

Cartographie de résistivité électrique dans un quai portuaire en béton armé avec des capteurs intégrés

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



UNIVERSITÉ DE NANTES



**SHM-France 2019 – 2ème Journée nationale :
Contrôle et monitoring des structures**

IFSTTAR Marne la Vallée le 14/03/2019

iMareco² A

Instrumentation pour Maintenance Re-ingénierie et Conception Optimisée



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.

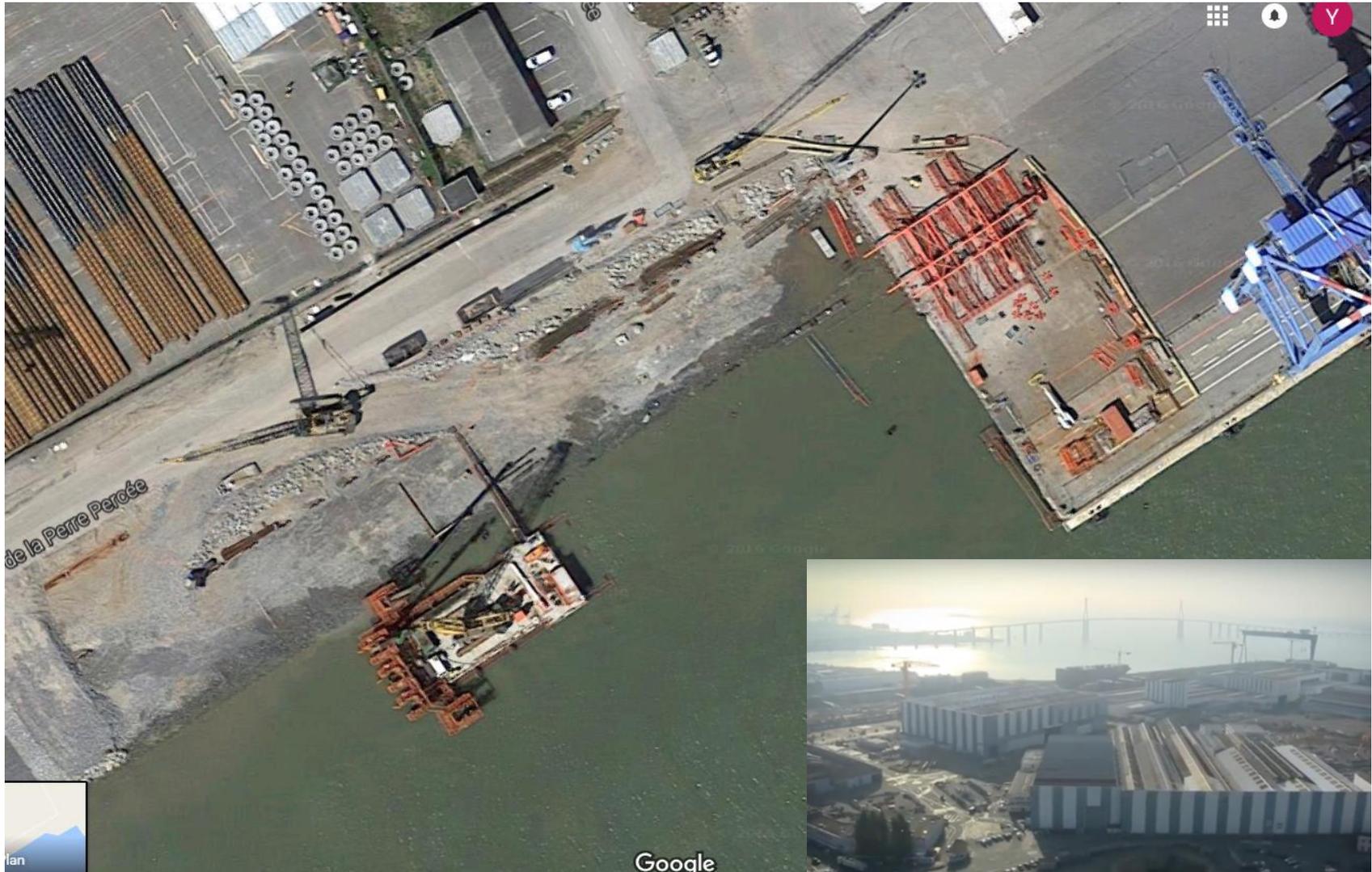


Porteur du projet, développe la partie « haute du système » concernant au sens large le traitement des données et le tableau de bord end user.



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

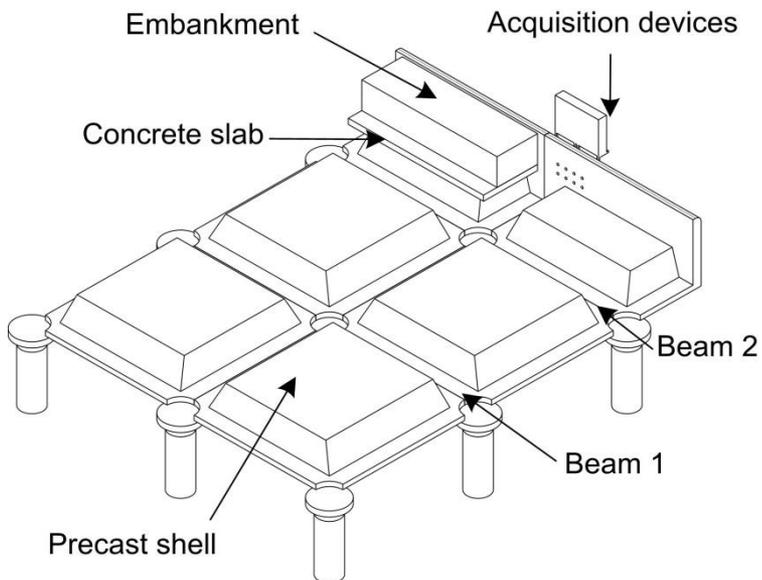
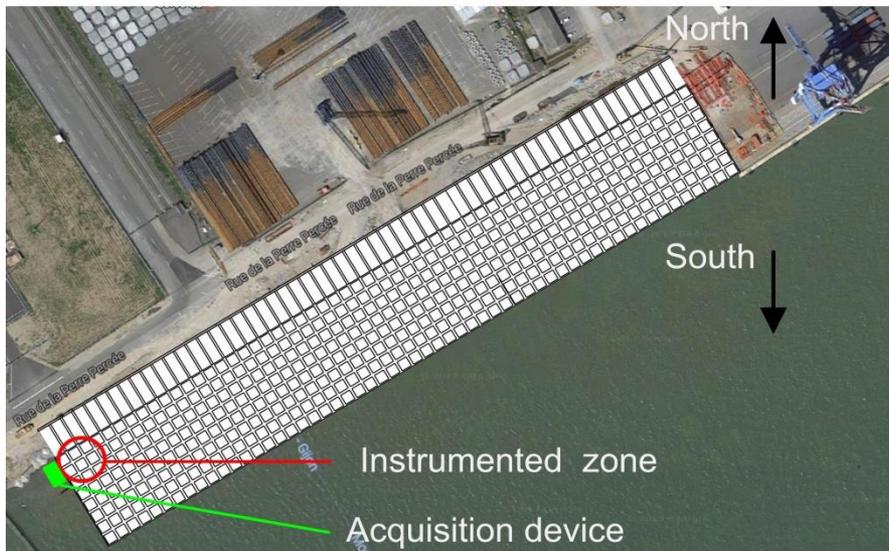
La structure instrumentée : extension du TMDC à Saint-Nazaire



