

Monitoring des structures de génie civil : exemples et perspectives

Mathilde Chevreuil, Virginie Gaillard, Romain Guyard, **Yann Lecieux**, Dominique Leduc, Cyril Lupi, Arianna Piccolo, Johann Priou, Emmanuel Rozière, & Franck Schoefs



UNIVERSITÉ DE NANTES



Journée Scientifique GIS ECND PdL 2019

ESTACA Laval le 29/03/2019

Thème I

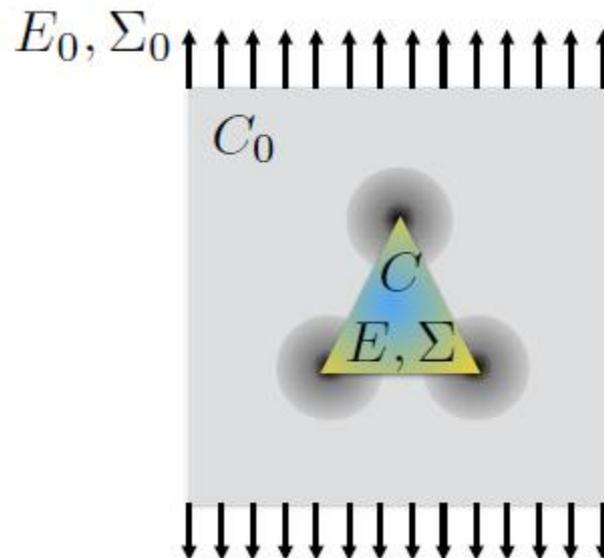
Développement de techniques de mesures

- **Développement d'un capteur pour la mesure des 6 composantes du tenseur de déformation**
- Suivi de l'évolution de la géométrie d'une alvéole par mesure de déformation distribuée
- Cartographie de résistivité électrique in-situ

Mesure des 6 composantes de déformation

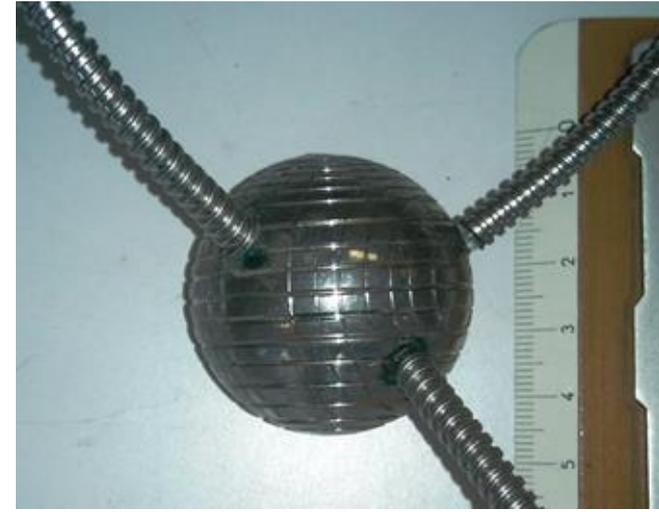
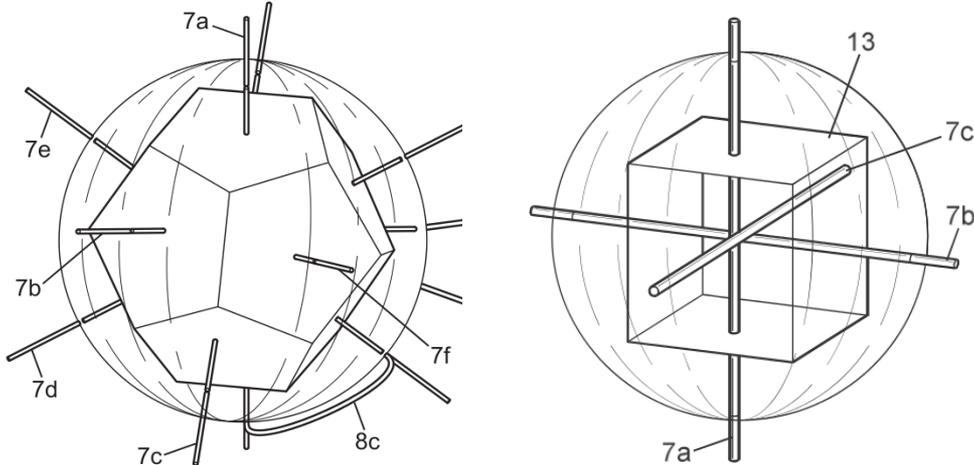
Aim : perform a **3D measurement** of the stress field within a structure using a single sensor

- Define the geometry of a test body (3D sensor) equipped with 6 unidirectional sensors to obtain the 6 components of the strain tensor within structure.
- Choose a sensor geometry such that the **strain field is uniform in the test body** for a uniform strain field in the structure !

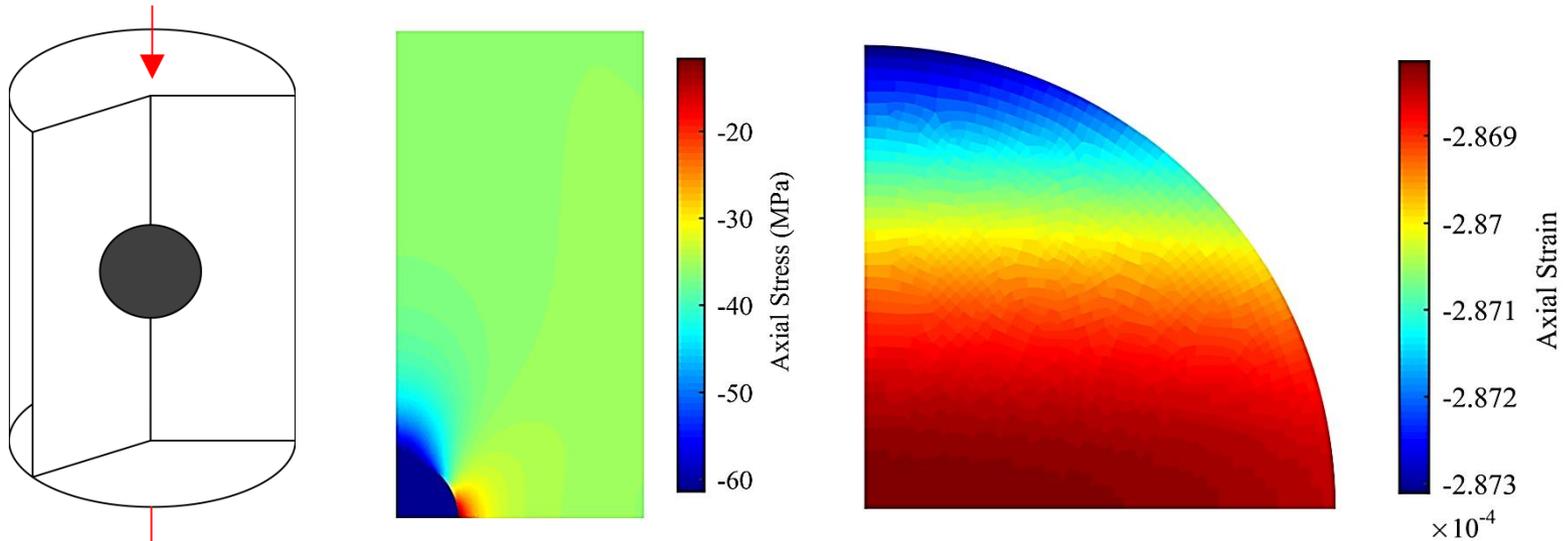


Solution technique

Fibre arrangement [François et al.] :



