

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

Imagerie et identification de défauts dans les milieux multi-
diffusants par acoustique non linéaire : mise au point et validation
de la méthode NCWI

(Nonlinear Coda Wave Interferometry)

présenté par Odile Abraham (Ifsttar GeoEND)

Yuxiang ZHANG, Benoît HILLOULIN, Jean-Baptiste LEGLAND, Guangzhi CHEN, Damien PAGEOT,
Shilin QU, Olivier DURAND

Vincent TOURNAT (LAUM), Alain LE DUFF (ESEO), Bertrand LASCOUP (ESTACA)



7 novembre 2019 – ECN
Journée Scientifique
du GIS ECND_PdL



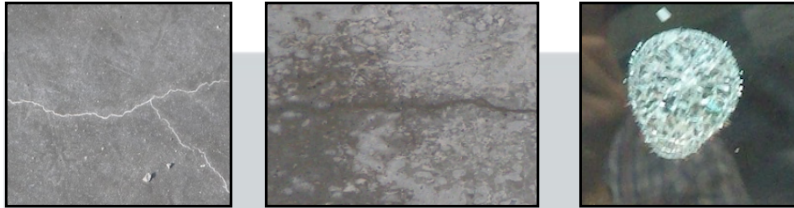
IFSTTAR

Détection et suivi d'un endommagement précoce dans le béton par modulation non linéaire de la coda ultrasonore

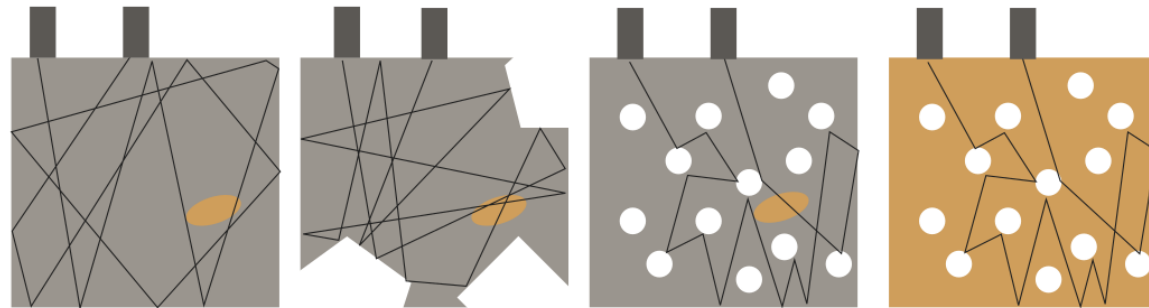
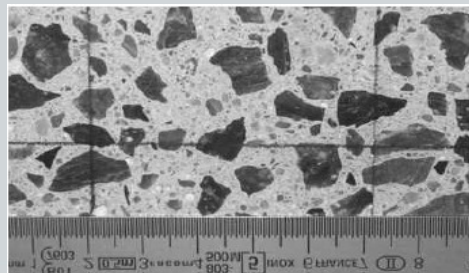
- **Contexte**
- **Principe de la méthode**
- **Premiers résultats expérimentaux**
- **Premières simulations**
- **Perspectives**



Contexte



Endommagement précoce, fissures fermées, etc.



Ondes dans un milieu multi-réverbérant

Ondes dans un milieu multi-diffusant

Détecter
Localiser
Quantifier

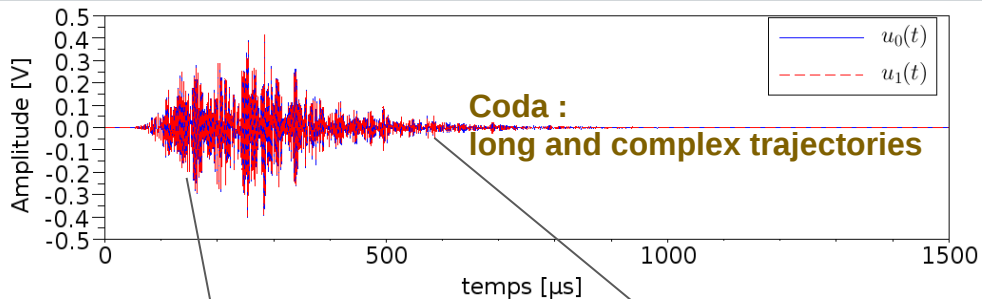
des propriétés du milieu
lorsque c'est impossible
avec les techniques classiques



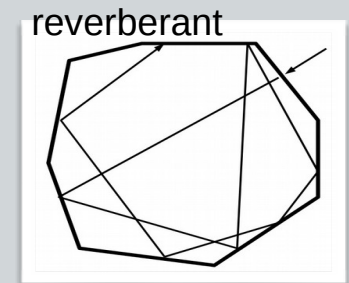
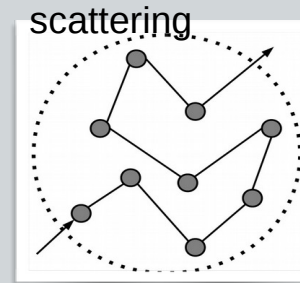
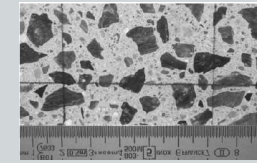
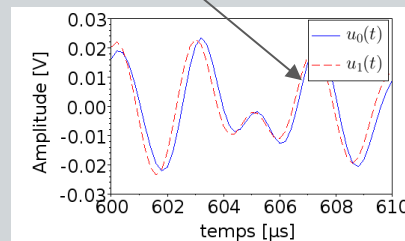
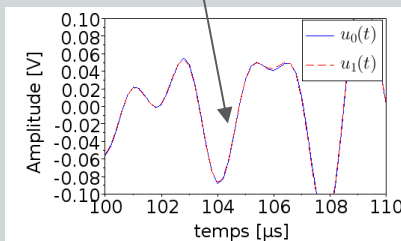
Détection et suivi d'un endommagement précoce dans le béton par modulation non linéaire de la coda ultrasonore

Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore

- Basic physical principle



- CWI : Stretching (state 0, state 1)



$$CC(\theta) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} u_0[t(1+\theta)] u_1[t] dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} u_0^2[t(1+\theta)] dt} \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} u_1^2[t] dt}}$$

Extracted features:

$$\theta = \delta v / v$$

Velocity variation

$$Kd = 1 - CC(\theta)$$

Decorrelation

R. Snieder, Coda Wave interferometry and the equilibration of energy in elastic media. *Phys. Rev. E*, 2002.



Détection et suivi d'un endommagement précoce dans le béton par modulation non linéaire de la coda ultrasonore

Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- Exemple d'application



Max 8MPa en compression

Projet ENDE



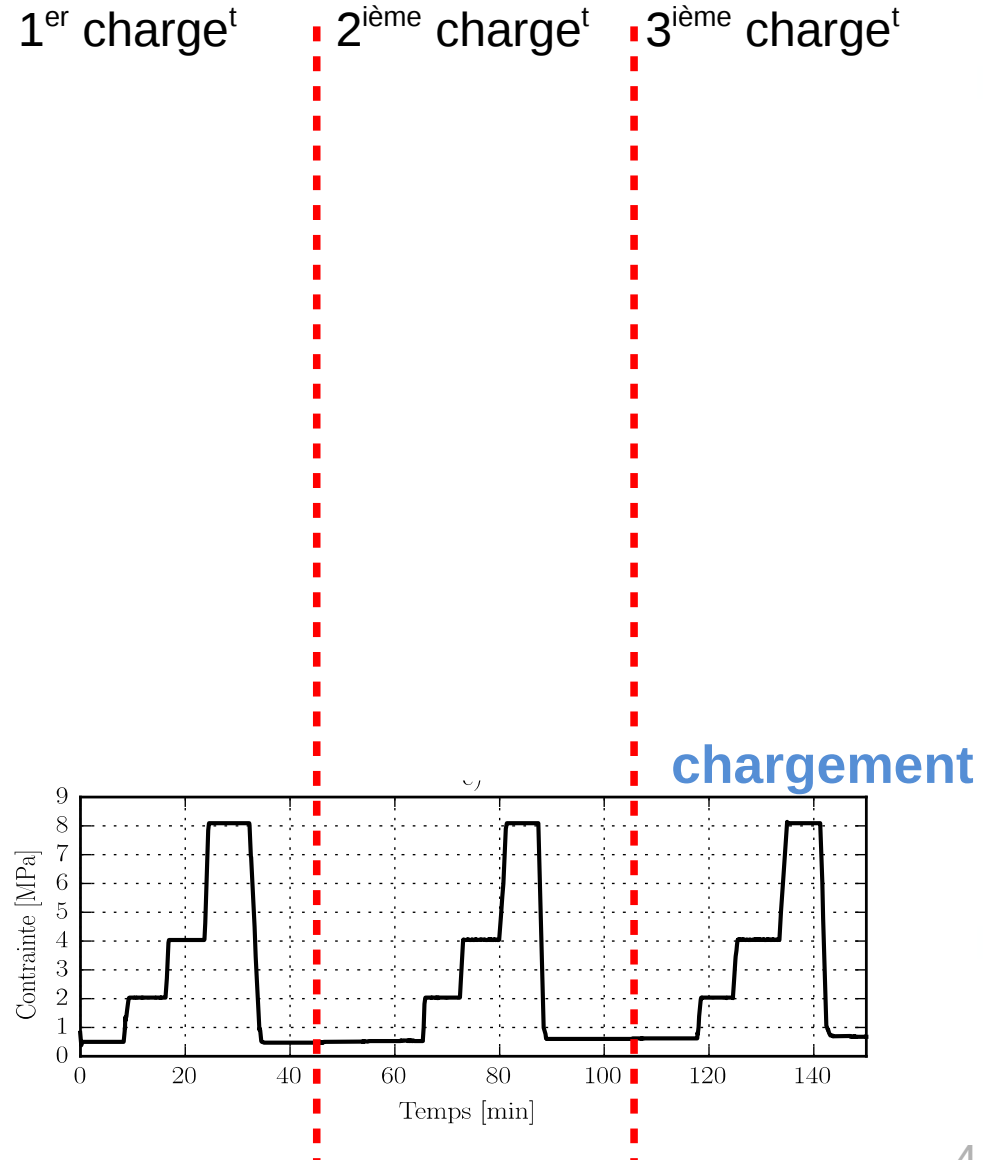
Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- Exemple d'application



Max 8MPa en compression

Projet ENDE



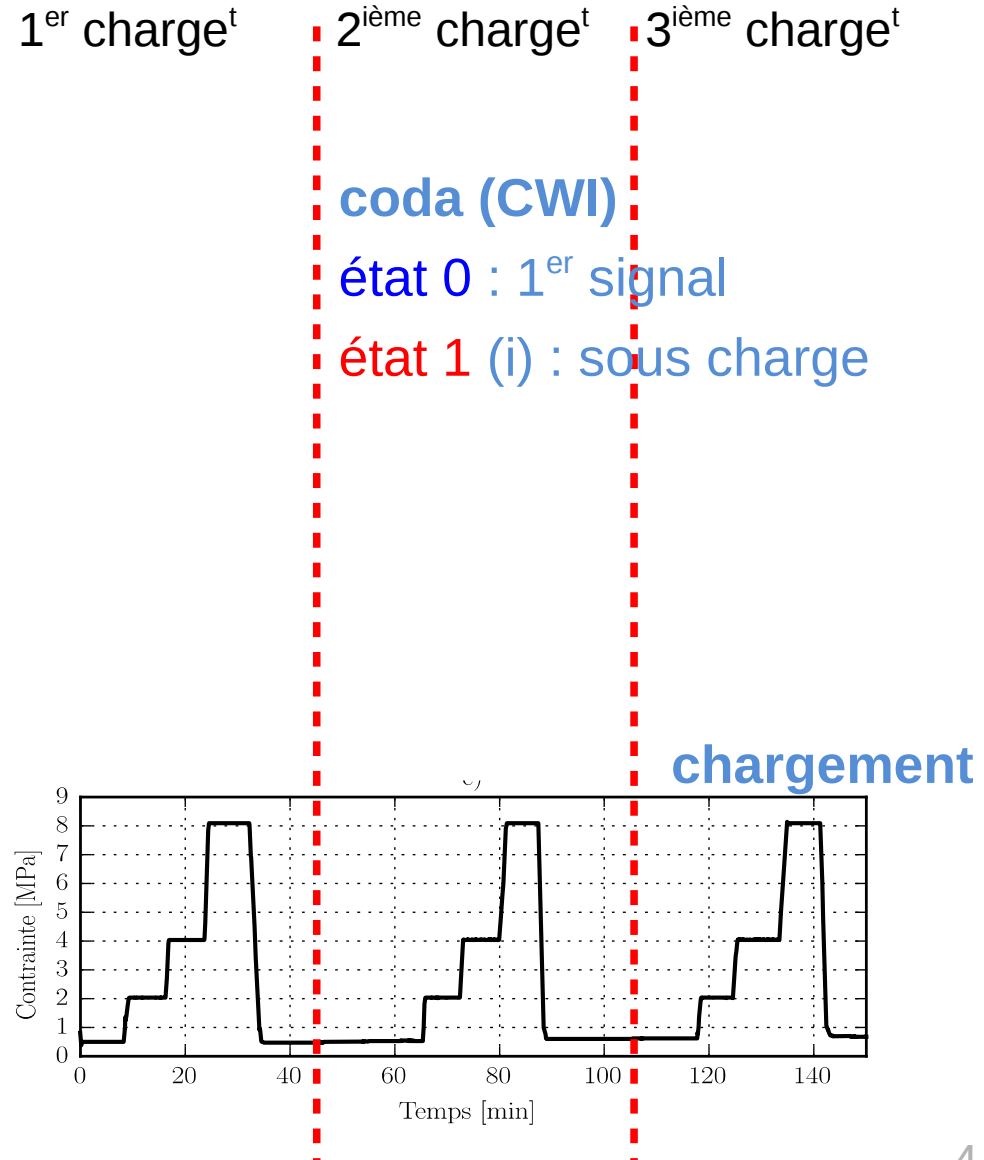
Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- Exemple d'application