La structure instrumentée : extension du TMDC à Saint-Nazaire



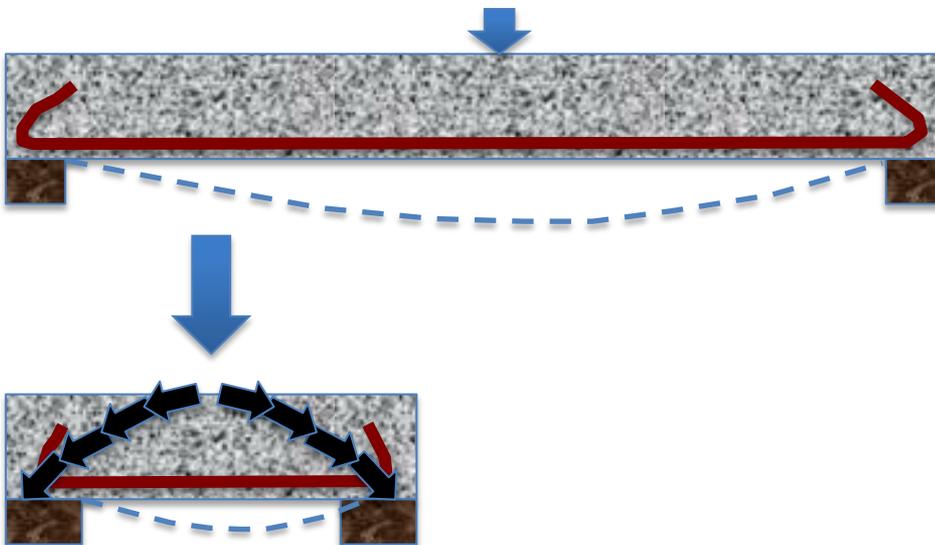
La structure instrumentée : extension du TMDC à Saint-Nazaire



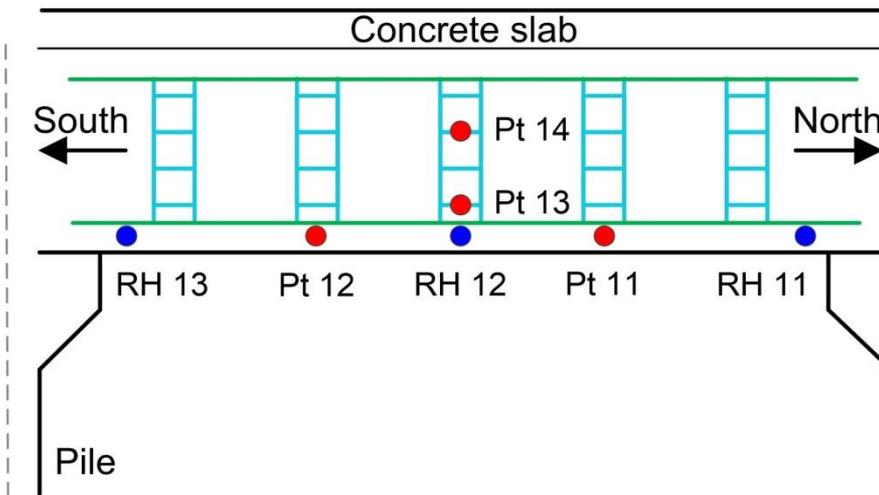
Sujets d'intérêts - verrous technologiques

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.

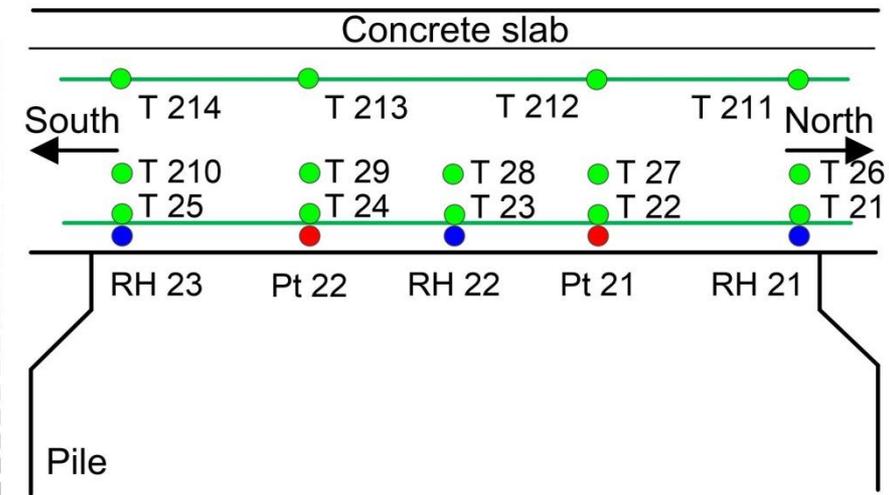


Mesure de température :



