

**Institut français des sciences et technologies
des transports, de l'aménagement et des réseaux**

Applications des capteurs à fibres optiques dans la génie civil: étude des cas

« IFSTTAR / CoSys- LISIS

2ème Journée Thématique du Club Fibres Optiques et
Réseaux

Aghiad KHADOUR



IFSTTAR

Université de Cergy-Pontoise, ENSEA
25 Mai 2016

Problématiques

Les différents problèmes reliés aux structures dans les infrastructures

➤ Performances et durée de vie des infrastructures :



Critères de fonctionnalité

Critères de sécurité

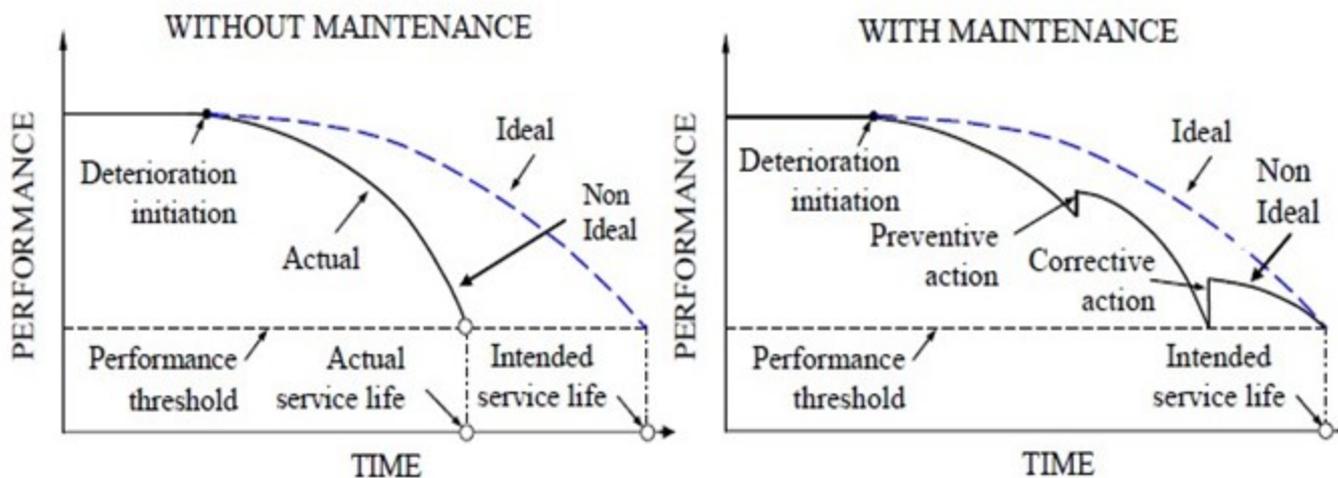
Critères de durabilité, de service,
économiques

Critères imposés par
les autorités

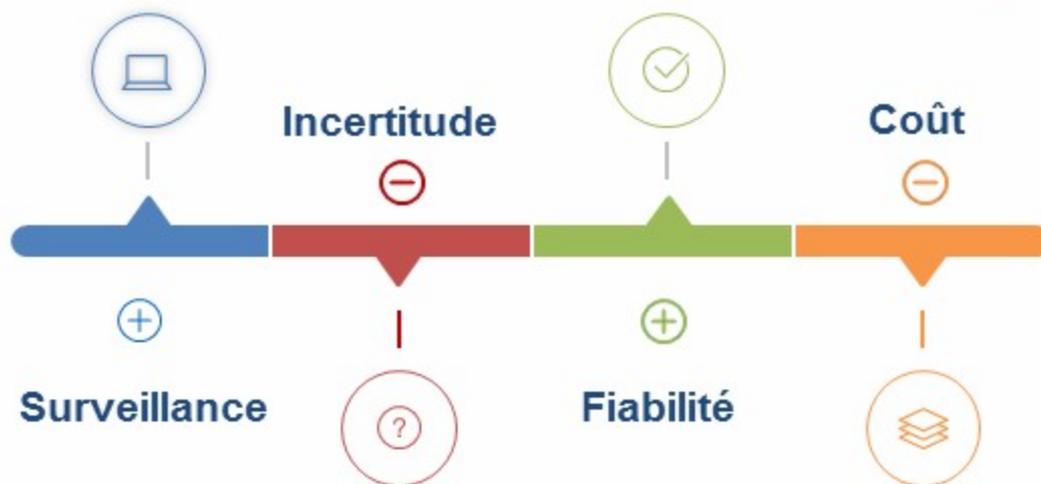
*Les **performances** des infrastructures.*

⌋ Performances et durée de vie des infrastructure : Maintenance

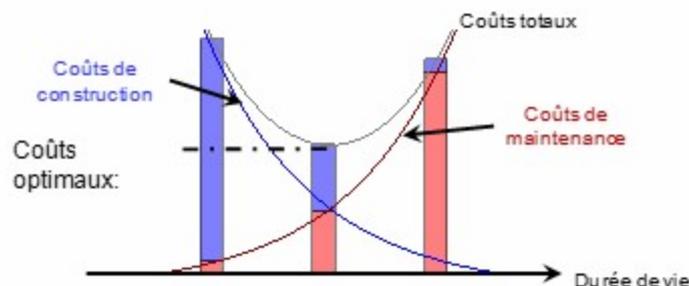
- 🏷 Maintenance préventive:
- Augmentation des performances
 - Diminution du taux de détérioration



① Performances et durée de vie des infrastructures : Évaluation du cycle de vie



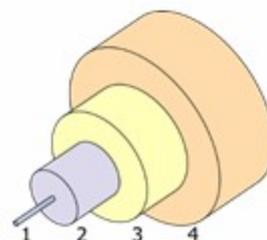
② Optimisation coûts de maintenance / durée de vie:



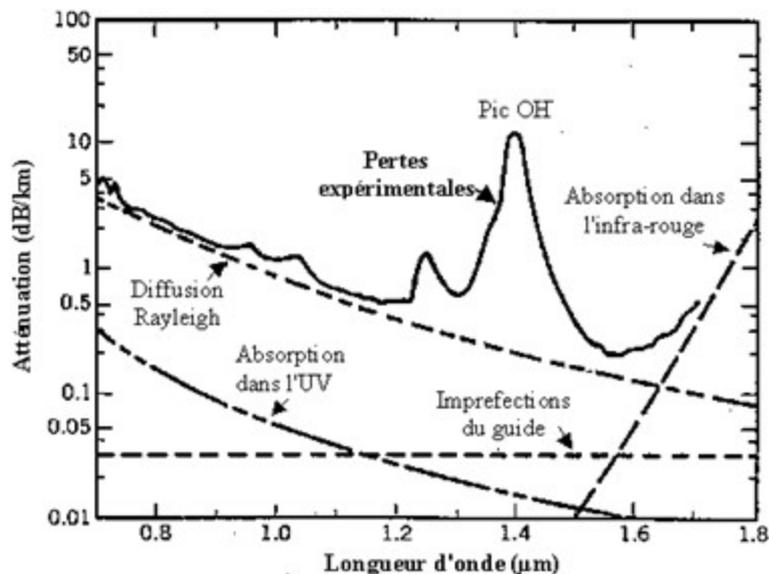
📋 Nécessité de mettre en place un système de surveillance de la santé structurale (**SHM**) : l'installation d'une instrumentation continue sur de grands linéaires ou de grandes surfaces ⇒ **l'utilisation de fibres optiques**

Évolution des fibres optiques pour des applications Telecom.

1. Cœur (indice de réfraction n_0).
2. Gaine optique (indice de réfraction n_1): $n_0 > n_1$
3. Revêtement primaire
4. Gaine mécanique



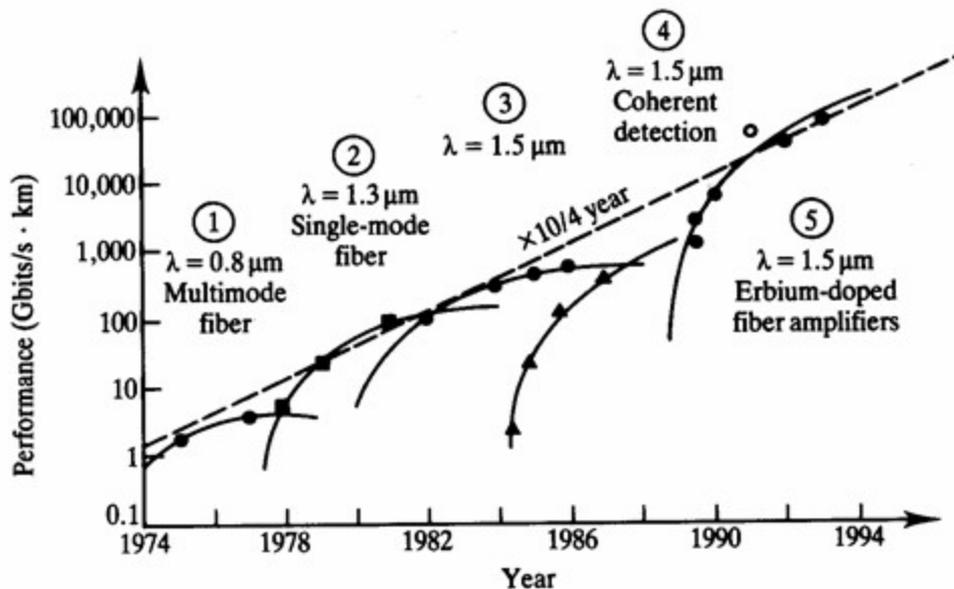
Atténuation avec la longueur d'onde des fibres optiques standard (SMF28).



Capteurs à fibres optiques

Les fibres optiques dans les télécommunications

Évolution des fibres optiques pour des applications Telecom.

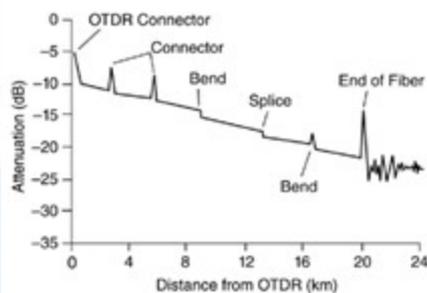


Comment passer au capteur à fibre optique?



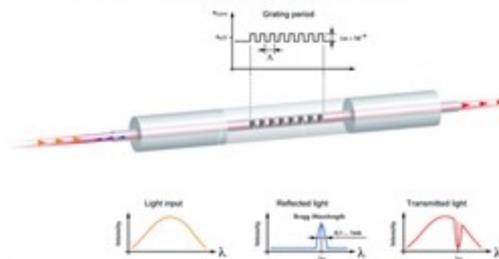
L'atténuation avec la propagation

Ex: OTDR



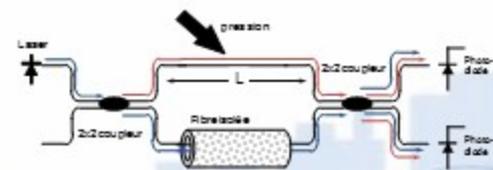
Réflexion

Ex: Réseaux de Bragg



L'interférence

Ex: Michelson, Mach-Zehnder, etc...



