



Les capteurs à réseaux de Bragg fibrés au cœur des matériaux :

Structures & procédés industriels

P. Ferdinand, V. Dewynter-Marty, S. Magne, S. Rougeault, G. Laffont, L. Maurin,
N. Roussel, J. Boussoir et P-J. Daniel

CEA-List (DIMRI-SIAR)

CEA-SACLAY

91191 Gif-sur-Yvette cedex

Tel : 01. 69. 08. 90. 47 Fax : 01. 69. 08. 83. 95 Sylvain.magne@cea.fr



Sommaire

Le Laboratoire de Mesures Optiques

Les réseaux de Bragg photo-inscrits

La métrologie par réseaux de Bragg

Systèmes de mesure types

Métrologie des températures

Capteur de température, mesure dans les terrains, hautes températures

Métrologie des déformations

Extensométrie 1D, 2D, mesure de déplacement, inclinométrie, matériaux composites

Métrologie des pressions

Mesures réfractométriques

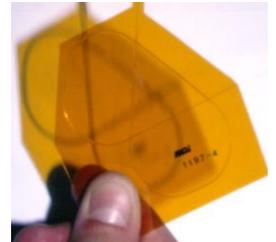
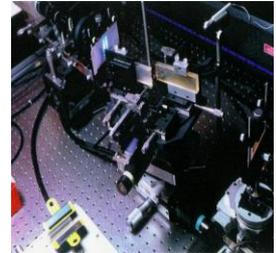
Conclusion

Le Laboratoire de Mesures Optiques

"Développement de dispositifs et systèmes de mesure à fibres optiques"

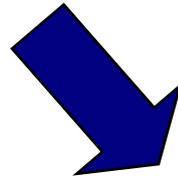
L'activité porte sur 5 volets :

- **Technologique** : les transducteurs à *réseaux de Bragg*
- **Capteurs** : 'conditionnement' de RdB ($T P \varepsilon F \alpha \text{ } ^\circ\text{Cure} \dots$),
- **Systèmes** de mesure (cartes opto type PCI, *soft* ...)
- **Démos** applicatives
- **Transferts**

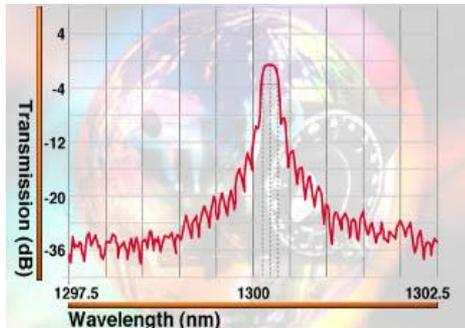
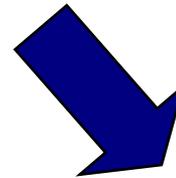


Les réseaux de Bragg photo-inscrits

Photosensibilité des fibres optiques

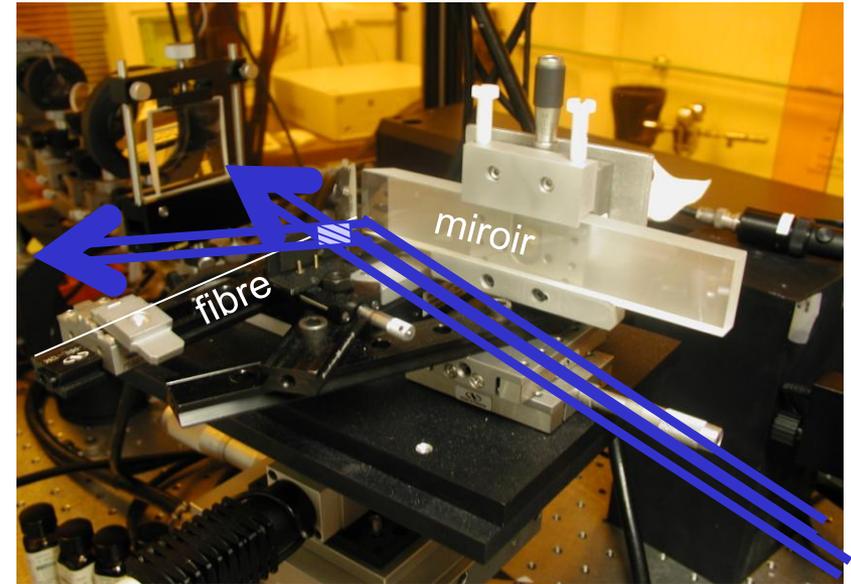
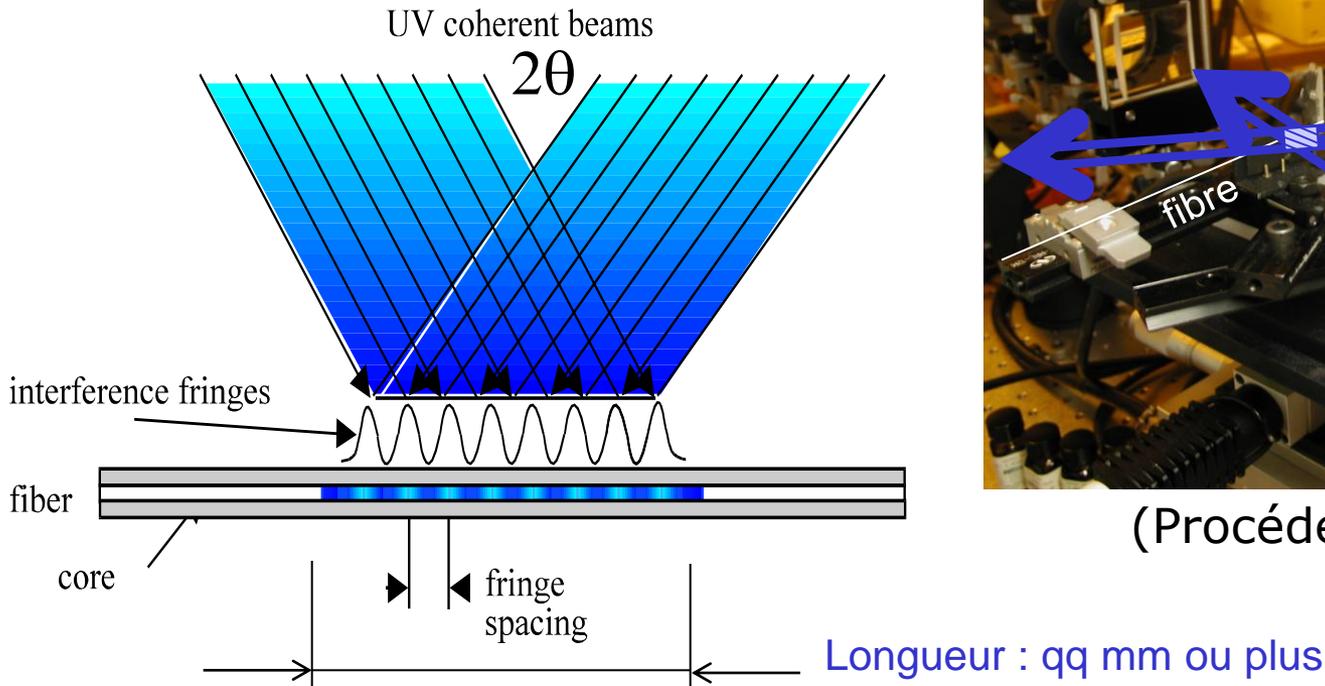