● RH % sensors ● Temperature Pt 100 sensors

a) Schematic view of beam 1

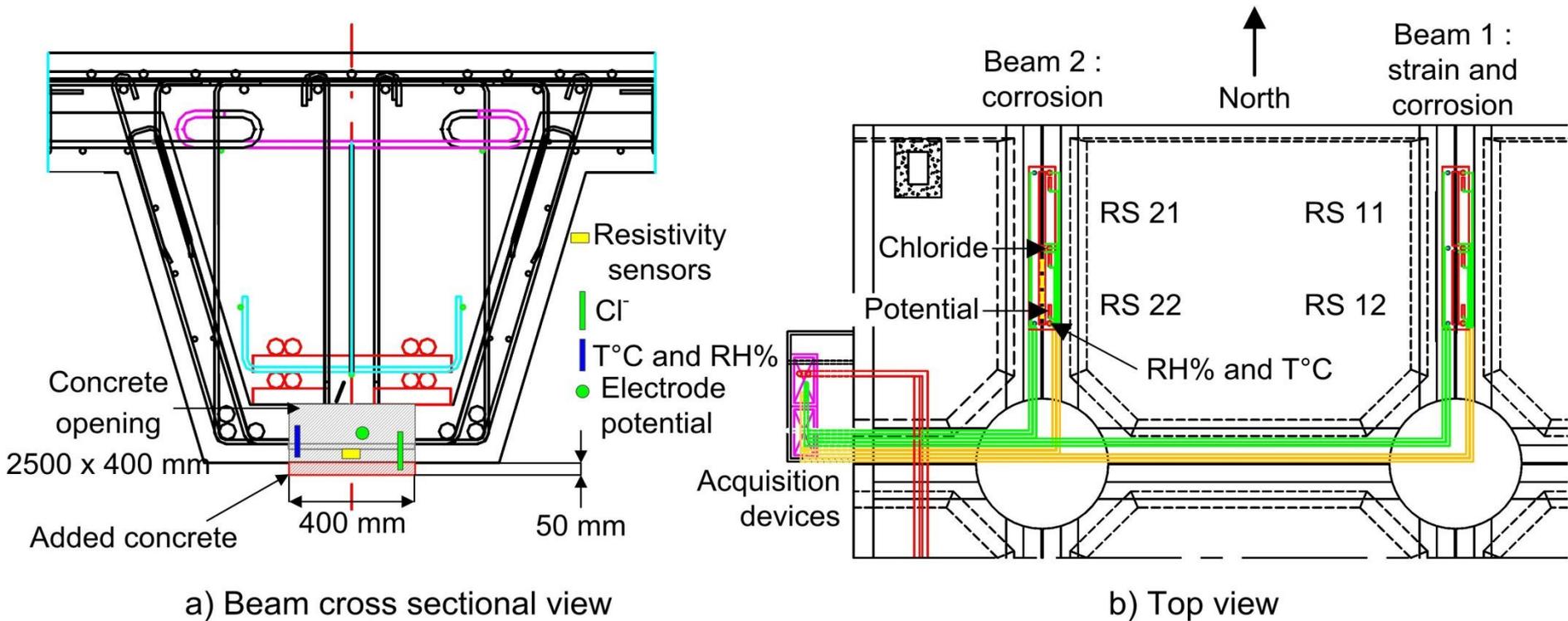


● Thermocouples sensors

b) Schematic view of beam 2

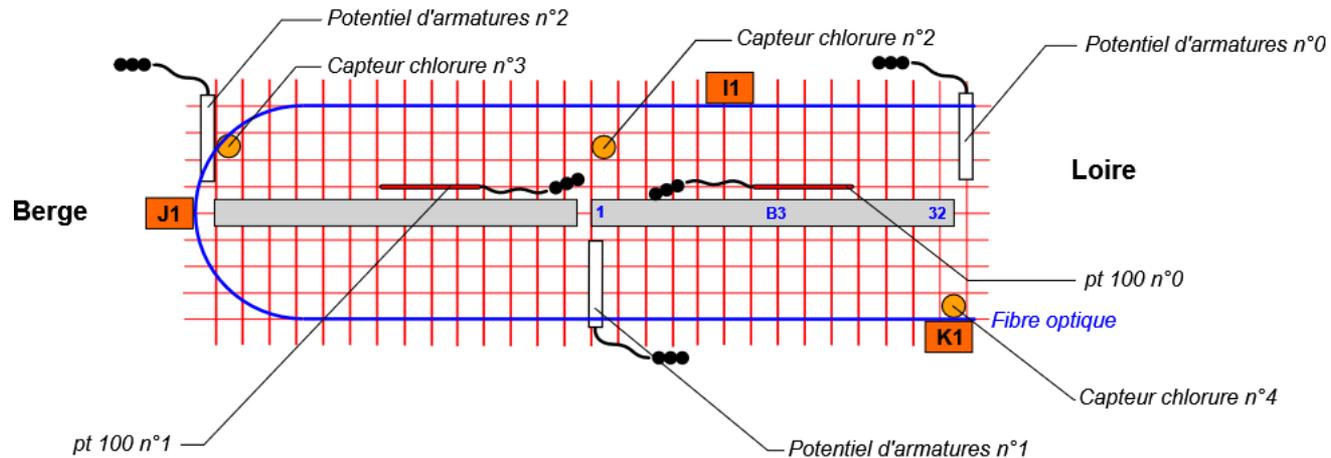
Suivi de la corrosion (1) :

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



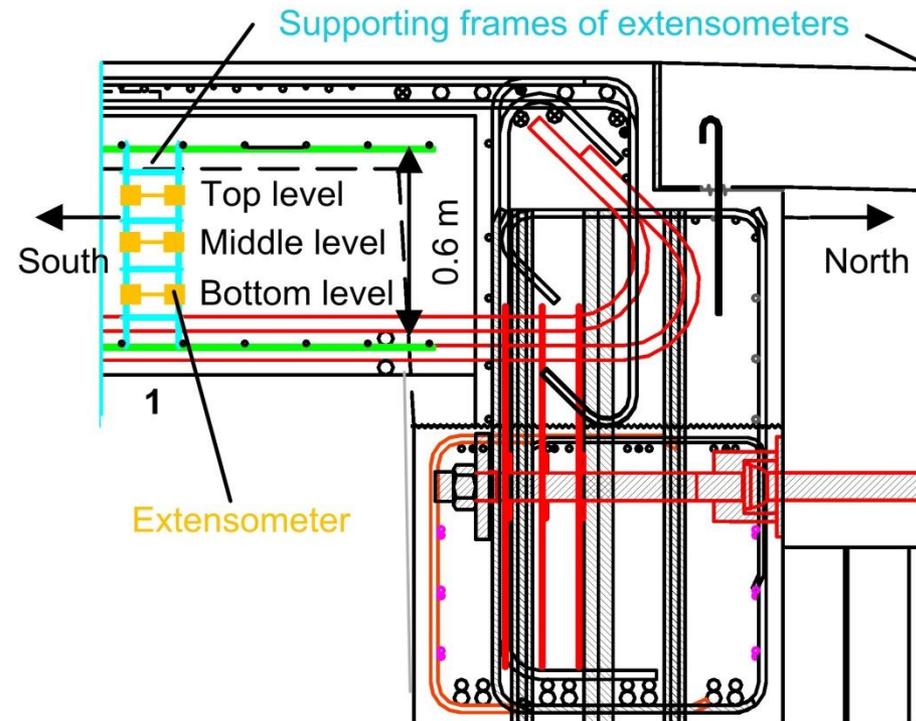
Suivi de la corrosion (2) :

- Température, RH%, **Résistivité**, Potentiel d'armature, Chlorures, Porosité 90 j (à faire)

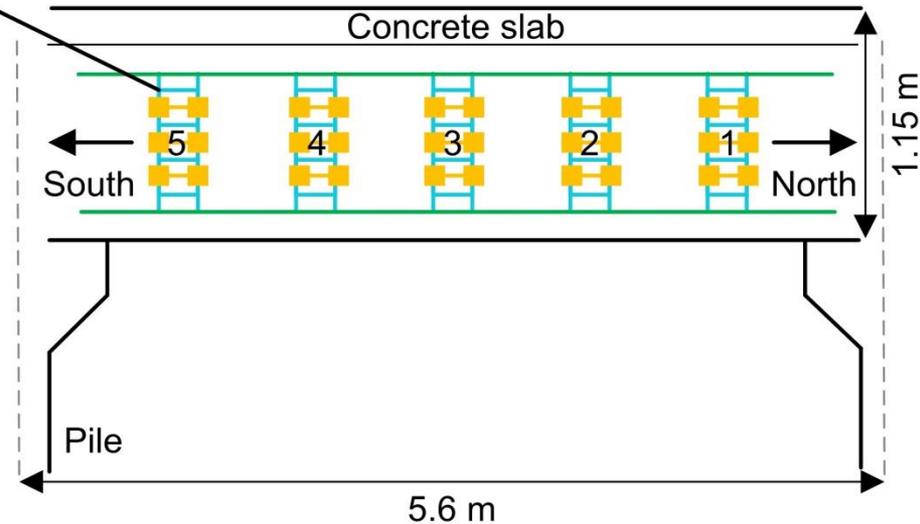


Mesure de déformation :

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



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

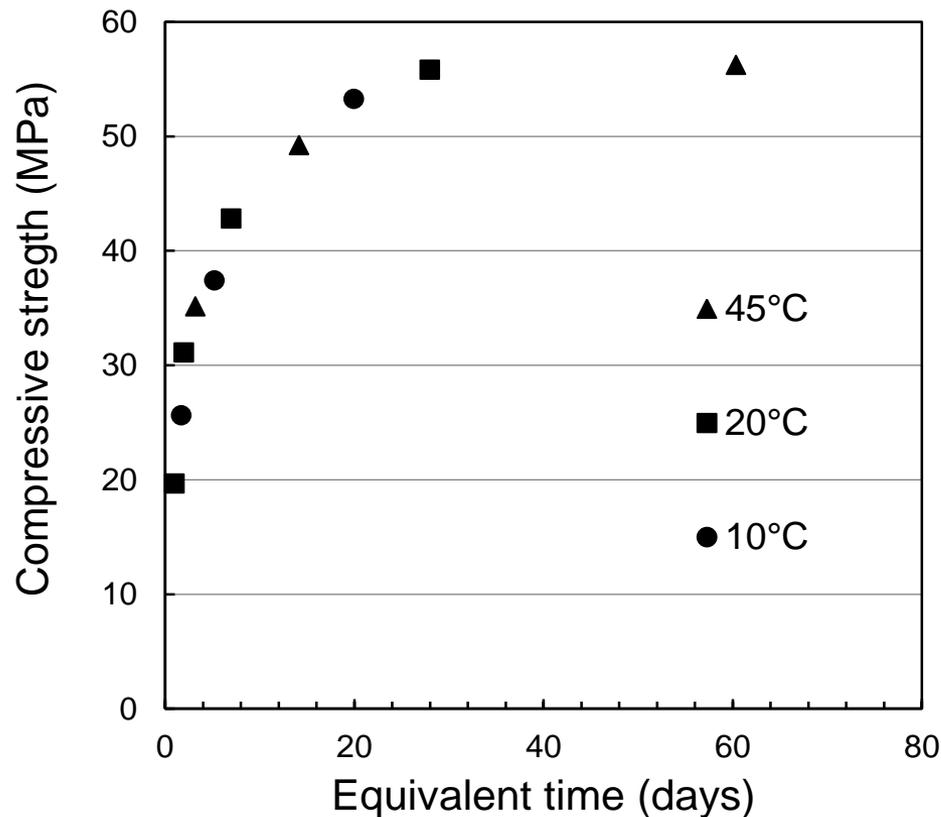


b) Schematic view of extensometers positioning

Mesure de déformation (2) :



