

Capteurs de courant à fibres optiques

par **Pascal ROYER**

Docteur en physique

Ingénieur-chercheur au centre de Recherches de la société Merlin-Gerin

1. Principe de la mesure	R 1 016 - 2
1.1 Généralités	— 2
1.2 Rappels	— 2
1.2.1 Polarisation	— 2
1.2.2 Biréfringence	— 2
1.3 Effet Faraday	— 3
1.3.1 Définition et propriétés	— 3
1.3.2 Effet Faraday dans une fibre optique	— 4
1.3.3 Méthodes de détection de l'effet Faraday	— 4
2. Capteurs polarimétriques	— 4
2.1 Configuration polarimétrique à 90°	— 4
2.1.1 Description	— 4
2.1.2 Phénomènes de biréfringence dans les fibres	— 6
2.1.3 Performances atteintes. Exemples de capteurs	— 6
2.2 Configuration polarimétrique à 45°	— 8
3. Capteurs interférométriques	— 9
3.1 Interféromètre de Sagnac	— 9
3.2 Détection hétérodyne	— 10
4. Capteurs à effet magnétostrictif	— 11
5. Quelques études récentes	— 12
5.1 Résonateur de Fabry-Pérot	— 12
5.2 Multiplexage en polarisation	— 12
5.3 Fibres optiques spéciales	— 12
5.3.1 Traitement thermique d'une bobine de fibre optique	— 12
5.3.2 Fibre optique à forte biréfringence circulaire	— 12
6. Marché	— 14
Références bibliographiques	— 15

La mesure des courants électriques se heurte à un nombre déterminant de problèmes dans les environnements sévères qu'imposent certains milieux industriels : perturbations électromagnétiques, tensions élevées, atmosphères corrosives ou explosives, contraintes de dimensionnement, de poids, ou d'accessibilité ; l'utilisation de la fibre optique pour la mesure de courant permet de remédier à ces problèmes. Cette nouvelle technologie apporte des avantages supplémentaires pour les caractéristiques métrologiques de la mesure : grande sensibilité, grande dynamique, large bande passante... Les nombreux atouts apportés par la fibre optique ont donc incité, depuis une quinzaine d'années, différents groupes de recherche et industriels à lancer des études sur la réalisation de capteurs de courant à fibres optiques.

De plus, les coûts élevés des réducteurs conventionnels, et surtout les incidents dus à la rupture de l'isolateur dans les applications très haute tension, avec les conséquences pour la sécurité du personnel d'exploitation, renforcèrent la volonté de mettre au point de nouveaux systèmes.

C'est ainsi que, sous l'impulsion d'Électricité de France (EDF), le Laboratoire Central de Recherches (LCR) Thomson, le LETI, les sociétés Schlumberger et Merlin-Gerin, ainsi que la Direction des Études et Recherches d'EDF engagèrent, dans les années 80, des études sur la réalisation d'ampèremètres optiques. Des

laboratoires étrangers travaillent également sur ce sujet. Dans les différentes configurations proposées, le principe utilisé repose soit sur l'effet Faraday, soit sur l'effet magnétostrictif. Nous évoquerons rapidement ce dernier effet qui est beaucoup plus intéressant pour la mesure du champ magnétique que du courant électrique.

LETI : Laboratoire d'Électronique et des Technologies de l'Instrumentation, Commissariat à l'Énergie Atomique, Grenoble.

1. Principe de la mesure

1.1 Généralités

Les capteurs à fibres optiques sont en général divisés en deux groupes :

- capteurs intrinsèques : la fibre optique est l'élément sensible, ses propriétés étant modifiées par la grandeur à mesurer (courant électrique ici) ;

- capteurs extrinsèques : la fibre optique est utilisée comme support pour véhiculer l'information entre un système de mesure classique (optique ou autre), le module d'émission (la source) et le module de réception (le détecteur).

Cet article sera uniquement consacré aux **capteurs intrinsèques**.

Les différents phénomènes ou principes mis en jeu pour la mesure provoquent la modulation d'un paramètre lumineux. Il est donc possible de réaliser une classification supplémentaire au sein des deux groupes précédents, et de définir des capteurs à modulation d'intensité, de phase, de polarisation, de longueur d'onde ou de temps.

Pour la mesure de courant, la **polarisation** et la **phase** sont les deux paramètres optiques modulés ; ils sont respectivement associés à des **capteurs polarimétriques** et à des **capteurs interférométriques**.

Les études concernant les ampèremètres à fibres optiques sont beaucoup plus limitées en nombre que celles qui concernent les thermomètres à fibres optiques : plus d'une dizaine de principes différents sont identifiables pour la mesure de la température ; dans le cas du courant électrique, les études reposent essentiellement sur un seul principe, l'**effet Faraday**. Seule la configuration expérimentale utilisée varie, les principales préoccupations étant de minimiser l'effet des contraintes extérieures sur la mesure. Nous décrirons donc un certain nombre de méthodes qui visent à optimiser les performances d'un ampèremètre optique face à des contraintes d'environnement.

1.2 Rappels

Nota : pour la définition de la polarisation et de la biréfringence, se reporter à l'article *Optique ondulatoire. Interférences. Diffraction. Polarisation* [A 191] dans le traité Sciences fondamentales des Techniques de l'Ingénieur.

1.2.1 Polarisation

C'est un phénomène propre à la propagation des ondes transversales, en particulier des ondes lumineuses ; il est caractérisé par le fait que leur direction de vibration se trouve dans un plan déterminé contenant la direction de propagation et appelé *plan de polarisation*.

■ La lumière blanche émise par une source thermique n'est pas polarisée. La vibration se produit dans tout plan quelconque contenant la direction de propagation, de telle sorte qu'au moins statistiquement la lumière naturelle présente une symétrie de révolution autour de l'axe de propagation.

■ Quand le plan de polarisation garde une direction fixe dans le temps, la polarisation est **linéaire** (figure 1). S'il tourne autour de la direction de propagation à une vitesse angulaire constante, la polarisation est **elliptique** ou, dans un cas particulier, **circulaire** (figure 2).

1.2.2 Biréfringence

Certains corps naturels présentent le phénomène de **biréfringence** : une lumière plane qui les traverse ne se propage pas à la même vitesse suivant que le plan de polarisation est parallèle à l'une ou à l'autre de deux directions perpendiculaires propres au corps biréfringent. Si la lumière plane se présente suivant une direction de polarisation quelconque par rapport aux axes du corps biréfringent, chacune des composantes vectorielles de la lumière suivant ces deux axes se comporte comme une onde plane autonome et progresse à la vitesse propre à cette direction. Elles conservent néanmoins leur fréquence et pourront donner lieu à des phénomènes d'interférence.

Le phénomène de biréfringence, qui caractérise un retard optique entre deux composantes ne doit pas être confondu avec le phénomène de polarisation rotatoire, propriété de certains corps qui font tourner le plan de polarisation de la lumière.

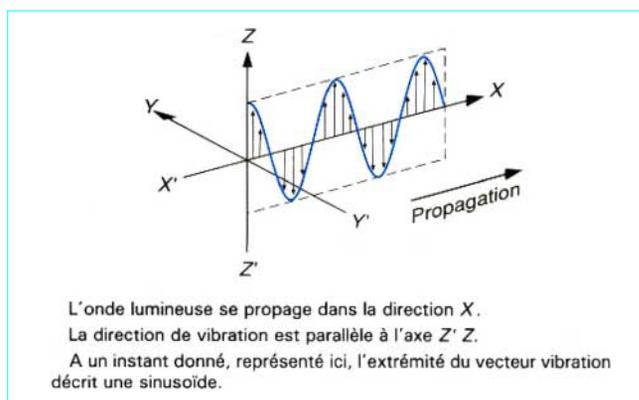


Figure 1 – Lumière polarisée linéairement

La biréfringence peut être **intrinsèque** (matériaux anisotropes) ou **induite** par :

- une contrainte mécanique : **effet photoélastique** ;
- un champ électrique : effet électro-optique (effets **Kerr** et **Pockels**) ;
- un champ magnétique : effet magnéto-optique (**Faraday**).

1.3 Effet Faraday

1.3.1 Définition et propriétés

C'est en 1845 que Michael Faraday découvrit qu'un morceau de verre placé dans un fort champ magnétique présente une activité optique : lorsqu'une lumière polarisée linéairement se propage parallèlement au champ magnétique, la direction de polarisation tourne. L'angle F de rotation de la polarisation est proportionnel à la circulation du champ magnétique extérieur H le long du chemin optique ℓ :

$$F = V \int_{\ell} \vec{H} \cdot d\vec{\ell}$$

Le coefficient V est appelé **constante de Verdet**, sa valeur est généralement faible et dépend du milieu optique utilisé [$1,4 \cdot 10^{-4}$ degré/(Oe · cm) ou $3 \cdot 10^{-6}$ rad/A à la longueur d'onde $\lambda = 780$ nm pour la silice].

La constante de Verdet est très peu dépendante de la température pour les matériaux diamagnétiques (c'est le cas de la silice), elle en dépend pour les matériaux paramagnétiques ; le tableau 1 donne quelques valeurs de la constante de Verdet pour différents matériaux.

Tableau 1 – Valeurs de la constante de Verdet V pour quelques matériaux		
Matériaux	Constante de Verdet V	
	[°/(Oe · cm)]	(rad/A)
Diamagnétiques		
ZnSe	$3,4 \cdot 10^{-3} (\lambda = 820 \text{ nm})$	$7,5 \cdot 10^{-5}$
BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$)	$1,6 \cdot 10^{-3} (\lambda = 870 \text{ nm})$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
BGO ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$)	$3,1 \cdot 10^{-3} (\lambda = 850 \text{ nm})$	$6,8 \cdot 10^{-5}$
SiO ₂	$1,4 \cdot 10^{-4} (\lambda = 780 \text{ nm})$	$3 \cdot 10^{-6}$
Paramagnétiques		
FR-5	$2,3 \cdot 10^{-3} (\lambda = 820 \text{ nm})$	$5 \cdot 10^{-5}$
Ferromagnétiques		
YIG : $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	$0,15 (\lambda = 1310 \text{ nm})$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
TIG : $(\text{TbYbBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	$5,83 (\lambda = 850 \text{ nm})$	0,13
RIG : $(\text{RbBi})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (1)	$4,00 (\lambda = 850 \text{ nm})$	$8,8 \cdot 10^{-2}$

La constante de Verdet est donnée en degrés par oersted et par centimètre, ainsi qu'en radians par ampère :

1 Oe = 79,6 A/m 1°/(Oe · cm) = 0,022 rad/A

(1) R signifie *rare earth* (terre rare).

■ L'effet Faraday est **dispersif** (V proportionnel à $1/\lambda^2$ où λ est la longueur d'onde), aussi convient-il d'utiliser un **rayonnement monochromatique** pour effectuer les mesures quantitatives.

■ Une particularité importante de cet effet est sa **non-réciprocité**, c'est-à-dire son invariance avec la direction de propagation de la lumière (figure 3). Cette propriété permet d'accroître l'angle F par réflexions multiples de la lumière : la rotation du plan de polarisation est multipliée par deux lorsque l'onde effectue un aller-retour dans le matériau.