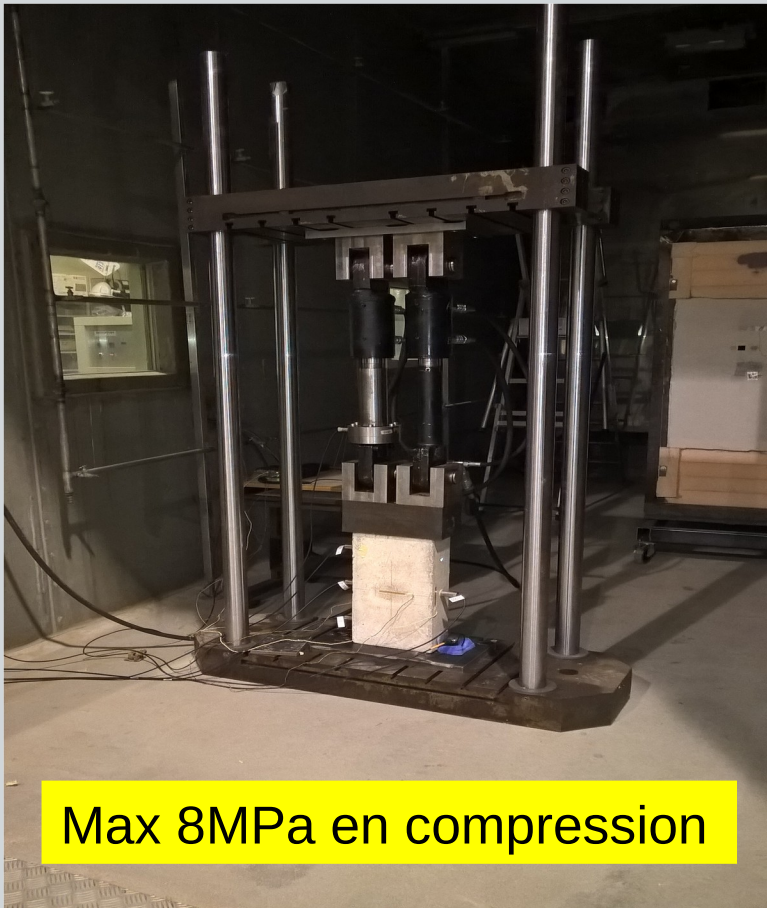
Max 8MPa en compression

Projet ENDE



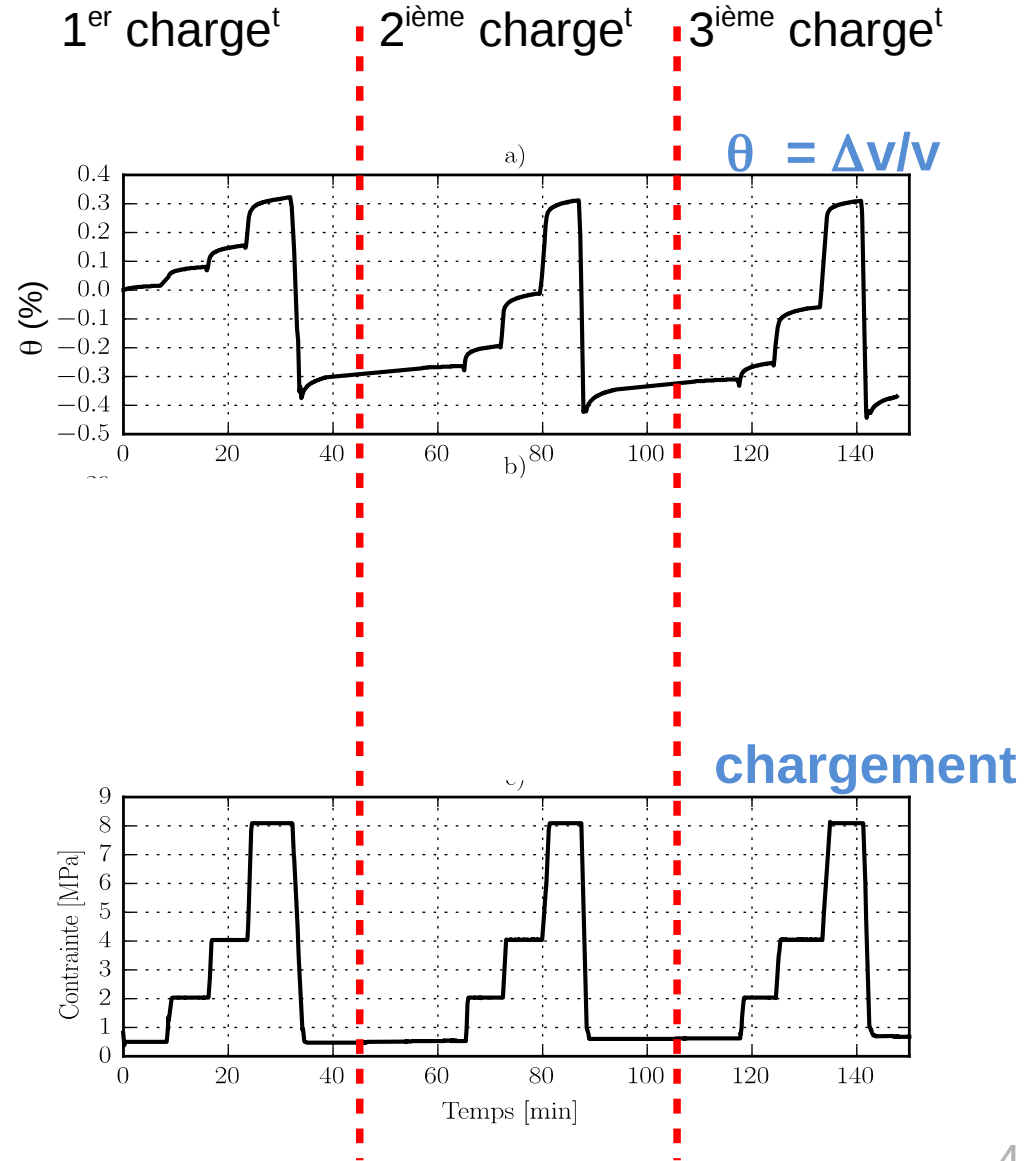
Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- Exemple d'application



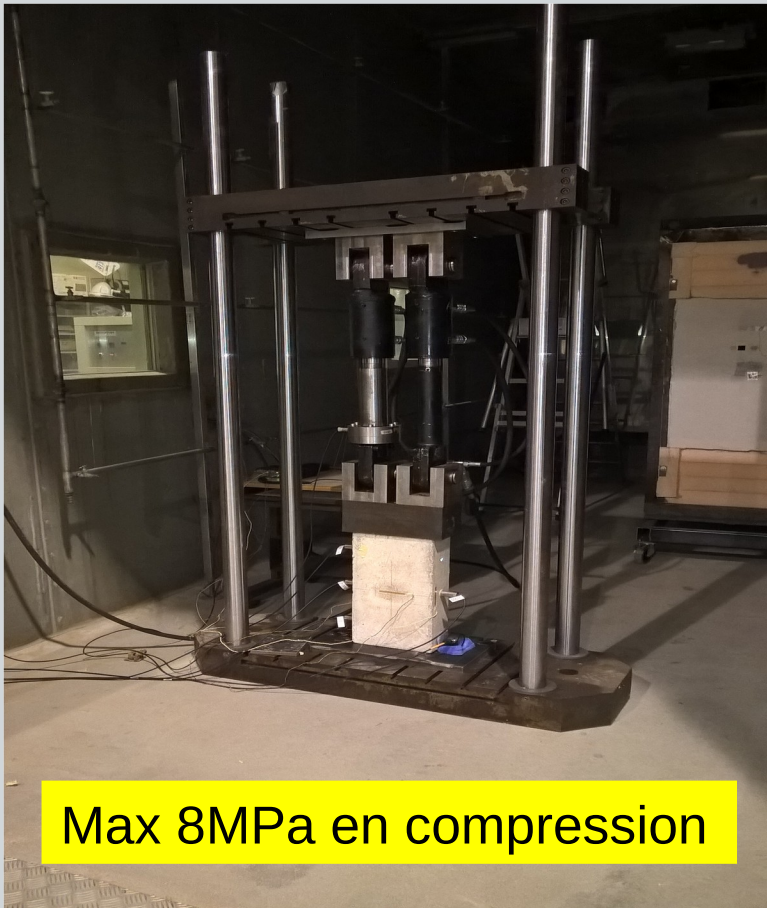
Max 8MPa en compression

Projet ENDE



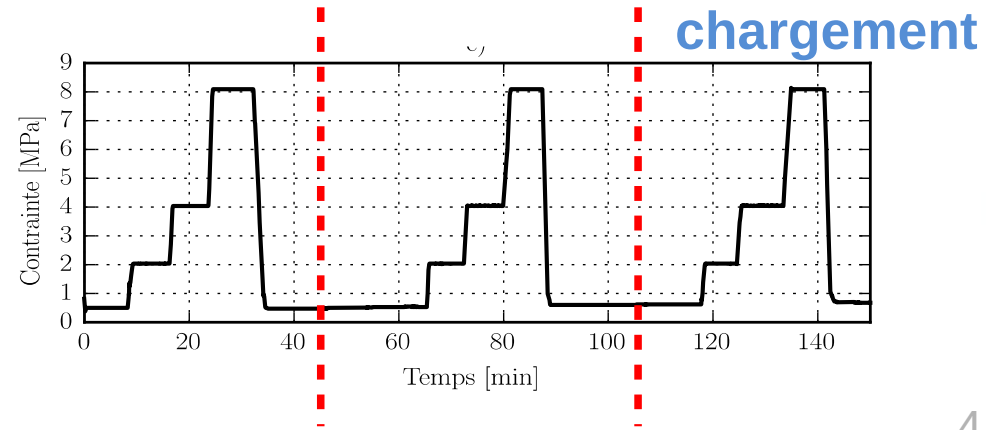
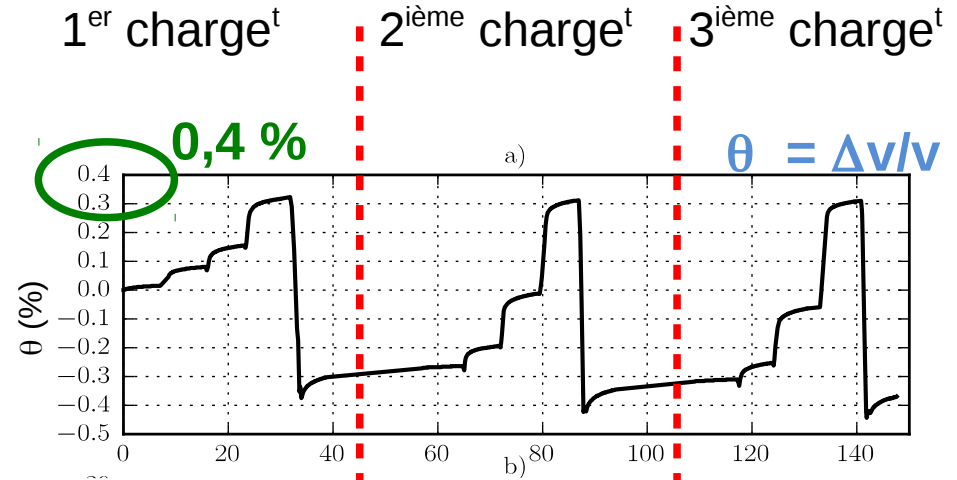
Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- Exemple d'application