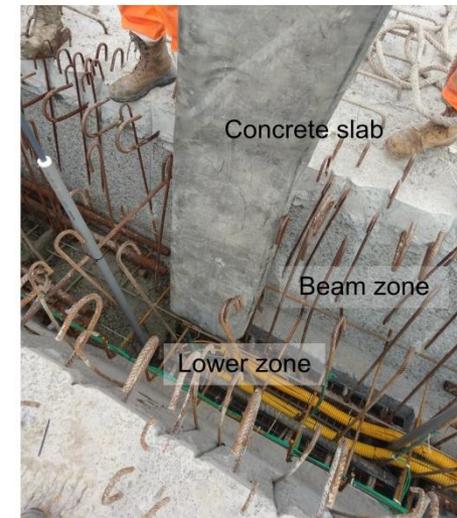
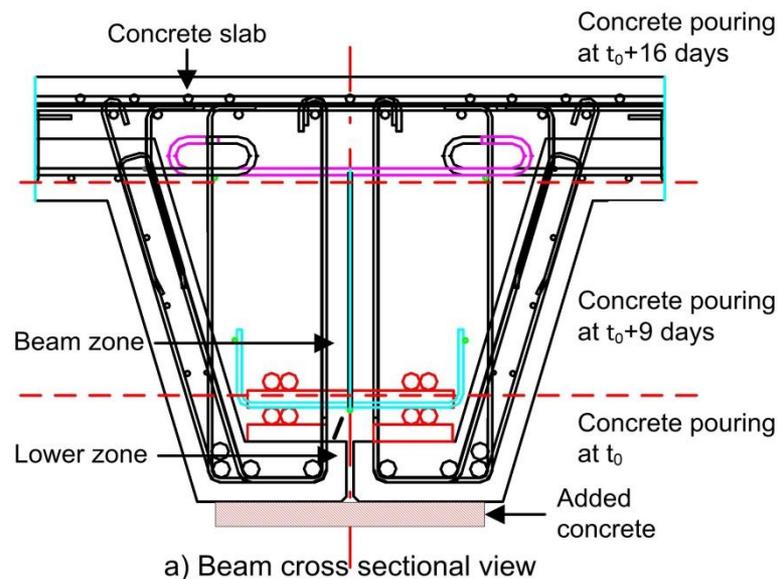
Essais matériaux :



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

Phasage du travail d'instrumentation

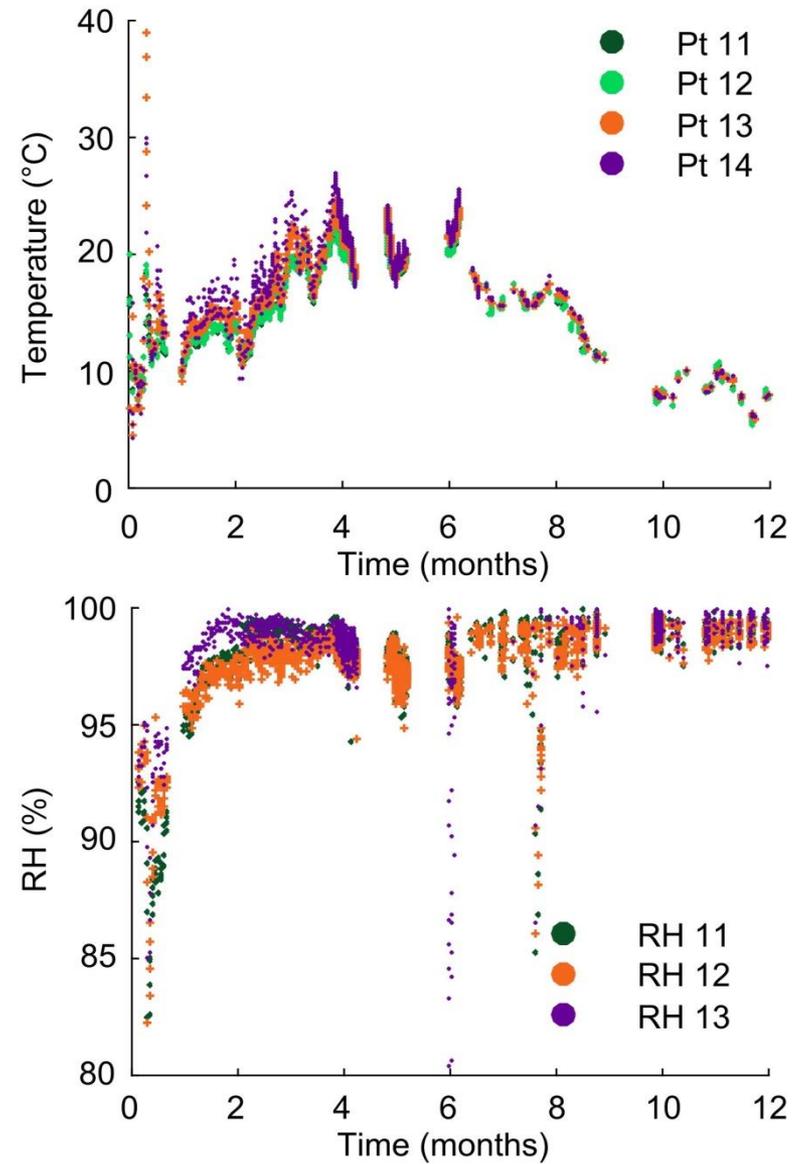
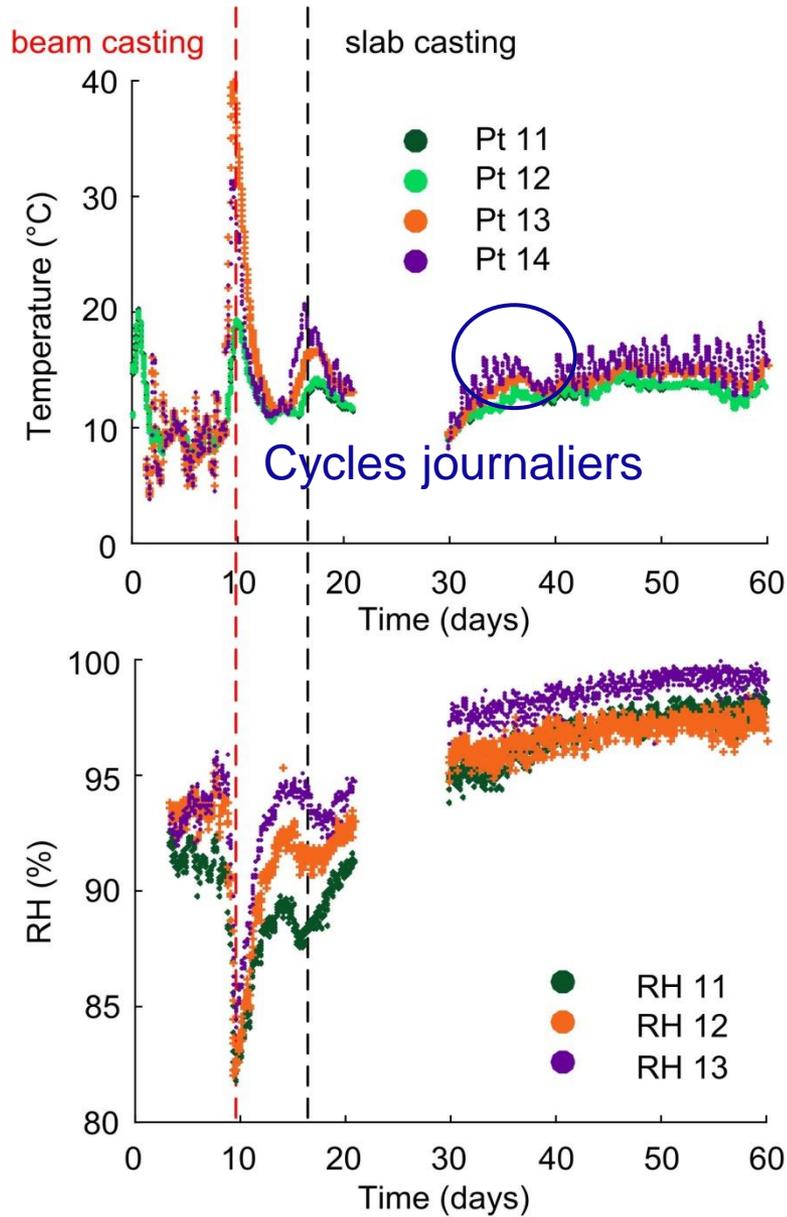
- J = J-3 Pose des éléments préfabriqués
- [J-3, J] Ferrailage nappe inférieure et pose des capteurs dédiés à la mesure de corrosion
- J Coulage du béton de la zone inférieure – **Démarrage mesure**
- [J, J+2] Pose des capteurs de déformation et ferrailage nappe supérieure
- J+9 Coulage du béton dans les poutres
- J+16 coulage de la dalle



