# Capteur de courant à fibre optique

**Luc Thévenaz**, Dr ès sciences, Maître d'enseignement et de Recherche
**Fabien Briffod, Dario Alasia**, Ing. Dipl. EPFL, Doctorants

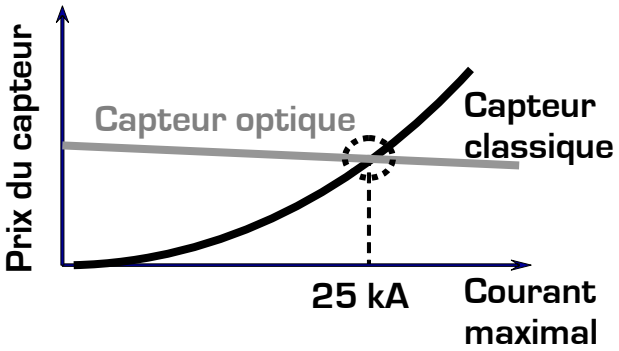
Laboratoire de Métrologie et de Photonique
Faculté des Sciences et Techniques de l'Ingénieur
**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**
1015 **Lausanne**

*Tél: 021 693 4774  Fax: 021 693 2614  Email: Luc.Thevenaz@EPFL.CH*

Le Laboratoire de Métrologie et Photonique de l'EPFL développe, depuis plusieurs années, des capteurs de courant à fibre optique destinés aux mesures de courant alternatifs à haut potentiel (dans les réseaux de distribution d'énergie) et aux mesures de courants électriques continus intenses (dans les usines produisant de l'aluminium ou du chlore par électrolyse). La fibre optique est un élément qui se prête particulièrement bien aux mesures de courant pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la fibre optique est parfaitement isolante ce qui permet de l'utiliser à haut potentiel en toute sécurité. De plus, l'absence de saturation permet de réaliser des capteurs ayant une plage dynamique très importante (mesure de courants jusqu'à 500kA aussi aisée que pour quelques 100 ampères) et ceci avec une bande passante supérieure au kilohertz. Les

capteurs de courant réalisés en fibre optique sont, en outre, insensibles aux champs magnétiques perturbateurs. Finalement, la petite taille de la fibre permet de réaliser des capteurs légers, peu encombrants et son installation peut s'effectuer sans interrompre le circuit électrique à mesurer.

Jusqu'à récemment, deux facteurs empêchaient le capteur de courant de s'imposer dans le terrain. Le premier est d'ordre technique et est lié aux perturbations aléatoires causées à la polarisation de la lumière se propageant dans une fibre optique. Grâce à une astuce développée dans notre laboratoire, ce problème a pu être maîtrisé et des performances comparables aux meilleurs capteurs classiques ont pu être atteintes. Le second facteur est d'ordre économique: l'optoélectronique est une technique encore onéreuse et le coût des composants est un handicap certain. Par contre, le prix du capteur optique est essentiellement indépendant du courant maximal à mesurer et aurait même plutôt tendance à décliner pour des courants croissants, la sensibilité du circuit de détection devenant moins critique, comme le montre le graphique ci-contre. Pour un capteur non-optique traditionnel à circuit magnétique, la taille du circuit magnétique croît fortement avec le courant maximal à mesurer, ce qui se répercute directement sur le coût. Il existe donc un "courant de compétitivité", qui représente la gamme de courant pour laquelle le coût des capteurs optiques et classiques est comparable. Aujourd'hui, ce courant de compétitivité se situe à 25 kA environ de manière conservatrice, mais va devenir rapidement inférieur à 10 kA avec les nouvelles configurations que nous développons en ce moment.

