

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

## Nonlinear Coda Wave Interferometry (NCWI) : exemples d'application et perspectives

présenté par Odile Abraham (Ifsttar GeoEND)

Yuxiang ZHANG, Benoît HILLOULIN, Jean-Baptiste LEGLAND, Guangzhi CHEN, Damien PAGEOT,  
Olivier Durand, Vincent Tournat (LAUM), Alain Le Duff (ESEO), Bertrand Lascoup (ESTACA)



29 mars 2019 – ESTACA Laval  
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

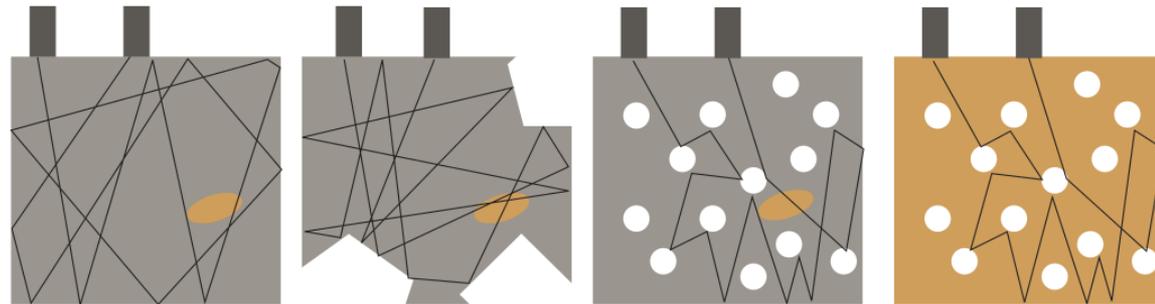
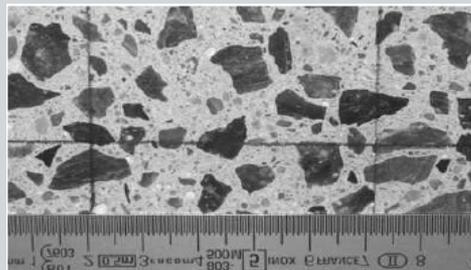
- **Contexte**
- **Principe de la méthode**
- **Premiers résultats expérimentaux**
- **Premières simulations**
- **Perspectives**



## Contexte



Endommagement précoce, fissures fermées, etc.



Ondes dans un milieu multi-réverbérant

Ondes dans un milieu multi-diffusant

Détecter  
Localiser  
Quantifier

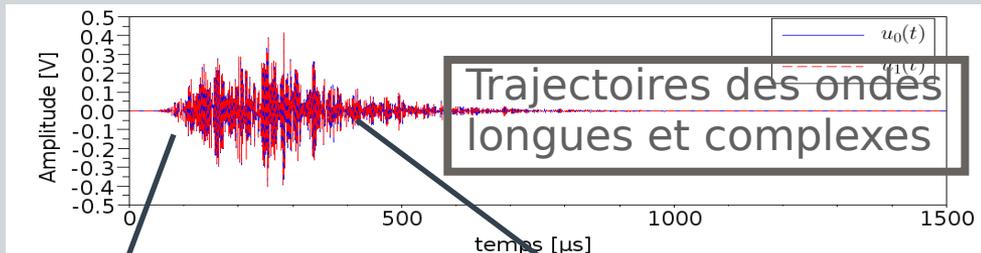
des propriétés du milieu  
lorsque c'est impossible  
avec les techniques classiques



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

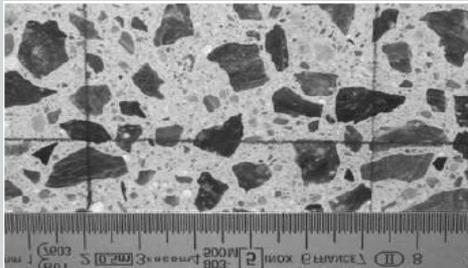
## Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore

- **La coda**

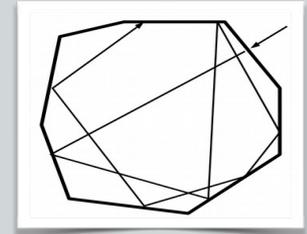


Ondes de volume  
Ondes de surface

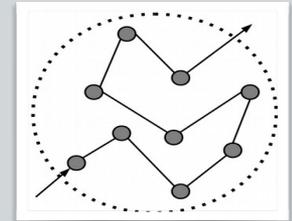
Coda :  
Reproductible  
Sensible



Réflexions multiples



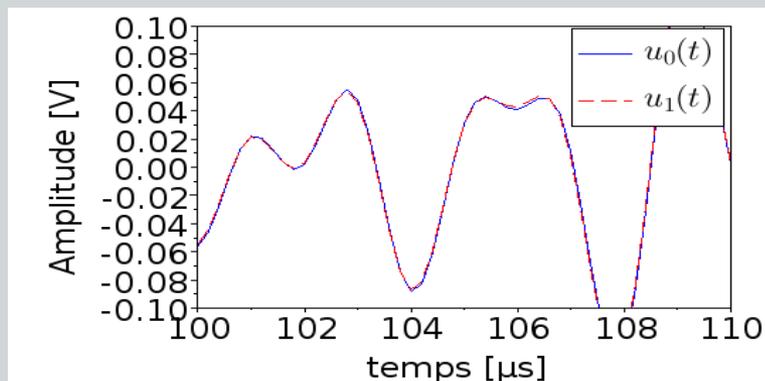
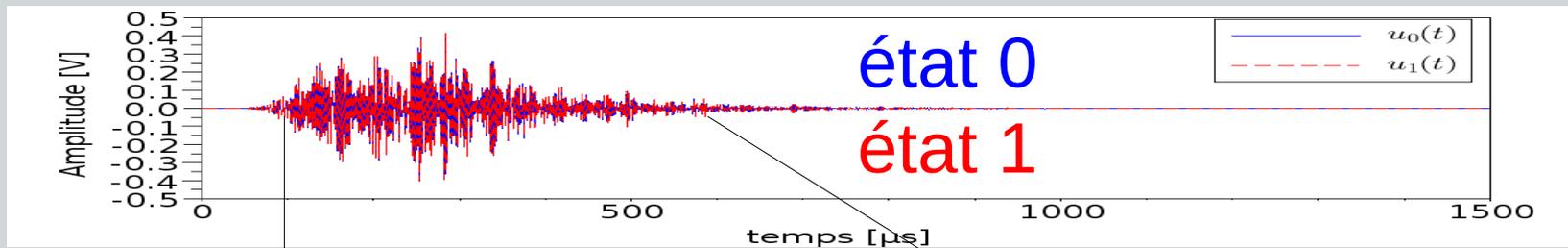
Diffusions multiples



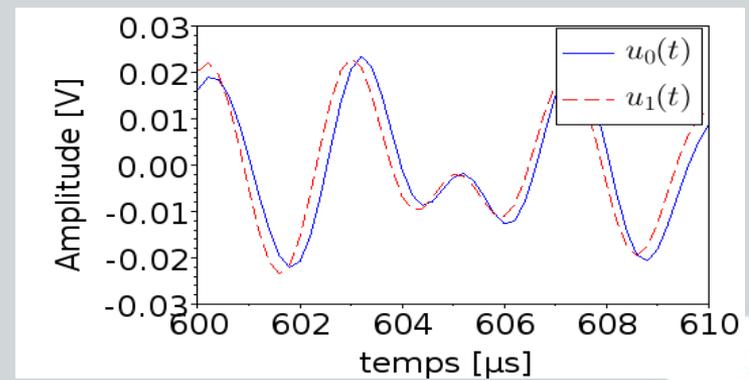
# Détection et suivi d'un endommagement précoce dans le béton par modulation non linéaire de la coda ultrasonore

## Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore

- Interférométrie de coda (CWI)