Stress field in the structure (concrete cylinder) and strain field within sensor :



Concrete test specimen subjected to 1% axial strain and spherical steel sensor

Analyse des données

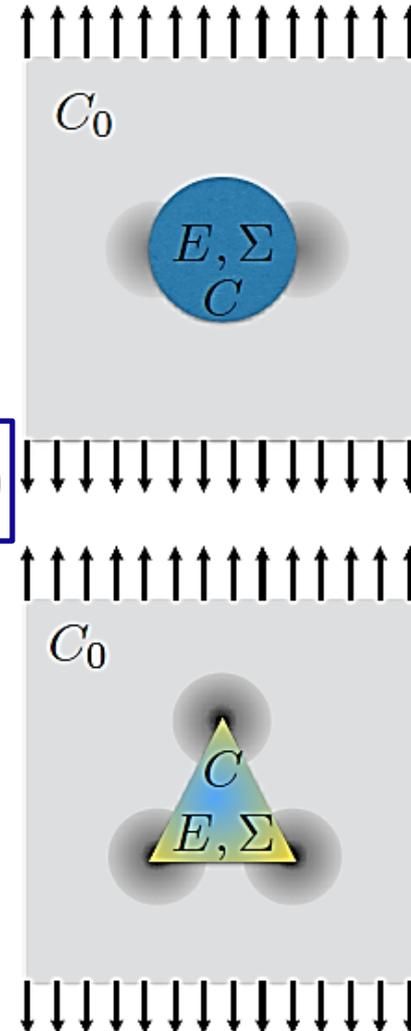
- [Eshelby, 1957];
- if E_0, Σ_0 is uniform in a matrix far from the inclusion then E, Σ is uniform within the ellipsoidal inclusion (the sensor);
- Minimization of stress concentration in the matrix;
- Analytical computation of strain/stress **within matrix !**

$$\left(\mathbb{I} + S_0 : \mathbb{C}_0^{-1} : (\mathbb{C} - \mathbb{C}_0) \right) : \left(\mathbf{E} - \mathbf{E}_0^f \right) = \mathbf{E}_0 - \mathbf{E}_0^f + S_0 : \mathbb{C}_0^{-1} : \mathbb{C} : \left(\mathbf{E}^f - \mathbf{E}_0^f \right)$$

$$\mathbb{C} = 3K\mathbb{P}^H + 2\mu\mathbb{P}^D, \mathbb{C}_0 = 3K_0\mathbb{P}^H + 2\mu_0\mathbb{P}^D$$

$$S_0 = \frac{3K_0}{3K_0 + 4\mu_0} \mathbb{P}^H + \frac{6}{5} \frac{K_0 + 2\mu_0}{3K_0 + 4\mu_0} \mathbb{P}^D$$

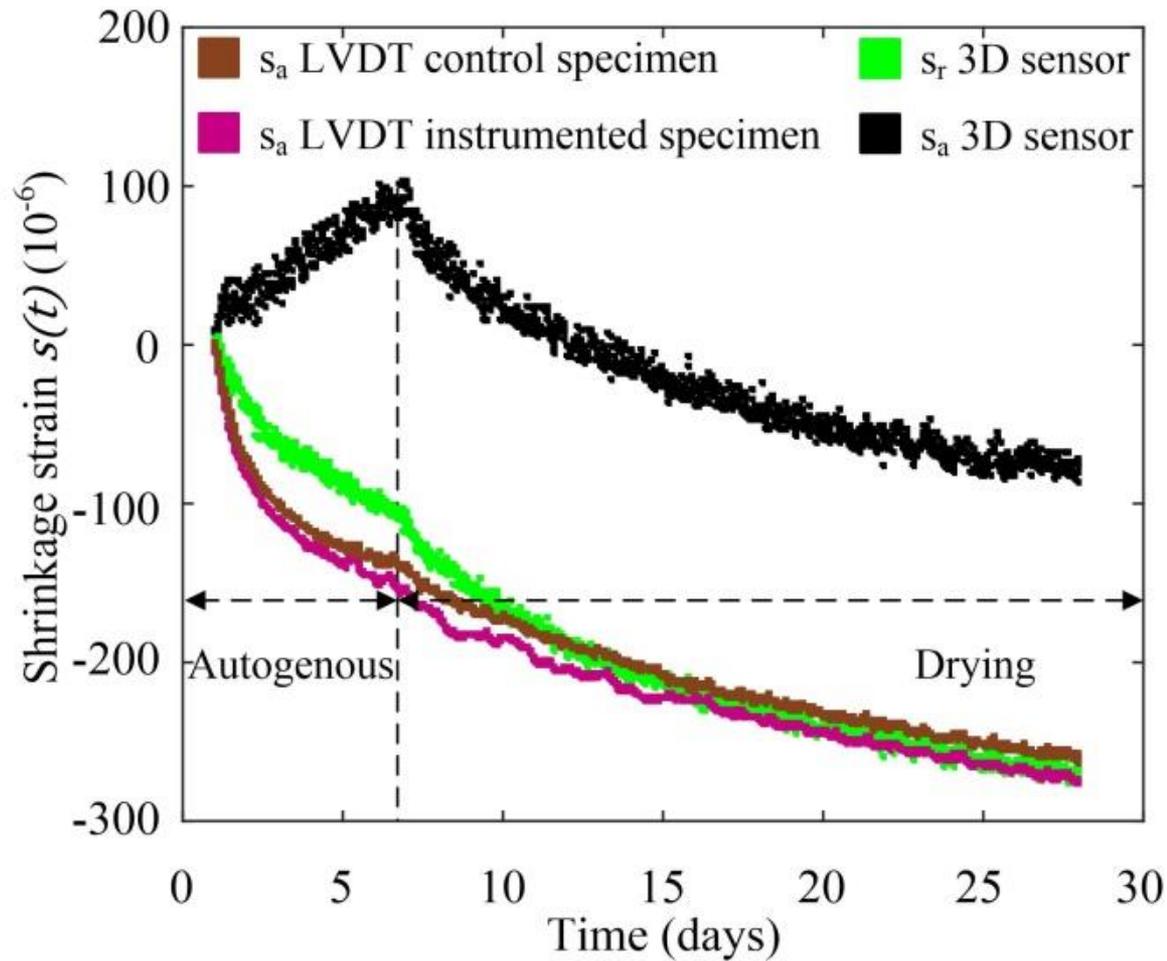
$$\mathbb{P}^H = \mathbf{I} \otimes \mathbf{I}, \mathbb{P}^D = \mathbb{I} - \mathbb{P}^H$$

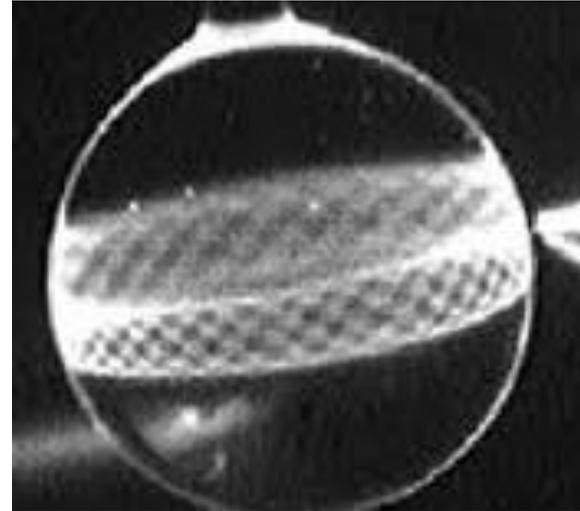


[Eshelby, 1957] : J. D. Eshelby. The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems. Royal Society of London Proceedings Series A, 241:376–396, August 1957.

