



IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

SHM-france

Durabilité des capteurs à fibres optiques pour le SHM des structures en béton

- Ismail ALJ (*UGE-IFSTTAR MAST/EMGCU*)
- Karim BENZARTI (*UGE-IFSTTAR NAVIER*)
- Quentin GRANDO (*IRSN PSN-RES/SEREX/LR2E*)
- Aghiad KHADOUR (*UGE-IFSTTAR COSYS/LISIS*)
- Marc QUIERTANT (*UGE-IFSTTAR MAST/EMGCU*)

Sommaire :

1. Le projet ODOBA (Observatoire de la Durabilité des Ouvrages en Béton Armé)
2. Les capteurs à fibres optiques
3. Etude de durabilité par essais de vieillissement accéléré
4. Instrumentation des blocs ODOBA

Sommaire :

1. Le projet ODOBA (Observatoire de la Durabilité des Ouvrages en Béton Armé)
2. Les capteurs à fibres optiques
3. Etude de durabilité par essais de vieillissement accéléré
4. Instrumentation des blocs ODOBA

Le projet ODOBA (Observatoire de la Durabilité des Ouvrages en Béton Armé) :

- ❖ Prolongation de la durée d'exploitation des centrales nucléaires
- ❖ Etude des pathologies qui affectent les bétons des centrales nucléaires (RSI, RAG et couplage RAG/RSI)

Développement des pathologies de manière accélérée dans des maquettes à grande échelle représentative (blocs de béton)



Plateforme ODE

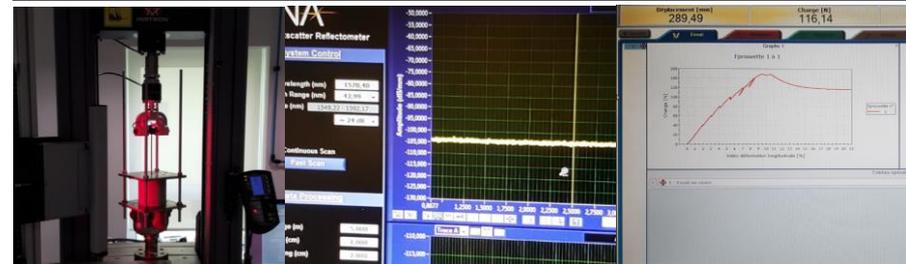


Objectifs de la thèse :



- Sélection des câbles à fibres optiques pour l'instrumentation des blocs du projet ODOBA (câbles noyés ou collés).
- Détection et suivi des pathologies des gonflements dans ces blocs.

- Etude de la durabilité des capteurs à fibres optiques noyés dans le béton et collés en parement.

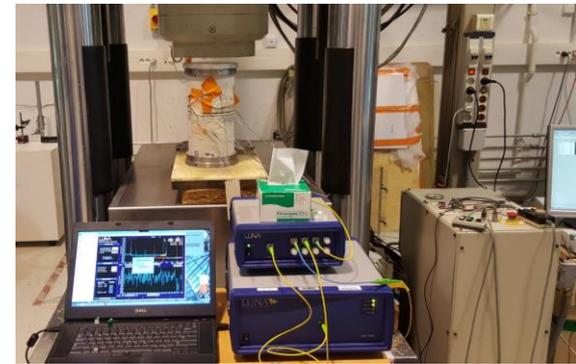
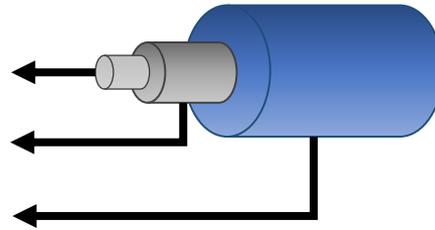


Sommaire :

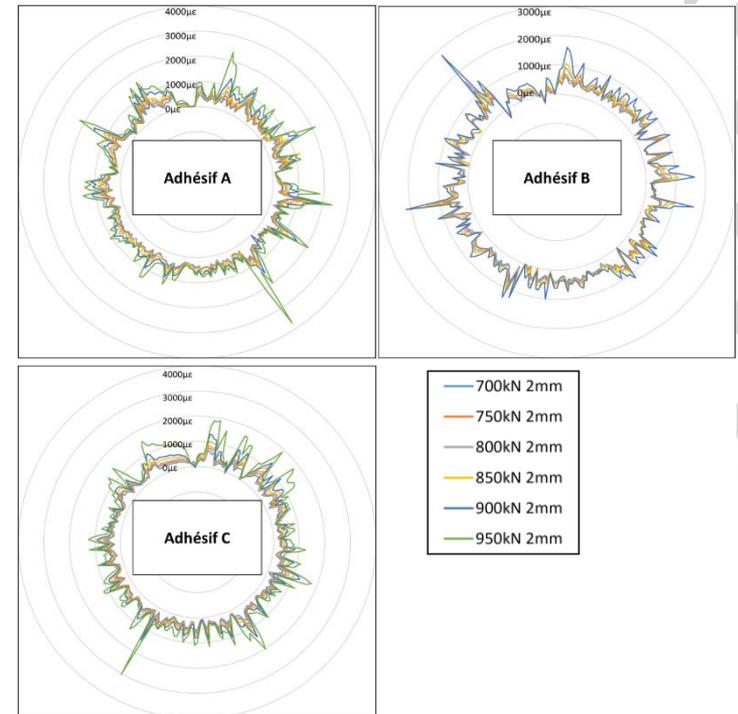
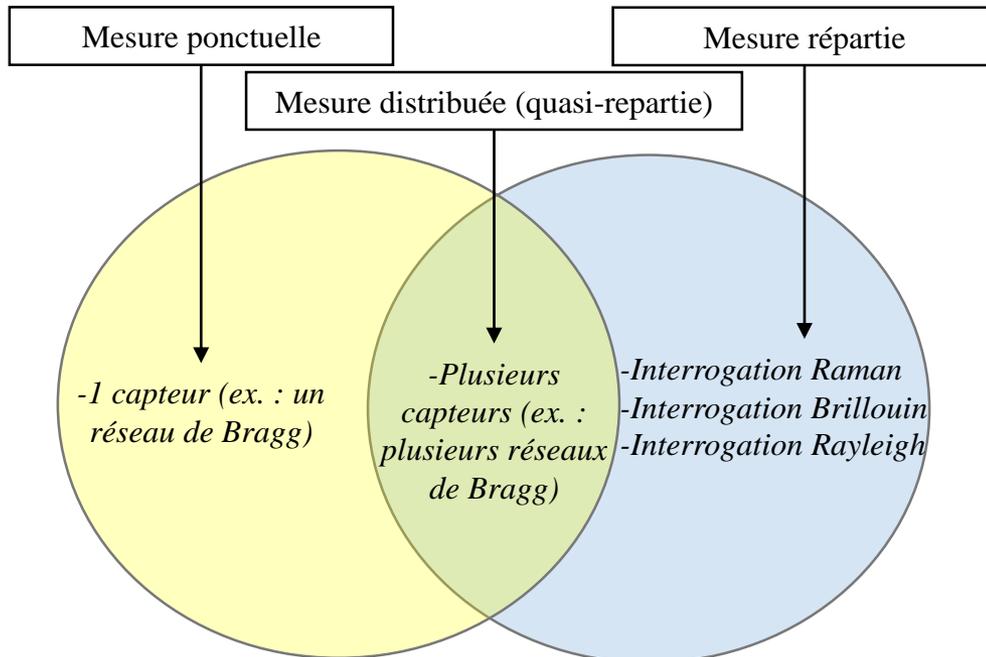
1. Le projet ODOBA (Observatoire de la Durabilité des Ouvrages en Béton Armé)
2. Les capteurs à fibres optiques
3. Etude de durabilité par essais de vieillissement accéléré
4. Instrumentation des blocs ODOBA