Ondes de volume  
Ondes de surface



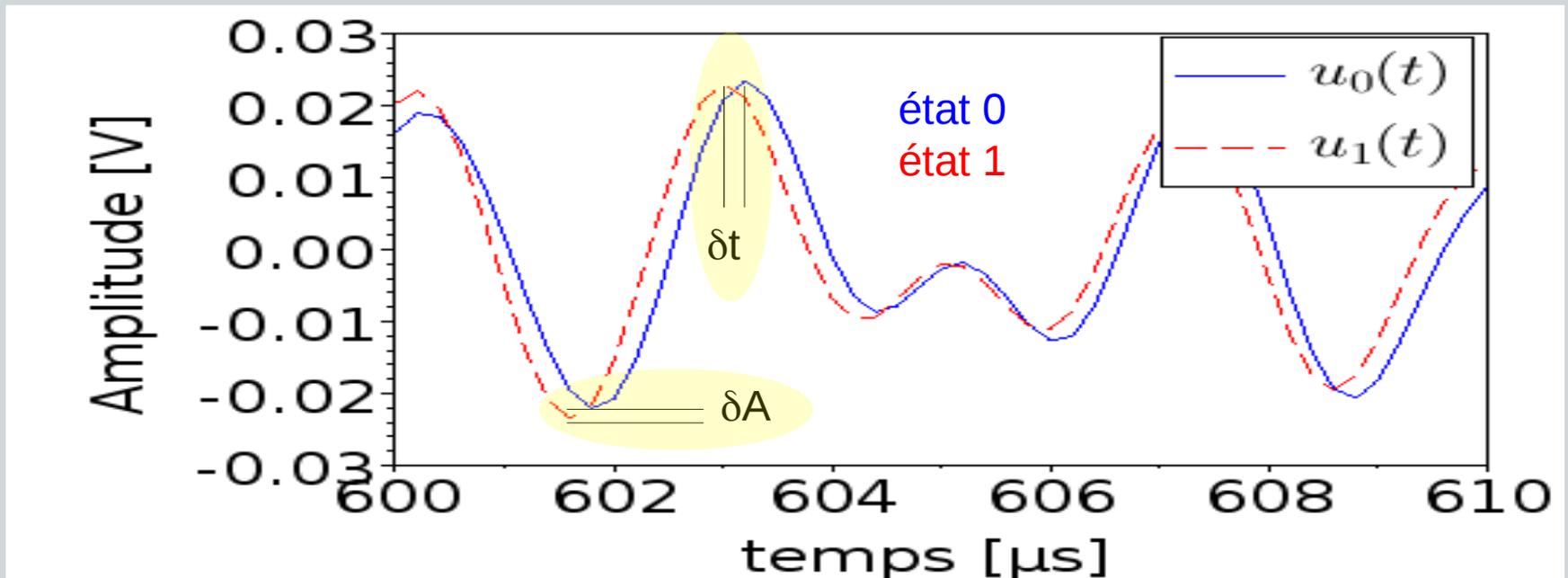
Coda :  
Reproductible  
Sensible



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

- Interférométrie de coda (CWI)



Coda :  
Reproductible  
Sensible

### Observables (issues du stretching) :

- Variation de vitesse  $\theta = \Delta v/v$
- Coefficient de décorrélation  $Kd$



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



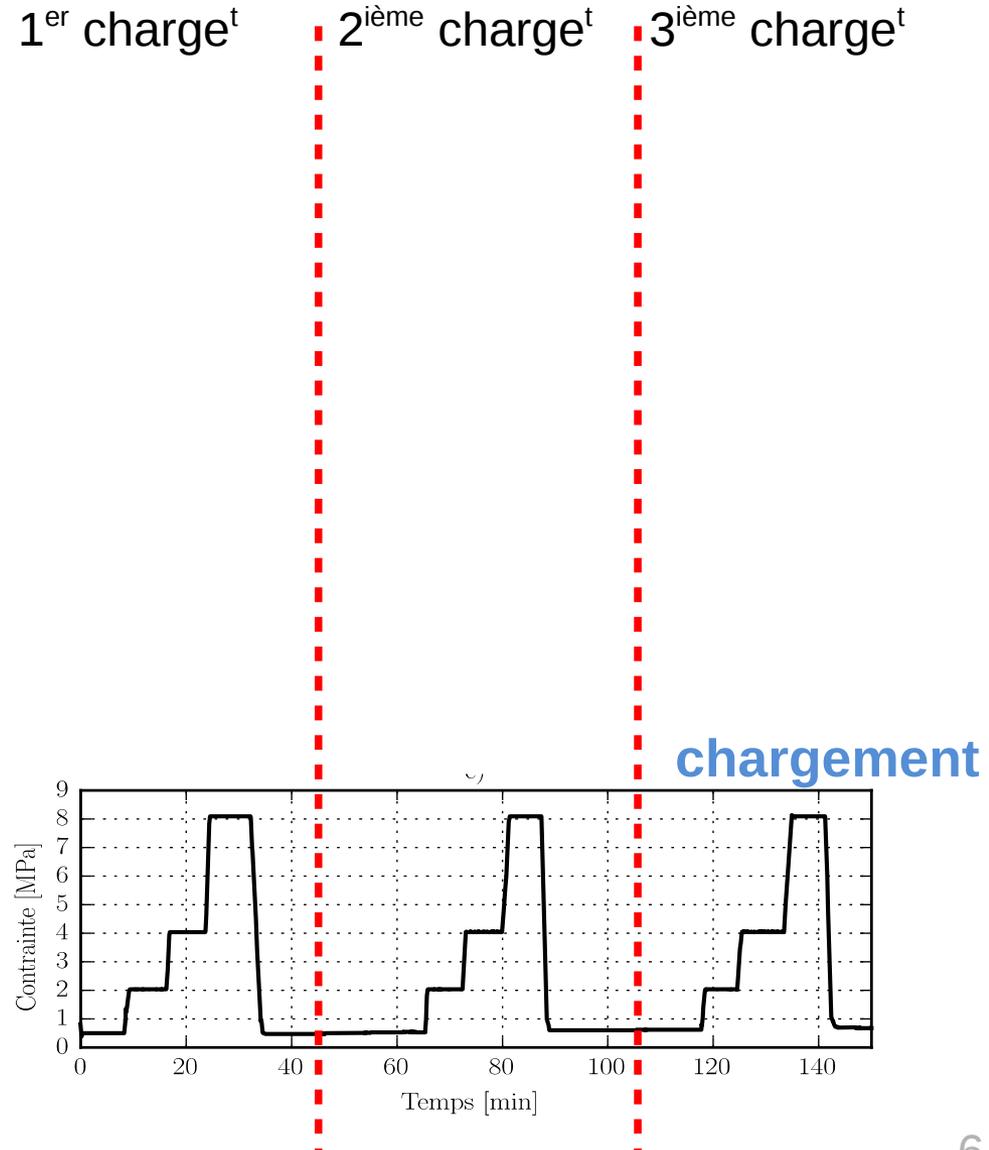
# Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- Exemple d'application



Max 8MPa en compression

Projet ENDE



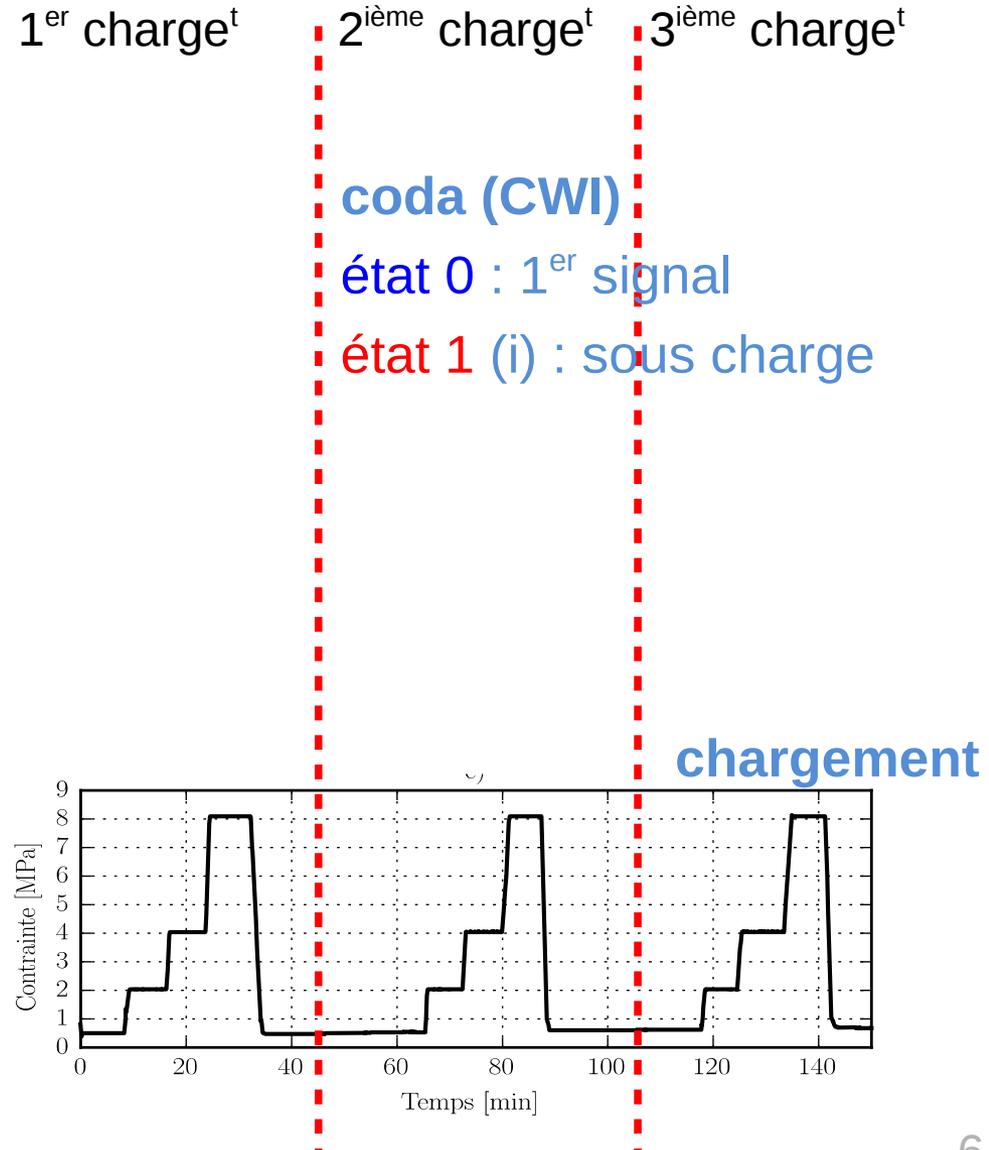
# Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- Exemple d'application