[François 2017] : M.L.M. François, Y. Lecieux, D. Leduc, C. Lupi, E. Rozière, *An Embedded 3D Strain Tensor Sensor Based on the Eshelby's Inclusion*, Exp Mech. 57 (2017) 801–811. doi:10.1007/s11340-017-0266-2

Result, shrinkage monitoring during 28 days





$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = F \frac{\Delta n_2}{n_2} + (1 - F) \frac{\Delta n_1}{n_1} + F \frac{\Delta R}{R}$$

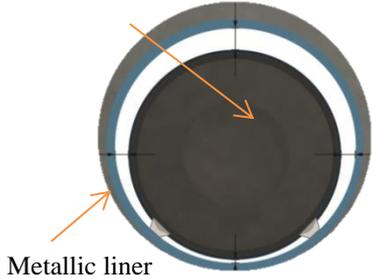
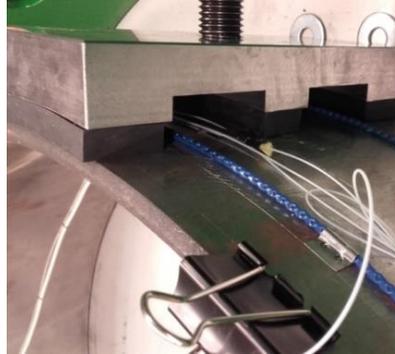
Thème I

Développement de techniques de mesures

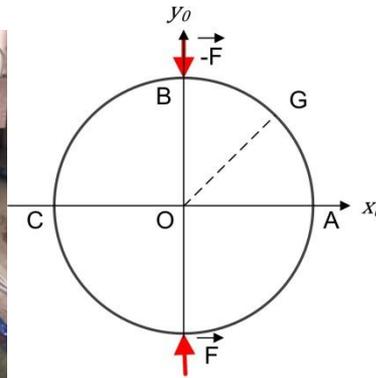
- Développement d'un capteur pour la mesure des 6 composantes du tenseur de déformation
- **Suivi de l'évolution de la géométrie d'une alvéole par mesure de déformation distribuée**
- Cartographie de résistivité électrique in-situ

Travaux communs avec l'ANDRA

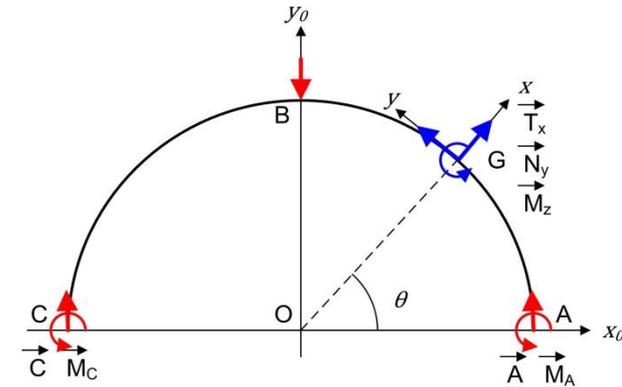
HLW disposal package



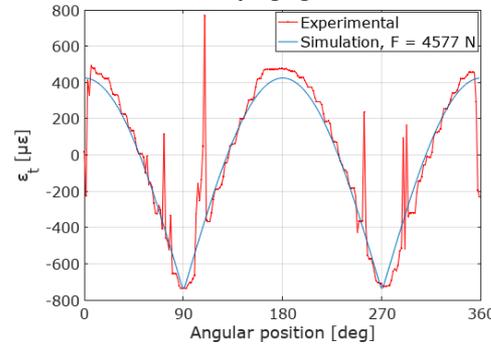
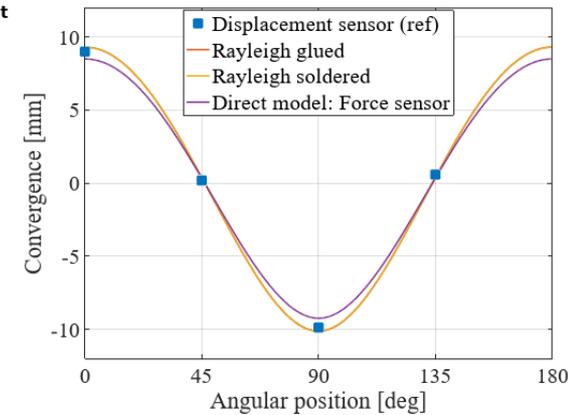
Metallic liner



a) Analytical model



b) Half ring and parameterization

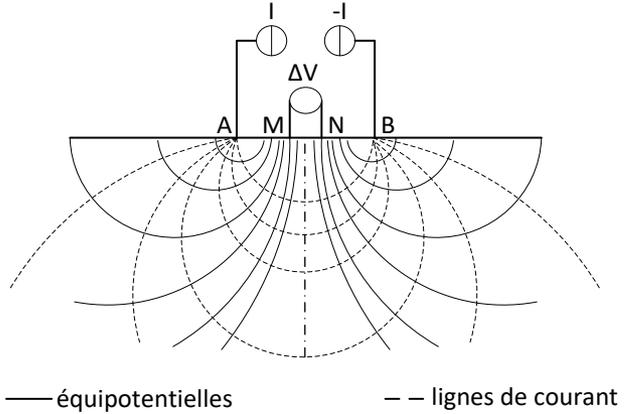

**Strain comparison: 10 mm of imposed displacement
Rayleigh glued**

Convergence comparison, 10 mm


Thème I

Développement de techniques de mesures

- Développement d'un capteur pour la mesure des 6 composantes du tenseur de déformation
- Suivi de l'évolution de la géométrie d'une alvéole par mesure de déformation distribuée
- **Cartographie de résistivité électrique in-situ**

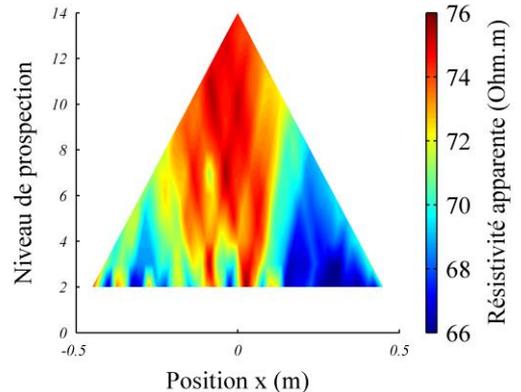
L'auscultation électrique adaptée de la géophysique au GC :



Principe



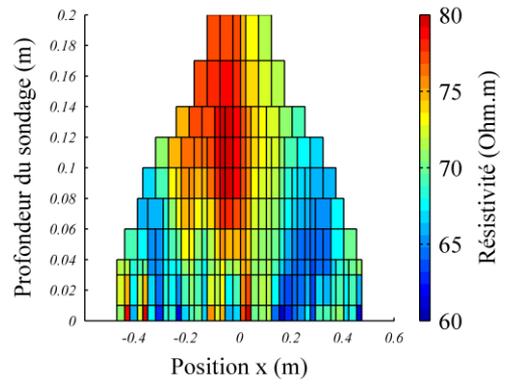
Matériel



Panneaux de résistivités apparentes

Capteur intégré dédié au SHM.