Capteurs à fibres optiques

Phénomènes de rétrodiffusion utilisés pour les capteurs à fibres optiques réparties



Rétrodiffusion Rayleigh

Réflexion avec réseaux de Bragg d'un pas aléatoire tout au long de la fibre

Phénomène optique **élastique**: ϵ, T .



Rétrodiffusion Brillouin

Déformations avec une modification locale de l'indice de réfraction

-Phénomène optique **non-élastique**: ϵ, T .



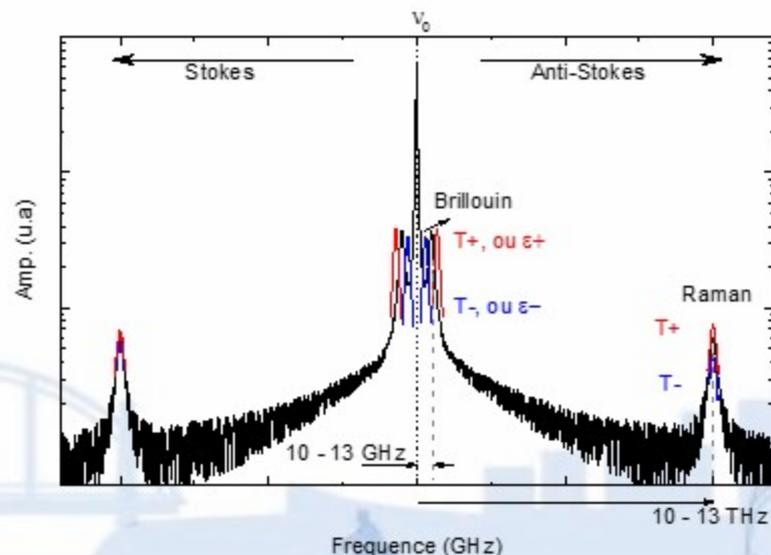
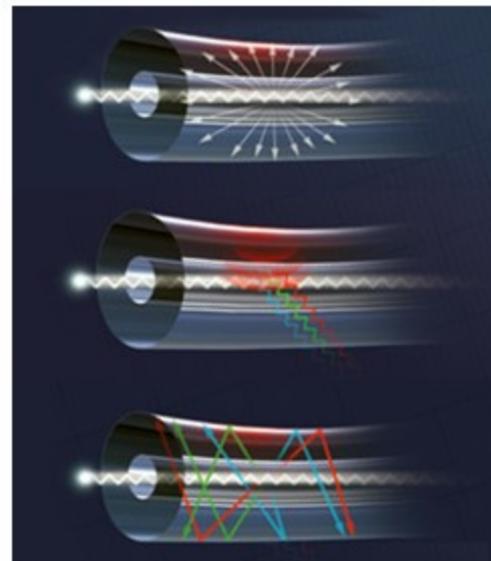
Rétrodiffusion Raman

Transfert d'énergie entre les photons incidents, les photons rétrodiffusés et les phonons.

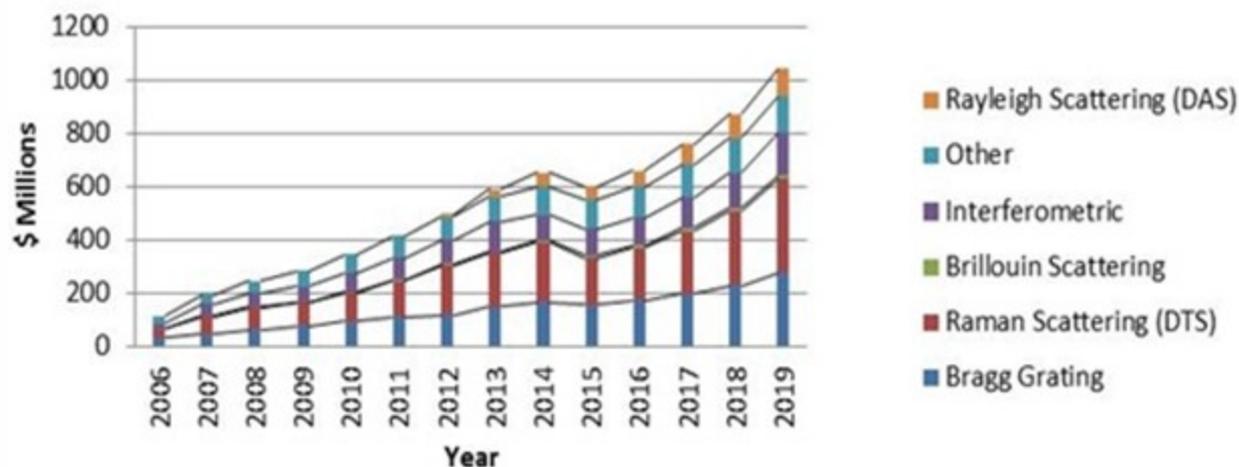
-Phénomène optique **non-élastique**: T .



Spectre de rétrodiffusion par la silice traversée par une onde avec une fréquence optique ν_0



Distributed Fiber Optic Sensor Market By Technology

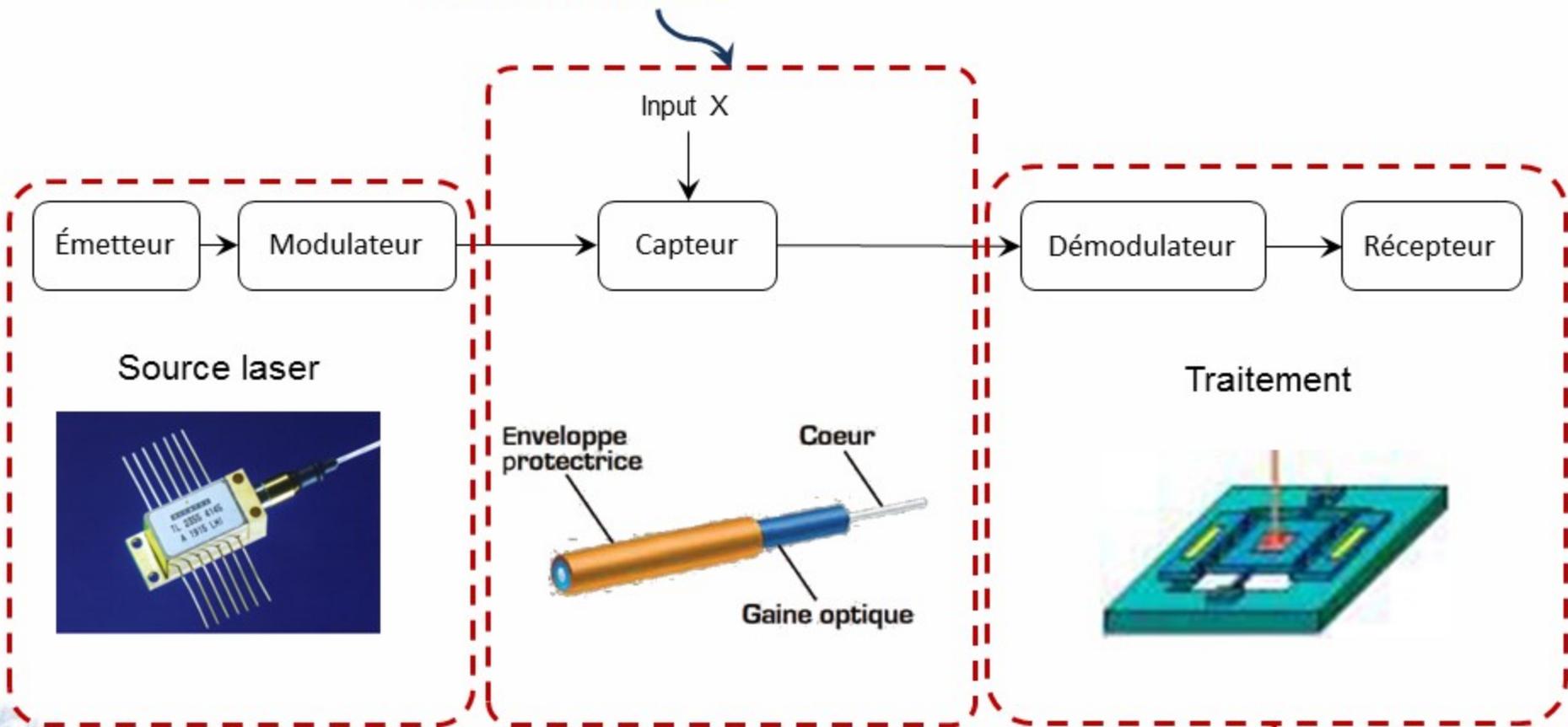


© 2015 Photonic Sensor Consortium Market Survey Report.

Capteurs à fibres optiques

Choix à l'IFSTTAR (COSYS/LISIS)

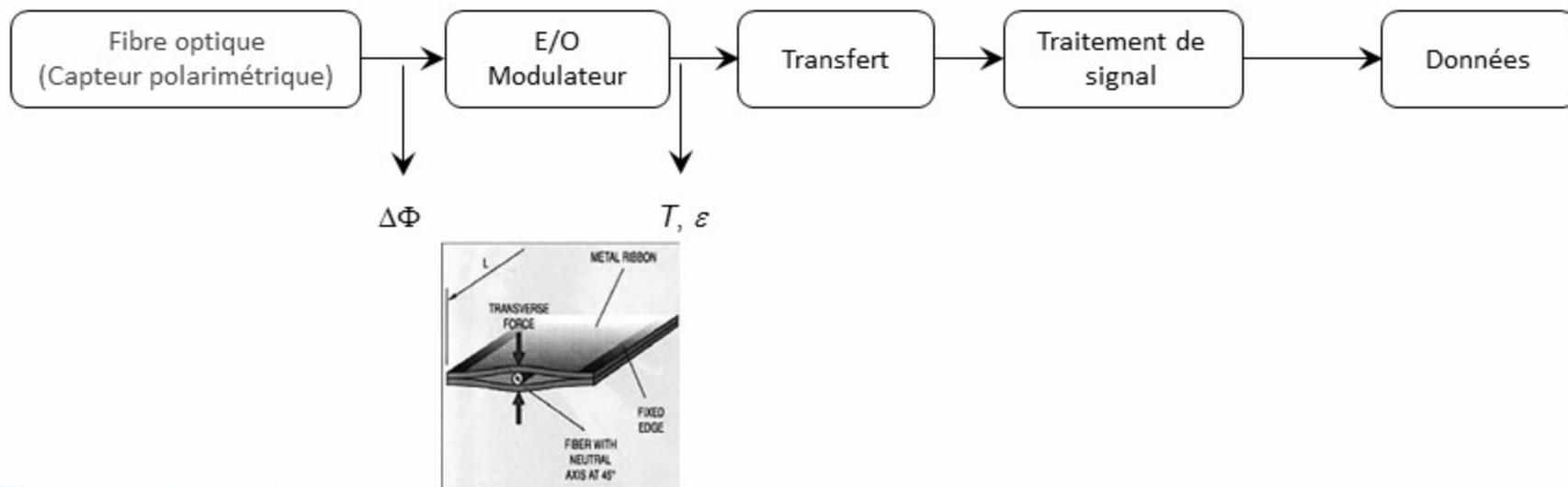
Intégration des Fibres optiques
dans des structures