Max 8MPa en compression

Projet ENDE



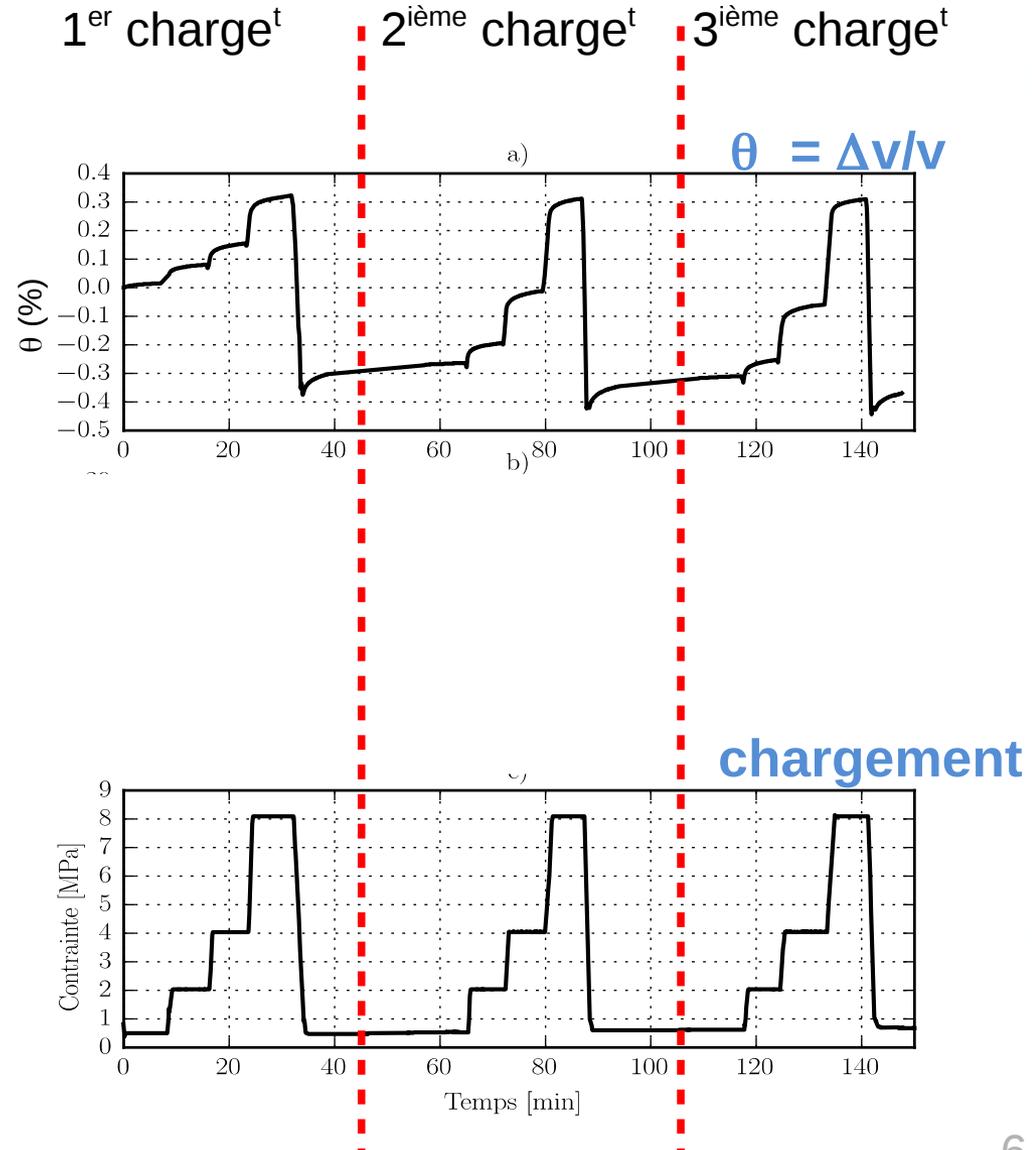
# Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- Exemple d'application



Max 8MPa en compression

Projet ENDE



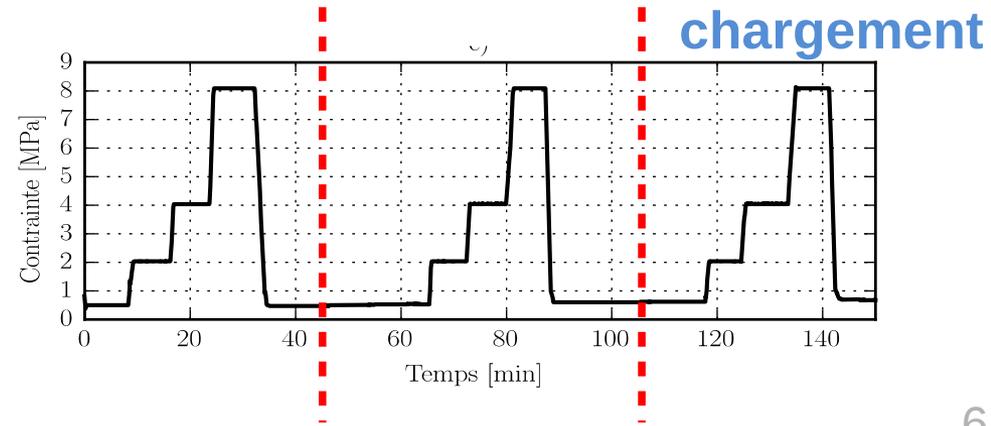
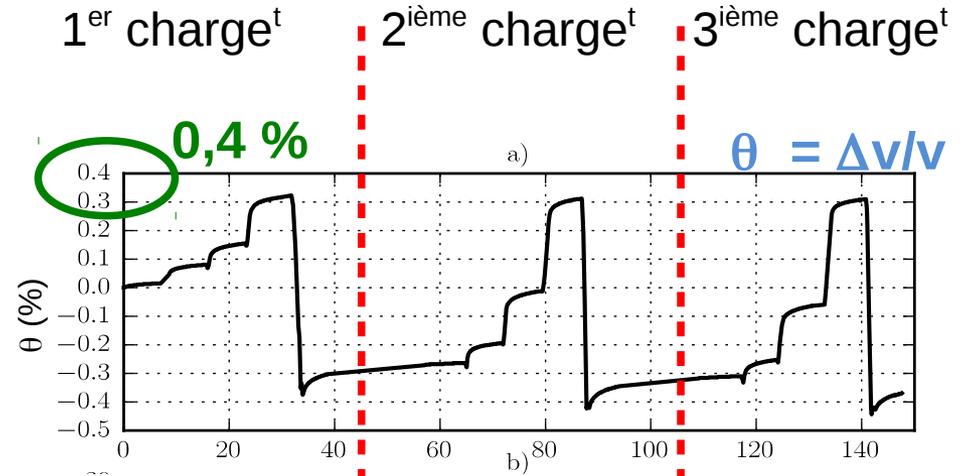
# Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- Exemple d'application



Max 8MPa en compression

Projet ENDE



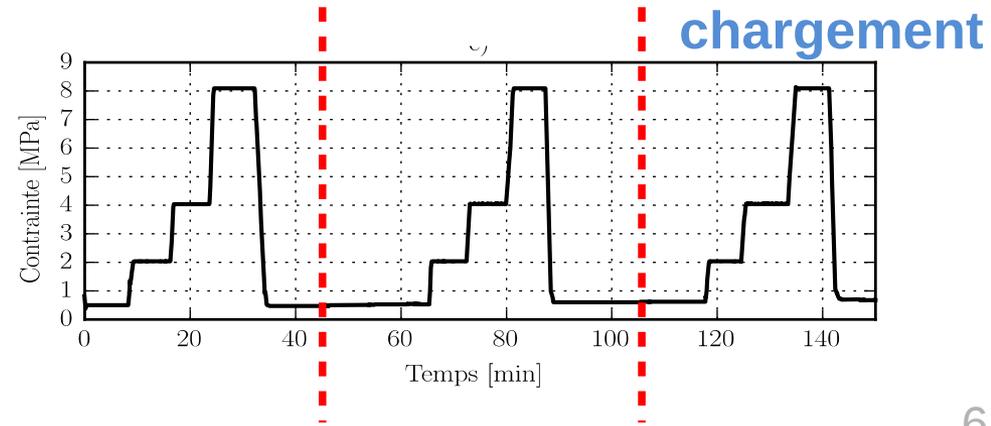
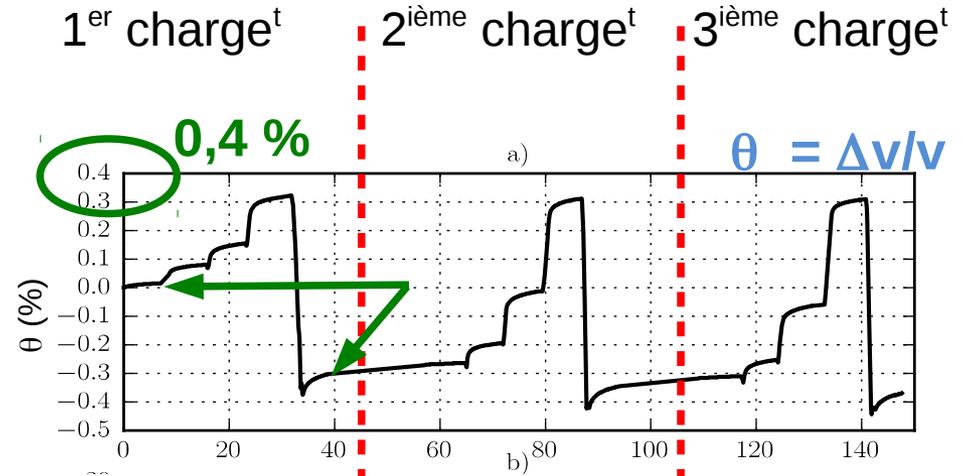
# Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- Exemple d'application