- Intérêt : panneau de résistivité électrique ;
- Possibilité d'effectuer un traitement statistique des données ;
- Limite : adaptation de la méthode à la problématique du génie civil



Panneaux de résistivités « vraies »

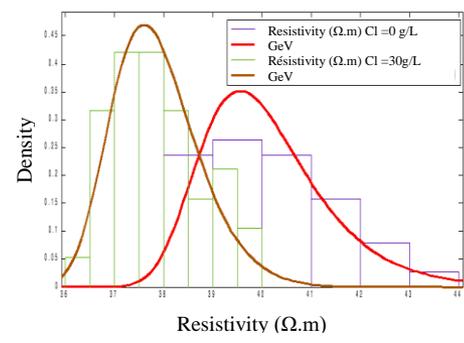
Résultat

Monitoring de la corrosion par résistivité électrique (Etat de l'art – travaux communs IFSTTAR)

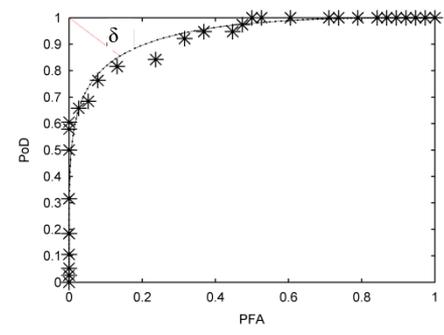


➤ Probabilité de détection d'un seuil de Cl⁻ :

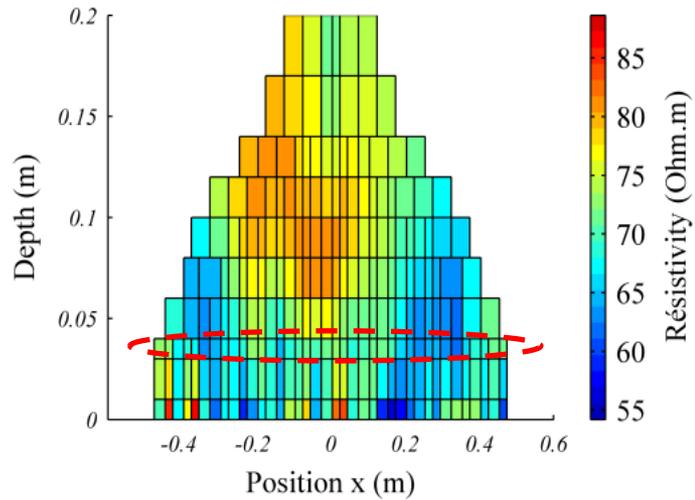
- ✓ Exploitation des résistivités inversées pour un niveau donné
- ✓ Courbe ROC



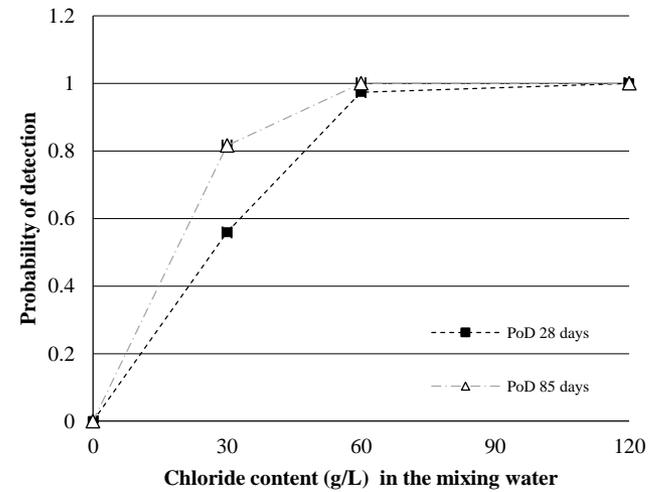
a) Experimental and fitted distributions of resistivity at 28 days



b) ROC curves for the detection of 30g/l of NaCl at 28 days.



Données exploitées

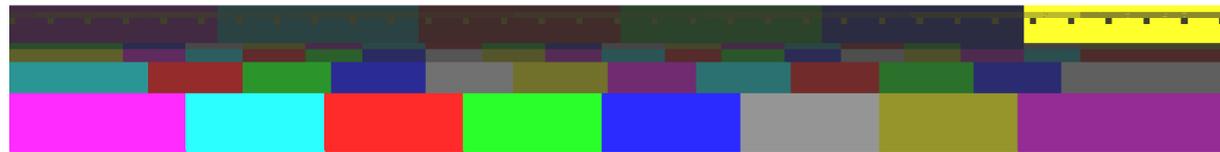


Seuil de détection des chlorures

Identification des paramètres de résistivité :

➤ Affichage des données mesurées (résistivité apparente)

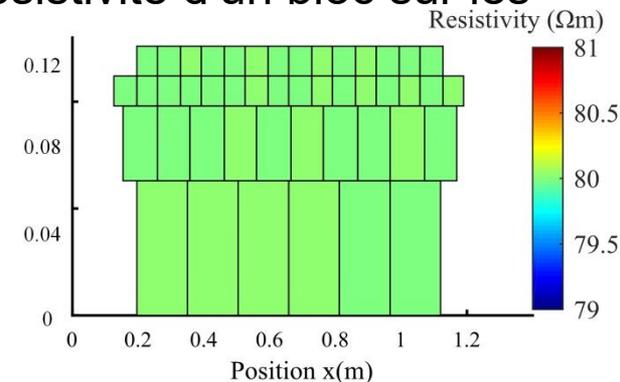
- ✓ Paramétrage



- ✓ Calcul de sensibilité (impact de la variation de la résistivité d'un bloc sur les mesures de potentiel)

$$S_i^k = \frac{\mathbb{V}(\mathbb{E}(\Delta V^k | \rho_{I \setminus i}))}{\max(\mathbb{V}(\Delta V^k))}$$

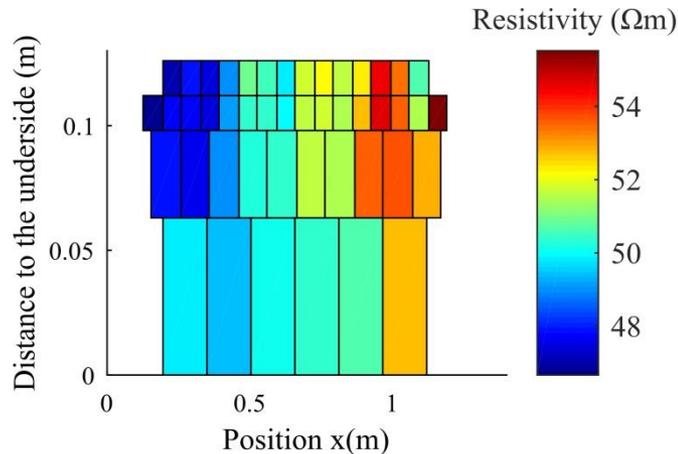
$$\rho_i = \frac{\sum_{k=1}^{129} \tilde{S}_i^k \rho^k}{\sum_{k=1}^{129} \tilde{S}_i^k}$$