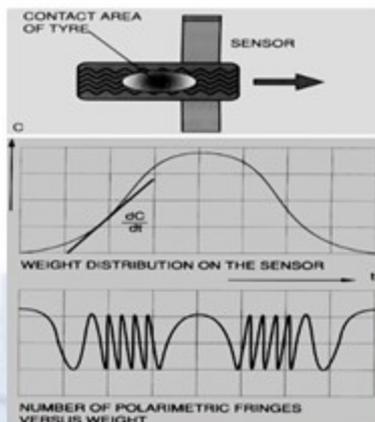
Développement des capteurs:

➤ Pesage en marche

🏷 Le principe

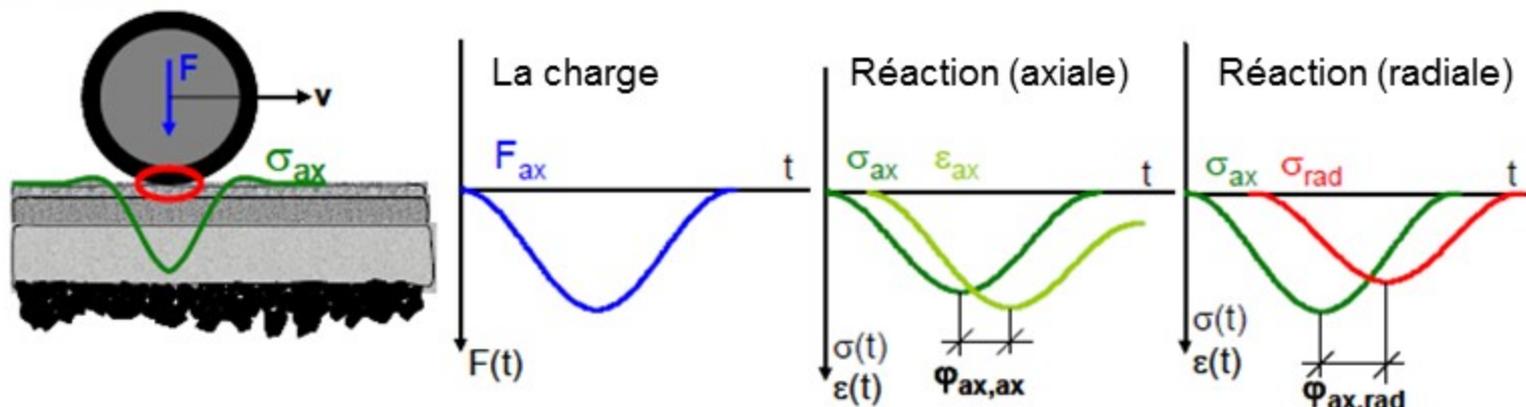


🏷 Le fonctionnement

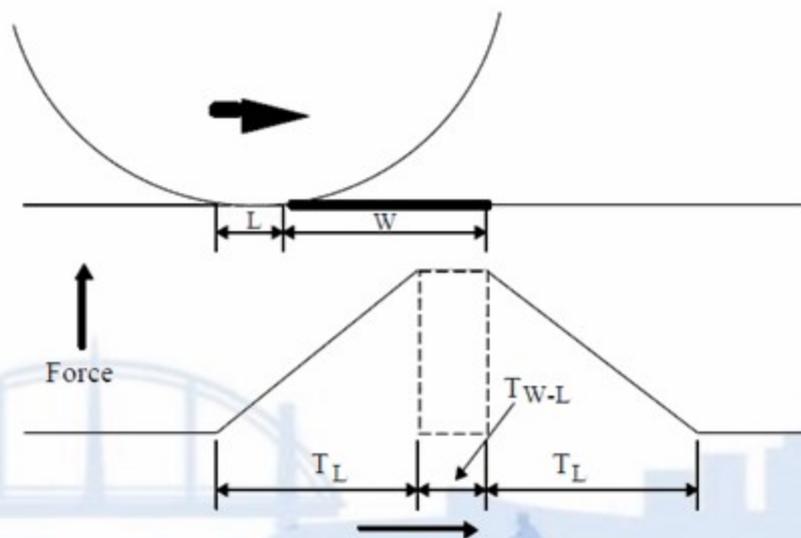


➤ Pesage en marche

🏷 Le phénomène



🏷 Effet des dimensions du système de mesure:

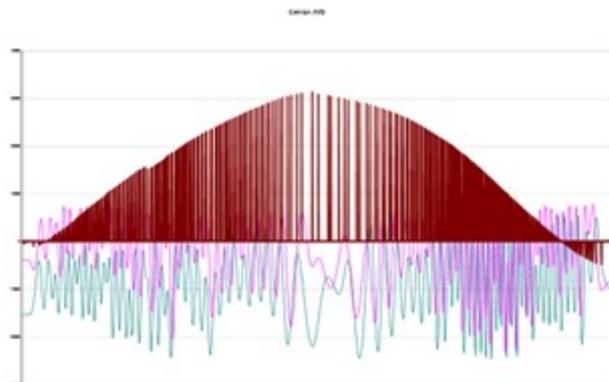


Projets et travaux à LISIS (en cours)

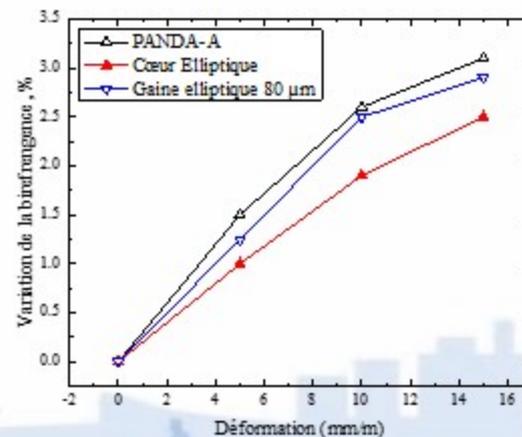
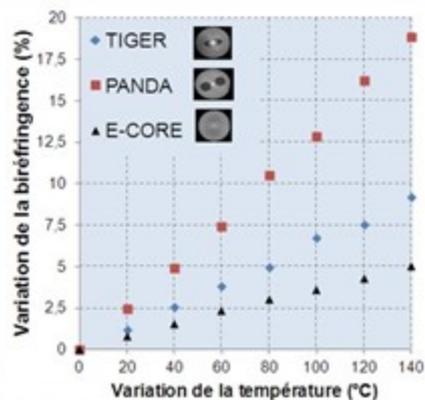
Historiques d'utilisation et développement des capteurs à fibres optiques à LISIS

➤ Pesage en marche

🏷️ Exemple des résultats: passage d'un roue de camion, avec une fibre monomode:



🏷️ Étude des fibres à maintien de polarisation:

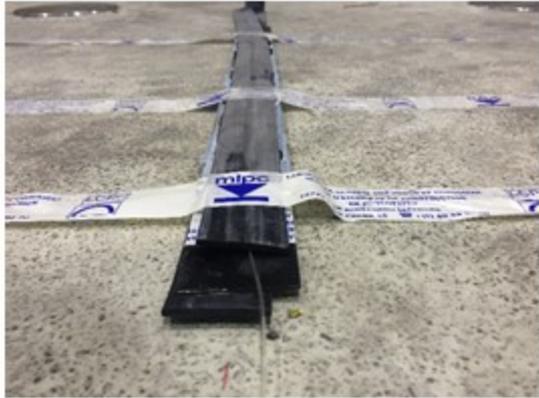


Projets et travaux à LISIS (en cours)

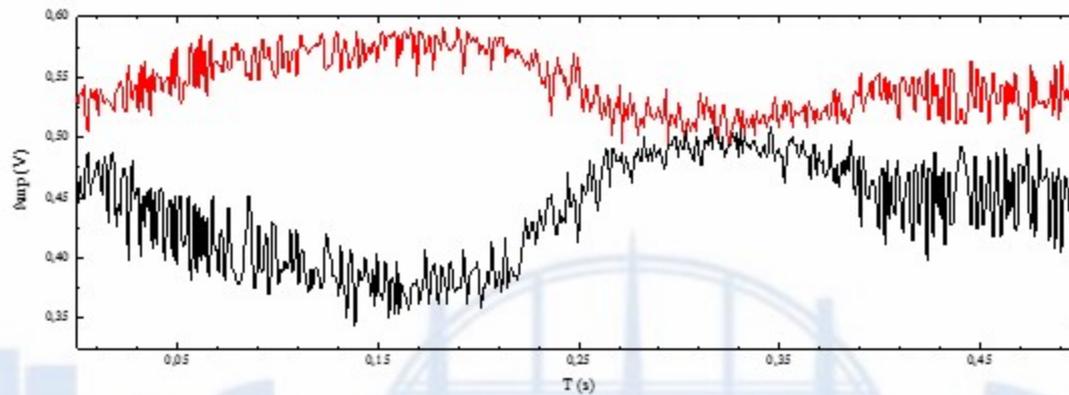
Historiques d'utilisation et développement des capteurs à fibres optiques à LISIS

➤ Pesage en marche

🏷️ Conception en version de test, utilisation d'une fibre (e-cœur) :



🏷️ Résultats des tests:



➤ Meilleur choix des câbles à fibres optiques : exemples

☰ Câble AFL

Comporte quatre fibres optiques : deux fibres monomodes et deux fibres multimodes.
Un revêtement plastique souple rendant ce câble facile d'emploi, mais avec une certaine fragilité.



☰ Câble SSV3

Comporte une fibre monomode placée dans des revêtements successifs (plastique et métal)



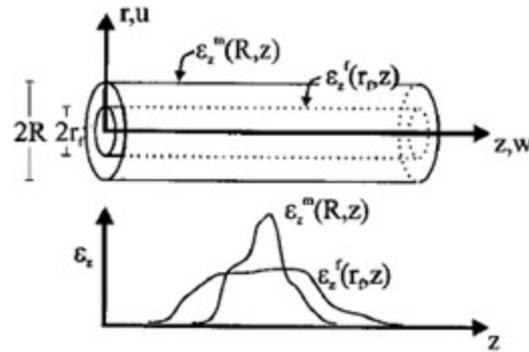
☰ Câble BruSteel

quatre fibres optiques multimodes placées dans un tube métallique et un revêtement plastique.