Type de capteur	Nombres de capteurs posés	Nombres de capteurs fonctionnels
FBG Mesure de déformation	15 Mesure ponctuelle puis continue	13 (câbles sectionnés)
Résistivité	4 Mesure ponctuelle	3 (connectiques)
RH%	6	5 (signaux en partie saturés)
PT 100	6	6
Electrode Ag	6	6
Chlorures	6	6
Fibre mesure température et ϵ	2 Mesure ponctuelle	2
Thermocouples	14	14



Température et HR %



Profil des ions chlorures (ASTM C1152) :

- Test destructif (carottage);
- Mesure des ions libres par une méthode chimique.

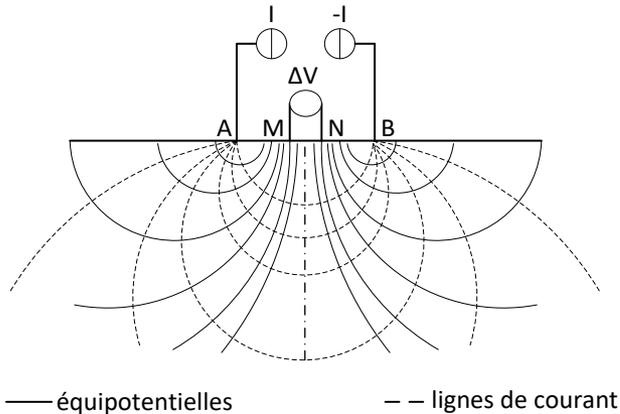
Mesure de résistivité :

- Renseigne sur le risque de corrosion (élevé si $\rho < 100 \Omega.m$) [Polder] ;
- Appareil portable pour une mesure ponctuelle ;
- Capteur enfoui pour de la mesure ponctuelle;
- Limite : dispersion importante des résultats sur des échantillons identiques [Polder] ;
- Sondage électrique (méthode géophysique).



Sonde Wenner portable

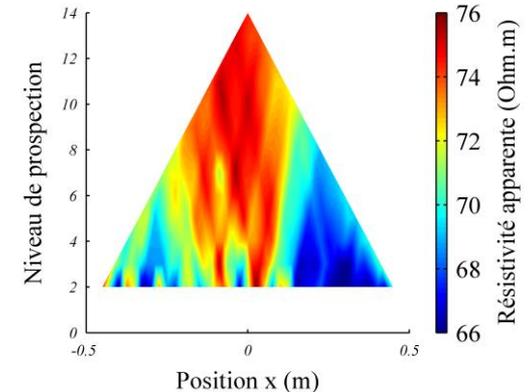
L'auscultation électrique adaptée de la géophysique au GC :



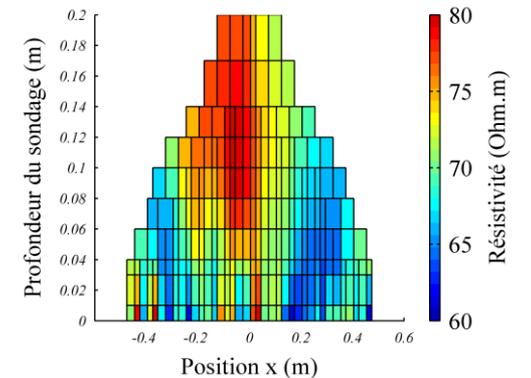
Principe



Matériel



Panneaux de résistivités apparentes



Panneaux de résistivités « vraies »

Résultat

Capteur intégré dédié au SHM.

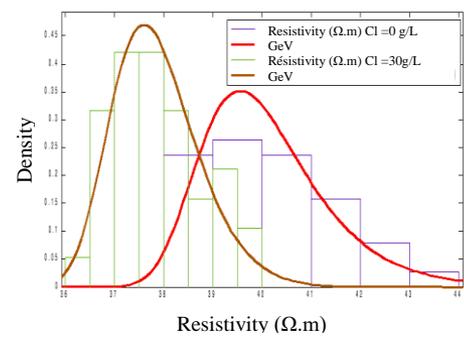
- Intérêt : panneau de résistivité électrique ;
- Possibilité d'effectuer un traitement statistique des données ;
- Limite : adaptation de la méthode à la problématique du génie civil

Monitoring de la corrosion par résistivité électrique (Etat de l'art)

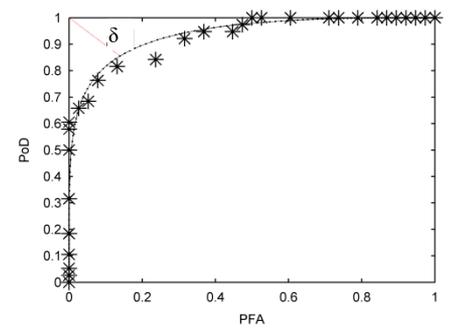


➤ Probabilité de détection d'un seuil de Cl⁻ :

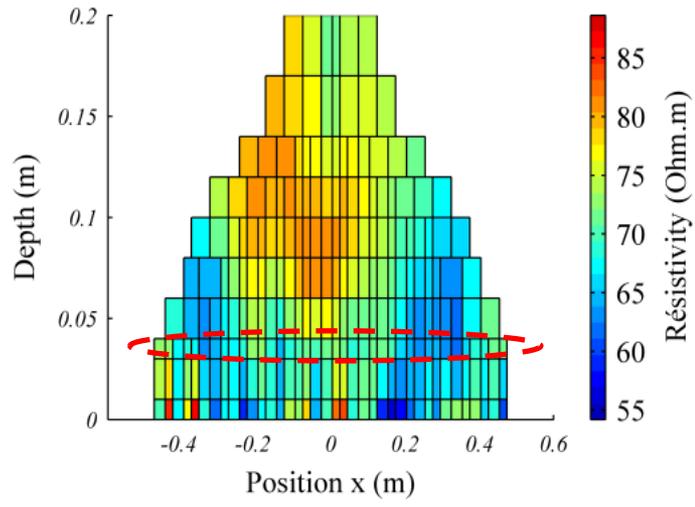
- ✓ Exploitation des résistivités inversées pour un niveau donné
- ✓ Courbe ROC