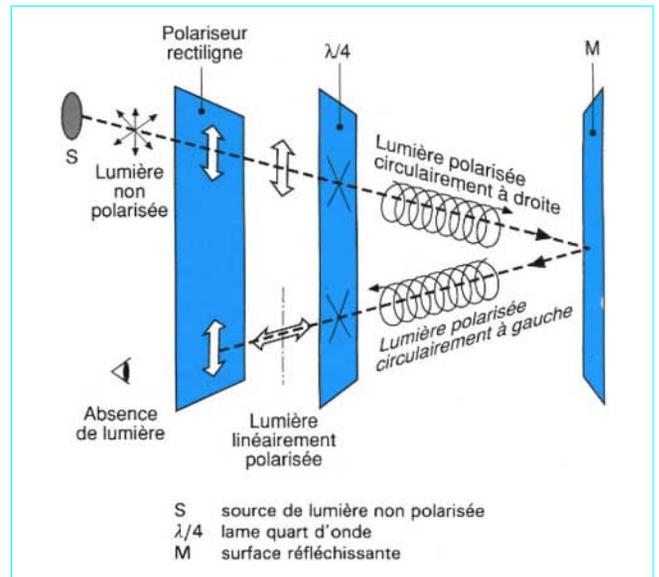


Figure 2 – Un polariseur rectiligne suivi d'une lame quart d'onde dont les axes sont à 45° de la direction de polarisation initiale constitue un polariseur circulaire

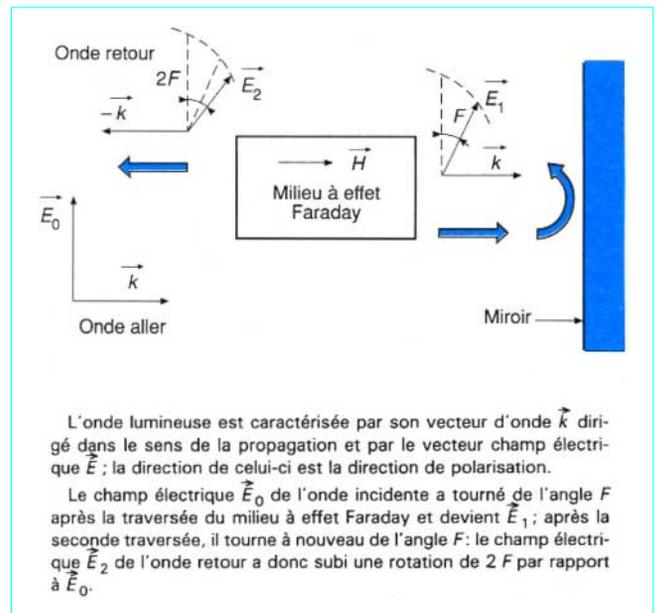


Figure 3 – Non-réciprocité de l'effet Faraday

■ Il est possible de constater l'effet Faraday d'une autre façon. Il suffit de faire propager, parallèlement au champ magnétique H , des faisceaux de lumière de polarisations circulaires droite et gauche, et de constater que la vitesse de phase des deux ondes est différente : l'indice de réfraction est différent pour l'onde de polarisation circulaire droite et pour l'onde de polarisation circulaire gauche. Leur recombinaison donne une polarisation rectiligne ayant tourné (figure 4).

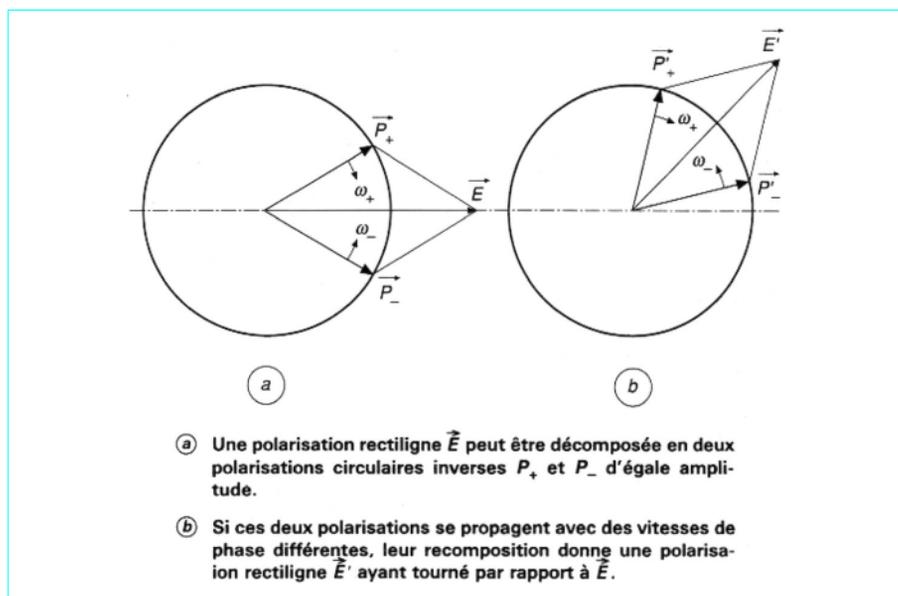


Figure 4 – Mise en évidence de l'effet Faraday par déphasage d'ondes à polarisation circulaire

1.3.2 Effet Faraday dans une fibre optique

On utilise une fibre optique en silice comme milieu à effet Faraday. La fibre entoure plusieurs fois un conducteur parcouru par un courant (figure 5). Pour une boucle de fibre, la rotation F du plan de polarisation de la lumière, créée par effet Faraday, s'exprime sous la forme suivante :

$$F = V \int_1 \vec{H} \cdot d\vec{\ell}$$

1 boucle de fibre optique

Le théorème d'Ampère donnant la valeur du champ magnétique H créé par le courant I nous permet d'écrire pour N spires de fibre optique :

$$F = VNI$$

Il n'est pas nécessaire de réaliser des enroulements circulaires et centrés par rapport au conducteur. Il suffit que la boucle soit fermée. De plus, le théorème d'Ampère permet de s'affranchir des perturbations apportées par des conducteurs extérieurs à la boucle de fibre optique.

1.3.3 Méthodes de détection de l'effet Faraday

Nous avons vu (§ 1.3.1) que l'effet Faraday pouvait être constaté de deux façons différentes : la première se décrivant en terme de rotation du plan de polarisation, la deuxième se décrivant en terme de déphasage relatif d'ondes à polarisation circulaire.

Deux méthodes sont alors utilisées : la méthode polarimétrique (§ 2) et la méthode interférométrique (§ 3).

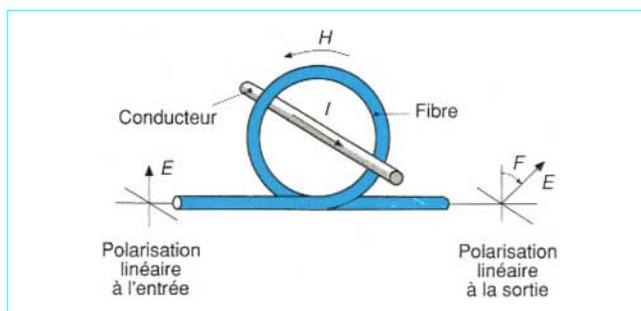


Figure 5 – Effet Faraday dans une fibre optique

2. Capteurs polarimétriques

Deux configurations principales peuvent être utilisées dans le cas des systèmes polarimétriques : la configuration polarimétrique à 90° et la configuration polarimétrique à 45°.

2.1 Configuration polarimétrique à 90°

2.1.1 Description

La liste des études [1] à [9] n'est pas exhaustive. Néanmoins, elles se rapprochent toutes du même dispositif (figure 6).

■ Le **principe** consiste à analyser la polarisation de la lumière issue de la fibre optique par l'intermédiaire d'un prisme de Wollaston ou d'un cube séparateur/polariseur qui sépare le faisceau incident en deux composantes de polarisations linéaires orthogonales, d'où

l'appellation de **détection à 90°**. L'analyseur est placé à 45° du plan de polarisation initial, de façon à obtenir le maximum de sensibilité (figure 7).

L'intensité lumineuse recueillie par les deux photodétecteurs s'écrit :

$$I_1 = \frac{I_0}{2} (1 - \sin 2F)$$

$$I_2 = \frac{I_0}{2} (1 + \sin 2F)$$

avec I_0 intensité lumineuse de la source.

■ On utilise une **source** monochromatique de longueur d'onde aussi faible que possible car V est sensiblement proportionnel à $1/\lambda^2$. On utilise en général une diode laser émettant à 780 nm. L'apparition récente des diodes laser émettant à 670 nm permet de réduire λ , donc d'augmenter la sensibilité de la mesure.

Une régulation thermique à effet Peltier stabilise la diode laser en température.

■ Il est possible d'obtenir électroniquement le signal de sortie S , indépendant de l'intensité lumineuse I_0 de la source, donc de ses fluctuations :

$$S = K \cdot \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = K \sin 2F$$

d'où le courant électrique à mesurer :

$$I = \frac{1}{2VN} \text{Arc sin} \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$$

K est une constante induite par le traitement électronique, qui dépend en particulier du gain des amplificateurs de sortie des photodétecteurs.

Le traitement électronique est en général simple (figure 8).

Il est également possible, à partir d'un seul signal (I_1 ou I_2), de s'affranchir des fluctuations de la source I_0 . Il suffit alors que l'électronique réalise la fonction :

$$\text{Arc sin} \frac{AC}{DC}$$

avec AC composante alternative du signal,
 DC composante continue du signal.

■ La **fibre optique** est l'élément principal de la chaîne optique, puisqu'elle est le transducteur. Elle pose un certain nombre de problèmes. D'une part, il n'est pas envisageable d'utiliser une fibre multimode car, chaque mode guidé ayant sa propre distribution de polarisation du champ électrique, un état de polarisation linéaire à l'entrée de la fibre serait rapidement détruit. Il est donc nécessaire d'utiliser une **fibre monomode** .

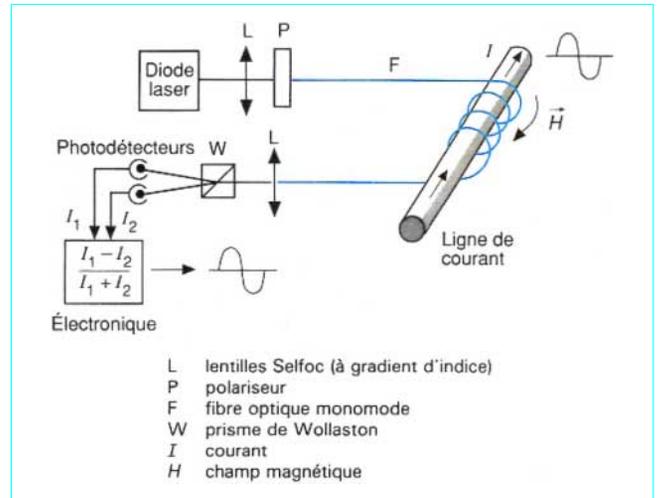


Figure 6 – Dispositif d'un capteur de courant à effet Faraday utilisant une configuration polarimétrique à 90°

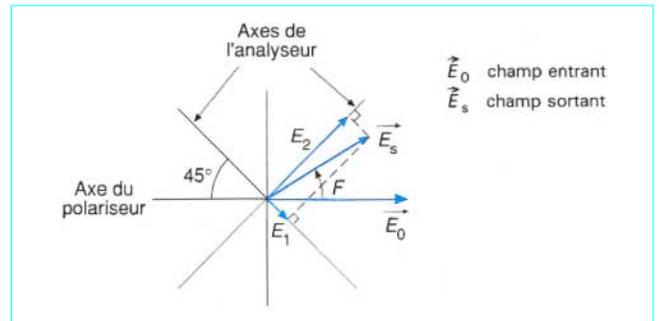
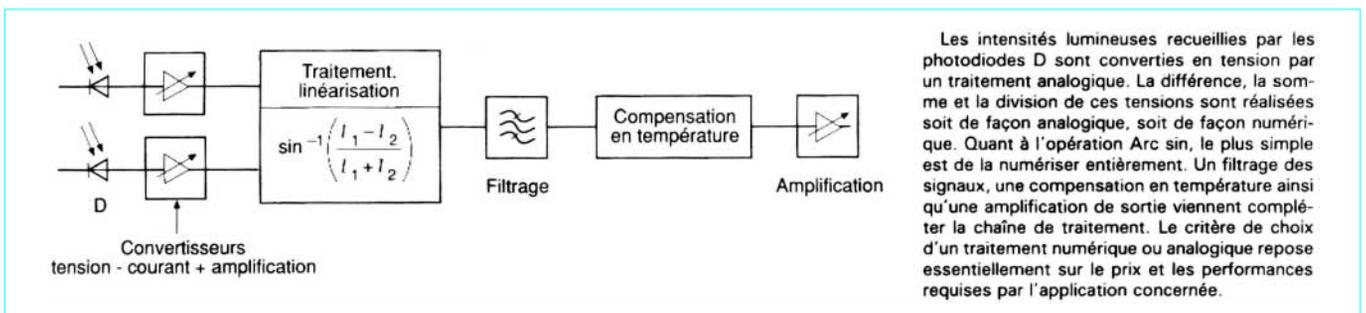


Figure 7 – Principe de la détection polarimétrique à 90°



Les intensités lumineuses recueillies par les photodiodes D sont converties en tension par un traitement analogique. La différence, la somme et la division de ces tensions sont réalisées soit de façon analogique, soit de façon numérique. Quant à l'opération Arc sin, le plus simple est de la numériser entièrement. Un filtrage des signaux, une compensation en température ainsi qu'une amplification de sortie viennent compléter la chaîne de traitement. Le critère de choix d'un traitement numérique ou analogique repose essentiellement sur le prix et les performances requises par l'application concernée.

