

# International Conference on Space Optics—ICSO 1997

Toulouse, France

2–4 December 1997

*Edited by George Otrio*



## *Gyrofibre pour le spatial*

*Thierry Gaiffe, Yann Cottreau, Nicolas Faussot,  
Pascal Simonpietri, et al.*



icso proceedings



International Conference on Space Optics — ICSO 1997, edited by Georges Otrio, Proc. of SPIE Vol. 10570,  
1057018 · © 1997 ESA and CNES · CCC code: 0277-786X/18/\$18 · doi: 10.1117/12.2326483

## GYROFIBRE POUR LE SPATIAL

Thierry GAIFFE, Yann COTTREAU, Nicolas FAUSSOT,  
Pascal SIMONPIETRI et Hervé LEFEVRE.

*Photonetics, 52 avenue de l'Europe  
78160 Marly-le-Roi.*

**RESUME** - La technologie des gyromètres à fibre optique présente de nombreux avantages par rapport aux autres technologies existantes: architecture « état-solide », faible masse, insensibilité à la pesanteur, faible consommation et potentiel de coût réduit. Elle apparaît donc comme extrêmement prometteuse pour le spatial; d'autant plus que son bon comportement sous radiation devrait également lui permettre une durée de vie supérieure à 15 ans en orbite géostationnaire.

**ABSTRACT** - *Fiber optic gyroscope technology offers many advantages compared to other technologies: solid-state architecture, low mass, no-g sensitivity, low power and potential low cost. Furthermore, it has a good behaviour under radiation which would yield more than 15 years of lifetime in geostationary orbit.*

### 1 - INTRODUCTION

Bon nombre de missions spatiales, notamment en télécommunications et en télédiffusion, ainsi que certaines missions scientifiques, nécessitent des gyroscopes de faible masse, de faible consommation, de longue durée de vie, de performances moyennes et de coût modéré. Ces dispositifs, s'ils sont légers et économes en énergie, conviennent par excellence pour l'emploi de petits satellites. Les missions d'observation de la terre exigent souvent de bonnes performances. Dans certaines missions scientifiques et de télédétection, tout mouvement mécanique de la plate-forme est à proscrire. Si l'on parvient à réduire suffisamment le coût, au détriment éventuel des performances, ces gyroscopes peuvent également faire office de détecteurs d'une grande sécurité dans les modèles de secours, et ce dans la quasi-totalité des missions.

Les gyroscopes actuellement utilisés dans l'espace pour remplir ces diverses missions sont les gyroscopes mécaniques « classiques », constitués schématiquement d'une toupie animée d'un mouvement de rotation rapide. Ces gyroscopes ont démontrés depuis des années leurs performances mais aussi leurs faiblesses : fiabilité et durée de vie moyenne, sensibilité au champ de gravitation, pérennité d'approvisionnement non assurée du fait du remplacement progressif de ces gyros par des technologies plus modernes et plus performantes.

On peut citer comme exemple de ces technologies le gyrolaser, qui a commencé à avoir une véritable existence industrielle au tout début des années quatre-vingt. On peut dire que le gyrolaser est maintenant le constituant principal de quasiment toutes les centrales d'attitude ou de navigation de moyennes et de hautes performances en aéronautique. Il a permis de réaliser des centrales à composants liés (strapdown en anglais), parce qu'il réussissait pour la première fois à atteindre un excellent rapport dynamique sur précision, une grande bande passante et une très grande stabilité de facteur d'échelle. Malheureusement, pour détecter des vitesses de rotation faibles, le gyrolaser doit être mis en oscillation mécanique autour de son axe de sensibilité; cette activation n'est pas très gênante sur des systèmes déjà soumis à de fortes vibrations, dues par exemple aux moteurs, mais peut s'avérer plus polluante dans un satellite soumis au vide spatial. Le gyrolaser semble par contre être une bonne solution sur des lanceurs comme Ariane, qui est déjà équipée de deux centrales gyrolaser.

Cependant, une autre technologie, basée sur la même principe physique que la gyrolaser, est apparue en laboratoire quand le gyrolaser lui arrivait au stade industriel. Vingt ans après, cette technologie est mûre pour la production de masse. Cette technologie est celle du gyroscope à fibre optique ou gyrofibre.

