

Réseaux de capteurs à fibres optiques

par **Michel LEQUIME**

Ingénieur de l'École supérieure d'optique (ESO), docteur 3^e cycle
Chef de la division Systèmes à fibres optiques de la société BERTIN & Cie

1. Définitions	R 460 - 2
1.1 Capteurs à fibres optiques.....	— 2
1.2 Différents types de réseaux.....	— 2
1.3 Principales caractéristiques.....	— 2
2. Domaines d'applications	— 4
2.1 Avantages généraux apportés par l'emploi des fibres optiques.....	— 4
2.2 Propriétés spécifiques associées à la mise en réseau.....	— 4
2.3 Exemples représentatifs d'utilisation.....	— 5
3. Procédures de multiplexage	— 6
3.1 Multiplexage spatial.....	— 6
3.2 Multiplexage temporel.....	— 7
3.3 Multiplexage spectral.....	— 7
3.4 Multiplexage de cohérence.....	— 8
3.5 Multiplexage fréquentiel.....	— 8
4. Réseaux à points multiples	— 9
4.1 Réseau OPTONET.....	— 9
4.2 Réseau FRASCAN.....	— 9
4.3 Réseau ACCORD.....	— 9
5. Réseaux quasi-répartis	— 11
5.1 Réseaux à dioptries insérés.....	— 11
5.2 Réflecteurs de Bragg.....	— 12
5.3 Fibre biréfringente segmentée par points de couplage interpolarisation.....	— 13
6. Réseaux répartis	— 14
6.1 Réflectométrie temporelle Rayleigh.....	— 14
6.2 Réflectométrie temporelle Raman.....	— 15
6.3 Réflectométrie temporelle Brillouin.....	— 16
6.4 Réseaux à conversion modale.....	— 17
7. Réseaux optoalimentés	— 17
8. Évolutions et tendances	— 17
Références bibliographiques	— 18

Les fibres optiques occupent une place de plus en plus importante dans le domaine des télécommunications, où leurs performances de **faible atténuation** et de **grande bande passante** ont rendu possible la mise en place de structures d'échange et de dialogue entièrement nouvelles.

Ces mêmes fibres optiques commencent aujourd'hui à diffuser dans le secteur de **l'instrumentation**, car elles permettent de concevoir des capteurs qui soient à la fois entièrement passifs et de grande résolution, tout en bénéficiant d'une immunité naturelle vis-à-vis des perturbations associées à l'environnement de mesure.

La mise en réseau de tels capteurs à fibres optiques permet de proposer des systèmes d'instrumentation homogènes et optimisés, et donne en outre accès à des **fonctions de mesure entièrement nouvelles** (comme, par exemple, la mesure continue d'une grandeur physique sur des distances pouvant excéder la dizaine de kilomètres).

1. Définitions

1.1 Capteurs à fibres optiques

En accord avec la terminologie définie par les instances internationales de normalisation (ISO/IEC) et reprise en France par l'AFNOR [1], un capteur à fibre optique est, de manière tout à fait générale :

Un dispositif dans lequel l'information est créée dans le chemin optique par réaction de la lumière à la grandeur à mesurer, avant d'être acheminée vers le récepteur optique par l'intermédiaire d'une ou de plusieurs fibres optiques.

Le choix d'une onde lumineuse comme support physique de l'information utile confère à cette technologie une aptitude naturelle au **multiplexage** : ceci a donc conduit les utilisateurs à rechercher les procédures qui permettent d'exploiter de manière pratique une telle propriété et rendent en particulier possible l'acquisition, à l'aide d'un seul et même récepteur, des informations inscrites dans l'onde optique par les différents capteurs que celle-ci parcourt.

Cette centralisation de la fonction de détection est à la base du concept de réseau de capteurs à fibres optiques, et trouve une part importante de sa raison d'être dans la réduction potentielle du coût de la voie de mesure à laquelle elle donne accès, tant il est vrai que le récepteur optique constitue en général l'une des composantes essentielles du prix d'acquisition de ce type d'instrumentation.

1.2 Différents types de réseaux

1.2.1 Classification normative

Les instances internationales de normalisation [1] ont choisi de distinguer dans le cas des capteurs à fibres optiques deux classes principales de réseaux, à savoir :

- les **réseaux à points multiples** (ou réseaux multiplexés), qui sont constitués par l'association de plusieurs transducteurs optiques ponctuels, raccordés à une centrale unique d'acquisition au travers d'une arborescence de composants guidés passifs (fibres optiques, connecteurs, épissures, coupleurs) ou actifs (commutateurs 1 vers N, obturateurs) ;

- les **réseaux répartis**, qui mettent en œuvre un transducteur optique unique de type continu (c'est-à-dire une fibre optique, de constitution et/ou de conditionnement éventuellement spécifiques) et qui donnent accès à la mesure, résolue dans l'espace, des valeurs prises par une grandeur physique particulière (température, déformation...) sur une région étendue.

Outre ces deux grandes catégories, l'usage courant a conduit progressivement les fabricants à identifier sous l'appellation **quasi-répartie** une troisième classe de réseau, qui se trouve être en fait une configuration particulière de réseau à points multiples, dans laquelle les différents transducteurs sont disposés en ligne sur une fibre unique de raccordement : dans un tel système, dont la logique de fonctionnement s'apparente à celle d'un réseau réparti (d'où la terminologie adoptée), la localisation des points de mesure est donc déterminée par l'agencement physique des transducteurs au long de la fibre de liaison, alors qu'elle se trouve être entièrement définie par les caractéristiques et performances du récepteur optique dans une configuration strictement répartie.

1.2.2 Classification topologique

Un autre mode de classification possible des différents types de réseaux de capteurs à fibres optiques est basé sur l'examen de leur structure topologique. On distingue en fait trois configurations fondamentales de réseau (figure 1) :

- le **réseau échelle** qui, dans sa variante de base, met en œuvre des capteurs fonctionnant en transmission et reliés en cascade à deux lignes principales (les fibres alimentation et retour) par des coupleurs passifs de dérivation ; si les capteurs utilisés fonctionnent en réflexion, cette topologie échelle prend alors une forme simplifiée, parfois abusivement qualifiée de linéaire. Une variante particulièrement intéressante de cette topologie échelle est la variante dite *équilibrée* qui permet de garantir un bilan de flux homogène pour l'ensemble des transducteurs constitutifs du réseau (le nombre de dérivation vues par chacun des capteurs est en effet un invariant de cet arrangement particulier) ;

- le **réseau linéaire**, dans lequel des capteurs réfléchis sont agencés *en série* sur une ligne unique de transmission ; cette topologie particulière de réseau s'identifie en fait à la variante quasi-répartie définie au paragraphe précédent. Elle prend pour forme particulière celle d'un *anneau* lorsque les capteurs utilisés fonctionnent en transmission et que le récepteur optique est localisé à proximité immédiate de l'émetteur ;

- le **réseau étoile**, dans lequel un composant passif unique (coupleur étoile ou coupleur 1 vers N) permet de répartir de manière équilibrée le flux lumineux sur l'ensemble des abonnés du réseau, que ceux-ci utilisent des transducteurs fonctionnant en transmission ou en réflexion. On identifie souvent une variante particulière de ce réseau étoile : il s'agit de la topologie dite *arborescente*, dans laquelle le point de dérivation unique caractéristique de la configuration étoile est remplacé par un ensemble de points de branchement réalisant une répartition progressive du flux lumineux utile ; naturellement la condition d'équilibrage des voies n'est plus obligatoirement respectée dans une telle variante de réalisation.

1.3 Principales caractéristiques

- La première caractéristique importante d'un réseau de capteurs à fibres optiques est naturellement sa **capacité**, c'est-à-dire le nombre N de points de mesure distincts auquel il est susceptible de donner accès. Ce paramètre peut prendre des valeurs extrêmement variées, suivant que l'on considère un réseau à points multiples (quelques unités à quelques dizaines d'unités) ou un réseau réparti (équivalent à plusieurs milliers de transducteurs agencés en ligne sur une même fibre optique).

- Le deuxième paramètre fondamental d'un tel réseau est sa **cadence de scrutation**, c'est-à-dire l'inverse du temps nécessaire au récepteur optique pour effectuer une interrogation complète de l'ensemble des transducteurs avec lesquels il se trouve en relation. Cette cadence de scrutation est directement fonction du rapport signal à bruit finalement recherché au niveau du système de détection, et dépend donc à ce titre :

- de la puissance effective émise par la source utilisée pour interroger le réseau ;
- des pertes de distribution caractérisant la manière dont le flux émis est réparti vers les différents *abonnés* ;
- des pertes propres à chaque transducteur ;
- des différentes sources de bruit affectant la détection optique (bruit quantique, bruit thermique, bruits propres du photodétecteur et de l'étage de préamplification...).

Cette cadence de scrutation est donc susceptible d'influencer le nombre de points effectifs résolus par chaque transducteur (rapport entre la gamme totale de variation de la grandeur physique à laquelle il est dédié et la plus petite variation décelable de cette même grandeur).

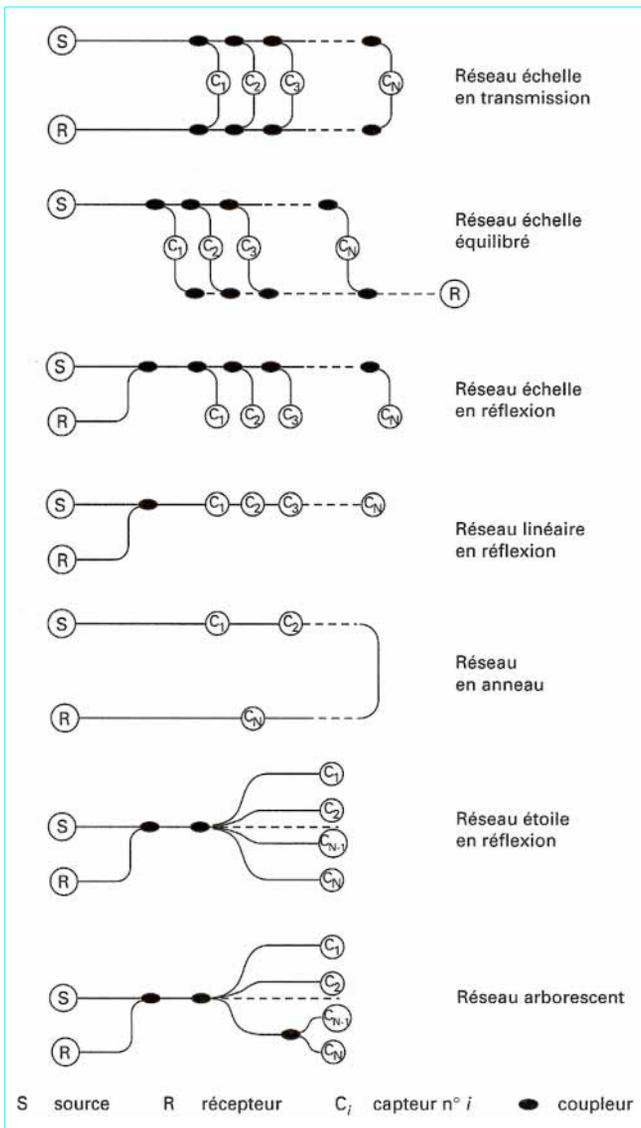


Figure 1 – Principales topologies de réseaux

Une manière simple de caractériser la performance globale d'un réseau de capteurs à fibres optiques consiste à définir la capacité totale d'informations K qu'il véhicule [2], à partir de la relation :

$$K = \sum_{i=1}^N B_i \log_2 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i$$

avec K (bits/s) capacité totale d'informations,
 B_i (Hz) bande passante du capteur n° i ,
 Q_i nombre de points résolus par le capteur n° i ;

et de représenter de manière géométrique la valeur prise par ces différents paramètres dans un espace à 3 dimensions ($N, B, \log_2 Q$). Une telle représentation est fournie pour illustration à la figure 2 dans trois cas particuliers différents correspondant au même volume final d'informations.

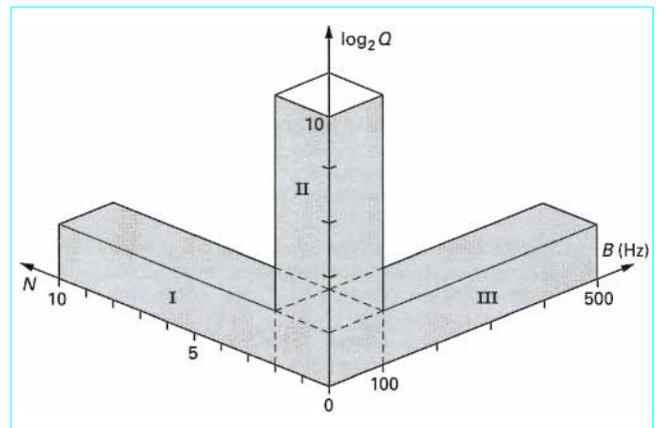


Figure 2 – Représentation graphique de la capacité totale d'informations véhiculée par un réseau de capteurs

Le cas I correspond à un réseau de 10 capteurs 4 états, échantillonnés à faible cadence. Le cas II s'apparente à celui fréquemment rencontré en contrôle de procédé (mesure simultanée de deux paramètres à haute résolution et faible cadence). Le cas III correspond à une configuration équivalente à la première, mais dans laquelle on a échangé de la capacité pour de la cadence de scrutation.

Le dernier élément important associé à une mise en réseau de capteurs élémentaires est le niveau de **diaphonie** que l'architecture particulière adoptée (topologie, procédure de multiplexage) va introduire entre les différentes voies d'acquisition. Cette quantité correspond au rapport entre l'intensité du signal délivré par un capteur dans le canal de détection qui lui est affecté et celle des signaux parasites générés par les autres capteurs dans ce même canal : elle est habituellement exprimée en décibels.

La connaissance de ce paramètre est importante, dans la mesure où il va directement affecter la quantité Q précédemment introduite et contribuer à définir la cadence de scrutation finalement adoptée (il est en effet sans intérêt de chercher à réduire l'intensité relative du bruit à un niveau inférieur à celui correspondant à la diaphonie intrinsèque entre voies).

