



---

# La technologie des **C**apteurs à **F**ibres **O**ptiques à réseaux de Bragg

*Principes et applications,  
mais aussi ... les capteurs distribués*

Laboratoire de Mesures Optiques  
CEA LIST Centre de Saclay  
91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Pierre Ferdinand  
01 69 08 83 39

[pierre.ferdinand@cea.fr](mailto:pierre.ferdinand@cea.fr)





La fibre

## Avantages :

- Faible intrusivité, souplesse
- Insensibilité EM,
- Faible pertes
- Bonne tenue en environnements sévères

La mesure

- Excellentes performances
- Multi-paramètres
- N capteurs par fibre



## Secteurs concernés :

- Mesure, métrologie,
- Contrôle de *process*,
- Surveillance des structures, des matériaux, etc.

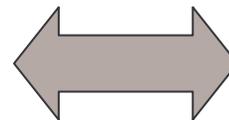
# La philosophie des capteurs répartis et distribués



- Une seule fibre optique remplace de nombreux capteurs



Instrument



Contrôle à distance

# Deux grandes familles de Capteurs à Fibres Optiques

---



- **Capteurs distribués** (*ponctuels*)
  - Capteurs **réseaux de Bragg** multiplexés sur la même fibre
  - nombreux types de mesures (T, P, déf, inclinaison ...),
  - une dizaine de capteurs par fibre
  - performances métrologiques (résolution < 1 °C, 1 µm/m ..)
- **Capteurs répartis** (*continus*)
  - fondés sur la réflectométrie (OTDR)
  - fournissent un nombre quasi illimité de points de mesure
  - mesure de température : **effet Raman** (DTS)
  - mesure de température et déformations : **effet Brillouin**

## Deux types d'instruments

### 1/ Les mesures réparties = continûment sensibles



Réflectométrie

Raman (DTS) : température Résolution : 1°C

Brillouin (B-OTDR) : temp./ déf. Résolution : 20 µε



une mesure tous les mètres

### 2/ Les mesures distribuées = locales



Réseaux de Bragg : temp. déformation, pression, force, ...

Résolutions : 0,1°C ; 1 µε ...



N capteurs à réseaux de Bragg



Capteurs distribuées à réseaux de Bragg



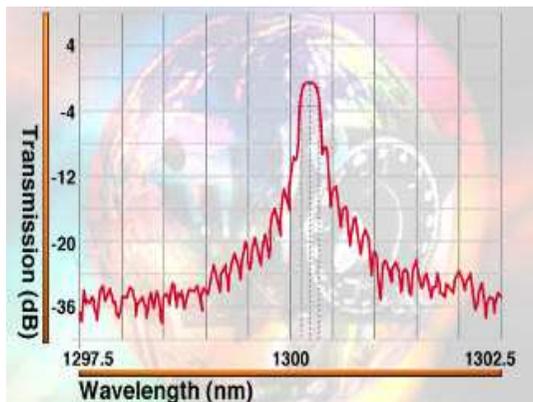
Fournissent des mesures  
'ponctuelles'