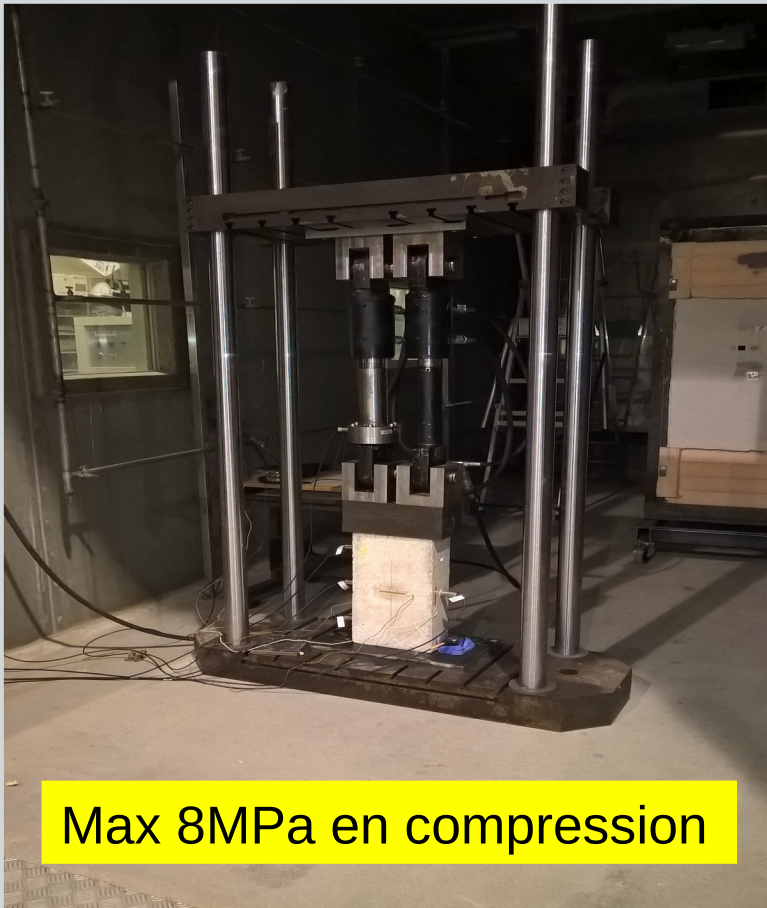
Max 8MPa en compression

Projet ENDE



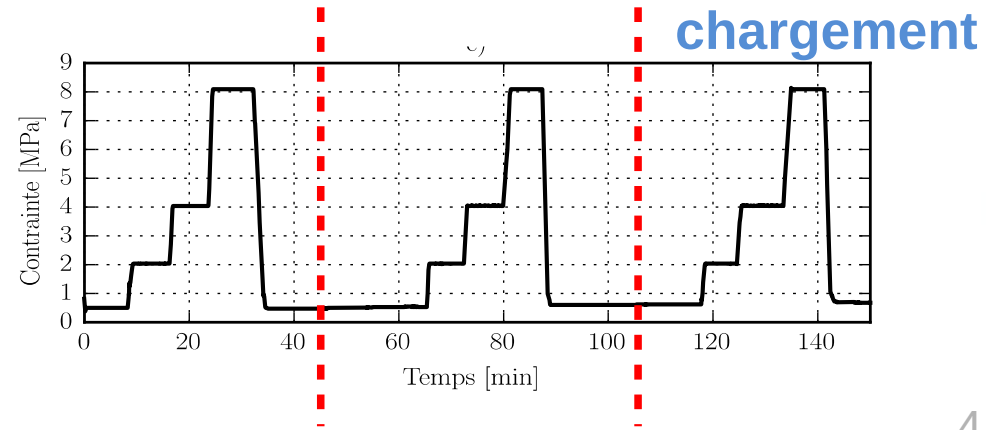
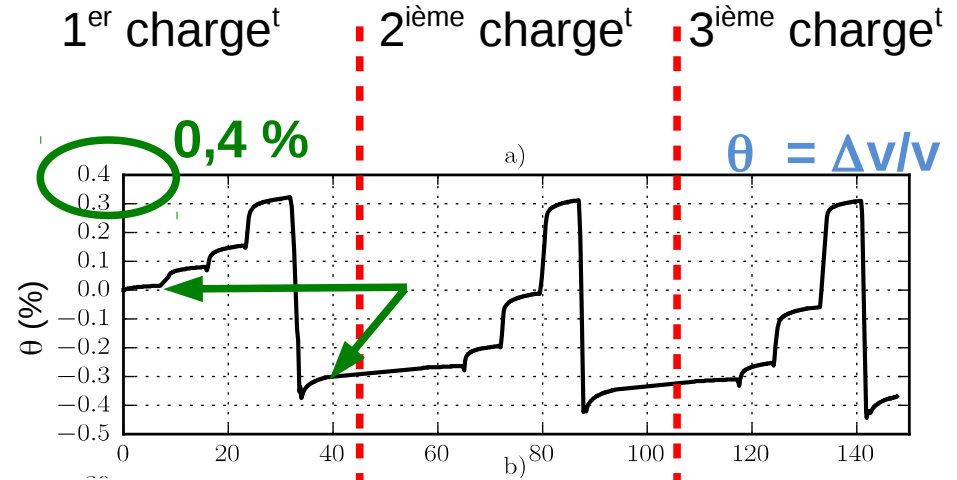
Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- Exemple d'application



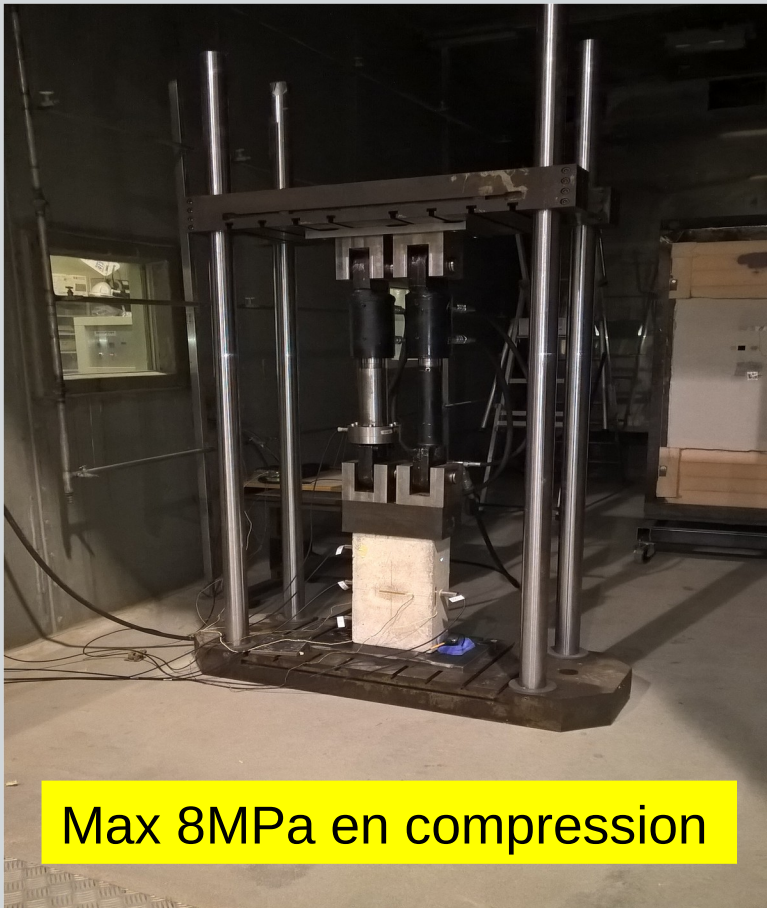
Max 8MPa en compression

Projet ENDE



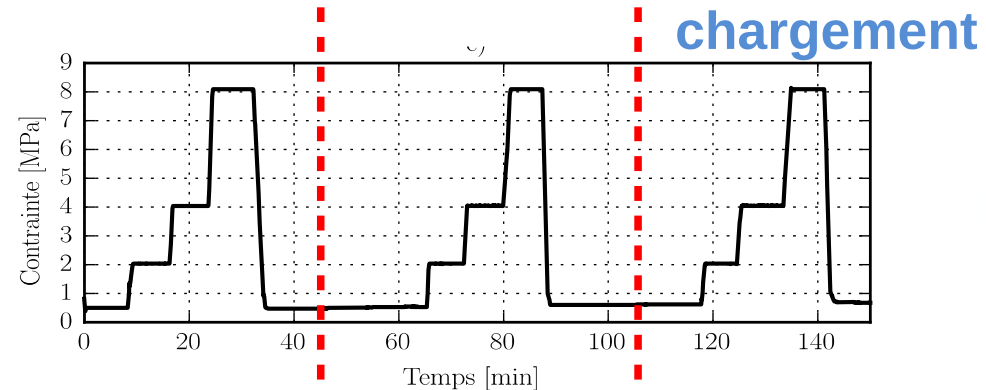
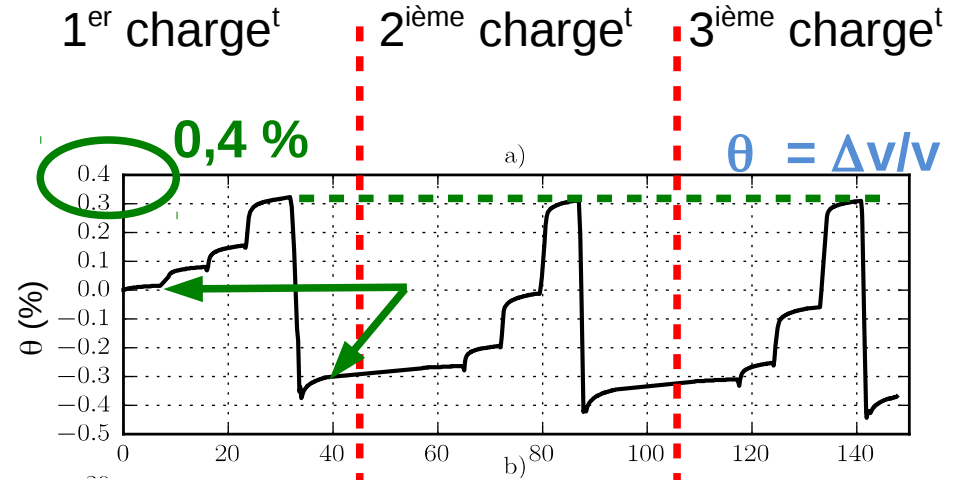
Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- Exemple d'application



Max 8MPa en compression

Projet ENDE



Principe de la méthode – CWI et non linéarité (NCWI)

Linéaire

$$\sigma = E_0 \varepsilon \quad \dots \rightarrow \quad V = V_0$$

Non linéaire

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 + \beta \varepsilon + \delta \varepsilon^2 + \dots) + \alpha F(\varepsilon, \text{sign}(\partial \varepsilon / \partial t))$$

- **Acousto élasticité (non linéarité « classique »)**

- $\sigma = E_0 \varepsilon (1 + \beta \varepsilon) \quad \dots \rightarrow \quad V = V_0 (1 + \beta \varepsilon)$

(génération d'harmoniques, modulation d'amplitude)



Principe de la méthode – CWI et non linéarité (NCWI)

Linéaire

$$\sigma = E_0 \varepsilon \quad \dots \rightarrow \quad V = V_0$$

Non linéaire

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 + \beta \varepsilon + \delta \varepsilon^2 + \dots) + \alpha F(\varepsilon, \text{sign}(\partial \varepsilon / \partial t))$$

- Acousto élasticité (non linéarité « classique »)

- $\sigma = E_0 \varepsilon (1 + \beta \varepsilon) \quad \dots \rightarrow \quad V = V_0 (1 + \beta \varepsilon + \dots)$

(génération d'harmoniques, modulation d'amplitude)

- **Non linéarité hystérétique (non linéarité « non classique »)**

- Sensible aux contacts (micro-fissures, interface pâte granulat, etc.)