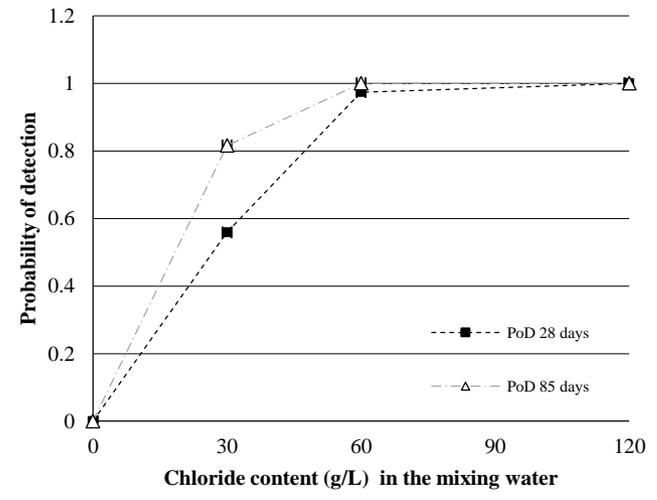
a) Experimental and fitted distributions of resistivity at 28 days



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

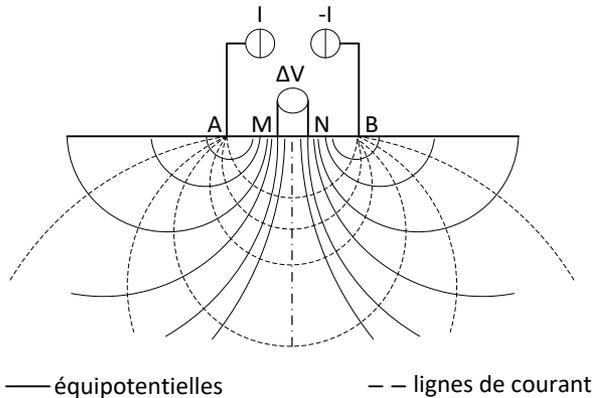


Données exploitées



Seuil de détection des chlorures

Résistivité apparente :



Potentiel en un point quelconque M :

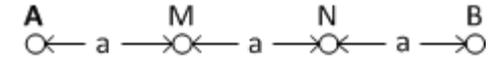
$$V_M = \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{I_1}{r_1} + \dots + \frac{I_n}{r_n} \right]$$

Expression de la résistivité apparente :

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I}$$

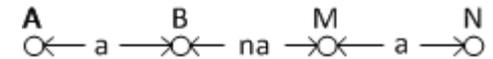
Protocole Wenner

$$K = 2\pi a$$



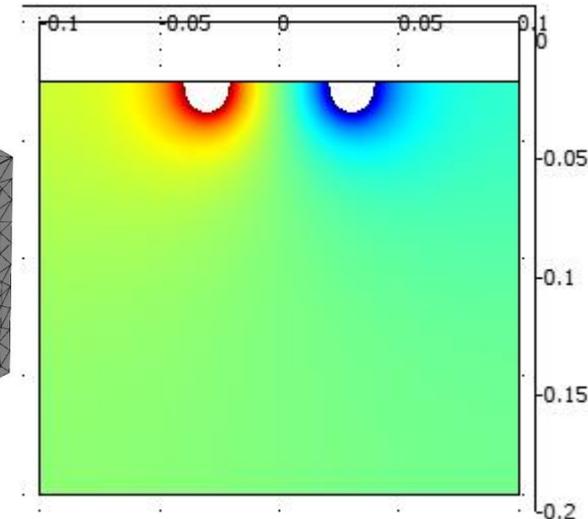
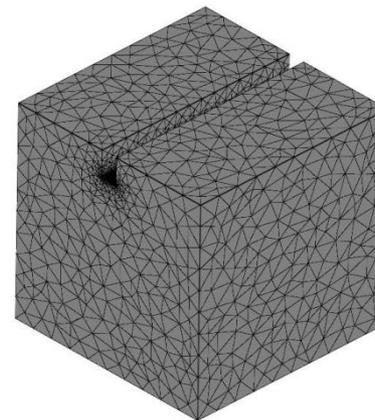
Protocole Dipôle-Dipôle

$$K = \pi n (n+1) (n+2) a$$

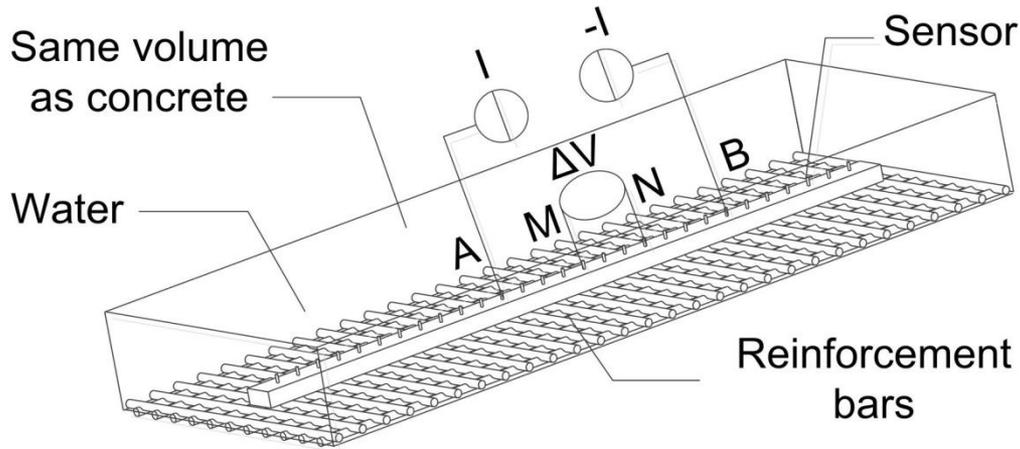


Calcul du coefficient K :

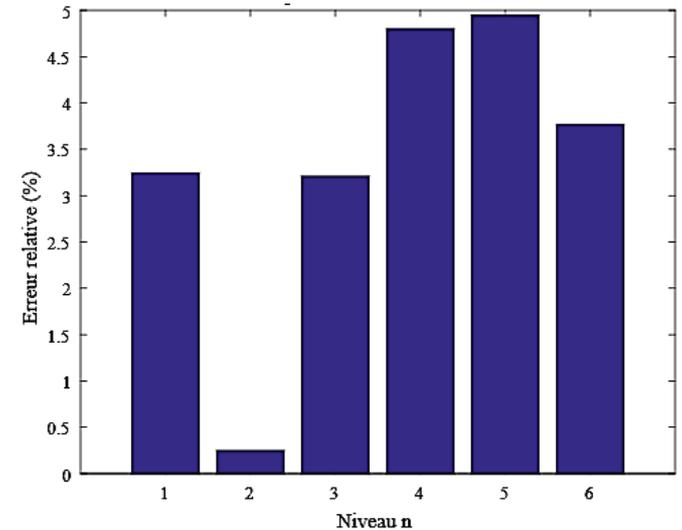
- Calcul analytique si le milieu est semi infini
- Sinon, il faut prendre en compte la géométrie du milieu :
 - ✓ Etalonnage numérique;
 - ✓ Etalonnage expérimental.