**Photosensibilité** des fibres optiques  
dopées au Ge

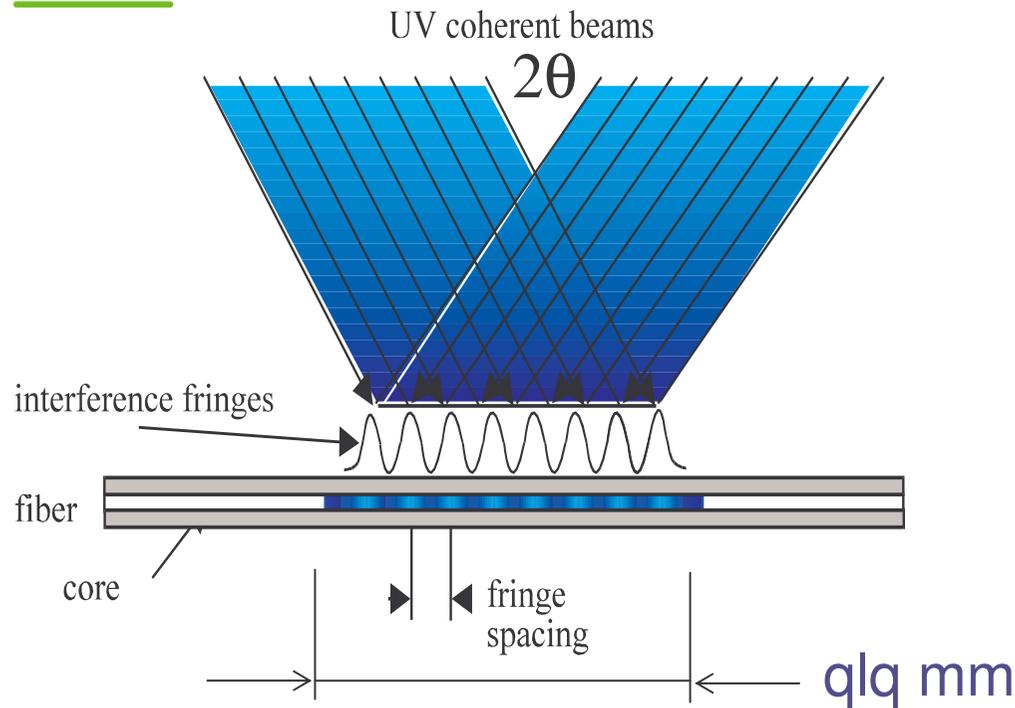


**Perturbation** locale et **périodique de l'indice** de  
réfraction du cœur de la fibre

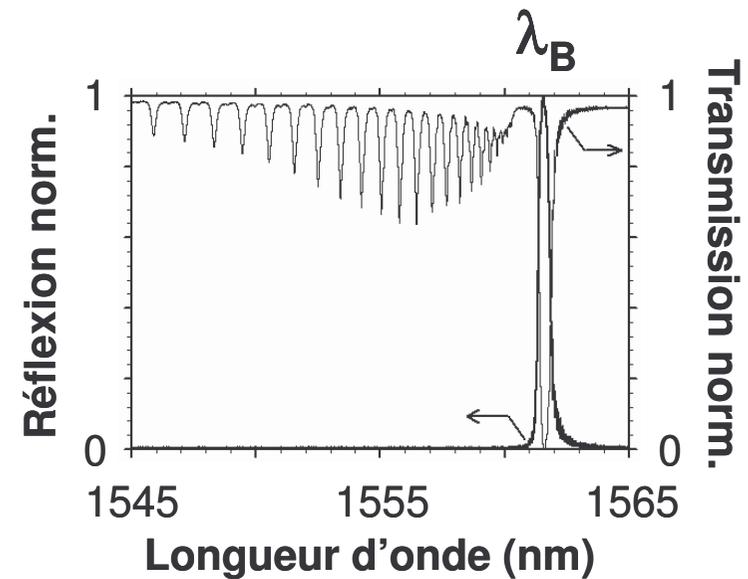


Filtre spectralement sélectif utilisé comme  
**transducteur**

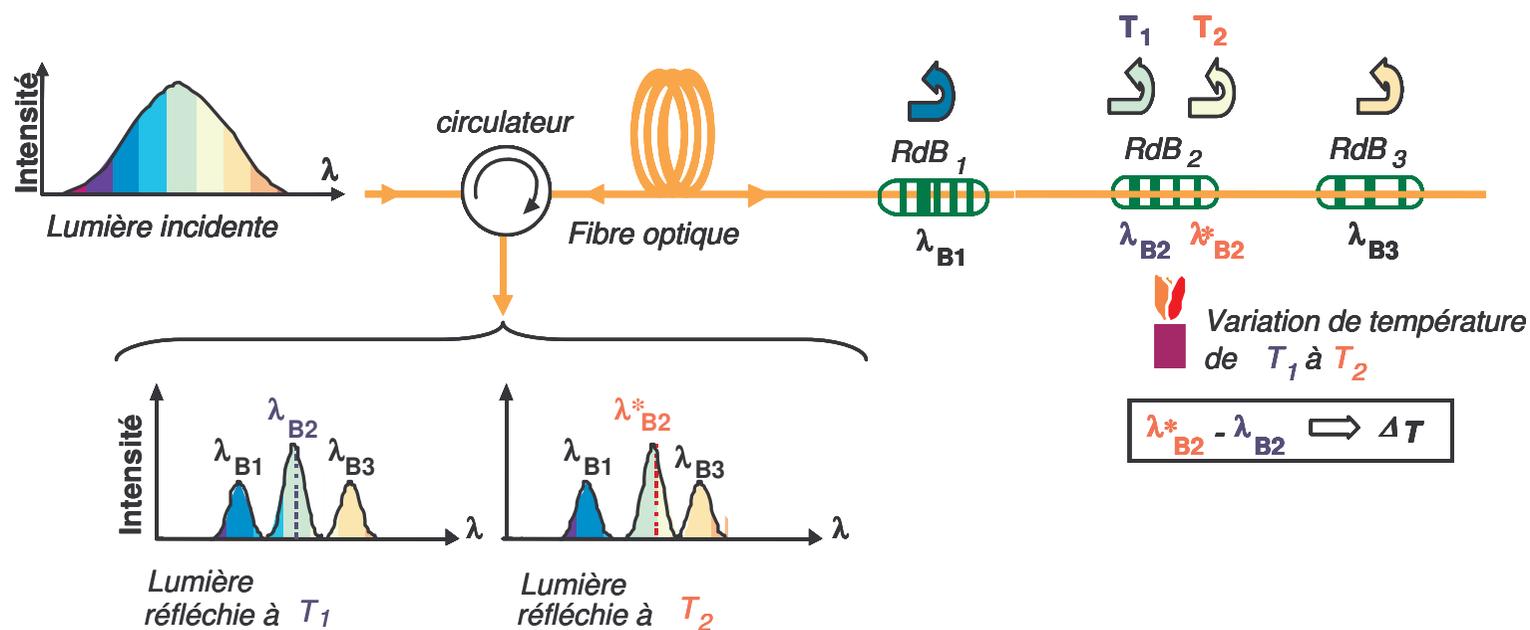
# Inscription par laser UV et réponse d'un réseau de Bragg



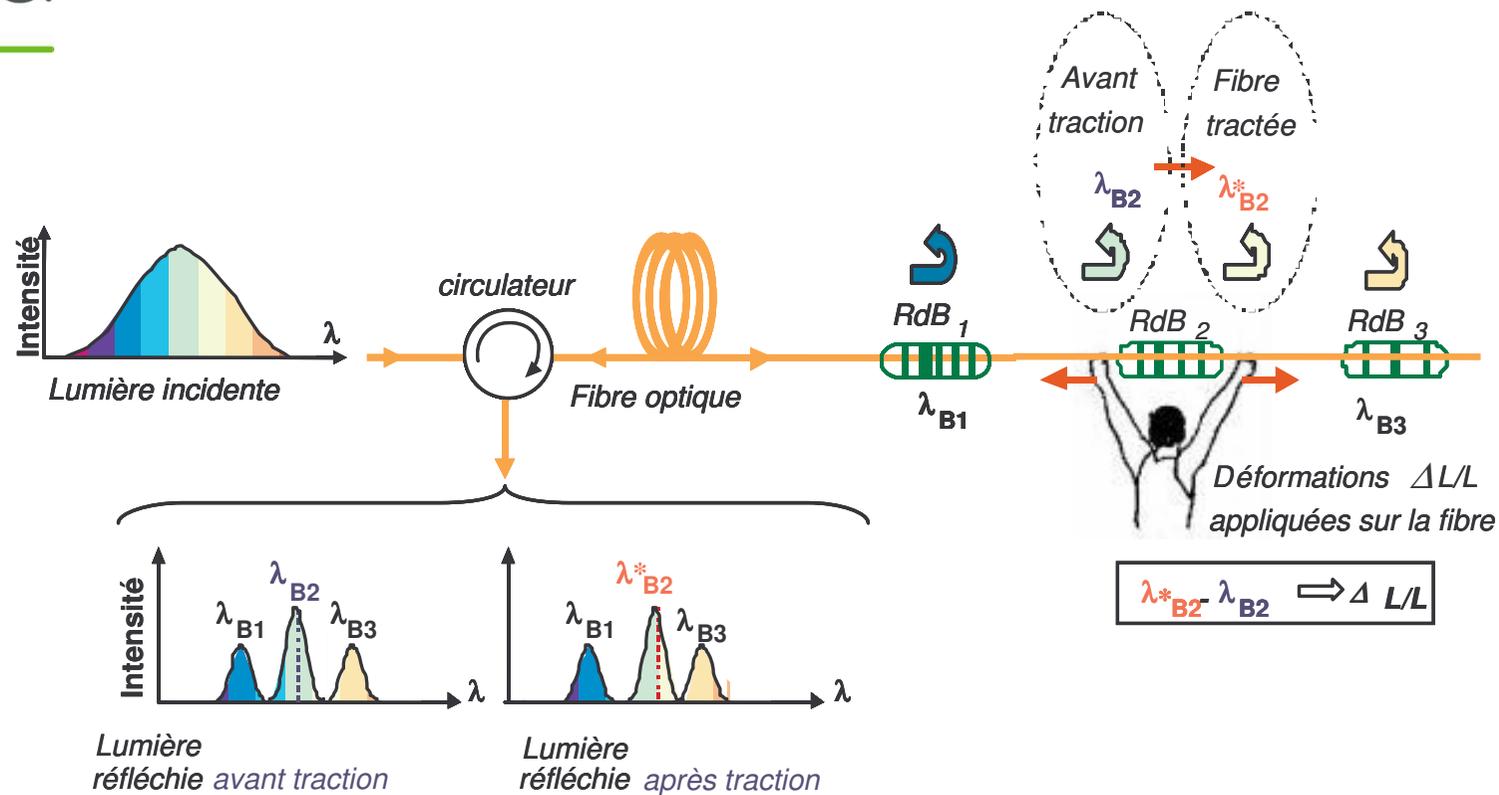
Résonance à  $\lambda = 2.n.pas$



# Principe de mesure / démultiplexage

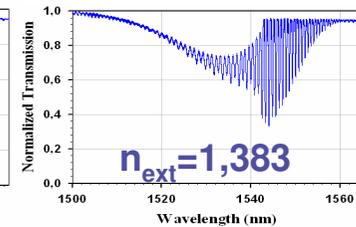
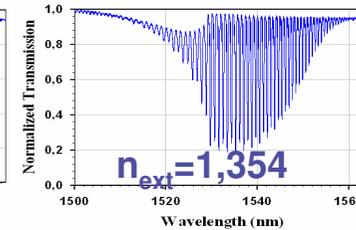
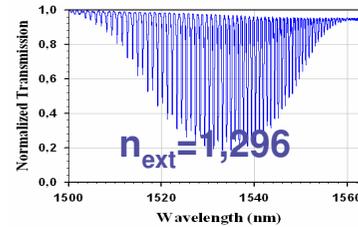
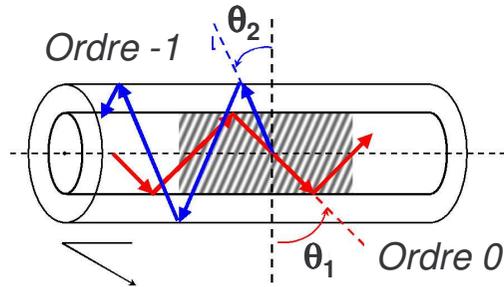