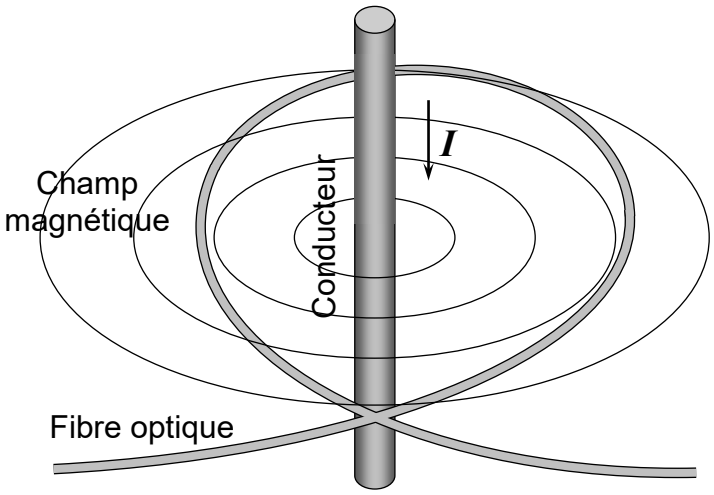



La mesure du courant électrique par la fibre optique se réalise par la mesure du champ magnétique créé par le courant circulant dans le conducteur. La fibre optique est sensible au champ magnétique par l'intermédiaire de l'effet Faraday, qui est une conséquence directe de l'effet Zeeman. Ce dernier modifie les propriétés électroniques des matériaux proportionnellement au champ magnétique appliqué, ce qui, en particulier, change la réponse optique du milieu. Ce changement se concrétise sous la forme d'une rotation de la polarisation de la lumière – la direction du champ électrique de l'onde optique tourne – d'une quantité proportionnelle au champ magnétique présent: c'est l'effet Faraday à proprement parler.

Plus spécifiquement, la rotation totale $\theta$ de la polarisation est égale à la rotation accumulée le long de la fibre optique, qui est due à la composante du champ magnétique $\vec{H}$ parallèle à l'axe de la fibre, ce qui s'écrit sous la forme suivante:

Angle de rotation de la polarisation: $\theta = V \int \vec{H} \bullet \vec{dl}$

où $\vec{dl}$ représente l'élément de longueur le long de la fibre, l'intégrale étant effectuée tout le long de la fibre, et $V$ est la constante de Verdet, qui est propre à un matériau donné et détermine sa sensibilité à l'effet Faraday.




Pour mesurer le courant, on utilise en fait une vieille connaissance des électriciens: le *théorème d'Ampère*. Celui-ci impose que la circulation du champ magnétique le long d'une boucle fermée est égale à la somme des courants électriques enfermés dans cette boucle. En entourant le conducteur avec la fibre optique de façon à former une boucle fermée, on constate que la rotation totale de la polarisation s'écrit alors:

$\theta = V \oint \vec{H} \bullet \vec{dl} = V \sum_{\text{boucle}} I_i$ où les $I_i$ représentent chaque courant enfermé dans la boucle. Donc on aboutit au résultat remarquable que la rotation totale de la polarisation de la lumière ne dépend que de l'intensité des courants enfermés dans la boucle de fibre optique, indépendamment de la forme de la boucle, de sa longueur et de son placement. De surcroît, tout conducteur placé à l'extérieur de la boucle n'aura aucune influence sur la mesure, ce qui assure une immunité totale aux perturbations extérieures.

Le même principe est appliqué par les capteurs basés sur une technique classique, utilisant un circuit magnétique formé de matériau ferromagnétique. La différence ici réside dans le fait que la magnétisation dans la fibre est de type diamagnétique, est donc linéaire par essence et ne présente ni de phénomène de saturation, ni d'hystérésis. Le capteur à fibre optique réalise la vraie intégrale de la circulation du champ magnétique et ne donne pas lieu aux problèmes de non-linéarité et de sensibilité aux non-homogénéités du champ observés dans les capteurs classiques. Cette propriété a pu être vérifiée en plaçant la fibre optique dans un champ magnétique très intense et inhomogène, sans courant électrique enfermé dans la boucle. La rotation de la polarisation est restée parfaitement nulle, prouvant la réalisation parfaite de l'intégrale et donc la grande immunité aux influences extérieures, ainsi que l'exactitude de la mesure en toutes circonstances.

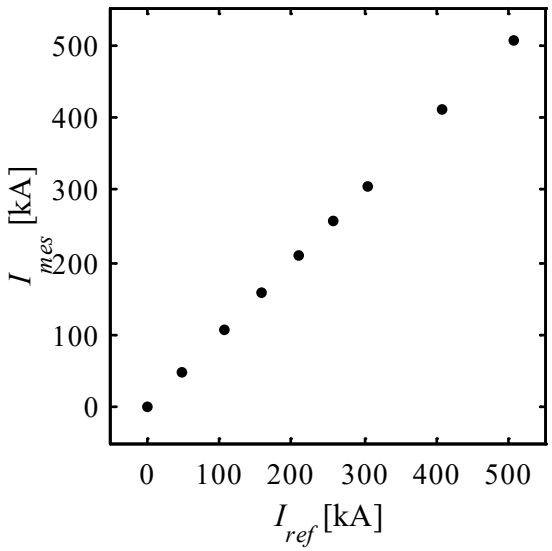
Si le principe de la mesure peut paraître simple – une simple mesure de l'angle de rotation de la polarisation -, sa réalisation pratique se heurte à deux difficultés principales, qui ont nécessité près de 20 ans de recherche pour aboutir à un capteur satisfaisant:

1. L'effet Faraday est très faible dans les fibres optiques. Ainsi, un courant de 100 A va provoquer dans des conditions normales une rotation de la polarisation de l'ordre de $10^{-4}$ radians ou 0,01°. Cela nécessite des techniques de détection très fines et va limiter les applications d'un tel capteur aux courants élevés, qui est de toute façon sa niche préférentielle.