Max 8MPa en compression

Projet ENDE



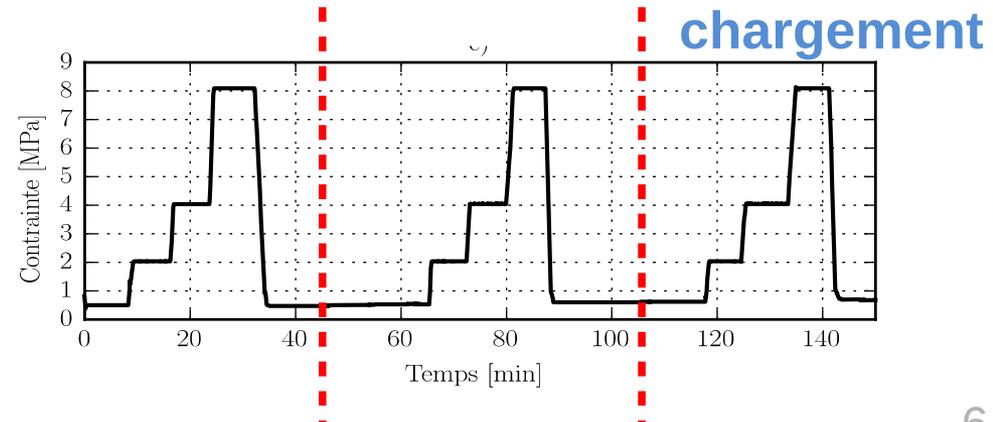
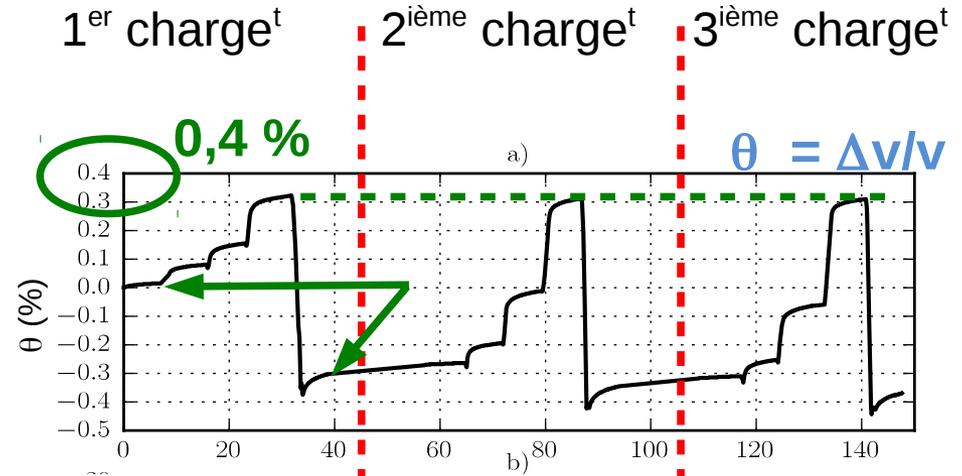
# Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore (CWI)

- 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)

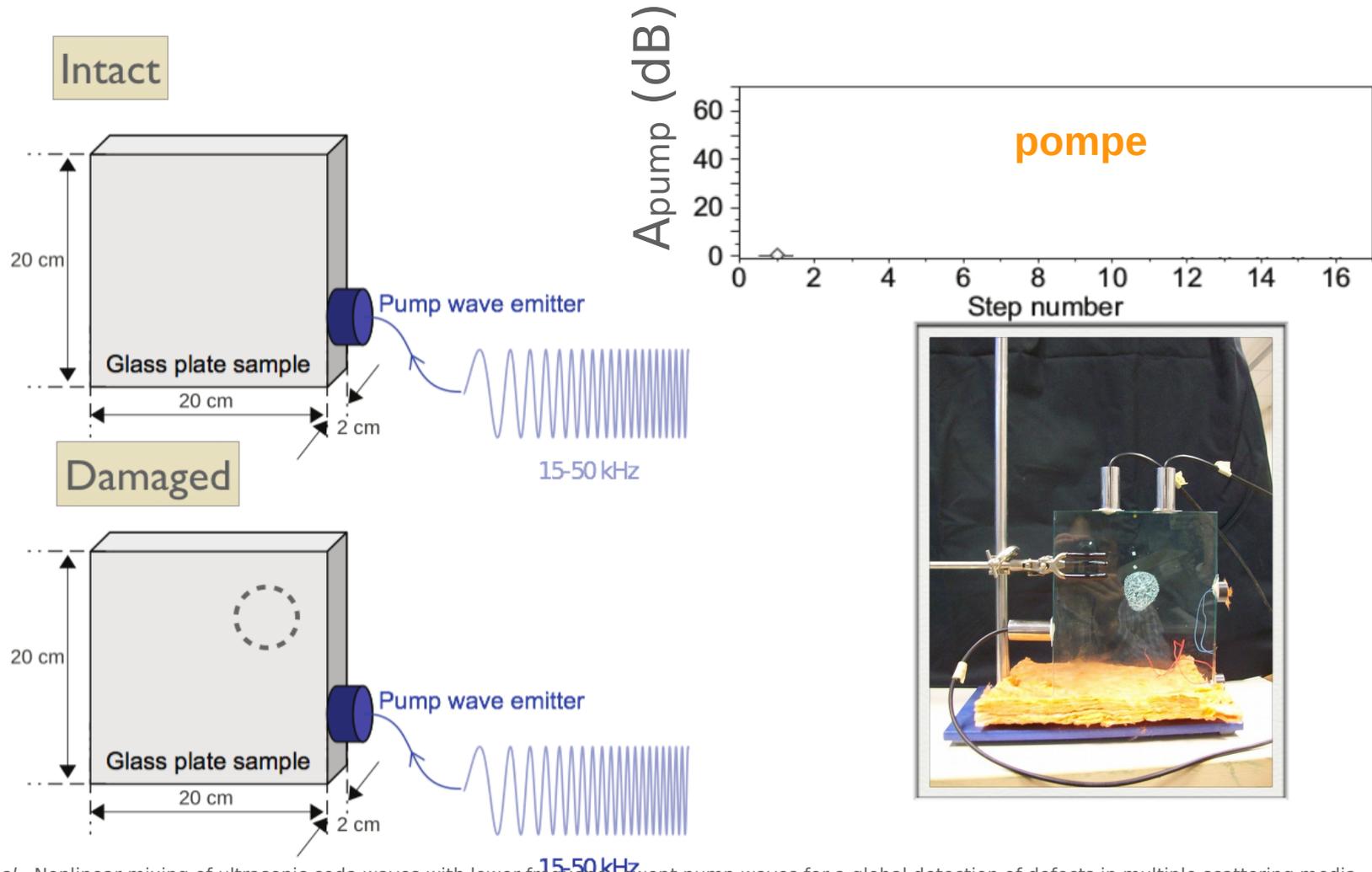
$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 + \beta \varepsilon + \delta \varepsilon^2 + \dots) + \alpha F(\varepsilon, \text{sign}(\partial\varepsilon/\partial t))$$

- **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)