Perturbation locale et **périodique de l'indice** de réfraction du cœur de la fibre



Filtre spectral très sélectif utilisé comme **transducteur**

Photo-Inscription d'un Réseau de Bragg



(Procédé : miroir de Lloyd)

$$\lambda_B = 2.n.\Lambda$$



La métrologie par réseaux de Bragg

$$\Delta\lambda_B = a\Delta T + b\Delta\varepsilon + c\Delta P$$

Mesures directes d'indice ou de température, déformations, pression,
Mesures indirectes de déplacements, d'angle, ...

Activité menée au laboratoire :

- Modélisation des réseaux, inscription laser, caractérisation, conditionnement : ▶ **Capteurs**
- Conception, réalisation des systèmes d'interrogation - démultiplexage (*hard & soft*) : ▶ **Systemes de mesure**

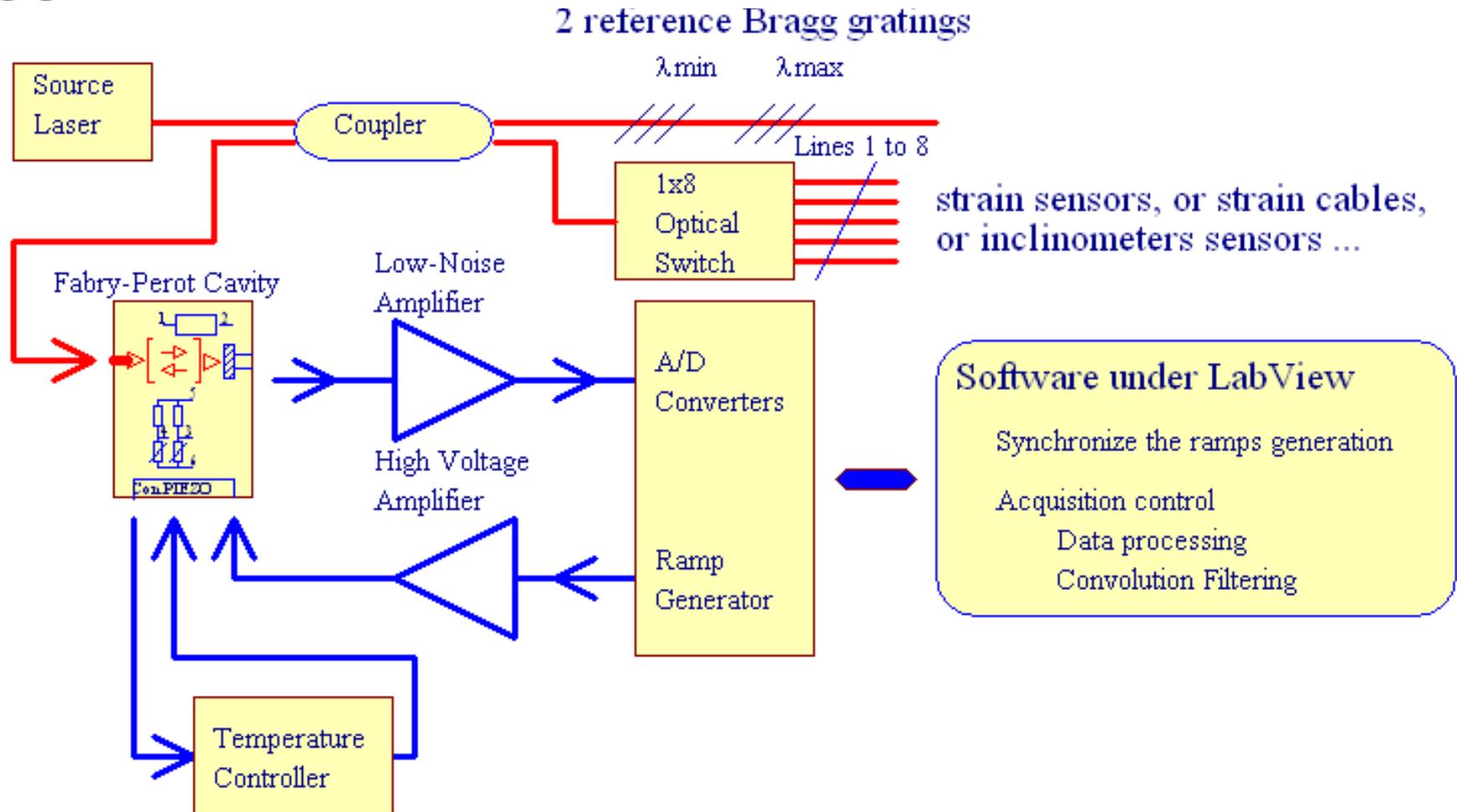
Avantages d'une métrologie par réseaux de Bragg



- Mesure locale non intrusive,
- Linéarité sur une large gamme de mesure,
- Bonnes performances métrologiques (*résolution, ...*),
- Insensibilité électro-magnétique,
- Déport important des points de mesure (*km*),
- Mise en série des capteurs possible (*faible pertes d'insertion*),
- Composants systèmes disponibles (*marché des télécoms*),
- Multiplexage et mesures spectrales (*N capteurs / ligne*),
- Signature spectrale indépendante de la puissance optique,
- Système déconnectable sans recalibrage,
- Optimisation du coût du point de mesure (*multiplexage sur système unique*),
- Mesures multi-paramètres (*T, P. déf. ...*) avec un seul système d'acquisition.