Dés à présent, le gyrofibre équipe entre autres certaines automobiles japonaises (gyros Hitachi sous licence Photonetics) et les Boeing 777 (centrale de secours Honeywell). On peut dire que la majorité des grandes entreprises spécialisées dans la navigation par inertie parient sur le gyrofibre pour les moyennes performances, là où le gyrolaser est surdimensionné et où le gyro vibrant n'est pas encore capable d'aller (sans doute n'en sera t'il jamais capable).

Par rapport au besoin spécifique du spatial, le gyrofibre est a priori bien adapté, car il est par nature léger, sans pièce mobile et de faible consommation électrique. Ces atouts potentiels, alliés à une disponibilité grandissante en sortie des chaînes de production, en font donc un des candidats des plus sérieux pour remplacer la technologie finissante des gyroscopes mécaniques pour applications spatiales. Il fallait cependant vérifier le bon comportement du gyro sous radiation, ce que nous avons fait.

Après un rappel du principe de fonctionnement du gyroscope à fibre optique, nous présenterons deux exemples de performances typiques obtenues sur deux produits que nous fabriquons : un gyro trois-axes à  $0,1 \text{ }^\circ/\text{h}$  et un gyro mono-axe à  $0,01 \text{ }^\circ/\text{h}$ . Le trois-axes au dixième est pour l'instant utilisé pour des applications terrestres et marines, mais cadre complètement avec les besoins exprimé par le CNES pour les satellites scientifiques et de télécommunications; le mono-axe au centième est utilisé pour l'instant en artillerie, mais deux maquettes de ce type ont été réalisées pour l'ESA, de très faible consommation et capable de tenir en environnement radiatif jusqu'à des doses cumulées de plus de 150 krad. Cette démonstration de la tenue aux radiations sera explicitée plus précisément dans une troisième partie.

## 2 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le gyrofibre, comme le gyrolaser, est un capteur de rotation basé sur l'effet Sagnac [1]. Dans son expérience originelle de 1913, Georges Sagnac a tenté de démontrer l'existence d'un éther lumineux à l'aide d'un interféromètre en anneau, c'est à dire un interféromètre où les deux ondes provenant de la même source parcourent le même parcours géométrique fermé, mais en sens opposés (figure 1).

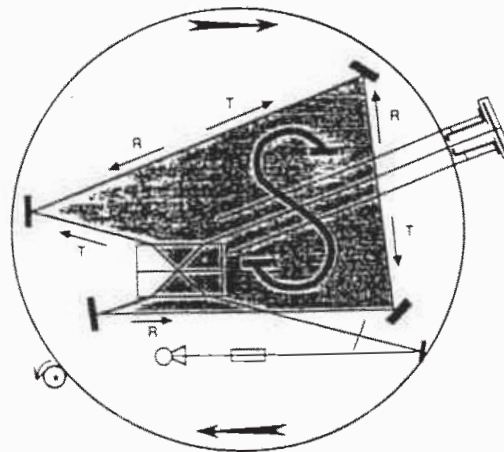


Figure 1 : interféromètre de Sagnac

Les deux ondes contrapropagatives se recombinaient et produisent des franges d'interférence dont la forme dépend de l'orientation des miroirs. Quand le système tourne, les franges se décalent, prouvant par la même qu'un déphasage supplémentaire est introduit entre les deux ondes. Sagnac croyait y voir la preuve de l'existence de l'éther lumineux au détriment de la théorie de la Relativité. En fait, l'effet Sagnac peut être décrit précisément par la théorie de la Relativité et est maintenant considéré comme un effet purement relativiste.

Sans rentrer dans les détails, on peut montrer que l'effet Sagnac est un pur retard, fondamentalement indépendant du milieu de propagation, et proportionnel au flux du vecteur rotation à travers la courbe fermée correspondant au chemin géométrique de la lumière. Cet effet ne fut en fait qu'une belle expérience de laboratoire pendant des années et il fallut attendre l'invention du laser dans les années soixante pour voir l'utilisation pratique de cet effet dans les gyrolasers, puis l'émergence de la fibre optique au début des années soixante-dix qui a permis la réalisation des premiers gyroscopes à fibre optique. La première expérience de laboratoire fut réalisée en 1976 par Vali et Shorthill [2].

