

COMPRENDRE

et apprécier le gyrofibre : le gyro aux performances ultimes ?

Hervé LEFÈVRE - iXblue, 34 rue de la croix de fer, 78100 Saint-Germain-en-Laye - herve.lefevre@ixblue.com

Introduction

Tirant pleinement avantage des technologies télécoms, le gyrofibre (souvent appelé FOG, l'acronyme anglo-saxon de *fiber-optic gyroscope*) a commencé à être étudié il y a 40 ans [1], ouvrant la voie à un gyro « *solid state* ». Plutôt vu au départ comme limité aux moyennes performances (stabilité de l'ordre du degré par heure), il atteint aujourd'hui largement la classe *stratégique* (meilleur que le millidegré par heure), surpassant son compétiteur, le gyrolaser, et il a le potentiel pour devenir le gyro *ultime*, approchant déjà en laboratoire la dizaine de microdegrés par heure en stabilité de zéro à long terme.

Ce papier va essayer de vous faire apprécier la façon étonnante dont le gyrofibre fonctionne, avec des solutions *parfaites* malgré les défauts des composants. C'est aussi l'opportunité de rappeler le contexte historique de l'expérience de Sagnac [2], le principe des gyros optiques.

À quoi sert un gyro ?

Des gyros (gyromètres ou gyroscopes en français, mais par contre uniquement *gyroscopes* en anglais), associés à des accéléromètres, permettent de connaître l'attitude et la trajectoire de mobiles de façon *complètement autonome*, sans aucune référence extérieure, ni possibilité de brouillage. Ces techniques, dites inertielles, utilisent l'information de vitesse de rotation, le vecteur Ω , donnée par trois gyros d'axes orthogonaux, et celle d'accélération \mathbf{a} et de pesanteur \mathbf{g} donnée par les trois accéléromètres pour retrouver l'attitude à partir de la verticale (l'axe de \mathbf{g}). Ces centrales d'attitude nécessitent des gyros de stabilité de zéro autour de 1 à 10 deg/h, la classe de performance dite *tactique*. Elles permettent aussi, de connaître sa direction par rapport au nord géographique (l'axe de la rotation de la Terre). C'est la fonction gyrocompas qui nécessite des gyros de 0,1 à 0,01 deg/h. Il est enfin possible, avec des composants d'encore plus haute performance, de restituer précisément la trajectoire par intégration (au sens mathématique) de ces rotations et accélérations. Ce sont les centrales de navigation inertielle qui nécessitent des gyros dits de classe *inertielle* (10 à 1 mdeg/h), pour assurer une dérive de position inférieure au nautique (ou mille marin, et correspondant à une minute d'arc terrestre, soit 1852 m) par heure. Avec des

gyros de classe *stratégique*, donc meilleurs que le mdeg/h, est atteinte une incertitude de position meilleure que le nautique par jour.

Les premiers gyroscopes ont été mécaniques et sont en fait des toupies extrêmement sophistiquées, mais qui restent d'une fiabilité limitée. Fondé sur le même effet Sagnac que le gyrofibre, le gyrolaser, dont l'étude a commencé dans les années 60, a apporté des progrès considérables et jouit aujourd'hui d'un quasi-monopole en navigation aérienne, tant civile que militaire. Avec, dans les années 70, l'avènement des fibres et des diodes laser pour les télécommunications, le gyrofibre a apporté la possibilité d'un gyro « *solid state* », avec tous les avantages associés de fiabilité et de longévité, sans les pièces mobiles des gyroscopes mécaniques, ni la décharge haute tension du plasma hélium-néon des gyrolasers.

Principe du gyrofibre : effet Sagnac, ou plutôt Sagnac-Laue, et réciprocité

Un gyrofibre utilise donc l'effet Sagnac dans une bobine de fibre optique. Cet effet s'explique très simplement en considérant la propagation dans un interféromètre en anneau sur un chemin circulaire dans le vide. Au repos, les deux chemins sont égaux et la lumière ressort en phase (*figure 1a*).