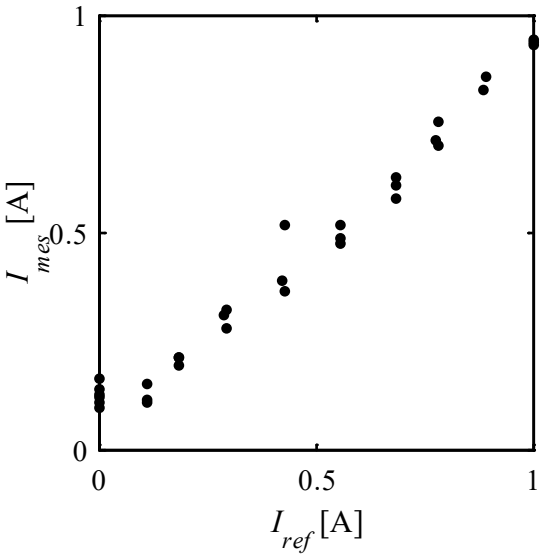
2. La fibre optique a, dans des conditions normales, un comportement préjudiciable sur la polarisation de la lumière, en la faisant évoluer de façon imprévisible. Ce n'est en général pas un problème pour l'acheminement d'informations dans les télécommunications, la polarisation n'étant pas utilisée comme support de modulation, mais cela va totalement brouiller l'information fournie par l'effet Faraday. Grâce à une préparation adéquate de la fibre optique, nous avons pu la rendre propre à maintenir la polarisation désirée pour notre mesure. Cette technique a permis la réalisation d'un capteur avec un câble optique de mesure souple, rendant possible une installation immédiate sur un site.

Un tel capteur a été testé dans différentes installations et a démontré ses grandes potentialités pour les installations de distribution d'énergie. Ainsi, il a pu mesurer des courants électriques sur 4 décades et supporter des chocs de potentiel excédant 270 kV, avec une bande passante supérieure au kHz.

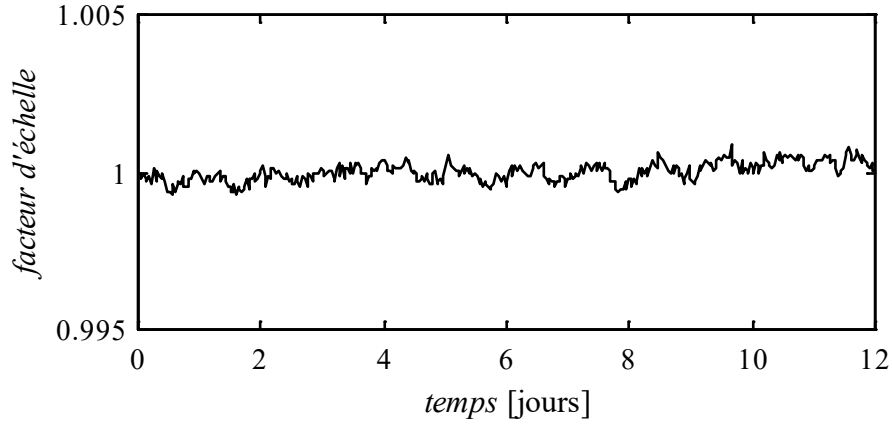
Mais ce capteur possède depuis peu le record de mesure directe d'un courant électrique (sans shunt, ni transformateur), en mesurant un courant de 500 kA, ce qui n'a jamais été réalisé en continu jusqu'à présent, à notre connaissance. On prend conscience du progrès réalisé en comparant la taille et le poids du capteur optique à celui d'un capteur classique nécessitant plusieurs tonnes de circuit magnétique. La mesure présentée ici a été réalisée sur les installations de la firme LEM SA à Plan-les-Ouates (GE). Elle montre le courant mesuré optiquement, en fonction du courant appliqué mesuré classiquement.