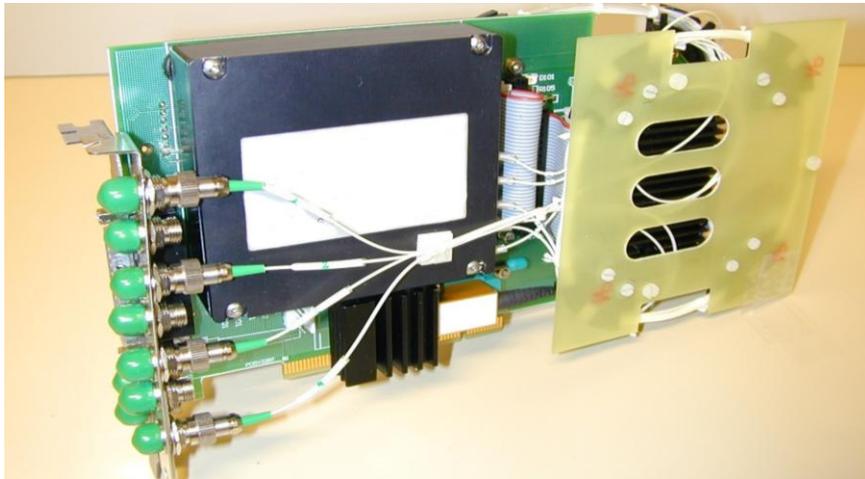
Systeme de mesure type



Systemes développés

“Bragg FIT”

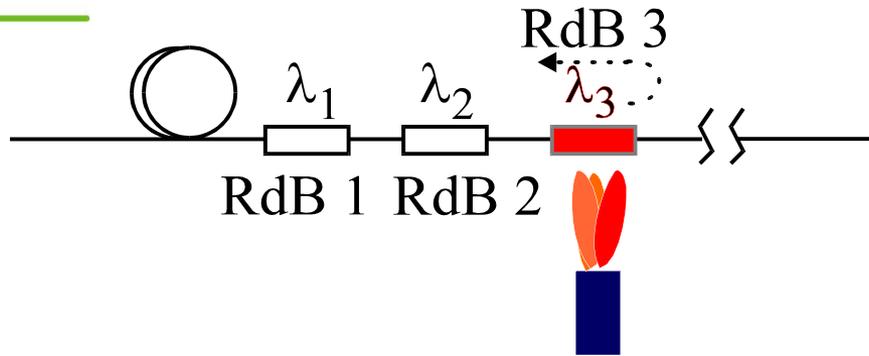
Systeme pour capteurs à Réseaux de Bragg
8 voies de ~ 10 capteurs, 50 Hz par voie



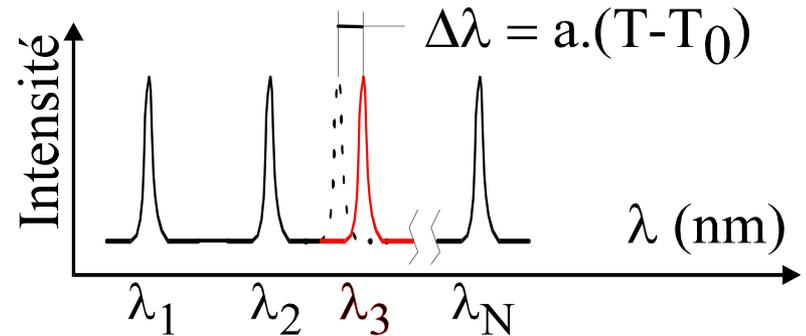
“Bragg Fast”

Analyseur compact & rapide (45 kHz / voie),
4 ou 8 voies multiplexées temporellement

Métrologie des températures

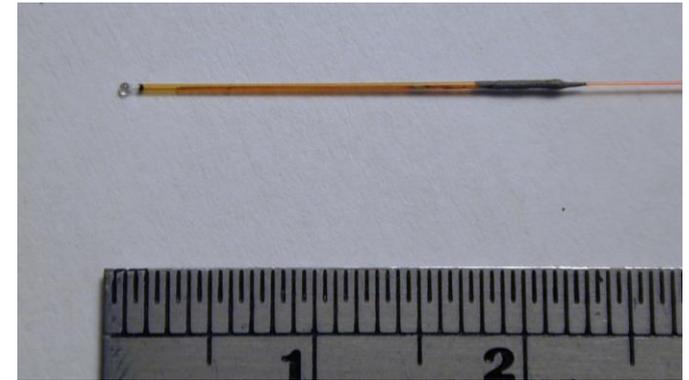
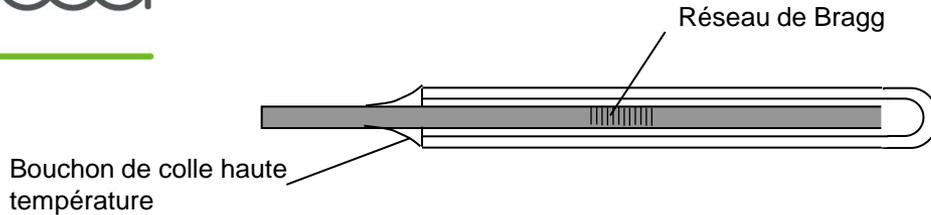


$$a = 12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$$



- Gamme : [quelques K à ~ 1000°C] *(liée au revêtement)*
- résolution : ~ 0,1°C *(liée au système de mesure)*
- nb de capteurs multiplexables : douzaine *(lié à leur dynamique)*

Capteur de température peu intrusif



Caractéristiques :