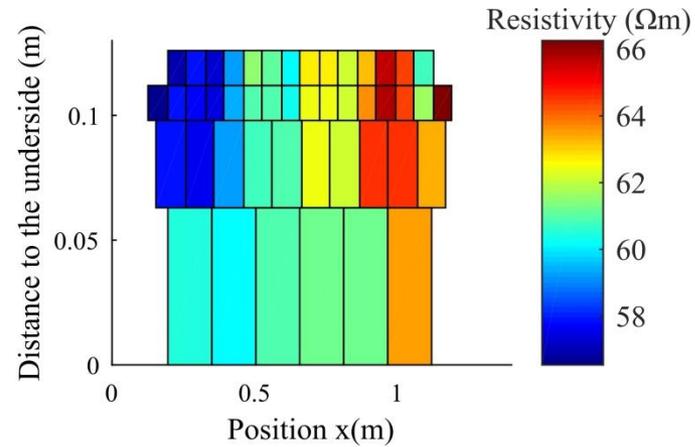
➤ Identification des résistivités vraies (pseudo section de résistivité)

- ✓ Calculer un jeu de paramètres initiaux (pseudo-section de résistivité apparente);
- ✓ Minimiser $\| \Delta V_{\text{ref}} - \Delta V_{\text{calcul}}(\rho_i) \|^2$;

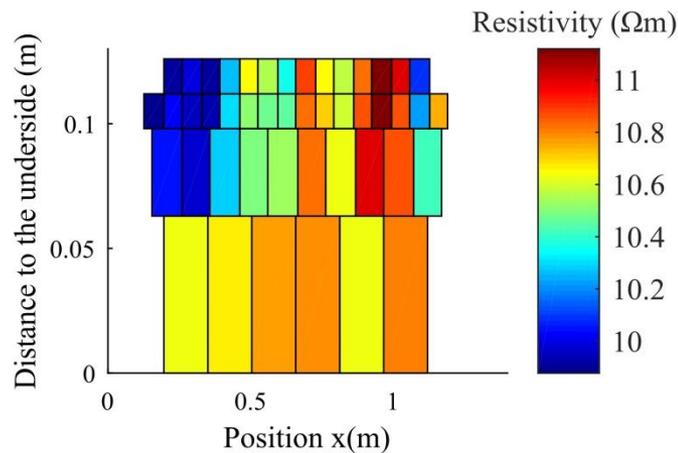
Utilisation des pseudo-sections de résistivité apparente pour identifier une zone à surveiller :



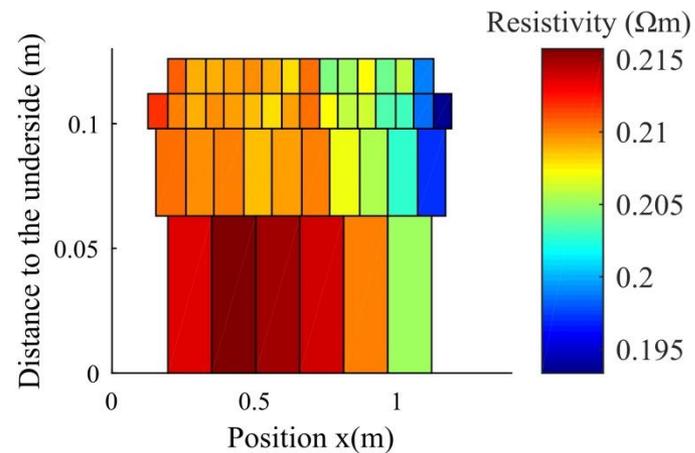
a) Map: RS21 day 148



b) Map: RS21 day 300

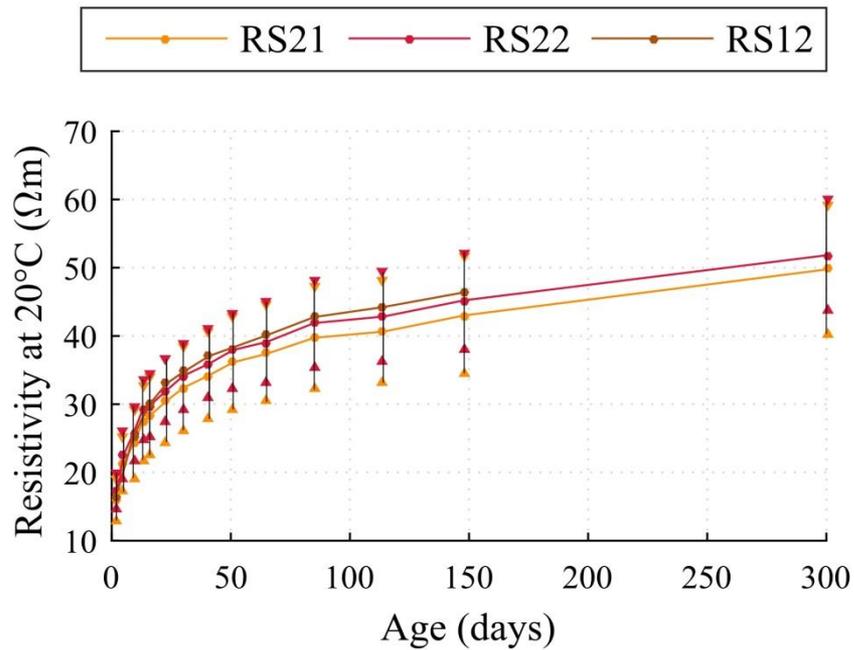


c) Difference between days 148 and 300

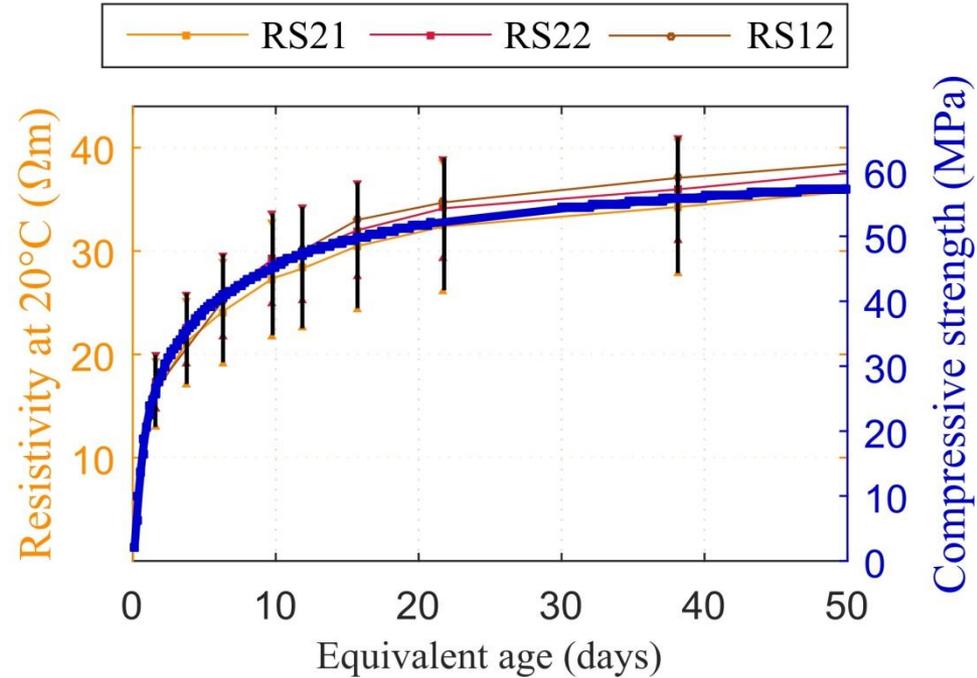


d) Relative difference between days 148 and 300

Corrélation entre évolution de la résistance mécanique et évolution de la résistivité (Mesures 2018)



a) Apparent resistivity



b) Apparent resistivity and compressive strength

Thème II

Instrumentation d'ouvrages

iMareco² A

Instrumentation pour Maintenance Re-ingenierie et Conception Opimisée



Maître d'Ouvrage et maître d'oeuvre, apporte sa vision et ses contraintes d'exploitant end user, met à disposition son équipement et ses données. Bénéficie d'un système opérationnel à la fin du projet



Réalise les travaux de mise en œuvre, participe à l'installation du système, intègre les contraintes techniques et propose des solutions de mise en œuvre.