Depuis en vingt années de recherches et développements, le gyrofibre est aujourd'hui arrivé à maturité et la configuration apte à l'obtention de bonnes performances est communément admise [3]. L'architecture optique, décrite sur la figure 2, est constituée:

- d'une source à forte cohérence spatiale et à faible cohérence temporelle. La forte cohérence spatiale assure un bon couplage de la lumière dans la fibre monomode, la faible cohérence temporelle la réduction de l'influence d'interférences parasites, de la rétrodiffusion et de l'effet Kerr. Cette source doit également être stabilisée en longueur d'onde pour assurer une bonne stabilité du facteur d'échelle.
- d'un filtrage monomode (spatialement et en polarisation) à l'entrée-sortie commune de l'interféromètre. Ce filtrage spatial est assuré à l'aide d'une fibre monomode en entrée du circuit optique intégré (COI) et le filtrage en polarisation par l'effet polarisant de ce COI.
- d'un COI qui permet en fait la contre réaction du fait de la grande bande passante de ses modulateurs de phase.
- d'une bobine de fibre à maintien de polarisation, ou de fibre monomode alliée à un dépolariseur.
- d'un bobinage quadrupolaire permettant la réduction de l'effet des transitoires thermiques.

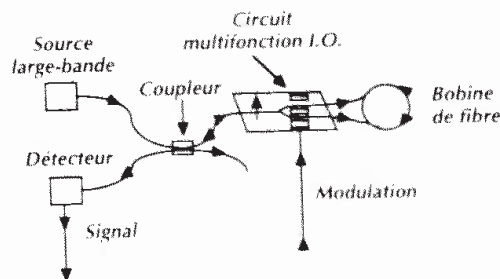


Figure 2: architecture optimale du cœur d'un gyroscope à fibre optique

Le traitement du signal utilisé pour les bonnes performances est lui aussi bien explicité:

- modulation dite de mise à biais permettant la détection des très faibles rotations et du signe de ces rotations.
- traitement en boucle fermée pour augmenter la dynamique et s'affranchir des fluctuations de puissance de la source.
- démodulation numérique, par nature non-génératrice d'erreur d'origine électronique.
- traitement tout numérique et rampe de phase numérique, permettant facilement une autocalibration du système et une donc une bonne stabilité de facteur d'échelle.

Nous réalisons sur la base de ces différents principes des gyrofibrés depuis près de dix ans. Nous avons actuellement deux produits phares : un gyrofibré trois-axes à  $0,1 \text{ }^\circ/\text{h}$ , réalisé à l'origine pour la navigation militaire terrestre et les gyrocompas marins, et un gyrofibré mono-axe à  $0,01 \text{ }^\circ/\text{h}$  réalisé pour les besoins de pointage de l'artillerie. Ce dernier gyro a été « amélioré » pour les besoins de l'Agence Spatiale Européenne de manière à ce que son coeur optique tiennent les radiations sur la durée de vie habituelle d'une mission en orbite géostationnaire.

### 3 - PERFORMANCES OBTENUES

#### 3.1 - Gyrofibré trois-axes de classe $0,1 \text{ }^\circ/\text{h}$

Sur ce système, une source unique vient se partager entre trois axes constitués de bobines de 500 m pour un diamètre moyen de 50 mm. Les ondes lumineuses provenant de chaque axe sont ensuite traitées séparément à l'aide de trois électroniques spécifiques. Cette configuration dite en partage de source permet de réduire le coût, la consommation et d'améliorer la compacité. Les résultats typiques obtenus sur ce gyro sont résumés sur le tableau I.

Ce gyro semble répondre au besoin exprimé par le CNES pour des applications scientifiques et de télécommunications. D'autant plus que le coeur optique, bénéficiant des travaux effectués pour l'ESA, est capable, comme on le verra plus loin, de tenir les radiations. Il reste cependant à « durcir » notre électronique pour qu'elle puisse tenir les radiations et à fiabiliser le produit pour le rendre conforme aux normes spatiales. A ce propos, nous bénéficions actuellement d'une étude du CNES pour qualifier la partie la plus délicate de notre procédure d'assemblage.

