètre de Sagnac

C'est un interféromètre en anneau dans lequel la lumière est injectée simultanément dans les deux sens de propagation sur l'anneau. Son application la plus connue est le gyromètre à fibres optiques, présenté en détail au chapitre 2, basé sur le déphasage entre les deux sens qui apparaît lorsque le dispositif est en rotation.

Ce montage permet aussi une mesure de champ magnétique exploitant l'effet Faraday, rotation de la polarisation de la lumière sous l'effet d'un champ magnétique longitudinal (Mihailovic et Petricevic 2021). La principale application est le capteur de courant (Silva *et al.* 2012) dans lequel  $N$  tours de fibre sont enroulés autour d'un conducteur parcouru par un courant  $I$  (figure I.8), la rotation de polarisation  $\theta$  due au champ magnétique créé par ce courant étant donnée par :

$$\theta = 2N.V_F.I$$

avec :  $V_F$  constante de Verdet =  $4,6.10^{-6}$  rd/A dans la silice, indépendamment du trajet de la fibre, et également insensible à la température ou aux contraintes qui, si elles influent sur la polarisation, le font de la même manière pour les deux sens de propagation, ce qui en annule l'effet, alors que la rotation due à l'effet Faraday est non réciproque.



**Figure I.8.** Interféromètre de Sagnac à fibre optique en capteur de courant

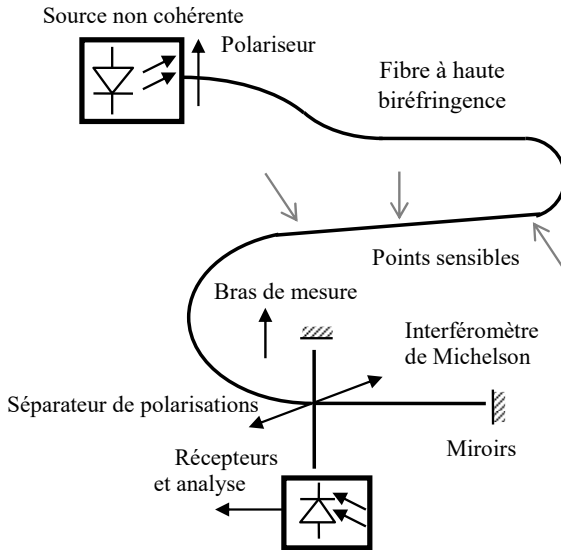
Ce capteur est donc précis, fidèle et permet de mesurer en toute sécurité des courants très forts sous des tensions très élevées. Mais il est coûteux et doit être installé de façon permanente, sur une ligne à haute tension par exemple ; son utilisation reste donc très spécifique.

## I.8. Capteurs polarimétriques

Ce sont toujours des capteurs interférométriques, nécessitant une source cohérente, mais ce sont les deux polarisations orthogonales guidées par la fibre qui jouent le rôle des deux bras de l'interféromètre. Ceci permet une meilleure intégration du capteur et une moins grande sensibilité à la température.

La principale application est le capteur de contrainte par biréfringence qui exploite la biréfringence créée (ou modifiée) dans une fibre monomode par une contrainte non isotrope. L'analyse de l'état de polarisation permet de connaître la direction et la valeur de la contrainte (Turpin *et al.* 1992). Pour un capteur déporté, la difficulté principale est de transmettre correctement l'état de polarisation du point sensible au point d'analyse ; on utilise alors des fibres à haute biréfringence (HB) dans lesquelles la contrainte va coupler de la lumière dans la polarisation orthogonale à la polarisation initiale.

L'état de polarisation résultant, conservé par la suite de la fibre biréfringente, est déterminé par la contrainte appliquée et permet d'analyser celle-ci. La localisation de la contrainte est possible par la technique assez complexe de multiplexage de cohérence (Brooks *et al.* 1985). Les constantes de propagation des deux polarisations de la fibre HB étant sensiblement différentes, le retard entre elles à la réception est proportionnel à la distance du point de couplage, donc du capteur. Ce retard est mesurable par un interféromètre de Michelson en lumière non cohérente placé en fin de fibre, une polarisation étant injectée dans chaque bras (figure I.9). Un battement est observable entre les deux polarisations lorsque le retard du bras de mesure compense exactement celui de la polarisation lente. On peut ainsi séparer spatialement, avec une grande résolution, de nombreux points de mesure répartis le long de la fibre.



**Figure I.9.** Capteurs polarimétriques exploités en multiplexage de cohérence

Ces méthodes restent cependant complexes, et malgré des innovations telles que l'emploi de fibres à cristal photonique (Wolinski *et al.* 2008), elles sont peu utilisées.

## I.9. Conclusion

Ce tour d'horizon des capteurs à fibres optiques développés depuis une quarantaine d'années montre la grande diversité des principes, des méthodes d'exploitation et des domaines d'applications qu'ils concernent. Même si leur développement n'a pas été aussi rapide et massif que certaines prévisions optimistes des années 1980, ils sont maintenant bien intégrés dans le paysage scientifique et industriel et rendent des services aussi précieux que discrets dans de très nombreux domaines.

