

Evaluation des gradients de propriétés des bétons selon la profondeur par mesures ultrasonores embarquées

Jean-François Chaix, Cécile Saïdi-Muret, Vincent Garnier

amU
Aix
Marseille
Université



Centrale
Méditerranée



Rouba Hariri, Olivier Durand, Odile Abraham

Université
Gustave Eiffel





[Hariri 2024] Hariri R. *Thèse de l'Université Gustave Eiffel, Nantes.*

Contexte général



Diagnostics des ouvrages du génie civil

Présence de bétons soumis aux conditions
environnementales  

CND par Ultrasons
= Evaluation des propriétés mécaniques

→ SHM par Ultrasons
pour les structures du Génie Civil
Découpler les effets...

Diagnostic des ouvrages en bétons

Programme de l'ANR ScaNING

Ondes ultrasonores dans les bétons

Dispositif ultrasonore en SHM

Protocole et qualification des mesures

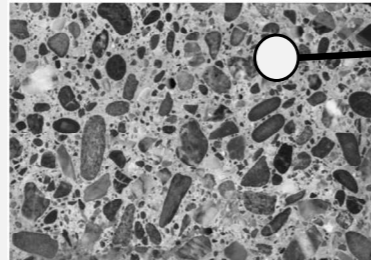
Suivi du gradient de teneur en eau

Perspectives pour le SHM dans le Génie Civil

Diagnostic des ouvrages en bétons

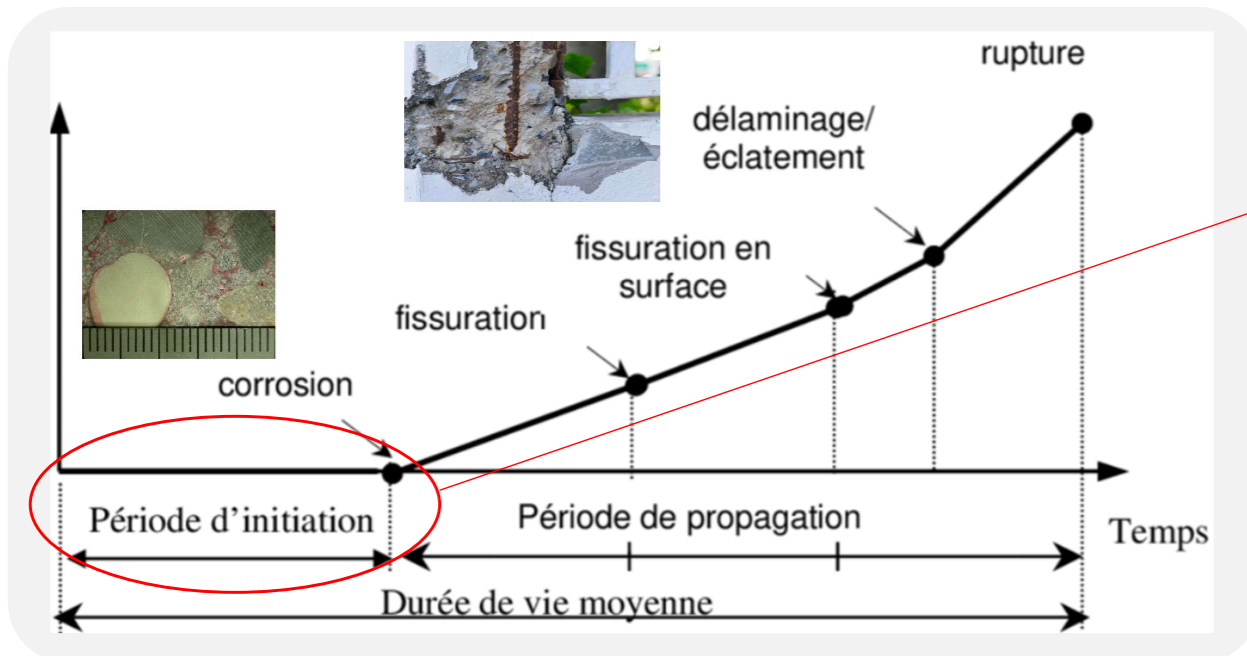
Composition

Ciment
Granulats
Pores
Eau



Aciers

Endommagement



Pour une composition de béton,
évolutions:

- Endommagement (μ fissures)

- Saturation en eau

- Température

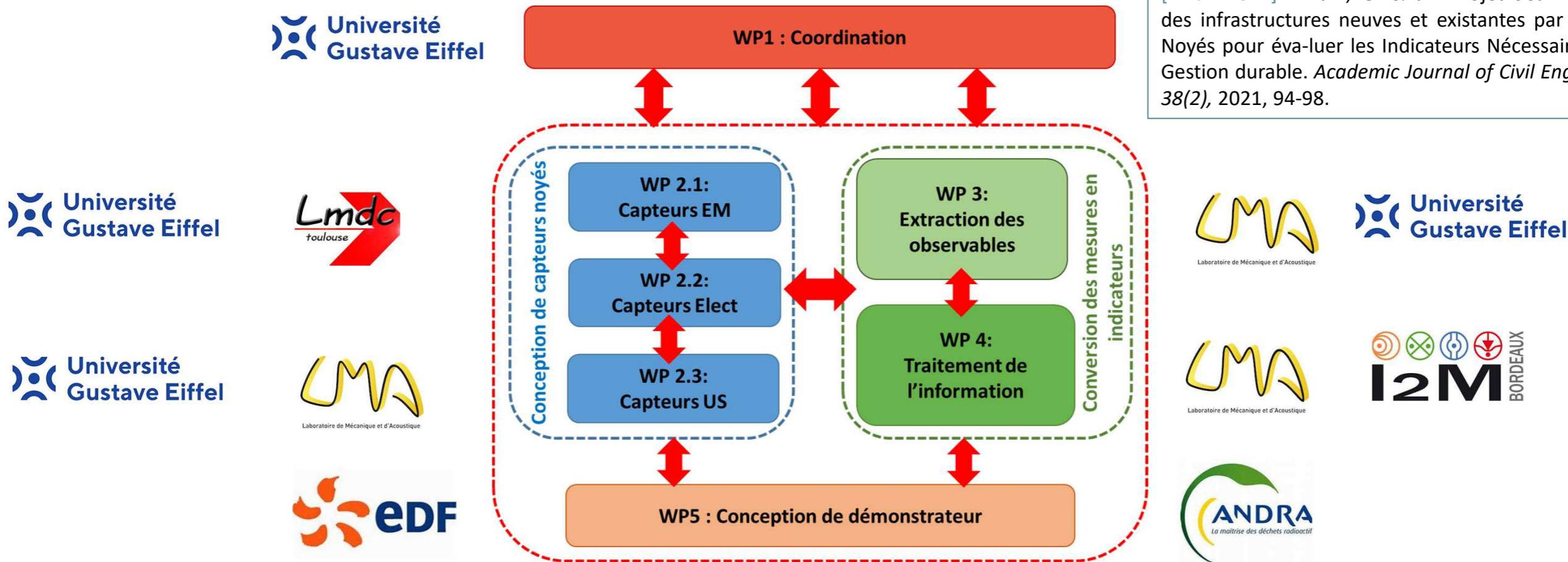
Diagnostic

[Zoubir Lounis, 2006] Zoubir Lounis. Modèles fiabilistes pour la prévision de la durée de vie des tabliers de ponts et béton, August 2006, 13e Colloque sur la Progression de la Recherche sur les Ouvrages d'Art, Transports Québec, Québec, QC., 9-10 mai, 2006, pp. 1-8.

