

Historique & panorama scientifique & industriel du domaine des Capteurs à Fibres Optiques

Pierre Ferdinand

pi.ferdinand@free.fr

Univ. de Cergy-Pontoise, ENSEA
le 25 mai 2016

Sommaire de la présentation

Petit historique des fondements de la photonique : d'où viennent les Capteurs à Fibres Optiques

Panorama des techniques des années 80, 90, 2000

Deux grandes familles de CFO (RCFO) : *distribués & répartis*

Applications des CFO en environnements difficiles : *SHM*

Marchés et acteurs

Acteurs du domaine (pays, tendances, sociétés ...)

Focus sur la Chine

Bilan et prospective

Les fondements de la photonique ...

Il y a 2000 ans : les romains découvrent les **fontaines lumineuses**

Il y a 1000 ans : Les avancées de la **civilisation Arabo-Musulmane**.

A. Boudrioua "La lumière à travers les siècles - Ibn al Haytham (Alhazen), fondateur de l'optique", CMOI, 16-20 nov. 2015, Lannion

1927 : Baird et Hansell travaillent sur un dispositif d'**imagerie TV par fibres**

1930 : Heinrich Lamm transmet l'image d'un filament par **assemblage de fibres de quartz**

1950 : Van Heel et Hopkins inventent le **fibroscope flexible**

1953 : Charles H. Townes crée le **Maser**

1958 : Arthur L. Schawlow y ajoute des miroirs : il invente le **Laser**

1960 : Theodore H. Maiman réalise le 1^{er} Laser (rubis) aux **Hughes Aircraft Labs**

1964 : Charles Kuen Kao (**Std Telecom Labs**), décrit un **système de communication longue distance** et faibles pertes grâce au laser & à la FO, et montre que la portée s'accroît avec une meilleure pureté de la silice ...

1964 : 1^{er} « **laser à fibre** » : **C.J. Koestler and E. Snitzer**

1970 : 1^{er} **fibre avec des pertes 'assez faibles'** (20 dB/km) pour les télécoms : **Robert Maurer, Peter Schultz et Donald Keck** de **Corning Glass Works**

1972 : **CNET** : **début des études sur les fibres**

1973 : 1^{er} **vrai Laser à fibre** : **J. Stone et C. Burrus**

1977 : 1^{er} **système téléphonique optique** à Chicago

1980 : En France, inauguration de la 1^{ère} **liaison optique entre les centraux téléphoniques** des Tuileries et Philippe-Auguste installée par la DGT

P. FERDINAND – Journée "Capteurs à Fibres Optiques" du Club Fibres optiques & Réseaux de la SFO, Cergy Pontoise - 25 mai 2016 – pi.ferdinand@free.fr

3

Petits résumé historique sur les CFO

Années 70 (fin) : 1^{ers} CFO (*dans la cave des labos ..., laser HeNe ...*) ... MCVD (Corning)

Années 80

- Les CFO, domaine à part entière (**1983** : OFS'1)
- **1985** : les 1^{ers} RCFO, le gyroscope « Capteur roi »
- 1^{ère} publication sur réseaux de Bragg (*sept 1989* : OFS'6)

Années 90

- **1990** : x 2 de l'activité CFO / 5 ans ; Thermomètres = 20 % des efforts
- 1^{ers} produits sur le marché (DTS ...)
- 1^{ère} démo « industrielle » des capteurs Bragg (**OFS'10** ; **1994**) par le CEA
- Les (R)CFO sortent des labos (demos de terrain)
- 90's : décennie des Réseaux de Bragg
- et de la « *Surveillance des Structures* » (SHM)

Années 2000

- **Avril 2001** : Crash du secteur des Télécoms ...
- Mais l'offre s'étoffe : de nouveaux produits (B-OTDR, OBR ...)
- De nouveaux concepts (Fibre à Cristaux Photoniques ...)
- De nouveaux besoins (Biomédical, sécurité, ...)