# Principe de mesure / démultiplexage



# Réponse spectrale d'un Réseau en angle

Réseau en angle 



RdB en angle  Couplage vers

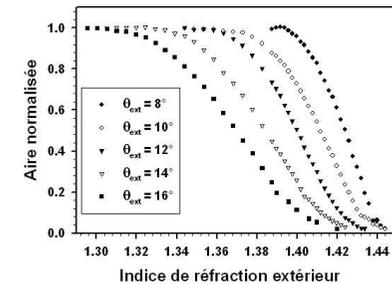
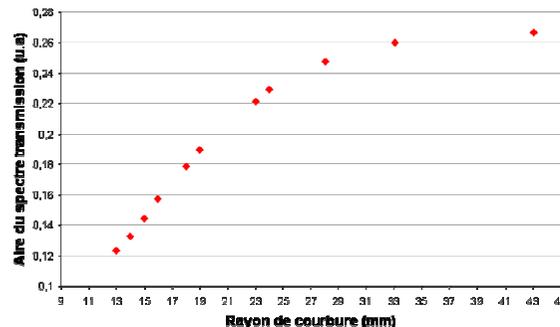
Modes de cœur  
Modes de gaine  
Modes radiatifs

 Dépendance avec  $n_{ext}$

Mesure d'indice :

- Dynamique : 1,3 à 1,45 puis 1,45 à 1,7
- Résolution :  $10^{-5}$  r.i.u. puis  $10^{-4}$  r.i.u.
- Faible sensibilité thermique  $< 2 \times 10^{-5}$  r.i.u./°C

de courbures :



Applications :

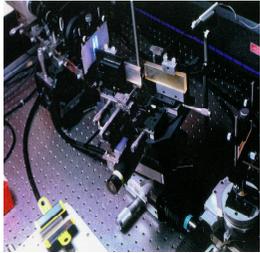
(Bio-)Chimie : mesure d'indice en solution

Composites : surveillance *process*

Mesures de courbures

Contrôle de produits

# Fibres à 'Cristaux Photoniques' : ex. le Projet Monte Cristo



**μ-capteurs physico-chimiques à sensibilité amplifiée**

Coopération :



**Idée** : marier les technologies :

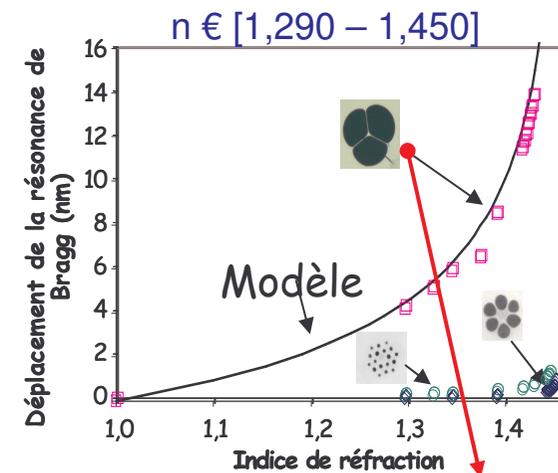
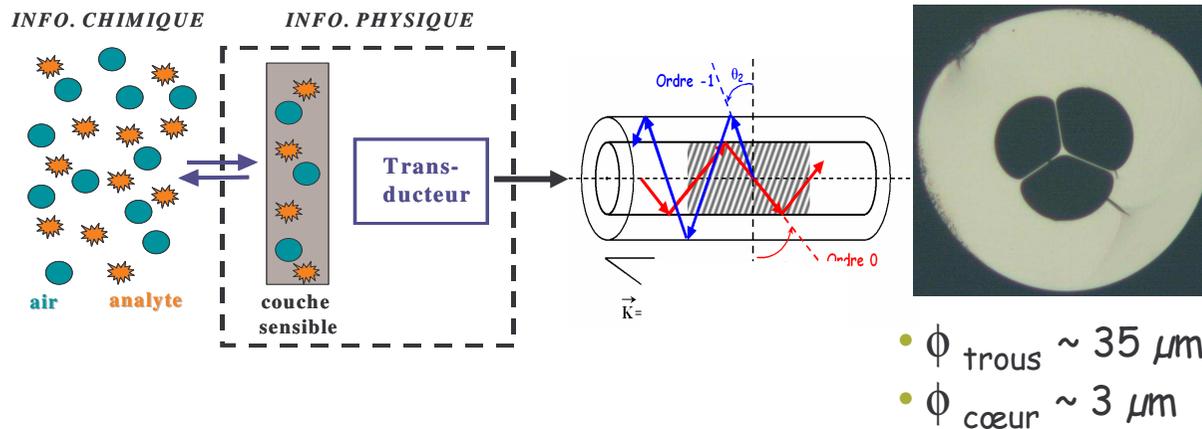
- ▶▶ réseaux de Bragg
- ▶▶ fibres spéciales à C. P.



μ-capteurs (bio)-chimiques



La présence de matériaux en surface et dans les trous influence la réponse



Résolution = qlq.  $10^{-6}$

## Propriétés spectrales et performances intrinsèques des réseaux de Bragg

	Type de réseau	Sensibilité	Résolution	Gamme de mesure
			(résolution 0,1 pm)	
Température	droit à pas courts	12 pm/°C	~ 0,01°C	0 K – 1000 K
Déformations		1 pm / (µm/m)	0,1 µm/m	2 % typique
Pression		- 5 pm/MPa - 100 pm/MPa	0,02 MPa 1 kPa	> 100 MPa
Indice de réfraction	blazé	1 % u.a. / 10 <sup>-4</sup> u.i.r.	10 <sup>-5</sup> u.i.r.	1,3 – 1,45
		1 % u.a./ 10 <sup>-3</sup> u.i.r.	10 <sup>-4</sup> u.i.r.	1,45 – 1,7
Courbures (rayon de courbure R <sub>c</sub> [mm])	à pas courts	3,25 % u.a./ R <sub>c</sub>	250 µm	5 à 30 mm typ.
		0,35 % u.a./ R <sub>c</sub>	1,5 mm	30 à 60 mm typ.