Programme de l'ANR ScaNING

Suivi des infrastructures neuves et existantes par **Capteurs Noyés** pour évaluer les **Indicateurs Nécessaires** à leur **Gestion durable**

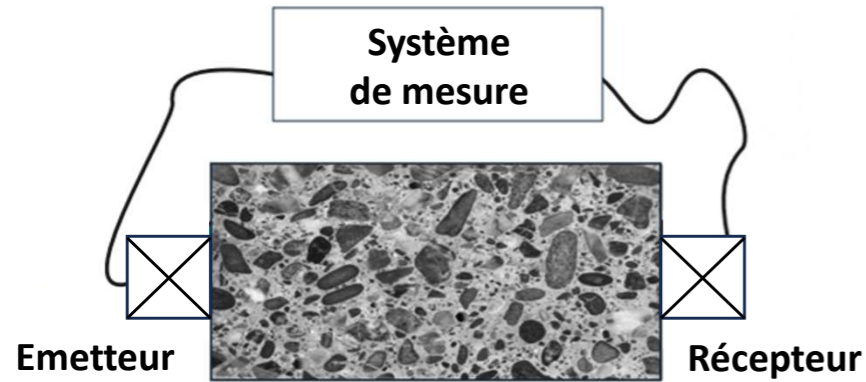
[Villain 2021] Villain, G. & all. Projet ScaNING: Suivi des infrastructures neuves et existantes par Capteurs Noyés pour évaluer les Indicateurs Nécessaires à leur Gestion durable. *Academic Journal of Civil Engineering*, 38(2), 2021, 94-98.



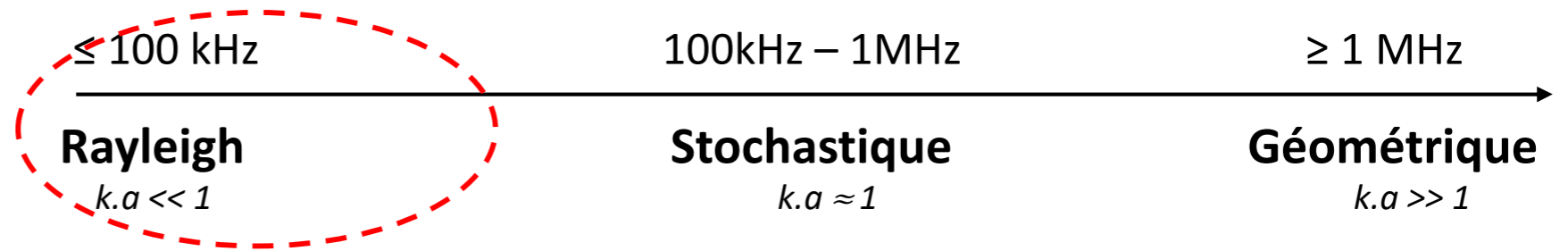
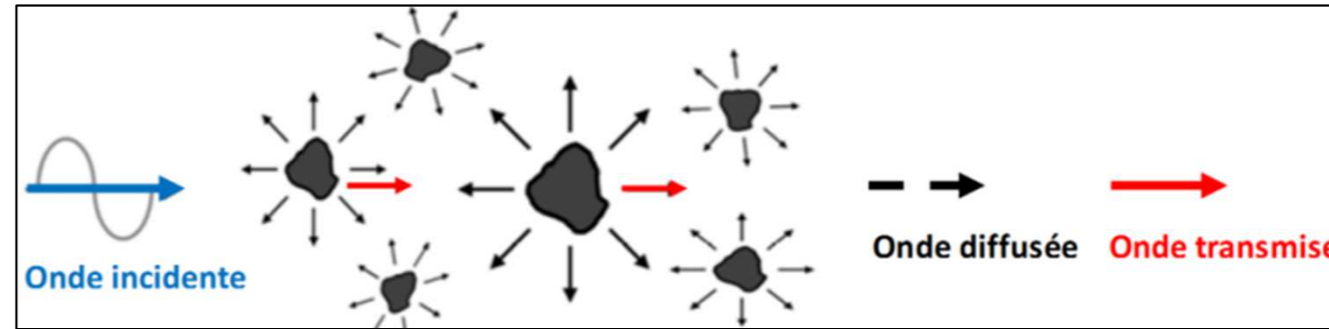
Objectif : Développer et qualifier des chaînes de mesure pour suivre le gradient de teneur en eau dans des structures épaisses en béton au cours du temps

Ondes ultrasonores dans les bétons

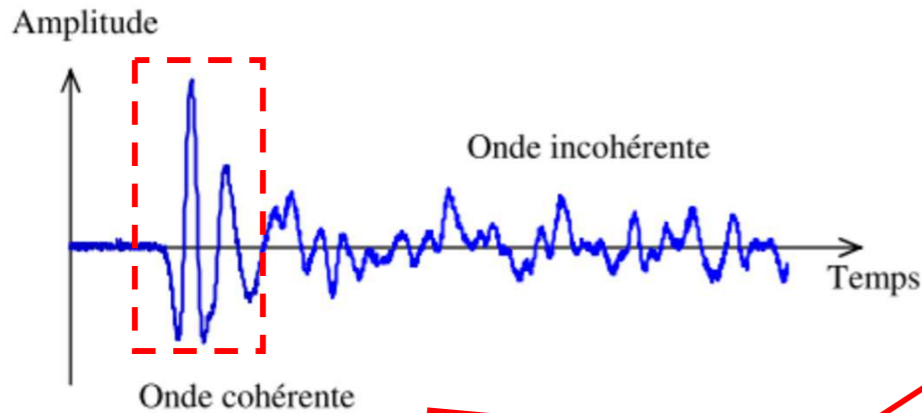
Principe



Diffusion multiple (granulats et fissures)



Signaux



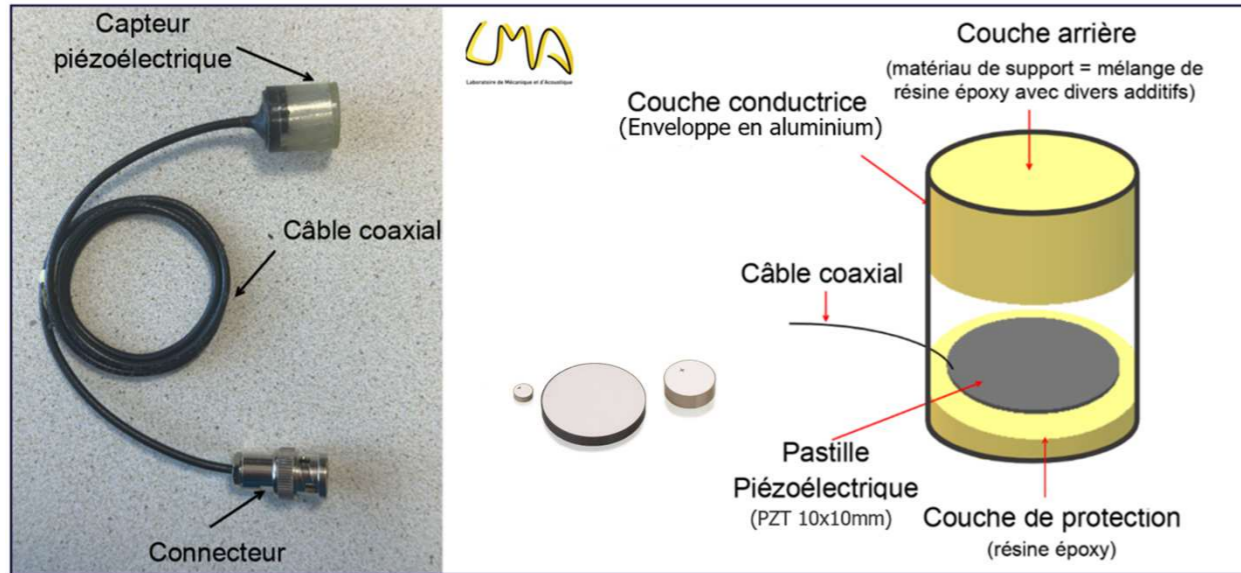
TOF
(& Vitesses US)