Figure 8 – Traitement électronique des signaux dans une configuration polarimétrique à 90°

D'autre part, une fibre monomode présente des biréfringences linéaires intrinsèques et extrinsèques, phénomènes limitant les performances des capteurs. Les composantes de polarisations linéaires orthogonales voyagent alors avec des vitesses de phase différentes. Une biréfringence uniforme δ de la fibre modifie le signal de sortie :

$$S \approx 2F \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}$$

avec $\alpha^2 = F^2 + \left(\frac{\delta}{2}\right)^2$ biréfringence résultante.

Comme en général $\delta \gg F$, on obtient :

$$S \approx 2F \frac{\sin \delta}{\delta}$$

La sensibilité est réduite par le facteur $\sin \delta/\delta$. On s'efforcera de minimiser δ en utilisant un type particulier de fibre, ainsi que certains artifices.

Il est donc nécessaire d'identifier et de définir les phénomènes de biréfringence qui créent les principales sources d'erreurs dont il faut absolument tenir compte si l'on veut comprendre et améliorer le comportement des capteurs ainsi que justifier l'existence d'autres configurations. Le lecteur peut se rapporter aux références bibliographiques [10] [11] [12] [13] qui exposent les problèmes de biréfringence et de polarisation liés aux fibres optiques.

2.1.2 Phénomènes de biréfringence dans les fibres

2.1.2.1 Biréfringence linéaire intrinsèque

Ce type de biréfringence provient de contraintes internes, engendrées notamment pendant les opérations de rétreint de la préforme et de tirage de la fibre, ainsi que d'une certaine ellipticité du cœur [14]. Une fibre monomode standard peut présenter une biréfringence linéaire intrinsèque (BLI) d'une valeur comprise entre 100 et plusieurs centaines de degrés par mètre. Cette biréfringence a pour effet de modifier l'état de polarisation de la lumière au cours de sa propagation dans la fibre. On utilise par conséquent une fibre optique à très faible BLI (quelques °/m), obtenue en faisant subir une rotation à la préforme au cours du tirage de la fibre (typiquement 1 000 tours/min ce qui correspond à environ 20 tours/m de fibre).

2.1.2.2 Biréfringence linéaire extrinsèque

■ Induite par courbure

L'enroulement de la fibre optique sur un mandrin provoque une biréfringence linéaire induite par courbure [17]. Une solution est d'appliquer à la fibre optique une torsion longitudinale suffisante [18] qui induira par effet élasto-optique une biréfringence circulaire masquant les variations de l'état de polarisation dues à la biréfringence linéaire. Ces différents phénomènes s'illustrent à l'aide de la sphère de Poincaré [19], la théorie matricielle de Jones [57] permet de les quantifier.

■ Induite aux connexions

Les points de résinage dans les connecteurs exercent sur la fibre optique des contraintes anisotropes par rapport à une section de la fibre induisant à nouveau, par le biais de l'effet élasto-optique, une biréfringence linéaire localisée, d'où une variation de l'état de polarisation de la lumière. Cette biréfringence peut être minimisée en utilisant des colles appropriées ou en réalisant des ferrules dites à faible biréfringence linéaire.

2.1.2.3 Sensibilité à la température

Les coefficients élasto-optiques, intervenant dans l'expression de la biréfringence circulaire φ induite par torsion, dépendent de la température :

$$\varphi = \left(\frac{n_0^2}{2}\right) (p_{12} - p_{11}) \tau = g \tau$$

avec τ taux de torsion appliqué (en °/m),

φ biréfringence circulaire induite (en °/m),

$n_0 = 1,46$ indice de la silice,

p_{12} et p_{11} coefficients du tenseur élasto-optique ($p_{12} - p_{11} = 0,15$).

Pour la silice $g \approx 0,16$ à 20 °C.

Il y a donc une dépendance de la biréfringence induite par torsion avec la température [20]. On observe une rotation supplémentaire du plan de polarisation sous l'effet d'une contrainte thermique. Il existe plusieurs solutions pour annuler fortement cette rotation ; chacune d'elles utilise la non-réciprocité de l'effet Faraday :

— soit par réflexion de la lumière en bout de fibre (**configuration reflex**) ;

— soit en réalisant une **double torsion inverse** [21] de la fibre optique ; chaque demi-longueur de fibre est torsadée à des taux de torsion égaux mais de sens opposés.

2.1.2.4 Sensibilité aux vibrations

Le fait de torsader une fibre optique permet également de minimiser la biréfringence linéaire induite par les courbures que subit la fibre sous l'effet de contraintes mécaniques (vibrations, chocs). Par contre, la biréfringence circulaire induite par la forme hélicoïdale que prend une fibre torsadée dépend fortement des paramètres locaux de l'hélice. Sous l'effet de vibrations, une variation de ces paramètres engendre une modification de la biréfringence circulaire perçue comme une rotation du plan de polarisation. Si les solutions de type reflex ou double torsion inverse permettent de minimiser fortement cette rotation liée à un effet réciproque, il subsiste malgré tout une biréfringence linéaire nécessitant de modifier la configuration des capteurs. Une solution à ce problème est décrite dans le paragraphe suivant.

2.1.3 Performances atteintes. Exemples de capteurs

Les performances (étendue de mesure, précision, sensibilité, bande passante...) atteintes par les prototypes réalisés ne sont pas toujours clairement spécifiées dans la littérature.

Le laboratoire de Los Alamos aux États-Unis [3] a développé un premier prototype pour la mesure de forts courants (plusieurs mégaampères). Pour faire face aux problèmes de mesure dus aux contraintes mécaniques et thermiques que pouvait subir la fibre, l'étude se dirigea par la suite vers la réalisation d'une configuration interférométrique.

Une équipe anglaise (A.N. Tobin and al.) a réalisé un prototype de capteur polarimétrique pour la mesure de courant dans les systèmes de distribution haute tension. Pour un courant nominal de 3 000 A, la précision est d'environ 1 % ; elle atteint 3 % pour les courants de défaut (30 à 40 kA).

■ En France, une première étude a été réalisée au début des années 80 au LETI, en collaboration avec la société Merlin-Gérin. En 1990, Merlin-Gérin réalisa un prototype de **capteur de courant pour le réseau 420 kV**. Deux enroulements de fibre optique sont utilisés (figure 9). Le premier enroulement (8 spires sur un diamètre

de 30 cm) se rattache à la voie mesure du capteur associée aux faibles valeurs du courant ($0,1 I_n < I < 2 I_n$ avec $I_n = 3\ 000\text{ A}$). Le deuxième enroulement (voie protection, une spire) est utilisé pour la mesure des courants de protection ou courants de court-circuit ($0,1 I_n < I < 50 I_n$). Ces deux voies ont respectivement une classe de précision de 0,5 et 5 P.

■ Un autre prototype fut réalisé en 1991 pour la mesure des **courants en moyenne tension** (36 kV) (figure 10). La voie mesure utilise 16 spires de fibre optique, sa classe de précision est de 0,5 et son étendue de mesure va de 10 A à 2 000 A. La voie protection utilise 1 spire de fibre optique et assure une classe de précision de 5 P de 100 A à 80 000 A.

Ces deux prototypes utilisent une double torsion inverse de la fibre optique pour s'affranchir des rotations de polarisation provoquées par des contraintes thermiques.

Quant au problème de la sensibilité aux vibrations de la fibre torsadée, une première solution consiste à stabiliser mécaniquement la fibre capteur autour de son support d'enroulement et à utiliser pour les bras aller (côté source) et retour (côté détection) du capteur deux fibres à maintien de polarisation insensibles aux perturbations mécaniques.

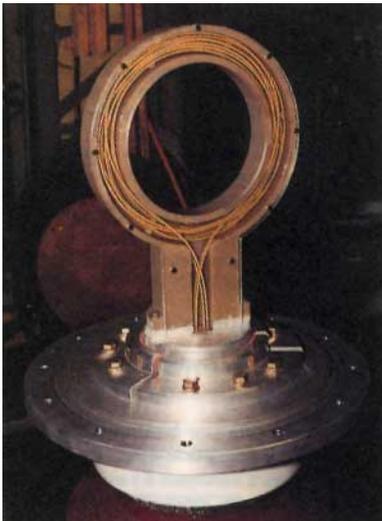


Figure 9 – Enroulement de fibres optiques d'un capteur de courant THT



Figure 10 – Capteur de courant à fibres optiques pour applications moyennes tensions

Une deuxième solution est de remplacer la fibre à maintien de polarisation du bras retour par deux fibres multimodes. Le système de détection se sépare alors en deux parties : l'analyseur optique situé directement à la sortie de la fibre capteur et un boîtier contenant les détecteurs et l'électronique relié à l'analyseur par les deux fibres multimodes. Cette configuration, en réalisant le déport de toutes les parties électroniques du capteur dans le bâtiment de relayage pour le prototype haute tension et dans le compartiment basse tension pour le prototype moyenne tension, permet d'assurer une immunité parfaite aux perturbations électromagnétiques. Les fibres optiques assurent l'isolation galvanique.

■ EDF et la société PSC Enertec ont mis au point en 1990 un prototype de **capteur de courant pour le réseau haute tension 420 kV**. Il utilise deux voies, une voie mesure basée sur la configuration reflex [24] dont le schéma est représenté figure 11 et une voie protection utilisant une fibre à double torsion inverse.

La configuration reflex de la voie mesure met à profit, de la même façon que la double torsion, la réciprocity des effets perturbateurs créant des signaux parasites. Elle a également l'avantage de doubler la rotation Faraday. L'utilisation d'un miroir en bout de fibre optique permet à la lumière de faire un aller-retour dans la fibre. Une lame semi-transparente prélève une partie du faisceau lumineux de retour et analyse sa polarisation en utilisant un prisme de Wollaston.

Le déport à distance des parties électroniques est réalisé par fibres multimodes et par fibre à maintien de polarisation.

La figure 12 représente le schéma du prototype, équipé également d'un capteur optique de tension. Les capteurs sont placés dans la tête d'une enveloppe de transformateur de courant classique.

La voie mesure couvre une gamme de courant allant de 0,1 à $2 I_n$ (courant nominal $I_n = 3\ 000\text{ A}$) et assure une classe de précision inférieure à 0,5. La voie protection a une étendue de mesure comprise entre $0,1 I_n$ et $40 I_n$ et assure une classe de précision 5 P.