# Systemes pour capteurs à reseaux de Bragg



## Systeme "Smits"

Grandes précision et capacité + rapidité

Résolution : 0,1 pm (0,1  $\mu$ def.) ; cadence : 1 kHz

4 lignes de mesure en temps réel



## Systeme "Bragg Fast"

Compact & ultra rapide (*impacts*)

Résolution 0,1 pm (0,1  $\mu$ def.) 500 kHz par voie

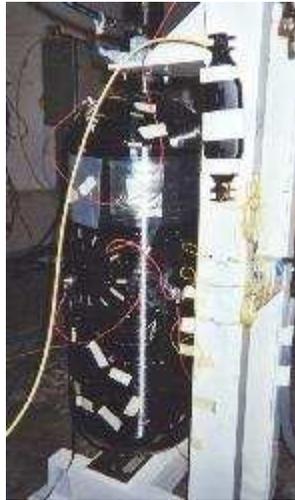
1 à 8 voies multiplexées temporellement



# Application aux matériaux composites

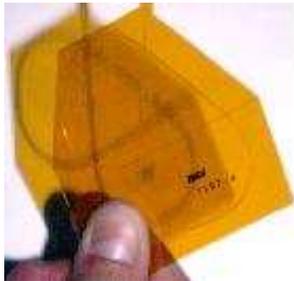
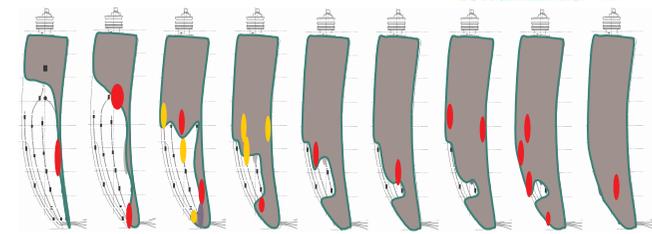


Contrôle process : portes d'écluses



Contrôle de fabrication, amélioration de la qualité : réservoirs de lanceurs

RTM contrôle process : pales d'hélices



Rosettes de réseaux de Bragg



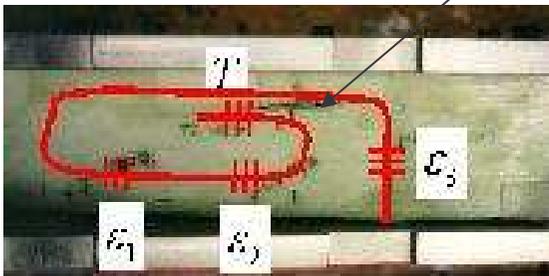
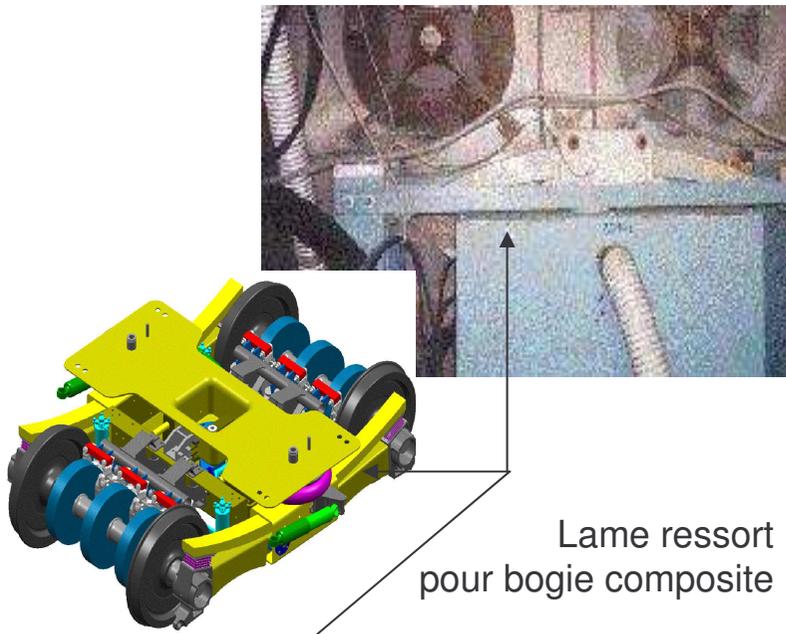
America's cup :  
Surveillance structurelle

Doc. AREVA



Surveillance de structurelle  
et détection d'impacts :  
radome

# Application aux matériaux composites dans le ferroviaire

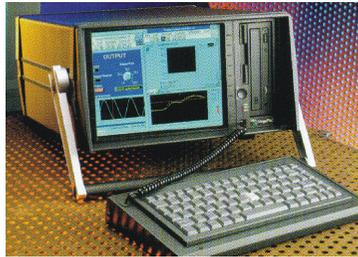


instrumentation des Pantographes

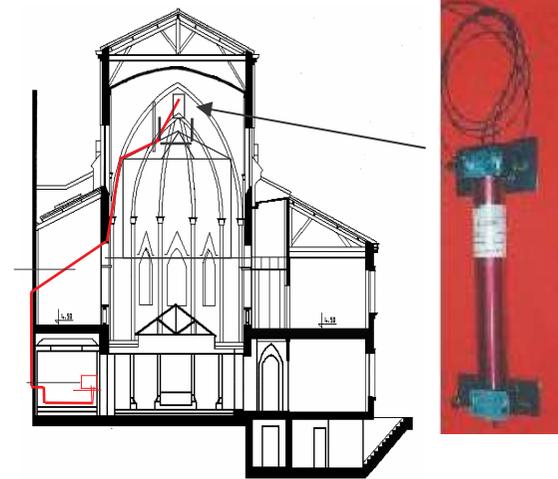
# Exemples de surveillance des bâtiments et du génie civil