Composition

- ✓ Endommagement (*pores et fissures*)
- ✓ Saturation en eau
- ? Température

Transducteurs ultrasonores (pour SHM)

Transducteur



Fabrication

Elément
actif
&
Isolation
électrique

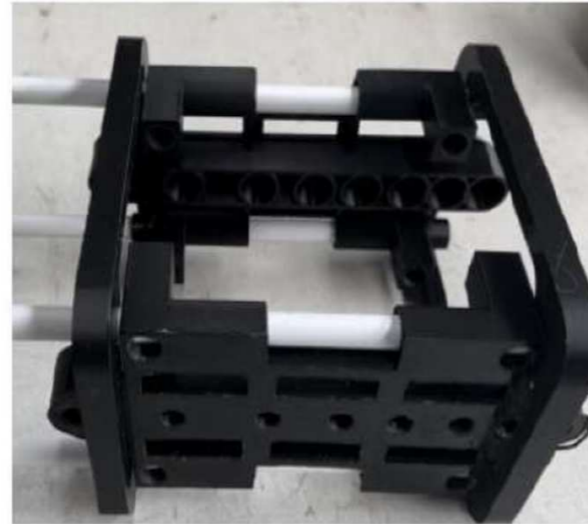
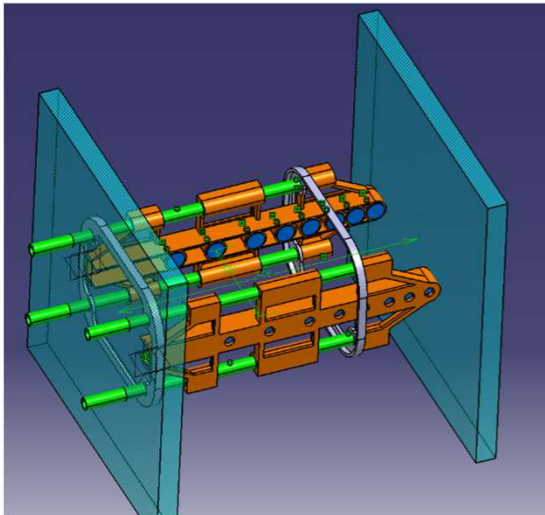


Étanchéité
&
Isolation
chimique

Basse fréquence (100-200kHz)
Petite taille (Ø16x18mm)
Isolation (cylindre aluminium)
Étanchéité (résine époxy)
Faiblement amorti

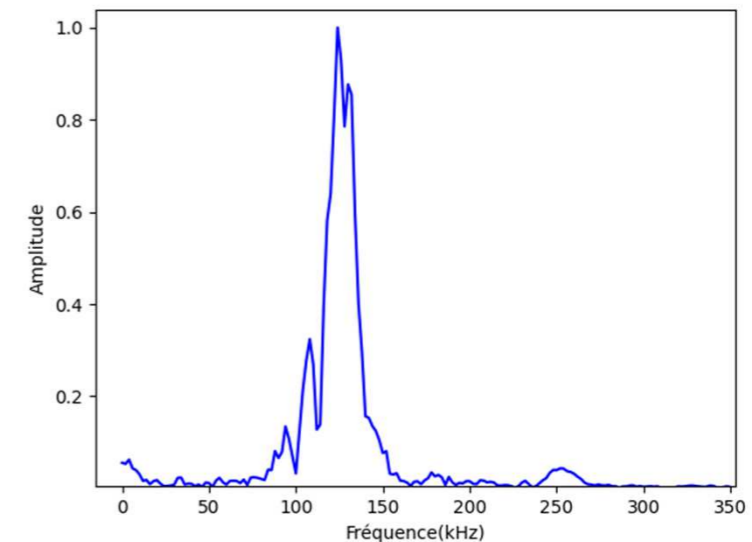
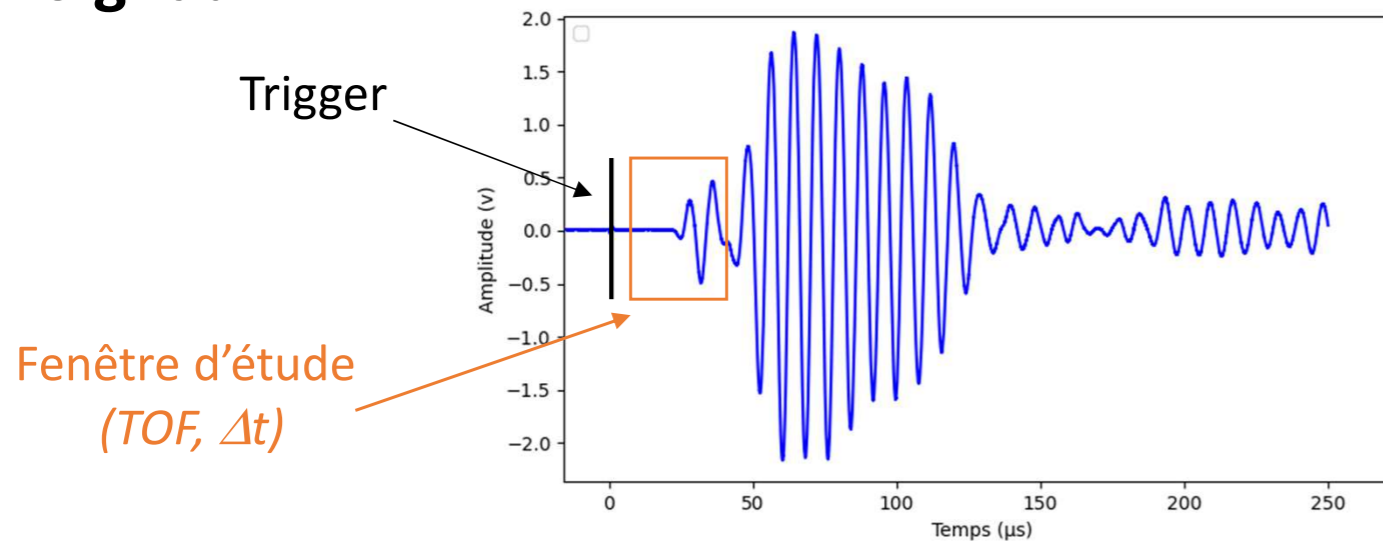
Dispositif ultrasonore en SHM

Support (CAO & Imp. 3D)