Les capteurs à fibres optiques :

- Cœur (généralement en silice)
- Gaine optique (même matériau que le cœur avec un dopage différent)
- Revêtement primaire pour protéger la fibre

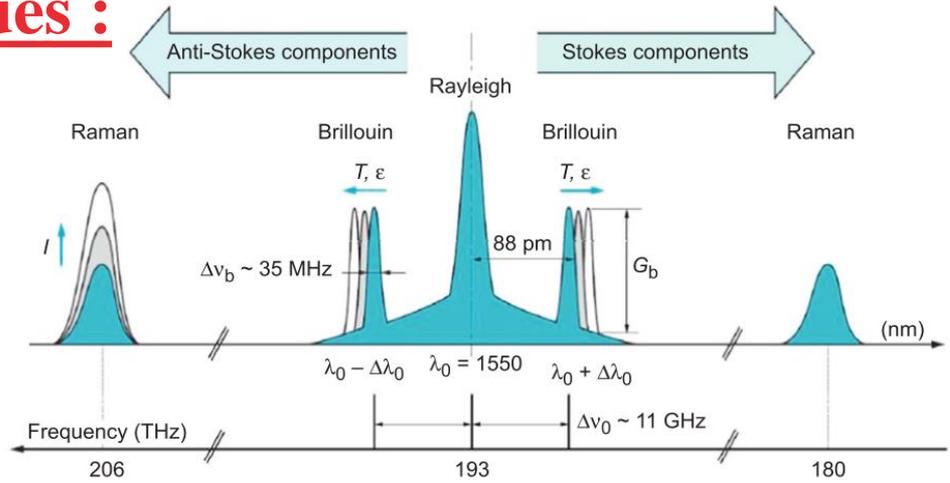
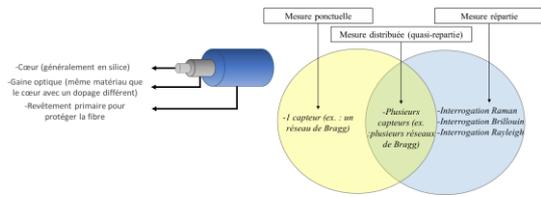


Essai de compression sur un cylindre en béton avec fibres optiques collées en surface.



Profils de déformation enregistrés par les fibres optiques.

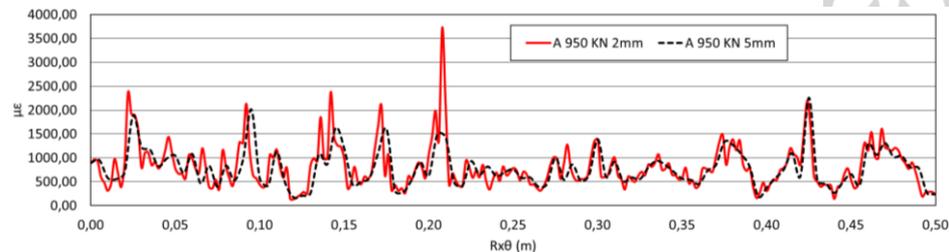
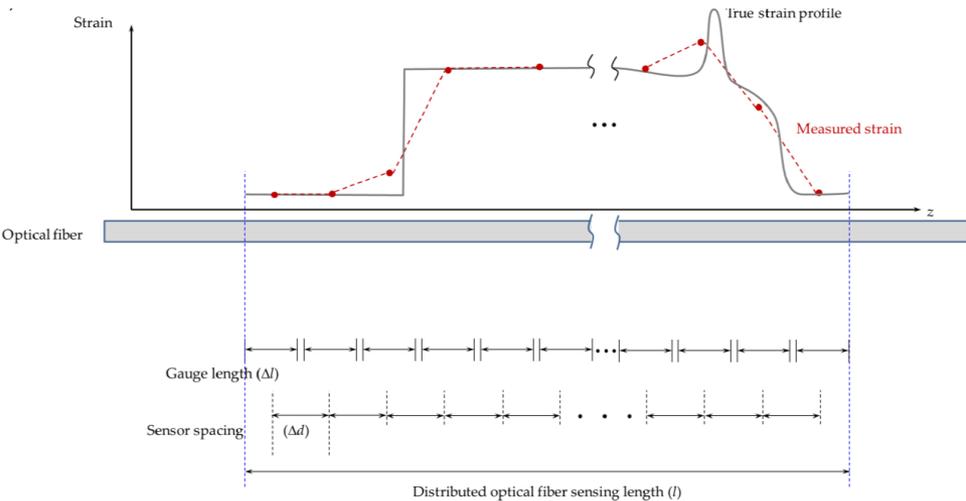
Les capteurs à fibres optiques :



Alan, 1999; Motil et al., 2016

Caractérisation du transfert d'effort :

$$\epsilon_{\text{mesurée}} = \epsilon_{\text{milieu hôte}} \otimes \text{FTM} \otimes F_{\text{interrogateur}}$$



Profils de déformation par capteurs fo avec deux résolutions : 2mm et 5mm.