Système d'acquisition intégré dans un PC portable



Surveillance de bâtiments :  
Inclinométrie



Surveillance du Pont St Jean - Bordeaux



Extensomètre base longue



Extensomètres base courte

# Applications au secteur pétrolier



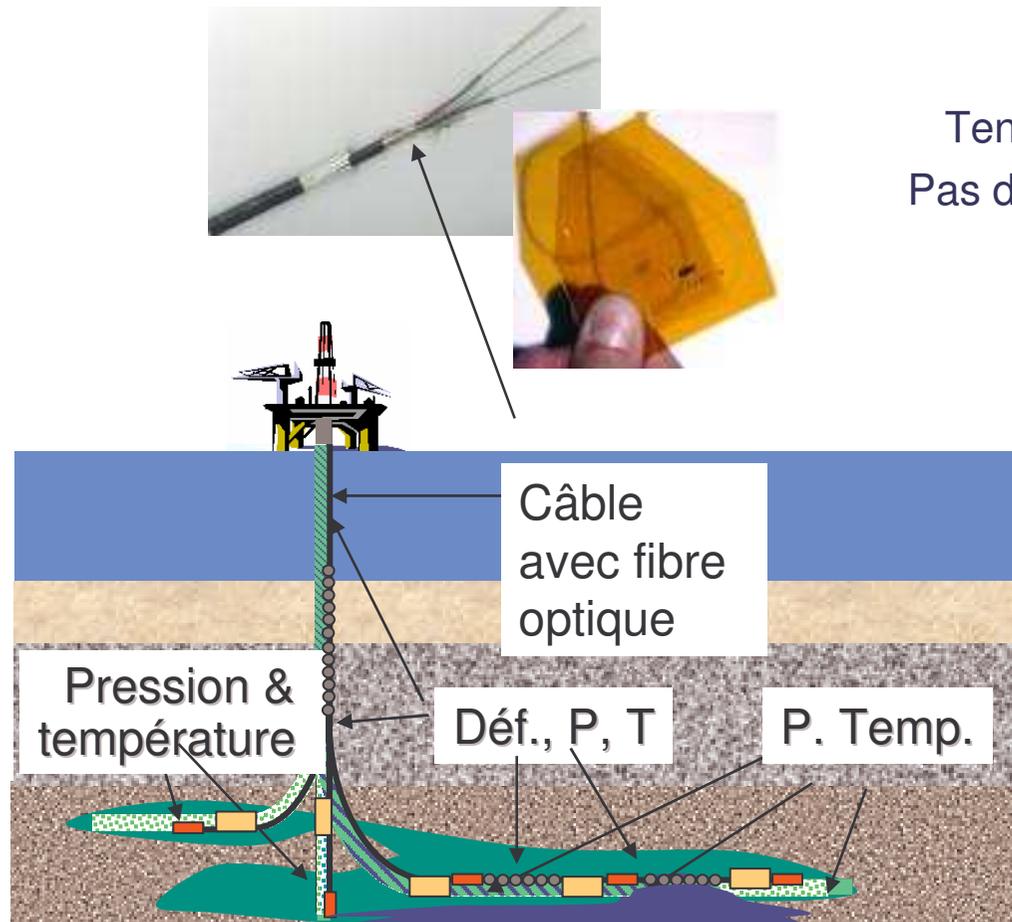
## Capteur de surveillance de pipes

### AVANTAGES :

Multiplexage à 3 km

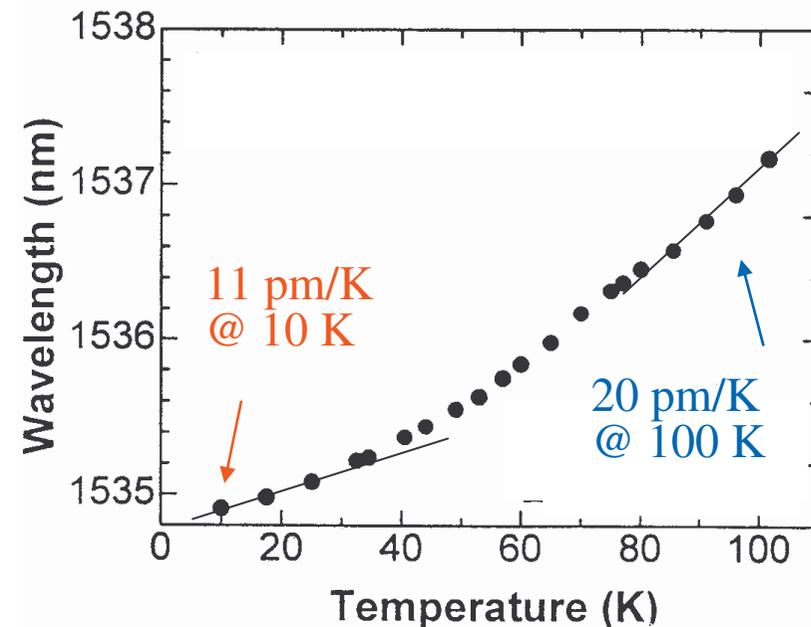
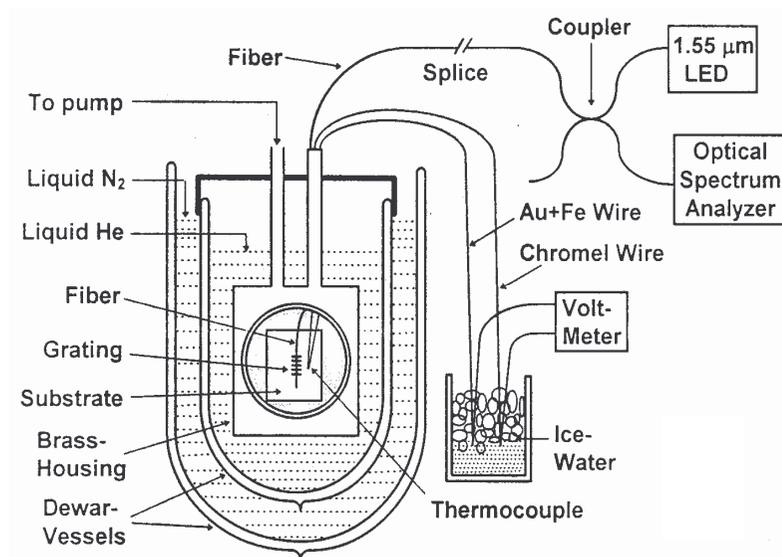
Tenue : 200°C, 1000 bar

Pas d'électronique au fond



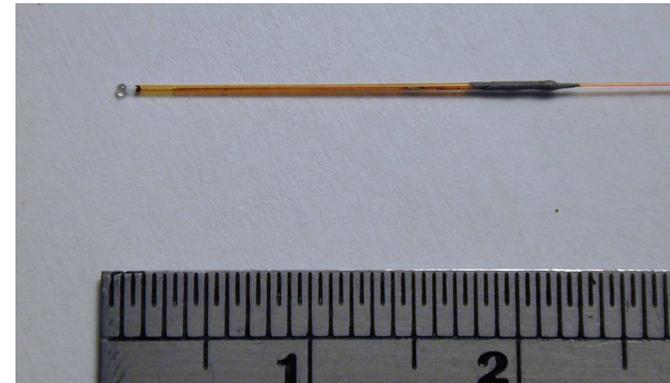
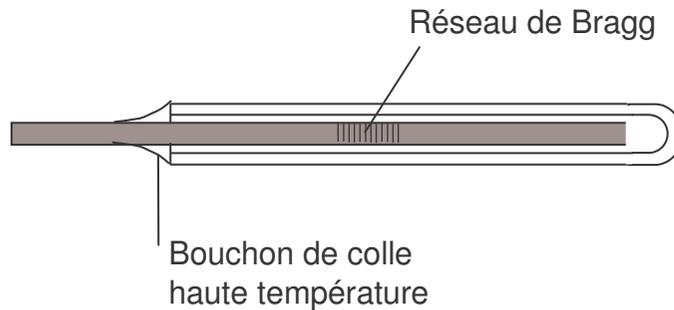
## Le domaine cryogénique

- Pb : le coefficient de **sensibilité** thermique **s'annule vers 0 K**,
- Option : **coller la fibre sur un support** (par ex. du **PMMA**)