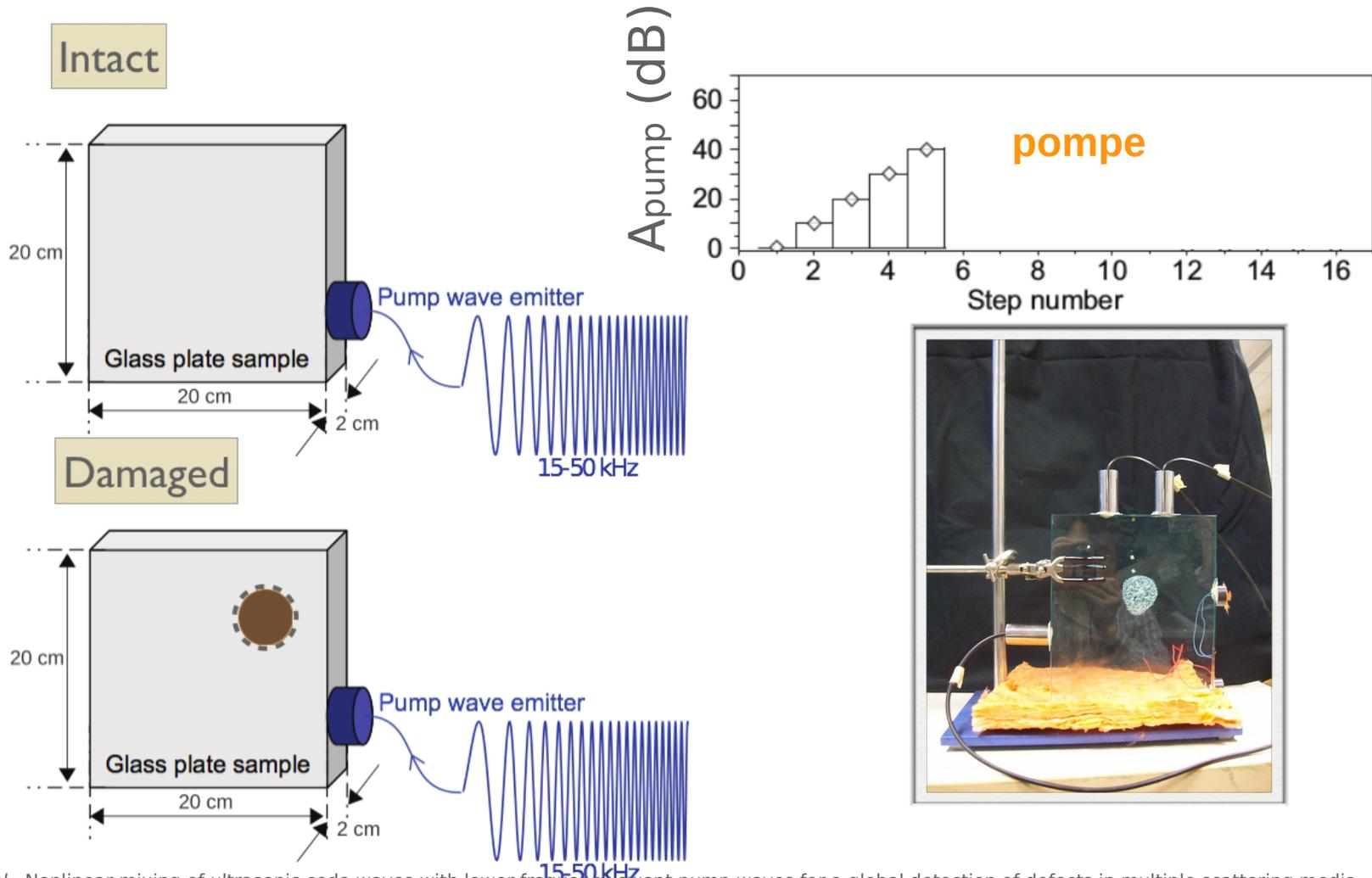


Zhang *et al.*, Nonlinear mixing of ultrasonic coda waves with lower frequency-swept pump waves for a global detection of defects in multiple scattering media. *Journal of Applied Physics*, 2013.



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

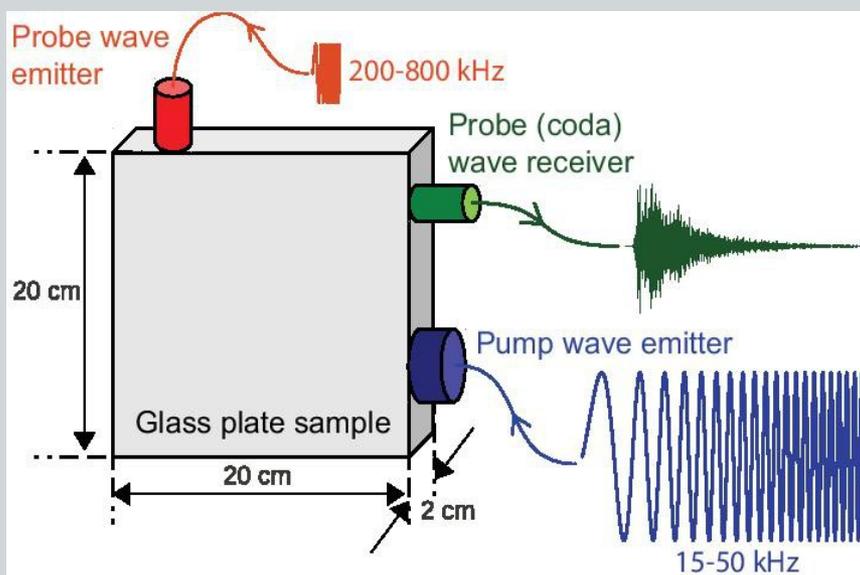
## Principe de la méthode – CWI et non linéarité (NCWI)



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.



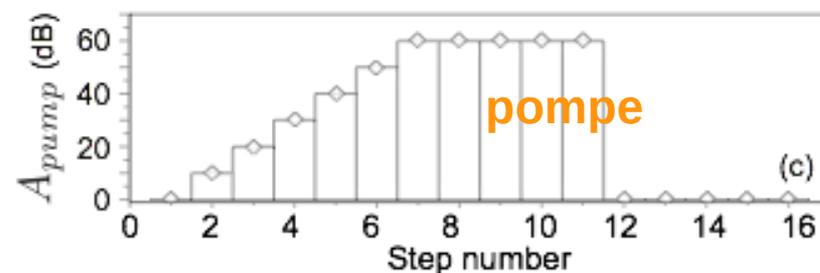
# Principe de la méthode – CWI et non linéarité (NCWI)



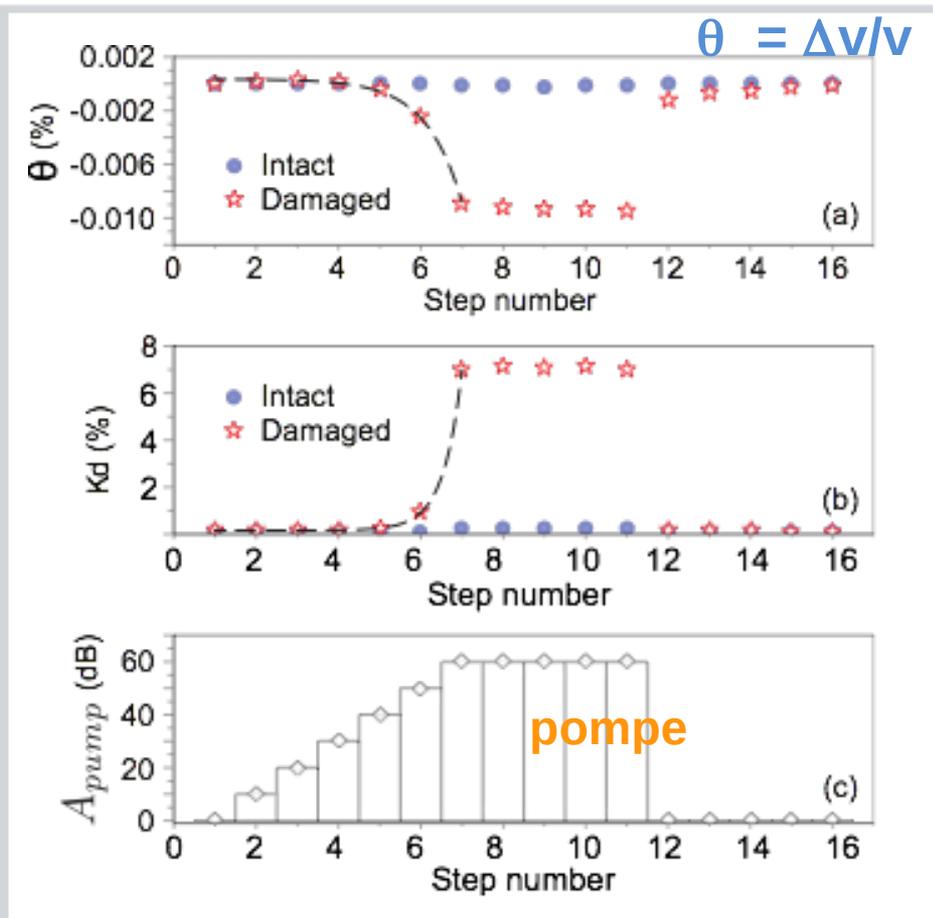
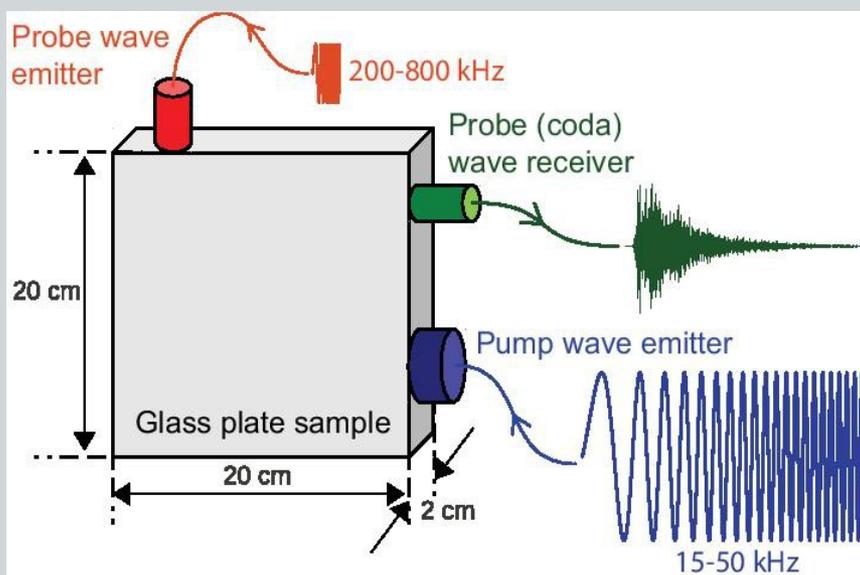
## coda (CWI)