Les capteurs à fibres optiques :

$$\varepsilon_{mesurée} = \varepsilon_{milieu\ hôte} \otimes FTM \otimes F_{interrogateur}$$

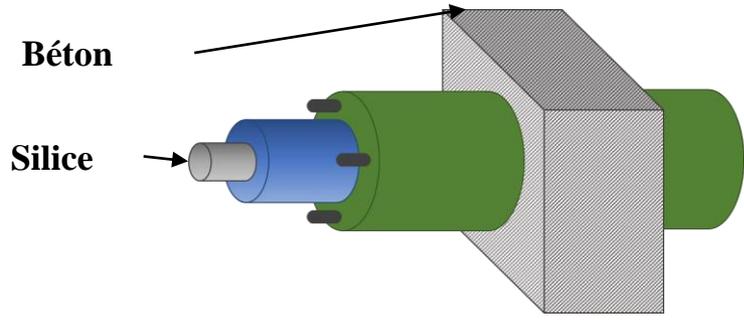
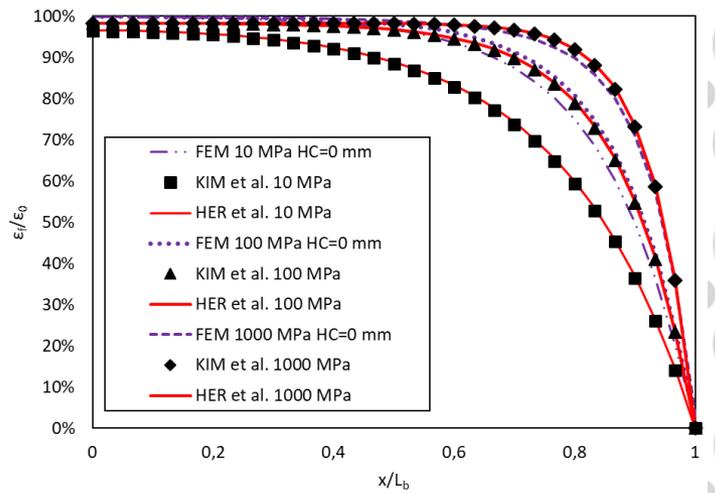


Schéma d'un câble fo noyé dans le béton.



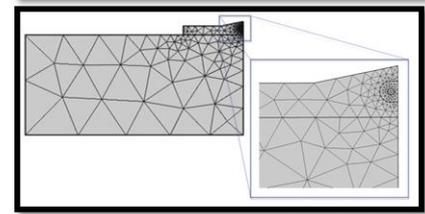
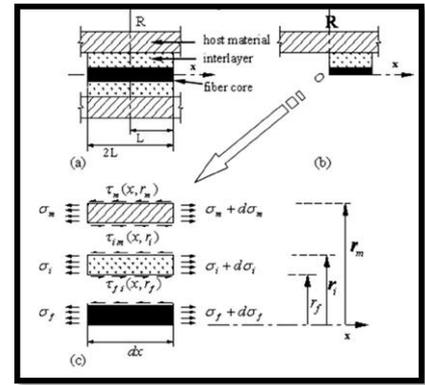
Exemple de courbes du transfert d'effort.

Modèles analytiques

- Exemple : le modèle proposé par Li et al.* dans le cas d'une fibre noyée.
- $\varepsilon_f(x) = \varepsilon_m \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right]$
- $k^2 = \frac{1}{\frac{1}{2}r_f^2 E_f \left\{ \frac{1}{G_i} \ln\left(\frac{r_i}{r_f}\right) + \frac{1}{G_m} \left[\frac{r_m^2}{r_m^2 - r_i^2} \ln\left(\frac{r_m}{r_i}\right) - \frac{1}{2} \right] \right\}}$

Modèles numériques

- FEM : méthode polyvalente, peut tenir compte des configurations spécifiques de la structure du câble.
- Exemple : une fibre optique collée en surface (Billon et al. 2013**)



*H. Li, G. Zhou, L. Ren, et D. Li, Journal of Engineering Mechanics vol. 135, n° December, p. 1343-1354, 2009.

**Billon A, Henault JM., Quertant M., Taillade F., Khadour A., Martin R.P., Benzarti K., Smart Materials and Structures 2015, Vol. 24 (11), 115001

Les capteurs à fibres optiques :

$$\epsilon_{mesurée} = \epsilon_{milieu\ hôte} \otimes FTM \otimes F_{interrogateur}$$

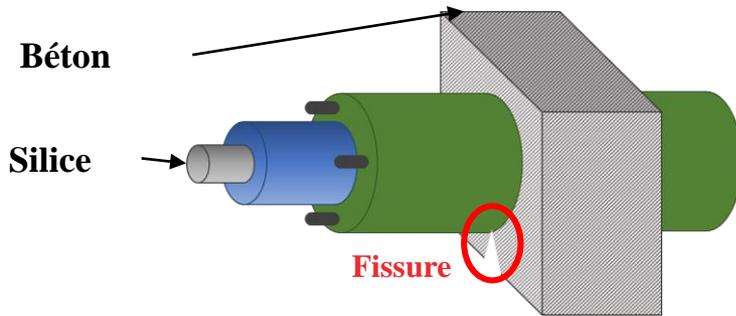
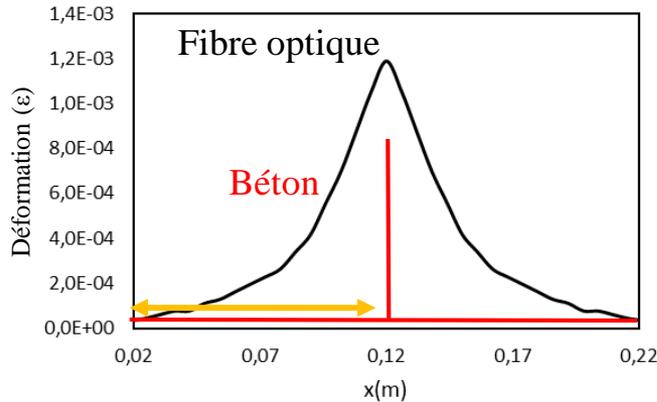


Schéma d'un câble fo noyé dans le béton.