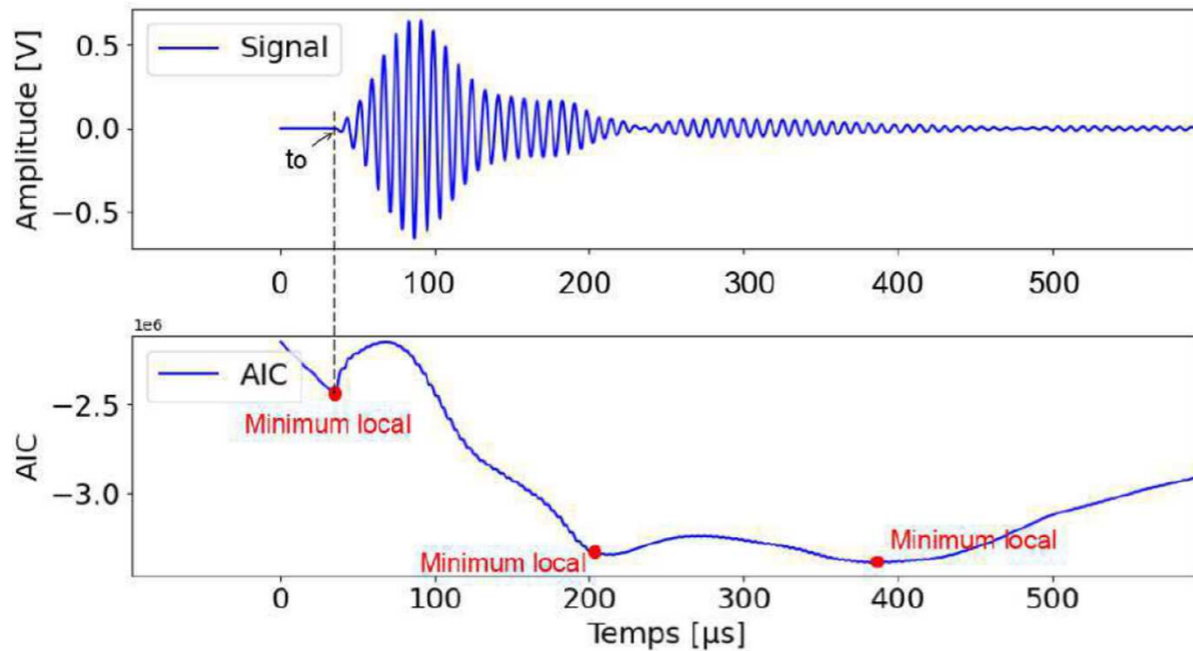
8 couples de transducteurs
Mesure en transmission
Support rigide
TOF et Vitesses ultrasonores
Fréquence 130kHz (110-140kHz)

Signaux



Protocole et qualification des mesures

Vitesse « absolue »



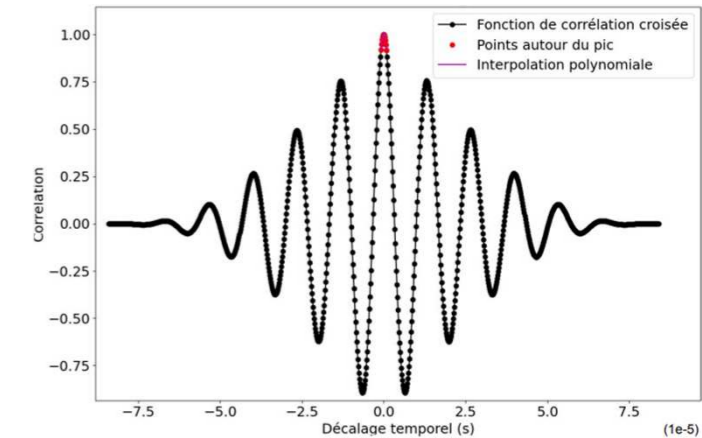
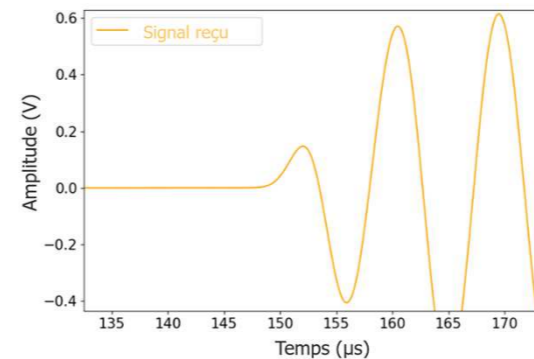
TOF par critère de Akaike (t_m)

$$V_{Beton Abs} = \frac{d}{(t_m - t_{cor})}$$

+/- 50 m/s

Vitesse « relative »

2 signaux à différents instants



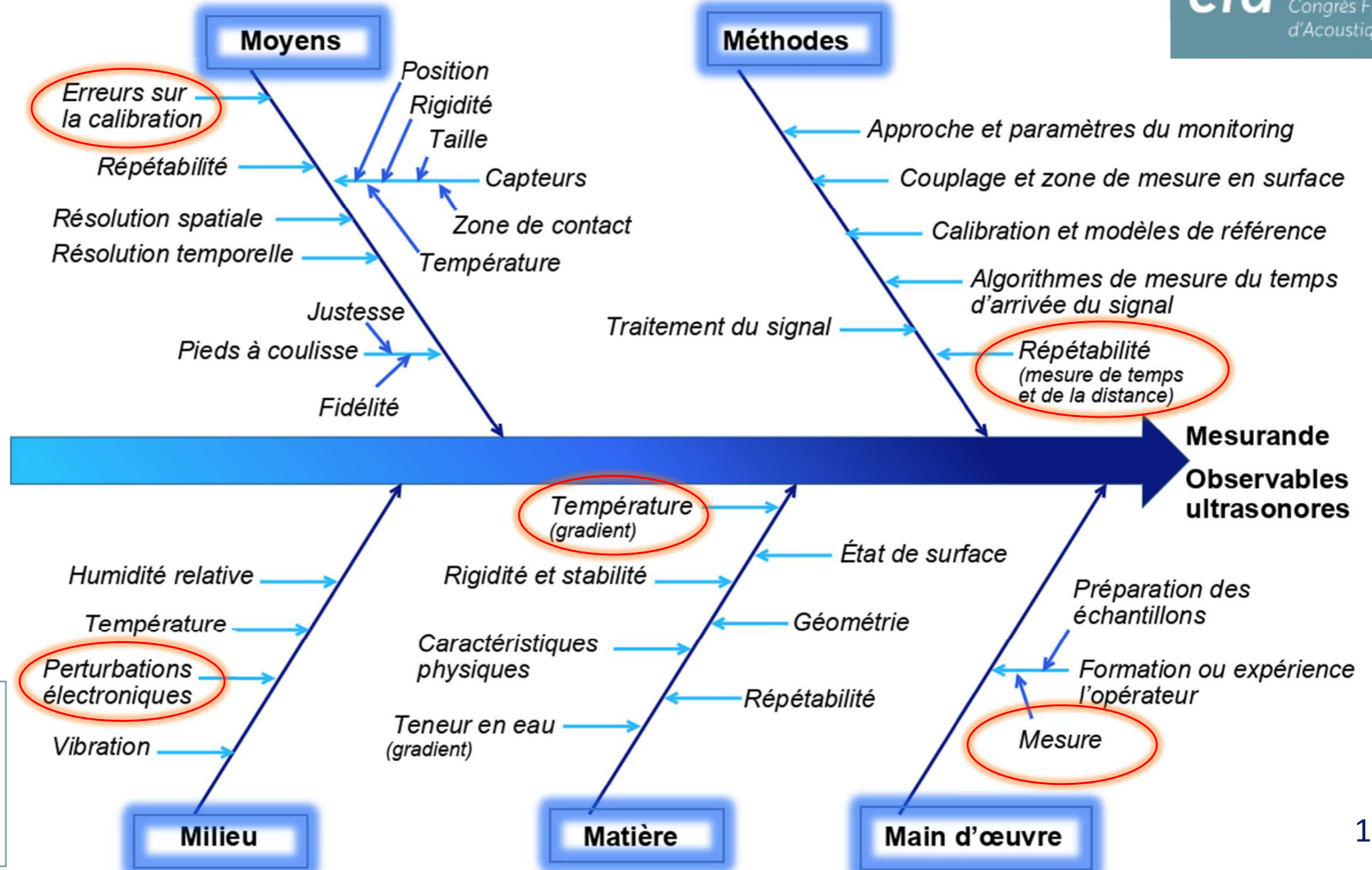
Δt_{Cross} par intercorrélation

$$\frac{\Delta V_{Béton}}{V_{Béton,ref}} \% = \frac{\Delta t_{Cross}}{t_{ref}} \cdot 100$$