## I.10. Bibliographie

- Bai, Y., Yan, F., Liu, S., Wen, X. (2016). All-fiber Fabry-Perot interferometer for high-sensitive micro-displacement sensing. *Optical and Quantum Electronics*, 48(206).
- Brooks, J., Wentworth, R. *et al.* (1985). Coherence multiplexing of fiber-optic interferometric sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 3(5).
- Bucaro, J.A., Carome, E.F., Layton, M.R. (1977). Optical Fiber Hydrophone. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62(72).
- Chen, M., Liu, Q., Zhao, Y. (2021). All Fiber Mach-Zehnder Interferometer Based on Intracavity Micro-Waveguide for a Magnetic Field Sensor. *MDPI Applied Science*, 11.
- Dakin, J.P. (dir.) (1990). Multiplexed and distributed optical fibre sensor systems. Dans *The distributed fibre optic sensing handbook*. Springer, Londres.
- Garthe, D. (1991). A fiber-optic microphone. *Sensors and Actuators A: Physical*, 26(1/3).
- Grattan, K.T.V., Zhang, Z.Y. (2020). Fiber Optic Fluorescence Thermometry. Dans *Topics in Fluorescence Spectroscopy*, Lakowicz, J.R. (dir.). Springer, Londres.
- Klima, T., Zhoua, Y. *et al.* (1999). Fiber optic acoustic hydrophone with double Mach-Zehnder interferometers for optical path length compensation. *Optics Communications*, 159(4/6).
- Krasovskii, V., Feofanov, I., Ivashkin, P., Kazaryan, M. (2017). A fiber-optic Doppler blood flow-velocity sensor. *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*, 3(1).
- Li, F., Murayama, H. *et al.* (2010). A Fiber Optic Doppler Sensor and Its Application in Debonding Detection for Composite Structures. *Sensors*, 10(6).
- Li, L., Xia, L., Xie, Z., Liu, D. (2012a). All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications. *Optics Express*, 20(10).
- Li, X., Deng, Y. *et al.* (2008). Microbending optical fiber sensors and their applications. Dans *ICAIT'08*. Shenzhen.
- Li, X., Yang, C., Yang, S., Li, G. (2012b). Fiber-Optical Sensors: Basics and Application in Multiphase Reactors. *Sensors*, 12(9), 12519–12544.

- Liu, T., Wang, J. *et al.* (2018). All-fiber Mach-Zehnder interferometer for tunable two quasi-continuous points' temperature sensing in seawater. *Optics Express*, 26(9), 12277–12290.
- Malki, A., Lecoy, P., Marty, J. (1995). Optical fiber accelerometer using silicon micromachined cantilever. *Applied Optics*, 34(34).
- Malki, A., Gafsi, R., Lecoy, P., Mevel, Y. (1996a). Fiberoptic microphone for optical communication systems. *Measurement Science and Technology*, 7.
- Malki, A., Gafsi, R., Michel, L., Labarrère, M., Lecoy, P. (1996b). Impact and vibration detection in composite materials by using intermodal interferences in multimode optical fibres. *Applied Optics*, 35(25).
- Mihailovic, P., Petricevic, S. (2021). Fiberoptic sensor based on the Faraday effect. *Sensors*, 21(6564).
- Nunez-Cascajero, A., Tapetado, A. *et al.* (2021). Optical Fiber pyrometer designs for temperature measurements depending on object size. *Sensors*, 21(646).
- Omega (2016). Fiber-optic temperature measurement. White Paper [En ligne]. Disponible à l'adresse : <http://www.omega.com/technical-learning>.
- Opran, G., Teodorescu, M., Marinescu, A. (2010). Applications of fiberoptic integrated Fabry-Perot interferometer for non-electric quantities measurements in electrical engineering. *Annals of the University of Craiova, Electrical engineering series*, 34.
- Poeggel, S., Duraibabu, D. *et al.* (2015). Recent Improvement of Medical Optical Fibre Pressure and Temperature Sensors. *Biosensors*, 5(3).
- Raatikainen, P., Kassamakov, I., Kakanakov, R., Luukkala, M. (1997). Fiber-optic liquid-level sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 58(2).
- Rao, Y.J., Jackson, D. (1996). Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry. *Measurement Science and Technology*, 7(7).
- Rao, Y.J., Ran, Z.L., Gong, Y. (2017). *Fiber-Optic Fabry-Perot Sensors: An Introduction*. CRC Press, Boca Raton.
- Silva, R.M., Martins, H. *et al.* (2012). Optical Current Sensors for High Power Systems: a review. *Applied Science*, 2012(2).
- Thevenet, J., Siroux, M., Desmet, B. (2008). Brake disc surface temperature measurement using a fiber optic two-color pyrometer. Dans *9<sup>th</sup> International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*. Cracovie.
- Turpin, M., Brévignon, M., Lepesant, J.P., Gaouditz, O. (1992). Interfero-polarimetric fiber optic sensor for both pressure and temperature measurements. Dans *OFS'92*. Monterrey.
- Udd, E., Spillman, W.B. (2014). Field Guide to Fiber Optic Sensors. *SPIE digital library*.
- Velazquez-Gonzalez, J., Monzon-Hernandez, D. *et al.* (2017). Surface Plasmon Resonance-Based Optical Fiber Embedded in PDMS for Temperature Sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 23(2).

- Wade, S.A., Collins, S.F., Baxter, G.W. (2003). Fluorescence intensity ratio technique for optical fiber point temperature sensing. *Journal of Applied Physics*, 94(4743).
- Wolinski, T.R., Lesiak, P., Domanski, A.W. (2008). Polarimetric optical fiber sensor of a new generation for industrial applications. *Bulletin of the polish academy of sciences*, 56(2).
- Yu, Q., Zhou, X. (2011). Pressure Sensor Based on the Fiber-Optic Extrinsic Fabry-Perot Interferometer. *Photonic Sensors*, 1(1).