

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

**Pierre Ferdinand**

[pi.ferdinand@free.fr](mailto: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. Schalow y ajoute des miroirs : il invente le **Laser**

**1960** : Theodore H. Maiman réalise le 1<sup>er</sup> 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<sup>er</sup> « **laser à fibre** » : **C.J. Koestler and E. Snitzer**

**1970** : 1<sup>er</sup> **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<sup>er</sup> **vrai Laser à fibre** : **J. Stone et C. Burrus**

**1977** : 1<sup>er</sup> **système téléphonique optique** à Chicago

**1980** : En France, inauguration de la 1<sup>ère</sup> **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](mailto:pi.ferdinand@free.fr)

3

## Petits résumé historique sur les CFO

**Années 70 (fin)** : 1<sup>ers</sup> CFO (*dans la cave des labos ..., laser HeNe ...*) ... MCVD (Corning)

### Années 80

- Les CFO, domaine à part entière (**1983** : OFS'1)
- **1985** : les 1<sup>ers</sup> RCFO, le gyroscope « Capteur roi »
- 1<sup>ère</sup> 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<sup>ers</sup> produits sur le marché (DTS ...)
- 1<sup>ère</sup> 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](mailto:pi.ferdinand@free.fr)

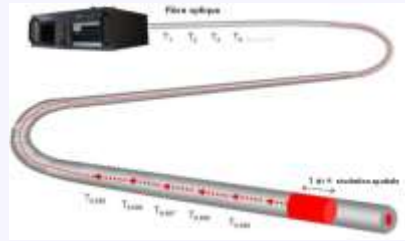
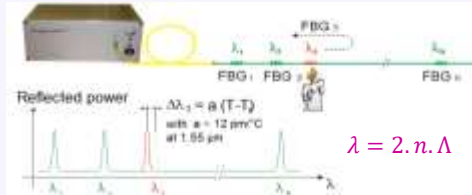
## Deux grandes familles de CFO : Distribués vs répartis

### • 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<sup>er</sup> 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

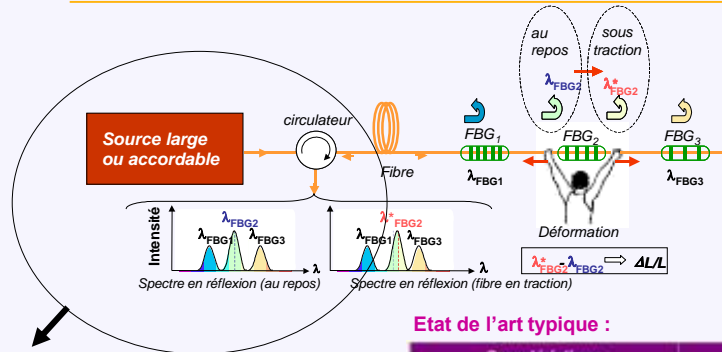
- Fondé sur la Réflectométrie (vs temps ou fréq.)
- Fournit un profil de paramètre d'influence (*T, ε, ...*)
- Très large multiplexage (> 10<sup>4</sup> pt de mesure/fibre)
- Cadence de mesure « lente » (qq min, ... voire < sec)

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

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

5

## 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 σ)

**BraggFIT<sup>3</sup>**



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 4<sup>th</sup> Asia-Pacific Optical Sensors Conf., Wuhan, China, 15-18<sup>th</sup> 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<sup>èmes</sup> Journées d'Optique Guidée, Villetaneuse, 8-10 juillet 2013

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

6

## 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.

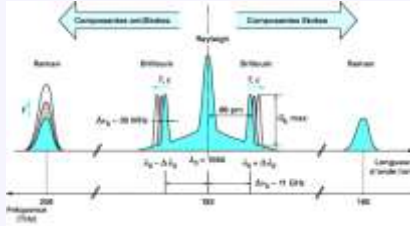
\* C. V. Raman, *A New Radiation*, Indian Journal of Physics, 2, 387 (1928)

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*, 10<sup>th</sup> 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<sup>-1</sup> 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](mailto: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 » (> 10<sup>4</sup>)
  - 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 <sup>-5</sup> )	1 µm/m (10 <sup>-6</sup> )
Repérage casse de fibre	50 cm (10 cm)	1 m	1 m	100 µm (Fresnel)

1989 : 1<sup>er</sup> 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<sup>e</sup> 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](mailto: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



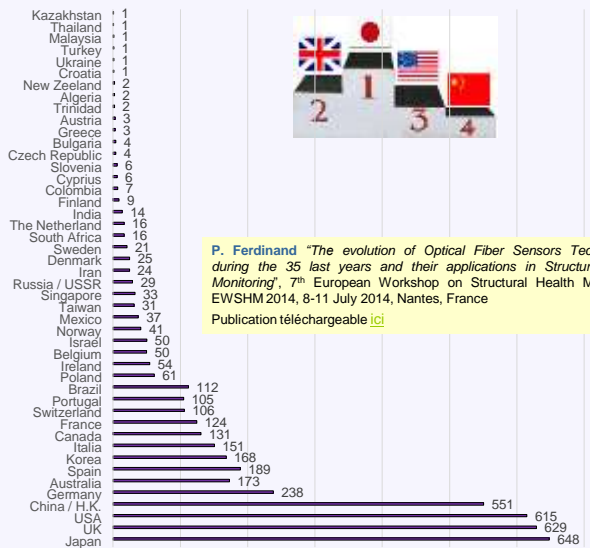
### L'avion du futur .. Vision d'Airbus... "l'avion idéal"

- 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", 7<sup>th</sup> 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	238	5,3%
6 Australie	173	3,8%
7 Espagne	168	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



## 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<sup>ème</sup>) 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<sup>ème</sup> au 11<sup>ème</sup> 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 ...)

## 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*