- **Phénomènes observés**

- Softening : diminution du module élastique
 - Augmentation de la dissipation



Principe de la méthode – CWI et non linéarité (NCWI)

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 + \beta \varepsilon + \delta \varepsilon^2 + \dots) + \alpha F(\varepsilon, \text{sign}(\partial\varepsilon/\partial t))$$

- **Méthode de référence**
 - Résonance non linéaire



Principe de la méthode – CWI et non linéarité (NCWI)

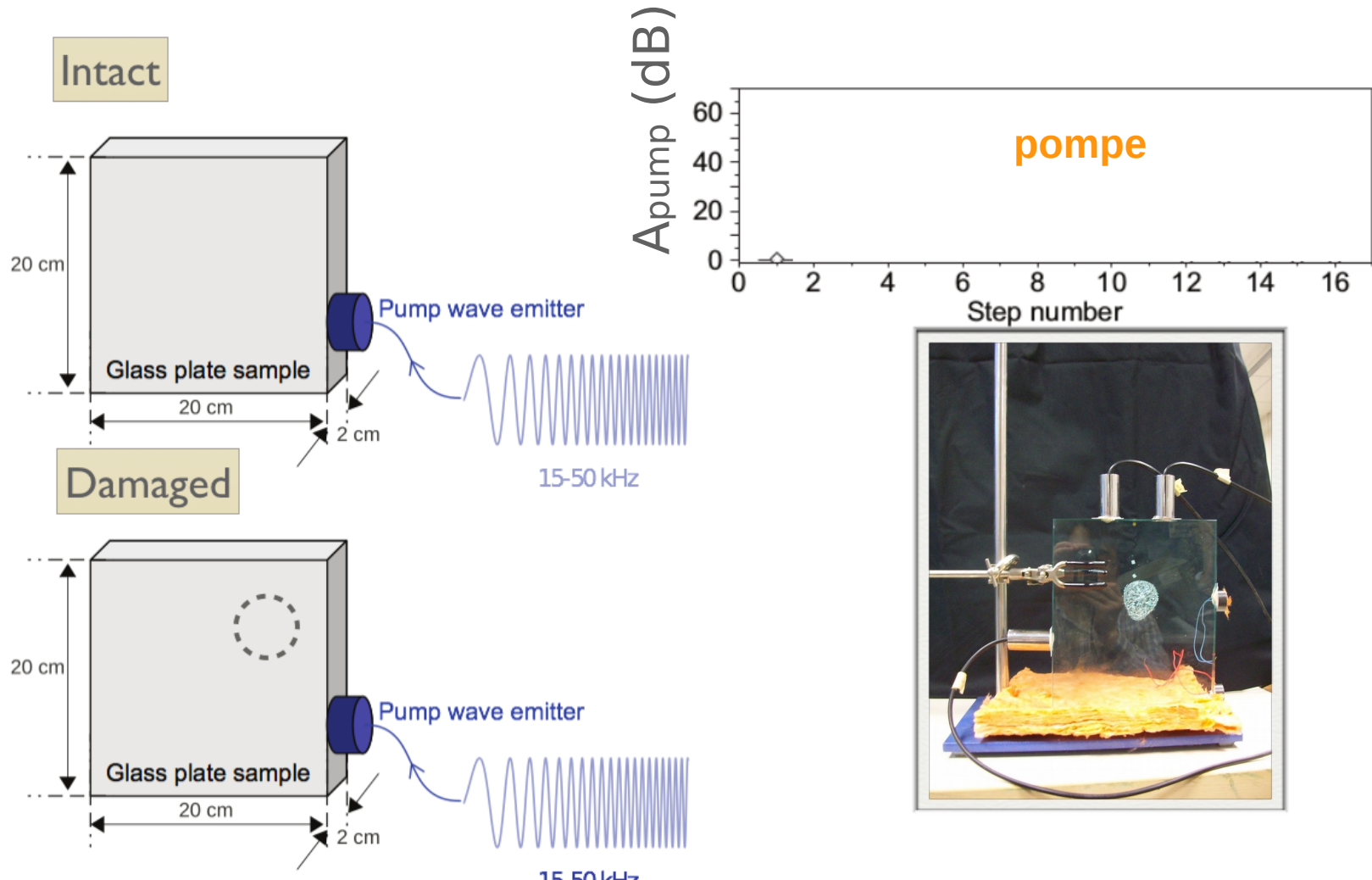
$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 + \beta \varepsilon + \delta \varepsilon^2 + \dots) + \alpha F(\varepsilon, \text{sign}(\partial\varepsilon/\partial t))$$

- **Méthode de référence**
 - Résonance non linéaire
- **Nouvelle méthode : modulation non linéaire de la coda (NCWI)**
 - Appartient à la **famille des méthodes pompe-sonde**
 - **Pompe** : Source ultrasonore additionnelle basse-fréquence dont l'amplitude maximale varie (augmente)
 - **Sonde** : Mesure avec la coda de l'effet de la pompe
 - Interférométrie de la coda :
 - états ↔ niveaux de la pompe
 - état 0 : pompe off (ampl = 0)



Détection et suivi d'un endommagement précoce dans le béton par modulation non linéaire du béton

Principe de la méthode – CWI et non linéarité (NCWI)

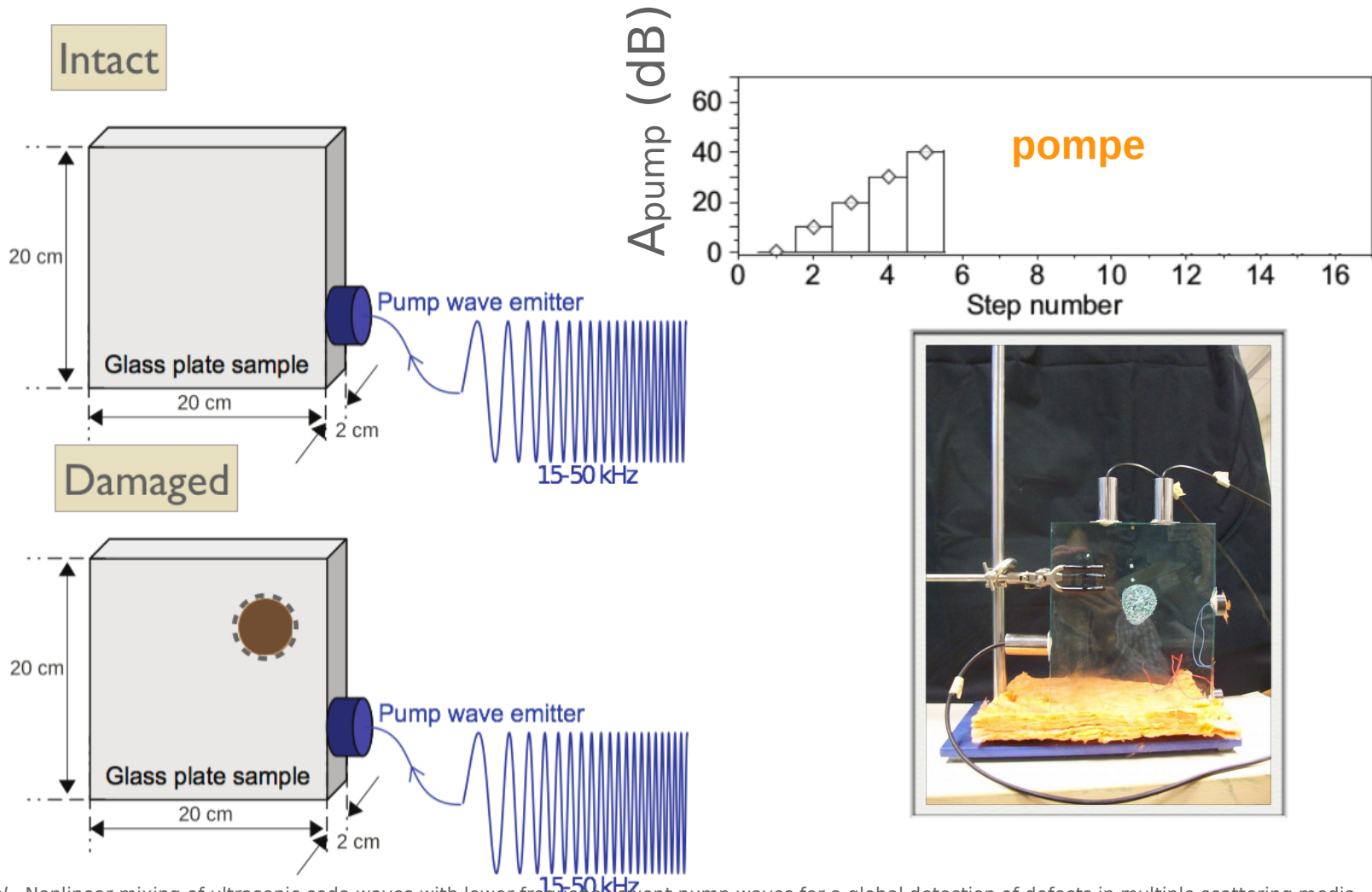


Zhang *et al.*, Nonlinear mixing of ultrasonic coda waves with lower frequency-swept pump waves for a global detection of defects in multiple scattering media. *Journal of Applied Physics*, 2013.



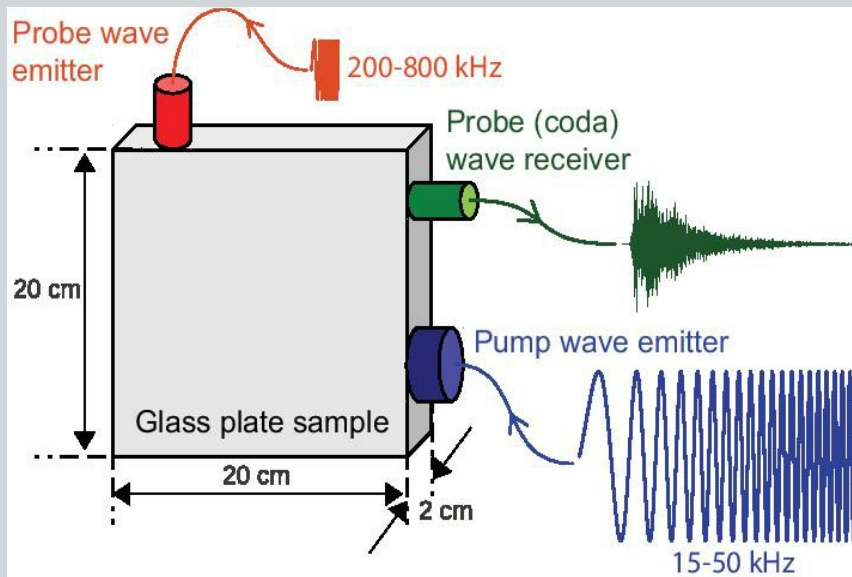
Détection et suivi d'un endommagement précoce dans le béton par modulation non linéaire du béton

Principe de la méthode – CWI et non linéarité (NCWI)



Zhang *et al.*, Nonlinear mixing of ultrasonic coda waves with lower frequency swept pump waves for a global detection of defects in multiple scattering media. *Journal of Applied Physics*, 2013.

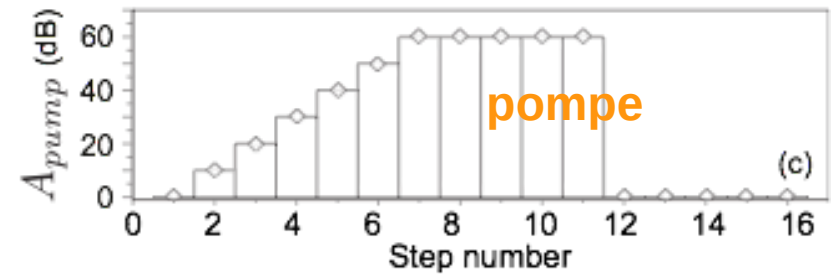
Principe de la méthode – CWI et non linéarité (NCWI)



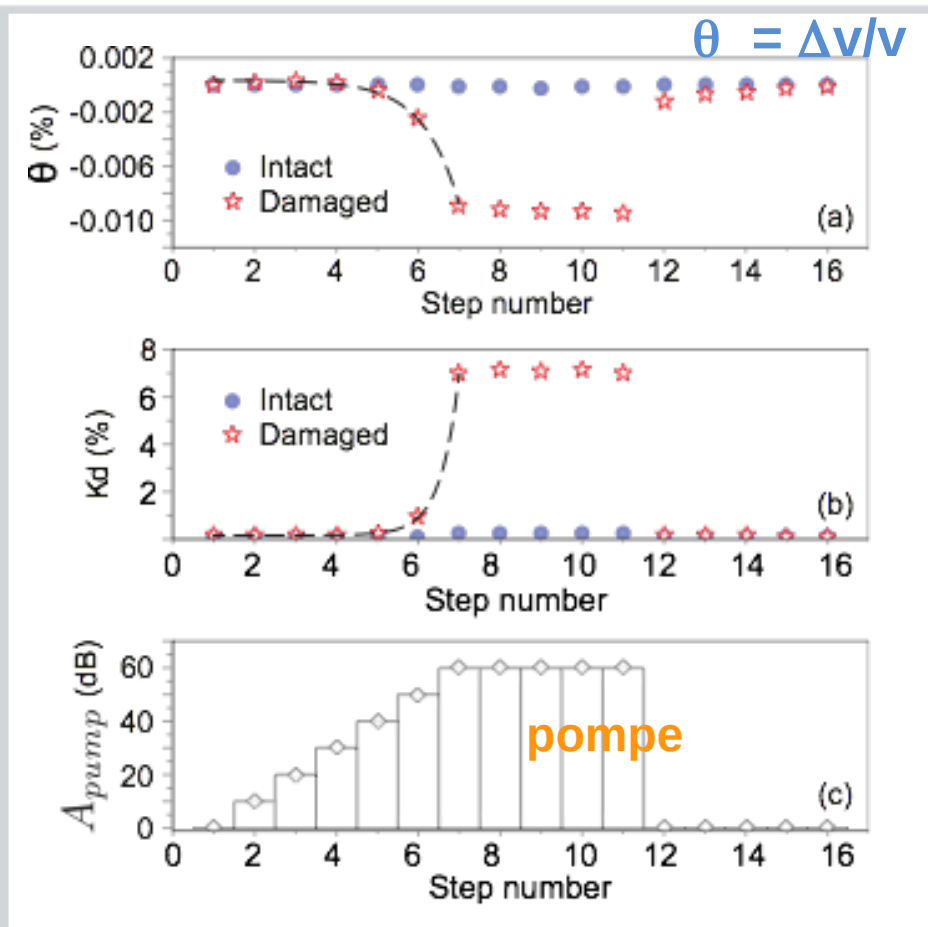
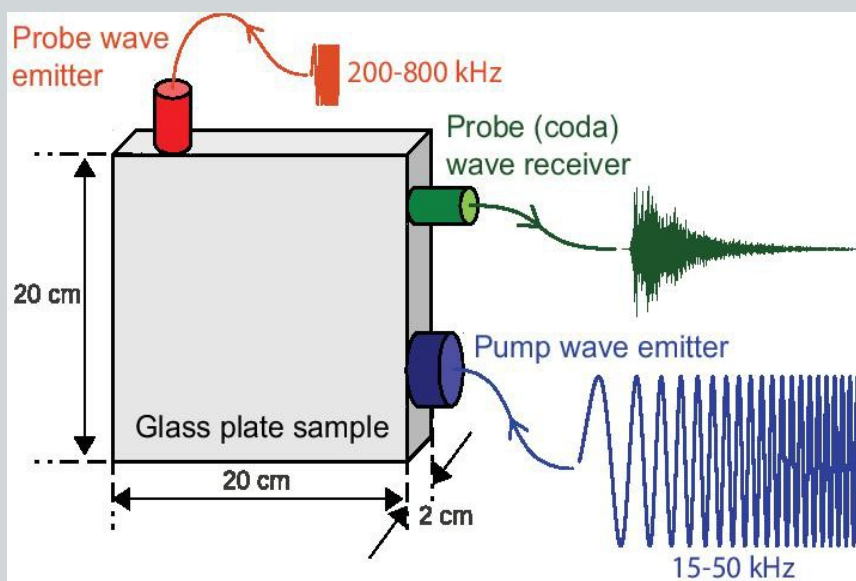
coda (CWI)