Apparition de fissure dans le béton :



=> Etude de l'évolution des propriétés du câble et de l'interface câble/béton en conditions de service et sous vieillissement accéléré et son effet sur le transfert d'effort.



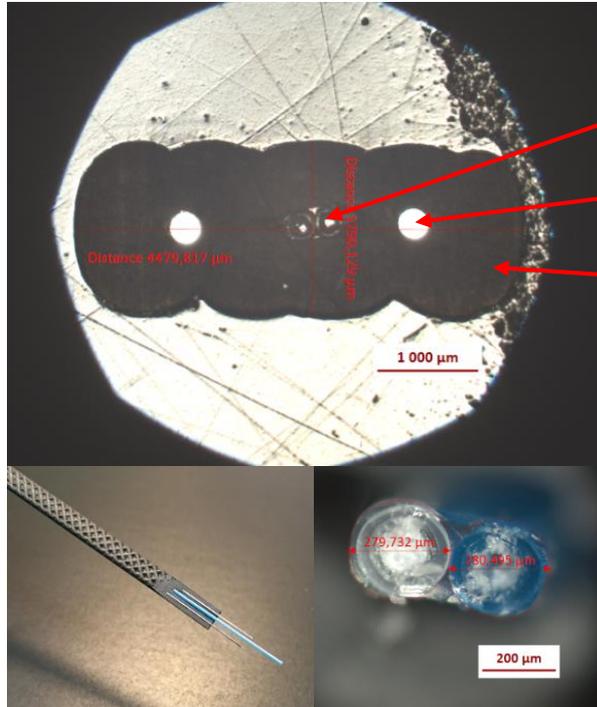
Sommaire :

1. Le projet ODOBA (Observatoire de la Durabilité des Ouvrages en Béton Armé)
2. Les capteurs à fibres optiques
3. Etude de durabilité par essais de vieillissement accéléré
4. Instrumentation des blocs ODOBA

Etude de durabilité par essais de vieillissement accéléré :

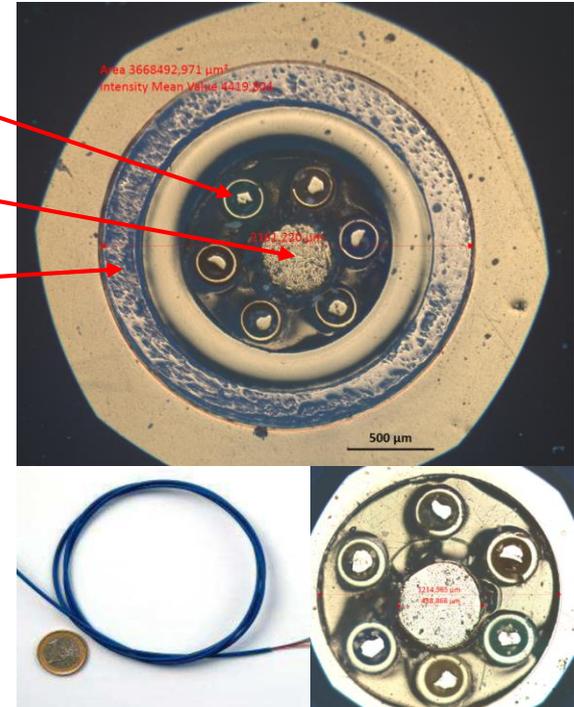
Sélection des câbles à fibres optiques :

-Câbles disponibles dans le commerce et déjà utilisés pour instrumenter des ouvrages.

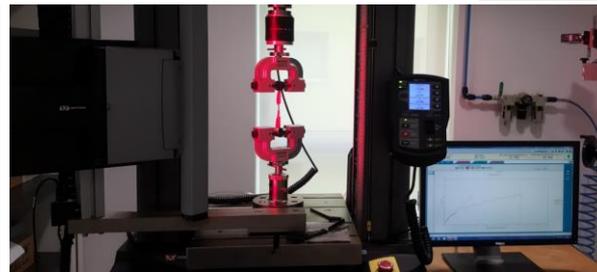
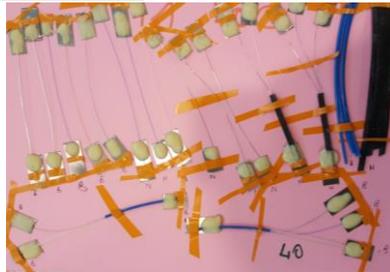


Câble A

Fibre optique
Renforcement
mécanique
Gaine



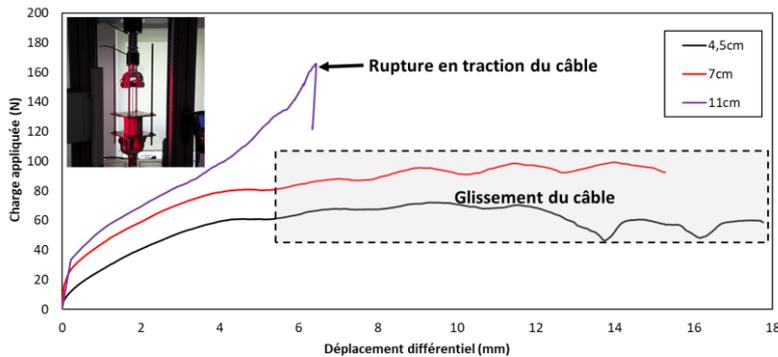
Câble B



Formulation des bétons et types d'échantillons :

2 formulations de béton sélectionnées :

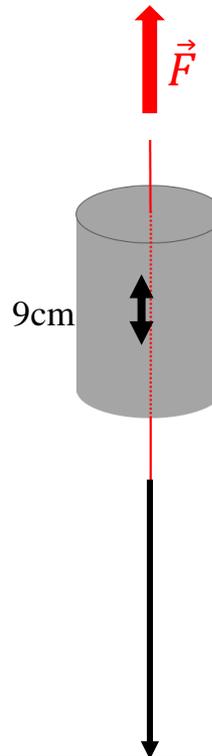
- Formulation d'un béton **non pathologique**.
- Formulation d'un béton **pathologique (RAG+RSI)**.



Courbes d'arrachement pour 3 longueurs de contact câble noyé/béton.