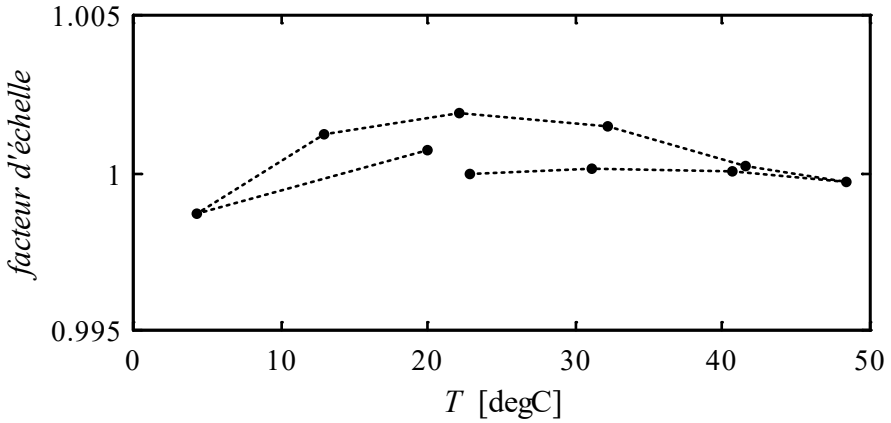


Il est aussi possible de mesurer de relativement faibles courants avec le même instrument. La sensibilité du capteur peut être augmentée en entourant plusieurs fois le même conducteur avec la fibre optique de mesure. Ainsi, des courants de 0,1 A ont pu être mesurés, à l'aide de 40 tours de fibres optiques autour du conducteur, comme le montre la figure ci-contre (le courant de référence est mesuré à l'aide d'un ampèremètre traditionnel). Par extension, un courant de 4 A peut donc être mesuré à l'aide d'une seule boucle, ce qui signifie que des courants de 4 A à 500 kA sont mesurables sans aucune modification de la configuration, soit sur plus de 5 décades.




La précision est évidemment un aspect essentiel d'un bon instrument de mesure. Pour les applications prévues, l'objectif est d'atteindre une précision meilleure que 0,5% sur une plage de température allant de -20°C à 80°C. Pour cela, 2 séries de mesure ont été effectuées: la première a été réalisée à température constante, mais sur plusieurs jours afin de tester la stabilité à long terme de l'étalonnage. Le courant a été varié sur toute la plage de mesure et a été comparé à la valeur donnée par un capteur classique de référence. La figure ci-dessous représente la variation du rapport des mesures des 2 capteurs en fonction du temps. On constate que les variations sur 12 jours demeurent inférieures à 0,1%, soit largement dans l'objectif défini. Par ailleurs, les variations de chaque point de mesure pris individuellement sont aussi inférieures à 0,1%.






La seconde série de mesures a été effectuée pour tester la stabilité thermique de l'instrument. Pour cela, le câble optique de mesure a été soumis à plusieurs cycles thermiques et la valeur du courant mesurée a été comparée à celle donnée par un instrument classique de référence. Il apparaît sur la figure ci-dessus que les variations observées demeurent confinées dans un intervalle de 0,2%, toutefois sur une plage réduite de température de 0 à 50°C imposée par notre installation. Si nous sommes confiants que le capteur va demeurer dans l'objectif fixé pour les hautes températures, nous restons cependant prudents pour conclure aussi favorablement sur les basses températures. En effet, nous avons observés que les polymères utilisés pour la protection des fibres optiques induisaient des contraintes préjudiciables en durcissant à basse température. Cet aspect est encore à l'étude.

Ce capteur de courant a pour l'instant surtout été testé sur des installations à basse tension et à courant continu élevé. En particulier, il a été placé sur une installation d'électrolyse de l'aluminium. Nous avons actuellement un projet en cours pour développer un système à installer dans une station de distribution à haute tension. Ce système utilisera une nouvelle configuration optique inventée dans notre laboratoire, qui cumulera les avantages d'être moins chère et moins sensible aux vibrations mécaniques, tout en maintenant les mêmes performances.

Au vu de ces résultats, il est possible aujourd'hui d'affirmer que les capteurs à fibre optique offrent une alternative crédible pour la surveillance des installations de distribution d'énergie. Une instrumentation d'une précision de 0,1% est même envisageable à relativement court terme. Du point de vue de l'exploitant, les avantages suivants d'une telle technologie sont particulièrement à retenir:

- Mesure non biaisée en raison de la physique des phénomènes mis en jeu (réalisation parfaite de l'intégrale du champ magnétique, linéarité et absence de saturation).

- La bande passante de mesure est de 3 à 4 ordres de grandeur supérieure à celle atteignable par les transformateurs classiques, ce qui permet d'envisager la détection de transitoires très rapides et d'événements liés à la foudre.

- L'élément capteur, en l'occurrence la fibre optique, est un isolant parfait, ce qui réduit à presque néant les besoins en isolation et les contraintes liées aux risques de pollution.
- L'absence de circuits inductifs permet de rendre l'installation *de facto* conforme aux nouvelles réglementations sur l'exposition aux champs électromagnétiques.

Ce projet est actuellement soutenu par la Fondation PSEL et TRENCH (Switzerland) AG, auxquels les auteurs tiennent à exprimer toute leur gratitude. Ils remercient également la maison LEM SA pour avoir mis à disposition leurs installations et prêté leur capteur pour la démonstration, ainsi que l'école d'ingénieurs HTA Burgdorf pour le soutien technique en électronique.