Porteur du projet, développe la partie « haute du système » concernant au sens large le traitement des données et le tableau de bord end user.



Expertise scientifique, apporte son expertise sur le fonctionnement des ouvrages en béton, mise en place de système de SHM et capteurs dédiés.

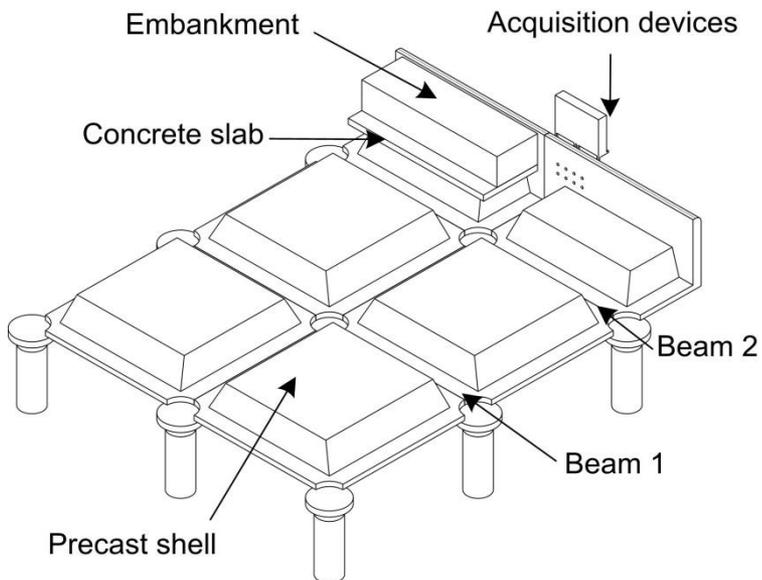
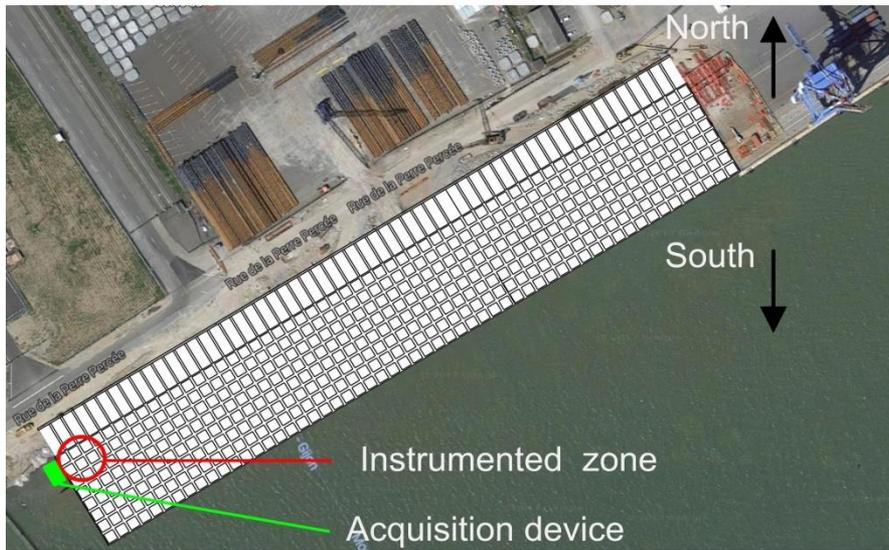
La structure instrumentée : extension du TMDC à Saint-Nazaire



La structure instrumentée : extension du TMDC à Saint-Nazaire



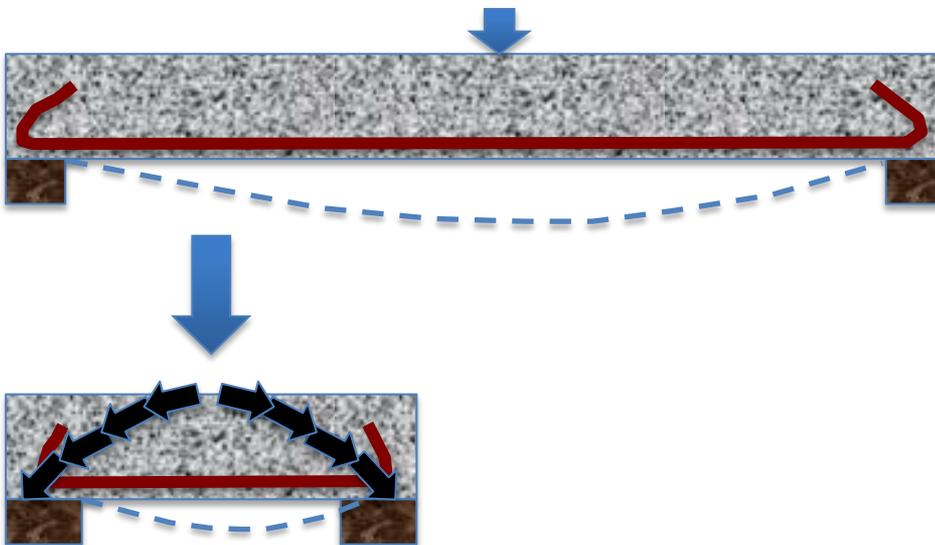
La structure instrumentée : extension du TMDC à Saint-Nazaire



Sujets d'intérêts - verrous technologiques

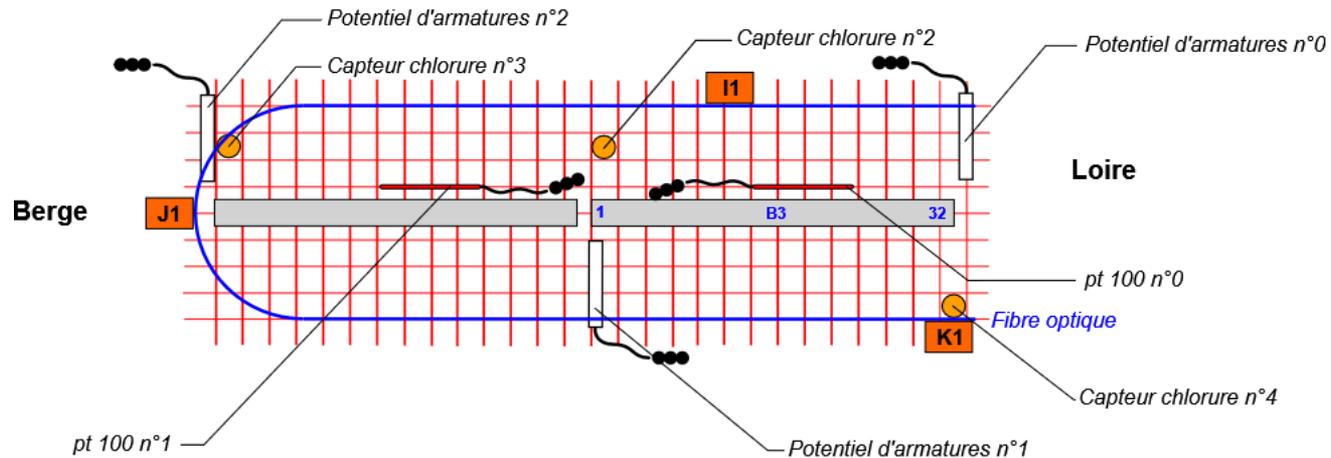
Dans le cadre du projet IMARECO, on s'intéresse à deux problématiques distinctes :

- Le développement d'une instrumentation optimale pour l'analyse de la pénétration des ions chlorures dans le béton et des risques de **corrosion des armatures** associées ;
- **L'analyse du comportement réel des éléments structuraux** « poutres courtes » afin de prolonger leur durée de vie vis à vis du dimensionnement conservatif des règlements de calcul.