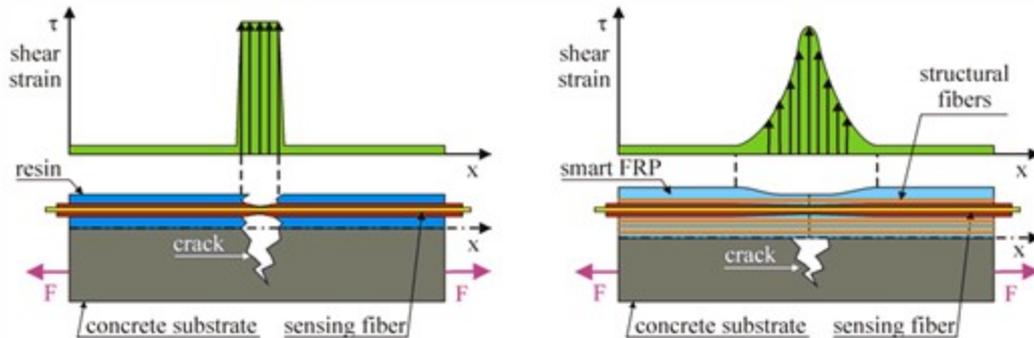


Intégration optimale des fibres optiques dans les structures:

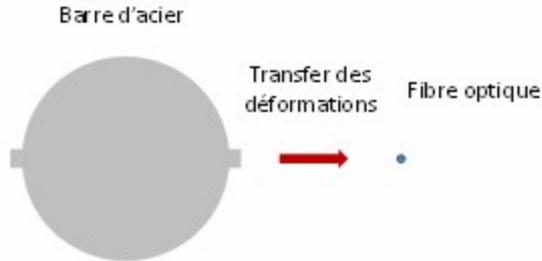
Transfert des efforts mécaniques vers la fibre optique



Effet d'enrobage :



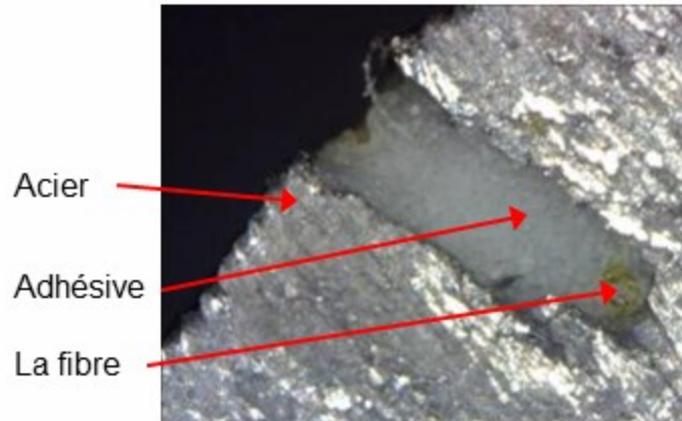
Intégration optimale des fibres optiques dans les armatures:



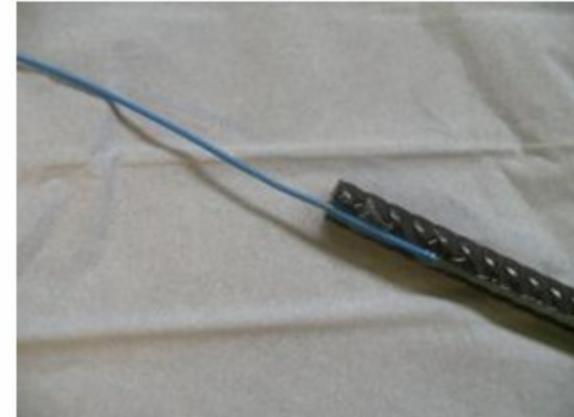
L'adhésif entre le revêtement primaire et l'armature:
-Protection de la fibre optique (chimiquement et mécaniquement)



Géométrie de l'engravure pour installer la fibre optique

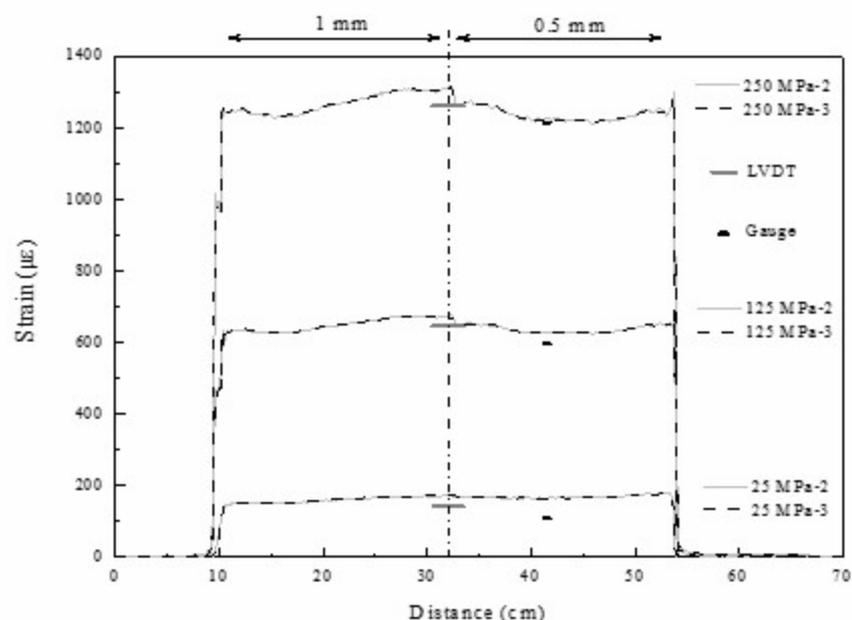
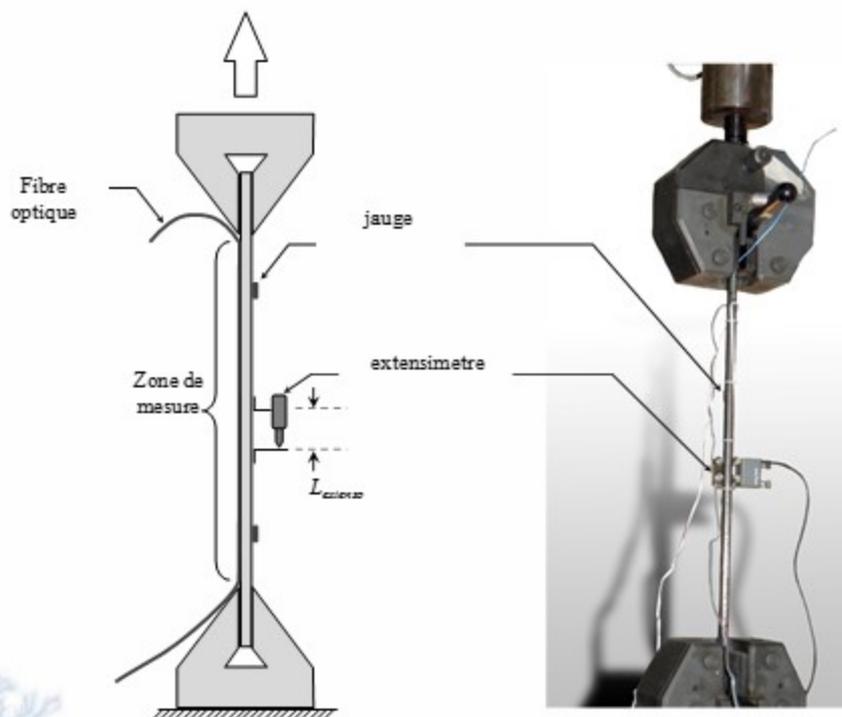


La fibre installée dans l'engravure



Intégration optimale des fibres optiques dans les armatures: Résultats

Traction simple sur acier HA instrumenté

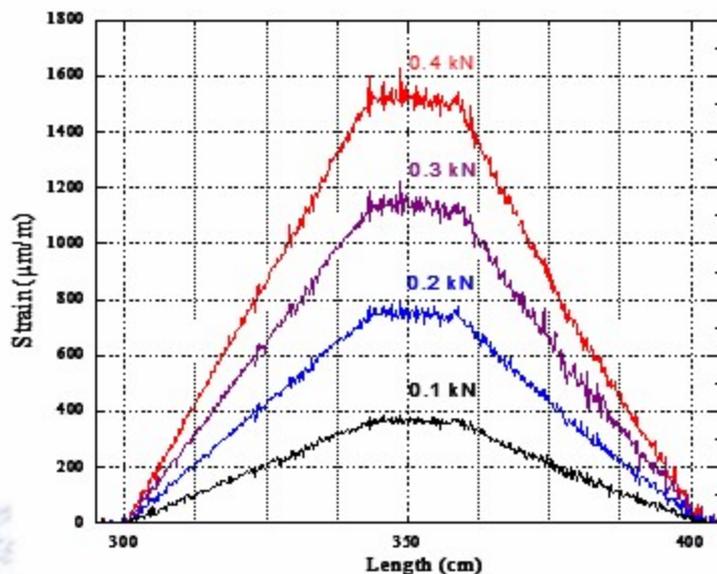
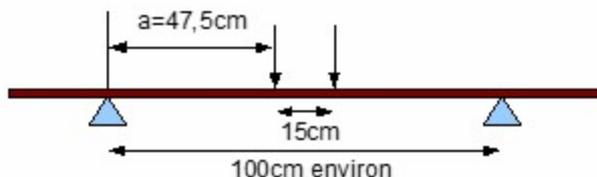


☞ Déformations mesurées, avec comparaison Jauges, extensomètre.

☞ Les déformations mesurées par FO sont avec précision $2\mu\text{m/m}$, résolution spatiale 5mm).

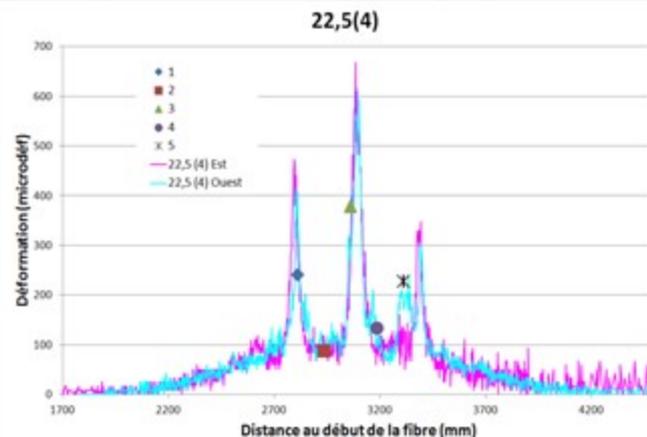
Intégration optimale des fibres optiques dans les armatures: Résultats

flexion 4 points sur armature



Les déformations mesurées par FO sont avec précision $4\mu\text{m/m}$, résolution spatiale 2mm).