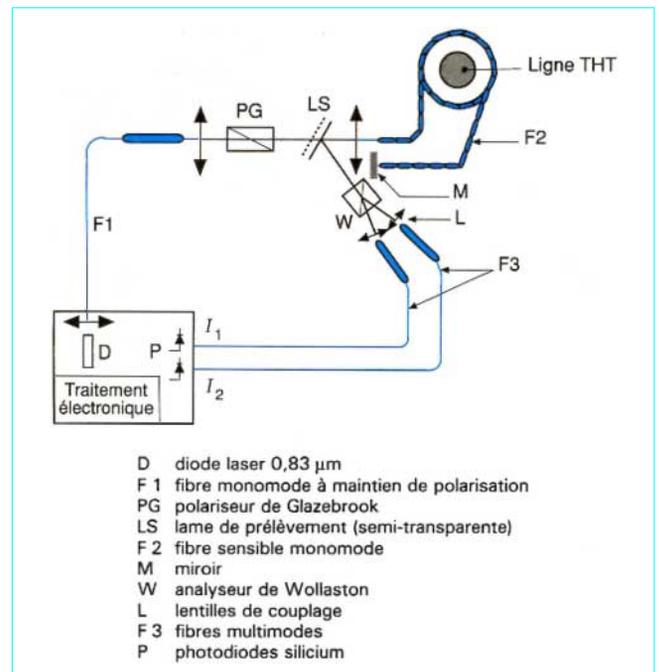


Figure 11 – Configuration de la voie mesure du capteur Faraday (PSC Enertec)

■ Une seconde étude [26] basée sur la même configuration permet à EDF de mettre au point un capteur destiné à la **mesure de courants rapides** dits « post-arc » [27] pour la caractérisation de disjoncteurs pour la très haute tension. Les caractéristiques de tels courants nécessitent la réalisation d'un capteur ayant les spécifications suivantes :

- étendue de mesure : 20 A ;
- résolution : 0,1 A ;
- courant maximal admissible : courant de défaut 63 kA en valeur efficace ;
- valeur crête maximale du courant : 200 kA ;
- bande passante : 5 MHz.

La bande passante de ce capteur est de loin son aspect le plus spécifique. Pour la mesure de courant par un enroulement, elle est directement fonction de la longueur de fibre optique, indépendamment du nombre de spires de mesure. Avec un enroulement de 66 spires d'un diamètre de 50 mm (longueur totale de la fibre sensible : 10,4 m), le temps de réponse du capteur à un échelon de 3 A dont le temps réel de montée est 15 ns est d'environ 200 ns. Malgré des problèmes d'instabilité du zéro dus à la lumière rétro-couplée dans la fibre, limitant l'exploitation quantitative des mesures, l'appareil montre un fonctionnement satisfaisant. Au contraire d'un système pyrotechnique, il a l'avantage de ne pas être détruit à chaque essai.

2.2 Configuration polarimétrique à 45°

La configuration précédente limite la dynamique du capteur si l'on veut utiliser un seul enroulement de fibre optique, ce qui est nécessaire dans certaines applications, pour des raisons de coût. Dans le cas d'une détection à 90°, nous ne disposons que de l'information $\sin 2F$ qui, par conséquent, limite théoriquement la rotation $2F$ à 90° donc la dynamique du capteur, pour un nombre de spires de fibre optique donné. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire d'utiliser deux enroulements comportant un nombre de spires différent si l'on veut élargir la dynamique (une voie mesure et une voie protection par exemple).

Il est donc intéressant de connaître la deuxième ligne trigonométrique, c'est-à-dire $\cos 2F$, ce qui permet une extension de la rotation Faraday à 360°, voire même à plusieurs tours. Dans ce cas, une fonction compte-tours doit être prévue.

Un calcul trigonométrique simple montre que, si l'on réalise une séparation du faisceau issu de la fibre optique en deux composantes polarisées linéairement et dont les plans de polarisation font un angle de 45° entre eux (figure 13), l'intensité recueillie par les photodiodes s'écrit :

$$I_1 = \frac{I_0}{4} (1 + \cos 2F)$$

$$I_2 = \frac{I_0}{4} (1 + \sin 2F)$$

La figure 14 représente le dispositif d'un capteur polarimétrique à 45°. Dans cette configuration, une opération arithmétique simple sur les intensités I_1 et I_2 ne nous permet pas d'éliminer I_0 . Par conséquent, une troisième photodiode, dite de référence, permet de mesurer l'intensité de la source.

■ Ce type de configuration a été utilisé pour la mesure d'**impulsions de forts courants** (jusqu'à 700 kA) dans le domaine de la physique des plasmas [22] qui utilise un tokamak auquel est appliquée une haute tension. L'utilisation d'une bobine de Rogowski pose des problèmes liés à de fortes perturbations électromagnétiques.

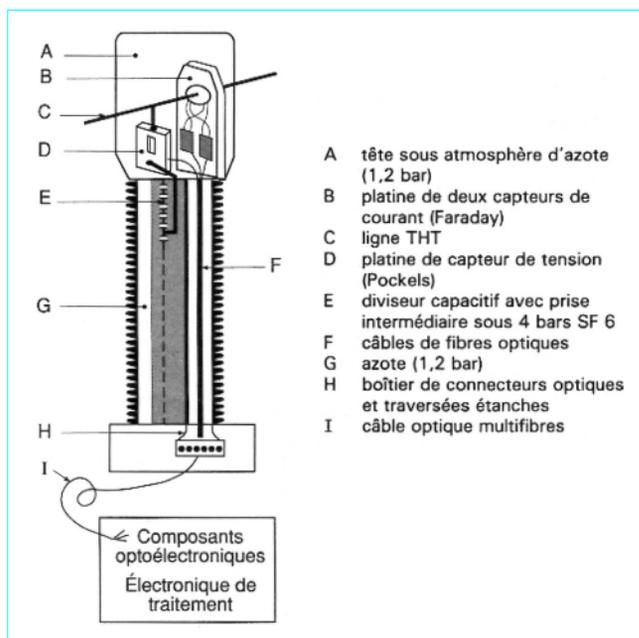


Figure 12 – Architecture du capteur (développé par PSC Enertec)

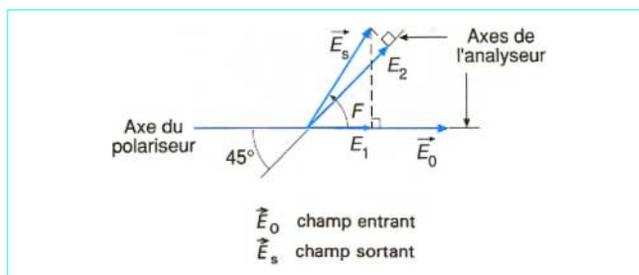


Figure 13 – Principe de la détection polarimétrique à 45°

La source est un laser hélium-néon de 5 mW déporté à une dizaine de mètres du dispositif. La fibre capteur est une fibre à faible biréfringence linéaire (fibre *spun*).

La résolution de la mesure est de 1 kA et la bande passante de 1 MHz. La précision varie entre 1 et 6 %.

■ Merlin-Gérin a mis au point un prototype utilisant une configuration à 45° pour une **application moyenne tension** [23]. L'utilisation d'une seule voie optique (un enroulement de 100 spires sur un diamètre de 10 cm) permet d'obtenir une étendue de mesure allant de 10 A à 160 000 A en assurant les classes de précision 0,5 et 5 P demandées respectivement pour les courants de mesure (de 10 A à 2 000 A) et pour les courants de protection (de 2 000 A à 80 000 A). Le prototype repose sur le schéma de principe de la figure 14. Une électronique numérique permet de compter les tours de rotation de la polarisation et d'effectuer les compensations nécessaires lors du traitement des données pour rattraper d'éventuelles dérives.

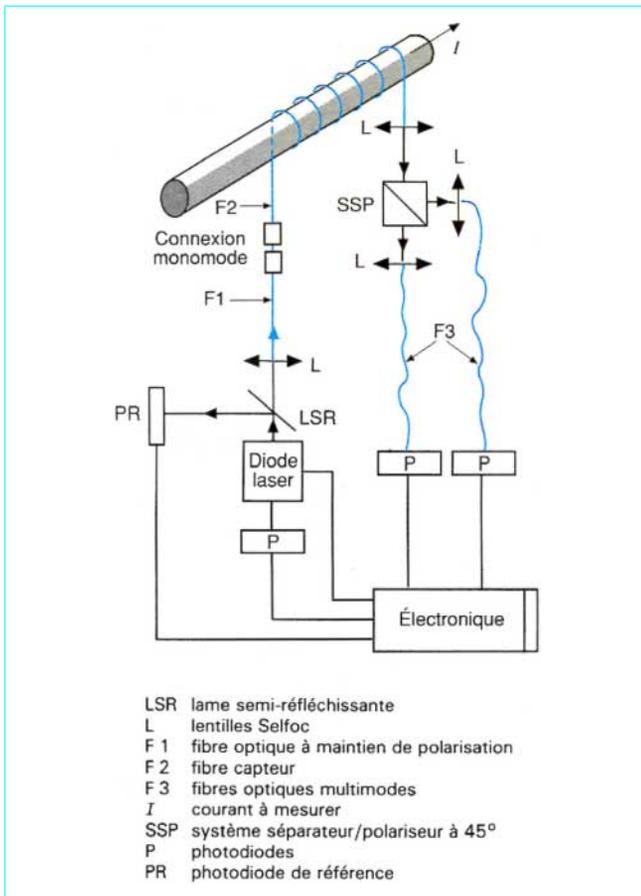


Figure 14 – Dispositif d'un capteur de courant à effet Faraday utilisant une configuration polarimétrique à 45°

3. Capteurs interférométriques

Nous avons vu (§ 2.1.2) que les problèmes rencontrés dans les configurations polarimétriques étaient dus aux perturbations extérieures de nature réciproque provoquant une variation de l'état de polarisation de la lumière. Il est donc intéressant de réaliser un système privilégiant l'effet Faraday et éliminant les effets réciproques parasites (vibrations, température).

L'interféromètre de Sagnac, dont l'application principale est le gyroscope optique (mesure des rotations inertielles), permet de concevoir un tel système.

3.1 Interféromètre de Sagnac

L'effet Sagnac comme l'effet Faraday sont actuellement les deux seuls effets physiques de nature non réciproque (c'est-à-dire, rappelez-le, indépendants du sens de propagation de la lumière).

La figure 15 représente schématiquement un interféromètre de Sagnac utilisé pour la mesure de courant.

Le principe repose sur le déphasage, créé par effet Faraday, de deux ondes à polarisation circulaire se propageant en sens inverse

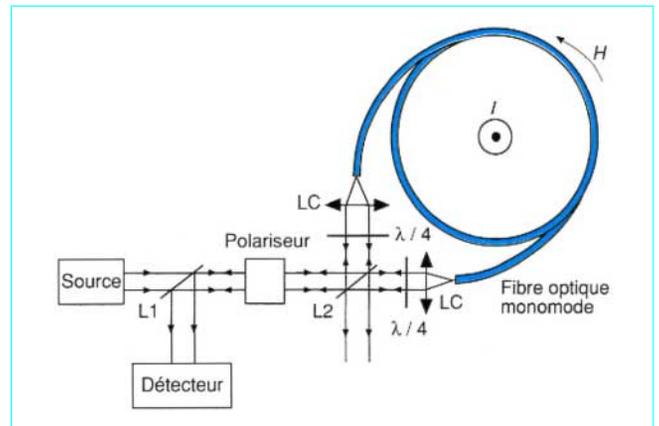


Figure 15 – Interféromètre de Sagnac

dans une fibre optique formant l'anneau de Sagnac (ondes contra-propagatives). Cette différence de phase vaut :

$$\Delta\Phi = 2 \sqrt{N} I$$

La sensibilité du système est doublée par rapport à la configuration polarimétrique à 45° ou à 90° ; elle est la même que dans le cas d'une configuration polarimétrique de type reflex.

La source de lumière peut être incohérente (DEL : diode électroluminescente), cohérente (diode laser) ou à faible longueur de cohérence (diode superradiante) car la différence de chemin optique entre les ondes interférentes est de l'ordre du μm (quelques longueurs d'onde). L'utilisation d'une DEL pose le problème du couplage de lumière dans une fibre monomode. Les diodes superradiantes (quelques dizaines de μm de longueur de cohérence) sont adaptées à l'interféromètre de Sagnac, mais sont d'un prix élevé. Les diodes lasers posent soit un problème de stabilité dans le temps, soit un problème de longueur de cohérence trop importante. En définitive un bon choix doit réaliser un compromis entre ces différents problèmes, et tenir compte de l'application concernée.