état 0 : 1<sup>er</sup> signal (ampl pompe = 0)

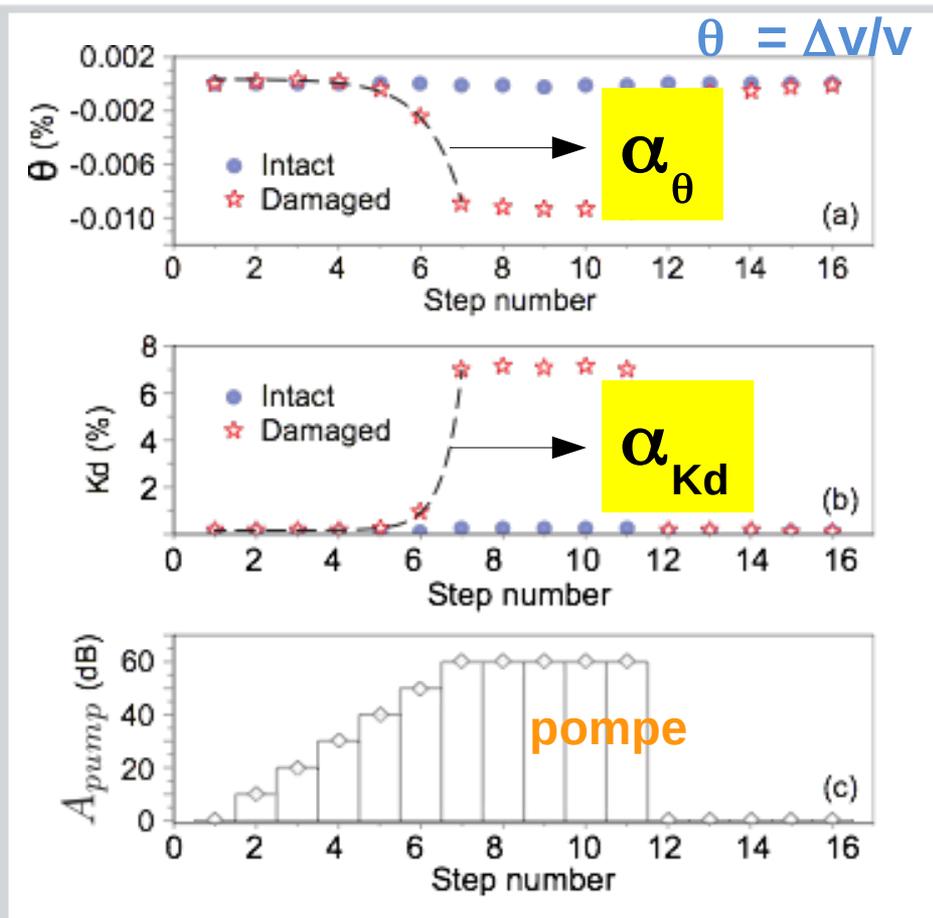
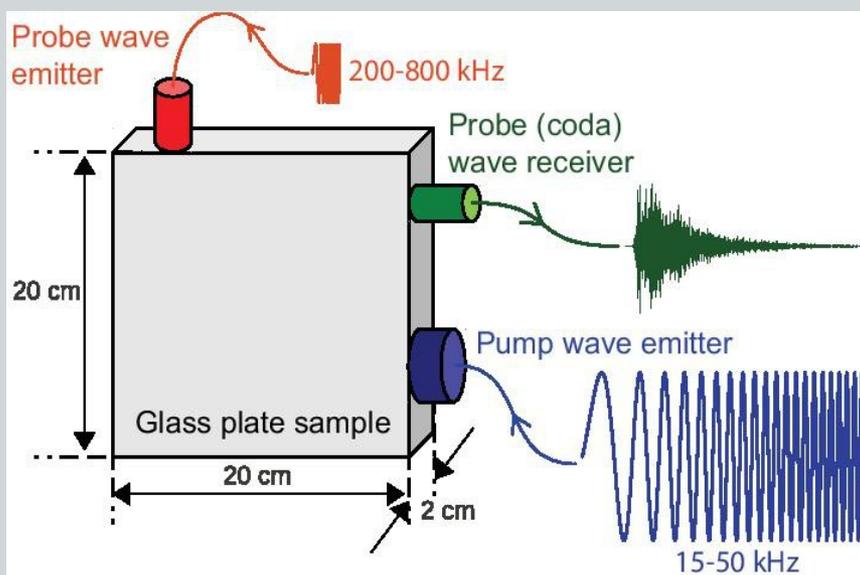
état 1 (i) : pompes suivantes



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

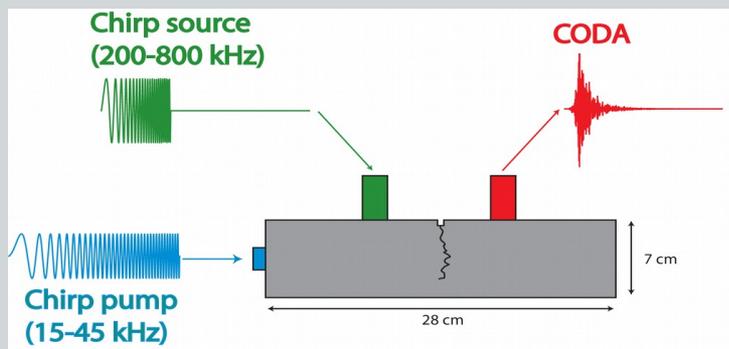
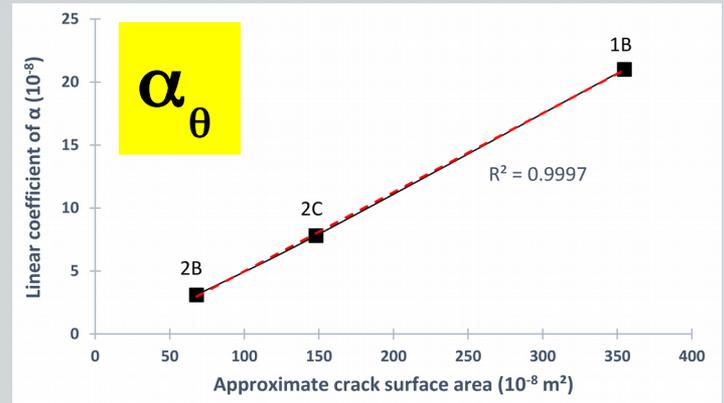
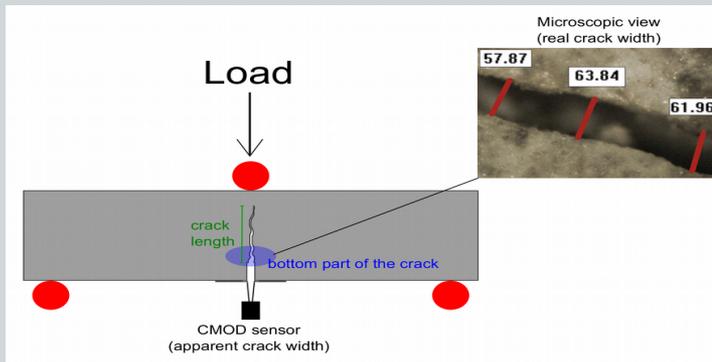