L'expérience montre que la capacité finale d'un réseau dépend peu de son extension spatiale (longueur physique des fibres optiques de liaison) ou des caractéristiques particulières du récepteur optique utilisé (choix de la longueur d'onde, du photodétecteur, voire du mode de multiplexage). Cette capacité se trouve en fait principalement déterminée par les performances des coupleurs de dérivation éventuellement employés (taux de branchement, pertes en excès) et celles des capteurs mis en œuvre (pertes en excès, lois de comportement). Cette remarque explique la part prépondérante aujourd'hui occupée par :

- les **réseaux linéaires de type réparti ou quasi-réparti**, qui mettent en œuvre des **capteurs intrinsèques** (c'est-à-dire dans lesquels les transducteurs sont constitués par les fibres optiques elles-mêmes) ;
- les **réseaux étoiles à capteurs extrinsèques**, dans lesquels les fibres optiques servent uniquement à raccorder un ensemble de transducteurs passifs utilisant des composants optiques de type discret.

2. Domaines d'applications

2.1 Avantages généraux apportés par l'emploi des fibres optiques

Le recours à une instrumentation par capteurs à fibres optiques trouve en général sa justification dans l'existence de contraintes particulières de mise en œuvre qui rendent impossible ou délicat l'emploi de capteurs conventionnels. Ces contraintes peuvent se manifester tant au niveau de la prise d'informations que tout au long du support de transmission. Parmi celles les plus fréquemment citées, on retiendra en particulier :

- l'existence de **fortes perturbations électromagnétiques** (du simple parasitage électrique au risque possible de foudroiement, en passant par les problèmes d'isolation électrique du type boucle de masse ou instrumentation au potentiel) ;
- la présence d'une **atmosphère explosible** ;
- la recherche de **gains de masse** ou de **réductions d'encombrement**, notamment au niveau des lignes de raccordement ;
- l'importance de la **distance** séparant la prise d'informations du lieu de son acquisition et de son traitement ;
- la valeur élevée de la **température ambiante**.

Les utilisateurs potentiels se tournent également vers cette nouvelle technologie lorsqu'ils se trouvent confrontés à des exigences particulièrement sévères de sensibilité ou de dynamique (nombre de points résolus Q supérieur ou égal à 5 000). Ils considèrent en effet – à juste titre – que la mise en œuvre d'une méthode optique, surtout si elle est de type interférométrique, doit leur permettre d'avoir accès à une finesse de mesure en rapport avec la faible valeur de la longueur d'onde utilisée : le **gyromètre à fibre optique** fournit une illustration particulièrement impressionnante de la justesse d'une telle analyse (dynamique de mesure approchant les 30 bits, résolution équivalente à un déplacement de l'ordre du centième de picomètre).

2.2 Propriétés spécifiques associées à la mise en réseau

2.2.1 Réduction des coûts

Une autre motivation souvent exprimée par ces mêmes utilisateurs est la réduction de leurs coûts d'investissement. Ils expriment en particulier le souhait que les systèmes de mesure basés sur l'emploi de la fibre optique soient à terme d'un coût plus faible que les systèmes correspondants réalisés en technologie classique, que ce soit au niveau de leur acquisition, de leur installation ou de leur maintenance [3].

C'est là que l'aptitude potentielle des capteurs à fibres optiques à être organisés en réseau ou à fournir des informations de type réparti prend tout son intérêt, dans la mesure où elle rend dès aujourd'hui effectif le respect d'une telle exigence, même si la diffusion relativement limitée des capteurs élémentaires n'a pas encore permis à ces derniers d'atteindre des prix de revient en accord avec les contraintes habituelles d'une mise en œuvre en milieu industriel.

En effet, le regroupement d'un nombre important de capteurs en réseau permet d'obtenir [4] :

- une **diminution du coût d'acquisition** du point de mesure grâce à la mise en commun du système d'interrogation ;
- une **optimisation du nombre de câbles de liaison**, et par conséquent de leur masse, de leur encombrement et de la complexité des systèmes de raccordement qui leur sont associés (passages étanches notamment) ;
- une **centralisation** spontanée de la gestion du parc des appareils ou des machines instrumentées.

Ces avantages sont particulièrement marqués dans le cas des réseaux de type réparti, compte tenu de leur capacité importante (qui peut se chiffrer en milliers de points) et de l'absence de tout composant spécifique lié à la distribution de l'information optique (la fibre optique joue en effet ici le double rôle de transducteur et de ligne de raccordement).

Dans le cas des réseaux à points multiples, tels que celui correspondant à la surveillance thermique d'un stator d'alternateur [5], des simulations technico-économiques ont par exemple montré que le coût du point de mesure réalisé dans une technologie optique devenait inférieure à celui de la solution classique (ici, des thermo-couples et leurs frontaux électroniques de mise en œuvre) lorsque la capacité du réseau excédait une centaine de voies.

Il convient toutefois de souligner qu'un nombre significatif d'applications potentielles concerne en fait des configurations de moindre capacité (typiquement entre 8 et 16), pour lesquelles le poids du récepteur optique dans le bilan économique reste encore important.

2.2.2 Fiabilité et maintenance

En même temps qu'ils engageaient ces études à dominante technico-économique, les utilisateurs potentiels et les fabricants de ces réseaux ont également conduit des réflexions sur la fiabilité et la maintenance de ces installations. Il ressort de ces analyses les points suivants :

■ Le récepteur optique constitue bien évidemment un point de panne unique, mais la centralisation de la fonction qu'il assure facilite en pratique les opérations de maintenance qui devront être effectuées sur le réseau (qu'elles soient de nature préventive ou curative). En outre, le recours à une technologie optique entièrement passive au niveau des transducteurs élémentaires constitue en soi une source importante de gain global en fiabilité. Enfin, les temps moyens entre défaillances (MTBF) des composants optoélectroniques d'émission (diodes laser et surtout diodes électroluminescentes), de réception (photodiodes PIN ou avalanche) ou de dérivation (coupleurs) sont aujourd'hui tellement grands (100 000 heures par exemple, pour les DEL) que des interventions de maintenance préventive deviennent souvent superflues.

■ L'utilisation d'une fibre continûment sensible dans le cas des réseaux répartis constitue également un élément critique en termes de fiabilité, puisque sa rupture conduit à la perte immédiate de l'ensemble des points de mesure situés au-delà de la coupure. Ceci a conduit les fabricants à recommander l'emploi de systèmes dans lesquels l'interrogation de la ligne peut être effectuée à partir de ses deux extrémités, ce qui augmente évidemment la disponibilité intrinsèque du réseau, essentiellement en cas d'incident isolé. La probabilité d'occurrence de tels incidents reste par ailleurs extrêmement faible, tant il est vrai que la dégradation d'un composant à fibre résulte la plupart du temps soit d'un conditionnement ou d'une procédure de pose inadaptés, soit de l'existence d'une action destructrice extérieure (la plupart des incidents réseau sont en effet liés à des problèmes de type génie civil, tels que l'action d'une pelle mécanique). Enfin, la mise au point des techniques de *soufflage de fibre* rend aujourd'hui envisageable le remplacement *in situ* d'une fibre optique défaillante, sans que la dépose du câble soit nécessaire.

■ La définition des capteurs et le choix de leur mode de multiplexage doivent viser à obtenir une parfaite interchangeabilité de l'ensemble des transducteurs affectés au même type de mesure (les réseaux développés pouvant être évidemment multiparamètres). Il est en effet exclu pour des utilisateurs industriels d'accepter le principe d'un réseau dans lequel les lots de maintenance contiendraient autant d'éléments distincts de rechange qu'il y a de points de mesure identiques dans le réseau.

2.2.3 Limitations

Le développement actuel des télécommunications optiques guidées est un élément évidemment favorable vis-à-vis de la diffusion potentielle de ces réseaux d'instrumentation dans le milieu industriel : il est cependant clair que les réticences qui subsistent ne sont pas toutes de nature objective, mais peuvent provenir de considérations plus mêlées, liées en particulier à [3] :

- l'absence d'exemples anciens démontrant l'efficacité et la fiabilité pratiques de cette technologie ;
- la nécessité de former un personnel d'installation et de maintenance spécialisé, disposant d'un outillage particulier pour les opérations de pose, de connexion et de réparation ;
- l'absence de réelle normalisation (les passerelles entre les différentes méthodes de multiplexage ne sont pas immédiates, et en outre, à l'intérieur d'une même méthode, la compatibilité entre les différents matériels n'est pas encore acquise).

2.3 Exemples représentatifs d'utilisation

Le choix de ces trois exemples a pour principal objectif d'illustrer de manière pratique l'apport de cette technologie optique à la résolution de problèmes particuliers d'instrumentation.

■ Le premier exemple choisi concerne la **détection acoustique sous-marine** (figure 3) : la localisation et l'identification dans un tel milieu de sources de bruit de très faible intensité (inférieure par exemple à *Mer zéro*, qui caractérise le niveau de bruit spontané de l'Océan) nécessite la mise en œuvre de capteurs acoustiques extrêmement sensibles (appelés hydrophones) régulièrement disposés le long d'antennes linéaires de grande longueur. Ces antennes, qui portent habituellement le nom de *flûtes*, peuvent comporter plusieurs milliers de capteurs : une combinaison convenable des signaux délivrés par ce réseau permet d'obtenir un lobe de détection étroit dont l'orientation angulaire par rapport à la direction principale de l'antenne peut être ajustée par un choix convenable des déphasages relatifs entre voies. De telles antennes peuvent être installées à poste fixe au fond de l'Océan, ou remorquées entre deux eaux par des bâtiments de surface ou des sous-marins : les applications de cette détection acoustique sont essentiellement militaires (suivi des mouvements de la flotte ennemie, avec en particulier identification et localisation des unités sous-marines), mais les utilisations civiles ont aujourd'hui tendance à se multiplier (gestion des zones de pêche, détection d'ondes sismiques artificielles utilisées en recherche pétrolière).

Les hydrophones actuellement utilisés sont de type électrique, et leur mise en œuvre soulève essentiellement des problèmes d'alimentation, de transmission sans distorsion ni déphasage de signaux faibles et de masse par unité de longueur auxquels l'emploi de techniques optiques semble devoir apporter des solutions particulièrement intéressantes. La criticité de ces problèmes augmente bien évidemment avec la complexité et la longueur de la flûte, mais aussi avec son caractère remorqué.

Les travaux relatifs aux hydrophones à fibres optiques ont commencé au début des années 80, essentiellement dans le cadre d'applications militaires et ont conduit à définir des transducteurs interférométriques à très haute résolution, dont la mise en réseau a suscité, tant aux États-Unis (National Research Laboratory) qu'en Grande-Bretagne (Plessey et Marconi), une grande partie des développements théoriques relatifs aux procédures possibles de multiplexage (notamment temporel, fréquentiel et de cohérence). Un réseau expérimental à 56 voies a été ainsi testé à la mer en 1990 dans le cadre du programme américain AOTA (*All Optical Towed Array*) [6], et l'on peut penser qu'un tel ensemble constitue la maille élémentaire d'un futur réseau opérationnel de grande envergure.

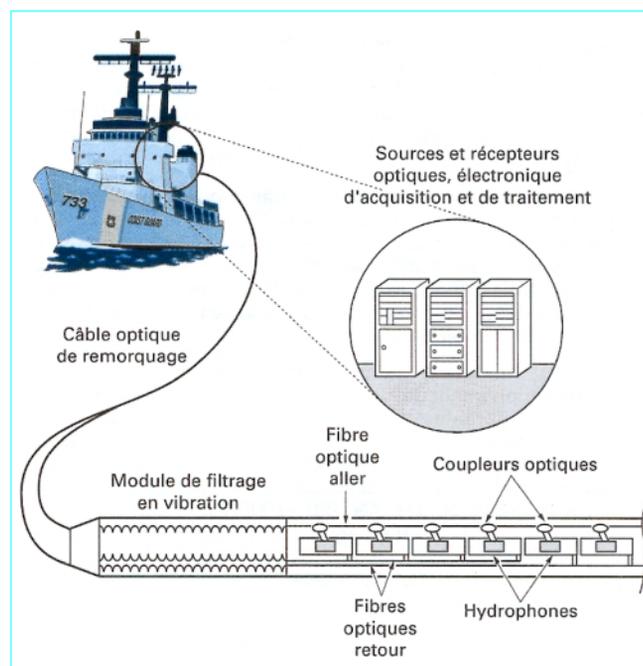


Figure 3 – Détection acoustique sous-marine par réseau multiplexé d'hydrophones à fibres optiques

Le développement d'une technologie tout optique (par opposition à une variante simplifiée où seule la transmission des signaux est réalisée sur support fibre) constitue l'un des grands défis techniques de la décennie en cours (1995-2005), car il nécessitera la construction de chaînes de fabrication dédiées à la production de capteurs interférométriques et la mise au point de procédures d'assemblage semi-automatisées adaptées à de tels transducteurs.

■ Le deuxième exemple est lié à la **surveillance thermique des câbles électriques** destinés au transport de puissance (par exemple 132 kV – 130 MVA). Une telle surveillance peut être envisagée essentiellement avec trois objectifs [7] :

- diminuer les marges de sécurité habituellement utilisées pour le choix des câbles lors de leur pose (avec des incidences évidentes sur le coût global de l'installation) ;
- améliorer la gestion des situations de défaillance potentielle, et permettre en particulier la mise en surcharge temporaire d'une installation sans prise de risque inconsidérée ;
- déterminer la localisation des zones de moindre performance de la ligne, c'est à dire celles pour lesquelles la conductivité thermique du milieu environnant est la plus faible ou la résistance intrinsèque du câble est la plus forte : ces informations pourront être en effet très utiles à la planification des futures opérations de maintenance et à un choix optimal des tronçons de câbles pour lesquels une augmentation de section semble nécessaire.

Une telle surveillance suppose donc une connaissance précise de la température du câble installé sur toute sa longueur et lors de ses différentes phases d'utilisation : le recours à une technique optique répartie permet bien évidemment de satisfaire à la fois cette exigence de contrôle à 100 % et les contraintes particulières de mise en œuvre liées à l'application câbles de puissance (isolation électrique, présence de forts potentiels).

Un nombre important de fabricants s'est donc consacré depuis 1985 au développement de ce type de produit (York Sensors notamment avec les différentes variantes du DTS (Distributed Temperature Sensor), mais aussi Cossor Electronics, Fujikura, G2 Systems

Corporation, Sumitomo ou Ericsson), et les essais site se sont multipliés, aussi bien dans le domaine initial de la surveillance de câbles de puissance (National Grid, MANWEB et BICC en Grande-Bretagne, Felten & Guillaume en Allemagne ou EDF en France), que dans celui de la détection d'incendies (British Gas, Elf Aquitaine, US Bureau Mines...) ou de la surveillance de transformateurs électriques (Asea Brown Boveri, GEC-Alsthom, EPRI).