La source de lumière polarisée linéairement délivre un faisceau traversant une première lame semi-transparente L1 puis une deuxième lame semi-transparente L2, réfléchissant et transmettant 50 % de l'intensité lumineuse vers deux lames quart d'onde (notées $\lambda/4$ sur la figure 15). Ces lames sont orientées de façon à rendre circulaires les polarisations des ondes incidentes. Deux lentilles de couplage LC focalisent les deux faisceaux sur les extrémités de la fibre optique. Après avoir parcouru les N spires de fibre, ces deux faisceaux quittent l'anneau de Sagnac et se recombinaient en donnant un phénomène d'interférence dont l'intensité est mesurée par un photodétecteur.

La loi de détection d'un interféromètre de Sagnac s'écrit :

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + \cos 2F)$$

avec F rotation Faraday,

I_0 intensité lumineuse de la source.

Nous voyons qu'aux faibles valeurs de F , donc aux faibles valeurs de courant, la sensibilité est mauvaise, la loi de détection étant en cosinus. Il est donc nécessaire d'affiner la méthode de détection. Deux types de détection sont utilisés : la détection homodyne et la détection hétérodyne, chacune d'elles pouvant se présenter sous de nombreuses variantes. La détection homodyne nécessitant la mise en place de procédés de mesure sophistiqués, nous nous limiterons à décrire ici la détection hétérodyne. Le lecteur trouvera dans les références [28] [29] [30] [31] [60] des détails sur les méthodes homodynes.

3.2 Détection hétérodyne

Nota : le lecteur pourra se reporter aux références bibliographiques [32] [33] [34] [35] [36].

La détection hétérodyne permet de détecter directement la phase induite par effet Faraday. De plus, la détection à une fréquence intermédiaire permet de s'affranchir des bruits propres des détecteurs, relativement élevés en basse fréquence (bruit en $1/f$).

Nous décrivons ci-après une étude réalisée par le département Études et Recherches d'EDF ; le montage (figure 16) utilise une seule source fournissant les deux fréquences nécessaires à l'hétérodynage. Cette source est un laser hélium-néon bifréquence émettant dans le rouge à 632,8 nm deux ondes à polarisations linéaires orthogonales et légèrement décalées en fréquence ($\nu_1 - \nu_2 \approx 100$ kHz). L'isolateur optique placé derrière la source laser évite la réinjection dans le tube laser d'une moitié de la puissance lumineuse sortant d'une des extrémités de la fibre et transmise par le cube séparateur 50/50 vers le laser.

Ce cube séparateur partage le faisceau sortant de l'isolateur en deux faisceaux d'intensités lumineuses égales. Un premier faisceau est dirigé vers la voie de référence sur laquelle un analyseur projetant chaque polarisation permet la détection, par une photodiode, du battement à la différence des fréquences $\nu_1 - \nu_2$.

Un deuxième faisceau est dirigé vers l'anneau de Sagnac à l'entrée duquel est placé un cube séparateur/polariseur ; ce dernier réalise la séparation spatiale des deux polarisations du signal à l'entrée de l'interféromètre, et dirige chacune d'elles vers l'un des deux bras de l'anneau. Deux lames quart d'onde convenablement orientées transforment la polarisation linéaire de chacune des ondes en polarisation circulaire. Après injection des faisceaux à chaque extrémité de la fibre par des objectifs de microscope O, les deux ondes parcourent dans l'interféromètre, en sens opposé, le même trajet et subissent l'effet Faraday. Les deux ondes en sortie de fibre optique sont retransformées en lumière polarisée linéairement en traversant une deuxième lame quart d'onde et ressortent colinéaires derrière le cube séparateur/polariseur.

Le cube séparateur 50/50 transmet une moitié du faisceau vers la voie de mesure et l'autre moitié vers l'isolateur qui réalise alors sa fonction d'obturateur optique. La voie de mesure est constituée d'un analyseur et d'un photodétecteur. Les deux signaux électroniques, issus des deux voies référence et mesure, sont traités par un phasemètre fournissant leur différence de phase, c'est-à-dire une mesure directement proportionnelle au double du déphasage Faraday. Après un trajet de longueur L dans la fibre optique soumise au champ magnétique, la composante alternative du signal détecté sur la photodiode de mesure est proportionnelle à :

$$\cos(\Delta\omega \cdot t + \Delta\Phi)$$

avec $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = 2\pi(\nu_1 - \nu_2)$

$$\Delta\Phi = L(n_1\omega_1 - n_2\omega_2)/c$$

où c est la vitesse de la lumière, $n_1 = n(\omega_1)$ et $n_2 = n(\omega_2)$.

Les indices de réfraction n_1 et n_2 associés à chaque onde sont très peu différents l'un de l'autre du fait du faible écart entre ω_1 et ω_2 .

En écrivant $n_1 = n + (\Delta n/2)$ et $n_2 = n - (\Delta n/2)$, $\Delta\Phi$ devient :

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \frac{L}{c} \left[\left(n + \frac{\Delta n}{2} \right) \omega_1 - \left(n - \frac{\Delta n}{2} \right) (\omega_1 - \Delta\omega) \right] \\ &= \frac{L}{c} (\omega_1 \Delta n + n \Delta\omega) = \Delta\Phi_F + \Delta\Phi_p \end{aligned}$$

avec $\Delta\Phi_F = \frac{L}{c} \omega_1 \Delta n$ déphasage induit par l'effet Faraday,

$\Delta\Phi_p = \frac{L}{c} n \Delta\omega$ déphasage induit par la propagation des deux ondes de fréquences légèrement différentes.

$\Delta\Phi_p \approx 0,23^\circ/\text{m}$ de fibre,

$\Delta\Phi_F = 2NV I = 1^\circ$ par tour de fibre, pour un courant de 2 000 A, et $V \approx 4,5 \cdot 10^{-6}$ rad/A pour la silice à 633 nm.

Le calcul de la longueur optimale de fibre permettant d'obtenir une sensibilité maximale donne les résultats suivants.

Un courant minimal d'environ 0,5 A peut être mesuré avec une longueur de fibre optique de 260 m ($\lambda = 632,8$ nm) d'atténuation 23,5 dB/km enroulée sur un mandrin de 10 cm de rayon en utilisant un phasemètre de $0,1^\circ$ de résolution. Ces valeurs sont théoriques. Lorsqu'on dispose d'une longueur de fibre optique plus faible, il faut chercher les caractéristiques de l'appareil en fonction de la nouvelle longueur ; par exemple, pour 100 tours de fibre (≈ 63 m de fibre sur un touret de 10 cm de rayon), $I_{\min} = 2$ A.

Quant au courant maximal mesurable, il correspond à un déphasage de 360° et à un nombre de spires $N = 1$. Il est alors possible de mesurer un courant d'environ 700 kA.

Les capteurs interférométriques permettent d'obtenir de bonnes performances (précision, dynamique, etc.), mais nécessitent de mettre au point des dispositifs compliqués, difficilement industrialisables.

Actuellement, la configuration polarimétrique offre un meilleur compromis technico-économique.

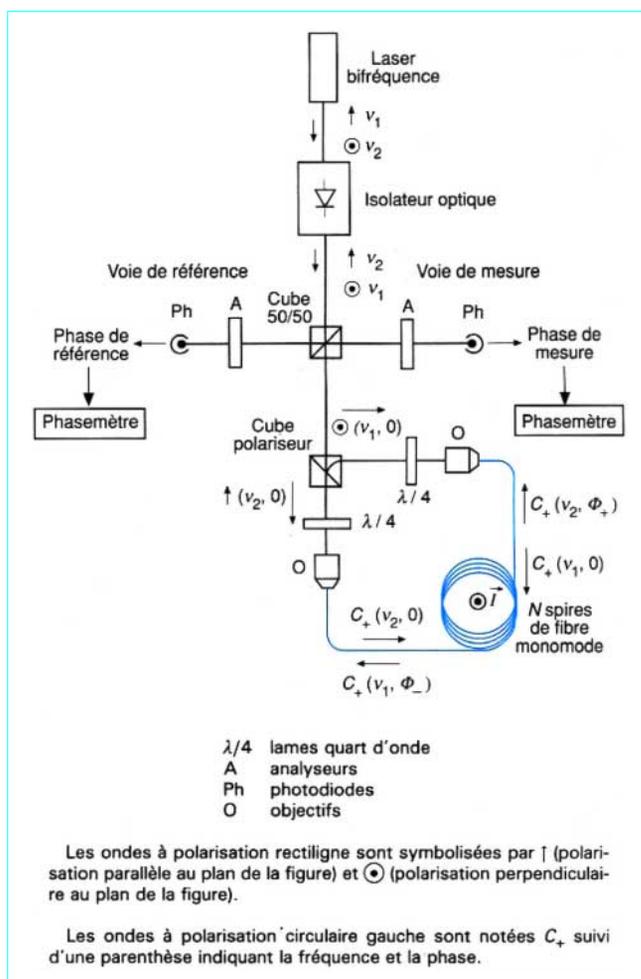


Figure 16 – Capteur de courant interférométrique à détection hétérodyne (d'après P. Ferdinand)

4. Capteurs à effet magnétostrictif

Cet effet est surtout utilisé pour la **mesure de champs magnétiques**. Par conséquent, il permet, dans certains cas, de remonter à la valeur d'un courant électrique associé au champ magnétique.

Le principe est fondé sur la mesure des tensions longitudinales se produisant dans une fibre optique gainée par une matière magnétostrictive ou l'entourant. En effet, la magnétostriction se manifeste par une variation réversible de la dimension d'un produit ferromagnétique parallèlement à l'axe du champ magnétique appliqué. Les deux autres dimensions transversales sont aussi affectées, mais on s'intéresse uniquement aux variations longitudinales.

Les principaux **matériaux** utilisés pour la magnétostriction sont le fer, le cobalt, le nickel et les alliages de ces métaux. Le **coefficient de magnétostriction** λ_s est donné par la variation relative de longueur $\Delta l/l$. Pour le nickel, par exemple : $\lambda_s = 32,8 \cdot 10^{-6}$. Pour des alliages fer-nickel, le coefficient peut être positif (allongement) ou négatif (rétrécissement) suivant les pourcentages respectifs. Le nickel pur est très utilisé à cause de sa simplicité de fabrication et de sa résistance à la corrosion. Cependant, ses propriétés sont fortement influencées par la présence d'impuretés et par son traitement. L'utilisation de verres métalliques améliore la sensibilité de la mesure.

Les transducteurs des appareils expérimentaux se présentent en général sous trois formes [37] [38] [39] [40] [41] [42] :

- un tube ou une barre de métal magnétostrictif sur lequel est enroulée la fibre de mesure (figure 17a) ;
- un revêtement métallique qui gaine uniformément la fibre (figure 17b) ;
- une fibre monomode qui est fixée sur une plaque métallique ou un verre métallique par une couche d'époxyde (figure 17c).

Ces différentes configurations sont utilisées avec des montages interférométriques (Mach-Zehnder) [37] [38] [42] (figure 18) ou des montages polarimétriques [41] (figure 19). Dans le cas de l'interférométrie, on mesure des différences de chemins optiques provoquées par une variation de longueur de la fibre optique du bras de mesure. Dans le cas du montage polarimétrique, on mesure la variation de biréfringence linéaire induite par la variation de courbure d'une fibre optique enroulée autour d'un matériau magnétostrictif.

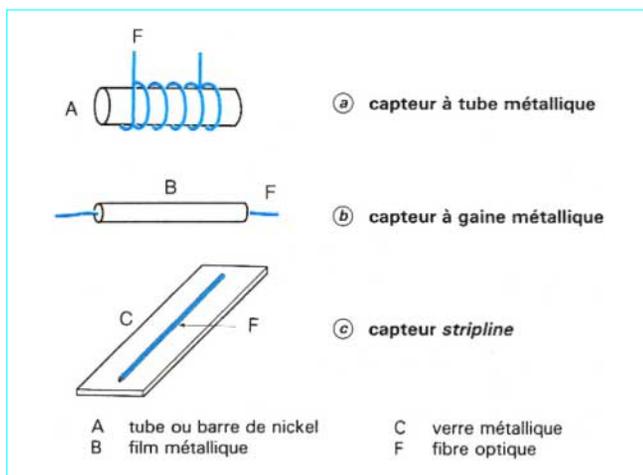


Figure 17 - Différentes utilisations de l'effet de magnétostriction

L'utilisation de fibres optiques multimodes permet la mesure de forts courants (10^4 A) [39], alors que des courants de l'ordre de 10^{-9} A furent mesurés avec un fibre monomode. La fréquence des courants alternatifs peut atteindre 10 kHz.