Mesure *in situ* peu intrusive

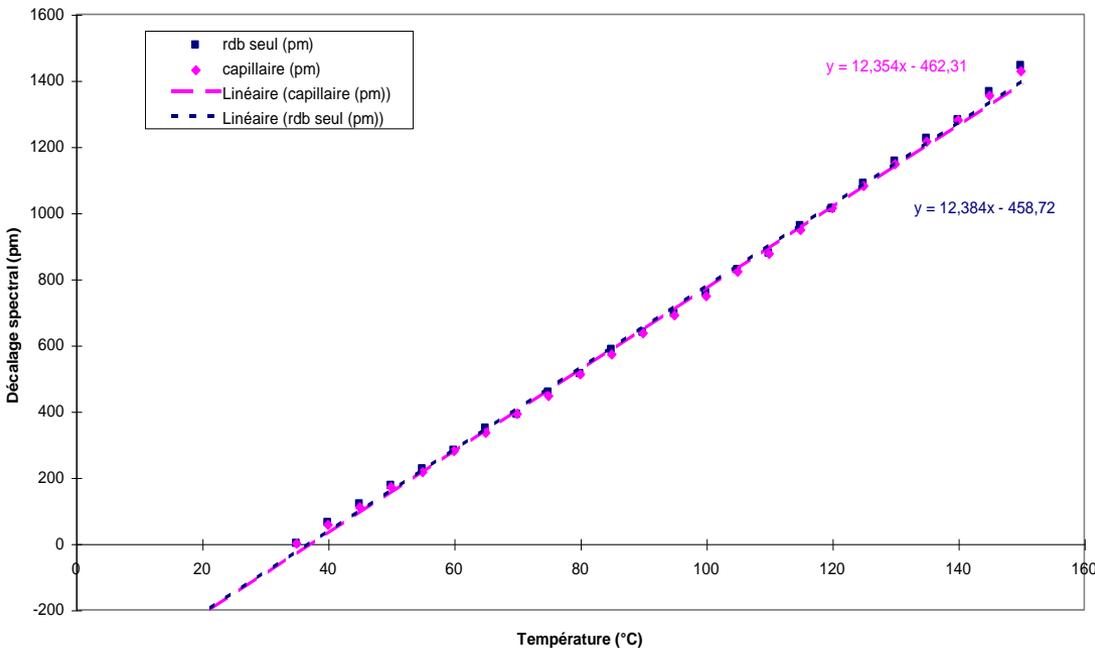
Sonde de longueur : 20 mm

Φ_{ext} : 350 μm

Φ_{int} : 250 μm

Temp. max : 400°C

résolution : $\pm 0,2^\circ\text{C}$

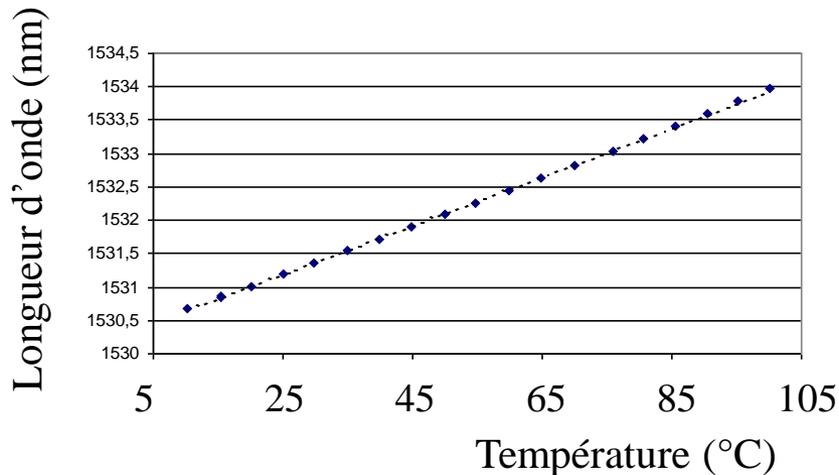


Application privilégiée : suivi in-situ de cuisson des matériaux composites



Mesure thermométrique dans les terrains

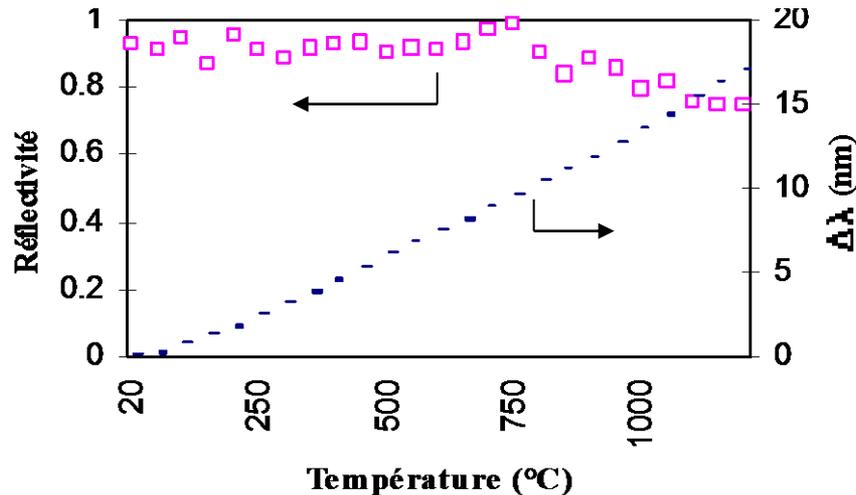
- Amplification mécanique en fixant le réseau sur un support ($\approx 39 \text{ pm}/^\circ\text{C}$)



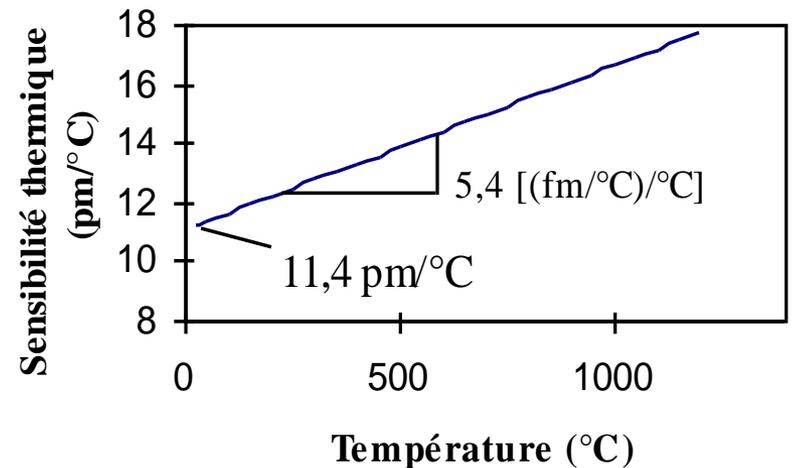
CFO



Métrologie des très hautes températures (1000 °C)