■ Le dernier exemple sélectionné concerne l'**instrumentation d'aéronefs** (avions ou hélicoptères). Celle-ci pose en effet un certain nombre de problèmes pratiques parmi lesquels on citera notamment :

- sa protection vis-à-vis des perturbations électromagnétiques, en particulier lors des phases de décollage ou d'atterrissage ;
- la résistance des appareillages au foudroiement, que ce soit au niveau du point de mesure lui-même ou au niveau du calculateur de bord (remontée possible de l'impulsion électrique par les différentes liaisons filaires) ;
- la résistance de ces mêmes appareillages à l'Impulsion Électro-Magnétique Nucléaire (IEMN), dans le cas des aéronefs à applications militaires ;
- la minimisation de la masse embarquée qui correspond à cette instrumentation, cette contrainte étant amplifiée par le niveau de redondance physique actuellement retenu pour l'ensemble du système de pilotage (par exemple, quadruplex) ;
- la possibilité de détecter de manière simple et précoce l'endommagement éventuel de certaines structures, en particulier lorsque celles-ci sont réalisées en matériaux composites (concept de maintenance préventive dirigée).

Les réseaux de capteurs à fibres optiques apportent une réponse potentielle globale à l'ensemble de ces interrogations, et notamment à celles qui mettent en cause les aspects liés à l'isolation électrique (figure 4).

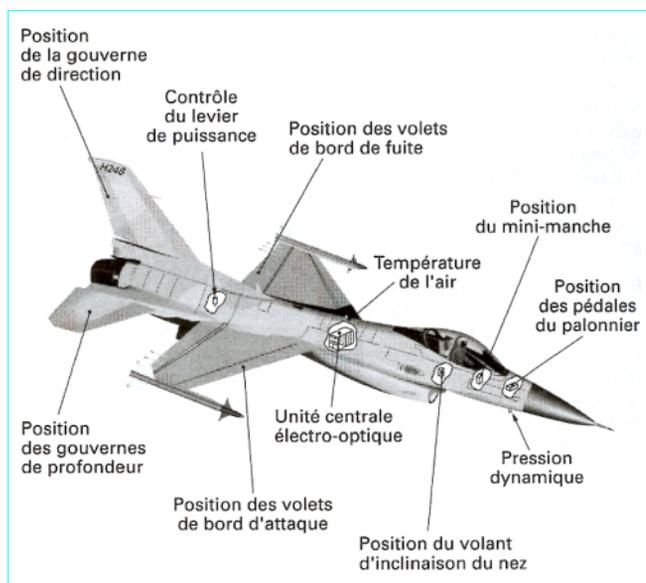


Figure 4 – Système centralisé de gestion d'un aéronef par réseau de capteurs à fibres optiques

En effet, un réseau à points multiples pourra être utilisé pour centraliser l'ensemble des informations relatives à la position des commandes, à celle des organes de pilotage, et à l'état du système de propulsion (pression, température, niveau de carburant, vitesse de rotation...), tandis que des capteurs répartis ou quasi-répartis implantés dans les éléments structuraux de l'aéronef permettront de déceler toute évolution anormale (déformations permanentes induites par des phénomènes de fatigue, détection d'impacts ou de délaminage).

À terme, on peut envisager que la disponibilité d'un tel réseau de surveillance aura des conséquences sur la structure même de l'aéronef ou sur ses modes d'utilisation (généralisation du principe de pilotage par objectifs).

De telles techniques de détection ne devraient toutefois être utilisées de manière opérationnelle avant au moins une décennie.

3. Procédures de multiplexage

Nota : le lecteur pourra se reporter aux références [2] [4] [8].

3.1 Multiplexage spatial

Cette première variante regroupe l'ensemble des méthodes dans lesquelles le pilotage d'un élément actif appelé **commutateur** est utilisé pour modifier la continuité optique de la liaison entre source de lumière, transducteur et récepteur.

■ La figure 5a illustre la topologie et le fonctionnement d'un réseau de capteurs à fibres optiques mettant en œuvre un tel principe à l'aide de **moyens mécaniques** : l'opération de commutation se traduit ici par le déplacement latéral de l'une des extrémités de la fibre principale qui passe d'un état initial où elle se trouvait alignée sur la fibre reliée au capteur k à un état final où son extrémité se trouve mise en regard de celle de la fibre connectée au capteur $k + 1$.

L'**avantage** essentiel d'une telle configuration est, outre sa simplicité, le gain qu'elle apporte en termes de rapport signal à bruit : la totalité de la puissance de la source lumineuse se trouve en effet temporairement affectée à l'interrogation d'un seul des capteurs présents dans le réseau. Un autre avantage significatif d'une telle configuration est l'absence totale de diaphonie qui la caractérise.

Elle présente toutefois deux **inconvénients** importants liés aux caractéristiques particulières des commutateurs électromécaniques habituellement utilisés :

- le temps d'accès entre deux voies adjacentes est relativement long (typiquement une dizaine de millisecondes), ce qui empêche l'emploi d'une telle procédure lorsque la bande passante des phénomènes à observer est importante ;
- la fiabilité de ces commutateurs n'est bien évidemment pas infinie (les fabricants garantissent typiquement 10^7 opérations), ce qui ramène leur durée de vie effective à environ une journée si on les utilise à pleine capacité (100 Hz) ou impose de limiter la fréquence de commutation à quelques dixièmes de hertz si on veut pouvoir garantir une utilisation nominale sur plus d'une année.

■ Ce sont essentiellement les problèmes pratiques soulevés par de tels compromis durée de vie-bande passante qui ont conduit à définir une **variante électronique de ce multiplexage spatial** (figure 5b). Celle-ci consiste à associer à chaque capteur C_k une source S_k qui lui soit dédiée, et à identifier au niveau du récepteur les informations relatives à chaque branche du réseau à l'aide du séquençement temporel des différentes sources. Ceci suppose naturellement que les fibres retour associées aux différents capteurs soient ramenées vers le récepteur au travers d'un coupleur passif $1 \rightarrow N$ utilisé ici comme concentrateur de flux.

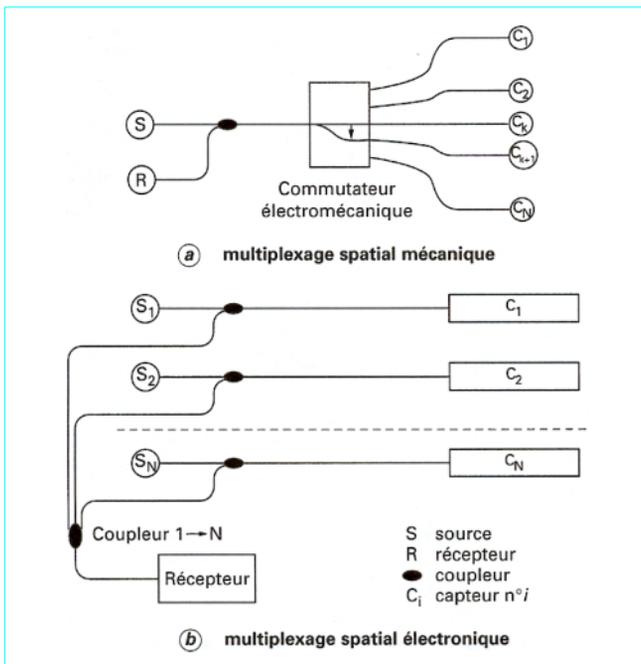


Figure 5 – Principes utilisés pour le multiplexage spatial d’un réseau de capteurs à fibres optiques

L’opération de commutation consiste donc ici à éteindre la source associée au capteur k et à allumer celle associée au capteur $k + 1$.

La mise en œuvre d’un tel concept nécessite évidemment que l’intensité des sources utilisées soit aisément modulable et que leur coût élémentaire reste suffisamment modéré : ces contraintes sont parfaitement remplies par des émetteurs de type semi-conducteur (diodes électroluminescentes ou diodes laser) qui sont justement ceux les plus fréquemment utilisés en technologie fibre optique.

■ L’une des particularités intéressantes commune à ces deux variantes est la possibilité de reconfigurer à tout instant la structure du réseau, en définissant la liste des abonnés auxquels on souhaite affecter la totalité du temps de scrutation.

Enfin, il convient de souligner dès à présent que le multiplexage spatial peut être utilisé en combinaison avec l’une quelconque des autres procédures décrites dans les prochains paragraphes, afin d’en augmenter la capacité intrinsèque.

3.2 Multiplexage temporel

Le principe de base de cette méthode [8], qui se trouve illustré à la figure 6, consiste à injecter dans le réseau une impulsion lumineuse de faible durée (typiquement quelques nanosecondes) et à détecter les impulsions renvoyées par les différents transducteurs et qui se trouvent retardées par rapport à l’instant d’émission d’intervalles de temps t_i définis par :

$$t_i = \frac{nL_i}{c}$$

avec n indice de réfraction du cœur de la fibre,
 c (m/s) vitesse de la lumière dans le vide,
 L_i (m) distance totale séparant le capteur $n^o i$ du récepteur.

Un récepteur adapté à un tel principe de multiplexage (TDM pour *Time Division Multiplexing*) est habituellement désigné sous l’appellation générique d’OTDR (pour *Optical Time Domain Reflectometer*), et se trouve être en fait un radar d’un type particulier adapté à la technologie optique guidée.

■ Dans le cas d’un réseau à points multiples, la durée τ de l’impulsion, sa fréquence de répétition f et le jeu de longueurs de raccordement $\{L_i\}$ doivent être choisis de manière à ce que le retard associé au capteur le plus distant soit supérieur au temps caractéristique $T = 1/f$, et à ce qu’aucun écho utile ne puisse être perturbé par son recouvrement total ou partiel avec un autre écho, qu’il soit associé à un autre capteur ou généré par des réflexions parasites produites par certains éléments passifs du réseau de raccordement (connecteurs, coupleurs, épissures).

■ Dans le cas des réseaux répartis, pour lesquels le multiplexage temporel constitue le mode principal de mise en œuvre, le même genre de recommandations s’applique encore, à ceci près que c’est maintenant la durée propre de l’impulsion qui définit l’extension physique d’un transducteur élémentaire ; on considère en effet que les signaux détectés correspondent à des sources d’informations décorrélées lorsque la distance d qui les sépare respecte la condition :

$$d \geq d_c = \frac{c}{2n} \tau$$

relation pour laquelle on a supposé que la fibre continûment sensible était utilisée en réflexion. La distance critique d_c est habituellement désignée sous le terme de *résolution spatiale*, et se trouve être de l’ordre du mètre lorsque la durée d’impulsion τ avoisine la dizaine de nanosecondes.

3.3 Multiplexage spectral

Dans cette méthode [4] [8], on réserve une bande spectrale spécifique (longueur d’onde centrale λ_k , largeur totale à mi-hauteur $\Delta\lambda_k$) à chaque capteur présent dans le réseau, et l’on choisit les caractéristiques spectrales de ces différentes porteuses de manière à minimiser le niveau de diaphonie entre voies et à permettre la scrutation complète du réseau à l’aide d’une source lumineuse unique. C’est la raison pour laquelle cette méthode est désignée en anglais par le sigle WDM (pour *Wavelength Division Multiplexing*).

La source lumineuse utilisée doit donc être de type *multicolore*, ce qui peut être obtenu :

— soit par l’utilisation d’une source incohérente à spectre large telle qu’une lampe à filament ou une combinaison de diodes électroluminescentes ;

— soit par la mise en œuvre d’une source cohérente à spectre étroit mais de longueur d’onde centrale ajustable, telle qu’un laser semi-conducteur de type DFB (modification de la longueur d’onde d’émission par réglage de la température de la jonction) ou un laser semi-conducteur en cavité externe (accordabilité obtenue grâce à une modification des caractéristiques géométriques de la cavité étendue).

La première méthode est bien adaptée à une définition des différentes bandes spectrales à l’aide d’empilements multicouches diélectriques (filtres passe-bande de type Fabry-Perot) ou grâce à l’emploi de systèmes dispersifs classiques (réseaux de diffraction notamment).

La mise en œuvre de la seconde méthode est fortement liée à la disponibilité récente de réflecteurs à bande étroite (0,1 à 0,3 nm), les réseaux de Bragg, réalisés en technologie guidée par modulation périodique de l’indice de réfraction du cœur d’une fibre mono-mode (effet photoréfractif induit par une illumination ultraviolette).

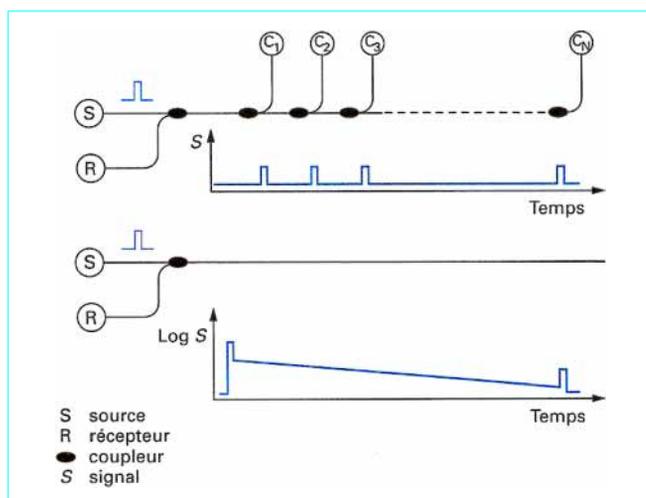


Figure 6 – Fonctionnement du multiplexage temporel en configurations multiplexée et répartie

3.4 Multiplexage de cohérence

Cette quatrième procédure de multiplexage [9] [10] nécessite à nouveau l'utilisation d'une source incohérente à spectre large (longueur d'onde centrale λ_0 , largeur totale à mi-hauteur $\Delta\lambda$), analogue à celle utilisée dans le cas de la méthode spectrale. Le multiplexage de cohérence présente toutefois, par rapport à une mise en œuvre intensimétrique de la technique précédente, des avantages analogues à ceux que confère en transmission radio l'utilisation de la modulation de fréquence en lieu et place de la modulation d'amplitude (amélioration de la qualité de la transmission et réduction de sa sensibilité vis-à-vis des perturbations générées par le milieu de propagation).