état 0 : 1^{er} signal (ampl pompe = 0)

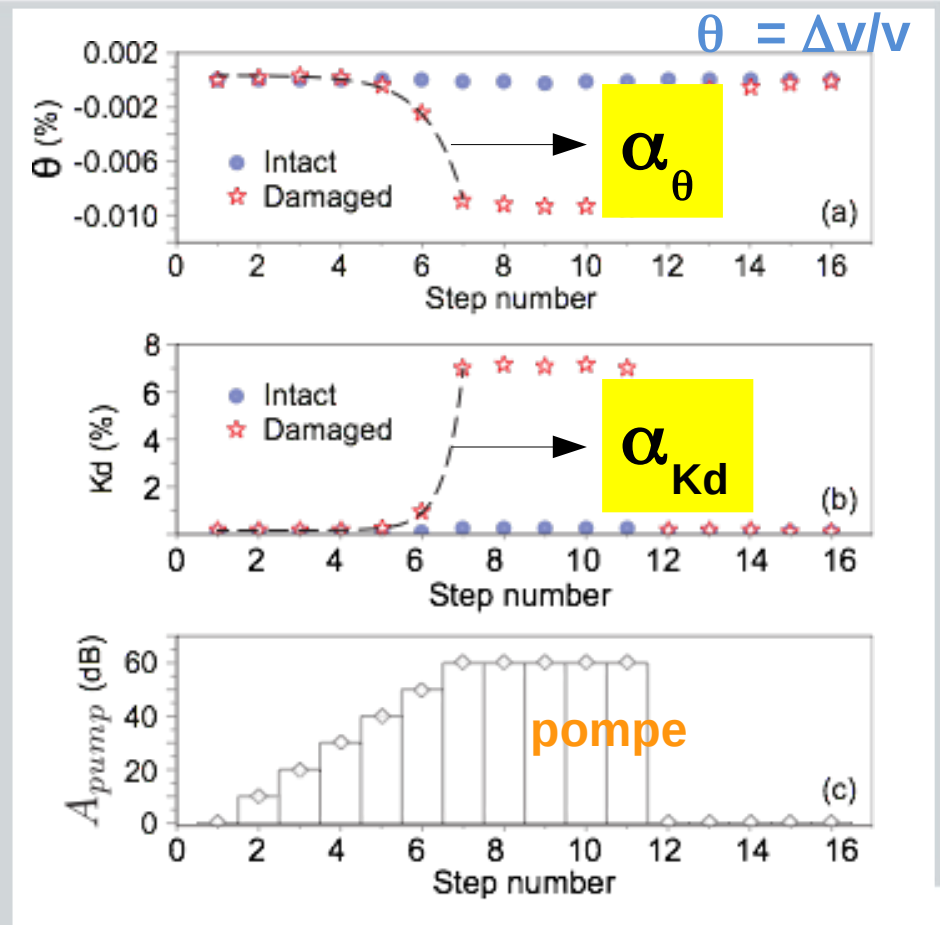
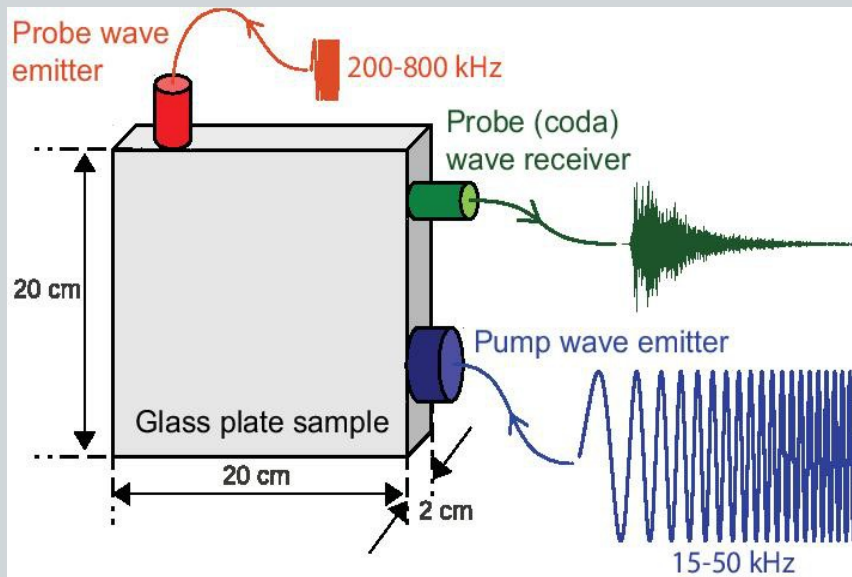
état 1 (i) : pompes suivantes



Principe de la méthode – CWI et non linéarité (NCWI)

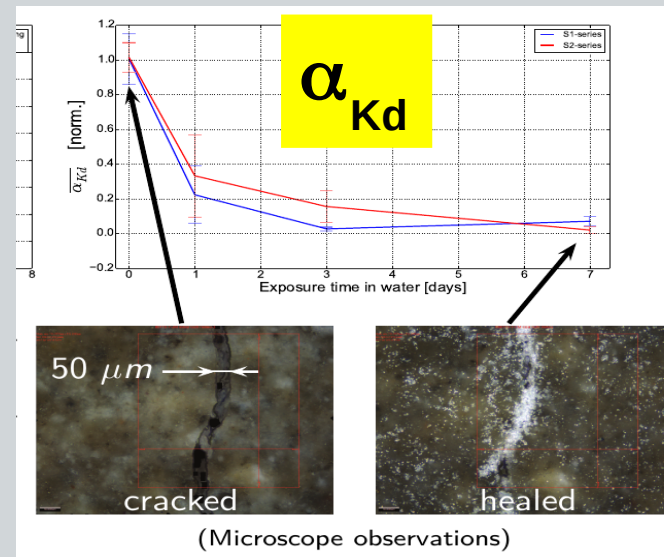
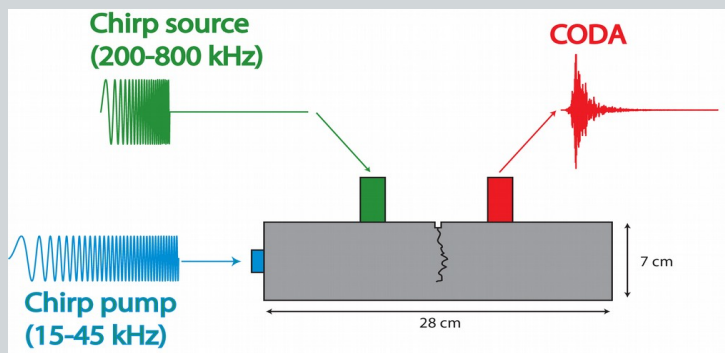
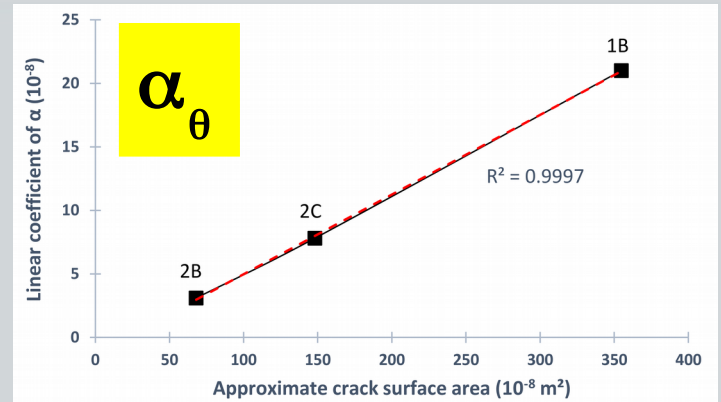
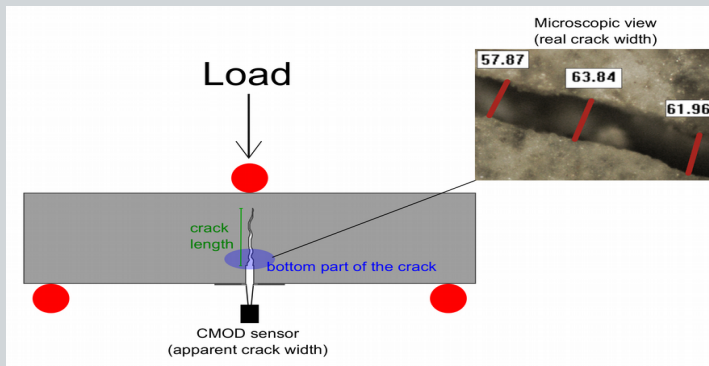


Principe de la méthode – CWI et non linéarité (NCWI)



Premiers résultats expérimentaux au laboratoire (NCWI)

- micro fissure / auto cicatrisation



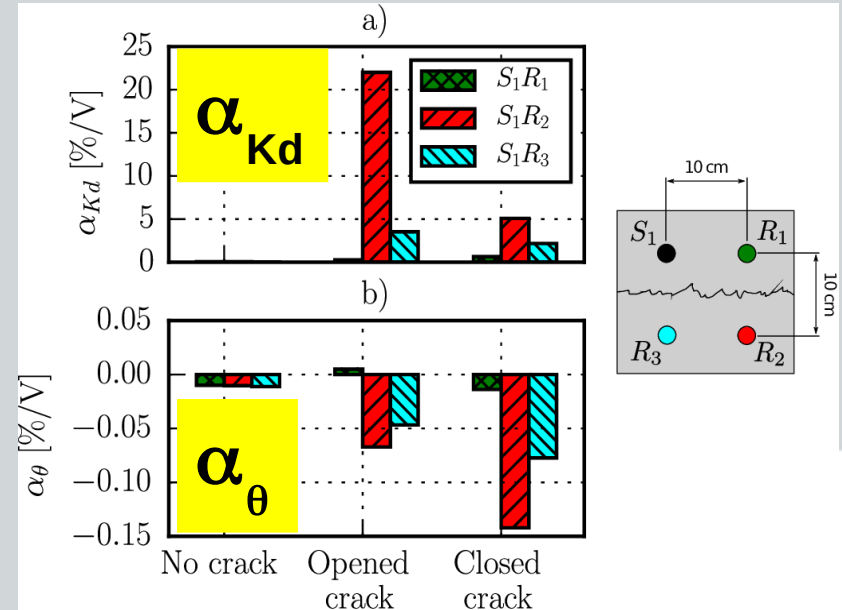
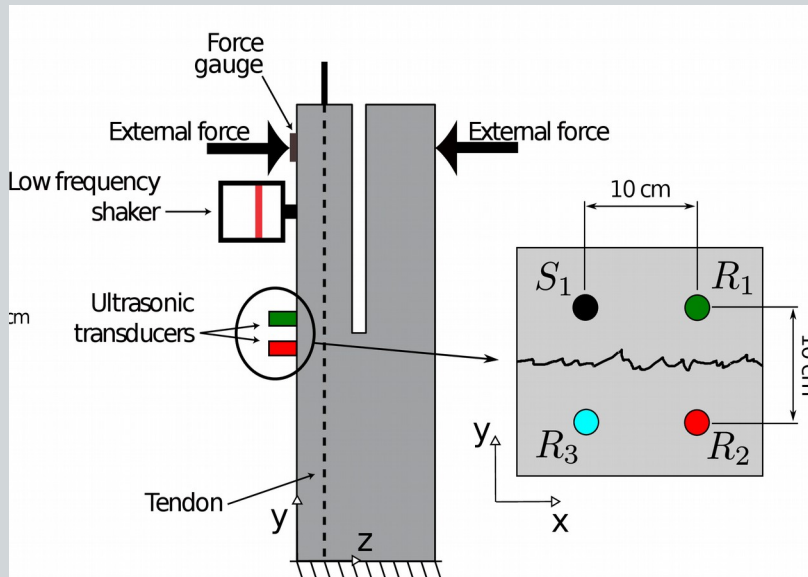
Hilloulin *et al.*, Small crack detection in cementitious materials using nonlinear coda wave modulation, NDT&E Int. , Vol. 68, pp. 98-104, 2014.