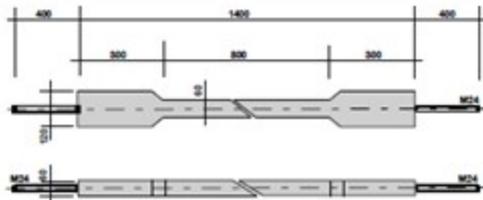
flexion 4 points sur poutre (2.5 m):



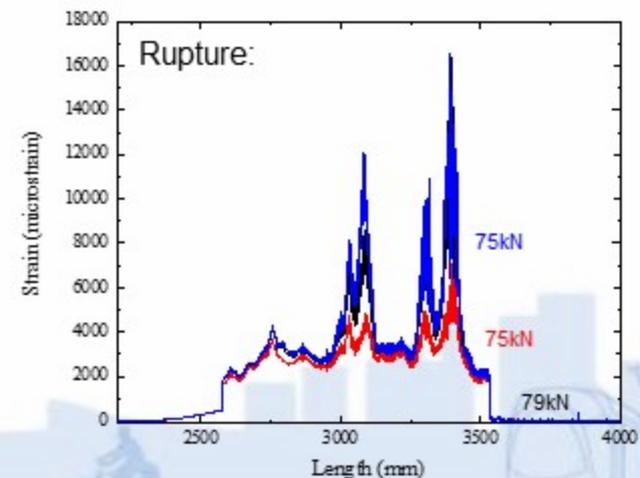
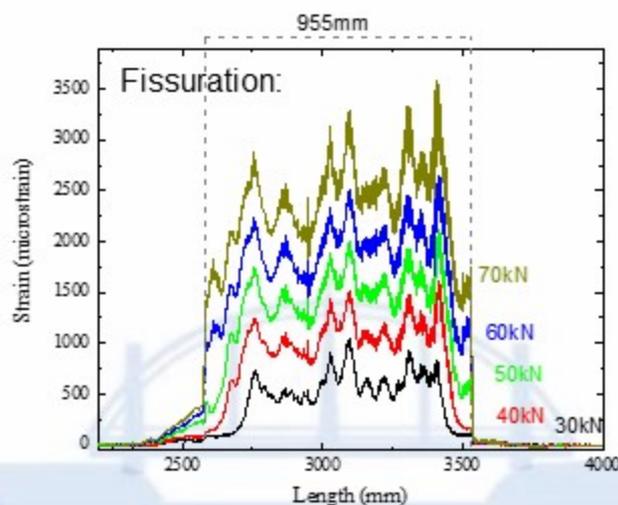
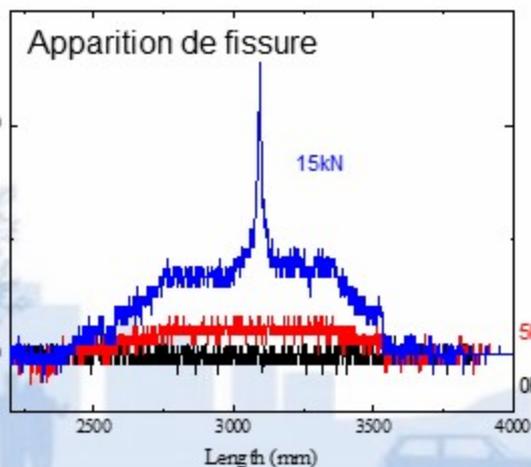
Les déformations mesurées par FO sont avec précision $2\mu\text{m/m}$, résolution spatiale 5mm).

Intégration optimale des fibres optiques dans les armatures: Résultats

Traction de structure BFUP avec acier HA instrumenté

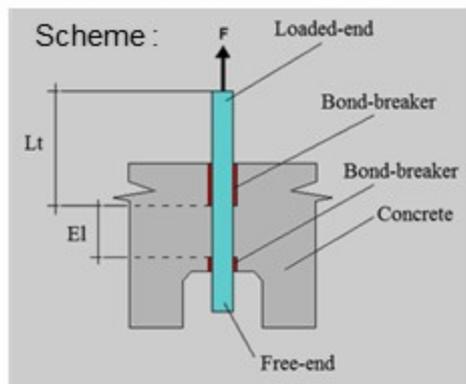


Profile de déformation précision 4 μ m/m, résolution spatiale 2mm

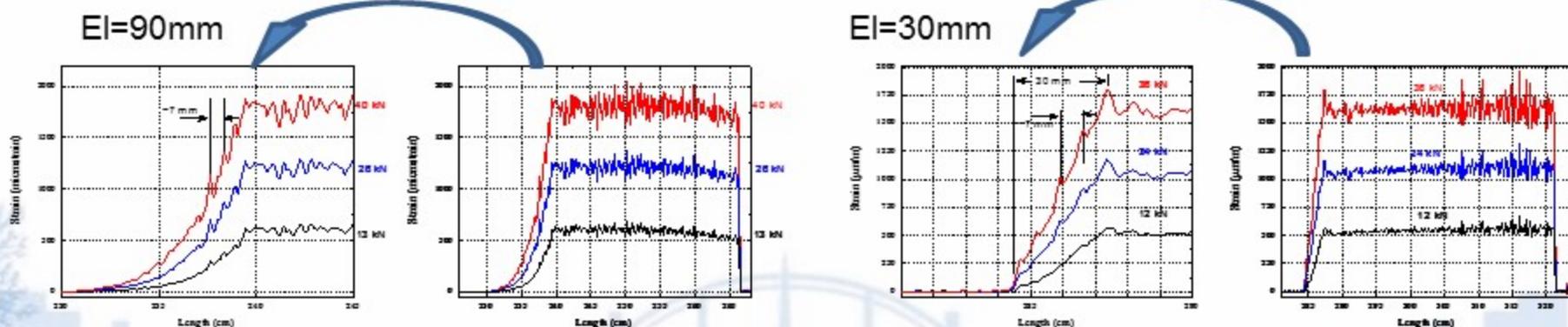


Intégration optimale des fibres optiques dans les armatures: Résultats

Tests d'arrachement, BFUP avec acier HA instrumenté



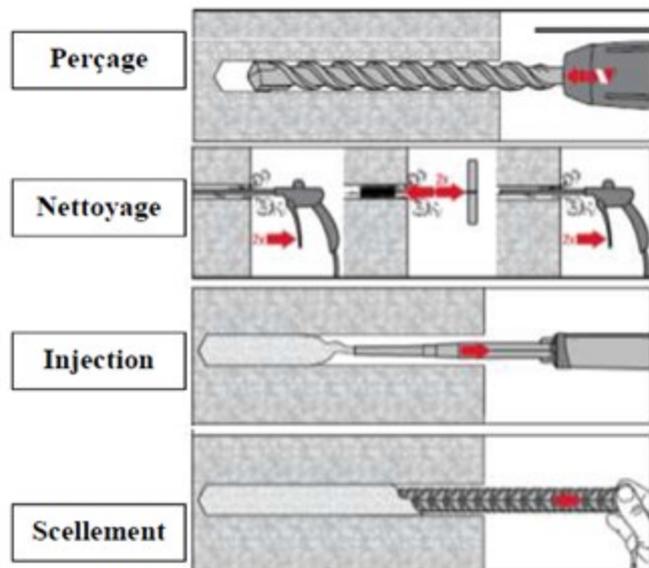
Résultats (précision $4\mu\text{m}/\text{m}$, résolution spatiale 2mm):



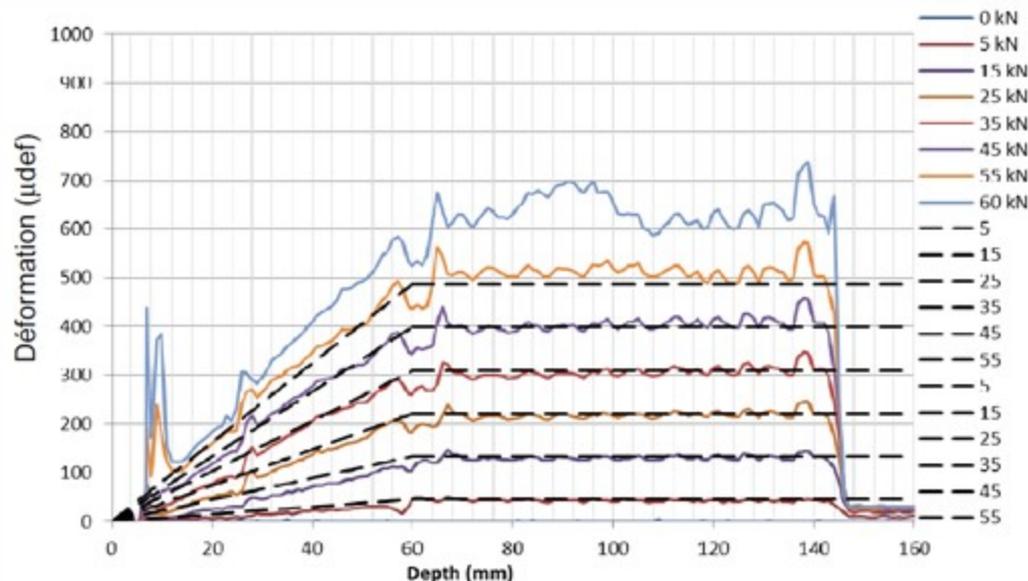
Intégration optimale des fibres optiques dans les armatures : applications

Ancrage d'une armature dans une structure béton en utilisant un adhésif polymère

Installation:



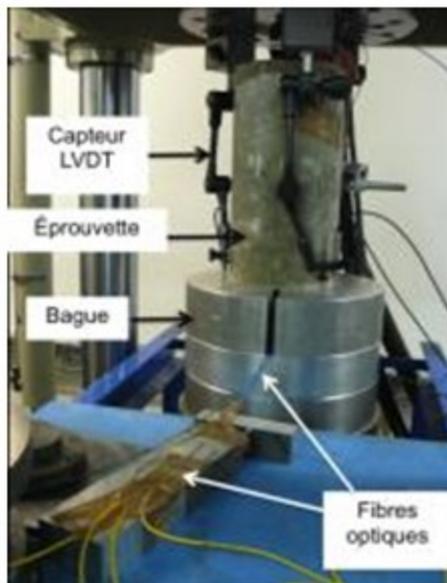
Résultats (précision 4 μ m/m, résolution spatiale 5mm):



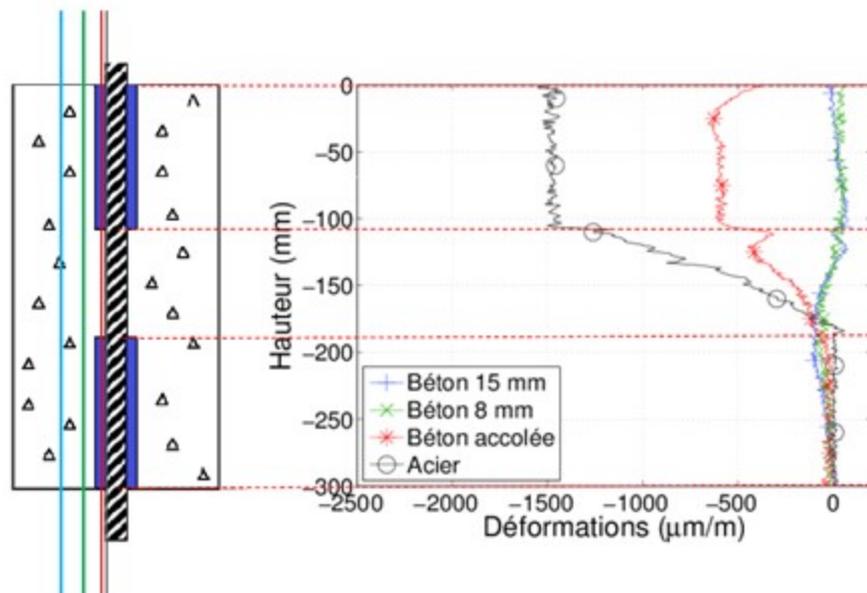
Intégration optimale des fibres optiques dans les armatures : application