+/- 0.2 %

Protocole et qualification des mesures

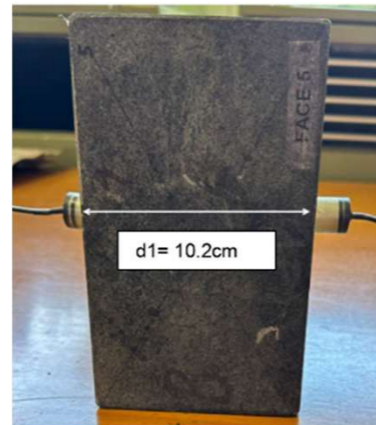
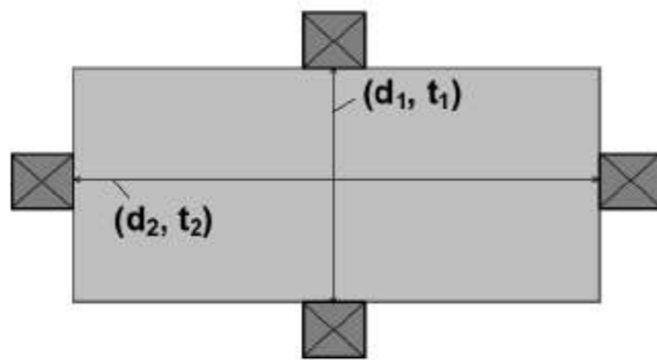
Incertitudes



[Chaix 2018] Chaix J.-F., Hénault J.-M., Garnier V. 2018. Quality, Uncertainties and Variabilities. In *Non-Destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures*, Elsevier: Amsterdam, The Netherlands.