Comme indiqué à la figure 7, cette méthode consiste à illuminer avec une source incohérente des transducteurs de type interférométrique (schématisés ici par des interféromètres de Michelson), dont les différences de marche Δ_k soient à la fois :

- grandes devant la longueur de cohérence ℓ_c de la source utilisée :

$$\Delta_k = 2 \Delta L_k \gg \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} = \ell_c$$

où ΔL_k désigne l'écart de longueur entre les deux bras du Michelson n° k ,

- et suffisamment distinctes, toujours en regard de cette même longueur de cohérence :

$$\Delta_{k+1} - \Delta_k \gg \ell_c$$

Compte tenu des règles de conception qui viennent d'être précisées, l'intensité du signal optique délivré par chaque transducteur n'est absolument pas affectée par une modification de la différence de marche qui le caractérise ; le phénomène d'interférences n'a donc pas ici de traduction intensimétrique, mais simplement spectrale : il crée en effet dans le spectre de la lumière qui traverse le transducteur une modulation périodique dont la fréquence est proportionnelle à la différence de marche correspondante.

À la sortie du réseau, le flux lumineux disponible est donc constitué par la superposition des contributions élémentaires des différents abonnés. Pour avoir accès à l'information spécifique associée au capteur k , il est alors nécessaire d'utiliser comme récepteur optique un nouvel interféromètre dont la différence de marche Δ soit proche

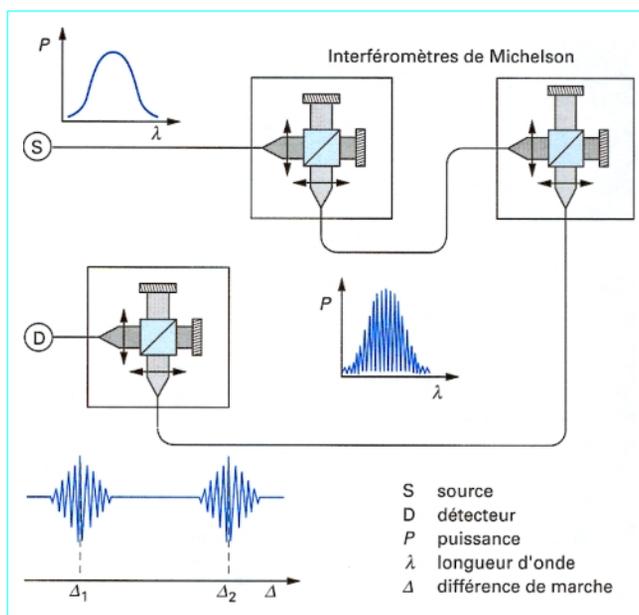


Figure 7 – Principes de base du multiplexage de cohérence

de celle de ce capteur ; la mise en série de ces différents éléments optiques donne en effet accès à un signal interférométrique dont l'intensité I est à nouveau fonction de la différence de marche du capteur et décrite par l'expression générale ci-après :

$$I = c_k P_0 \left\{ 1 + \frac{1}{2N} m (\Delta - \Delta_k) \cos 2\pi \frac{\Delta - \Delta_k}{\lambda_0} \right\}$$

où c_k désigne un coefficient de distribution associé à la structure particulière du réseau,

N la capacité totale de ce réseau,

P_0 la puissance lumineuse injectée dans le réseau,

et m un *facteur de visibilité* qui devient maximal lorsque les différences de marche des deux interféromètres sont égales et s'annule lorsque leur écart devient grand devant la longueur de cohérence de la source.

C'est le comportement particulier de ce facteur de visibilité qui rend possible la sélection d'un capteur donné à l'intérieur du réseau et fait que le multiplexage de cohérence est aussi appelé **interférométrie par corrélation** ou PMDI (*Path Matched Differential Interferometry*).

3.5 Multiplexage fréquentiel

Cette dernière variante de multiplexage est certainement la moins usitée, et consiste à assigner une bande de fréquence spécifique à chaque capteur (d'où l'appellation anglaise FDM, pour *Frequency Division Multiplexing*) à l'intérieur de laquelle le signal délivré par le transducteur est modulé en amplitude, phase ou fréquence. Cette méthode est donc analogue dans son principe à la technique WDM, à ceci près que les fréquences des porteuses utilisées diffèrent de plusieurs ordres de grandeur.

Deux exemples particuliers permettront de mieux appréhender la manière dont cette méthode peut être en pratique mise en œuvre.

■ Le premier exemple concerne des capteurs constitués par des **microstructures mécaniques** (obtenues notamment par attaque chimique sélective de substrats en silicium), dont la fréquence propre de résonance est fonction de la valeur prise par certains paramètres physiques tels que pression ou température et dont la mise en résonance et l'interrogation peuvent être réalisées par des moyens optiques [11].

Les fréquences de résonance de telles structures varient typiquement de quelques kilohertz à plusieurs mégahertz, et les facteurs de surtension Q sont compris entre quelques dizaines et quelques milliers suivant que le fonctionnement a lieu dans l'air ou sous vide. Ceci laisse donc une grande liberté pour le choix des porteuses, même si le réseau ainsi constitué ne respecte pas à l'évidence le critère d'interchangeabilité défini au paragraphe 2.2.

■ Le second exemple concerne des **capteurs interférométriques** à différences de marche non nulles dont l'interrogation est réalisée par technique FMCW (pour *Frequency Modulated Continuous Wave*), c'est-à-dire à l'aide d'une source laser dont la longueur d'onde centrale est modulée périodiquement en forme de rampe. L'intensité du signal délivré par chaque interféromètre se trouve alors lui-même modulé à une fréquence dont la valeur est directement proportionnelle à la différence de marche du capteur considéré et à la pente de la rampe spectrale de modulation. Comme pour le précédent exemple, un filtrage électronique du signal global délivré par le réseau permet ensuite d'isoler les informations propres à chaque capteur [12].

4. Réseaux à points multiples

4.1 Réseau OPTONET

Ce réseau, développé à partir de 1984 par la société Photonetics [13], constitue un exemple opérationnel de l'application du multiplexage temporel à l'interrogation de capteurs à fibres optiques de type tout ou rien (TOR).

Ces capteurs TOR sont constitués de transducteurs ponctuels dont la transmission optique varie de manière brutale lorsque la valeur du paramètre physique auquel ils sont dédiés franchit un seuil prédéterminé. Ces capteurs fournissent donc de simples informations d'état, ce qui rend possible l'utilisation d'un codage optique aussi simple que le codage d'intensité. Parmi les paramètres accessibles, on retiendra en particulier le **niveau** d'un liquide à l'intérieur d'un réservoir, la **température** ou encore le dépassement d'une **position** de fin de course.

La figure 8 illustre la constitution et le fonctionnement d'un tel réseau. Une diode laser pulsée modulée à une fréquence de répétition de 10 kHz injecte dans le coupleur de tête une impulsion lumineuse de faible durée (20 ns) et de forte puissance crête.

Cette impulsion lumineuse est alors acheminée (éventuellement sur une grande distance) jusqu'à la zone de mesure à l'aide d'un câble monofibre, puis séparée en N impulsions synchrones grâce à un coupleur en étoile sur lequel se trouvent raccordés les différents capteurs TOR. De manière à séparer et identifier les échos réfléchis par l'ensemble de ces capteurs, une ligne à retard de longueur spécifique est insérée entre chaque capteur et la branche de sortie du coupleur étoile qui lui correspond (ces longueurs s'échelonnent ainsi de L à $8L$, dans la configuration à 8 voies schématisée à la figure 8).

Le photodétecteur à grande bande passante utilisé dans le récepteur optique délivre donc une série d'impulsions électriques, dont l'analyse du séquençement et de l'intensité (comparaison à un seuil) permet non seulement de déterminer l'état des différents capteurs, mais aussi de vérifier le bon fonctionnement des éléments constitutifs du réseau (ensemble émission/réception, coupleur de tête, ligne de raccordement, coupleur étoile).

4.2 Réseau FRASCAN

Ce deuxième exemple de réseau opérationnel [14] a été conçu et développé par le département OPTOFRA de la Société Framatome à partir de 1987, et se trouvait lui aussi dédié à l'origine à la mise en œuvre de capteurs TOR.

Comme le montre la figure 9, ce réseau est basé sur l'emploi d'un multiplexage de type spectral, et ses performances sont fortement tributaires de celles des polychromateurs utilisés pour découper à l'intérieur d'une seule source incohérente un nombre important de bandes spectrales indépendantes (jusqu'à 48 dans une largeur totale n'excédant pas 150 nm).

Une variante de fonctionnement a été ultérieurement développée par Framatome pour permettre à un tel réseau de supporter des capteurs de type analogique ($Q = 100$) : elle consiste à affecter un certain nombre de signaux à la caractérisation du réseau lui-même, de manière à s'affranchir de ses évolutions éventuelles de performances et à accéder ainsi à une mesure plus précise de la réponse effective de chaque capteur.

4.3 Réseau ACCORD

Contrairement aux exemples décrits dans les deux précédents paragraphes, le réseau à points multiples ACCORD a eu dès l'origine pour objectif de rendre possible le multiplexage de capteurs analogiques de grande résolution ($Q \geq 1\,000$) : c'est ce qui a conduit la société BERTIN à sélectionner, dès 1986, le **multiplexage de cohérence** comme principe de base d'un tel système, car son insensibilité intrinsèque aux perturbations apportées par les lignes de transmission et la nature interférométrique des transducteurs qu'il met en œuvre constituent des atouts particulièrement décisifs en regard d'un tel objectif.

■ Afin d'éviter le recours à un interféromètre de réception à balayage capable de venir s'accorder séquentiellement sur les fréquences de modulation spectrales caractéristiques des différents capteurs présents dans le réseau, et dont l'emploi peut soulever des problèmes de fiabilité, de bande passante et de stabilité à long terme, la société BERTIN a retenu une architecture de détection qui soit à la fois :

- **statique** (grâce à l'emploi d'un interféromètre de réception biréfringent de type homodyne passif, c'est-à-dire assurant la démodulation des informations de phase par une combinaison convenable de quatre signaux interférométriques complémentaires) [15] ;
- et **parallèle** (c'est-à-dire dans lequel on utilise autant de récepteurs élémentaires différents qu'il y a de capteurs présents dans le réseau, ces récepteurs étant alors eux-mêmes organisés sous la forme d'un réseau étoile qui est en fait l'image à distance du réseau de transducteurs).

Cette architecture a été en particulier utilisée par la société BERTIN pour développer des capteurs intégrés multiparamètres (par exemple, pour la mesure simultanée de pression et de température en fond de puits de pétrole [16]).

■ De manière à augmenter la capacité potentielle de ce type de réseau et à rendre possible l'utilisation de capteurs tous identiques, ce qui constitue une exigence forte dans de nombreux cas d'applications, la société BERTIN a défini une nouvelle variante de réalisation qui associe **multiplexage de cohérence** et **multiplexage spatial électronique**.

Une telle configuration a été en particulier utilisée pour développer un nouveau réseau d'instrumentation, le réseau COST [5], qui constitue une variante du réseau ACCORD adapté à la surveillance thermique d'un stator d'alternateur de centrale nucléaire. Ce réseau mixte est capable de multiplexer jusqu'à 128 capteurs de température de grande dynamique (0,1 °C de résolution sur une gamme de 200 °C) dans un temps de scrutation qui n'excède pas 10 secondes.

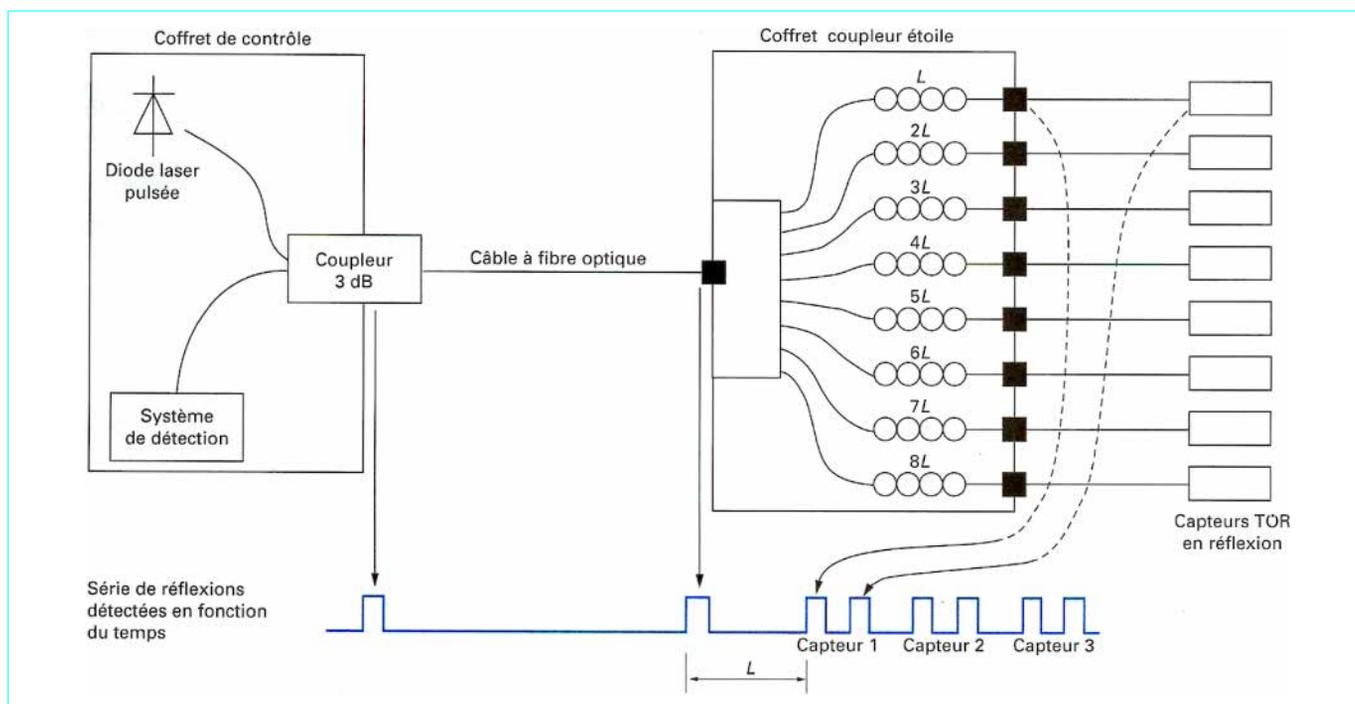


Figure 8 – Schéma de principe du réseau OPTONET

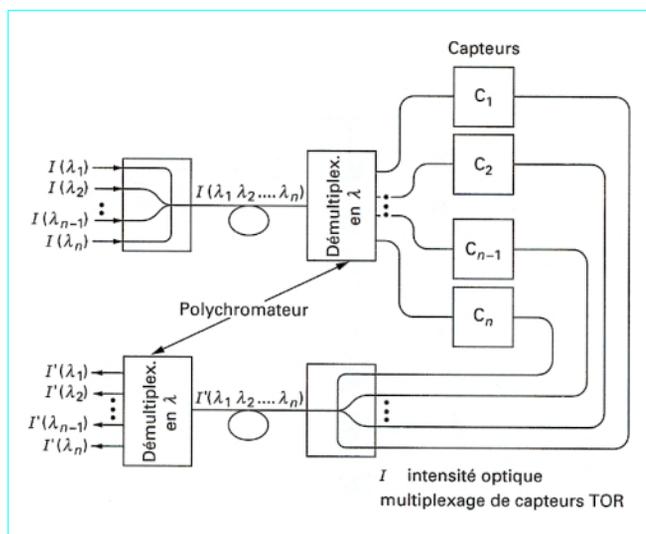


Figure 9 – Principe de fonctionnement du réseau FRASCAN

La figure 10 illustre la structure prise par un réseau industriel de type ACCORD lorsque les deux variantes d'architecture précédemment décrites sont utilisées en combinaison.