Calcul numérique des facteurs géométriques K :

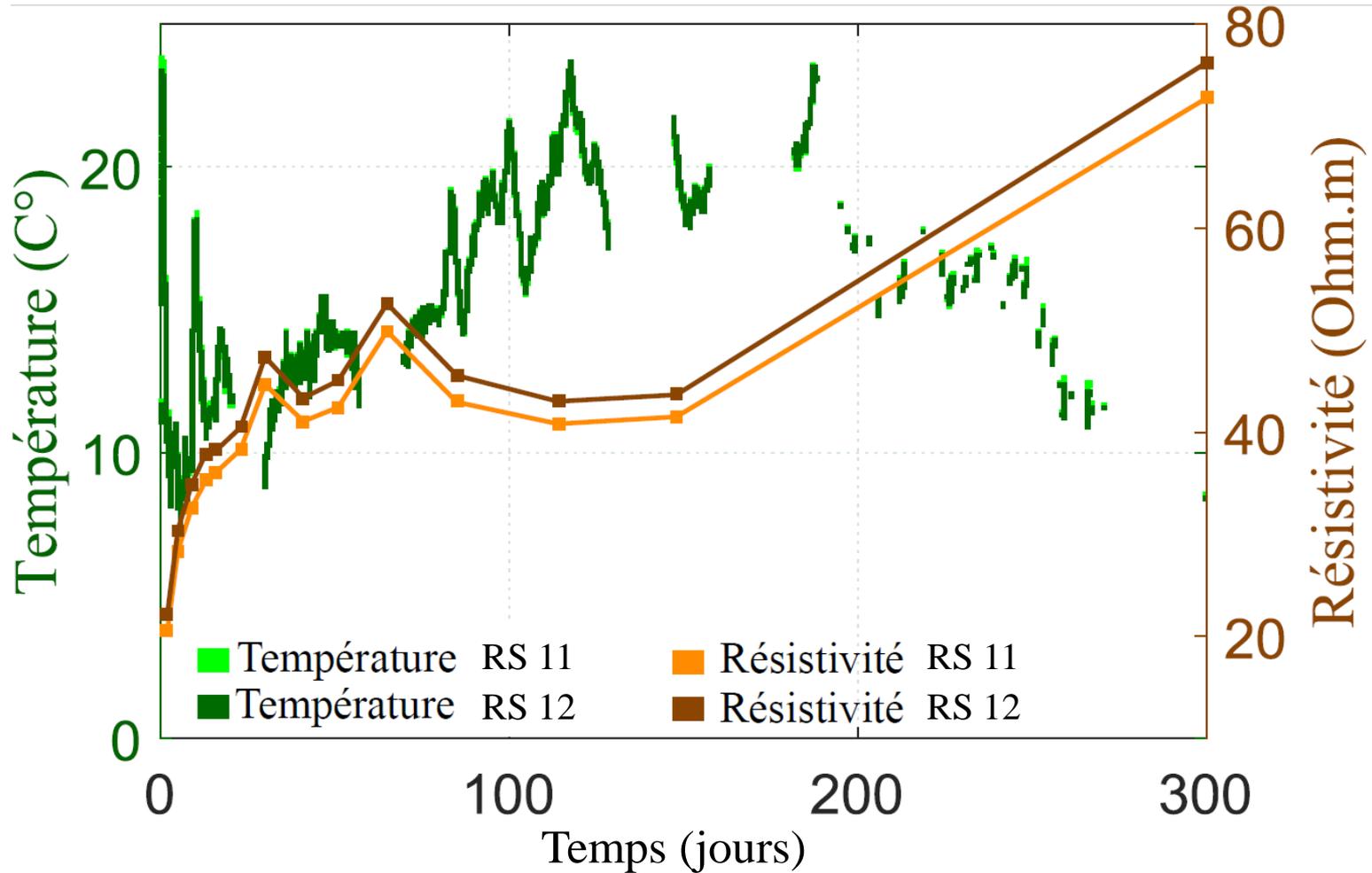


Mesure des facteurs géométriques :



Ecart, mesure - modèle

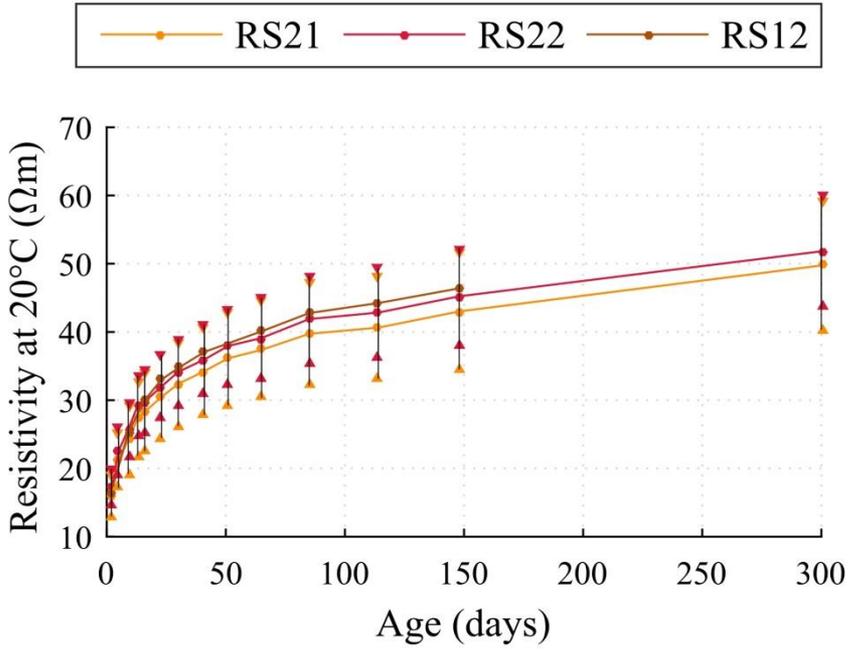
Résistivité – suivi du béton



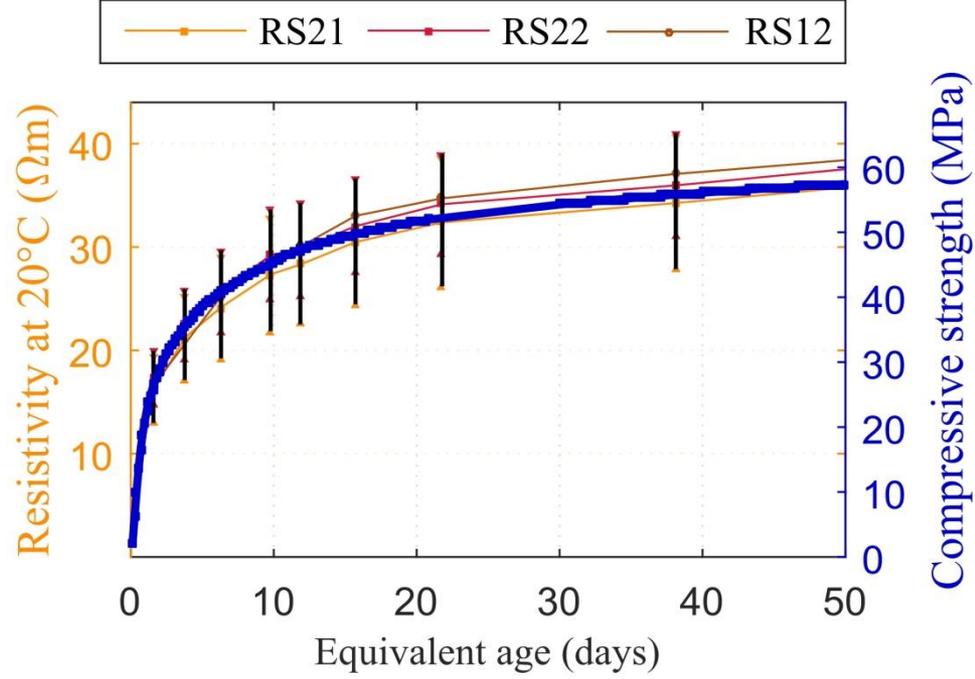
Correction des effets thermiques :