Hilloulin *et al.*, Monitoring of autogenous crack healing in cementitious materials by the nonlinear modulation of ultrasonic coda waves, 3D microscopy and X-ray microtomography, JCBM, 123, pp143-152, 2016.



Premiers résultats expérimentaux au laboratoire (NCWI)

- Fissure fermée
 - Béton précontraint au laboratoire

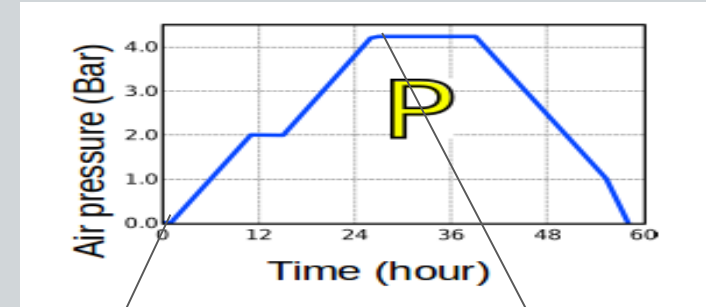
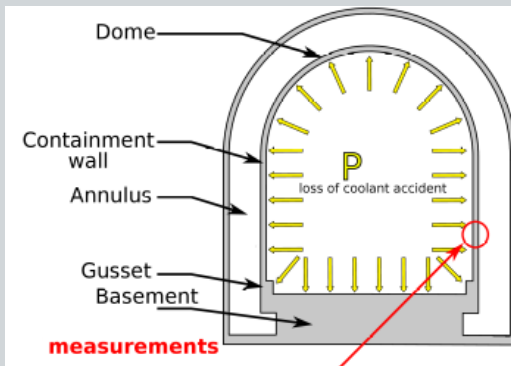


– À VERCORS

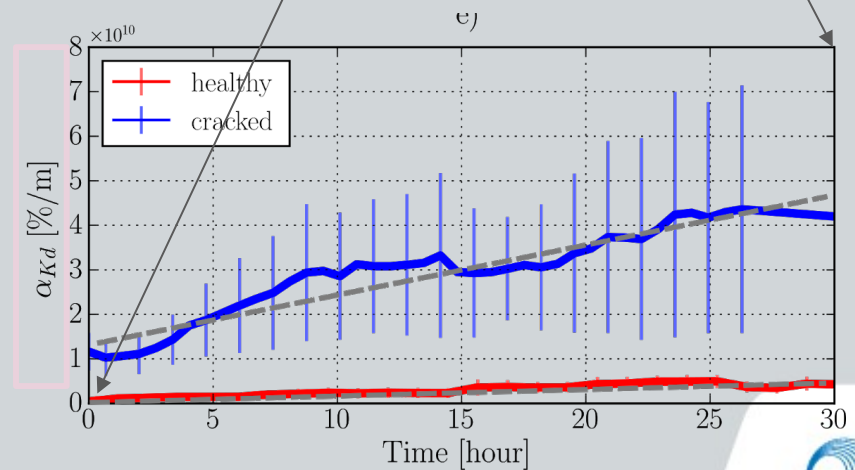


Premiers résultats expérimentaux « in situ » (NCWI)

- Fissure fermée
 - Béton précontraint
 - « in situ »



$$Kd \propto \alpha_{Kd} (A_{pump})^2$$

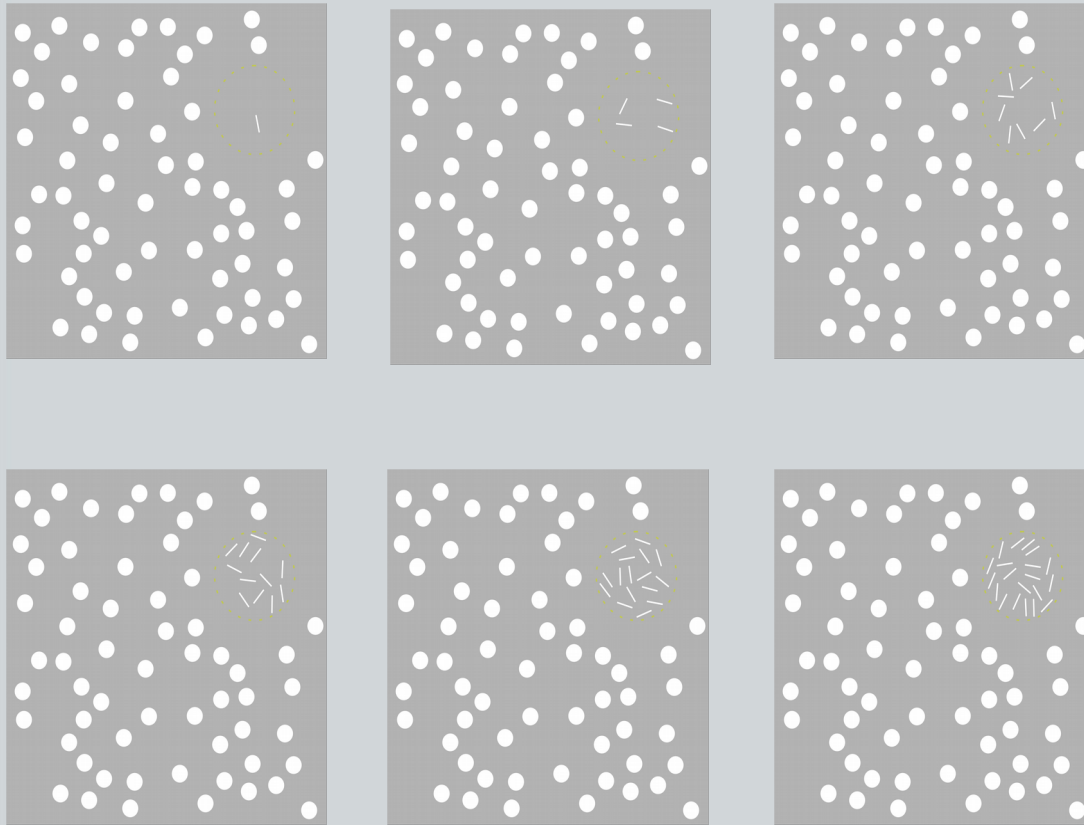


Legland J.-B. et al, Evaluation of crack status in a meter-size concrete structure using the ultrasonic nonlinear coda wave interferometry. *JASA*, 2017

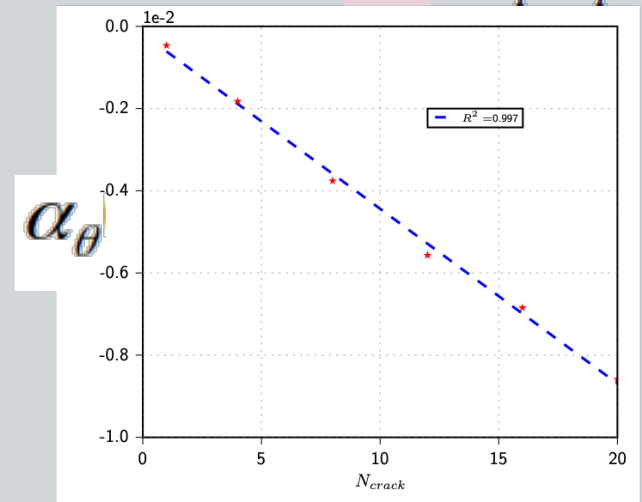


Modélisation numérique

(spectral element method)



$$\theta \propto \alpha_{\theta}(A_{pump})$$



$$\theta = \alpha_{\theta}^{\sum L} \times \left(\sum \frac{\Delta L_{crack}}{L_{crack}} \right)$$

$$Kd = \alpha_{Kd}^{\sum L} \times \left(\sum \frac{\Delta L_{crack}}{L_{crack}} \right)^2$$

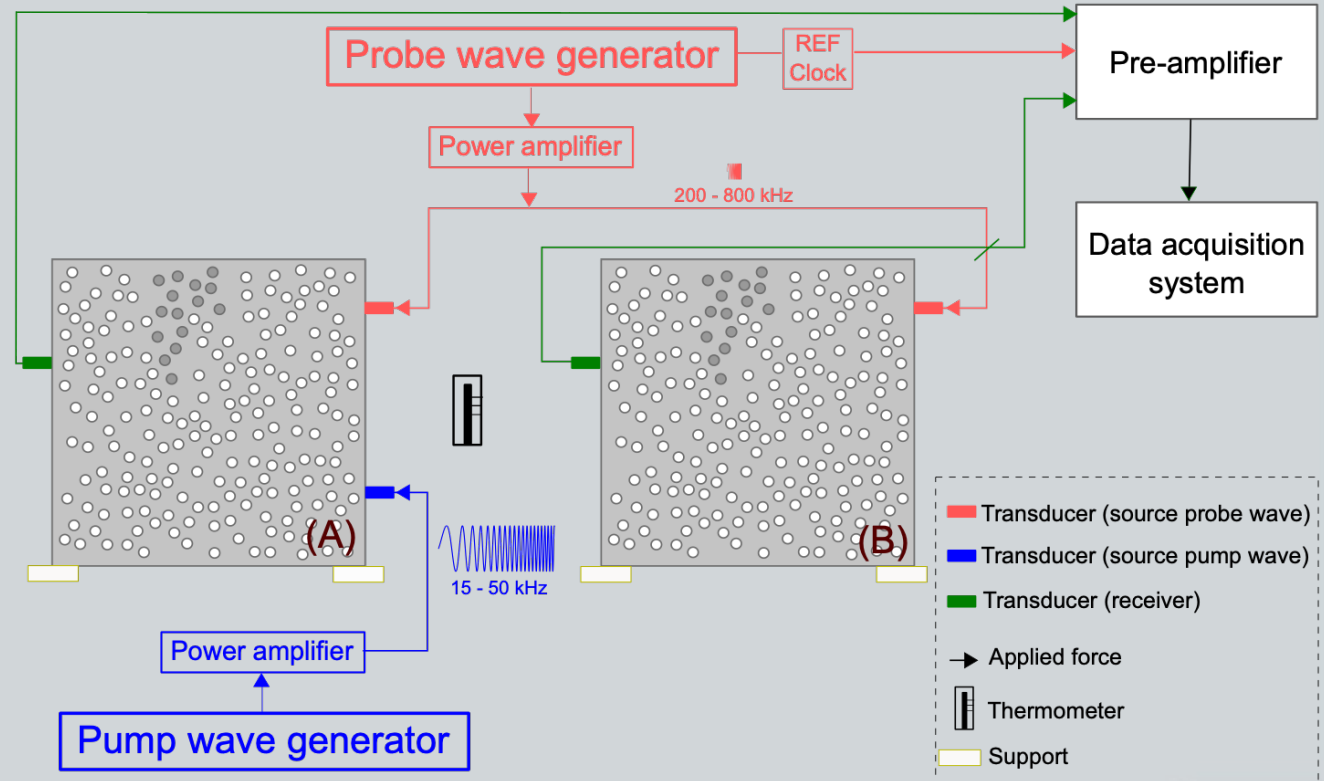
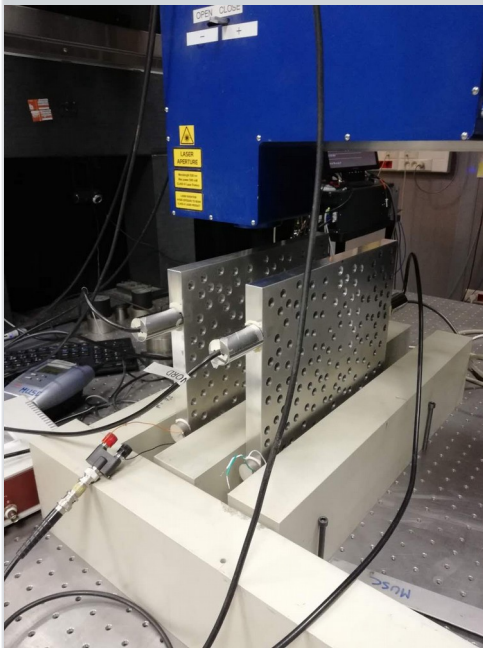
Chen et al. Numerical modeling of ultrasonic coda wave interferometry in a multiple scattering medium with a localized nonlinear defect, *Wave Motion*, 2017

Chen et al., Nonlinear Coda Wave Interferometry: sensitivity to wave-induced material property changes analyzed via numerical simulations in 2D, *Ultrasonics*, 99, 2019.