On retrouve dans un tel schéma :

- autant de diodes électroluminescentes qu'il y a de capteurs distincts dans le réseau (soit ici 6) ;
- autant de récepteurs interférométriques qu'il y a de fréquences de codage différentes (soit ici 2, la présence du capteur mixte pression/température justifiant à elle seule le recours à une telle valeur) ;

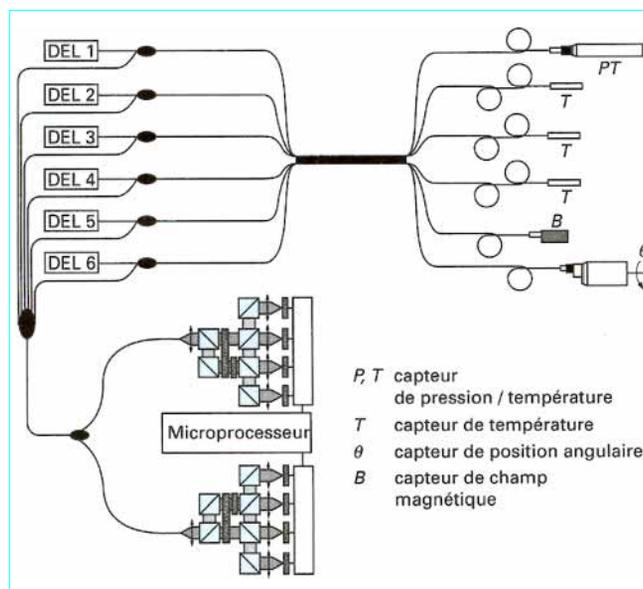


Figure 10 – Réseau ACCORD associant multiplexage spatial et multiplexage de cohérence

— un microprocesseur chargé de séquencer la commutation électronique des différentes sources et de traiter l'ensemble des valeurs acquises, en particulier au travers de l'application des lois expérimentales de comportement des différents transducteurs.

5. Réseaux quasi-répartis

5.1 Réseaux à dioptrés insérés

On désigne ici par réseau à dioptrés insérés toute configuration quasi-répartie dans laquelle le mécanisme de transduction nécessite que la fibre unique utilisée comme support de la transmission soit **physiquement interrompue** à intervalles plus ou moins réguliers. Deux exemples différents permettront de mieux visualiser la structure d'un réseau mettant en œuvre une telle architecture.

■ Le premier exemple de réseau à dioptré inséré est celui développé par Alcatel Alsthom Recherche (AAR) pour les besoins de la surveillance thermique de machines électriques [17]. Son principe est illustré à la figure 11 et consiste :

— à mettre à profit la forte sensibilité thermique de l'indice de réfraction d'un polymère pour obtenir une variation du coefficient de réflexion d'un transducteur élémentaire, constitué d'un simple dioptré silice-polymère ; ce coefficient de réflexion ρ est en effet décrit par la relation de définition suivante :

$$\rho = \left(\frac{n_{\text{polymère}} - n_{\text{silice}}}{n_{\text{polymère}} + n_{\text{silice}}} \right)^2$$

— à multiplexer temporellement ces différents transducteurs agencés en ligne au long de la même fibre optique.

De manière à éviter toute perturbation due aux évolutions de transmission de la fibre elle-même, le niveau de flux que cette fibre diffuse est mesuré entre chaque transducteur, ce qui donne accès pour chaque point à un rapport R uniquement fonction de la température :

$$R = \frac{P_c - P_0}{P_d - P_0}$$

où P_c désigne l'intensité crête du signal rétro-réfléchi par le dioptré,

P_d celle du signal rétrodiffusé immédiatement avant celui-ci, et P_0 le bruit intrinsèque du système de détection.

Les pertes en excès introduites par chaque transducteur étant faibles (0,075 dB), il est possible d'interroger jusqu'à 20 capteurs disposés en série sur une même fibre multimode 100/140 à l'aide d'un réflectomètre temporel dédié (longueur d'onde 904 nm, puissance crête 3W, durée d'impulsion 12 ns, cadence de répétition 16 kHz). La gamme couverte par chaque capteur est de 100 °C pour une précision effective approchant le degré Celsius.

■ Le second exemple de réseau à dioptré inséré est celui développé conjointement par le Virginia Polytechnic Institute et la société Fiber & Sensor Technologies [18].

Ce réseau est constitué de transducteurs habituellement désignés sous le sigle EFPI (pour *Extrinsic Fabry-Perot Interferometer*) et dont le schéma de principe est présenté à la figure 12a. La cavité Fabry-Perot en question est ici formée par les extrémités planes de deux fibres optiques monomodes placées en regard et entre lesquelles on a ménagé un interstice e de quelques dizaines de micromètres. Ces fibres sont placées dans un capillaire de grande précision qui assure à la fois leur alignement et leur maintien (habituellement par collage).

Chacun de ces capteurs est donc caractérisé par une différence de marche spécifique $\Delta = 2e$, dont la valeur est susceptible d'être modifiée soit par la température (dilatation thermique du capillaire d'alignement), soit sous l'application d'une contrainte axiale (déformation mécanique de ce même capillaire).

Comme indiqué sur la figure 12b, la lecture de l'information portée par de tels transducteurs agencés en réseau quasi-réparti est réalisée par multiplexage de cohérence, grâce à l'emploi d'un inter-

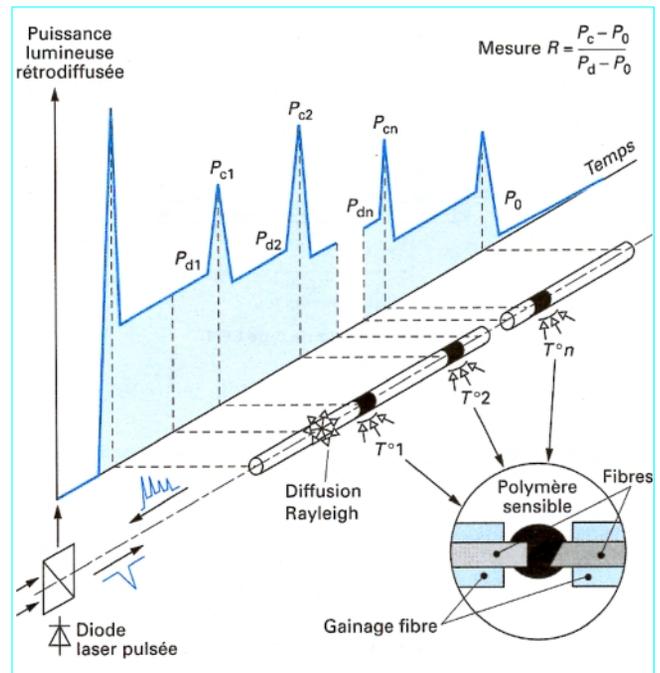


Figure 11 – Réseau AAR à polymère inséré

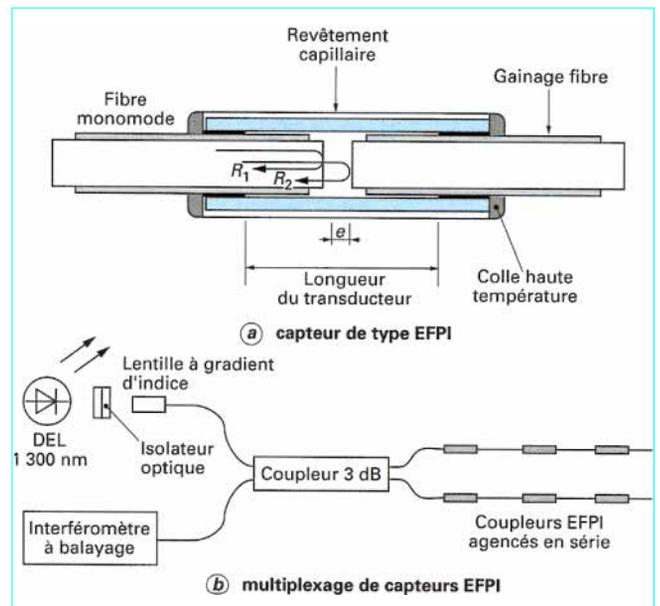


Figure 12 – Réseau EFPI à multiplexage de cohérence

féromètre de réception à balayage ; pour que ce démultiplexage puisse être obtenu sans diaphonie excessive, il est non seulement nécessaire que les épaisseurs des cavités Fabry-Perot utilisées soient toutes différentes, mais aussi que les fréquences d'ordre supérieur associées aux harmoniques de chaque Fabry-Perot ou à leur recombinaison ne viennent pas créer de signaux parasites d'amplitude efficace trop importante.

Les applications principales de ce type de réseau concerne l'**instrumentation de structures**, et une première expérimentation opérationnelle a été réalisée sur un élément d'aile d'un F/A-18 à l'aide de 12 capteurs multiplexés spatialement, le nombre de ces jauges de déformation devant être prochainement porté à 60 par mise en œuvre simultanée d'un multiplexage de cohérence.

5.2 Réflecteurs de Bragg

Un réflecteur de Bragg (ou réseau de Bragg) est un composant photo-inscrit sur fibre utilisé pour augmenter la capacité des réseaux de communication à fibres optiques par multiplexage spectral (réseaux dits *multicolores*).

Ce composant, présenté à la figure 13, est réalisé par illumination transverse d'une fibre optique monomode à l'aide d'un rayonnement ultraviolet dont le profil d'intensité au long de cette fibre présente une variation spatiale périodique de pas Λ : cette illumination donne naissance par effet photoréfractif à une variation permanente de l'indice du cœur de la fibre qui présente la même structure périodique. Lorsqu'une onde lumineuse se propage dans une telle structure, elle est transmise sans atténuation notable, sauf si sa longueur d'onde λ satisfait à la relation

$$\lambda = \lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda$$

où n_{eff} désigne l'indice effectif de la fibre : dans ce cas, il se produit en effet un phénomène d'interférences constructives, et l'onde lumineuse se trouve réfléchi avec une efficacité pouvant approcher les 100 %. Une autre propriété particulièrement intéressante de ces réflecteurs de Bragg est leur grande finesse spectrale (quelques angströms).

La longueur d'onde caractéristique λ_B est naturellement modifiée par toute évolution affectant l'indice effectif n_{eff} du guide ou la période Λ du réseau photo-inscrit : c'est en particulier le cas pour la température ou la déformation axiale, pour lesquelles les sensibilités obtenues sont typiquement de 10 pm/°C (soit de l'ordre de 10^{-5} en valeur relative) et de 1 pm/ $\mu\epsilon$.

Il est naturellement possible d'inscrire sur une même fibre plusieurs réflecteurs de Bragg de longueurs d'onde caractéristiques différentes, et de constituer ainsi un réseau quasi-réparti : c'est ce qu'illustre la figure 14, dans le cas particulier d'un réseau à 12 éléments [19].

L'interrogation d'un tel réseau peut être réalisée soit par multiplexage spectral soit par multiplexage temporel [20] [21].

■ Pour mettre en œuvre la première variante, on utilise une source à spectre large, et un Fabry-Perot à balayage, comme indiqué à la figure 15.

La source utilisée est une fibre dopée erbium fonctionnant en régime de superfluorescence (ou ASE, pour *Amplified Spontaneous Emission*) de manière à obtenir une largeur et une densité spectrale de puissance suffisantes pour assurer une alimentation optique convenable des différents réflecteurs de Bragg agencés en réseau. Le Fabry-Perot à balayage est de type FFP (*Fiber Fabry-Perot*), c'est-à-dire qu'il est constitué d'un sous-ensemble analogue à celui décrit à la figure 12 (EFPI), mais dans lequel l'une des fibres en regard est montée sur une cale annulaire piézo-électrique. L'application à cette cale d'une tension électrique de type dents de scie permet d'obtenir le balayage régulier et périodique de la longueur d'onde transmise par cet interféromètre. L'emploi d'un circuit électronique associant un mélangeur et un filtre passe-bas permet d'obtenir la dérivée de la fonction de réflexion spectrale enregistrée au cours du balayage : la détermination des zéros de cette dérivée donne accès avec une grande précision (typiquement 1 pm) aux variations des longueurs d'onde caractéristiques des différents réflecteurs de Bragg interrogés.