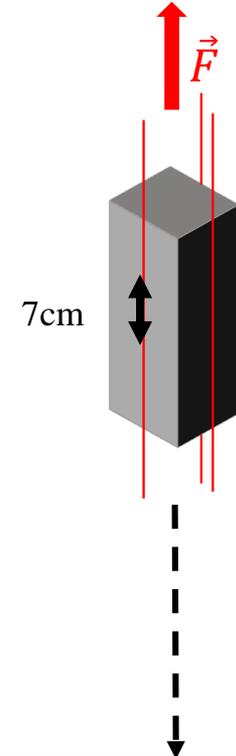
Essais d'arrachement

Cas noyé



-Attaque chimique en milieu alcalin

Cas collé



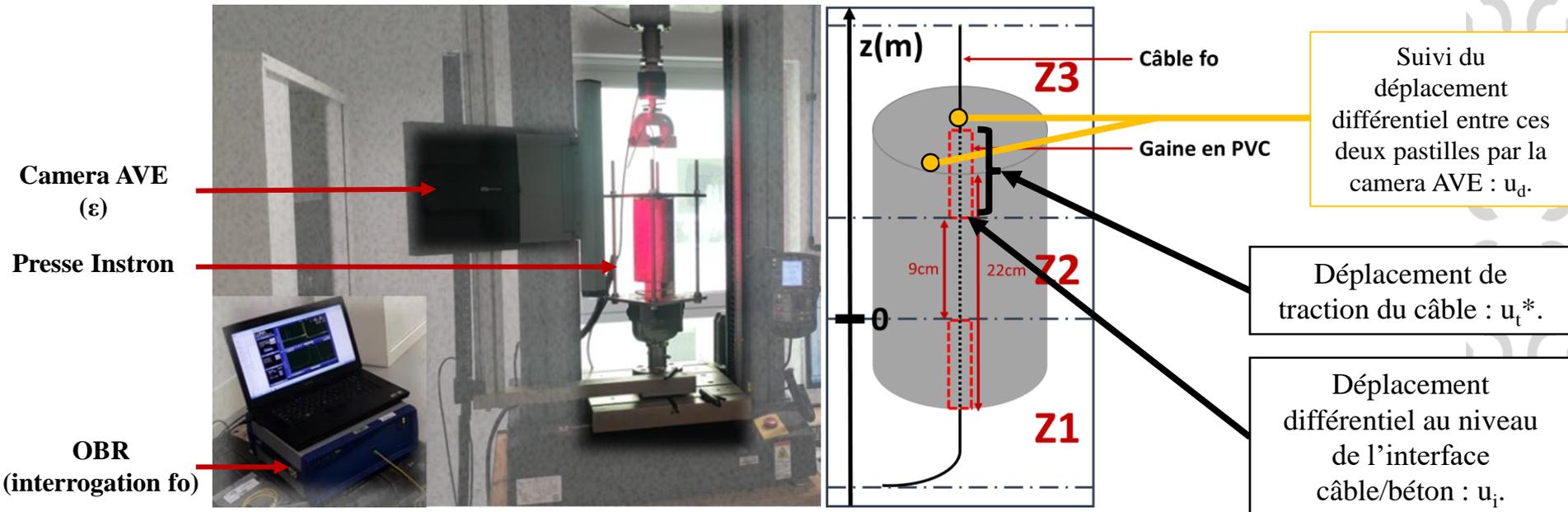
-Cycles thermiques
-Cycles d'immersion/séchage

Fabrication des éprouvettes :



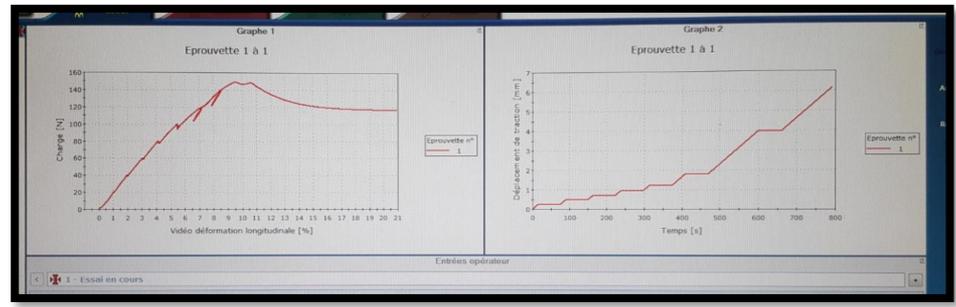
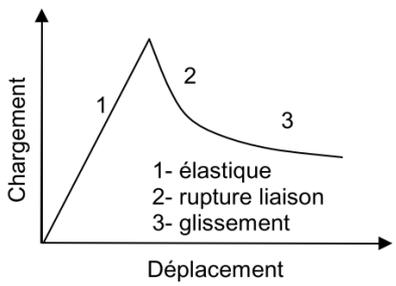
Préparation des éprouvettes de béton avec câbles noyés et collés en surface.

Dispositif des essais d'arrachement (cas du câble noyé) :