La mesure du courant électrique par effet magnétostrictif s'est beaucoup moins développée que la mesure par effet Faraday. L'isolation galvanique, avantage principal de la mesure de courant par fibre optique dans les applications où la tension est élevée, disparaît avec les systèmes magnétostrictifs du fait de la présence de matériaux métalliques dans le transducteur. C'est la raison pour laquelle la magnétostriction est plus utilisée pour mettre au point des **magnétomètres** que des ampèremètres.

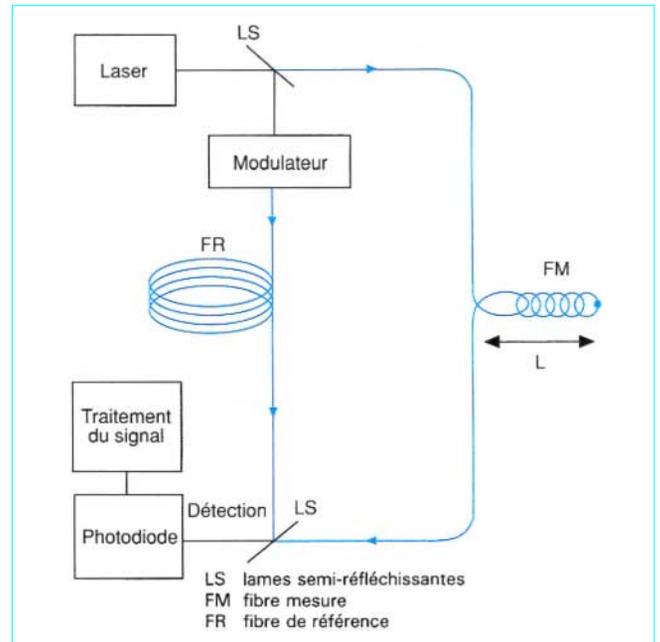


Figure 18 - Capteur magnétostrictif utilisant une configuration interférométrique de Mach-Zehnder

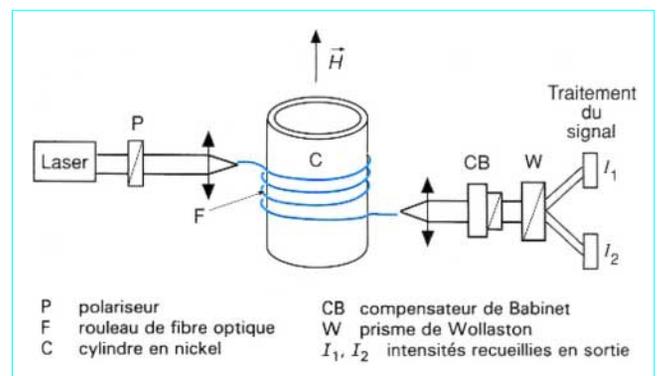


Figure 19 - Capteur magnétostrictif utilisant un montage polarimétrique de Rashleigh

5. Quelques études récentes

5.1 Résonateur de Fabry-Pérot

Nota : le lecteur pourra se reporter aux références bibliographiques [43] [44] [45].

L'augmentation de la rotation Faraday, obtenue dans les systèmes polarimétriques ou interférométriques par la multiplication du nombre de spires de fibre optique entourant le conducteur de courant, peut se réaliser en utilisant une configuration de type Fabry-Pérot. Le résonateur est constitué d'une fibre optique monomode formant un seul tour d'hélice, aux extrémités de laquelle sont collés deux miroirs (figure 20). Pour la mesure, on accorde la fréquence optique d'un laser semi-conducteur à un pic de résonance de la cavité Fabry-Pérot où la sensibilité est maximale. La différence de phase entre les deux polarisations transmises à la sortie du résonateur est alors quantifiée en utilisant une configuration polarimétrique à détection hétérodyne. L'augmentation de la sensibilité est proportionnelle à la *finesse* du résonateur.

La biréfringence induite par la courbure de l'hélice est masquée par la biréfringence circulaire créée par la torsion géométrique due à la forme hélicoïdale de la fibre.

La dynamique du capteur est limitée par sa largeur de résonance correspondant à un déphasage de $\pm 45^\circ$. La diode laser est optiquement isolée du résonateur et émet une raie centrée à 780 nm de largeur 20 MHz, cinq fois plus étroite que les pics de résonance Fabry-Pérot. Une **sensibilité** de $1,4 \cdot 10^{-3}$ degrés/A, quatre fois supérieure à celle d'un capteur utilisant une seule spire de fibre, peut être obtenue.

5.2 Multiplexage en polarisation

Une étude réalisée au Laboratoire de métrologie de l'Institut de Technologie de Lausanne [46] repose sur un multiplexage temporel de deux états de polarisation différents injectés dans une fibre optique à faible biréfringence linéaire, utilisée dans une configuration polarimétrique à 90° . Cette méthode permet de discriminer la biréfringence linéaire induite par des contraintes extérieures (courbure, pression, vibrations,...) de la rotation Faraday et ainsi d'**améliorer la précision de la mesure** en s'affranchissant des phénomènes réciproques.

Le schéma de principe du montage proposé est présenté sur la figure 21.

En pratique, il est difficile, voire impossible, d'obtenir un parfait état de polarisation circulaire. En effet, l'imperfection de la lame quart d'onde et la sensibilité de la lame séparatrice à la polarisation ne permettent d'obtenir qu'un état de polarisation elliptique introduisant une erreur dans la mesure de F . Une solution consiste à utiliser sur le bras de polarisation circulaire un compensateur de polarisation placé entre le polariseur P_1 et la lame séparatrice LS_2 . Il permet de réduire l'ellipticité de la polarisation circulaire atteignant ainsi une valeur de 0,99.

Des premiers essais ont montré, sur une plage de courant comprise entre 0 et 8 kA, un bon comportement du système.

5.3 Fibres optiques spéciales

5.3.1 Traitement thermique d'une bobine de fibre optique

Depuis quelques années, des laboratoires étudient la possibilité de réduire la taille des capteurs de courant à fibres optiques et d'augmenter leur sensibilité. Il est alors nécessaire de réaliser des bobinages de fibre optique de faible diamètre (quelques centimètres) sans induire par courbure une forte biréfringence linéaire.

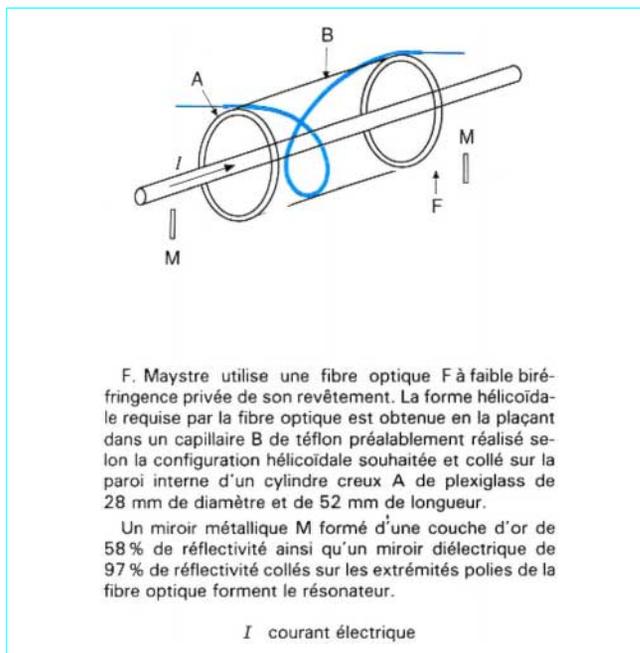


Figure 20 – Résonateur de Fabry-Pérot pour la mesure de courant par effet Faraday [43]

G.W. Day du Laboratoire national de Boulder (Colorado) [47] [48] [49] propose d'enrouler selon la configuration souhaitée (forme et diamètre de l'enroulement) une fibre optique monomode, à faible biréfringence de préférence, sur un support céramique et de chauffer l'ensemble à environ 800 à 900 °C pendant 24 h puis de le refroidir lentement (quelques jours à une dizaine de jours). Cette opération permet une relaxation des contraintes appliquées à la fibre. Ainsi, on réduit considérablement la biréfringence sans diminution notable de la sensibilité. Mais le traitement thermique appliqué à la fibre lui confère une biréfringence résiduelle la rendant sensible à la température (variation de sensibilité de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} °C⁻¹).

Des enroulements de 1 à 3 cm de diamètre, comportant 100 à 200 spires de fibre, ont été réalisés pour la mesure de faibles courants et la réalisation d'**ampèremètres miniatures** (figure 22).

L'utilisation de ces faibles diamètres d'enroulement, donc de faibles longueurs de fibre optique, permet, en réduisant le temps de propagation de la lumière dans la fibre, d'augmenter la bande passante des capteurs (temps de propagation de 25 ns dans 190 spires de fibre optique d'une bobine de 1 cm de diamètre).

La société 3M aux États-Unis travaille actuellement sur la réalisation d'un prototype de capteur Faraday utilisant ce type d'enroulement dans une configuration à 90° . De plus, un premier polariseur à fibre optique [50] est utilisé entre la source et l'entrée de la fibre capteur, alors qu'un second polariseur à fibre optique est utilisé comme analyseur entre la sortie de la fibre capteur et les détecteurs. Il est ainsi possible de réaliser un **capteur tout fibre optique**.

5.3.2 Fibre optique à forte biréfringence circulaire

Nota : le lecteur pourra se reporter aux références bibliographiques [52] [53].

Des chercheurs de l'université de Southampton en Angleterre mènent actuellement des études dans le but de réaliser une fibre à forte biréfringence circulaire obtenue en torsadant, au cours de l'opération de préforme, une fibre optique à forte biréfringence linéaire, appelée encore fibre à maintien de polarisation (*bow-tie*) [54].