# Principe de la méthode – CWI et non linéarité (NCWI)



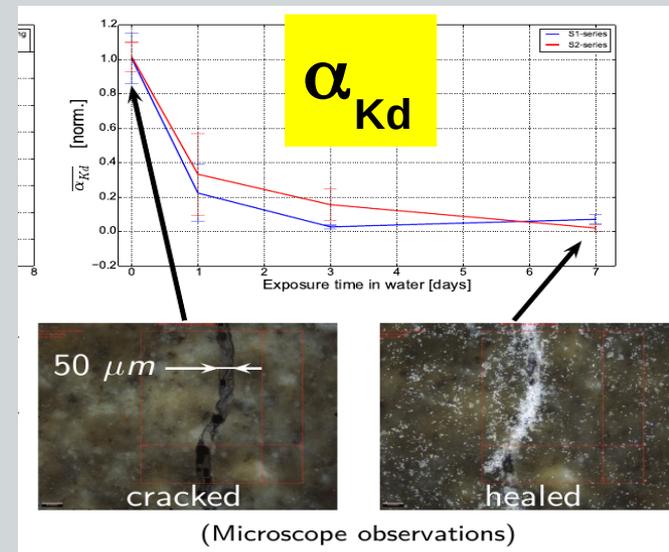
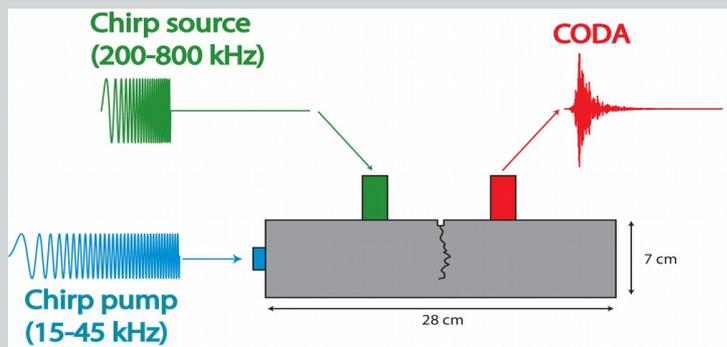
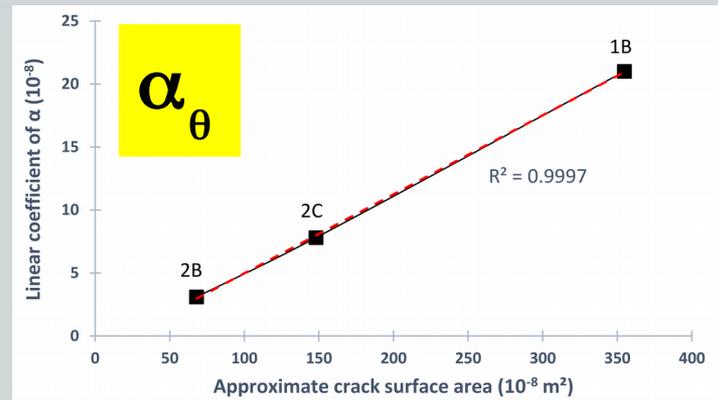
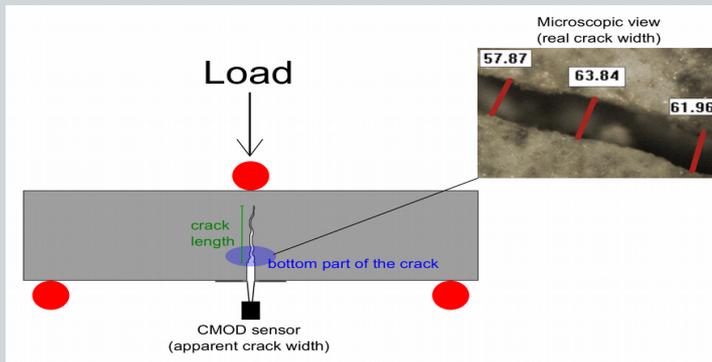
# Premiers résultats expérimentaux au laboratoire (NCWI)

- micro fissure / auto cicatrisation



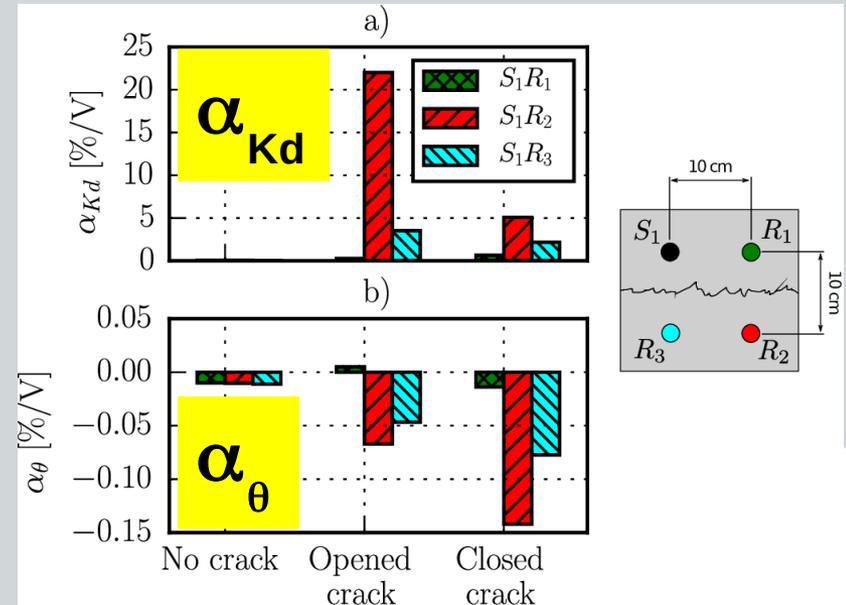
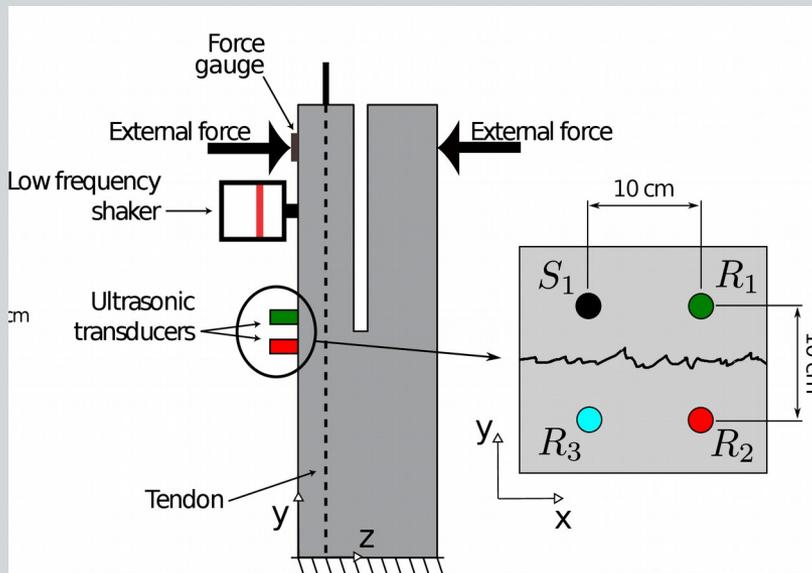
# Premiers résultats expérimentaux au laboratoire (NCWI)

- micro fissure / auto cicatrisation



# Premiers résultats expérimentaux au laboratoire (NCWI)

- Fissure fermée
  - Béton précontraint au laboratoire

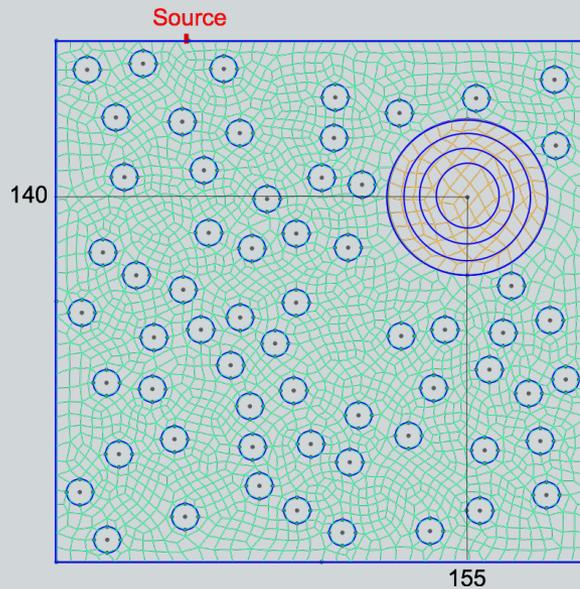


– À VERCORS



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

## Modélisation numérique

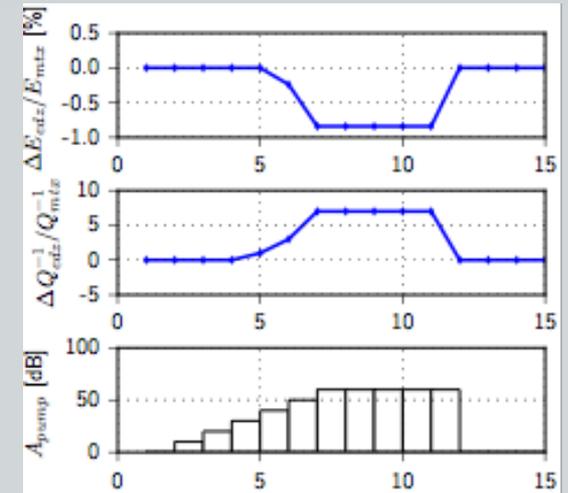


$$\Delta E_{edz}/E_{mtx} \propto A_{pump}$$

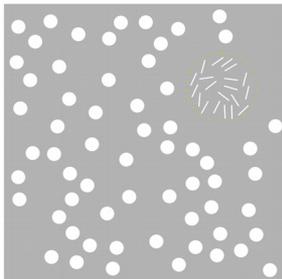
$$\Delta Q_{edz}^{-1}/Q_{mtx}^{-1} \propto A_{pump}$$

$$\theta = \alpha_{\theta}^{E,S} \times \left( \frac{\Delta E_{edz}}{E_{mtx}} \right) \times S_R$$

$$Kd = \alpha_{Kd}^{E,S} \times \left( \frac{\Delta E_{edz}}{E_{mtx}} \right)^2 \times (S_R)^2$$