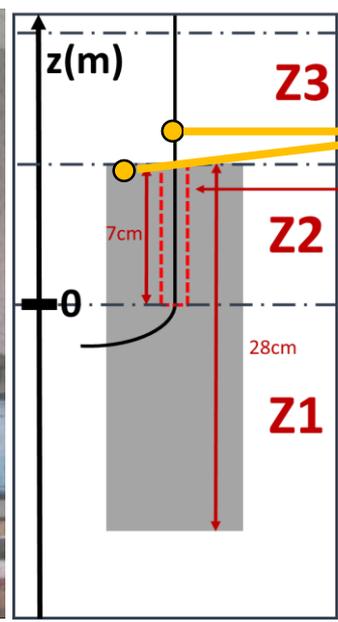
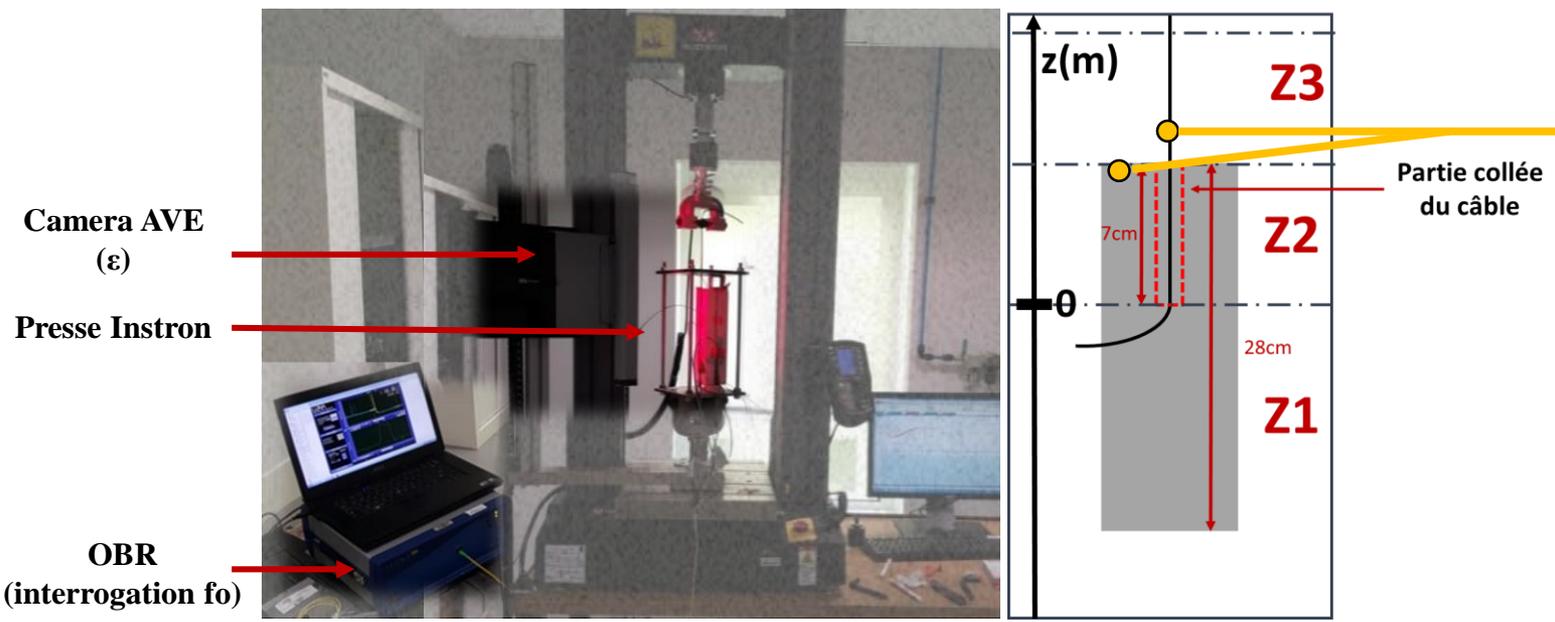


$$u_i = u_d - u_t \quad \longrightarrow \quad \text{Caractérisation de l'interface}$$

*L'interrogation avec l'OBR permet de calculer le module élastique du câble dans le domaine Z3 pour déduire u_t

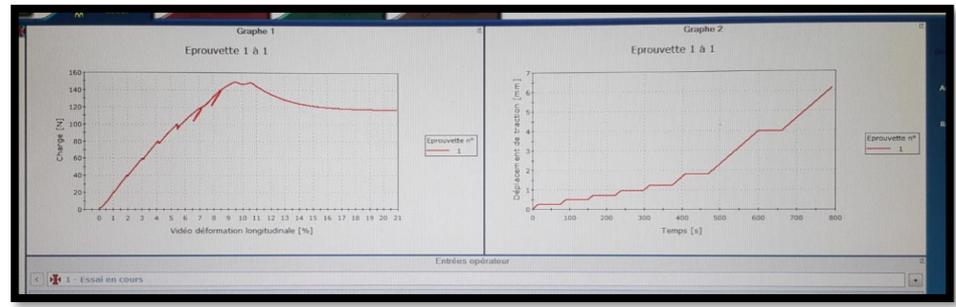
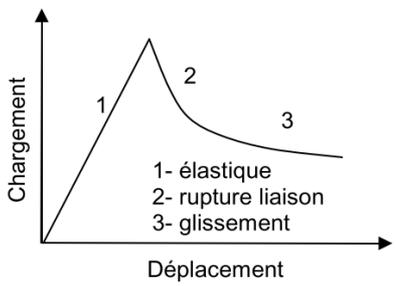


Dispositif des essais d'arrachement (cas du câble collé en surface) :

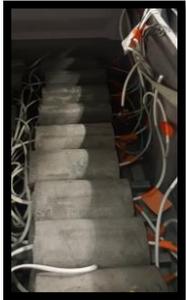


Suivi du déplacement différentiel entre ces deux pastilles par la camera AVE : u_d .

$u_i = u_d$ → Caractérisation de l'interface



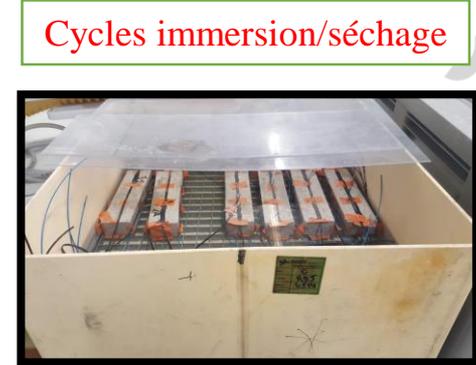
Lancement des vieillissements accélérés :