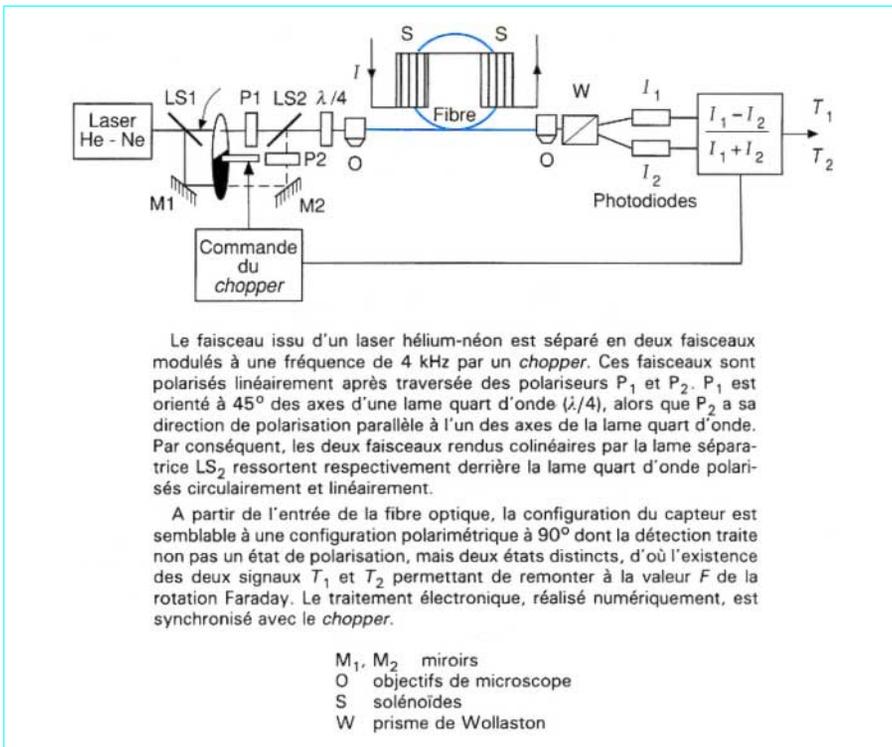


Figure 21 – Multiplexage en polarisation : montage expérimental

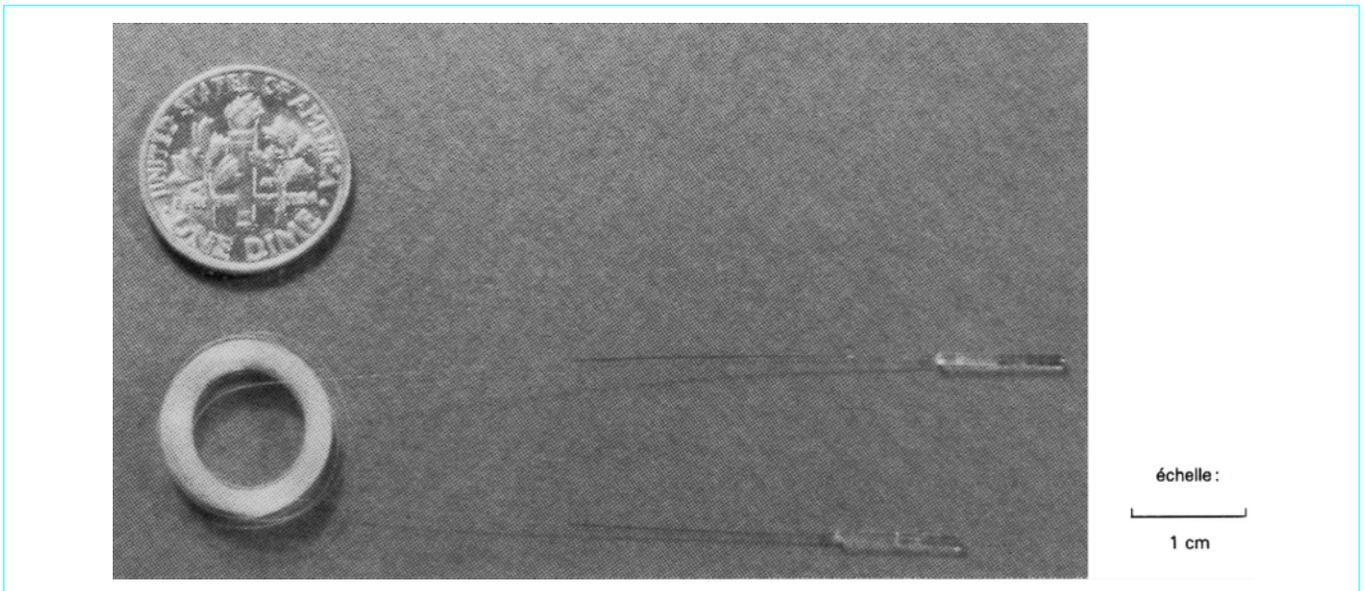


Figure 22 – Capteur de courant miniature (photo due à la courtoisie de Gordon W. Day, du Boulder Laboratory, USA)

Les taux de torsion pouvant être appliqués à la fibre *bow-tie* ne suffisent pas à lui conférer une biréfringence circulaire totale ; ils génèrent une biréfringence elliptique produisant une légère baisse de sensibilité de la fibre optique.

Ce nouveau type de fibre, appelé **fibre SEB** (*spun elliptically birefringent*), présente les avantages qu'offre d'une part une fibre à forte biréfringence linéaire (à savoir une insensibilité aux

contraintes mécaniques) et d'autre part, une réelle fibre à biréfringence circulaire, idéale pour la mesure du courant par effet Faraday.

Le principal **inconvenient** de ce type de fibre est la sensibilité à la température liée au fait que la forte biréfringence linéaire de la fibre *bow-tie* est obtenue par contraintes thermiques au cours de la fabrication.

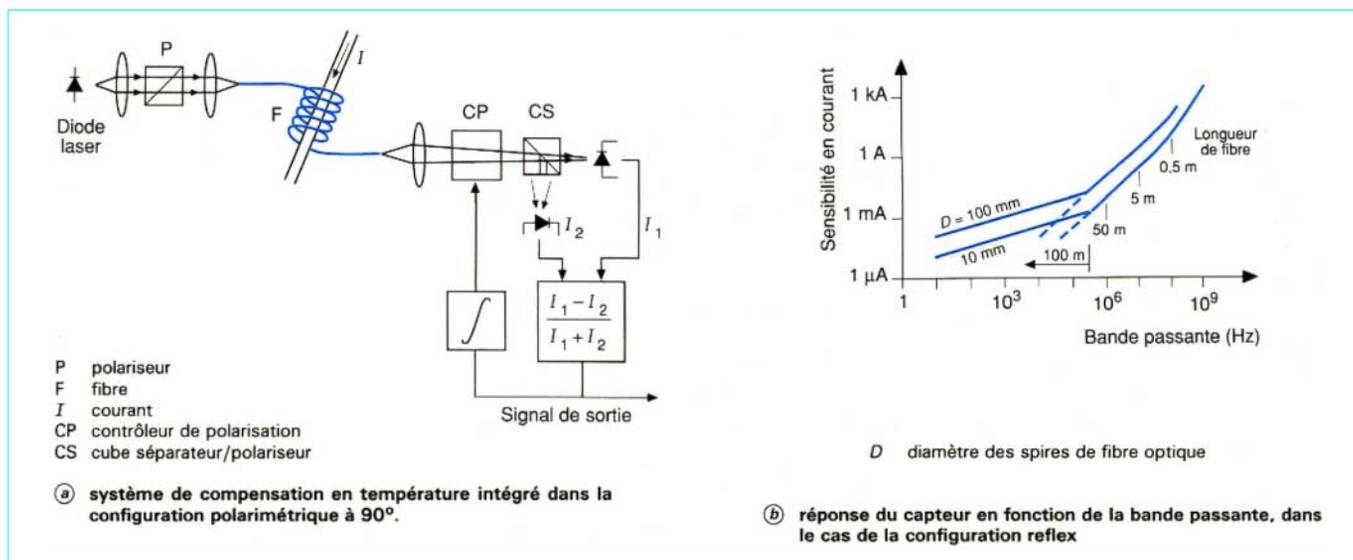


Figure 23 – Capteur à effet Faraday utilisant une fibre à forte biréfringence circulaire

■ Il existe différentes solutions [54] [55] pour remédier à ce problème. L'une d'elles consiste à introduire un contrôleur de polarisation (figure 23a) dans une configuration polarimétrique à 90° [55]. Ce contrôleur, placé en sortie de fibre optique avant le cube séparateur/polariseur, permet de compenser les variations lentes de la biréfringence introduites par les contraintes thermiques. Un prototype a été réalisé. Une sensibilité de l'ordre de 100 $\mu\text{A}/\text{Hz}^{1/2}$ fut obtenue pour 80 spires de fibre SEB couplées à un laser hélium-néon ($\lambda = 633 \text{ nm}$) ou pour 185 spires couplées à une diode laser AsGa ($\lambda = 790 \text{ nm}$).

■ Une autre solution aux problèmes thermiques consiste à utiliser le système reflex (§ 2.1.3). Il permet de compenser les effets thermiques agissant sur la biréfringence circulaire de la fibre, les variations de la biréfringence linéaire ne pouvant être compensées par cette méthode. Les résultats obtenus à partir d'une bobine de 25 mm de diamètre comportant 100 spires de fibre SEB constituant le transducteur d'une configuration reflex montrent une dérive en température de 0,05 %/°C. Il est possible d'abaisser le diamètre de la bobine à une valeur de 13 mm avec seulement une diminution de 1 % de la sensibilité de la mesure, son maximum étant de 1 $\text{mA}/\text{Hz}^{1/2}$. Une dynamique de 113 dB fut obtenue. La faible longueur de fibre utilisée dans ces bobinages permet d'entrevoir la possibilité d'atteindre des sensibilités proches du mA dans les gammes de fréquence de l'ordre du MHz (figure 23b).

6. Marché

Le seul domaine des capteurs de courant à fibres optiques n'a pas, à notre connaissance, fait l'objet d'études prospectives concernant leur marché potentiel. Le faible pourcentage qu'ils représentent, quelques % du marché des capteurs à fibres optiques, lui-même représentant quelques % du marché mondial des capteurs, n'a pas encore incité certains organismes à réaliser une étude marketing.

Actuellement, certaines études sur les ampèremètres à fibres optiques commencent à sortir des laboratoires. Elles concernent essentiellement une application spécifique qui confère aux ampèremètres optiques un avantage prédominant : c'est le cas de la **mesure de courant dans le domaine de la haute tension** qui bénéficie, avec la technologie optique, de capteurs insensibles aux perturbations électromagnétiques et offrant une bonne isolation galvanique.

C'est l'existence de tels avantages déterminants qui permettra aux capteurs à fibres optiques de s'imposer.

Il existe donc, dans l'application précédemment citée, quelques prototypes pré-industriels mis en essai sur les réseaux de distribution haute tension (États-Unis, France, Japon). Ils utilisent surtout une configuration polarimétrique, plus simple et moins coûteuse qu'une configuration interférométrique. Si certains d'entre eux atteignent actuellement les caractéristiques techniques suffisantes pour rivaliser avec les réducteurs de courant conventionnels, ils se heurtent par contre à des problèmes d'interfaçage avec les équipements secondaires (transformateur d'isolement, shunt, relais) qu'ils doivent alimenter.

Un capteur de courant délivre des signaux bas niveaux alors que l'entrée des systèmes de protection et de comptage utilise dans leur principe une puissance beaucoup plus élevée que peut fournir le réducteur conventionnel. Par conséquent, l'intégration des capteurs à fibres optiques dans les postes haute tension dépend essentiellement de la rapidité avec laquelle les équipements secondaires utiliseront des techniques numériques permettant des entrées bas niveaux. En France, il sera certainement nécessaire d'attendre 5 à 10 ans avant de faire les premières expérimentations d'envergure. Les cinq prochaines années pourraient être consacrées, d'une part, à la mise en expérimentation sur le réseau de prototypes et, d'autre part, à la préparation des nouveaux paliers techniques liés aux futures interfaces.

Pour des applications moyenne et basse tension, le coût des nouveaux appareils devra baisser. L'optique intégrée permettra, en réduisant ces coûts, de développer des capteurs concurrentiels. On remarque déjà une nette baisse du prix des composants opto-électroniques.

Le marché des ampèremètres à fibres optiques étant mal connu à ce jour, nous nous contenterons de réactualiser certaines données sur le marché global des capteurs à fibres optiques. Nous nous appuyerons sur une étude réalisée par la société Corporate Strategic Intelligence (Middlebush, New Jersey, USA). D'après cette société et selon les premières analyses des ventes, le marché des capteurs à fibres optiques va augmenter à raison de 30 % par an dans la période qui s'étend de 1988 à 1996. Cette croissance moyenne variera de 28 à 62 % suivant les applications. Le tableau 2 donne la répartition du marché des capteurs à fibres optiques, par domaine de mesure.