Analyse du comportement de l'interface acier-béton pas essai push-in. Mesures par fibres optiques

Principe de l'essai:



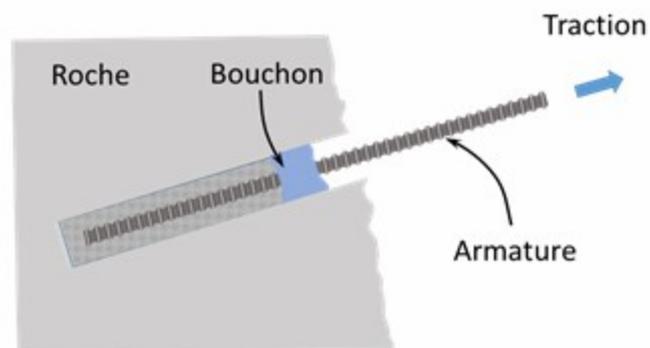
Résultats (précision $4\mu\text{m/m}$, résolution spatiale 5mm):



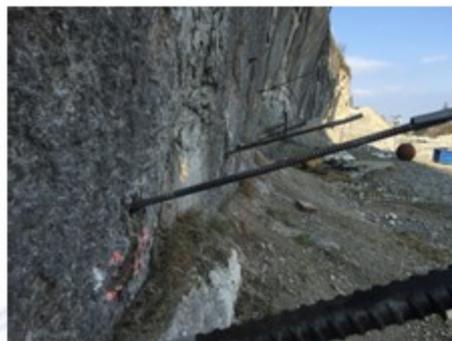
Intégration optimale des fibres optiques dans les armatures : application

Étude du comportement en traction-cisaillement des ancrages passifs de confortement au rocher scellés au mortier

Le principe:



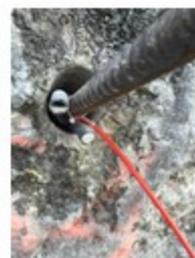
Le montage de l'essai



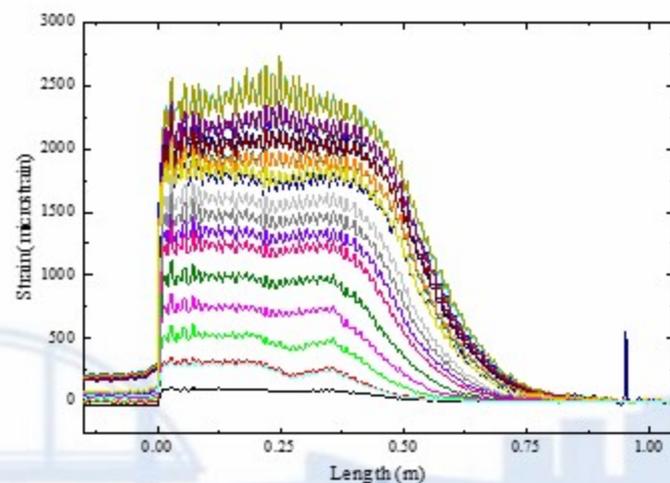
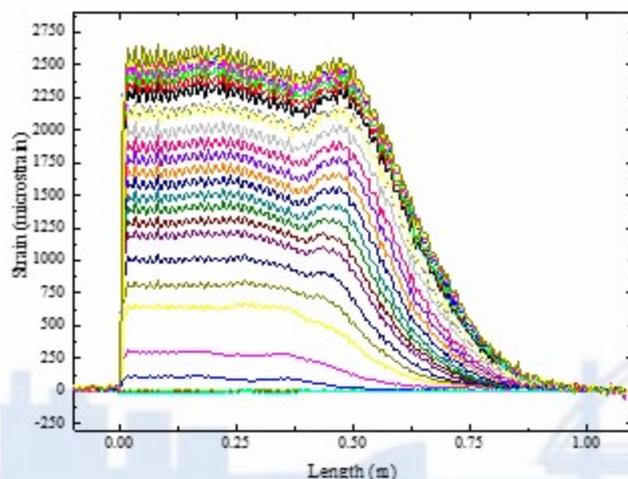
Intégration optimale des fibres optiques dans les armatures : application

Étude du comportement en traction-cisaillement des ancrages passifs de confortement au rocher scellés au mortier

Armatures instrumentés



Résultats: deux exemples (précision $4\mu\text{m/m}$, résolution spatiale 6mm):



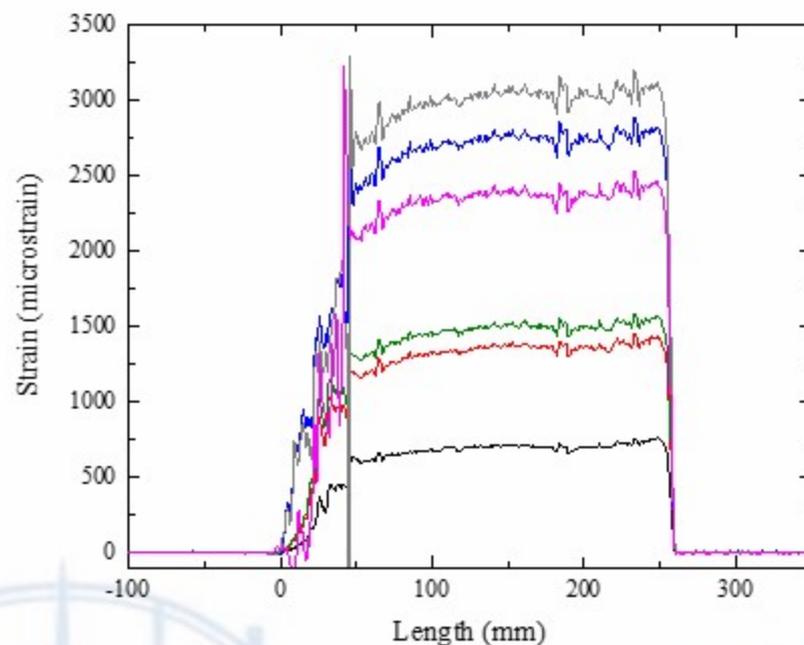
Intégration optimale des fibres optiques dans les armatures : armatures en composites

🏷️ Ancrage d'une armature dans une structure béton en utilisant un adhésif polymère

➡️ Installation:



➡️ Résultats (précision 4µm/m, résolution spatiale 5mm):

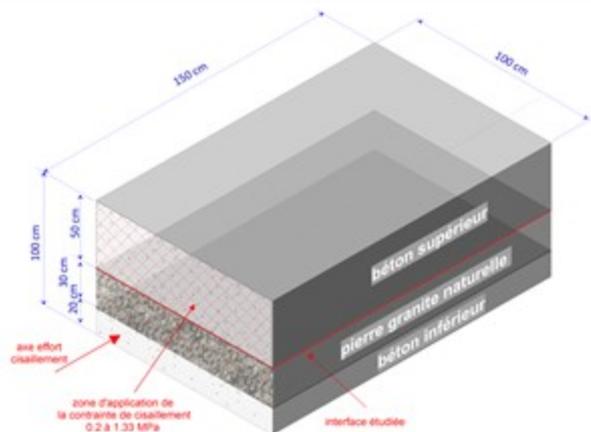


Intégration optimale des fibres optiques dans les structures :

Résistance au cisaillement et comportement des interfaces entre roche et béton à la base des barrages poids

Schéma de principe du test

Installation du bloc à tester:



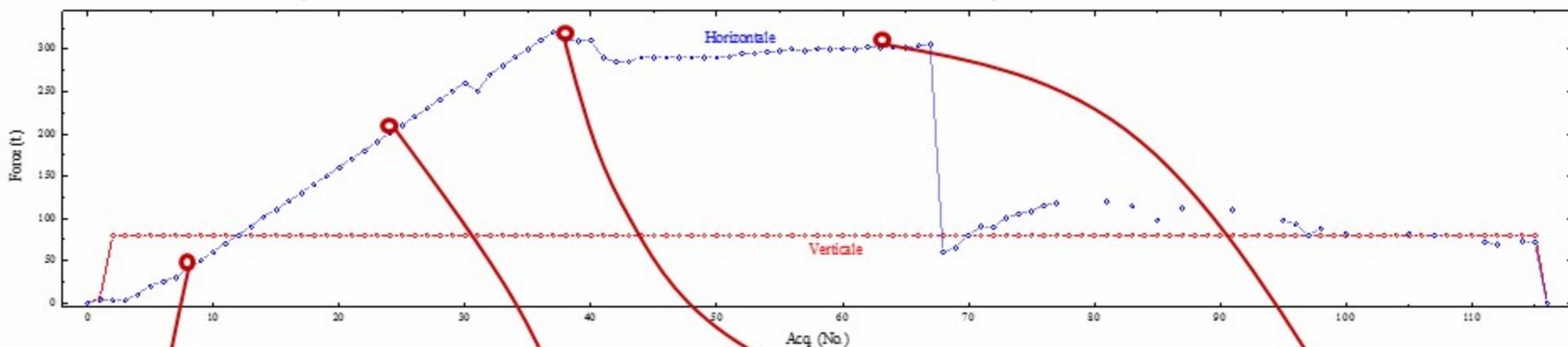
Intégration optimale des fibres optiques dans les structures :

Résistance au cisaillement et comportement des interfaces entre roche et béton à la base des barrages poids

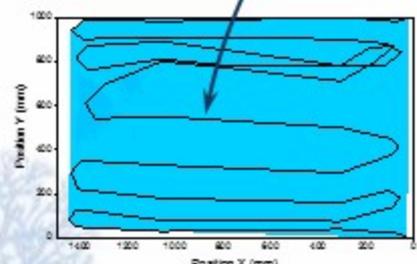
Compression

Fissuration

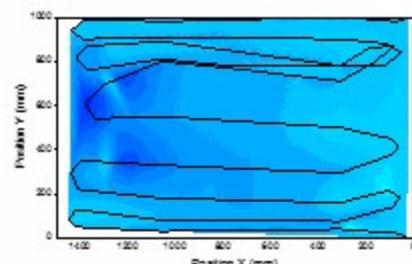
Rupture



La positionne réel de la fibre optique

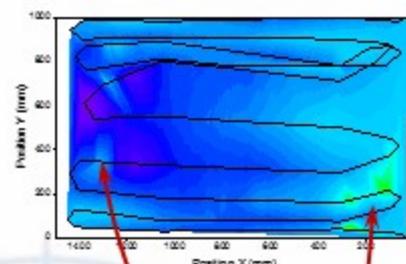


08-V80T H40T



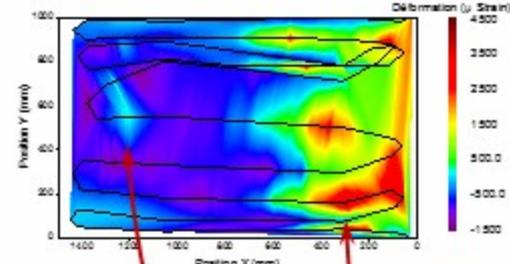
34-V80T H300T

Compression



39-V80T H310T

Apparition des fissures



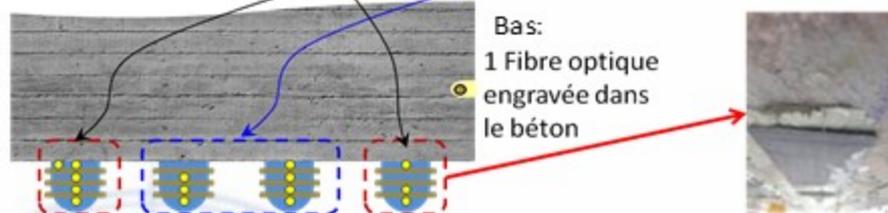
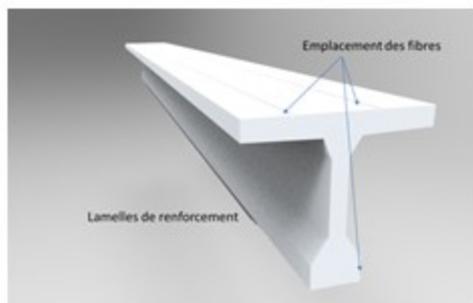
63-V80T H302T