Attaque chimique en milieu alcalin



Cycles gel/dégel



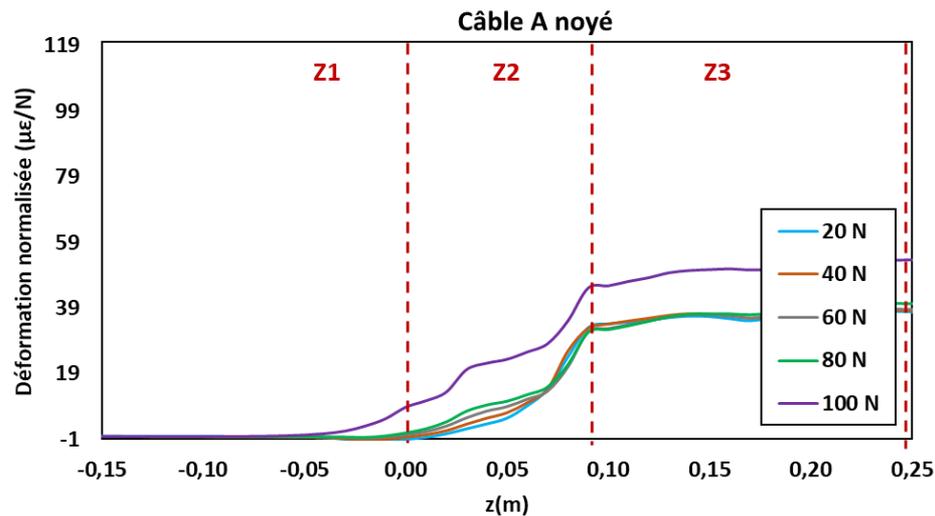
Cycles immersion/séchage

Vieillissement naturel

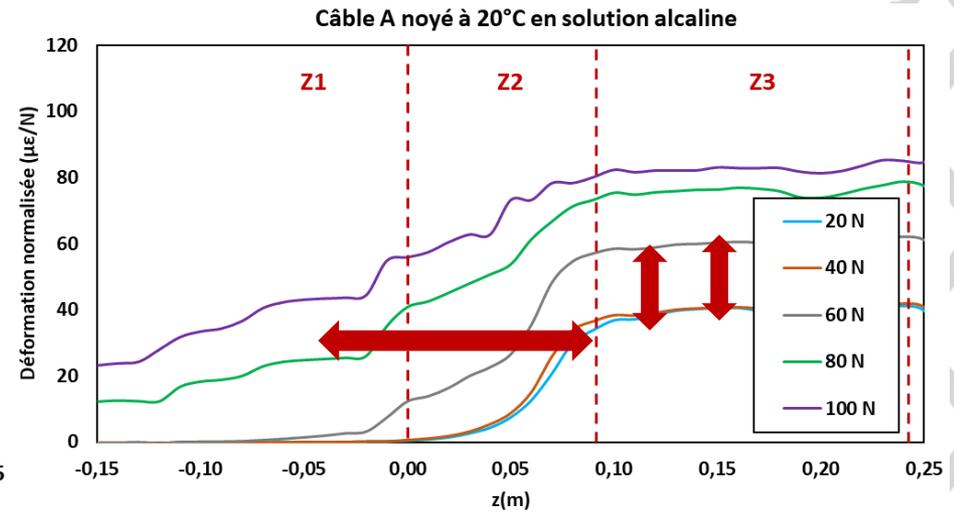


- ✓ Effet de la solution alcaline sur l'interface câble/béton.
- ✓ Effet de l'environnement extérieur sur la plateforme ODE.
- ✓ Vieillissement naturel.

Avant vieillissement :



Après 12 mois de vieillissement accéléré :



Après 12 mois de vieillissement accéléré :

- ✓ Cas noyé : Dégradation de l'interface câble/béton à 60°C pour le câble B surtout.
- ✓ Cas collé : Dégradation de l'interface câble A/béton en cycles d'I/S.

Sommaire :

1. Le projet ODOBA (Observatoire de la Durabilité des Ouvrages en Béton Armé)
2. Les capteurs à fibres optiques
3. Etude de durabilité par essais de vieillissement accéléré
4. Instrumentation des blocs ODOBA

Instrumentation des blocs ODOBA :

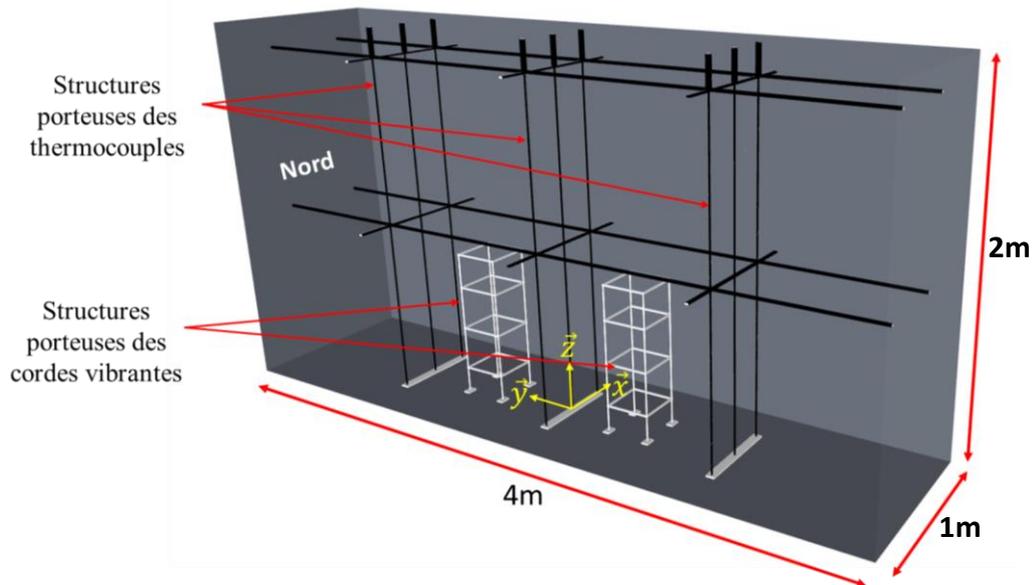
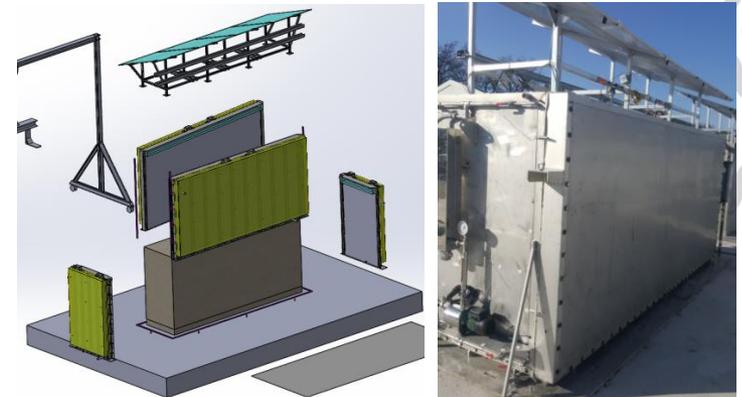


Schéma d'un bloc ODOBA en béton non armé



Local d'étuvage pour la réalisation des traitements thermiques sur les blocs RSI.