En rotation, et observé dans le référentiel fixe du laboratoire (*figure 1b*), la lame séparatrice M a le temps de se déplacer en M' pendant la propagation dans l'interféromètre. L'onde corotative parcourt donc *plus* d'un tour, et l'onde contrarotative *moins* d'un tour, et ce à la même vitesse c de la lumière

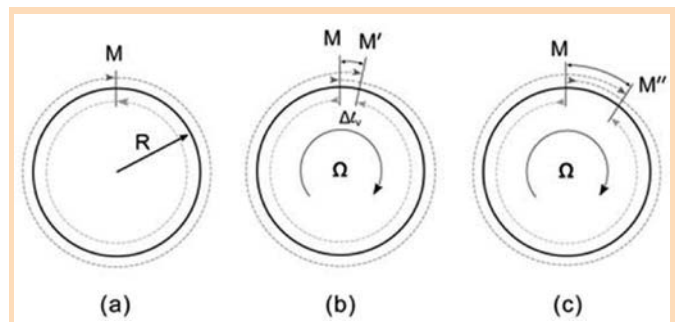


Figure 1. Explication cinématique de l'effet Sagnac.

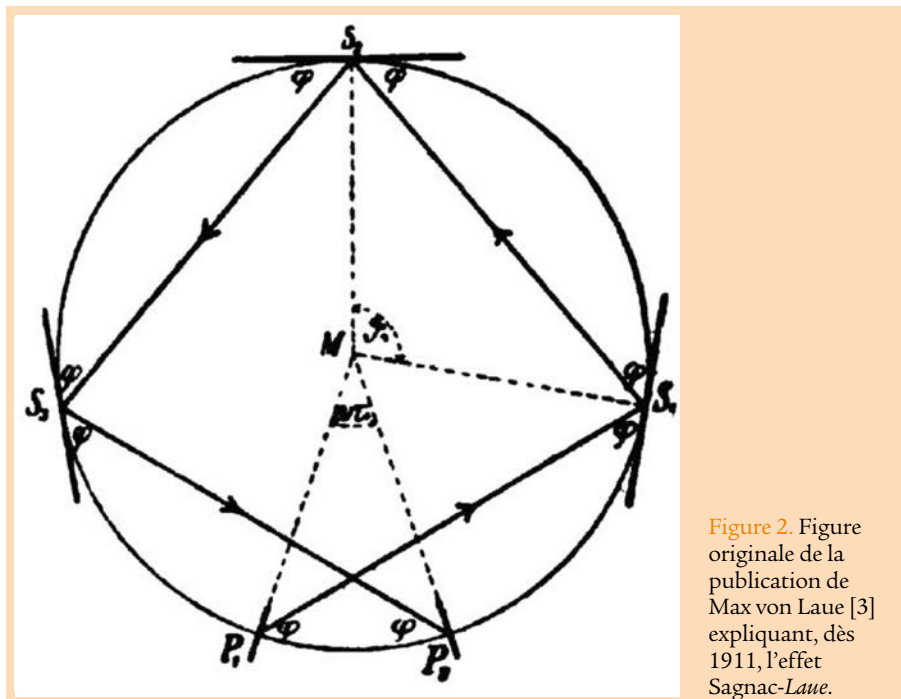


Figure 2. Figure originale de la publication de Max von Laue [3] expliquant, dès 1911, l'effet Sagnac-Lauve.

dans le vide: ceci crée une différence de phase $\Delta\Phi_R$ proportionnelle au produit scalaire du vecteur vitesse de rotation Ω par le vecteur aire \mathbf{A} de la surface définie par le chemin en anneau (λ étant la longueur d'onde):

$$\Delta\Phi_R = 8 \pi \mathbf{A} \cdot \Omega / \lambda c$$

Cette explication presque simpliste du cas du vide correspond cependant bien à la réalité physique. Elle n'a pas besoin de recourir à la Relativité; en effet, l'analyse se fait dans le référentiel *fixe* du laboratoire où la vitesse de la lumière est c avec, bien sûr, la Relativité, mais aussi avec la théorie de l'Ether lumineux. C'est d'ailleurs le titre de la publication originelle de Sagnac [2]. Cependant, celui-ci en tirait la conclusion que l'Ether existe, alors que la bonne analyse est de dire que cette expérience de l'interféromètre tournant ne permet pas de déterminer qui de la Relativité ou de l'Ether est juste. Ce n'est pas très connu, mais cette analyse a été faite par von Laue [3] dès 1911 (*figure 2*), soit deux ans avant l'expérience de Sagnac [2]. Au vu de la pertinence de cette publication, l'effet Sagnac se doit d'être renommé effet Sagnac-Lauve!