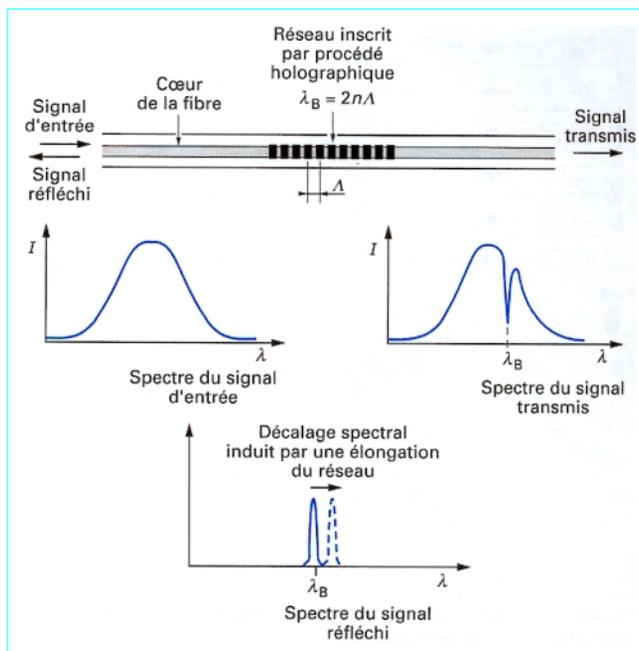


Figure 13 – Principe d'un réflecteur de Bragg

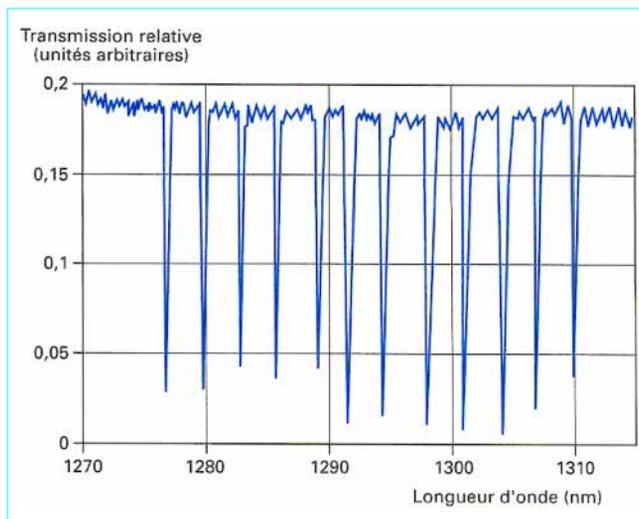


Figure 14 – Spectre en transmission d'un réseau quasi-réparti à 12 réflecteurs de Bragg

■ La deuxième méthode est de type temporel : elle consiste, comme indiqué à la figure 16, à envoyer dans la fibre support une impulsion lumineuse à spectre large. Chaque réflecteur de Bragg sélectionne dans cette impulsion la longueur d'onde qui lui correspond, de sorte que le récepteur voit revenir un train de N impulsions de longueurs d'onde centrales différentes.

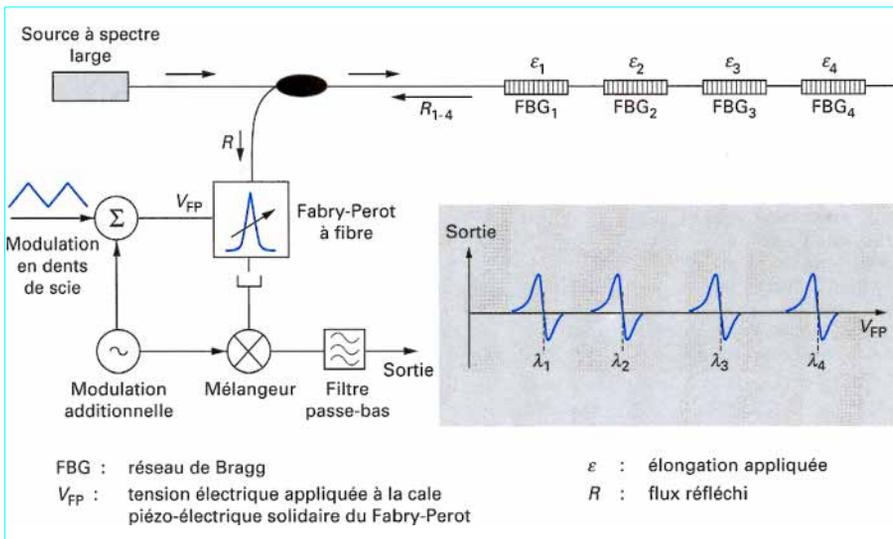


Figure 15 – Réseau de réflecteurs de Bragg multiplexés spectralement à l’aide d’un Fabry-Perot à balayage

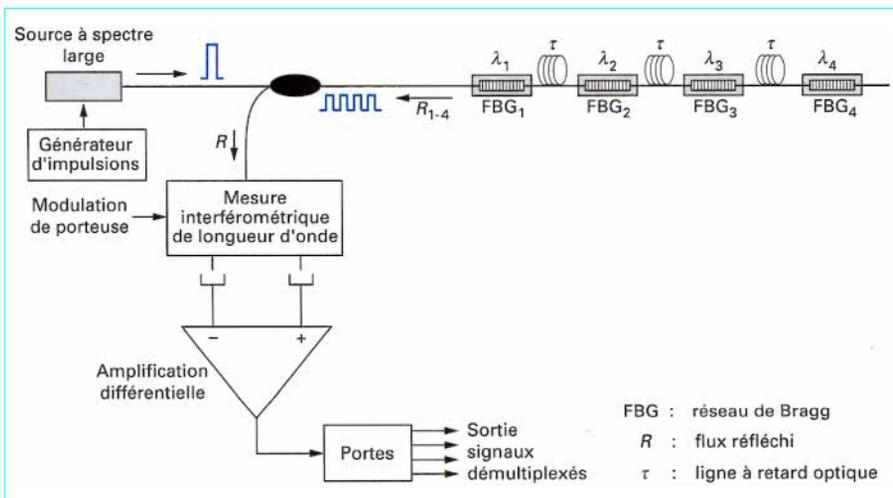


Figure 16 – Réseau de réflecteurs de Bragg multiplexés temporellement avec détection interférométrique du décalage en longueur d’onde

Pour mesurer les longueurs d’onde centrales associées à ces différentes impulsions avec un rapport signal à bruit suffisant malgré la bande passante élevée, il est souhaitable de mettre en œuvre un mécanisme d’amplification : ceci est obtenu grâce à l’emploi comme récepteur d’un interféromètre de Mach-Zehnder dont la différence de marche Δ est importante (typiquement quelques centaines de microns), qui transforme les évolutions δλ_B de la longueur d’onde centrale d’un réflecteur de Bragg en variations de phase, en accord avec les relations de définition suivantes :

$$\phi = 2\pi \frac{\Delta}{\lambda_B} \Rightarrow \delta\phi = -2\pi \frac{\Delta}{\lambda_B} \cdot \frac{\delta\lambda_B}{\lambda_B}$$

Le choix du rapport Δ/λ_B permet ici de régler l’importance de l’effet d’amplification apporté par ce mécanisme de détection.

■ Ces réseaux à réflecteurs de Bragg sont en particulier employés dans le domaine de l’**instrumentation de structures**, que ce soit en aéronautique (contrôle dynamique d’éléments d’aéronefs) ou en génie civil (surveillance de l’évolution d’ouvrages d’art). Ils présentent le même inconvénient que celui indiqué pour le réseau EFPI à multiplexage de cohérence, à savoir que leur utilisation en configuration quasi-répartie conduit en pratique à associer un transducteur différent à chaque point de mesure.

5.3 Fibre biréfringente segmentée par points de couplage interpolarisation

Les deux variantes de réseaux quasi-répartis présentées aux paragraphes précédents (dioptries insérés, réflecteurs de Bragg) conduisent en fait à un échantillonnage local du champ de variation d’un paramètre à des intervalles plus ou moins réguliers disposés le long d’une fibre optique : le réseau est donc constitué dans ce cas d’une alternance de zones de transduction et de zones de transmission.

La configuration décrite dans ce paragraphe procède d’un principe différent, et délivre des informations qui sont en fait les valeurs moyennes du paramètre d’intérêt (température ou déformation) mesurées sur des tronçons de fibre consécutifs : elle constitue donc une variante de réseau quasi-réparti extrêmement proche d’une structure répartie [22].

Le transducteur utilisé est une fibre à forte biréfringence (de forme ou de contrainte), dans laquelle on a implanté à intervalles plus ou moins réguliers des coupleurs interpolarisation (cf. figure 17).

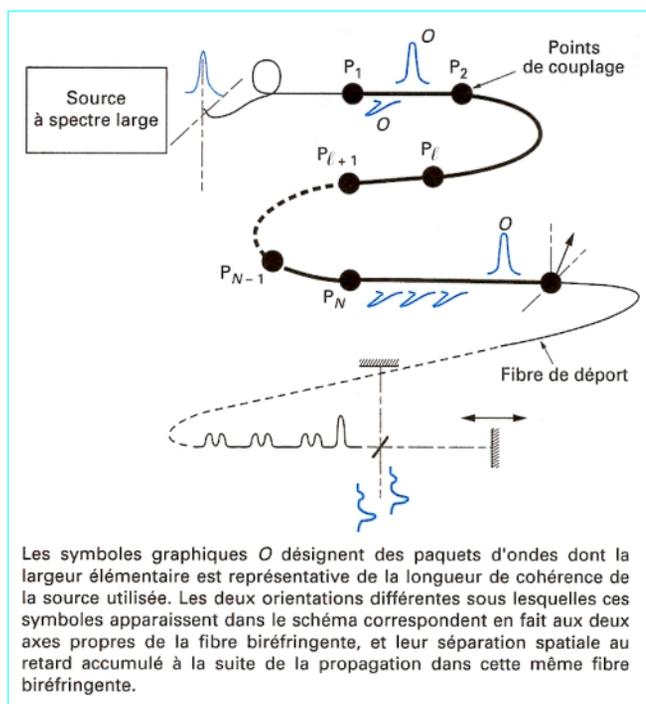


Figure 17 – Réseau quasi-réparti à fibre biréfringente

Ces coupleurs sont des zones particulières de fibre, de faible extension spatiale (du millimètre à la dizaine de millimètres, suivant le mode de fabrication employée), et qui ont pour principale propriété de provoquer un transfert partiel et symétrique de la puissance optique se propageant dans l'un des axes propres de la fibre vers l'autre axe propre. Ils peuvent être réalisés :

- soit grâce à une action mécanique permanente appliquée localement à la fibre (*squeezer ring*) ;
- soit par un chauffage temporaire et localisé de cette même fibre, réalisé par exemple à l'aide d'une machine à épissurer ;
- soit encore en utilisant des réseaux de Bragg d'un type particulier, appelés coupleurs de mode copropagatifs [23], et dont la période spatiale Λ est cette fois-ci définie par :

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\Delta n_{\text{eff}}}$$

où Δn_{eff} désigne la biréfringence de la fibre.

Le principe de fonctionnement d'un tel réseau est le suivant : on injecte dans la fibre biréfringente le flux émis par une source à spectre large (Diode SuperRadiante par exemple) après l'avoir polarisé linéairement et en alignant cette direction de polarisation sur l'un des axes propres de la fibre, par exemple l'axe dit rapide.

La lumière se propage donc dans cet axe propre, jusqu'à ce qu'elle rencontre un point de couplage : à cet endroit précis, une faible partie de la puissance lumineuse est transférée sur l'autre axe (ici l'axe lent) et les deux ondes ainsi créées (onde principale, onde couplée) accumulent au cours de leur propagation dans la fibre une différence de marche Δ_1 définie par :

$$\Delta_1 = L_1 \Delta n_{\text{eff}}$$

où L_1 désigne la longueur de fibre séparant ce premier point de couplage de l'extrémité de la fibre.

Si on implante N points de couplage au long de la même fibre, ceci permettra donc de générer N différences de marche Δ_k définies à l'aide de la même relation que celle indiquée plus haut, mais où la longueur caractéristique L_1 doit évidemment être remplacée par la longueur L_k associée au point de couplage de rang k considéré.

Si la longueur de cohérence de la source est grande devant les différences de marche accumulées entre deux points de couplage consécutifs, l'ensemble de ces informations pourra être multiplexé par cohérence, et relu à l'aide d'un interféromètre à balayage.

Ce récepteur donne donc accès à une mesure des différences de marche Δ_k , puis, par soustraction 2 à 2, à une caractérisation de l'état du tronçon k séparant le point de couplage k du point de couplage $k + 1$:

$$\delta_k = \Delta_k - \Delta_{k+1}$$

la détermination des variations de la grandeur δ_k permettant d'en déduire les évolutions moyennées par tronçon du paramètre d'intérêt (température, déformation).

Les domaines d'application de cette technique sont similaires à ceux présentés dans le cas des réseaux de Bragg, à ceci près qu'elle permet un échantillonnage **continu** de la structure sur laquelle la fibre sensible est implantée. De ce fait, les résolutions accessibles sont importantes (par exemple, 0,1 °C pour un pas d'échantillonnage spatial de 25 cm).

6. Réseaux répartis

Nota : le lecteur pourra se reporter à la référence [24].

6.1 Réflectométrie temporelle Rayleigh

Les réflectomètres temporels présentés au paragraphe 3.2 sont des appareils d'un usage aujourd'hui courant dans le domaine des télécommunications optiques guidées, car ils permettent, indépendamment du système de transmission lui-même, de s'assurer à tout instant de la disponibilité du réseau passif de distribution (détection des évolutions du profil d'atténuation des fibres de transmission, localisation des problèmes ponctuels de type courbure ou rupture).

En réflectométrie temporelle de type **Rayleigh**, on injecte dans la fibre une impulsion lumineuse de faible durée et de forte puissance crête, et on mesure la variation temporelle de la lumière rétrodiffusée par cette fibre à la **longueur d'onde d'excitation** ; le signal détecté provient d'une part de la lumière rétrodiffusée par les fluctuations d'indice du cœur de la fibre (diffusion Rayleigh) et, d'autre part, des réflexions créées par les discontinuités locales de ce même guide (connecteurs, épissures).

L'application de cette technique au domaine de l'instrumentation nécessite bien évidemment la définition d'un mécanisme de transduction qui relie de manière reproductible les modifications d'atténuation locale d'une fibre aux variations du paramètre d'intérêt. De nombreux systèmes ont été développés depuis 1980 autour d'un tel concept : les exemples sélectionnés ici concernent la détection de force, la mesure distribuée d'humidité et la mesure de la concentration locale d'une espèce chimique.

■ Le mécanisme de transduction utilisé pour la **détection de force** est celui des pertes induites par microcourbures sur un guide multimode.

Lorsqu'on applique à une fibre multimode une déformation périodique dont le pas Λ est relié aux constantes de propagation β_k de cette fibre par la relation :

$$\Delta\beta_k = \beta_{k+1} - \beta_k = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

on provoque un transfert progressif de la puissance véhiculée dans la fibre par le mode d'ordre k vers le mode d'ordre $k + 1$.

Si la fibre utilisée est une fibre à gradient d'indice, l'écart $\Delta\beta$ entre deux modes de propagation consécutifs est une constante du guide, de sorte que ce transfert devient quasi résonnant et conduit en cascade à un couplage de la lumière vers des modes radiatifs, et donc à une augmentation de l'atténuation locale de la fibre.