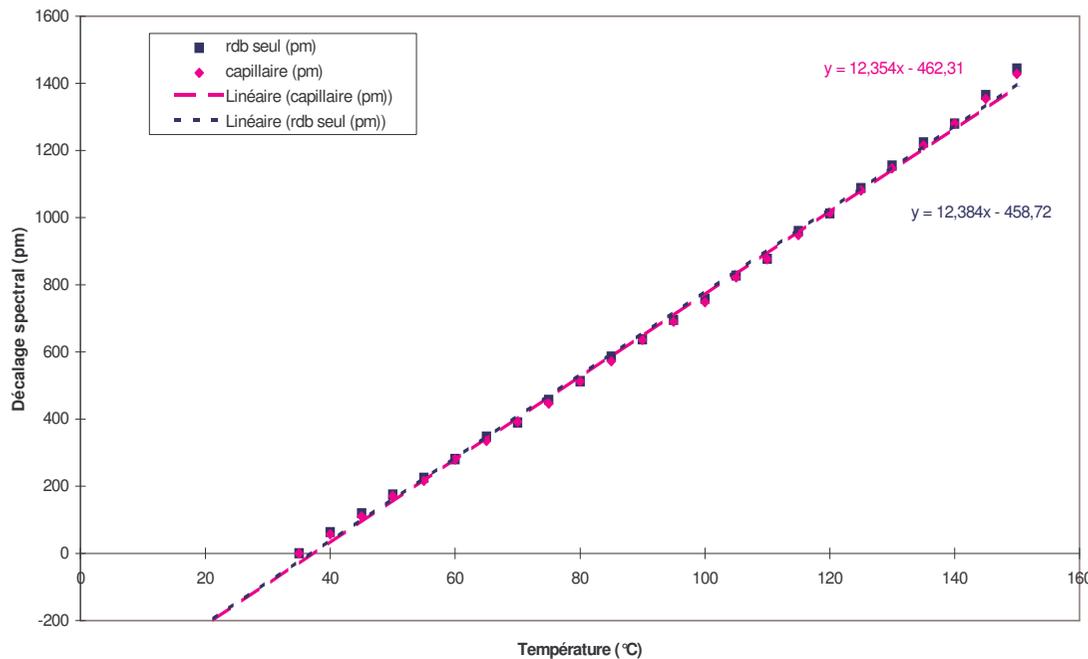


Réf. : T. Mizunami, OFS'97

# Thermomètre pour matériaux composites



Reponse d'un réseau de Bragg seul et d'un réseau de Bragg encapsulé à la température



## Caractéristiques :

**Mesure *in situ* peu intrusive**

Sonde de longueur : 20 mm

$\Phi_{\text{ext}}$  : 350  $\mu\text{m}$

$\Phi_{\text{int}}$  : 250  $\mu\text{m}$

Temp. max : 400°C

résolution :  $\pm 0,2^\circ\text{C}$



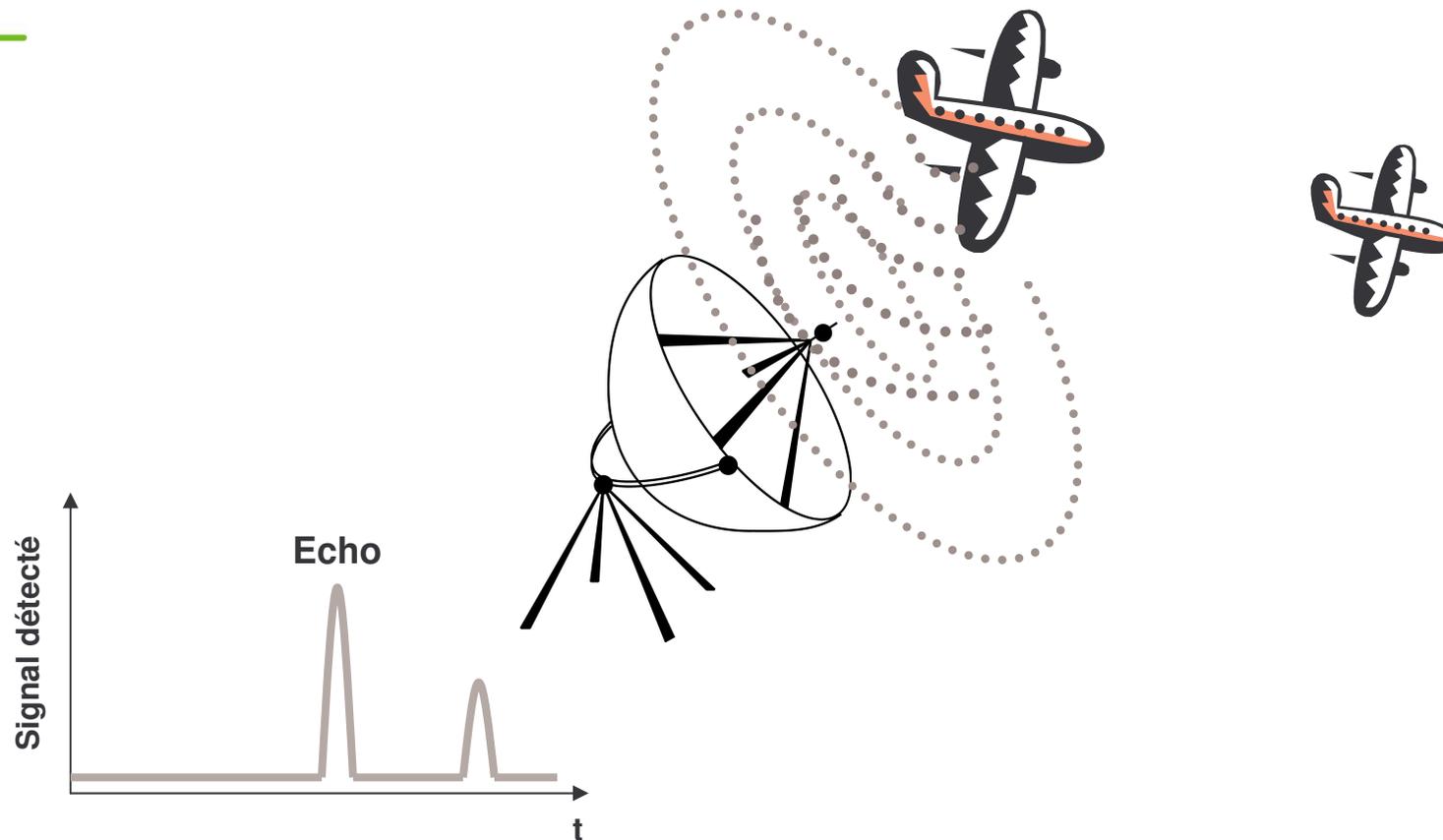
Capteurs répartis (*continûment sensibles*)