C'est dans le cas de la propagation dans un milieu matériel d'indice n (donc le cas de la fibre), que l'analyse devient plus complexe et relève là de la théorie de la Relativité. En effet, en regardant toujours l'effet dans le référentiel *fixe* du laboratoire, et les ondes se propageant à c/n et non plus à c , le séparateur va s'être déplacé plus loin, en M'' et non plus en M' , à la recombinaison des ondes (*figure 1c*). On pourrait en déduire que l'effet va être plus grand, mais ce serait oublier l'entraînement de Fresnel-Fizeau. La différence entre les deux chemins opposés a bien augmenté, mais les vitesses, vues dans le référentiel *fixe* du laboratoire, sont maintenant différentes. Le chemin corotatif, allongé par rapport au vide, est parcouru plus vite que c/n à cause de l'entraînement par la matière; et le chemin contrarotatif, raccourci, est quant à lui parcouru moins vite de par l'entraînement opposé. L'effet Sagnac-Lauve s'avère complètement indépendant de la matière.

Rappelons que l'entraînement de Fresnel-Fizeau est *relativiste*, étant en fait la loi de composition des vitesses en Relativité, comme analysé dès 1907, et avec toujours autant de pertinence, par von Laue [4]. L'effet Sagnac-Lauve dans la matière est donc lui aussi *relativiste*.

ScienTec
La Solution à vos mesures

Gamme complète d'appareils portables

Photométrie Colorimétrie Radiométrie

KONICA MINOLTA

Luxmètre T-10A
Précis & performant
Conforme aux normes JIS et DIN, Mesures multi-points...

Photomètre Chromamètre Luminancemètre CS-150 ou LS-150
Précis & rapide
Large plage de luminance...

REMISE EXCEPTIONNELLE DE 10%
Avec le code **PHOTONIQUES16***

Présente sur Forum LED
Les 8 et 9 Décembre 2016, à Lyon
Stand C1

Luxmètre IRC CL-70F
Efficace & performant
Sources lumineuses et LED,
Nombreux types de mesures...

Luxmètre Chromamètre CL-200A
Polyvalent & léger
Eclairage,
R&D et Production...

ScienTec c'est aussi...
Vidéocolorimètres
Photogoniomètres
Analyseurs d'écran
Sources de référence

*Offre valable jusqu'au 31/12/16
info@scientec.fr / www.scientec.fr
01.64.53.27.00

Maintenant, avec le seul tour de l'expérience de Sagnac, l'effet est très peu sensible, et il faut donc un système multi-tour. Dans le gyrolaser, ceci est obtenu par résonance dans une cavité laser hélium-néon en anneau, mais la fibre permet une approche interférométrique avec une bobine qui peut être de plusieurs kilomètres, de par la faible atténuation des fibres.

Même avec cette recirculation multi-tour, l'effet Sagnac-*Laue* reste faible, et l'obtention des performances théoriques n'a été rendue possible que grâce au principe fondamental de *la réciprocity de la propagation lumineuse*: les deux chemins opposés vont varier bien sûr (en particulier, d'environ $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ en thermique), mais d'exactement la même valeur.

Les meilleurs gyrofibras actuels atteignent largement la classe de performance stratégique. À titre d'exemple, la dernière centrale de navigation inertielle d'iXblue, la MARINS M7 (*photo 1*), a une spécification de positionnement meilleure que le nautique sur trois jours en inertiel pur. La spécification de dérive long terme de ses gyros est de l'ordre de $100 \mu\text{deg/h}$. Ramenée en différence de phase interférométrique, cela correspond à 10 nanoradians au bout de plusieurs km de bobine, soit une réciprocity relative de 10^{-19} . En laboratoire, $10 \mu\text{deg/h}$ (un tour en 4000 ans !) de stabilité sur un mois ont même été démontrés par iXblue [5] et par Honeywell [6], ce qui amène au nanoradian et à 10^{-20} !

Si la réciprocity a été essentielle au succès du gyrofibre, elle n'aurait cependant pas été suffisante, et les différents problèmes ont pu être résolus par des solutions si efficaces que le terme « *serendipity* » a été utilisé pour les décrire.



Photo 1. Centrale de navigation inertielle MARINS M7 d'iXblue ($500 \times 300 \times 344 \text{ mm}^3$).