C'est ce mécanisme qui est utilisé dans le câble sensible commercialisé par la société Herga Ltd. [24], dont le schéma de principe est représenté à la figure 18a. Ce câble contient une fibre multimode à gradient d'indice autour de laquelle est enroulé en hélice un jonc polymère, l'ensemble étant placé dans une gaine mécanique ajustée. Lorsqu'un effort transverse est appliqué à la gaine extérieure, celui-ci se trouve intégralement transmis au jonc polymère dont la géométrie hélicoïdale provoque alors une déformation périodique de la fibre. Un choix convenable du pas de l'hélice permet donc d'obtenir une dépendance importante de l'atténuation de la fibre vis-à-vis de l'effort transverse qui est appliqué au câble.

Une telle structure a permis le développement de **barrières de sécurité**, capables de détecter la pression locale générée par le poids d'une personne, et utilisables soit sur des sites industriels (arrêt automatique d'une machine dangereuse en cas de présence de personnel à proximité), soit autour de sites sensibles (détection d'intrus éventuels).

■ La figure 18b montre comment le principe précédemment décrit (fibre à jonc hélicoïdal) peut être appliqué à la **mesure d'humidité**, grâce à l'emploi d'une enveloppe en polymère dont le volume augmente en présence d'eau [25].

■ La **détection d'une espèce chimique** et l'évaluation de sa concentration peuvent être obtenues en utilisant une fibre dont la gaine optique est constituée d'un matériau dont l'indice de réfraction est inférieur à celui de la silice et la transmission fonction de la concentration locale d'une espèce chimique donnée [26] [27].

Une faible partie du flux lumineux guidé se propage en effet dans la gaine optique sous une forme évanescente et l'augmentation de l'absorption du polymère se traduit donc par une augmentation de l'atténuation locale du guide.

Les applications envisagées sont en particulier relatives à la **détection de fuites de gaz explosibles** et à la localisation de ces fuites le long des canalisations de transport. Les principaux problèmes soulevés par une telle technique concernent le choix du polymère sensible, sa compatibilité avec le procédé de fabrication de la fibre, ainsi que la réversibilité du phénomène de fixation de l'espèce chimique.

6.2 Réflectométrie temporelle Raman

Dans cette nouvelle technique, on ne s'intéresse plus à la lumière rétrodiffusée à la longueur d'onde d'excitation, mais à celle ayant subi un **décalage en fréquence par diffusion inélastique de type Raman**.

Ce mécanisme de diffusion inélastique conduit à générer deux fréquences disposées symétriquement par rapport à la fréquence d'excitation ν_L et appelées respectivement raie Stokes ($\nu_S = \nu_L - \nu_B$) et raie anti-Stokes ($\nu_{AS} = \nu_L + \nu_B$), ν_B désignant la fréquence de vibration caractéristique du milieu dans lequel se produit cette diffusion (soit ici, la silice).

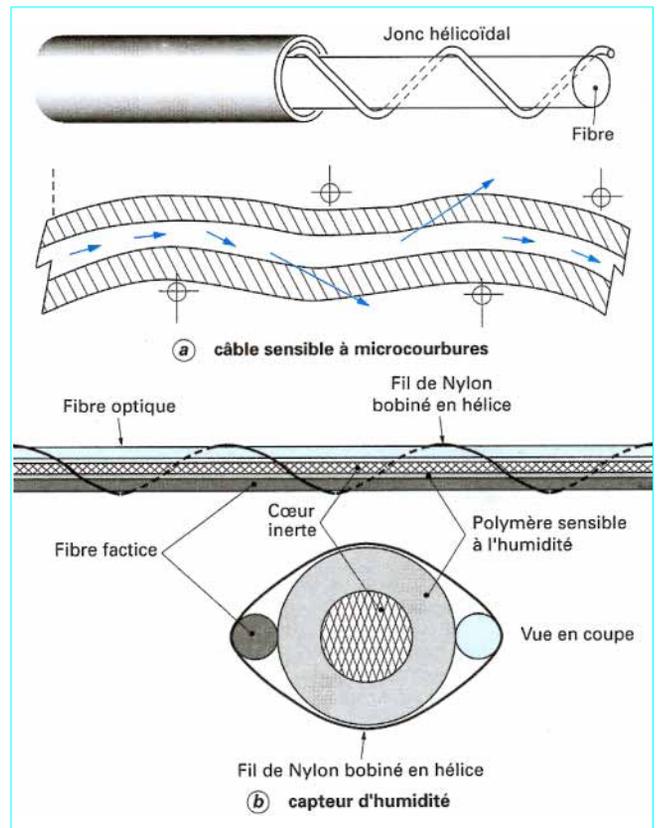


Figure 18 - Capteurs répartis à microcourbures

L'intensité de chacune de ces bandes est proportionnelle à la population du niveau de départ, c'est-à-dire à celle du niveau fondamental dans le cas de la raie Stokes, et à celle du premier niveau excité dans le cas de la raie anti-Stokes. Une analyse complète du problème montre que le rapport R des intensités diffusées dans ces deux régimes (anti-Stokes/Stokes) est donné par la relation :

$$R(T) = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right)^4 \exp - \frac{hc\nu_B}{kT}$$

avec h constante de Planck,

k constante de Boltzmann,

et ne dépend donc que des caractéristiques vibrationnelles du milieu et de sa température T . La mesure temporellement résolue de ce rapport donnera donc accès à une détermination locale de la température au long de la fibre, la résolution spatiale étant fixée par la durée propre de l'impulsion d'excitation et par la bande passante du système de détection [28].

La figure 19 présente un exemple des résultats obtenus lorsqu'une même fibre est soumise à des variations locales de température, par insertion dans des enceintes régulées à différents niveaux de consigne.

L'intérêt majeur de cette technique réside dans le fait que le rapport R ainsi formé ne dépend pas de la valeur locale de l'intensité de l'impulsion sonde, et présente donc une grande insensibilité vis-à-vis des perturbations mécaniques éventuellement appliquées à la fibre.

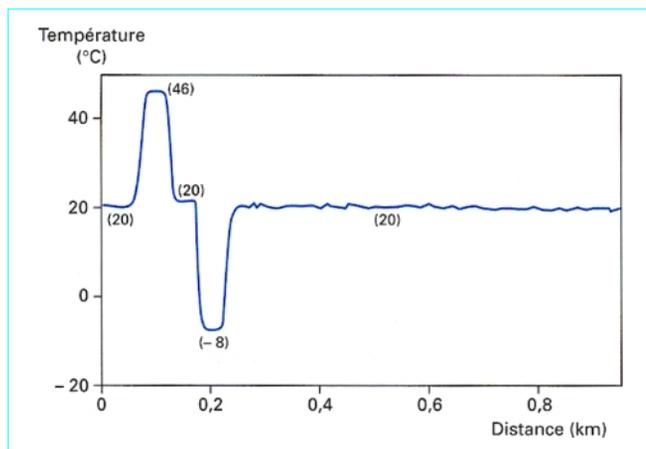


Figure 19 – Profil de température enregistré au long d'une fibre par un réflectomètre temporel à effet Raman

Son seul réel inconvénient est lié à la faible efficacité des mécanismes de diffusion mis en jeu : ceci impose en pratique l'emploi d'impulsions sondes de forte puissance crête et le recours à des cadences de scrutation faibles, notamment à basse température. Une dizaine de secondes sont ainsi nécessaires pour déterminer le profil de température d'une fibre de quelques kilomètres avec une précision avoisinant le degré Celsius et un pas d'échantillonnage de l'ordre du mètre.

6.3 Réflectométrie temporelle Brillouin

Cette dernière variante de réflectométrie [29] [30] est de mise au point plus récente et met en œuvre un mécanisme de diffusion inélastique qu'il est possible de présenter comme une **interaction de l'onde lumineuse avec des phonons d'origine acoustique** prenant naissance dans la fibre. L'intérêt potentiel de cette méthode réside dans l'efficacité de ce régime de diffusion (10 fois plus intense que dans le cas Raman), sa finesse spectrale (la largeur spontanée de la raie Brillouin ne dépasse pas 35 MHz), et la dépendance de ce décalage spectral vis-à-vis de la température (1,2 MHz/K) et de la déformation (5,8 MHz pour 100 $\mu\epsilon$).

Le décalage en fréquence qui lui correspond est cependant beaucoup plus faible qu'en régime Raman (typiquement 13 GHz), et il est donc en pratique impossible de l'isoler de la raie Rayleigh par filtrage spectral. La mesure temporellement résolue de ce décalage a donc nécessité la mise au point de deux techniques cohérentes, habituellement désignées par les sigles BOTDR (pour *Brillouin Optical Time Domain Reflectometry*) et BOTDA (pour *Brillouin Optical Time Domain Analysis*).

■ Dans la technique BOTDR, schématisée à la figure 20, on injecte dans la fibre une impulsion lumineuse de faible durée, et on mesure l'intensité de l'onde rétrodiffusée à l'aide d'un récepteur cohérent qui effectue le mélange de cette onde avec celle fournie par un oscillateur local : la mesure répartie du spectre Brillouin est alors obtenue soit en faisant varier l'écart entre la fréquence de l'impulsion sonde et celle de l'oscillateur local, soit en balayant la fréquence centrale du filtre électronique à bande étroite utilisé dans le récepteur pour assurer la réjection de la contribution Rayleigh.

Le principal avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite d'avoir accès qu'à l'une des extrémités de la fibre. Elle a en particulier conduit au développement de lasers spéciaux, susceptibles de constituer les oscillateurs locaux que sa mise en œuvre nécessite : il s'agit des lasers à fibre de type Brillouin, où le développement d'un effet laser dans une fibre à un niveau suffisant donne naissance à un phénomène de diffusion Brillouin stimulée.

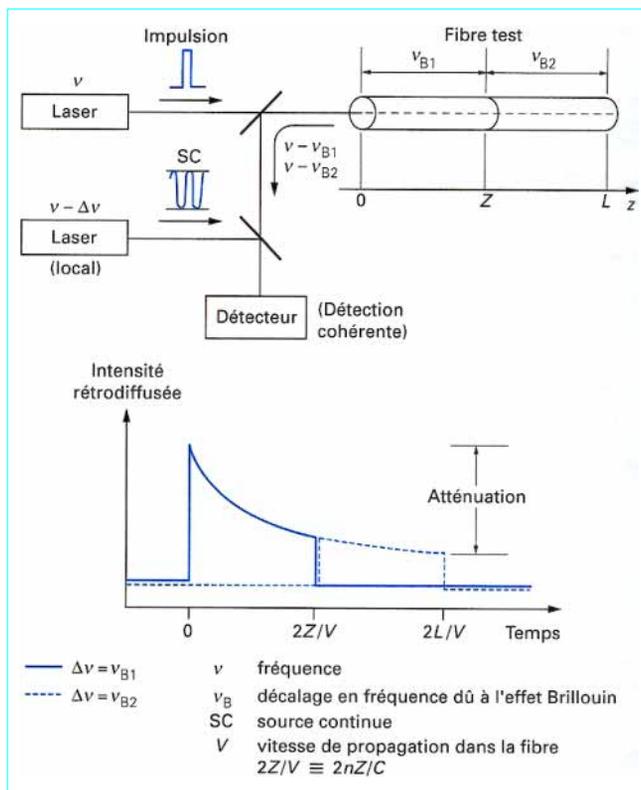


Figure 20 – Réflectométrie temporelle Brillouin. Principe de la méthode BOTDR

■ La deuxième méthode, appelée donc BOTDA et schématisée à la figure 21 est, en fait, une technique qui s'apparente à la spectroscopie laser : elle consiste à injecter une impulsion lumineuse à l'une des extrémités d'une fibre, tandis que l'autre extrémité de cette même fibre est utilisée comme point d'entrée d'une onde lumineuse continue. Lorsque l'écart en fréquence de ces deux ondes se propageant en sens inverse est égal au décalage Brillouin dans la fibre, l'intensité de l'onde continue est localement augmentée par effet Brillouin stimulé. La mesure temporellement résolue de ce gain conduit à déterminer les zones de la fibre pour lesquelles cet accord en fréquence est obtenu, la détermination complète du profil de déformation ou de température nécessitant ensuite un balayage continu de cet écart sur une certaine plage de fréquences.

L'intérêt de cette seconde méthode réside dans le phénomène de gain sur lequel elle est basée : elle permet d'obtenir avec des puissances continues réduites (0,1 mW par exemple) des signaux utiles dont l'intensité excède d'un facteur 100 celle de la diffusion Rayleigh.

■ Actuellement, la mise en œuvre de ces techniques de réflectométrie Brillouin est limitée au domaine des télécommunications, et a pour but essentiel de caractériser le niveau de contraintes mécaniques accumulées par un câble à fibre optique de grande longueur au cours de sa pose, afin d'en prononcer la réception et d'évaluer l'évolution dans le temps du profil ainsi enregistré.

Dans ce cas, l'un des objectifs prioritaires est d'avoir accès à des portées très importantes, ce qui explique en partie la faveur en général accordée à la méthode BOTDA.

Les meilleures résolutions spatiales aujourd'hui obtenues sont de l'ordre du mètre pour des portées de plusieurs dizaines de kilomètres, tandis que la précision de détermination des décalages Brillouin avoisine quelques MHz.

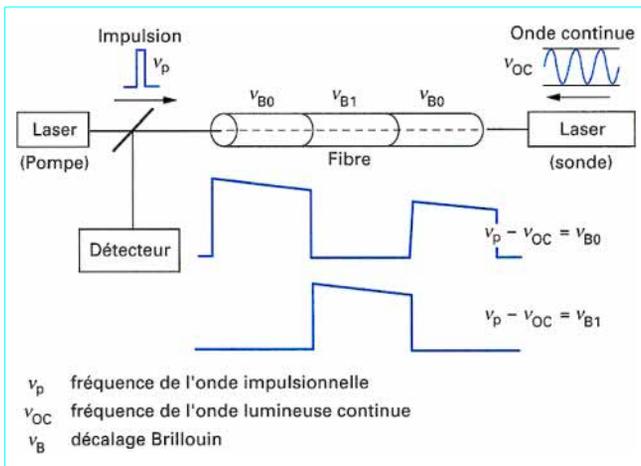


Figure 21 – Réflectométrie temporelle Brillouin. Principe de la méthode de BOTDA

6.4 Réseaux à conversion modale

Cette dernière variante de réseaux répartis est particulièrement bien adaptée à la réalisation de fonctions de surveillance et de localisation.

Elle consiste à utiliser une fibre continue dans laquelle sont susceptibles de cohabiter deux modes distincts de constantes de propagation différentes, et d'associer l'application d'un effort transverse sur cette fibre à la **création d'un point de couplage**, qui produise un transfert d'énergie entre ces deux modes.