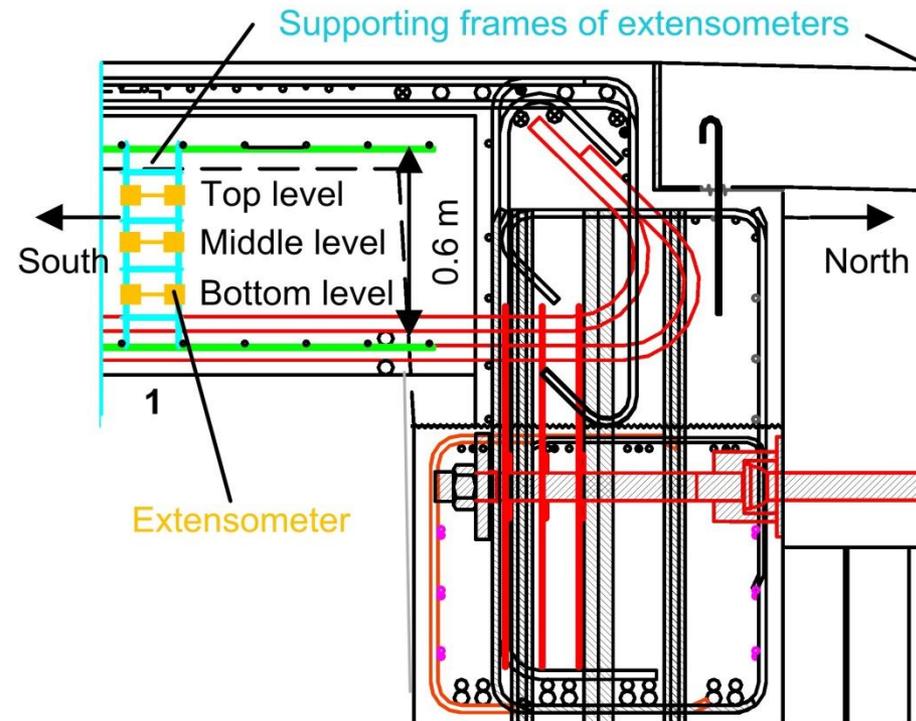
Suivi de la corrosion :

- Température, RH%, **Résistivité**, Potentiel d'armature, Chlorures, Porosité 90 j

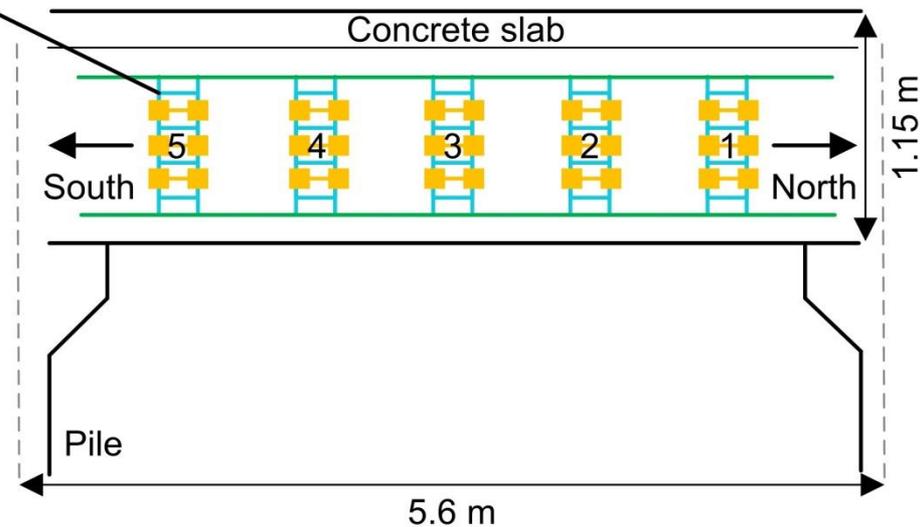


Mesure de déformation :

- Température, Déformation FBG, Déformation Rayleigh-Brillouin, Résistance mécanique, Suivi des modules d'élasticité



a) Beam sectional view (Plan of the tie road)

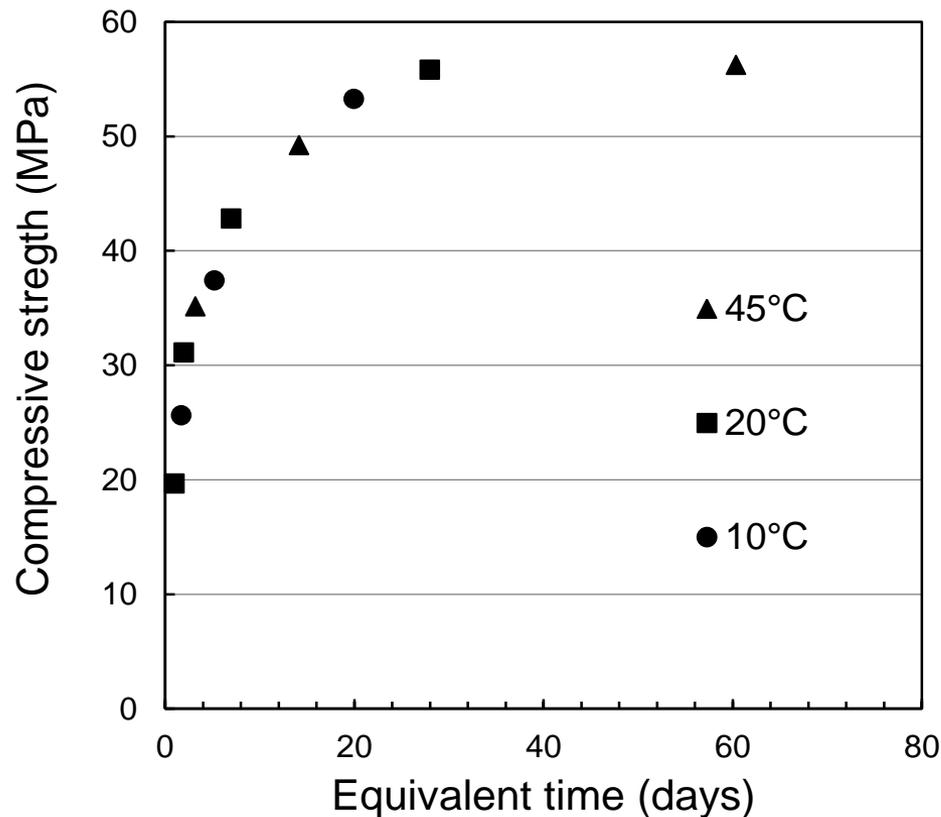


b) Schematic view of extensometers positioning

Mesure de déformation (2) :