Comportement thermique (isochrone) d'un réseau de type II



Évolution de la sensibilité thermique d'un réseau azoté de type II

$$\Delta\lambda_B \text{ [pm]} = 2,70 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \text{ [}^\circ\text{C]} + 11,3 \cdot T \text{ [}^\circ\text{C]} - 328 \quad (\Delta\lambda_B \sim 0 \text{ vers } 29^\circ\text{C, au départ).}$$

Partenaire : Univ. de Lille



Métrologie des déformations

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \varepsilon_z - \frac{n^2}{2} \left[(p_{11} + p_{12}) \varepsilon_r + p_{12} \varepsilon_z \right]$$

Déformation radiale

↓

Déformation axiale

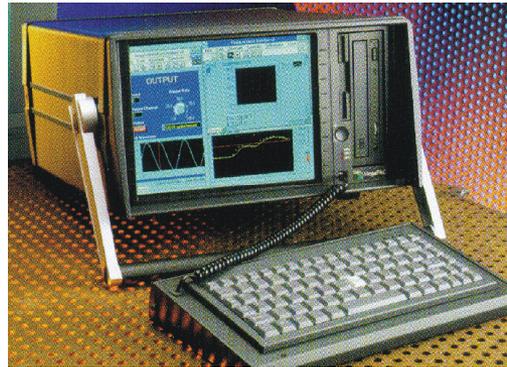
Déformation axiale pure : $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1 - p_e) \cdot \varepsilon_z$ avec $p_e = \frac{n^2}{2} \cdot (p_{12} \cdot (1 - \nu) - p_{11} \cdot \nu)$

- Gamme : [qq $\mu\varepsilon$ à ~ 1 % typ] (*voire 2 à 3 % selon procédé et proof-test*)
- résolution : ~ qq $\mu\varepsilon^\circ$ (*liée au système de mesure*)
- nb de capteurs multiplexables : 3 à 4 (*lié à leur dynamique*)

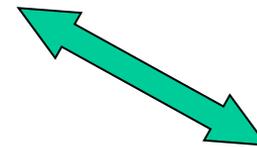


Extensométrie : Mesure de déplacements (1/2)

Système
d'acquisition
intégré



Transfert à Hydrolog



Extensomètre base longue
(fibre dans composite verre-époxy pultrudé)

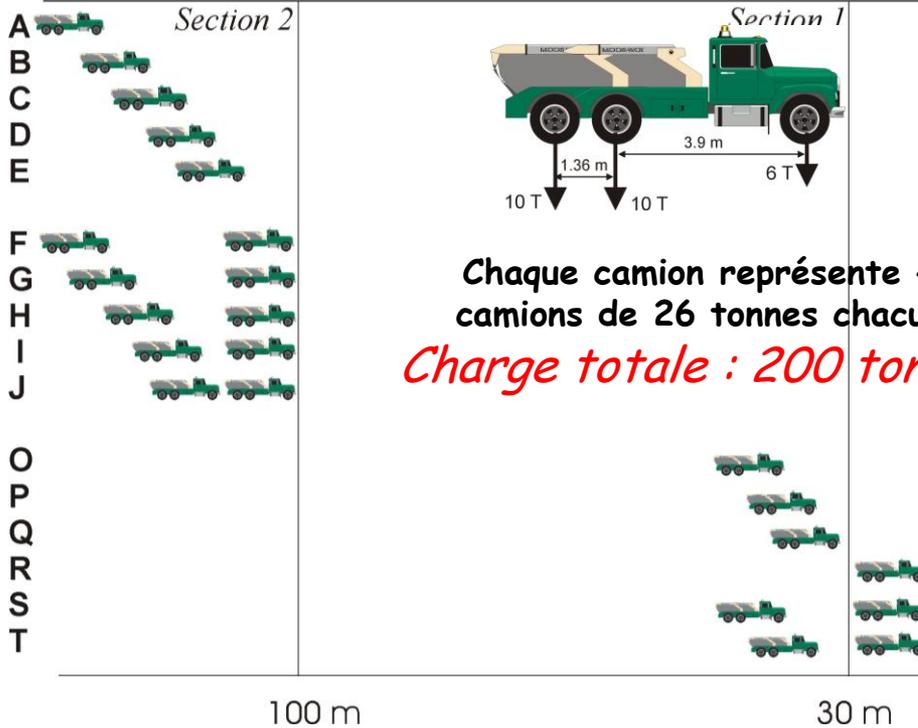


Extensomètres base courte
(fibre collée sur acier)

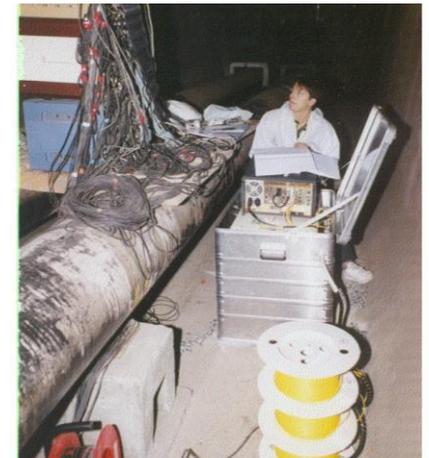
*Essais sur site :
Pont St Jean (2001-2002)*