Piscine pour le vieillissement accéléré des blocs.

- ✓ 6 cordes vibrantes (2 zones x 3 directions)
- ✓ ≈50 thermocouples

Instrumentation d'un bloc par câble à fibres optiques noyé dans le béton :

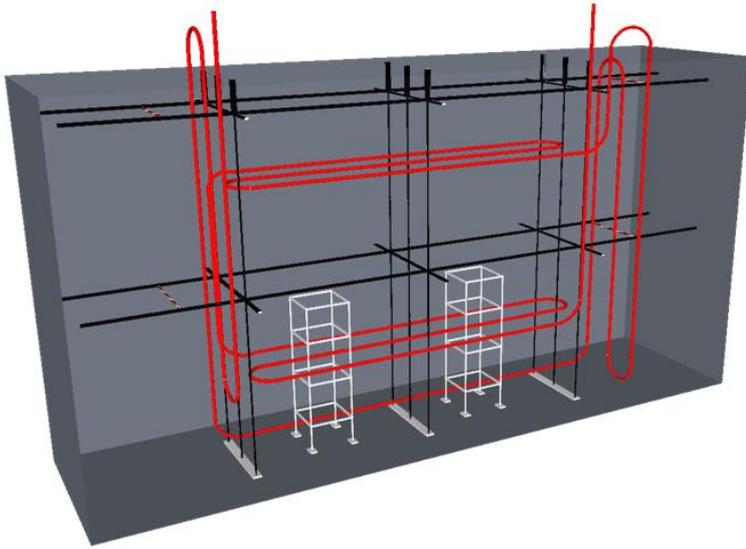


Schéma d'instrumentation d'un bloc en béton non armé par câble à fibres optiques noyé dans le béton



- ✓ 2 plans horizontaux et 2 plans verticaux.
- ✓ Contrôle des rayons de courbure du câble le long du parcours.

Instrumentation d'un bloc par câbles à fibres optiques collés en surface du béton :

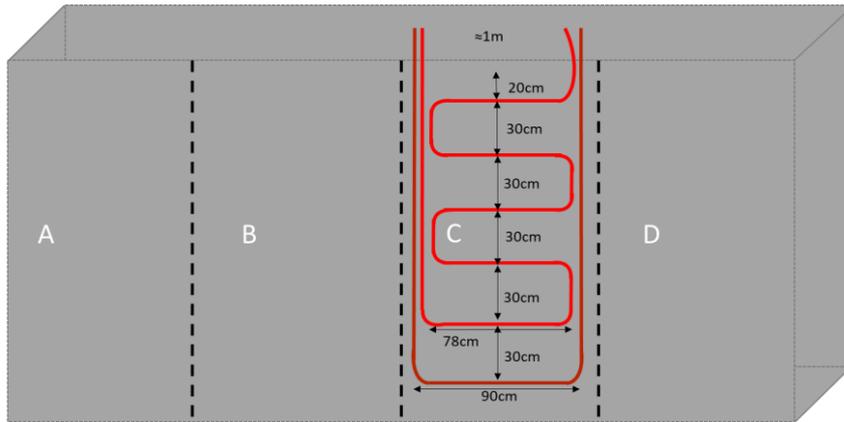
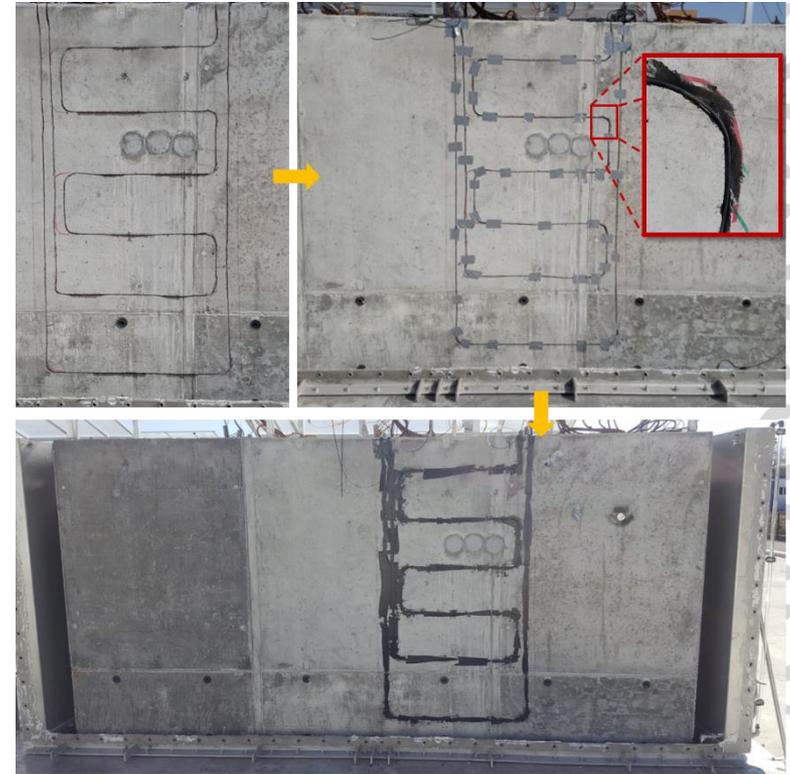


Schéma d' instrumentation d'un bloc en béton non armé par câble à fibres optiques collé en surface du béton



- ✓ 2 parcours pour permettre des mesures de déformations horizontales et verticales.
- ✓ Câble collé dans une engravure en surface.
- ✓ Contrôle des rayons de courbure du câble le long du parcours.

Conclusion :

- Sélection de deux câbles à fibres optiques pour l'étude de durabilité.
- Deux configurations sont considérées : capteurs noyés dans le béton et collés en surface.
- Etude de l'évolution des propriétés de l'interface câble/béton en conditions de service et sous vieillissement accéléré.
- Premières évolutions de l'interface câble/béton après 12 mois de vieillissement.
- Proposition et validation des plans d'instrumentation des blocs ODOBA par câbles noyés et collés en parement.
- Instrumentation de plusieurs blocs ODOBA par câbles noyés et câbles collés.

Merci de votre attention

Ismail ALJ

ismail.alj@univ-eiffel.fr / ismail.alj@ifsttar.fr / aljismail19@gmail.com

01 81 66 81 65