Un condensé de technologies télécoms optiques et un traitement du signal étonnamment performant

Un fonctionnement réciproque, élément donc essentiel de la performance du gyrofibre, nécessite un mode unique et il faut donc utiliser une fibre monomode. Idéalement il faudrait aussi un guidage mono-polarisation, mais il a été montré très tôt qu'un polariseur sur l'entrée-sortie commune de l'interféromètre suffit [7], sachant que des fibres à conservation de polarisation permettent de relâcher la spécification de réjection de ce dernier.

Le premier point important à comprendre est que pour éviter plusieurs sources de dérive et de bruit, il faut une source à spectre large (c'est-à-dire de faible cohérence temporelle). Le déphasage Sagnac reste très bien contrasté, n'étant que de l'ordre de la frange, alors que les différentes ondes parasites, et en particulier la rétrodiffusion, perdent la cohérence avec l'onde signal. Les produits de moyenne performance utilisent des diodes superluminescentes à 850 ou 1300 nm, mais la technologie erbium des amplificateurs optiques télécom à 1550 nm s'est imposée pour la très haute performance avec les sources dites ASE, *amplified (by) stimulated emission) spontaneous emission*.

La fonction clef de séparation-recombinaison d'un interféromètre peut être effectuée avec des coupleurs à fibre, mais pour la haute performance leur est préféré un circuit optique intégré multi-fonction [8] en niobate de lithium (LiNbO_3). Cette séparation-recombinaison est alors faite très simplement avec une jonction Y, et la modulation de phase nécessaire au traitement du signal utilise les propriétés électro-optiques (effet Pockels) du niobate. Celui-ci apporte aussi l'avantage de permettre de réaliser un polariseur de très haute réjection avec la technique *d'échange protonique* qui conduit à un guide mono-polarisation.

Maintenant, la réponse brute d'un gyrofibre est la sinusoïde classique d'un interféromètre, donc non linéaire et liée à la puissance retour, avec tout ce que cela implique en termes d'instabilité, mais un traitement du signal tout numérique extrêmement performant apporte un potentiel de perfection étonnant au vu des défauts résiduels des composants optiques et électroniques. Il combine une modulation de mise au biais, une contre-réaction par rampe de phase numérique et une démodulation numérique *intrinsèquement sans dérive* [9]. L'ensemble procure une « *serendipity* », comparable à la réciprocity pour l'optique.

La démodulation numérique intrinsèquement sans dérive est essentielle, mais la performance vient aussi du fait que ce traitement utilise un modulateur de phase *réciproque*, qui applique donc *exactement* le même déphasage $\phi_m(t)$ sur les deux ondes opposées, mais une différence de phase $\Delta\phi_m(t)$ est cependant générée de par le retard τ de $5 \mu\text{s/km}$ dû à la propagation dans la bobine :

$$\Delta\phi_m(t) = \phi_m(t) - \phi_m(t-\tau)$$

Il n'est pas facile de faire apprécier en quelques lignes, ce que cette équation simple apporte, mais on peut résumer en décomposant cette modulation entre une modulation

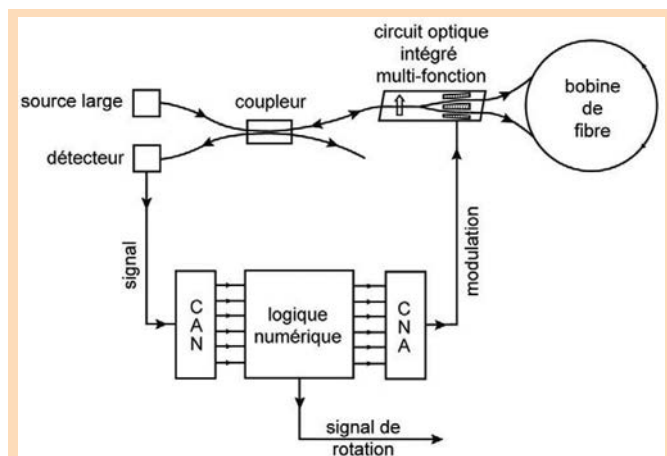


Figure 3. Architecture d'un gyrofibre.

parfaite et un défaut, et montrer que, selon la règle élémentaire que la moyenne d'une différence est égale à la différence des moyennes, le défaut généré sur le déphasage $\phi_m(t)$ étant identique pour les deux sens par réciprocity, le défaut sur la différence de phase $\Delta\phi_m(t)$ est en moyenne nul !