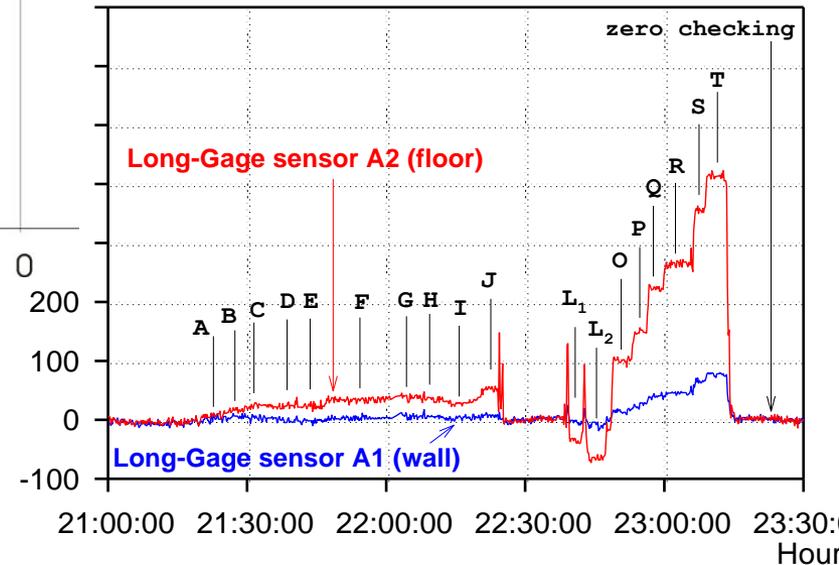
Extensométrie : Mesure de déplacements (2/2)



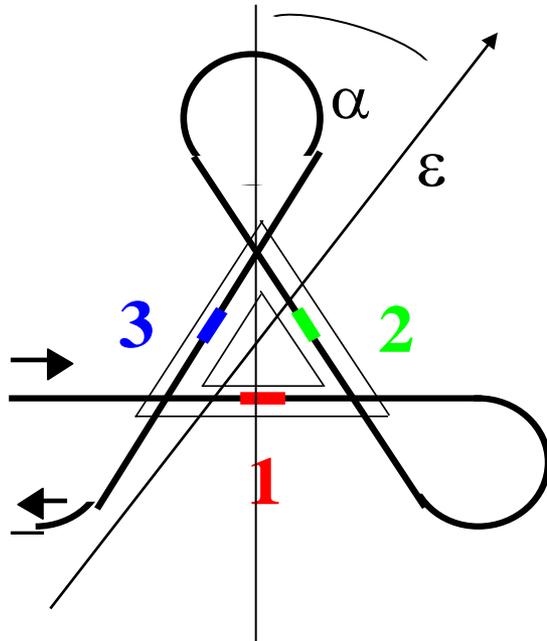
Chaque camion représente 4 camions de 26 tonnes chacun
Charge totale : 200 tonnes



- Déplacements du tablier ~ 4 to 5 fois ceux des parois, preuve d'une flexion de l'ouvrage,
- Résolution de mesure $\pm 3 \mu\text{m}/\text{m}$,
- Résolution en ouverture de fissures $\pm 1 \mu\text{m}$,
- Bonne corrélation entre tous les capteurs



Extensométrie : Rosettes à réseaux de Bragg



Rosette 'delta' (120 °)



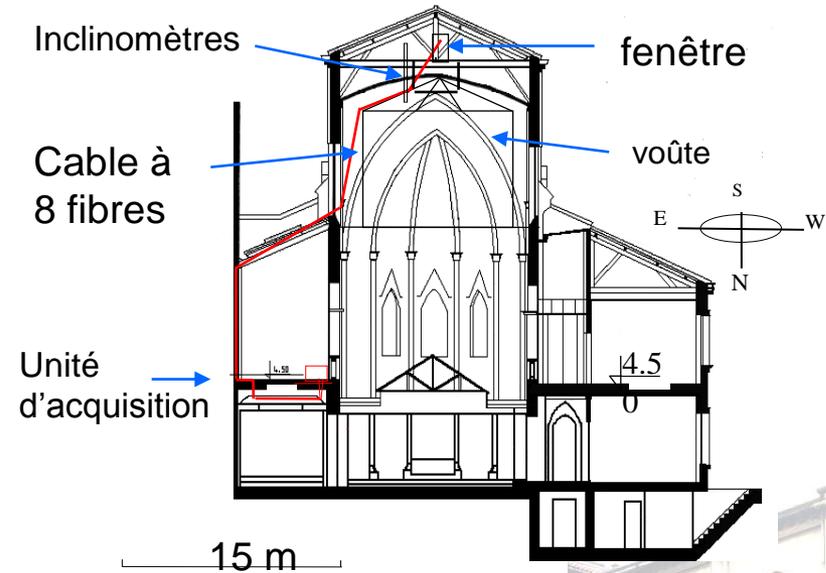
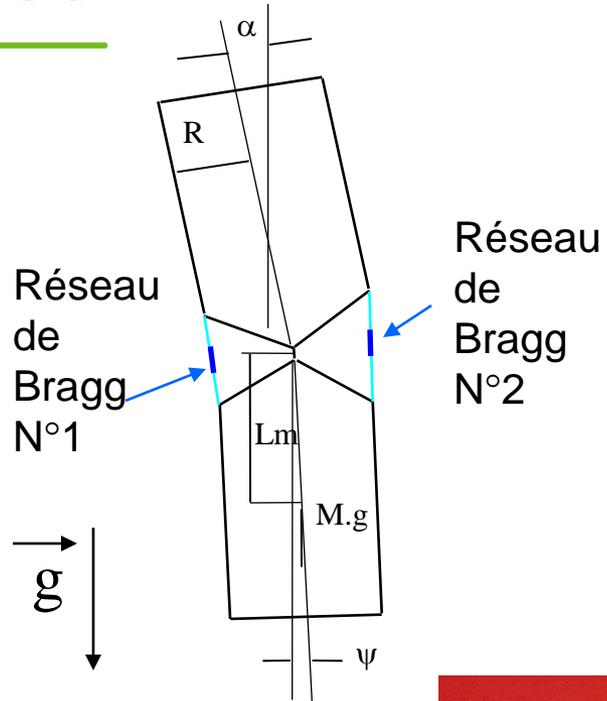
Brevet CEA

4 jauges : Mesure de T , ε_x , ε_y (déf. principales) et orientation α (extenso traditionnelle)

3 jauges : Mesure de ε_x indépendant de T et de α (applications aux poutres, filins, ...)