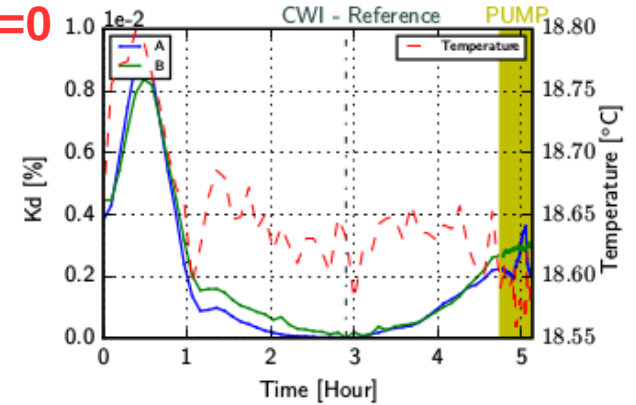
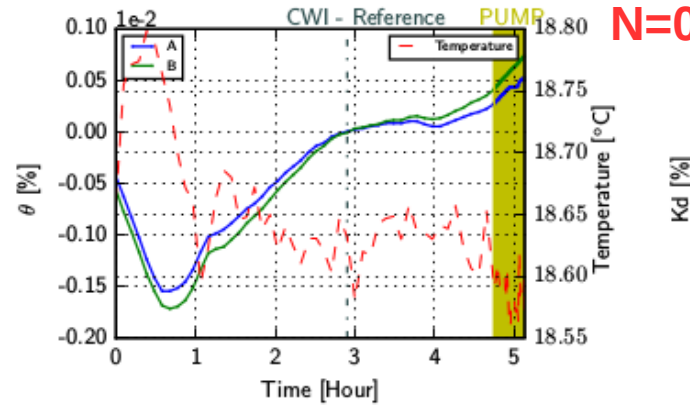
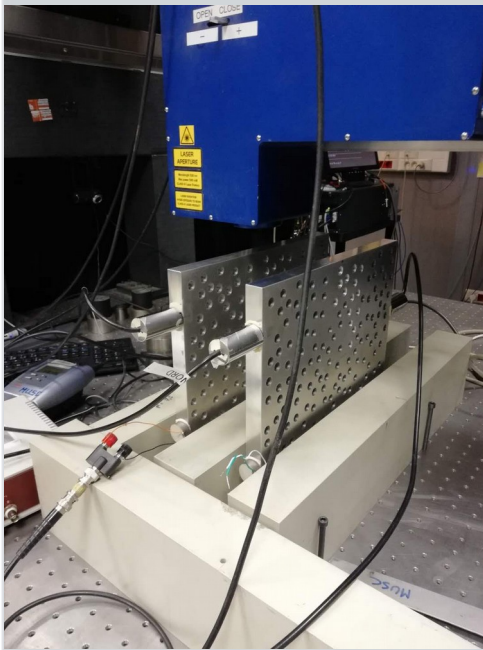
Détection et suivi d'un endommagement précoce dans le béton par modulation non linéaire de la coda ultrasonore

Résultats expérimentaux sur milieux modèles



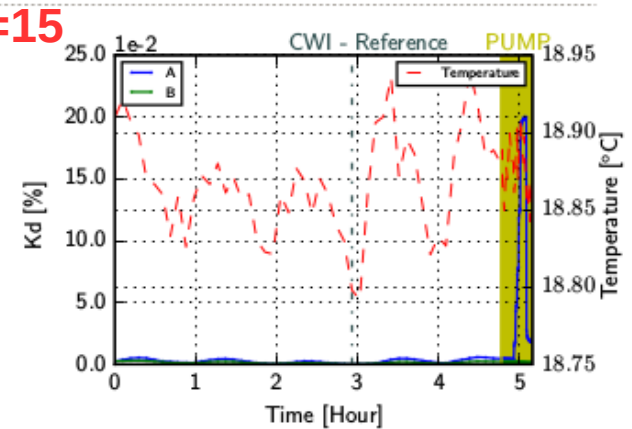
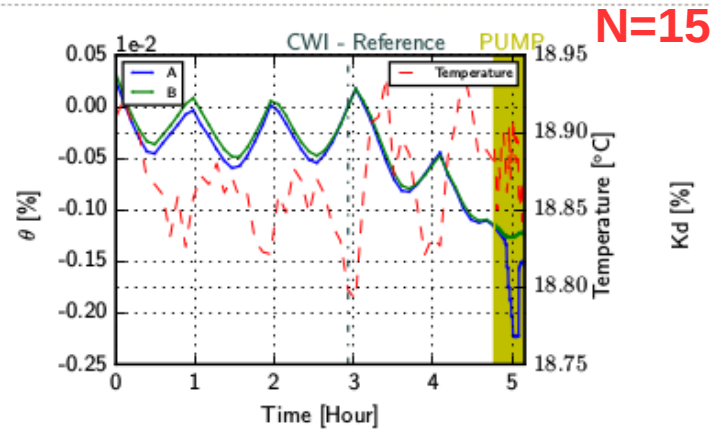
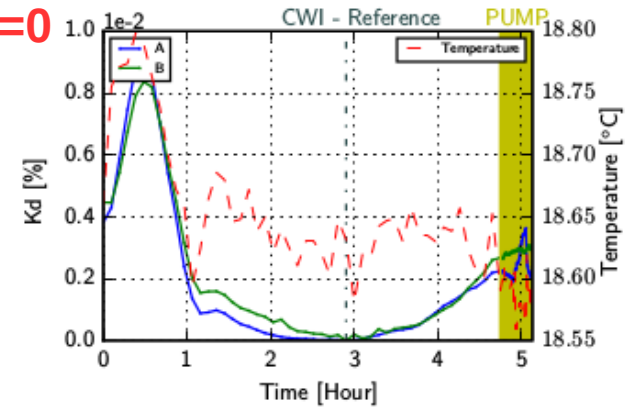
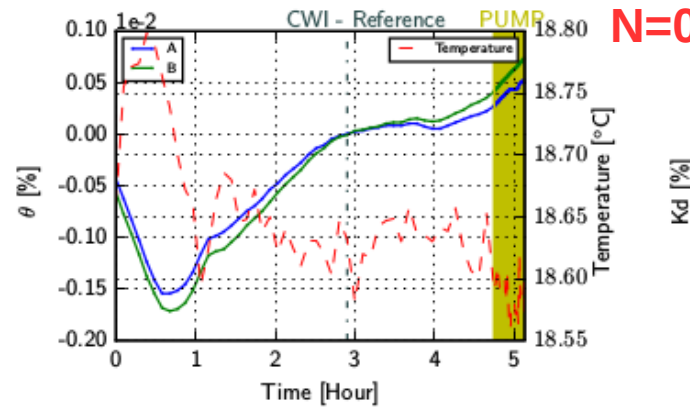
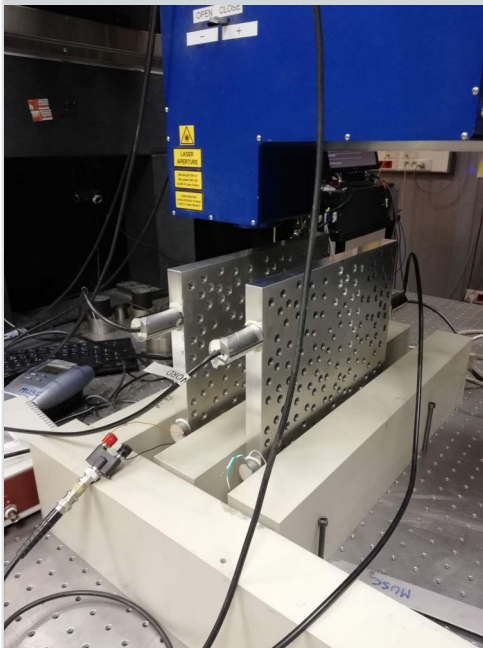
Détection et suivi d'un endommagement précoce dans le béton par modulation non linéare de la coda ultrasonore

Résultats expérimentaux sur milieux modèles



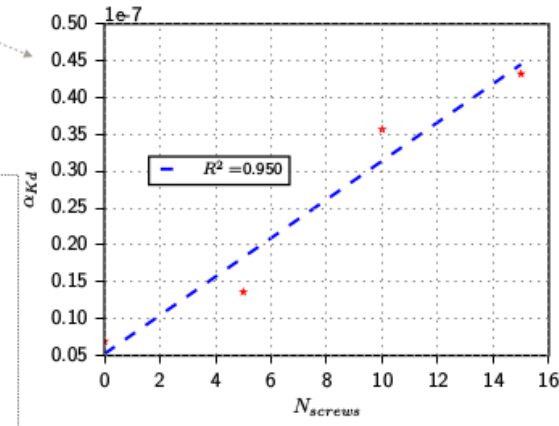
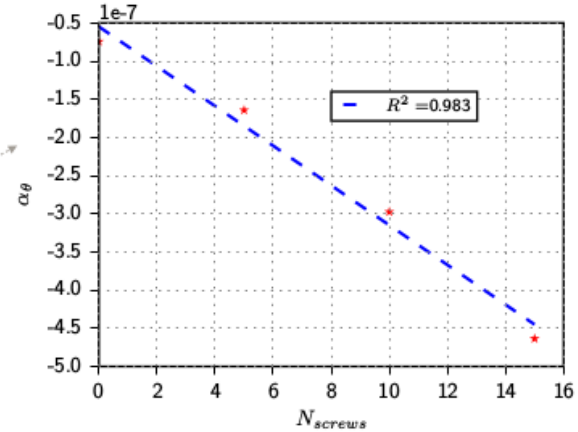
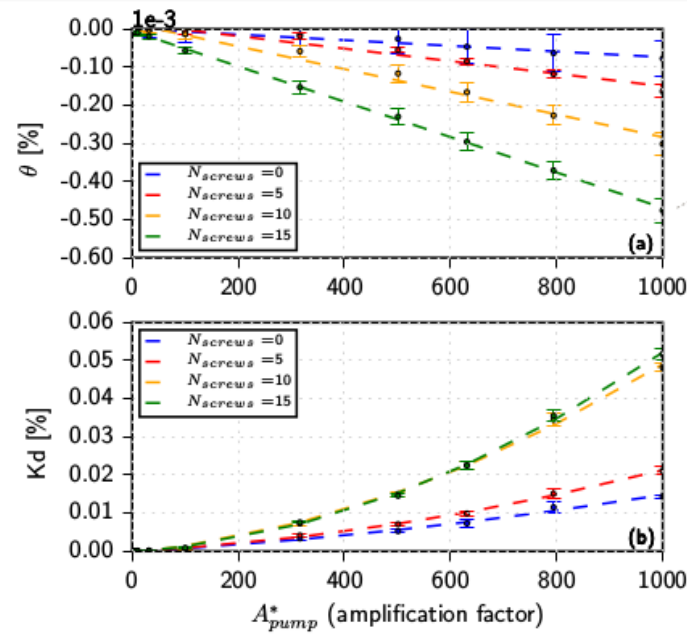
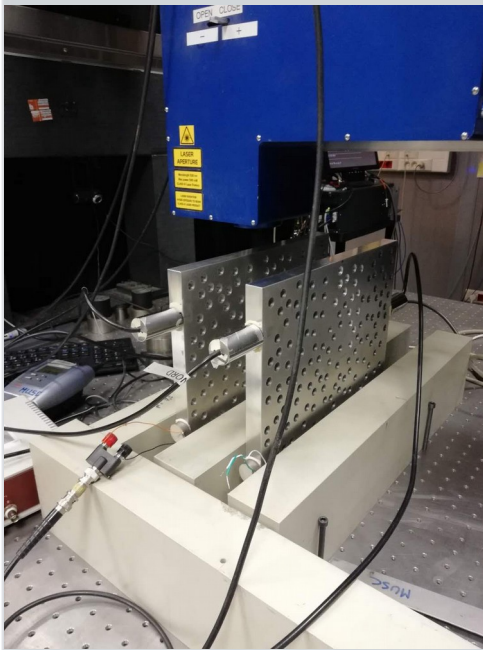
Détection et suivi d'un endommagement précoce dans le béton par modulation non linéare de la coda ultrasonore

Résultats expérimentaux sur milieux modèles



Détection et suivi d'un endommagement précoce dans le béton par modulation non linéaire de la coda ultrasonore