Essais matériaux :

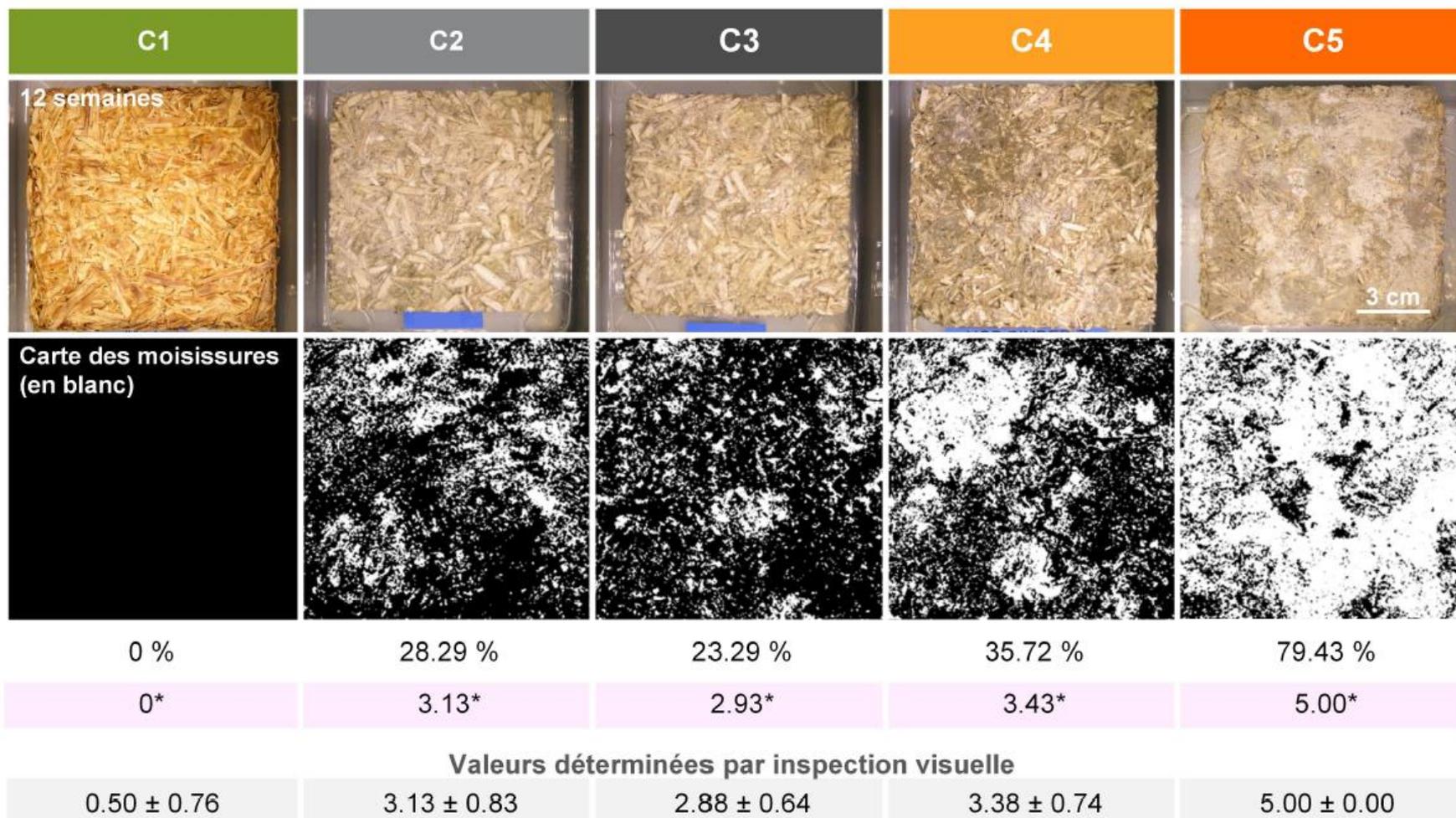


- Stockage à 10, 20 et 45°C;
- Suivi de modules (fréquences propres et test de compression);
- Résistance mécanique
- Porosité

Thème III

Analyse d'image

Digital Image Correlation (DIC)



Thème IV

Localisation de dommages

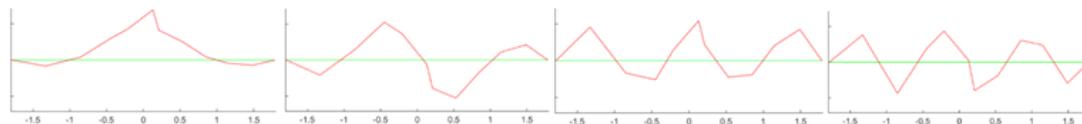


Figure 8. Mode shapes of the first four modes in the healthy state.

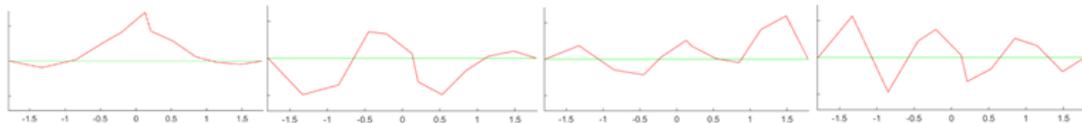
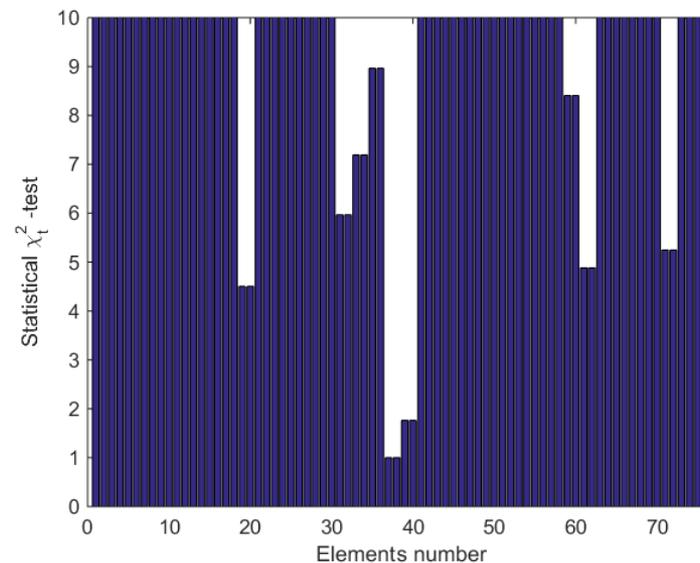
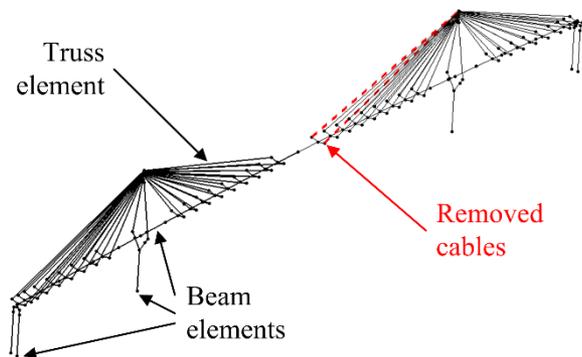


Figure 9. Mode shapes of the first four modes in the damaged state.



Merci pour votre attention



UNIVERSITÉ DE NANTES



Journée Scientifique GIS ECND PdL 2019

ESTACA Laval le 29/03/2019