Mesure d'angle (inclinométrie)

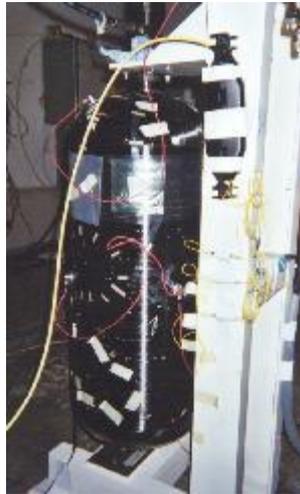


Partenaires : CEE, Solétanche-Bachy

Application aux matériaux composites

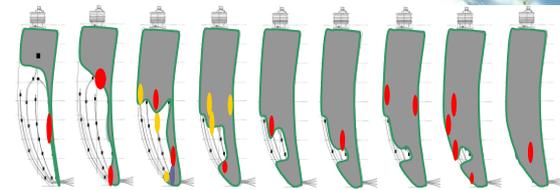


Spatial
EADS

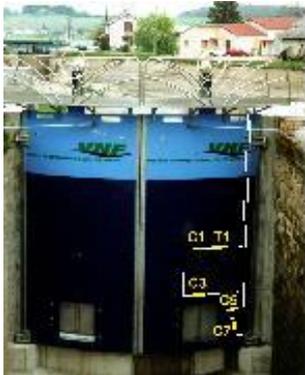


Aéronautique
Ratier Figeac

Contrôle process
RTM



Génie civil

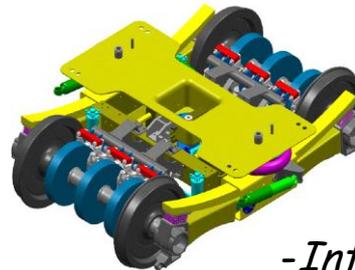


Amélioration de la
Qualité de
fabrication :
Réservoir de lanceur

VNF, DCN

Contrôle process &
Surveillance intégrité

Ferroviaire



Alstom, DDL

- Intégrité matériel roulant
- Qualification en fatigue ($16 \cdot 10^6$ cyc)

Siemens, SNCF : smart caténaires



Métrologie des pressions hydrostatiques

2 concepts de capteurs :

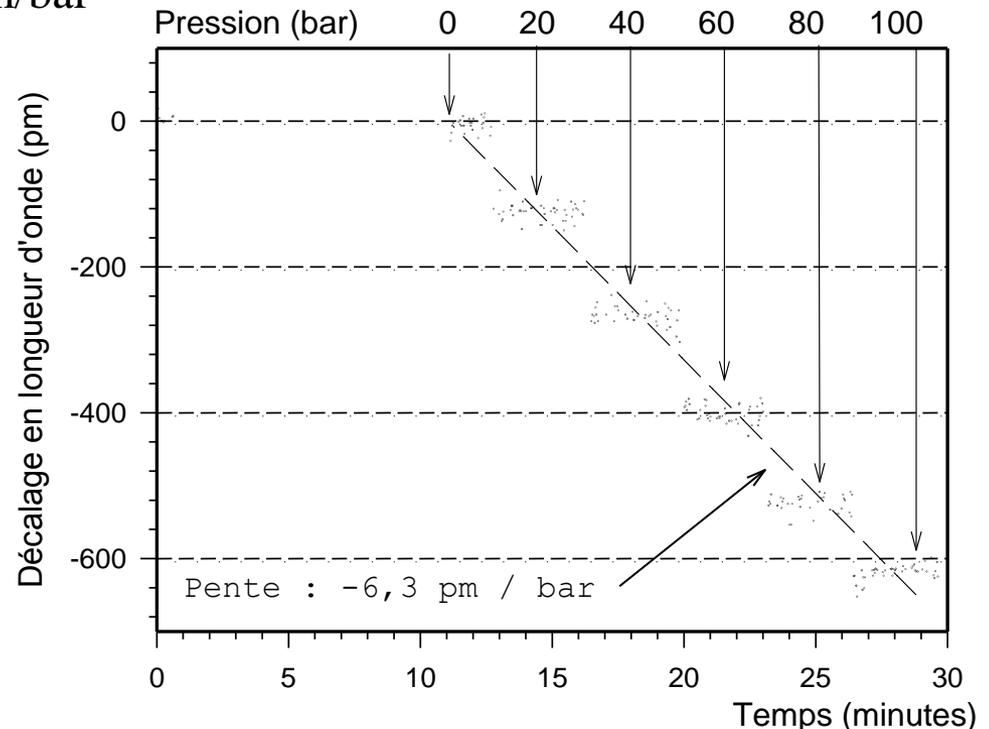
1/ *Extrinsèque* : avec corps d'épreuve (mesure de $\varepsilon(P)$)

2/ *Intrinsèque* : sans corps d'épreuve (mesure directe de P)

Réponse en pression (fibre seule) : ~ 0,5 pm/bar

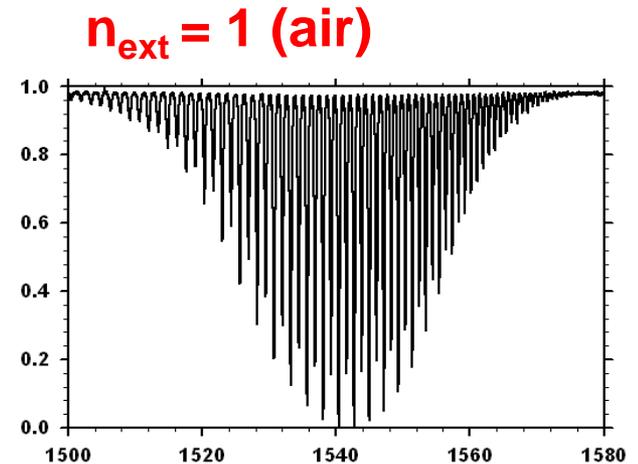
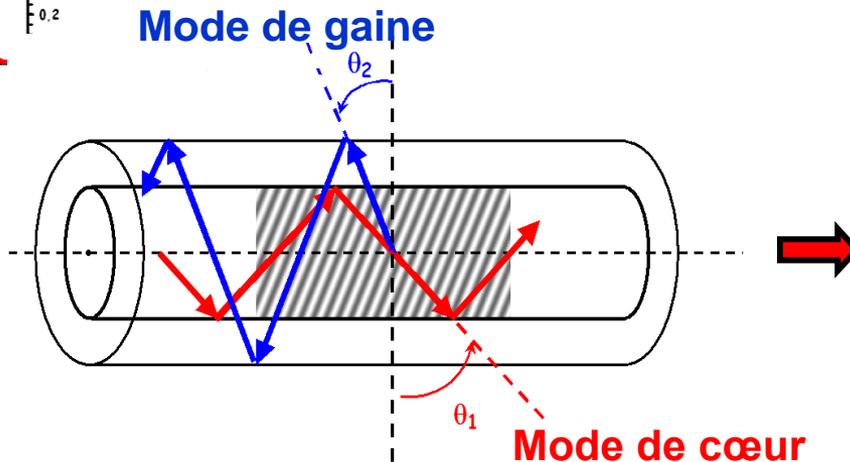
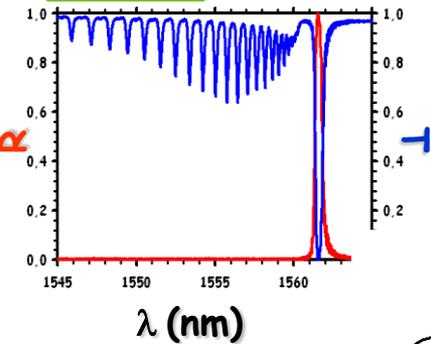
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{(1-2\nu)}{E} \left[1 - \frac{n^2}{2} (2p_{12} + p_{11}) \right] P$$