Années 2010 : OFS'22, 23, 24 ... **Intégration ↗ Asie ↗ Offre commerciale**
↗ **Utilisation accrue de ces nouveaux systèmes de mesure ?**

P. Ferdinand, *Capteurs à Fibres Optiques et Réseaux associés*, ISBN : 2-85206-781-1, Editions Tech. & Doc. LAVOISIER, Paris, Sept. 1992

P. Ferdinand, *La saga des Capteurs à Fibres Optiques depuis 35 ans*, Colloque 2013 du Club CMOI « Contrôles et Mesures Optiques pour l'Industrie » de la Société Française d'Optique, 18-21 nov. 2013, Orléans

4

P. FERDINAND – Journée "Capteurs à Fibres Optiques" du Club Fibres optiques & Réseaux de la SFO, Cergy Pontoise - 25 mai 2016 – pi.ferdinand@free.fr

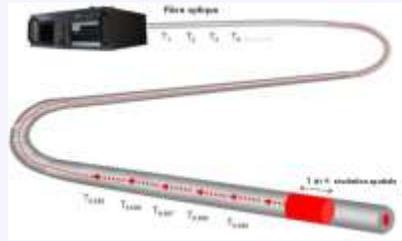
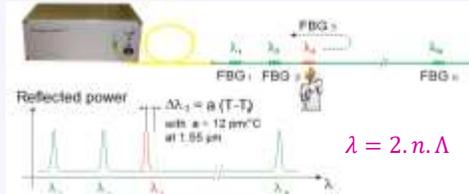
Deux grandes familles de CFO : Distribués vs répartis

• Distribués

- Principalement : **Réseaux de Bragg***
- Mesures : (*Temp., déformation, pression, indice, rotation, courbure, ...*)
- Quelques dizaines de transducteurs multiplexés par fibre
- Mesures rapides [DC ; >> kHz ... GHz]
- Perfs métrologiques** : **Résol < 0,1 pm ; Stabilité : 32 fm / 400 h (1 s)**

*G. Meltz, W. Morey, and W.H. Glen, Bragg-Grating Temperature and Strain Sensors, OFS'6, Paris, 1989 (1^{er} papier sur les réseaux de Bragg pour la mesure)

**P. Ferdinand et N. Roussel APOS 2013, et JNOG 2013 (Cf. réf. transparent suivant)

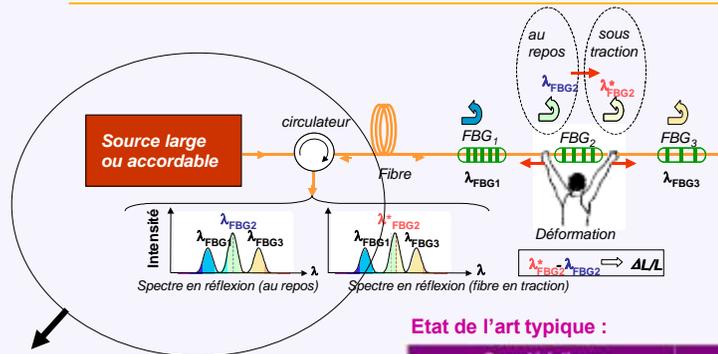


• Répartis : Raman***, Brillouin, Rayleigh

- Fondé sur la Réflectométrie (vs temps ou fréq.)
- Fournit un profil de paramètre d'influence (*T, ε, ...*)
- Très large multiplexage (> 10⁴ pt de mesure/fibre)
- Cadence de mesure « lente » (qq min, ... voire < sec)

*** C. V. Raman, A New Radiation, Indian Journal of Physics, 2, 387 (1928)

Ex. de système ultra-performant du CEA LIST + Etat de l'art des perfs



- Cadence : 1 kHz
- Plage spectrale : 50 nm
- Canaux : 6 voies en temps réel
- Résolution : < 0,1 pm (0,01°C)
- Stabilité : 32 fm / 400 h (1 s)

BraggFIT³



Module optoélectr. (19"-3U)
+ Laptop, Ethernet ou Wi-Fi

Etat de l'art typique :

Caractéristique	Bragg
Résolution spatiale	2-3 mm (étendue du réseau)
Portée, déport	> km (cf. pertes de la fibre)
Cadence de mesure	DC - GHz (trad. qq kHz)
Dynamique de mesure	30-50 dB
Résolution thermique	0,01°C (trad. 0,1°C)
Résol. en déformations	0,1 μm/m (trad. 1 μm/m)
Nombre de points de mesure	Plusieurs dizaines

N. Roussel, P. Ferdinand and L. Maurin, Long term stability of spectral measurement systems for Fiber Bragg Grating sensors, APOS2013, the 4th Asia-Pacific Optical Sensors Conf., Wuhan, China, 15-18th Oct. 2013. In *Proceedings of SPIE*, 8924, 89243E. [DOI:10.1117/12.2033932](https://doi.org/10.1117/12.2033932)

N. Roussel et P. Ferdinand, De la stabilité long terme des systèmes de mesure spectrale pour capteurs à réseaux de Bragg, JNOG'33, 33^{èmes} Journées d'Optique Guidée, Villetaneuse, 8-10 juillet 2013

Capteurs répartis, procédés mis en œuvre : OTDR, OFDR ...