La mesure de la différence de temps de propagation entre les deux ondes ainsi créées sur la distance séparant le point de couplage de l'extrémité de la fibre permet de localiser le point d'application de la force, tandis que celle du coefficient de couplage renseigne sur la valeur de l'effort transverse appliqué.

Ces mesures peuvent être réalisées en faisant appel soit à du multiplexage de cohérence, soit à du multiplexage fréquentiel (technique FMCW). Les fibres utilisées sont soit des fibres biréfringentes, soit des fibres monomodes classiques utilisées en régime bimodal [31].

Cette méthode met donc en œuvre des principes physiques analogues à ceux utilisés par le réseau quasi-réparti à fibre biréfringente, et les fonctions obtenues sont similaires à celles assurées par les dispositifs à microcourbures interrogés par réflectométrie temporelle Rayleigh.

Une première application marquante de cette technique [32] concerne la détection et la localisation d'impacts à la surface de pièces en matériaux composites (par exemple, radômes d'avions), avec évaluation des énergies d'impact.

7. Réseaux optoalimentés

De manière tout à fait générale, un capteur est dit optoalimenté lorsqu'il associe un transducteur classique à sortie électrique et un module d'interface optoélectronique chargé :

- de convertir en énergie électrique la puissance envoyée par le site central sous forme optique (cellules photovoltaïques) ;
- de transformer en signal optique codé les informations de mesure délivrées par le capteur ;

la liaison entre le capteur et le site central étant assurée par fibre optique. Les mécanismes de transduction mis en jeu sont donc de nature classique, et sont adaptables à des problèmes très variés pour autant que la consommation intrinsèque du procédé employé reste faible.

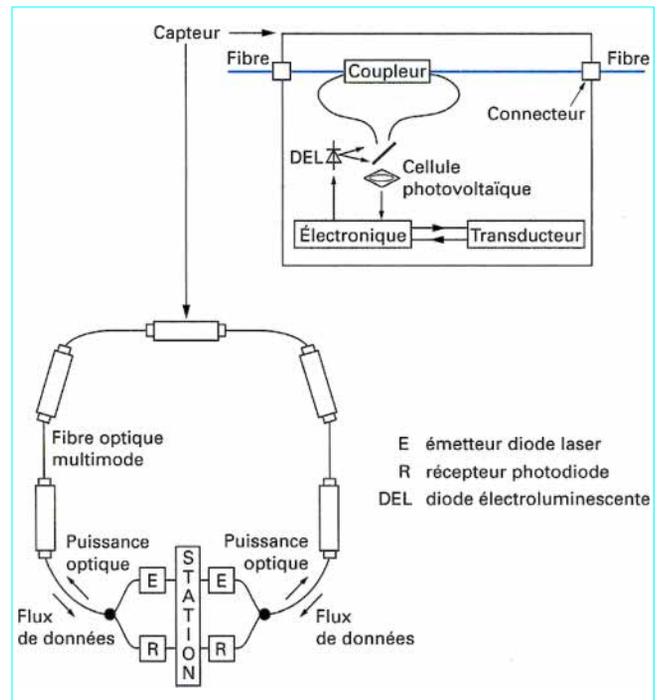


Figure 22 – Réseau de capteurs optoalimentés

Le développement de tels capteurs a conduit les fabricants à mettre au point des cellules photovoltaïques de fonctionnement optimisé autour de 850 nm (première fenêtre de transparence des fibres optiques où existent également des lasers semi-conducteurs continus de puissance) : les rendements de conversion atteints aujourd'hui les 50 %.

La mise en réseau de tels capteurs optoalimentés a conduit la société SPECTEC à définir une architecture en anneau qui optimise à la fois les aspects téléalimentation et transmission de données [33], et dont le principe de fonctionnement est schématisé à la figure 22.

La station centrale injecte la puissance optique délivrée par des diodes laser à réseaux phasés (100 à 500 mW) dans l'anneau de manière bidirectionnelle, et récupère de manière symétrique les informations codées renvoyées par les différents capteurs raccordés sur le réseau. Cette structure bidirectionnelle a deux intérêts :

- elle permet d'homogénéiser la puissance optique disponible au niveau de chaque capteur, et ce quelles que soient les performances intrinsèques des différents coupleurs de dérivation mis en œuvre ;
- elle rend possible un fonctionnement quasi-nominal du réseau en cas de coupure localisée des lignes d'alimentation et/ou de communication.

8. Évolutions et tendances

L'évolution prévisible de ce secteur particulier de l'instrumentation semble aujourd'hui dictée par cinq grandes tendances :

- la recherche d'applications à forte valeur ajoutée, qui se traduit dès maintenant par un abandon progressif des fonctions tout ou rien au profit de mesures analogiques ;
- le choix de plus en plus fréquent de la fibre monomode comme support de la transduction ou de la transmission, de manière à bénéficier des fonctionnalités accrues auxquelles elle donne souvent accès, ainsi que des baisses de coût liées à son emploi massif par le secteur des télécommunications ;

— l'adoption de solutions simples tant au niveau des capteurs que de leur mise en réseau, ce qui peut en particulier conduire à préférer des architectures de réseau de type point à point (la baisse de prix des fibres et la prise en compte des contraintes industrielles telles que l'interchangeabilité sont à l'évidence des moteurs importants d'une telle orientation) ;

— l'importance des configurations réseaux dites réparties ou quasi-réparties, compte tenu de la rupture *conceptuelle* auxquelles elles donnent accès et des avantages opérationnels qu'elles procurent (simplification des câblages notamment) ;

— le développement rapide du thème instrumentation de structures (aussi bien dans le domaine de l'aéronautique que dans celui du génie civil).

Références bibliographiques

- [1] *Spécification générique pour les capteurs à fibres optiques*. Norme NFC 93-800. Association française de normalisation (AFNOR).
- [2] KIST (R.). – *Point sensor multiplexing principles*. Chapitre n° 14 paru dans le volume 2 du livre *Optical fiber sensors*, édité par B. CULSHAW et J. DAKIN. Artech House (1989).
- [3] MARCUS (M.A.). – *Requirements for distributed sensor technology in process control systems*. SPIE Vol. 2 071, pp. 198-208, Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors III (1993).
- [4] FERDINAND (P.). – *Capteurs à fibres optiques et réseaux associés*. Lavoisier éditeur (1992).
- [5] MEUNIER (C.), GUERIN (J.J.), LEQUIME (M.), RIOUAL (M.), NOEL (E.), EGUIAZABAL (D.), FLEURY (D.), MAURIN (J.) et MONGIN (R.). – *Industrial prototype of a fiber-optic sensor network for the thermal monitoring of the turbogenerator of a nuclear power plant—Design, qualification and settlement*. Journal of Lightwave Technology, LT-13, pp. 1 354-1 361 (1995).
- [6] DANDRIDGE (A.). – *The development of Fiber optic sensor systems*. Proceedings of the 10th International Conference on Optical Fibre Sensors, Glasgow, pp. 154-161 (1994).
- [7] CROSSLEY (S.D.). – *Commercial prospects for distributed fibre optic sensors*. SPIE Vol. 2 294, pp. 14-21, Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors IV (1994).
- [8] KERSEY (A.D.). – *Multiplexed fiber optic sensors*. SPIE Vol. 1 797, pp. 161-185, Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors II (1992).
- [9] LEFEVRE (H.C.). – *White light interferometry in optical fiber sensors*. Proceedings of the 7th International Conference on Optical Fibre Sensors, Sidney, pp. 345-351 (1990).
- [10] MARILLER (C.) et LEQUIME (M.). – *Fiber-optic white-light birefringent temperature sensor*. SPIE Vol. 798, pp. 21-130, Fiber Optic Sensors II (1987).
- [11] CULSHAW (B.). – *Silicon in optical fiber sensors*. Chapitre n° 13 paru dans le volume 2 du livre *Optical Fiber Sensors*, édité par B. CULSHAW et J. DAKIN. Artech House (1989).
- [12] SAKAI (I.). – *Frequency-division multiplexing of optical fibre sensors using a frequency-modulated source*. Optical Quantum Electronics, Vol. 18, pp. 279-289 (1986).
- [13] DESFORGES (F.X.). – *Application de la réflectométrie optique temporelle à l'interrogation d'un réseau de capteurs tout ou rien à fibres optiques*. Thèse de doctorat. Université de Limoges (1989).
- [14] DURANTIS (R.), ANGLARET (G.), HUGUES (C.J.) et FEHRENBACH (G.W.). – *Specific design of optical fiber sensor systems for Wavelength Division Multiplexed networks*. Conférence OFS'89, Paris, Springer Proceedings in Physics, Vol. 44, pp. 504-512 (1989).
- [15] LEQUIME (M.), LECOT (C.), GIOVANNINI (H.) et HUARD (S.J.). – *A dual-wavelength passive homodyne detection unit for fiber-coupled white-light interferometers*. SPIE Vol. 1 267, pp. 288-298, Fiber Optic Sensors IV (1990).
- [16] LEQUIME (M.), LECOT (C.), JOUVE (P.) et POULEAU (J.). – *Fiber optic pressure and temperature sensor for down-hole applications*. SPIE Vol. 1 511, pp. 244-249, Fiber Optic Sensors : Engineering and Applications (1991).
- [17] FEVRIER (H.), HERVO (J.), ARTIGAUD (S.), TARDY (A.), JURCZYSHYN (M.), DEROSSIS (A.), BOUILLERET (A.) et PIERRAT (J.L.). – *A temperature optical fiber sensor network : from laboratory feasibility to field trial*. Proceedings of the 8th International Conference on Optical Fibre Sensors, Monterey, pp. 262-265 (1992).
- [18] MURPHY (K.A.), BHATIA (V.), CLAUS (R.O.), DUNCAN (P.), JONES M.E., GRACE (J.L.), GREENE (J.A.) et TRAN (T.A.). – *Multiplexed extrinsic Fabry-Perot interferometers and applications*. SPIE Vol. 2 507, pp. 2-13, Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors V (1995).
- [19] DAVIS (D.A.), BELLEMORE (D.G.), PUTNAM (M.A.) et KERSEY (A.D.). – *A 60 Element Fiber Bragg Grating Sensor System*. Proceedings of the 11th International Conference on Optical Fibre Sensors, Sapporo, pp. 100-103 (1996).
- [20] FERDINAND (P.), FERRAGU (O.), LECHEN (J.L.), LESCOP (B.), MARTY (V.), ROUGEAULT (S.), PIERRE (G.), RENOUD (C.), JARRET (B.), KOTROTSIOS (G.), NEUMAN (V.), DEPEUR-SINGE (Y.), MICHEL (J.B.), VAN UFFELEN (M.), VERBANDT (Y.), VOËT (M.R.H.) et TOSCANO (D.). – *Mine Operating Accurate Stability Control with Optical Fiber Sensing and Bragg Grating Technology : the BRITE-EURAM STABILOS Project*. Proceedings of the 10th International Conference on Optical Fibre Sensors, Glasgow, pp. 162-166 (1994).
- [21] KERSEY (A.D.). – *Interrogation and Multiplexing Techniques for Fiber Bragg Grating Strain-Sensors*. SPIE Vol. 2 071, pp. 30-48, Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors III (1993).
- [22] TURPIN (M.), ROJAS (D.) et PUECH (C.). – *Nouveaux concepts de capteurs répartis tout fibre*. Conférence MESUCORA, Session 13 (1988).
- [23] GUERIN (J.J.), MAILLARD (J.M.) et SANSONETTI (P.). – *Polarization Mode Couplers Made by Photoinduced Grating for White Light Quasi-Distributed Polarimetric Sensors*. Proceedings of the 8th International Conference on Optical Fibre Sensors, Monterey, pp. 288-291 (1992).
- [24] DAKIN (J.P.). – *Distributed optical fiber sensors*. SPIE Vol. 1 797, pp. 76-108, Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors II (1992).
- [25] MICHIE (W.C.), CULSHAW (B.), McKENZIE (I.), MORAN (C.), GRAHAM (N.B.), SANTOS (F.), GARDINER (P.T.), BERGQVIST (E.) et CARLSTROM (B.). – *A Fibre Optic/Hydrogel Probe for Distributed Chemical Measurements*. Proceedings of the 10th International Conference on Optical Fibre Sensors, Glasgow, pp. 130-133 (1994).
- [26] BLYLER Jr. (L.L.), FERRARA (J.A.) et McCHESNEY (J.P.). – *A plastic clad silica fiber chemical sensor for ammonia*. Proceedings of the 5th International Conference on Optical Fibre Sensors, New Orleans, pp. 369-372 (1988).
- [27] PICHERY (T.) et KATCHAROV (N.). – *Optical Fibre Gas Detection*. Proceedings of the 11th International Conference on Optical Fibre Sensors, Sapporo, pp. 470-473 (1996).
- [28] DAKIN (J.P.), PRATT (D.J.), BIBBY (G.W.) et ROSS (J.N.). – *Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector*. Electronics Letters, Vol. 21, pp. 569-570 (1985).
- [29] HORIGUCHI (T.), SHIMIZU (K.), KURASHIMA (T.) et KOYAMADA (Y.). – *Advances in distributed sensing techniques using Brillouin scattering*. SPIE Vol. 2 507, pp. 126-135, Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors V (1995).
- [30] HORIGUCHI (T.), KURASHIMA (T.) et KOYAMADA (Y.). – *Measurement of temperature and strain distribution by Brillouin frequency shift in silica optical fibers*. SPIE Vol. 1 797, pp. 2-13, Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors II (1992).
- [31] KOTROTSIOS (G.) et PARRIAUX (O.). – *White Light interferometry for Distributed Sensing on Dual Mode Fibers*. Proceedings of the 7th International Conference on Optical Fibre Sensors, Paris, pp. 568-574 (1989).
- [32] NOHARET (B.), CHAZELAS (J.), BONNIAU (P.), LECUELLET (J.) et TURPIN (M.). – *Impact Detection on Air borne Multi-layered Structures*. SPIE Vol. 2 444, Smart Sensing and Materials (1995).
- [33] OSTROWSKY (D.B.), NEVEUX (P.) et SCHWEIZER (P.). – *Fiber Optically Powered Sensors and Sensor Networks*. University of Strathclyde, Glasgow (1989).

Dans les Techniques de l'Ingénieur :

- [34] FERRETI (M.). – *Capteurs à fibres optiques*. R415, oct. 1996.
- [35] FERDINAND (P.). – *Capteurs de température à fibres optiques*. R2800, janv. 1989.