Fournissent le profil du  
paramètre le long de la fibre

# Le concept du Radar pour la localisation des réflecteurs

cea

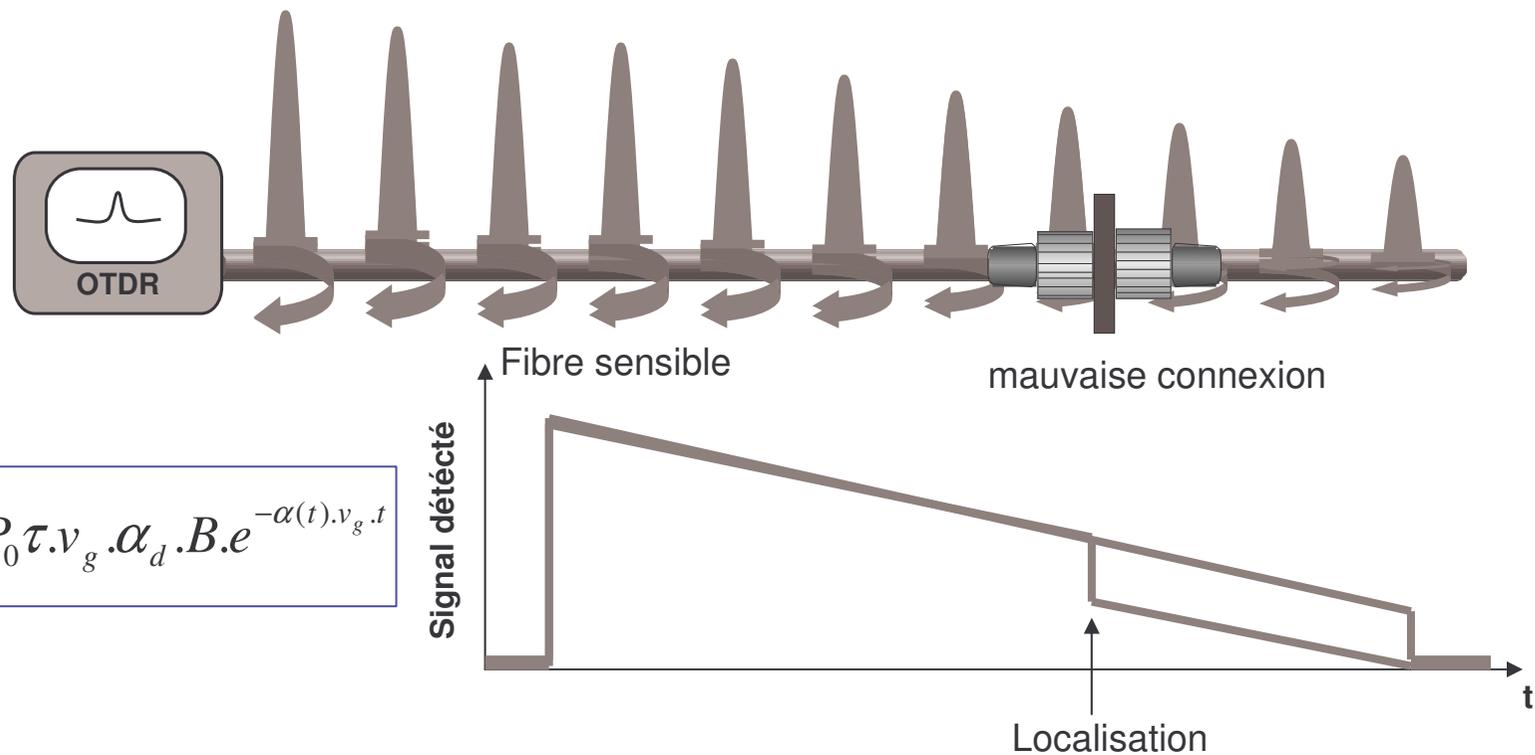


list



## Technique 'Radar' de localisation

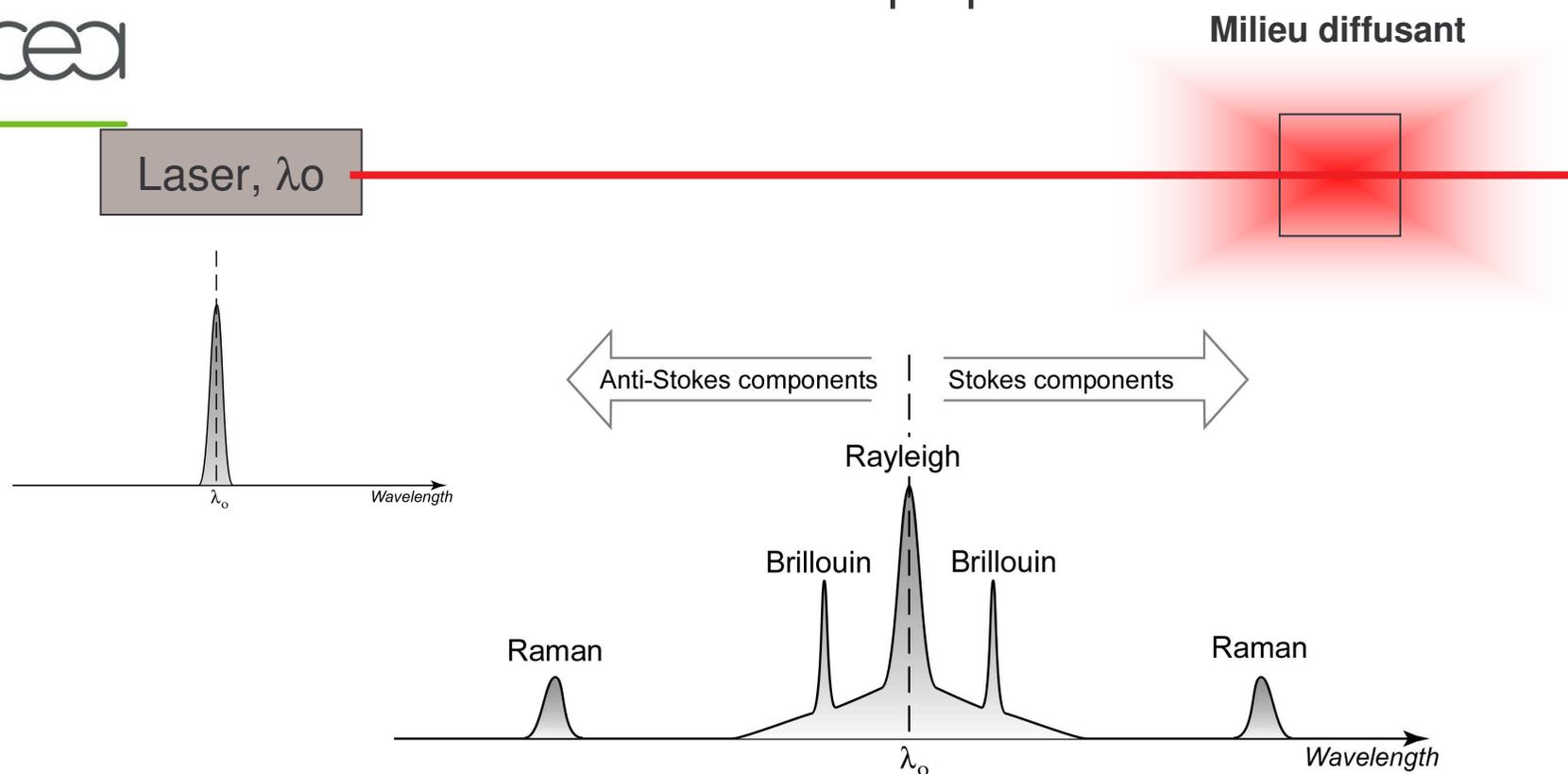
- Génération d'impulsions optiques
- Puis, détection de l'intensité 'réfléchie'
- *Technique télécoms : la réflectométrie (OTDR)*



$$P_R(t) = \frac{1}{2} \cdot P_0 \tau \cdot v_g \cdot \alpha_d \cdot B \cdot e^{-\alpha(t) \cdot v_g \cdot t}$$