Propagation des fissures

Déformations projetées sur maillage x,y suivant la position de la fibre optique précision 4 μ m/m, résolution spatiale 5mm):

Intégration optimale des fibres optiques dans les structures :

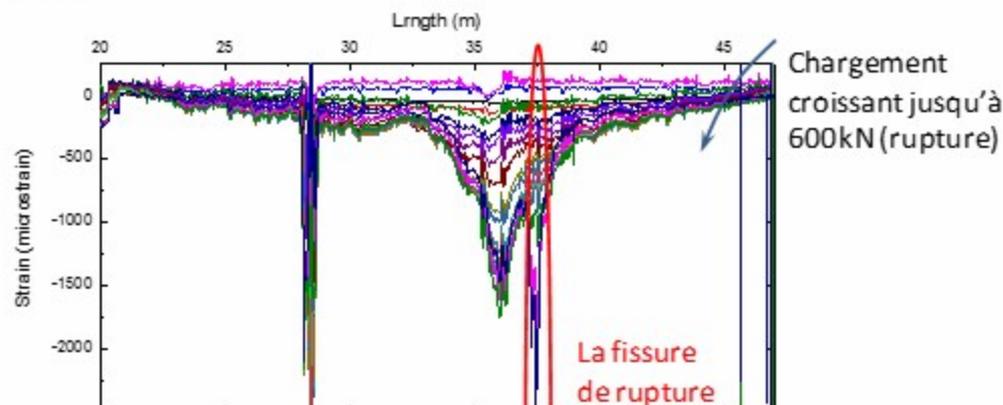
- Instrumentation de la poutre VIPP de Clerval : caractériser la durée de vie résiduelle, les phénomènes d'endommagement et les dispositifs de renforcement



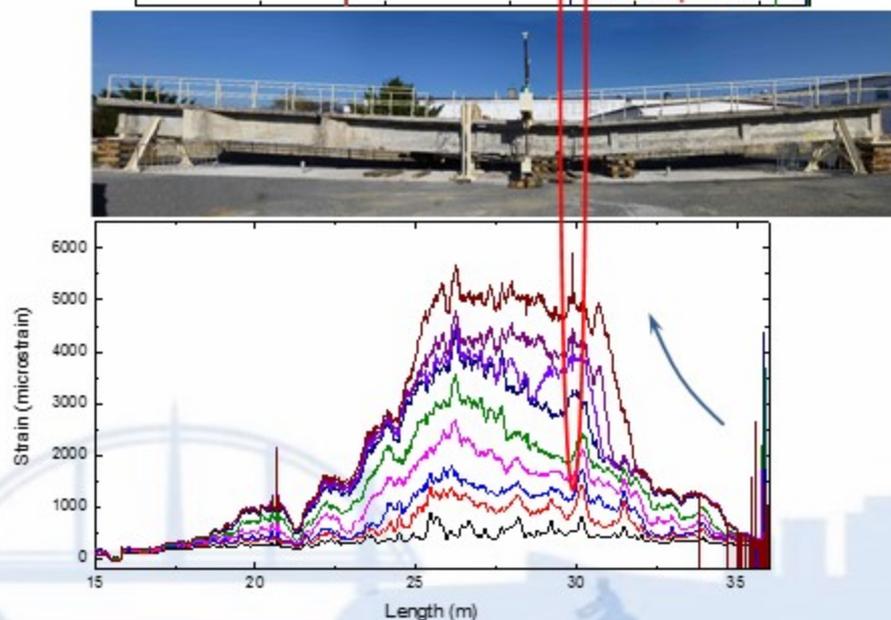
Intégration optimale des fibres optiques dans les structures :

- Instrumentation de la poutre VIPP de Clerval : caractériser la durée de vie résiduelle, les phénomènes d'endommagement et les dispositifs de renforcement

Fibre dans le béton (surface haute)

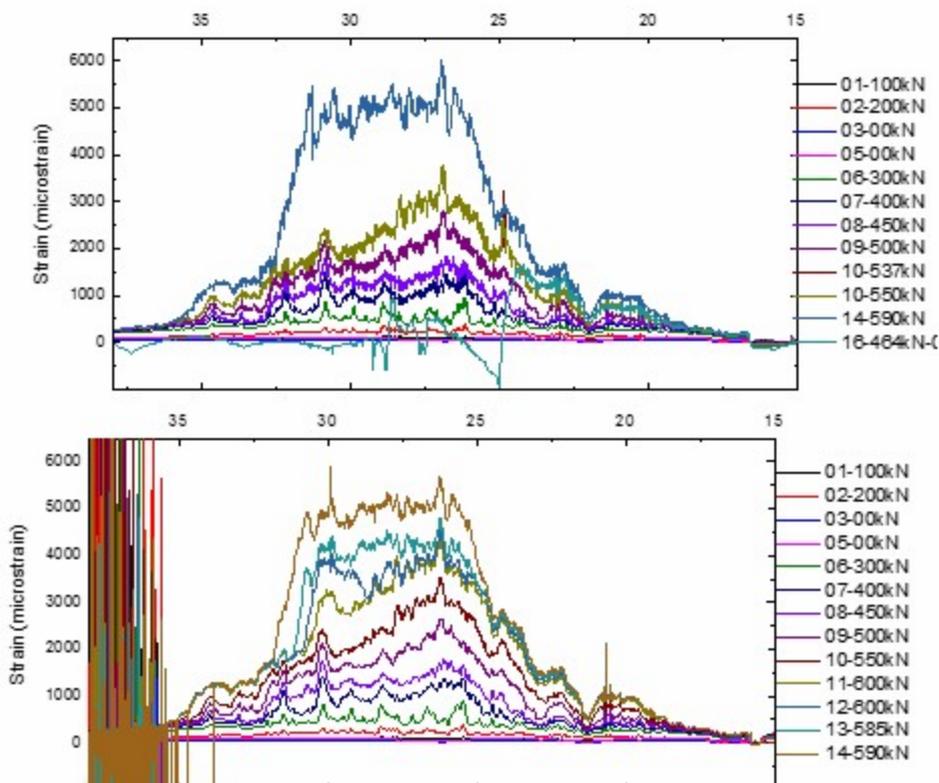
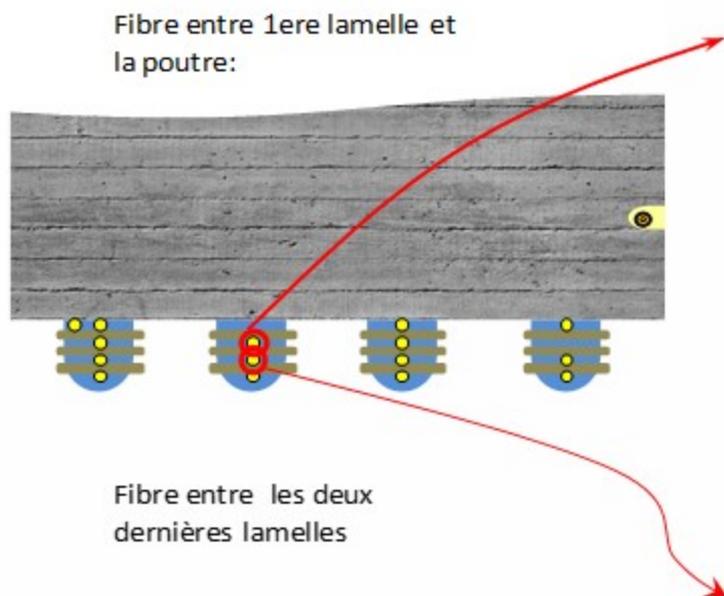


Fibre entre les lamelles de renforcement



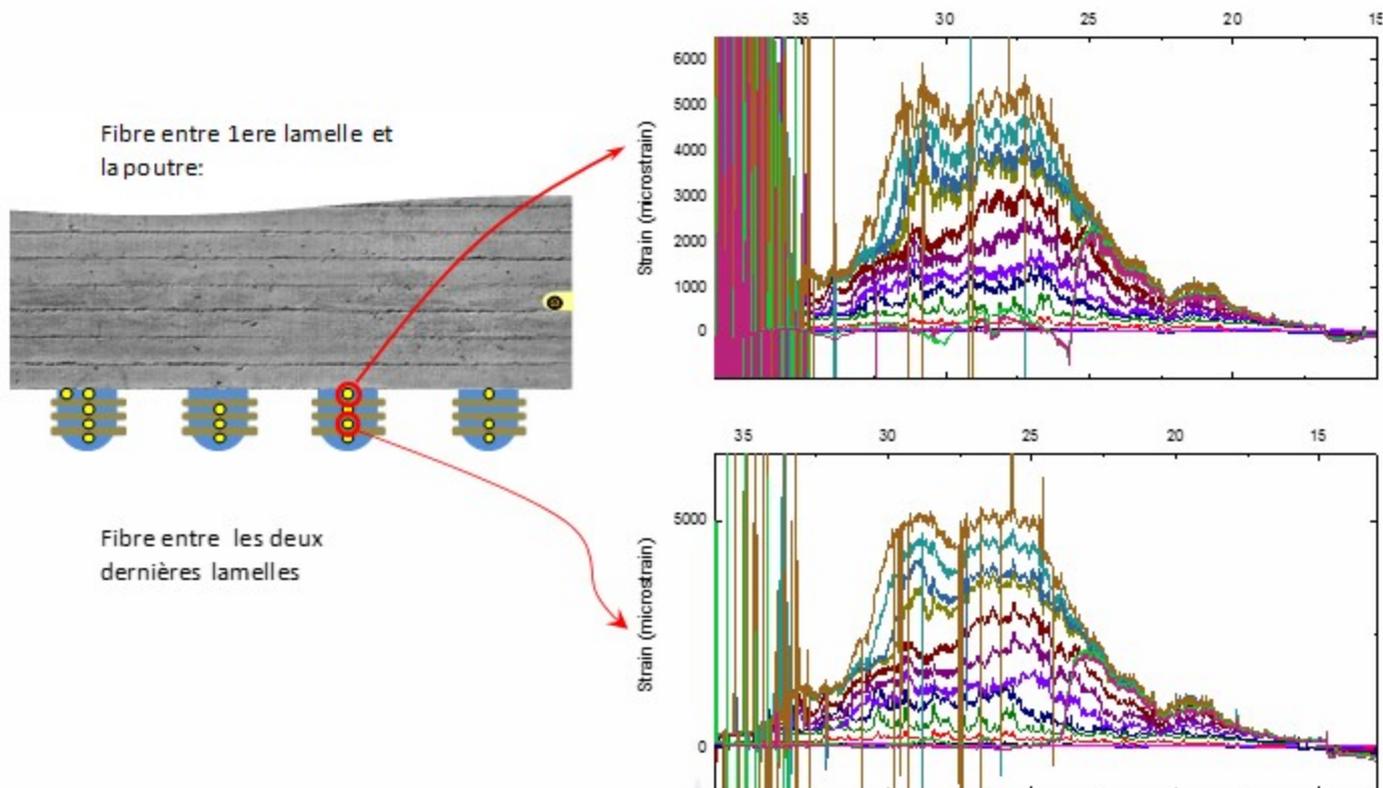
Intégration optimale des fibres optiques dans les structures :