Exemple de réponse en pression
d'un **réseau de Bragg surgainé** 





Mesures réfractométriques par réseaux en angle



RdB en angle

Couplage vers

Modes de cœur
Modes de gaine
Modes radiatifs



Dépendance avec n_{ext}



Réfractométrie : Caractéristiques métrologiques

- Dynamique de mesure

1,3 à 1,45

1,45 à > 1,6

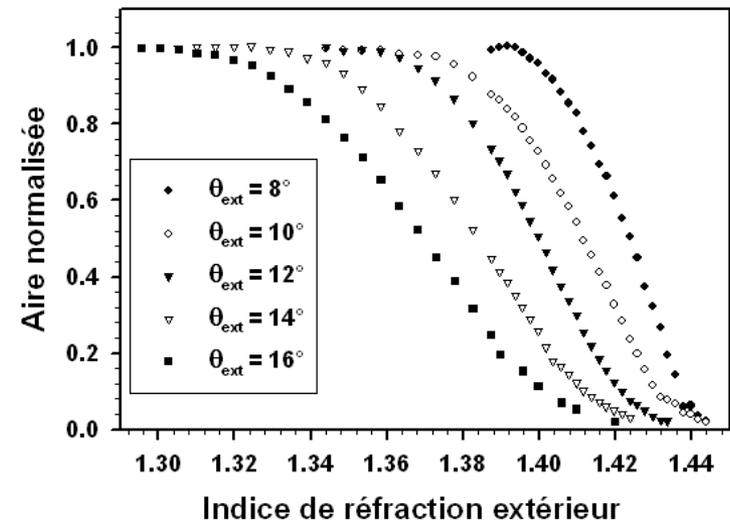
- Résolution

2×10^{-5} r.i.u.

10^{-3} r.i.u.

- Sensibilité croisée avec la température

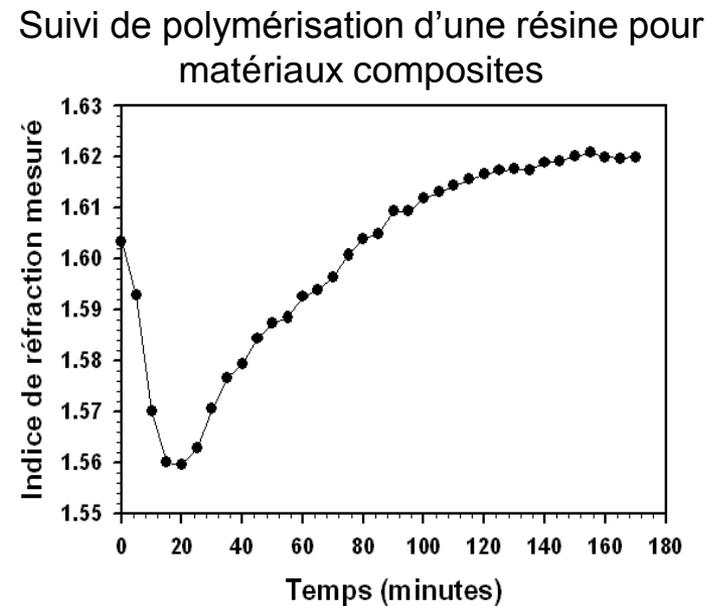
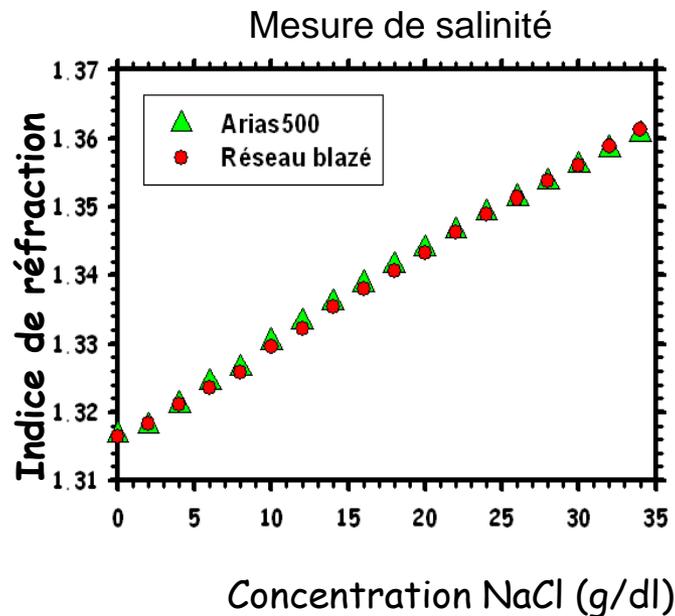
$< 2 \times 10^{-5}$ r.i.u./°C



Quelques Applications potentielles



- (Bio-)Chimie : mesures d'indices en solutions aqueuses
- Matériaux composites : surveillance de *process*
- Contrôle de produits pétroliers





Sylvain Magne / Pierre Ferdinand

CEA List

DIMRI-SIAR-Laboratoire de Mesures Optiques

Centre d'Etudes de Saclay

91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Tél : 01.69.08.83.39 pierre.ferdinand@cea.fr