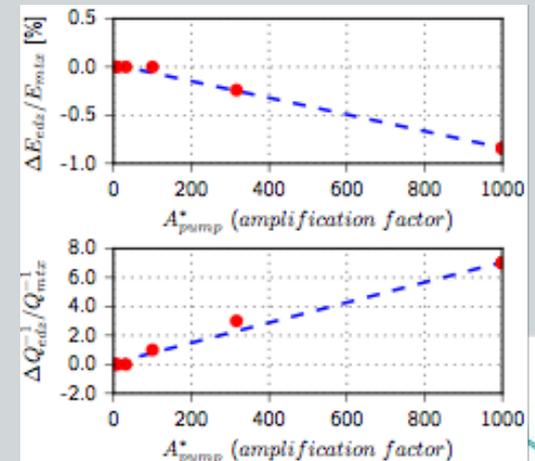


$N_{crack} = 20$



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

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



## Perspectives

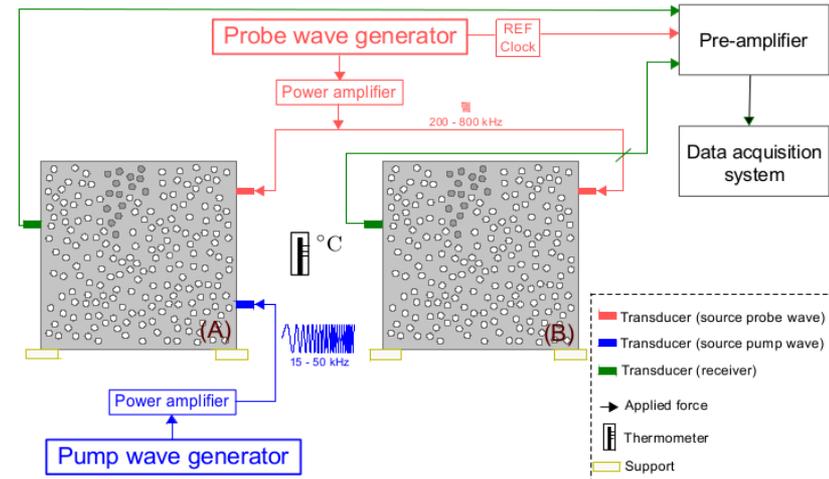
### NCWI

Détecter 😊 😊 😊

Localiser ???

Quantifier 😊 😊

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



Sujet de thèse N°2149

**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**

## Nonlinear Coda Wave Interferometry (NCWI) : exemples d'application et perspectives

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

Yuxiang ZHANG, Benoît HILLOULIN, Jean-Baptiste LEGLAND, Guangzhi CHEN

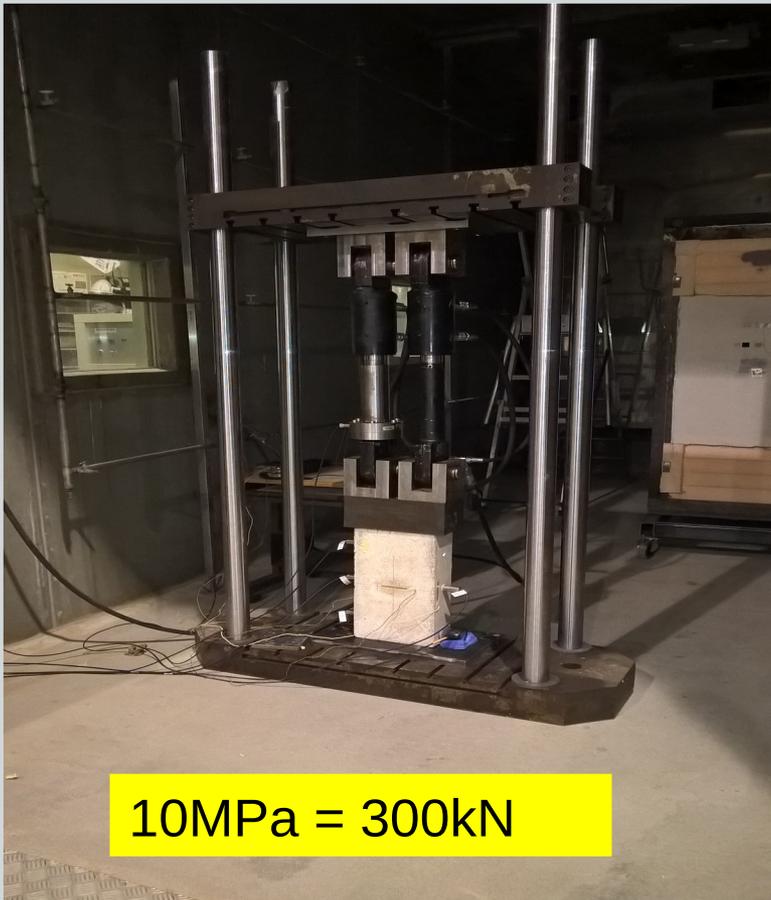
Olivier Durand, Vincent Tournat (LAUM), Alain Le Duff (ESEO), Bertrand Lascoup (ESTACA)



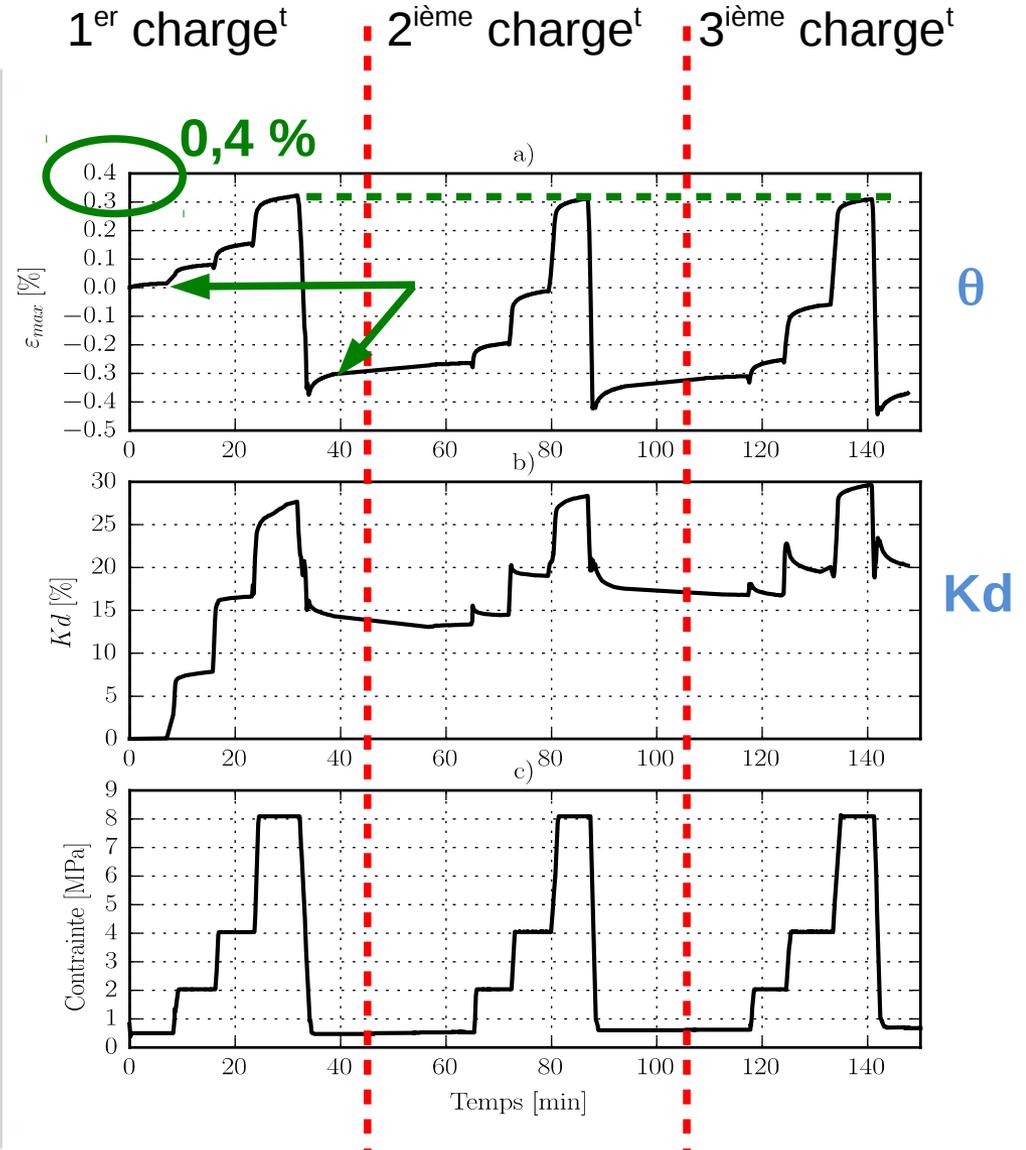
# Détection et suivi d'un endommagement précoce dans le béton par modulation non linéaire de la coda ultrasonore

## Principe de la méthode – Interférométrie de la coda ultrasonore

- Exemple d'application



Projet ENDE



# Homogeneous model with a localized EDZ completed with random cracks