- Instrumentation de la poutre VIPP de Clerval : caractériser la durée de vie résiduelle, les phénomènes d'endommagement et les dispositifs de renforcement



Intégration optimale des fibres optiques dans les structures :

- Instrumentation de la poutre VIPP de Clerval : caractériser la durée de vie résiduelle, les phénomènes d'endommagement et les dispositifs de renforcement



Intégration optimale des fibres optiques dans les structures :

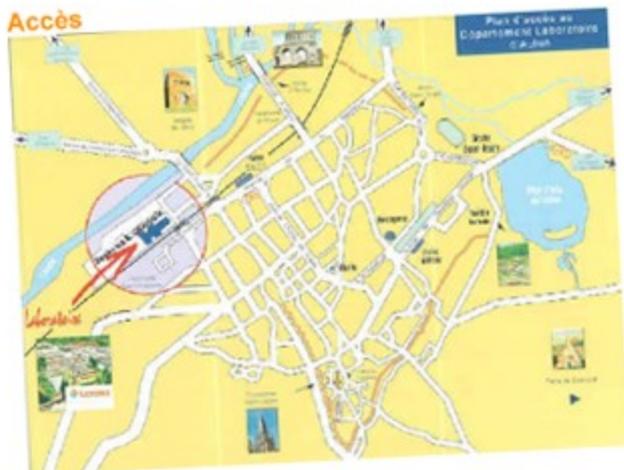
Modalités pratiques

Merci de confirmer au plus tard, le jeudi 23 juin 2016, votre présence à l'aide du bulletin d'inscription ci-joint par mail adressé à : jean-louis.villededy@cerema.fr et bernadette.sementa@cerema.fr
Pour participer au déjeuner, merci d'adresser un chèque de 16 € établi au nom de "Hôtel du Commerce" – Autun.

Contact

Cerema - Département Laboratoire d'Autun
Boulevard Bernard Giberstein
ZI de Saint Andoche BP 141
71404 AUTUN Cedex
Tel. : Bernadette SEMENTA : 03 85 86 67 40
Jean-Louis VILLEDEY : 03 85 86 67 09

Accès



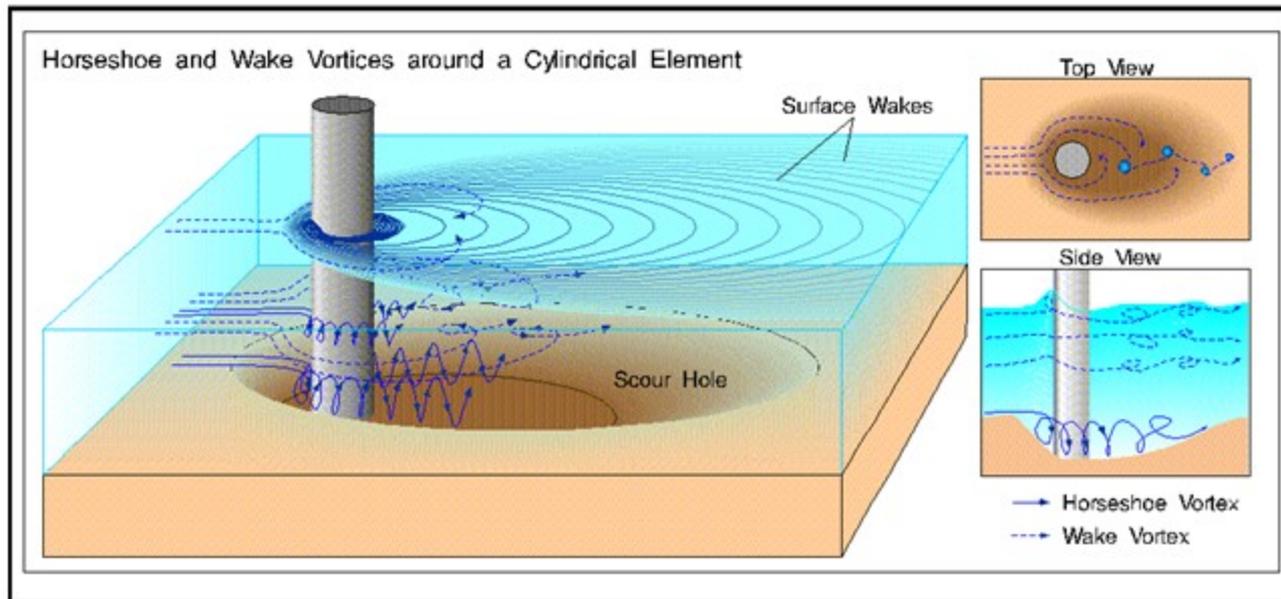
« Poutre de Cerval, une seconde rupture programmée »



Jeudi 30 juin 2016
A partir de 9h00
Autun

➤ Phénomène d'affouillement :

🏷 Analyse des déformations autour des piles de pont



➡ Le principe: mesurer les déformations par fibres optiques autour de piles de ponts,

➤ Développement d'un model 2D par éléments finis pour trouver la rétrodiffusion Brillouin

🏷 Le principe

- Onde acoustique

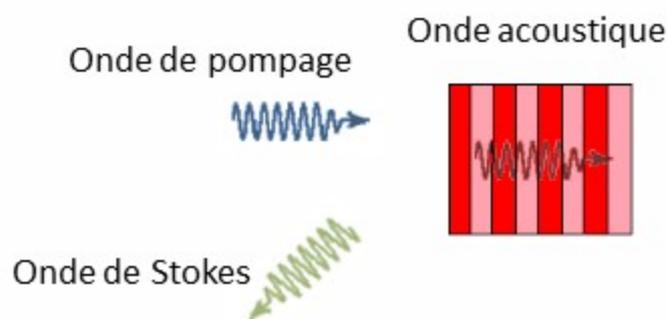


- Réseau de Bragg dynamique



- Onde de rétrodiffusion

Brillouin shift $\nu_B = \nu_0 + C_T \Delta T + C_\epsilon \Delta \epsilon$



$$\nu_B = \nu_S - \nu_0 = \pm \frac{2n_{eff} V_a}{\lambda_0}$$

🏷 L'approche



Recouvrement acousto-optiques



Spectre de gain Brillouin

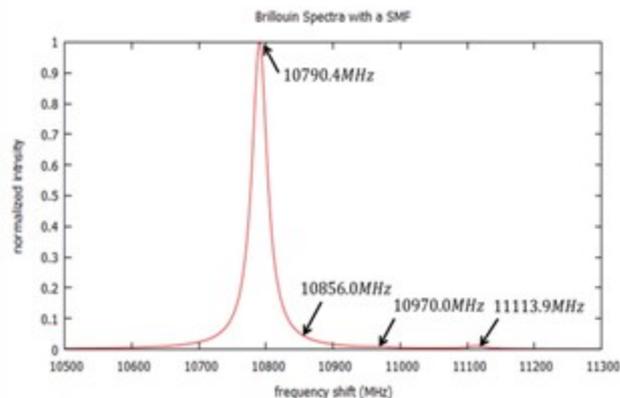
$$I_m^{ao} = \frac{(\int |E|^2 u_m^* dx dy)^2}{\int |E|^4 dx dy \cdot \int |u_m|^2 dx dy}$$

$$g(\nu) = \sum_m I_m^{ac} \frac{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}{\left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2 + (\nu - \nu_m)^2}$$

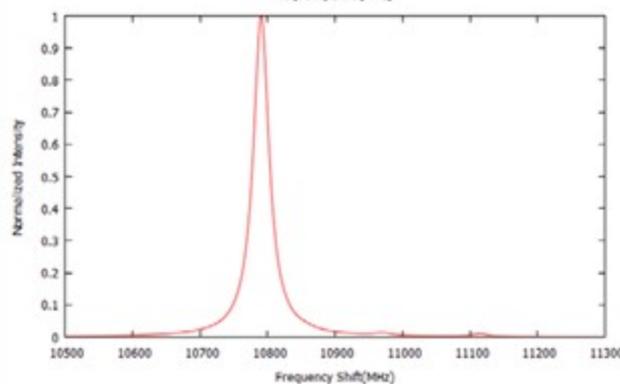
Exemples des résultats:



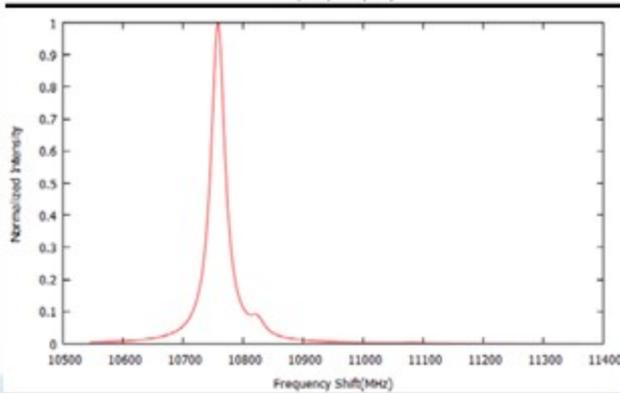
SMF28



PANDA



Bow-Tie



Conclusions, perspectives

Résumé des résultats, objectifs à moyenne et long terme

- La possibilité de l'instrumentation des armatures par fibres optiques:
 - Champs de déformation constant (Traction uni-axiale), Champs de déformation gradué (arrachement).
 - Les fissures sont détectables au niveau des fibres optiques.
 - Etude et optimisation de la fonction de transfert barre d'acier-fibre optique.
- Caractérisation de la durabilité des Fibres Optiques (suivant l'enrobage).
- Capteurs Quasi-répartis de la corrosion,
- Optimisation de la détection et traitement des spectres Brillouin dans les fibres optiques.
- Instrumentation active des infrastructures (détection des fissures loin de FO)

Partenaires:





Merci de votre attention

Ifsttar

14-20 Bld. Newton

Cité Descartes

Champs sur Marne

77447 Marne-la-Vallée Cedex 2

France

Tél. +33 (0)1 81 66 80 00

www.ifsttar.fr

communication@ifsttar.fr