# Les phénomènes physiques de diffusion dans la fibre

## ■ La diffusion dans la fibre optique



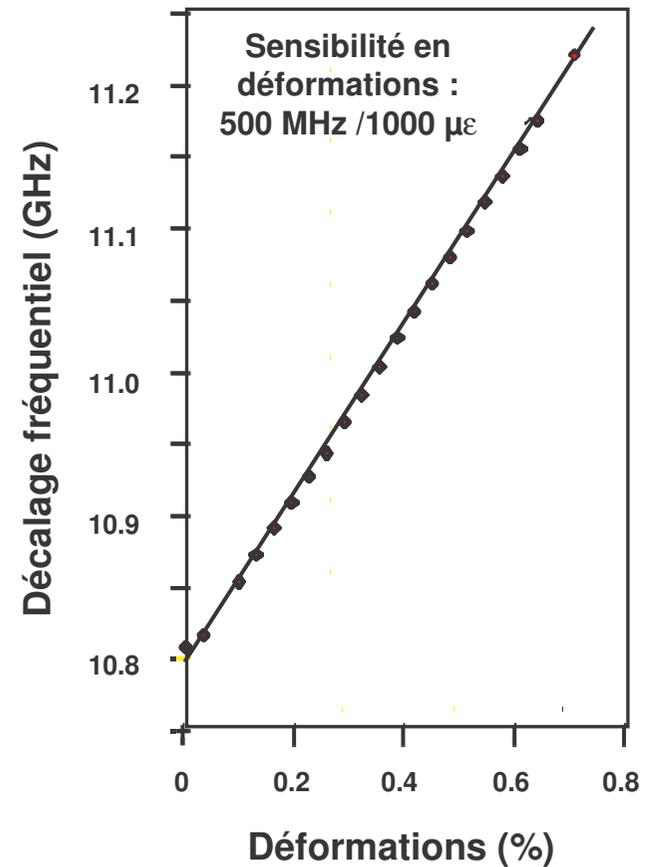
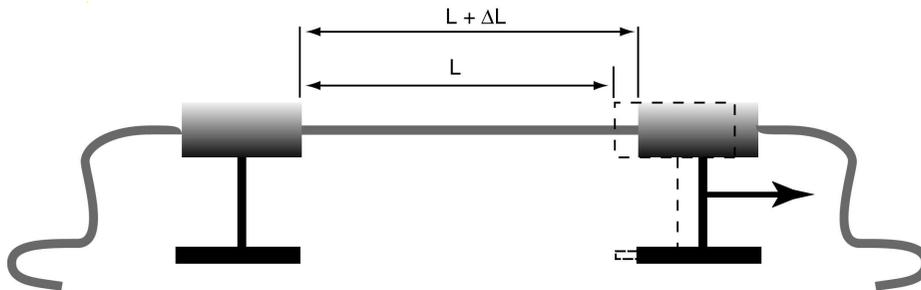
- La diffusion **Raman** : donne accès à la **température**
- La diffusion **Brillouin** : donne accès à la **température et aux déformations**

# L'effet Brillouin sensible aux déformations



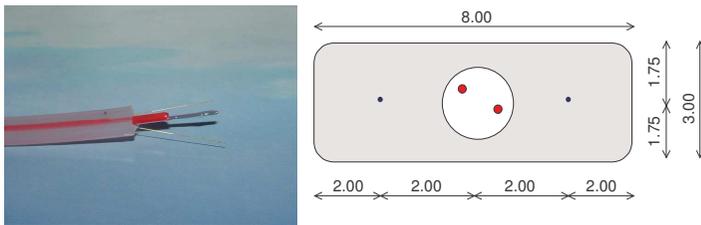
Les déformations affectent les composantes de la diffusion Brillouin

Déformation  $\varepsilon = \Delta L/L$   
Pente en déform. : 1 MHz / 20  $\mu\varepsilon$

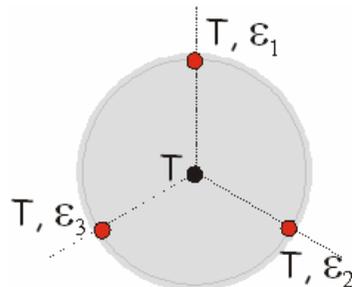


## Exemples de câbles sensibles ; système de mesure

- La fibre elle même ... ou :
- « SMART cable »
  - 2 fibres non serrées et 2 autres noyées dans un profilé thermoplastique



- « Câble 3D du CEA-LIST » (*en développement*)
  - Plusieurs fibres noyées pour mesurer allongements et courbures, plus une autre fibre pour la température



- Analyseur de **température** et de **déformations**



- résolution en température ~ 1 °C
- // en déformations : ~ 20 μm/m
- résolution spatiale : ~ 1 m
- portée 10 à 35 km, 200 km si répéteurs
- jusqu'à 100 000 points de mesure
- temps de mesure : 30 s à 5 min



- Détection d'incendie

- Robuste facile à utiliser
- Portée 8 km, 16 km ou 24 km
- Détection automatique et à distance ...



- Détection de fuites

- Jusqu'à 30 km de distance
- Résolution  $\sim 0,5^\circ\text{C}$

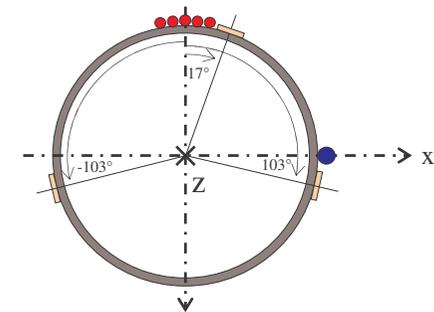
- Surveillance des structures (thermique, déformations)

- Jusqu'à 30 km de distance
- résolution  $< 20 \mu\epsilon$



- *Ex de surveillance de pipes :*

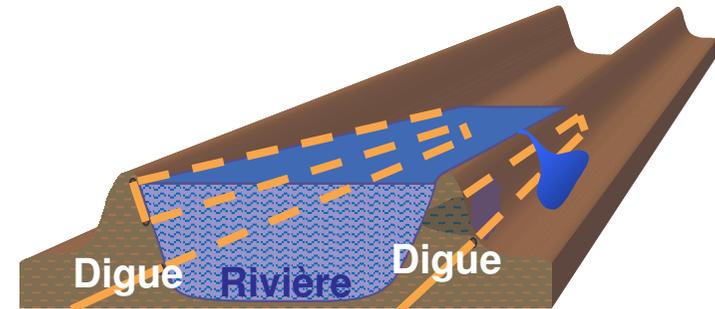
- 550 m de tuyau, posé dans une région instable
- Système BOTDR (température et fuites)



# Surveillance de digues, barrages, bâtiments, grandes installations



- Possibilité de couvrir de longues portées, localiser les problèmes d'érosion ou de débordement avant toute rupture (*alarme précoce*)



- Surveillance thermique de la cuisson du béton
- Surveillance des déformations des ponts, barrages, dalles, pipes, ...



## Conclusion : les Capteurs à Fibres Optiques permettent des mesures locales ou continues

### Technologie des réseaux de Bragg multiplexés

- Mesure de : temp. pression, déformations, force, inclinaison, indice, courbure, ...
- Résolutions métrologiques
- Nb capteurs multiplexables (*~ 10 par ligne ; N lignes en //, topologie évolutive*)
- Sécurité si rupture de fibre (*interrogation par les 2 extrémités*)
- Bonne tenue des réseaux aux environnements sévères,
- Mesures absolues (*ni calibrage, ni fonctionnement permanent imposé*)
- Bon comportement long terme (*mesure spectrale indépendante de l'intensité ... vieillissement de la source, pertes en lignes ...*).

### Technologie Brillouin pour capteurs répartis

- Mesure de : température, déformations, courbures ...
- Détermination des profils le long de la fibre, sans équivalent technologique
- Plusieurs dizaines de milliers de points de mesure sur 1 fibre