⇒ Fibre = capteur intrinsèque réparti > 10 000 points de mesure sur une seule fibre

✦ **OTDR** (*Optical Time-Domain Reflectometry*) : portée de dizaines de km

- **DTS** (*Distributed Temperature Sensor*) **Raman*** : Ratio Anti-Stokes/Stokes ne dépendant que de T(°C) Mesure d'intensité normalisée - Résolutions ~ 1 m, 0,1 °C, minutes.

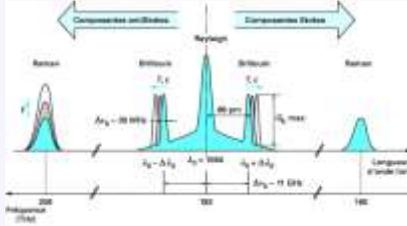
* C. V. Raman, *A New Radiation*, Indian Journal of Physics, 2, 387 (1928)

A. H. Hartog and A.P. Leach, *Distributed temperature sensing in solid-core fibers*, Elect. Lett., 21, no 23, pp. 1061-1062 (1985).

J. Dakin, and D.J. Pratt, *Temperature distribution measurement using Raman ratio thermometry*, SPIE, 566, Fiber Optic & Laser Sensor III (1985)

- **BOTDR(R ... ou A) (Brillouin)** : Décalage Brillouin dépendant de la T°C et des déformations

Mesure spectrale - Résolutions ~ 1 m, 1°C, 20 µm/m ; Cadence : minutes à secondes



M. Nikles, L. Thévenaz, et P.A. Robert, *Simple Distributed Temperature Sensor based on Brillouin Gain Spectrum Analysis*, 10th Optical Fiber Sensors Conference (OFS10), Glasgow, pp. 138-141 (1994). Référencé comme Proceeding SPIE, 2360.

P. Ferdinand, *Réseaux de capteurs à fibres optiques, Mesures et multiplexage*, Techniques de l'Ingénieur, R 460v2, mars 2008
P. Ferdinand, *Réseaux de capteurs à fibres optiques, Applications*, Techniques de l'Ingénieur, R 461, sept. 2008

✦ **OFDR** (*Optical Frequency-Domain Reflectometry*)

- Diffusion **Rayleigh** en interférence avec l'onde de réf. d'un laser continu accordable
- Interférogrammes enregistrés pour les deux EdP
- TF⁻¹ pour déduire la distribution Rayleigh le long de la fibre
- Mesure du décalage spatial de ce profil Rayleigh (*signature de la fibre*) par d'autocorrélation.
Résolutions : 1 cm, 0,1 °C, 1 µm/m ; Cadence ~ minute ; Portée : 70 m ...

M. Froggatt and J. Moore, *High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter*, *Applied Optics*, Vol. 37, Issue 10, pp. 1735-1740 (1998)

P. FERDINAND – Journée "Capteurs à Fibres Optiques" du Club Fibres optiques & Réseaux de la SFO, Cergy Pontoise - 25 mai 2016 – pi.ferdinand@free.fr

7

Bilan de ces deux grandes familles de (R)CFO

- Capteurs **distribués (multi-ponctuels)**
 - Majoritairement : les capteurs **réseaux de Bragg**
 - Mesures variées (**Temp., Pression, déf., inclinaison, indice, courbure ...**)
 - Plusieurs dizaines multiplexés sur une même fibre
 - Cadence de mesure très rapide (kHz et +)
 - Performances métrologiques !
- Capteurs **répartis (continus)**
 - Fondés sur la réflectométrie (temp. ou fréq.)
 - Fournissent un profil du/des paramètre(s)
 - Très grand nombre de « points de mesure » (> 10⁴)
 - Cadence « lente » en général (min, sec)