$$\rho_{T_{mes}} = \frac{\rho_{T_{ref}}}{1 + \alpha(T_{mes} - T_{ref})}$$

Corrélation entre évolution de la résistance mécanique et évolution de la résistivité



a) Apparent resistivity

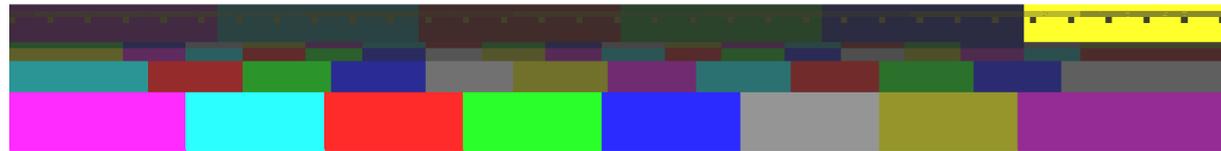


b) Apparent resistivity and compressive strength

Identification des paramètres de résistivité :

➤ Affichage des données mesurées (résistivité apparente)

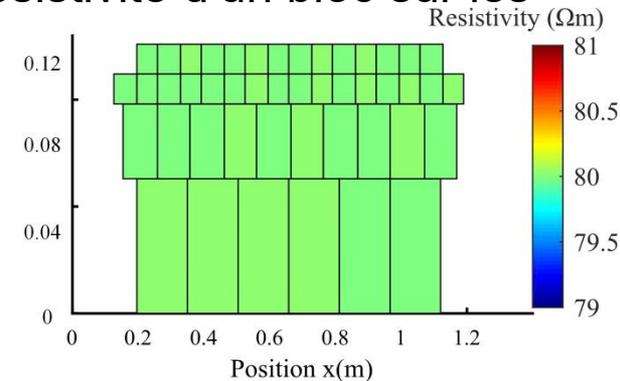
- ✓ Paramétrage



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

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

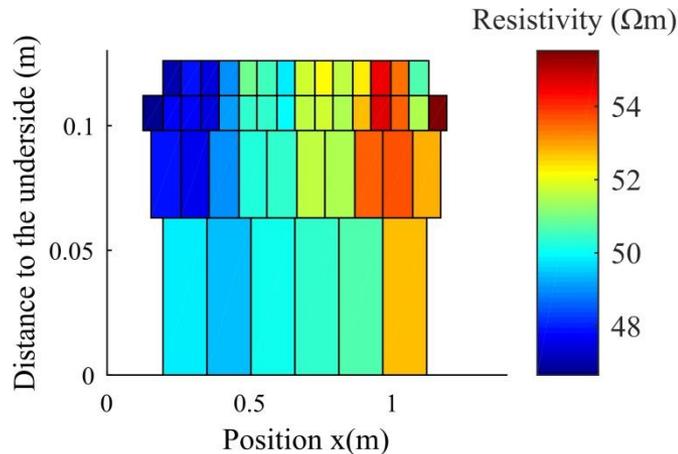
$$\rho_i = \frac{\sum_{k=1}^{129} \tilde{S}_i^k \rho^k}{\sum_{k=1}^{129} \tilde{S}_i^k}$$



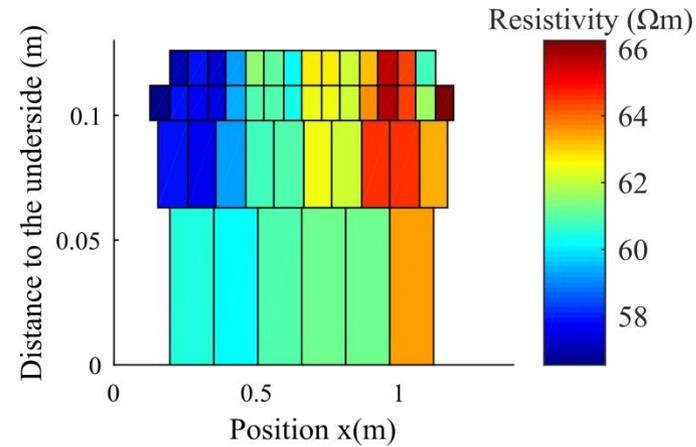
➤ Identification des résistivités vraies (pseudo section de résistivité)

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

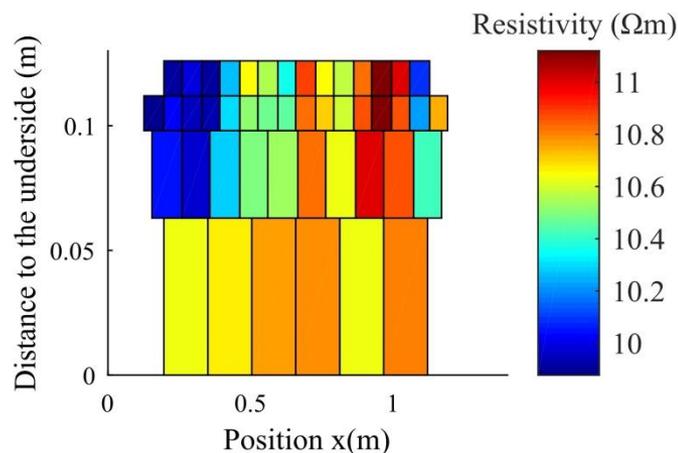
Utilisation des pseudo-sections de résistivité apparente pour identifier une zone à surveiller :



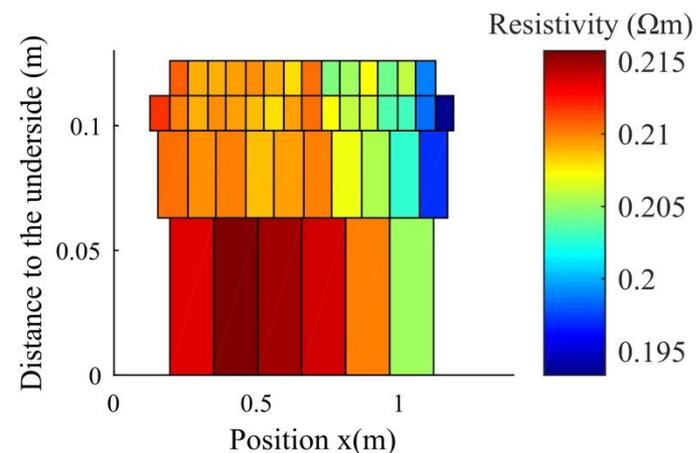
a) Map: RS21 day 148



b) Map: RS21 day 300



c) Difference between days 148 and 300



d) Relative difference between days 148 and 300

PROCHAINE JOURNÉE SCIENTIFIQUE À L'ESTACA

Le 29 mars 2019

Pour faire le point sur les dernières avancées des travaux de recherche des membres du GIS ECND_PdL et ateliers de montage de projet

- pour en savoir plus cliquer ici

13 Laboratoires Scientifiques

Académiques et Établissements de Recherche Appliquée

Spécialisés dans le domaine

Evaluation et Contrôle Non Destructifs

en Pays de la Loire

Regroupés autour de **Méthodes**:

Acoustiques, Électromagnétiques, Nucléaires...

Pour des **Applications** :

Aéronautique, Génie Civil, Naval...



Merci pour votre attention



UNIVERSITÉ DE NANTES



**SHM-France 2019 – 2ème Journée nationale :
Contrôle et monitoring des structures**

IFSTTAR Marne la Vallée le 14/03/2019