Résultats expérimentaux sur milieux modèles



Simulation

$$\theta = \alpha_\theta^{\sum L} \times (\Delta L \times N) = \alpha_\theta^{\sum L} \times (\sum \Delta L) \quad \checkmark$$

$$Kd = \alpha_{Kd}^{\sum L} \times (\Delta L \times N)^2 = \alpha_{Kd}^{\sum L} \times (\sum \Delta L)^2 \quad ?$$



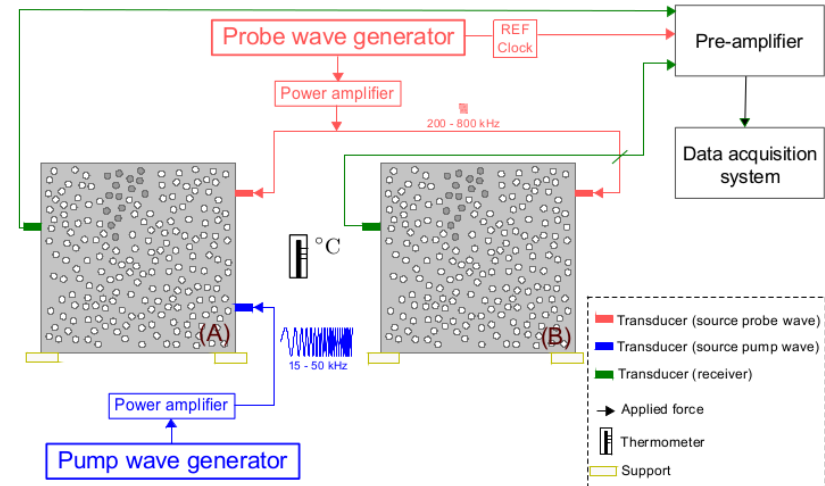
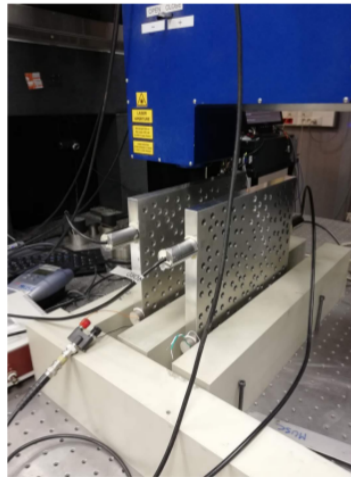
NCWI

Détecter 😊 😊 😊

Localiser ???

Quantifier 😊 😊

des propriétés du milieu
lorsque c'est impossible
avec les techniques classiques



Thèse financée par l'Ifsttar de Shilin QU

Imagerie de micro-fissures par interférométrie de la coda non linéaire



Merci pour votre attention

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

Imagerie et identification de défauts dans les milieux multi-diffusants par acoustique non linéaire : mise au point et validation de la méthode NCWI (Nonlinear Coda Wave Interferometry)

Présenté par Odile Abraham (odile.abraham@ifsttar.fr)

Yuxiang ZHANG, Benoît HILLOULIN, Jean-Baptiste LEGLAND, Guangzhi CHEN, Damien PAGEOT, Shilin QU, Olivier DURAND

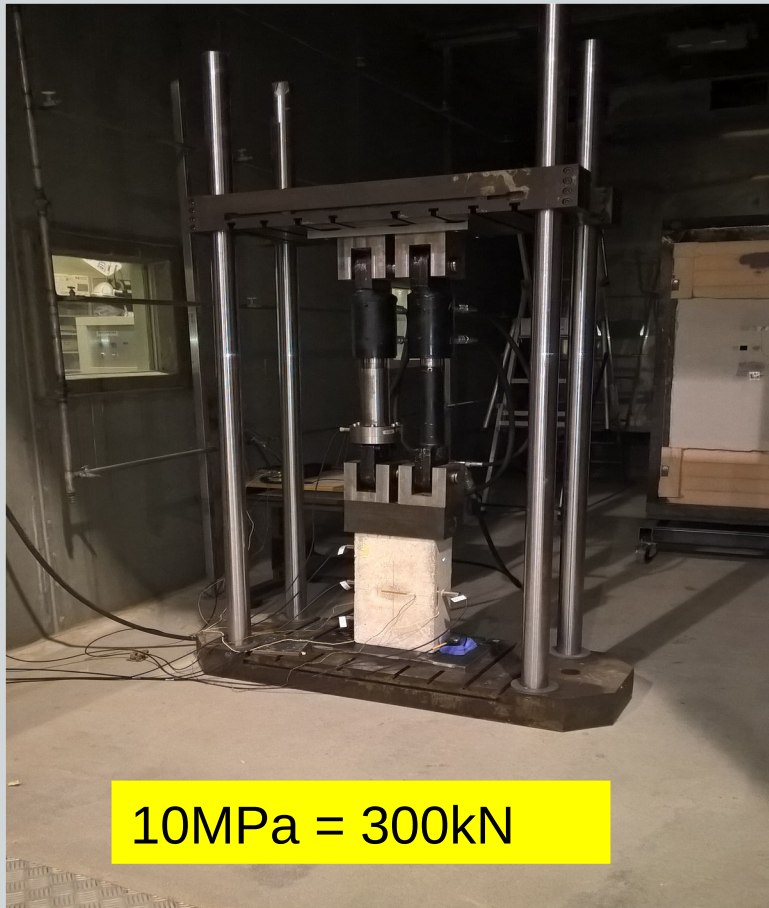
Vincent TOURNAT (LAUM), Alain LE DUFF (ESEO), Bertrand LASCOUP (ESTACA)



Détection et suivi d'un endommagement précoce dans le béton par modulation non linéaire de la coda ultrasonore

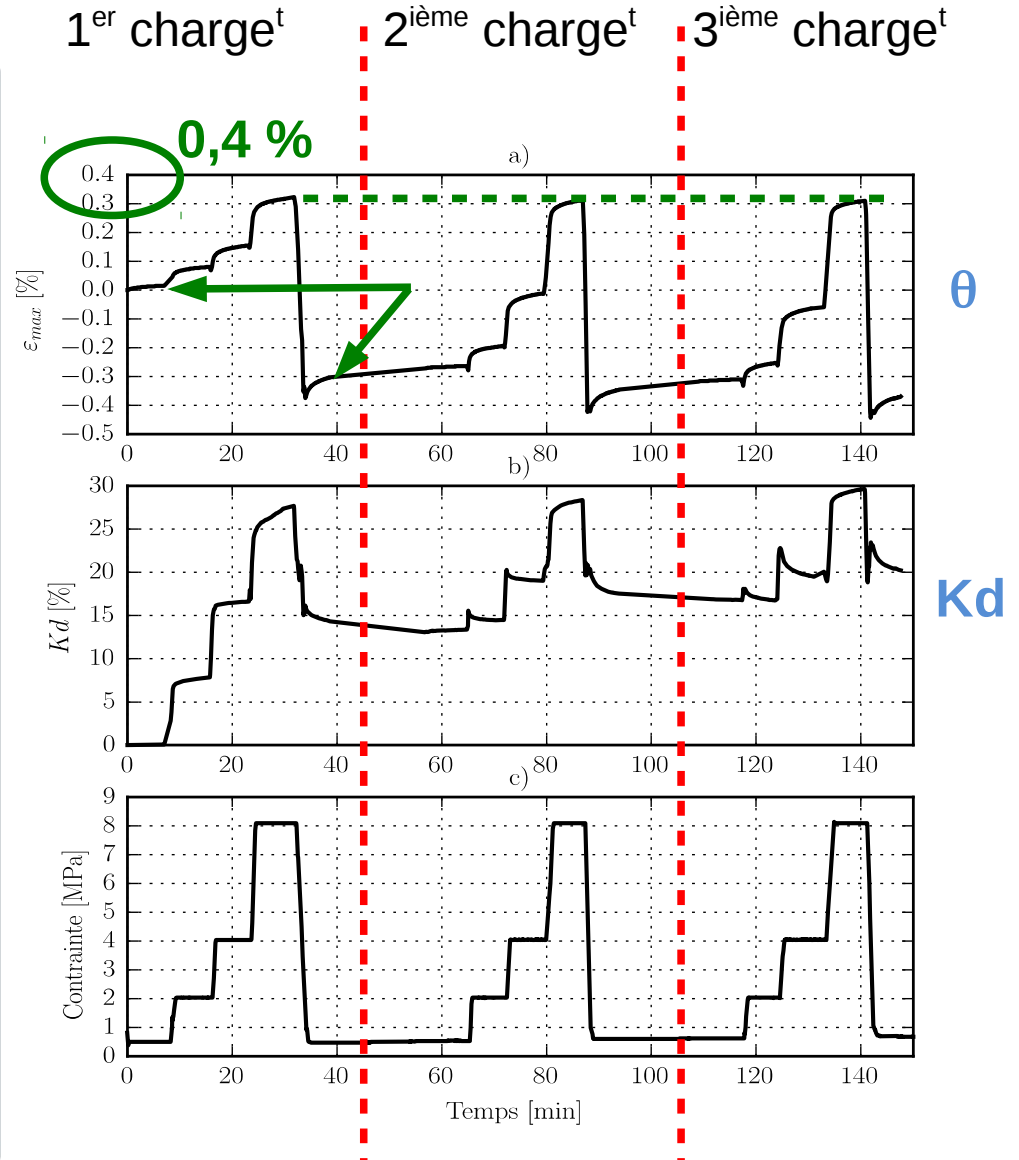
Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore

- Exemple d'application



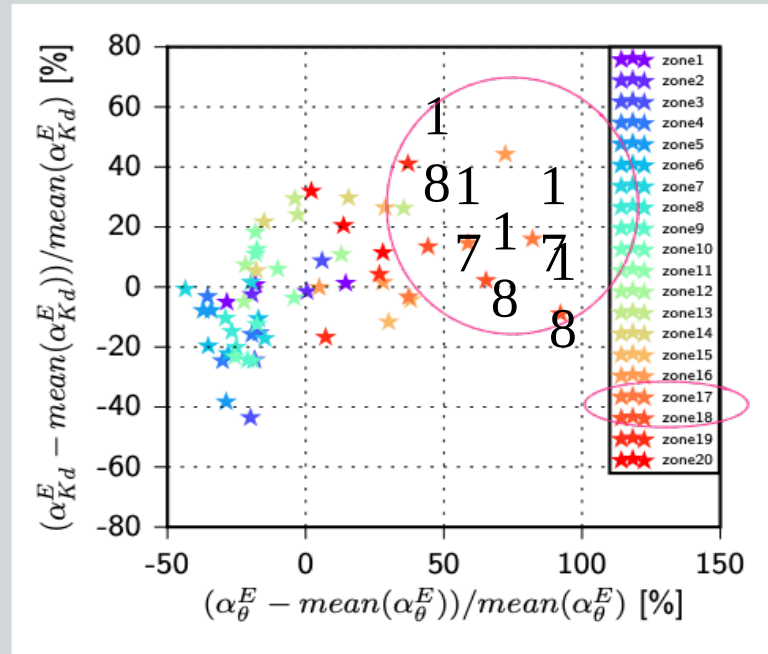
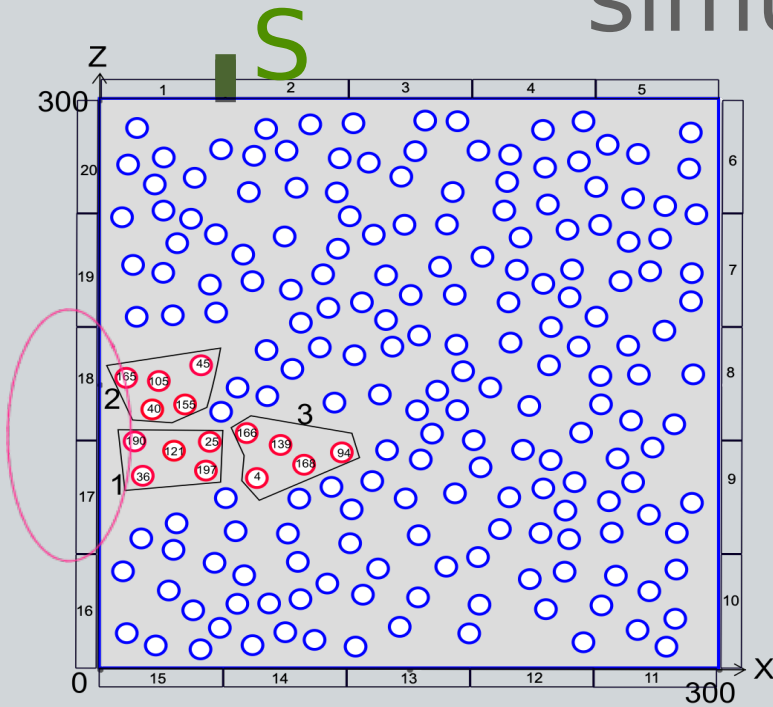
10MPa = 300kN

Projet ENDE



Localisation ?

simulation



Homogeneous model with a localized EDZ completed with random cracks