Tableau 2 – Répartition du marché des capteurs à fibres optiques par domaine de mesure

Application	Marché (millions de dollars par an)				
	1987	1988	1992	1996	Croissance (%)
Température	4,5	5,5	18,39	66,43	36,5
Pression	2,25	2,5	10,14	37,96	40,5
Niveaux	1	1,25	4,59	17,1	38,5
Débits	1	1,25	4,59	17,1	38,5
Radiations	0,8	1	3,17	7,12	28
Électromagnétique	0,8	1	3,17	7,12	28
Accélération	1,4	1,75	5,07	28,4	41,5
Gyroscopie	11,25	14	50,51	156,59	35,5
Chimique	2,2	2,5	12,68	66,42	50,5
Déplacement	1,2	1,5	4,77	15,62	34,5
Pollution	0,4	0,5	1,27	7,12	52,5
Hydrophones	0,6	0,75	5,07	33,22	62,5
Sismique	0,25	0,35	0,64	2,4	39
Acidité	0,2	0,25	0,64	2,4	32,5
Divers	2,15	2,98	9,17	41,65	
Total	30	37,08	133,87	506,65	38,5

Références bibliographiques

- [1] SMITH (A.M.). – Appl. Opt., vol. 7, n° 1, p. 52-56 (1978).
- [2] ROGERS (A.J.). – *Electrical Power Applications*. Vol. 2, n° 4, p. 120-124 (1979).
- [3] VEESER (L.R.), KANIA (D.), FREEMAN (B.), KRUSE (P.) et ZIMMERMAN (E.). – *Measurement of megampere currents with optical fibers*. SPIE vol. Los Alamos Conference in Optics 83, p. 300-304 (1983).
- [4] LIZET (J.). – *Mesure de forts courants par effet Faraday dans une fibre optique*. Thèse CNAM, Grenoble (1980).
- [5] LANGEAC (D.). – *Étude et réalisation d'un ampèremètre à fibre optique*. Thèse, Grenoble (1983).
- [6] ROYER (P.), KEVORKIAN (A.), RIVAL (R.), TURC (J.) et CARDOT (B.). – *Capteur de courant à fibre optique et traitements associés*. RGE n° 4 (1990).
- [7] PAPP (A.) et HARMS (H.). – Appl. Opt., vol. 19, p. 3729-3734, nov. 1980.
- [8] AULICH (H.), BECK (W.), DOUKLIAS (N.), HARMS (H.), PAPP (A.) et SCHNEIDER (H.). – Appl. Opt., vol. 19, p. 3735 (1980).
- [9] HARMS (H.) et PAPP (A.). – Appl. Opt., vol. 19, p. 3741-3745, nov. 1980.
- [10] KAMINOW (I.P.). – IEEE J. of Quant. Elect., vol. 17, n° 1, juin 1981.
- [11] PAYNE (D.N.), BARLOW (A.J.) et RAMSKOVHANSEN (J.J.). – IEEE J. of Quant. Elect., vol. 18, n° 4, avril 1982.
- [12] RASHLEIGH (S.C.). – J. of Light Techn., vol. 1, n° 2, juin 1983.
- [13] ROSS (J.N.). – *The rotation of the polarization in low birefringence monomode optical fibers due to geometric effects*. Optical Quantum Electron., vol. 16, p. 455-461 (1984).
- [14] RAMASWAMY et FRENCH (G.W.). – *Influence of monocircular core on the polarization performance of single mode fibers*. Electron. Lett., 14, p. 143 (1978).
- [15] BARLOW (A.J.), RAMSKOV-HANSEN (J.J.) et PAYNE (D.N.). – *Birefringence and polarization mode dispersion in spun single mode fibers*. Appl. Opt., vol. 20, n° 17, p. 2962-2968, sept. 1981.
- [16] BARLOW (A.J.), RAMSKOV-HANSEN (J.J.) et PAYNE (D.N.). – *Anisotropy in spun single mode fibers*. Electron. Lett., vol. 18, n° 5, p. 200-202, mars 1982.
- [17] ULRICH (R.), RASHLEIGH (S.C.) et EICKHOFF (W.). – *Bending induced birefringence in single-mode fibers*. Opt. Lett., 5, 273 (1980).
- [18] RASHLEIGH (S.C.) et ULRICH (R.). – *Magneto-optic current sensing with birefringent fibers*. Appl. Phys. Lett., 17, p. 52-56 (1978).
- [19] JOHNSON (M.). – *Poincare sphere representation of birefringent networks*. Appl. Opt., 20, 2075 (1981).
- [20] LANGEAC (D.). – *Temperature sensing in twisted single-mode fibers*. Electron Lett., vol. 18, n° 24, p. 1022 (1982).
- [21] ULRICH (R.) et SIMON (A.). – Appl. Opt., vol. 18, n° 13, p. 2241-2251, juil. 1979.
- [22] LAMING (H.S.), MASTOP (W.J.), van der MEER (A.F.G.) et OOMENS (A.A.M.). – Appl. Opt., vol. 26, n° 12, p. 2456-2460, juin 1987.
- [23] ROYER (P.) et KERVORKIAN (A.). – *Capteur de courant à fibre optique*. Journées Nationales de l'Optique Guidée, Grenoble, oct. 1990.
- [24] RASHLEIGH (S.C.) et ULRICH (R.). – *Optical fiber current measurement apparatus*. Patent Application no DE 3116149 and 6B 2100018.
- [25] CHATREFOU (D.) et TANTIN (P.). – *Un combiné optique de mesure courant-tension*. RGE, n° 5 (1989).
- [26] MEILLAND (P.). – *Construction d'un ampèremètre à grande bande passante basé sur l'effet Faraday dans une fibre optique unimodale*. Thèse, Université de Limoges, sept. 1988.
- [27] YANABU (S.) et al. – *Post arc current after high current interruption in vacuum*. Xlth Int. Symp. on discharges and electrical discharges in vacuum (1984).
- [28] LIN (S.C.) et GIALLORENZI (T.). – *Sensitivity analysis of the Sagnac effect optical fiber-ring interferometer*. Appl. Opt., 18, p. 915-931 (1979).
- [29] ARDITTY (H.J.), BOURDIN (Y.) et PAPUCHON (M.). – *Un capteur ampèremétrique à fibre optique*. Revue technique Thomson-CSF, vol. 13, n° 3 (1981).
- [30] LEFEVRE (H.). – *Contribution à la gyrométrie à fibre optique de classe inertielle*. Thèse d'état, Nice (1982).
- [31] DAVID (J.L.) et EZEKIEL (S.). – *Technics for shot-noise limited inertial rotation measurement using a multiturn fiber Sagnac interferometer*. SPIE, vol. 157 : Laser inertial rotation sensor, p. 131-136 (1978).
- [32] YOSHINO (T.) et NARA (M.). – *Some fiber-optic sensors using differential heterodyne method*. Proc. 4th Sensor Symposium, Institute of Electrical Engineers of Japan (1984).
- [33] CHANDLER (G.I.), FOREMAN (P.R.), JAHODA (F.C.) et CLARKE (K.A.). – *Fiber optic heterodyne phase shift measurement of plasma current*. Appl. Opt., 25, p. 1770-1774 (1986).
- [34] KERSEY (A.D.) et JACKSON (P.A.). – *Current sensing utilizing heterodyne detection of the Faraday effect in single mode optical fiber*. IEEE J. Lightwave Tech LT-4, p. 640-644 (1986).

- [35] KERSEY (A.D.) et DAVIS (M.A.). – *All-fiber Faraday-rotation current sensor with remote laser-FM based heterodyne detection*. Proceeding of the 6th International Conference on optical fiber sensors OFS'89, p. 285-290.
- [36] FERDINAND (P.). – *Réalisation d'un ampèremètre à fibre optique*. Thèse 3^e cycle, Orsay (1982).
- [37] YARIV et WINSOR (H.V.). – *Proposal for the detection of magnetic fields through magnetostrictive perturbation of optical fibers*. Opt. Lett., 5, p. 87-89 (1980).
- [38] DANDRIDGE (A.), TVETEN (A.B.) et GIALLORENZI (T.G.). – *Interferometric current sensors with optical fibers*. Elect. Lett., vol. 17, p. 523-524 (1981).
- [39] TANGONAN (G.L.), PERSECHIMI (D.I.), MORRISON (R.J.) et WYSOCKI (T.A.). – *Current sensing with metal coated multimode fibers*. Elect. Lett., vol. 16, p. 958 (1980).
- [40] TROWBRIDGE (F.R.) et PHILLIPS (R.L.). – *Metallic glass fiber optic phase modulators*. Optic Lett., 6, p. 636-638 (1981).
- [41] RASHLEIGH (S.C.). – *Magnetic field sensing with a single mode fiber*. Opt. Lett., vol. 6, p. 19-21 (1981).
- [42] DAGENAIS (D.M.), BUCHOLTZ (F.) et KOO (K.P.). – *Heterodyne detection of magnetic fields in a magnetostrictive fiber sensor*. Proceedings of the 6th International Conference, OFS'89, p. 255, Paris (1989).
- [43] MAYSTRE (F.) et BERTHOLDS (A.). – *Magneto-optic current sensor using a helical fiber Fabry-Perot resonator*. Proceedings of the 6th International Conference, OFS'89, p. 267, Paris (1989).
- [44] STONE (J.) et MARCUSE (D.). – *Ultra high finesse fiber Fabry-Perot interferometers*. J. Lightwave Tech. LT-4, p. 382-385 (1986).
- [45] YU (M.H.) et HALL (D.B.). – *Fiber ring resonator*. Proc. SPIE 487, p. 122-126 (1984).
- [46] REN (Z.B.) et ROBERT (PH.). – *Input polarization coding in fiber current sensors*. Proceed. of the 6th Inter. Conf., OFS'89, p. 261, Paris (1989).
- [47] DAY (G.W.) et ETZEL (S.M.). – *Annealing of bend induced birefringence in fiber current sensors*. Technical digest, Int. Conf. on integrated optics and optical fiber commun., European Conf. Optical. Commun, Venice (1985).
- [48] DAY (G.W.). – *Compact sensors for the measurement of low level electric currents*. 4th Int. Conf. on optical fiber sensors, Tokyo (1986).
- [49] TAND (D.) et DAY (G.W.). – *Progress in the development of miniature optical fiber current sensors*. IEEE/Lasers and Electro-optics Society Annual Conf. Santa Clara CA (1988).
- [50] MESSERLY (M.J.), ONSTOTT (J.R.) et MIKKELSON (R.C.). – *Broadband single polarization optical fiber*. Optical Fiber Communication Conference, 1990 Technical Digest Series, volume 1, Conference Edition, San Francisco California, 22-26 janv. 1990.
- [51] LI (L.), QIAN (J.R.) et PAYNE (D.N.). – *Current sensors using highly birefringent bow-tie fibers*. Elect. Lett., vol. 22, n° 21, p. 1142-1144 (1986).
- [52] LAMING (R.I.) et PAYNE (D.N.). – *Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers*. J. of Light Techn., vol. 7, n° 12, p. 2084-2094, déc. 1989.
- [53] BIRCH (R.D.), PAYNE (D.N.) et VARNHAM (M.P.). – *Fabrication of polarisation maintaining fibers using gas phase etching*. Elect. Lett., n° 18, p. 1 036-1 038 (1982).
- [54] LAMING (R.I.), PAYNE (D.N.) et LI (L.). – *Current monitor using elliptical birefringent fiber and active temperature compensation*. Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., vol. 798, p. 283-287 (1987).
- [55] LAMING (R.I.), PAYNE (D.N.) et LI (L.). – *Compact optical fiber current monitor with passive temperature stabilization*. Proc. OFS (New Orleans, LA), p. 123-128 (1988).
- [56] JONES (R.C.). – *A new calculus for the treatment of optical systems*. J. Opt. Sci. Am., 31, 488 (1941).

On pourra consulter aussi :

- [57] DAY (G.W.) et ROSE (A.H.). – *Faraday effect sensors : the state of the art*. SPIE, vol. 985, Fiber optic and laser sensors VI, p. 138 (1988).
- [58] CULSHAW (B.) et DAKIN (J.). – *Optical fiber sensors, vol. 1 : principles and components*. Éd. Artech House, Norwood, Mass (1988) ; Vol. 2 : systems and applications (1989).
- [59] NASRALLAH (C.), BOUCHET (J.M.), NALIN (C.), CHAMPIOT (G.G.) et LE MEUR (R.). – *Capteurs à fibre optique*. Tomes I et II, étude CEA/EDF/Westinghouse/Framatome (1986).
- [60] DUPRAZ (J.P.). – *Capteurs interférométriques de courant à fibres optiques*. La technique moderne, p. 9, 17, juil.-août 1988.
- [61] ARDITTY (H.J.), DAKIN (J.P.) et KERSTEN (R. Th.). – *Optical fiber sensors*. Proceed of the 6th Inter. Conf., OFS'89, Paris, sept. 1989.
- [62] FROST et SULLIVAN. – *Fiber optic sensors*. Étude T.032 (Technology impact report).