Calibration

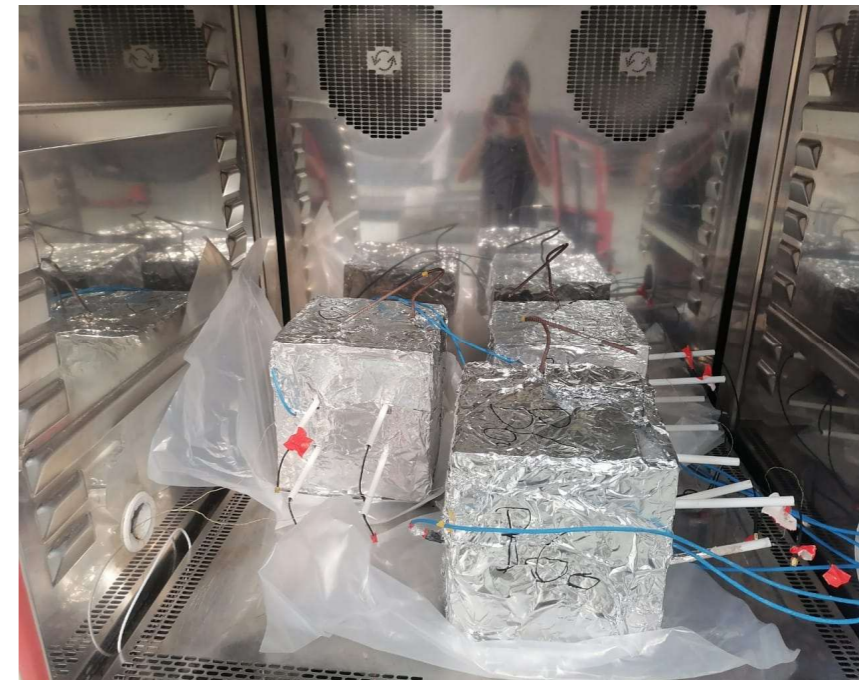
Capteurs



$$t_{\text{Capteurs}} = t_1 - \frac{d_1}{V_{\text{marbre}}}$$

Températures

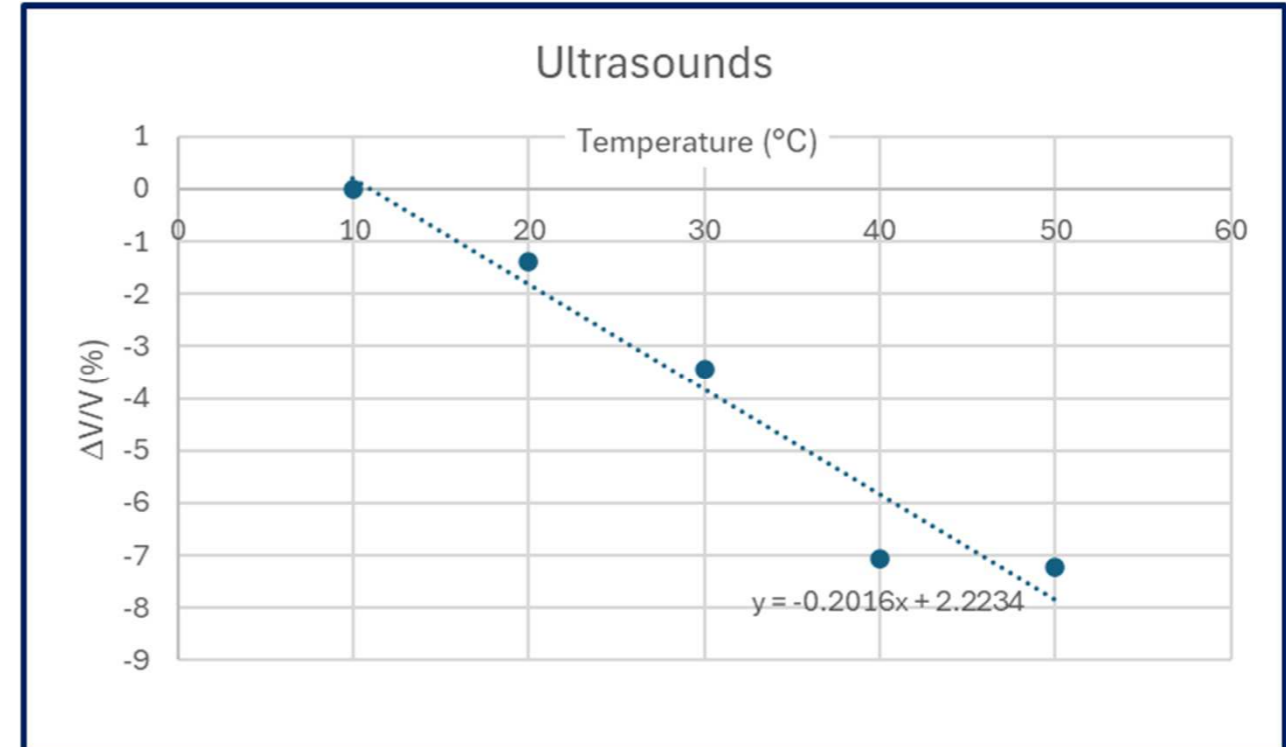
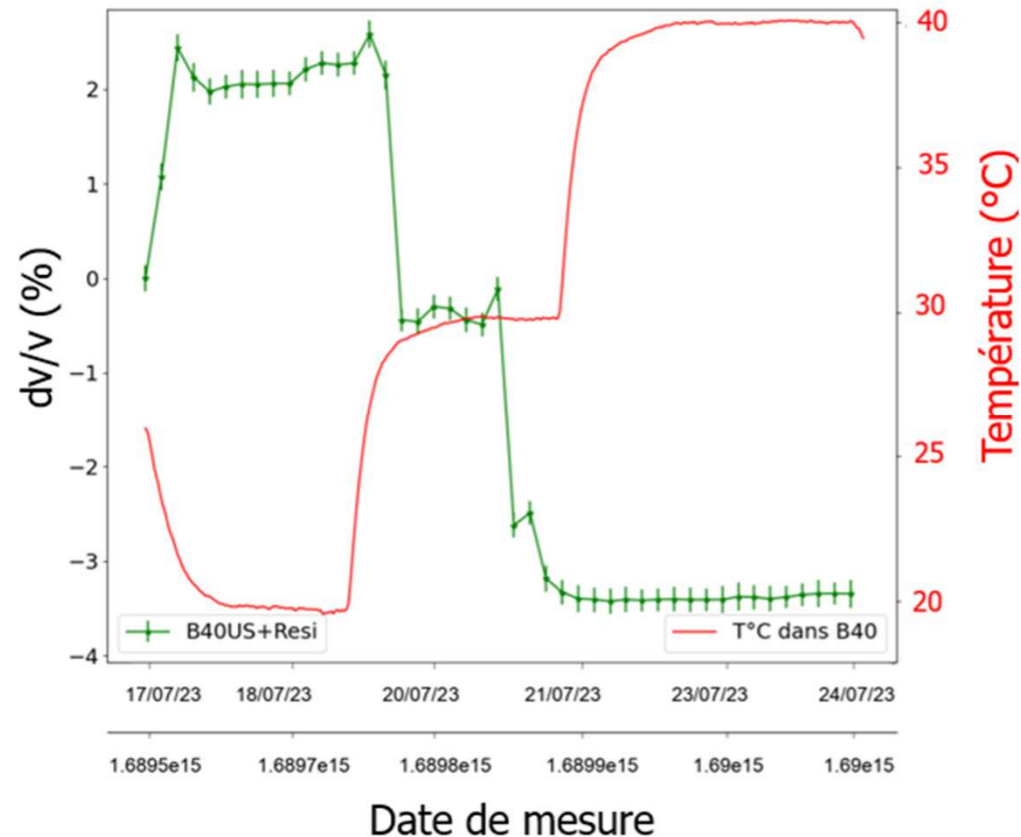
Chauffage contrôlé de blocs de bétons étanchéifiés dans une enceinte climatique



Lois de correction (t_{temp} ou Δt_{temp})

Lois de correction des températures

Exemple d'influence sur vitesse « relative »



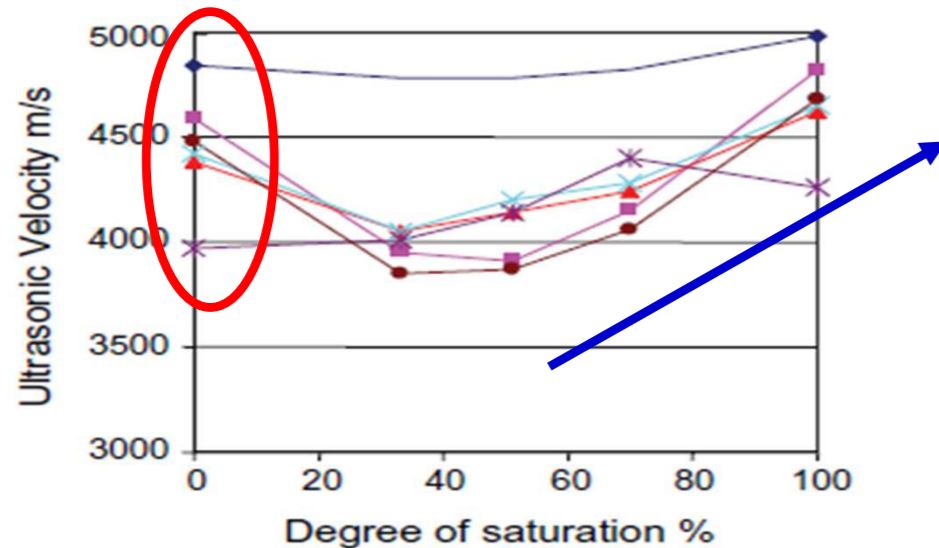
Jusqu'à 7 à 8 % de variation ($\Delta V/V$) entre 10 et 50°C

Effet de la saturation en eau sur les vitesses

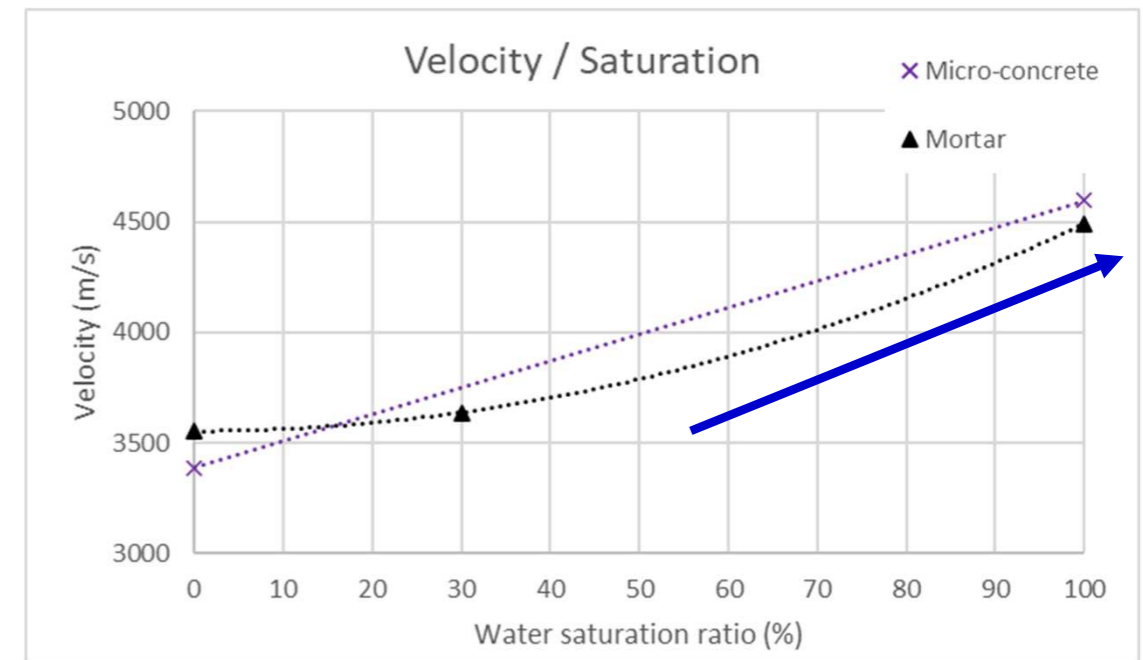
Exemple d'influence sur vitesse « relative »

PIA ANR SENSO 2006-2009

[Garnier 2013] V. Garnier & al. Acoustic techniques for concrete evaluation: Improvements, comparisons and consistency, *Construction and Building Materials* 43 (2013) 598–613.