Caractéristique	OTDR Rayleigh	DTS Raman	BOTDR / A Brillouin	OFDR Rayleigh
Résolution spatiale	50 cm (v-OTDR 10 cm)	1 m	50 cm à quelques cm (R&D)	1 cm
Portée, départ	> 50 km (résol. moindre)	10-30 km ... 50 (mono)	30 km typ., 80 km bientôt	70 m (2 km option)
Cadence de mesure	min. (v-OTDR 1 sec)	1 à qlq. min	(10 Hz) ; 2-3 s ... 10 min	6,5 s ... min
Dynamique de mesure	30-50 dB	20 à 30 dB	10-20 dB	20 dB
Résolution thermique	-	0,1°C à 2 σ (moy. 1 h)	1°C à 2 σ (moy. qq min)	0,1°C
Résol. en déformations	-	Sans objet	+/- 10 µm/m (+/- 10 ⁻⁵)	1 µm/m (10 ⁻⁶)
Repérage casse de fibre	50 cm (10 cm)	1 m	1 m	100 µm (Fresnel)

1989 : 1^{er} papier sur les réseaux de Bragg pour les capteurs : G. Meltz, W. Morey and W.H. Glen, *Bragg-Grating Temperature and Strain Sensors*, OFS'6, 18-20 sept. 1989, Paris. Springer Proc, in Physics 44. ISBN 3-540-51719-7

1888 : Hertz : les ondes EM se réfléchissent sur les surfaces métalliques. Début XX^e Marconi : développe les antennes
1904 : Ch. Hülsmeyer « *Telemobiloskop* » (Reichspatent Nr 165546) : Les fondements théoriques du Radar

P. FERDINAND – Journée "Capteurs à Fibres Optiques" du Club Fibres optiques & Réseaux de la SFO, Cergy Pontoise - 25 mai 2016 – pi.ferdinand@free.fr

8

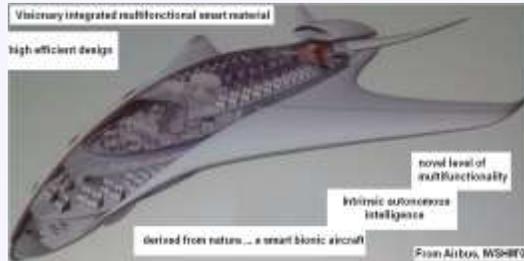
Ex. d'aspect transverse de la technologie : marchés & tendances en Surveillance des Structures & matériaux (SHM)

De nombreux secteurs industriels concernés



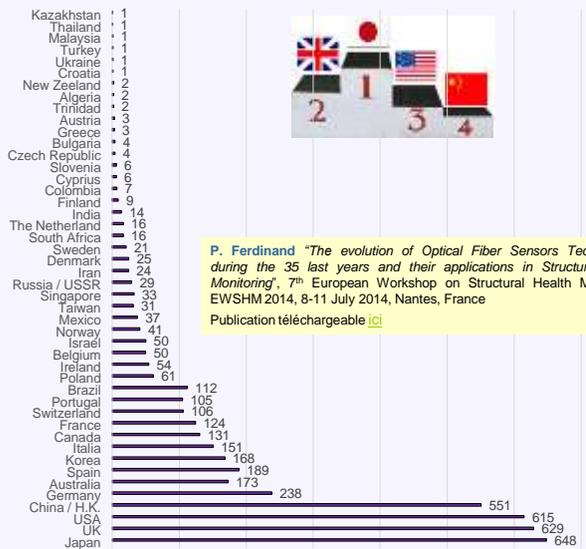
L'avion du futur .. Vision d'Airbus... "l'avion idéal"

- Voilure à géométrie variable
- Pilotage automatique et auto-surveillance
- Conception multifonctionnelle intégrée
- Moteurs non audibles
- Faible consommation de carburant
- Poids faible vs charge utile : utilisation massive de composites
- SHM pour réduire les coûts de maintenance, et accroître la disponibilité



Publications à OFS : Statistiques et tendances

[1983 (OFS1) - 2015 (OFS24)] : 4497 publiés ; 46 pays



P. Ferdinand "The evolution of Optical Fiber Sensors Technologies during the 35 last years and their applications in Structural Health Monitoring", 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, EWSHM 2014, 8-11 July 2014, Nantes, France
Publication téléchargeable [ici](#)

Classement	Nb.	%
1 Japon	648	14,4%
2 Royaume-Uni	619	14,0%
3 USA	615	13,7%
4 Chine / H.K.	551	12,2%
5 Allemagne	338	7,5%
6 Australie	173	3,8%
7 Espagne	169	3,7%
8 Corée du Sud	168	3,7%
9 Italie	151	3,3%
10 Canada	131	2,9%
11 France	124	2,8%
12 Suisse	106	2,4%