On peut aussi donner un exemple frappant en réalisant que la marche de poids le plus faible de la rampe numérique de contre-réaction est de l'ordre de la dizaine de deg/h quand la résolution finale descend à 10 μ deg/h, soit 10^6 fois moins.

La figure 3 résume l'architecture d'un gyrofibre avec :

- Une source à spectre large, un coupleur renvoyant le signal retour sur un détecteur, un circuit multi-fonction en niobate, et une bobine de fibre à conservation de polarisation dont l'aire équivalente est adaptée à l'application : du mètre carré pour les bobines très compactes des gyros moyennes performances (100 m sur quelques cm), à plusieurs centaines de mètres carrés pour les très hautes performances (plusieurs km sur une vingtaine de cm).
- Un convertisseur analogique-numérique (CAN) d'échantillonnage, un circuit logique numérique (généralement un FPGA) de traitement du signal et un convertisseur numérique-analogique (CNA) qui génère la commande électrique appliquée sur les modulateurs de phase.

Les grands acteurs du domaine

Avec les premiers produits proposés au début des années 90, la technologie gyrofibre a conquis un bon tiers du marché inertiel, le gyrolaser en conservant la moitié. Northrop-Grumman (avec sa filiale allemande NG Litel) domine largement le marché du gyrofibre avec un contrôle de 50 %, mais surtout sur les moyennes performances. Sa centrale LN 200 *tactique* (donc au deg/h) s'est vendue à 30 000 exemplaires [10]. Le leader incontesté de l'inertiel est Honeywell mais, archi-dominant en gyrolaser (75 % du marché), il ne propose le gyrofibre que pour les très hautes performances [6]. iXblue est aussi positionnée sur ce créneau « *high end* », avec 6000 centrales livrées, et ses succès en spatial (en collaboration avec Airbus Defense & Space) et en marine militaire confirment la performance de classe largement stratégique (100 μ deg/h) de la technologie.

Les autres acteurs sont plus concentrés sur les moyennes performances avec, en particulier, KVH [11] aux États-Unis, Fizoptika en Russie, et Sagem Navigation GmbH en Allemagne, où la technologie apporte alors ses avantages de coût et de fiabilité.

Remerciements

Ce papier est l'occasion de remercier tous mes collègues qui ont partagé ma fascination pour la « serendipity » du gyro-fibre, au LCR de Thomson-CSF et à l'université de Stanford dans les années 70-80, puis à Photonetics, iXsea, iXfiber, Photline, et maintenant iXblue.

RÉFÉRENCES

- [1] V. Vali et R.W. Shorthill, « Fiber Ring Interferometer », *Applied Optics* **15**, 1099-1100, 1976.
- [2] G. Sagnac, « L'éther lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme », *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* **95**, 708-710, 1913.
- [3] M. von Laue, « Über einen Versuch zur Optik des bewegten Körper », *Münchener Sitzungsberichte*, 405-411, 1911.
- [4] M. von Laue, « Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip », *Annalen der Physik* **328**, 989-990, 1907.
- [5] H.C. Lefèvre, « The fiber-optic gyroscope, a century after Sagnac's experiment: the ultimate rotation-sensing technology? », *Comptes Rendus Physique* **15**, 851-858, 2014.
- [6] G.A. Sanders et al., « Fiber Optic Gyro Development at Honeywell », *Proc. of SPIE* **9852**, 985207-1-14, 2016.
- [7] R. Ulrich, « Fiber-Optic Rotation Sensing with Low Drift », *Optics Letters* **5**, 173-175, 1980.
- [8] H.C. Lefèvre et al., « Progress in Optical Fiber Gyroscopes using Integrated Optics », *AGARD/NATO Conference*, CPP-383, 9A/1-13, 1985.
- [9] H.J. Arditty et al., « Fiber-Optic Gyroscope with All-Digital Processing », *Proceedings of OFS-6*, Springer-Verlag, *Proceedings in Physics* **44**, 131-136, 1989.
- [10] G.A. Pavlath, « Fiber Optic Gyro from Research to Production », *Proc. of SPIE* **9852**, 985205-1-7, 2016.
- [11] J. Napoli, « 20 years of KVH Fiber Optic Gyro Technology », *Proc. of SPIE* **9852**, 98520A-1-13, 2016.