Essai en cours



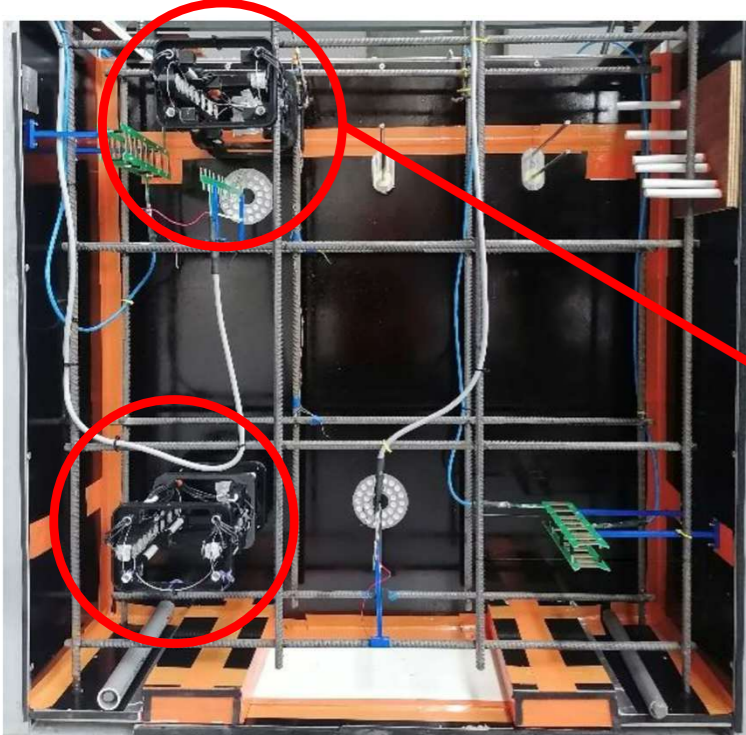
Augmentation de vitesse avec la saturation (taux 30 et 100%)
Décroissance ? (taux entre 0 et 30%)

Systemes embarques pour le suivi SHM

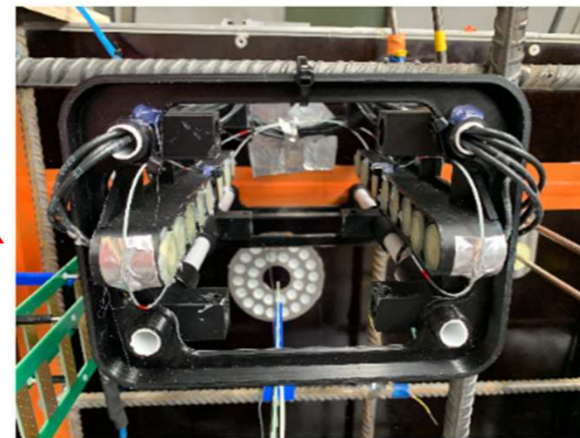
Formulation

Constituent	Quantity
Sand 0/4 Boulonais	984 kg
Aggregate 4/12 Boulonais	890 kg
Cement CEM I 52.5 N SR 3 PM	350 kg
Water	206 kg
Water to cement ratio	0.56

Coffrage et systemes



Systemes US

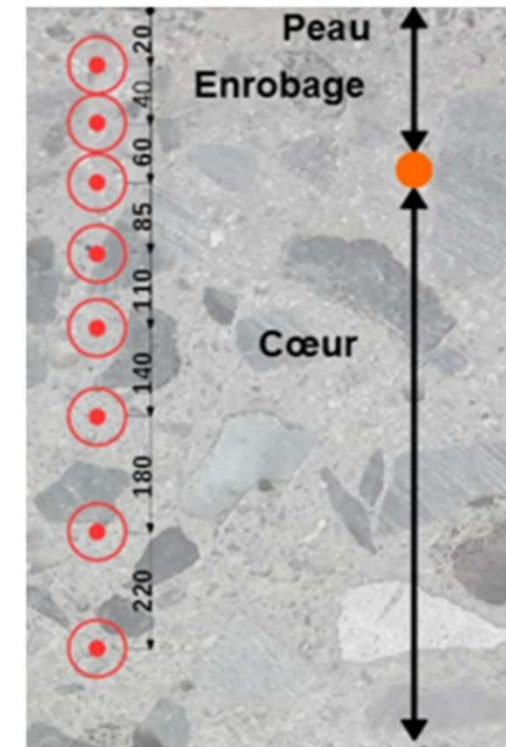


Dalle (séchage)



**Positions
transducteurs**

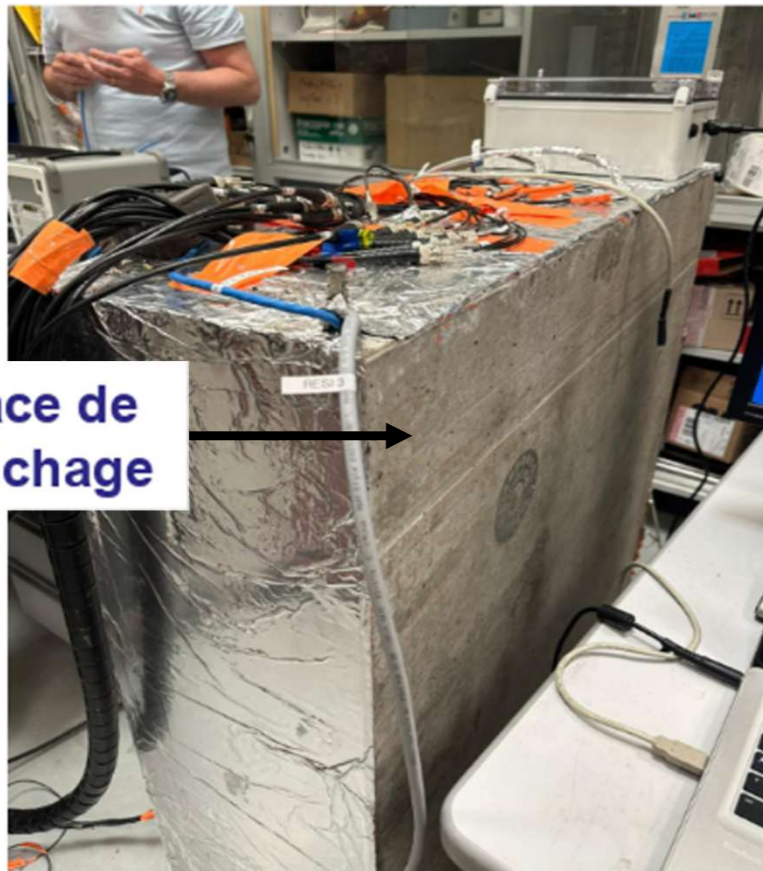
Surface libre (séchage)