Tendances

UK: →

USA: →

Japon: →

Chine: ↗

Les pays les plus récemment impliqués = les plus dynamiques

L'irrésistible montée en puissance Chinoise

光纤传感器在中国的研发与应用

2 lectures recommandées (pour déprimer) :

P. Ferdinand, et al, *Les CFO en Chine*, JNOG2014, 29-31 oct. 2014, Nice

P.-O. Rouaud, *Pourquoi les industriels innovent en Chine ?*, L'Usine Nouvelle n° 3304, 25-31 oct. 2012



P. FERDINAND – Journée "Capteurs à Fibres Optiques" du Club Fibres optiques & Réseaux de la SFO, Cergy Pontoise - 25 mai 2016 – pi.ferdinand@free.fr

11

Bilan & conclusion (1/2)

Aspects « économiques » et « géopolitiques »

- En 40 ans, le monde a changé : passé d'états providences (occident) pilotant la R&D et l'industrie, à un monde dérégulé, de plus en plus libéral et multipolaire,
- Apparition de nouveaux acteurs : des PME, mais aussi de Pays (46 à ce jour publiés à OFS : JP, UK, USA, Chine (4^{ème}) sera en tête vers 2020).
- Les autres pôles se font rattraper (USA, Eu). Même si certains résistent (UK, Ge), d'autres font du sur place, voire (France) régressent (du 5^{ème} au 11^{ème} rang).
- Conséquence des crises en occident, la différence de fonctionnement avec l'Asie devient criante ... et le manque de relais de croissance inquiétant.
- Le déplacement du centre de gravité vers l'Asie est déjà irréversible

Aspects « technologiques »

- En 40 ans, de nombreux outils sont apparus :
 - Electronique : PC, logiciels d'acquisition / pilotage, traitement du signal ...
 - Opto : diodes lasers, fibres monomodes, HB, coupleurs, FCP, réseaux de Bragg, détecteur fibrés, modulateurs, amplis à fibre, compensateurs de dispersion, etc.
 - Equipements : nouveaux lasers, cliveuses, soudeuses, OTDR, re-gaineuses, ...
- Comme conséquence des investissements massifs (années 70-80) en R&D des états régaliens puis de la demande : Montée en puissance des Télécoms (2001-2008 : « petit » accident de parcours)
- CFO : après la décennie 80 dédiée aux pionniers, une sélection des techniques s'est opérée
- A ce jour, plusieurs technos de RCFO dominent : Bragg (distribuées), Raman, Brillouin, Rayleigh (réparties).
- Certains produits sont depuis longtemps une réalité (ex. Le Gyro, etc.), d'autres en R&D ...
- De nouveaux concepts et certaines ruptures technologiques apparaissent (FCP, OFDR ...)

P. FERDINAND – Journée "Capteurs à Fibres Optiques" du Club Fibres optiques & Réseaux de la SFO, Cergy Pontoise - 25 mai 2016 – pi.ferdinand@free.fr

12

Bilan & conclusion (2/2)

Aspects « Applicatifs » ; Marchés

Offre :

- Immunité EM et à la foudre, résistance à la fatigue, à la corrosion,
- Faible intrusivité (*légèreté, miniaturisation, insertion dans les matériaux, e.g. composites*)
- Mesure multiparamétrique, parfois absolue (*signature spectrale*), déport à grandes distances
- Utilisation industrielle en environnements difficiles (fiabilité, passivité)
- Multiplexage en réseaux de capteurs (*TDM, WDM ...*)
- Fonctionnalité parfois sans égal avec les autres technos (*e.g. CFO répartis*)
- De plus en plus de produits disponibles

Demande :

- Les besoins sont réels pour de nombreux secteurs (ex. la surveillance, la sécurité, la santé ...)
- ⇒ *Surveillance des structures, transports, GC, énergie (pétrole), contrôles de procédés, sécurité/défense*

- De nombreuses démonstrations industrielles ont lieu de part le monde
- Pour trouver de l'argent, les chercheurs doivent aller vers les utilisateurs, devenir plus 'commerciaux'

- CFO longtemps commercialisés sur des marchés de « niche », .. *Mais cela change ...*
- Marché des CFO de nouveau en croissance depuis 10 ans (*surtout mesures réparties*),
- ⇒ *Diffusion progressive et multisectorielle de la métrologie optique dans l'industrie*



*Merci
pour
votre
attention*