**Performances**

Biais long terme (plat de variance d'Allan)	0,02 °/h
Stabilité du biais en température	0,1 °/h
Bruit de marche aléatoire	0,005 °/Vh
Dynamique	± 1000 °/s
Stabilité du facteur d'échelle	50 ppm
linéarité du facteur d'échelle	10 ppm
Bande passante	10 kHz

**Environnement et caractéristiques**

Domaine de température	-40°C / +80°C
Alimentation	24 VDC
Consommation	5W
Dimensions	175 x 110 x110 mm
Masse	2 kg

**Tableau I : Performances du trois-axes de classe 0,1 °/h**

**3.1 - Gyro fibre mono-axe de classe 0,01 °/h**

Ce gyro de haute performance a une structure mono-axiale identique à celle du gyro trois-axes de performances plus moyennes décrit ci-dessus, seule la longueur de la bobine et son diamètre changent. Ceci permet une très forte synergie entre nos produits, ce qui réduit nos coûts de fabrication. Ce gyro est actuellement produit pour les besoins de pointage précis en artillerie, mais nous avons développé pour l'Agence Spatiale Européenne deux prototypes de même définition globale mais capable de tenir en radiations jusqu'à des doses cumulées de 150 krad.

Les performances de ce capteur sont décrites sur le tableau II.

L'ESA s'est intéressé à la classe 0.01 °/h de manière à pouvoir répondre à un maximum de missions, quitte à modifier le gyro de façon simple pour réaliser des versions peu coûteuses, moins performantes, pour les besoins de certaines missions. Cette adaptabilité est un des point forts de la technologie, puisqu'il suffit de modifier la taille de la bobine pour changer la performance dans la même proportion. L'enjeu principal de l'étude fut de concevoir un coeur optique apte à survivre en environnement radiatif spatial.

**Performances**

Biais long terme (plat de variance d'Allan)	0,003 °/h
Stabilité du biais en température	0,01 °/h
Bruit de marche aléatoire	0,001 °/Vh
Dynamique	± 1000 °/s
Stabilité du facteur d'échelle	20 ppm
linéarité du facteur d'échelle	5 ppm
Bande passante	10 kHz

**Environnement et caractéristiques**

Domaine de température	-40°C / +80°C
Alimentation	24 VDC
Consommation	3W
Dimensions	diamètre 120 mm x 28 mm
Masse	700 g

**Tableau II : Performances du mono-axe de classe 0,01 °/h**

**4 - TENUE AUX RADIATIONS**

La tenue aux radiations d'un gyrofibre est souvent à l'origine de polémiques, liées au sentiment général que les fibres ont un comportement très variables sous rayonnement ionisant. Il fallait donc réaliser rapidement au moins un prototype capable de garder ses performances après une exposition classique en orbite géostationnaire sur une durée de mission longue, c'est à dire une quinzaine d'années. Pour fixer les ordres de grandeur, cette dose est évaluée à 50 krad.

Les fibres sous irradiation voient leur atténuation augmenter, ce phénomène est lié à la création de centres colorés (voir par exemple [4]). L'atténuation induite est fonction de la longueur d'onde, du débit de dose, de la relaxation et des dopants. Pour ce qui est du premier paramètre, l'atténuation est en général d'autant plus faible que la longueur d'onde est grande.

Originellement, trois longueurs d'onde se sont imposées pour le gyroscope à fibre optique : 850 nm, 1300 nm et 1550 nm. Ces trois longueurs d'onde ont suivi l'évolution historique du développement des télécommunications par fibre optique. Pour la raison invoquée plus haut, un gyro spatial a plus de chance de tenir les radiations s'il fonctionne dans la plage du 1550 nm.

Il faut de plus choisir des fibres possédant les bons dopants, sachant que le comportement de la fibre peut être radicalement différent suivant le choix effectué: par exemple, du Germanium dans le coeur n'altère pas la tenue alors que la présence de Phosphore s'avère véritablement catastrophique [5].

Nous avons testé un certain nombre de fibres à maintien de polarisation, candidates à la réalisation d'un gyro de classe  $0.01^\circ/h$  dans un irradiateur au  $Co60$  diffusant quelques rads de rayon gamma par minute. Nous avons à l'issue sélectionné une fibre dont l'atténuation est de l'ordre de 1 dB/km pour une exposition de 50 krad, ce qui signifie une très faible dégradation du bruit de marche aléatoire en fin de vie.

Nous avons également irradié un circuit optique intégré, et vérifié que l'ensemble des paramètres le caractérisant restait inchangé après irradiation. D'autres éléments, comme les éléments de couplage optique (coupleurs, multiplexeurs, isolateurs, diodes laser...) ou des éléments opto-électroniques comme le photodétecteur ont eux aussi un excellent comportement sous radiation.