Etapes du séchage de la dalle

3 phases de séchage

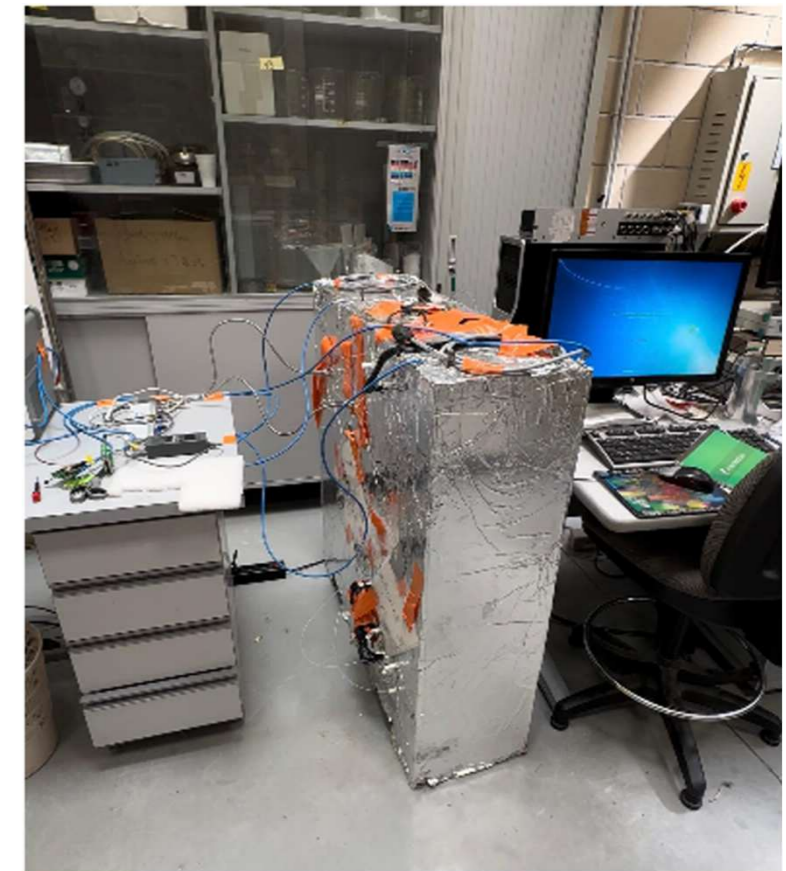
Séchage 1 à 20°C (154 jours)



Séchage 2 à 45°C (88 jours)



Séchage 3 à 20 °C
(22/01/24 -> présent)



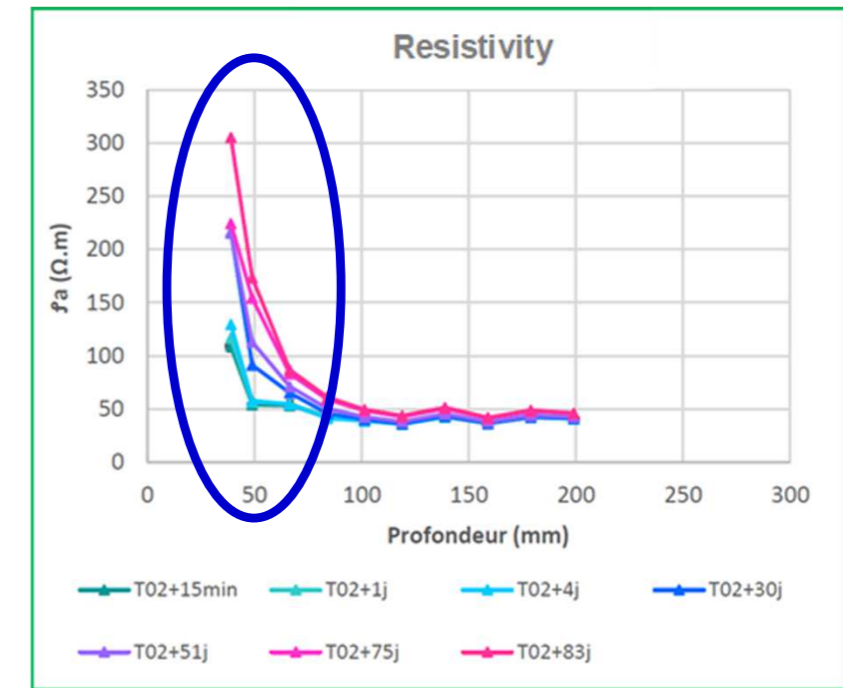
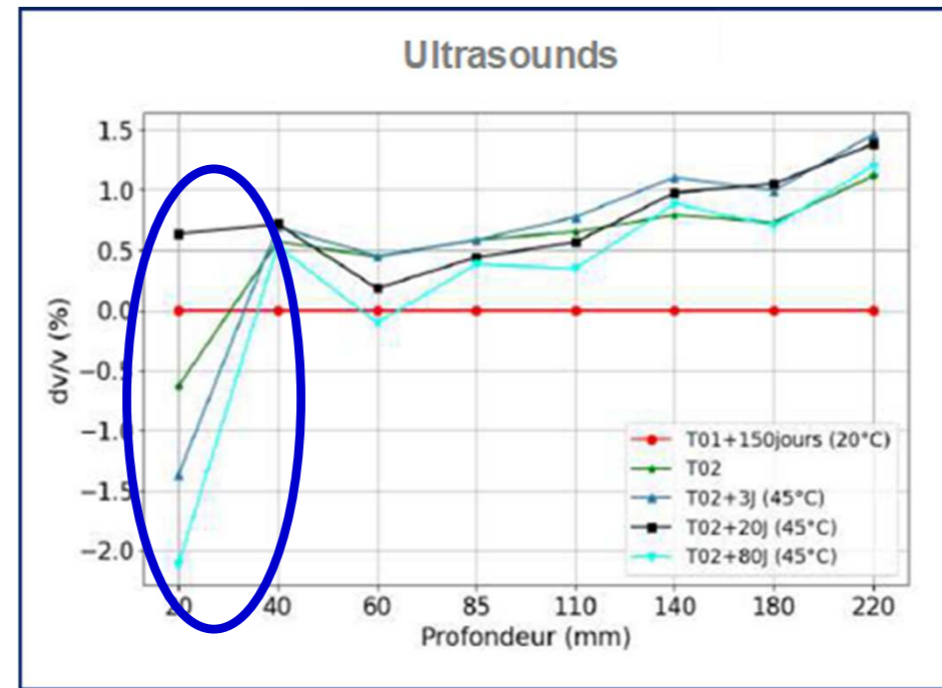
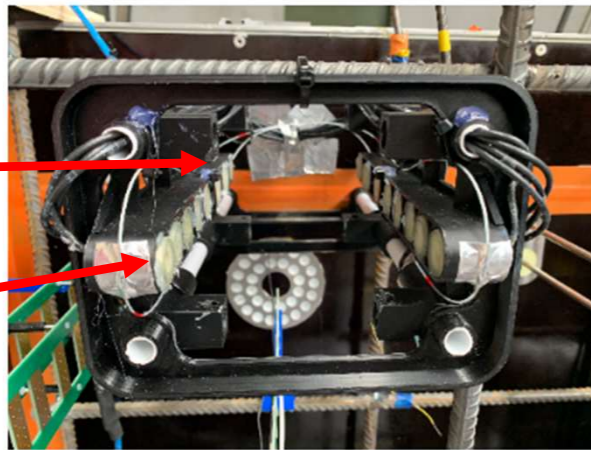
Suivi de gradient de saturation en eau

Pendant le séchage 2 (45°C en étuve, 88 jours)

Profondeurs

220 mm

20 mm



Chute de vitesse observée en surface (séchage à 45°C)
Baisse du taux de saturation confirmée (résistivité électrique)

Monitoring US basse fréquence possible

Correction des effets des températures

Suivi du taux de saturation

Suivi d'endommagements (avec correction  ) ?

Couplage et fusion multi-CND

Ouvrages anciens, integration à posteriori ?

A hautes fréquences, diffusivité et dissipation ?