Le problème principal concernait en fait la source de lumière. Comme on a pu le préciser plus haut, cette source doit coupler suffisamment de lumière dans une fibre optique et posséder un spectre suffisamment large pour atteindre de faibles longueur de cohérence. S'il existe des sources semi-conducteurs puissantes à 850 nm possédant ces propriétés (Diodes Superluminescentes), l'équivalent bon marché à 1550 nm n'existe pas: les DSLs et les ELEDs à 1500 nm émettent en effet une relative faible puissance, qui se traduit *in fine* par un mauvais rapport signal sur bruit et qui déborde largement des spécifications spatiales.

On peut heureusement réaliser des sources de gyrofibras performants à 1550 nm. Ce sont les sources dites à fibre dopée erbium, qui ont suivi le développement des amplificateurs à fibre dopée erbium pour les besoins des télécommunications à fibre optique. L'idée est d'utiliser un amplificateur sans signal d'entrée: l'émission spontanée des ions erbium pompés optiquement à l'aide d'un laser semi-conducteur est alors amplifié par émission stimulée des ions voisins, on parle alors d'ASE pour Amplified Spontaneous Emission. Cette source est celle que nous utilisons sur tous nos gyros de moyennes et hautes performances.

Sous radiation, le problème principal est que l'erbium n'est pas un dopant idéal, que la longueur d'onde de pompage est par nature plus courte que la longueur d'onde d'émission et est donc plus fortement atténué, ce qui diminue le rendement de conversion et donc la puissance disponible en sortie.

Heureusement, deux effets contrecarrent l'atténuation induite: la relaxation et le photobleaching [6]. Ces deux effets sont des réactions chimiques inverses de celle induisant l'atténuation, le photobleaching diffère de la relaxation car il demande un photon dans une de ses étapes et ne pourra donc se produire qu'en présence de lumière incidente.

Nous avons en fait choisi une fibre dopée erbium possédant des codopants tels que pour des débits faibles comme ceux observés en spatial, ces deux effets compensent *en live* l'atténuation induite et permettent d'obtenir une source capable de fonctionner tout à fait correctement en fin de vie. Nous avons testé une telle source jusque 150 krad, la perte de puissance est alors de l'ordre de 10 dB, ce qui donne 3 à 4 dB pour 50 krad, et qui, de manière brute, ne dégrade que le bruit de marche aléatoire et ce d'un facteur 2. Pour encore améliorer les performances, nous faisons en fait fonctionner notre source à puissance constante à l'aide d'un asservissement. Nettement sous-utilisée en début de vie, la source dans cette configuration ne perd pas de puissance au bout d'une exposition typique de 50 krad.

Pour terminer, cette source est de plus stabilisée en longueur d'onde et fonctionne sans aucun élément Peltier de stabilisation thermique, ce qui améliore la fiabilité et la consommation globale.

Un gyro utilisant toutes les caractéristiques précédentes est actuellement en test de radiation dans les locaux de l'ESTEC.



## REMERCIEMENTS

Le développement de notre technologie gyrofibre est soutenu par la DGA ainsi que par l'ESA et le CNES pour les applications spatiales.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Sagnac, G., « 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, Vol. 95, 1913, pp. 708-710.
- [2] Vali, V. et Shorthill, R.W., « Fiber Ring Interferometer », Applied Optics, Vol. 15, 1976, pp. 1099-1100 (SPIE, MS 8, pp. 135-136).
- [3] Pour une revue résumée, voir par exemple :  

Lefèvre, H.C., "Fundamentals of the Interferometric Fiber-Optic Gyroscope", SPIE Proceedings, Vol. 2837, Fiber Optic Gyros : 20th Anniversary Conference, 1996.

Pour une analyse détaillée, voir par exemple :

Burns, W.K., editor, « Optical Fiber Rotation Sensing », 1993, Quantum Electronics.

Lefèvre, H., « The Fiber Optic Gyrocope », 1993, Artech House.
- [4] West, R.H., « A local View of Radiation Effects in Fiber Optics », Journal of Lighthwave Technology, Vol. 6, No. 2, Feb. 1988, pp 155-164.
- [5] Friebele, E.J., Gingerich, M.E., Long, K.J., « Radiation Damage of Optical Fiber Waveguides at long Wavelength », Applied Optics, Vol. 21, 1982, pp 547-553.
- [6] Friebele, E.J., Gingerich, M.E. in Proceedings, Fiber Optics in the Nuclear Environment Symposium, 25-27 Mar. 1980.