

# Propriétés Thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés

**Alvaro PEDRAZA**

**Encadrants:  
Hervé DI BENEDETTO  
Cédric SAUZÉAT  
Simon POUGET**

**25/01/2017**

# PLAN

1. Objectifs
2. Essais thermomécaniques
3. Conclusions

# Objectifs

Innovation en Matériaux et PROcédés pour la Valorisation du MULTI-Recyclage des Enrobés



## Partenaires



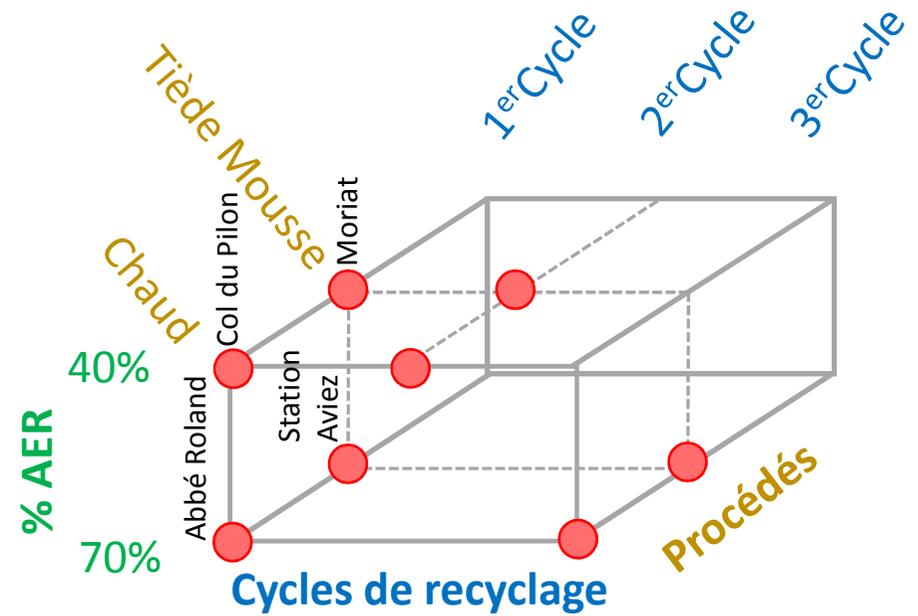
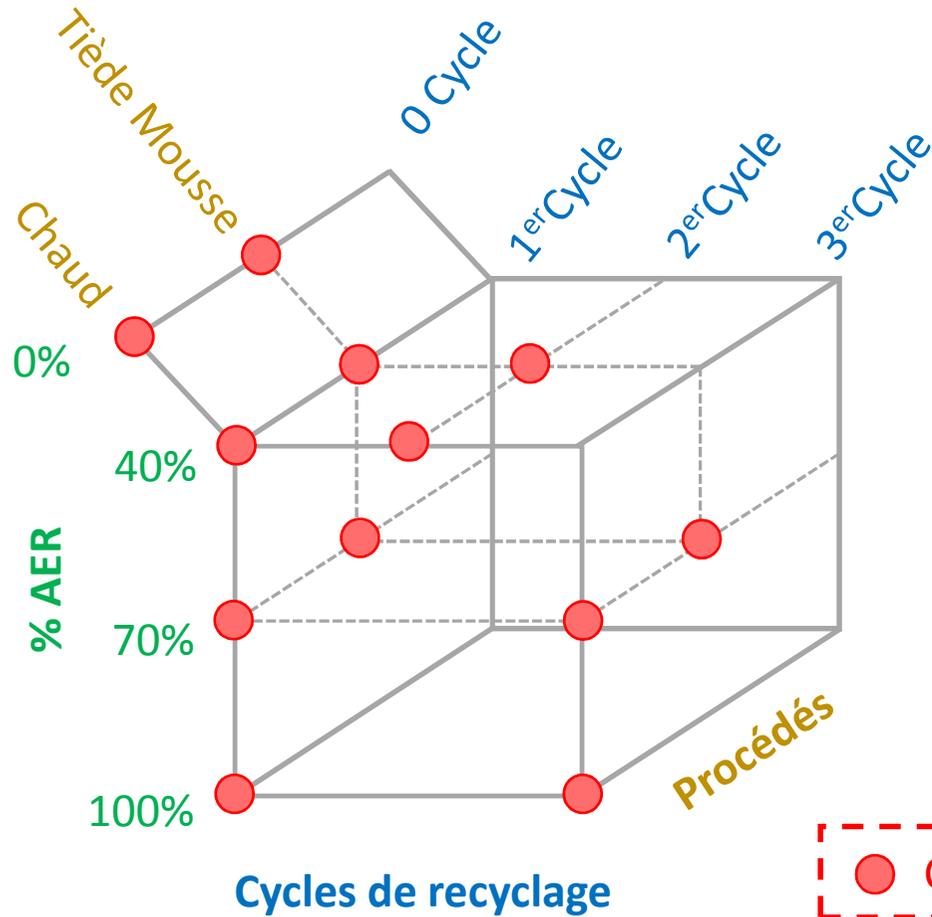
➔ Influence de recyclages successifs sur les propriétés thermomécaniques des enrobés multi-recyclés

➔ Modélisation du comportement thermomécanique des enrobés multi-recyclés

# Configurations

Éprouvettes fabriquées en laboratoire

Éprouvettes issues du chantier



● Caractérisation Thermomécanique

## Essais réalisés

↪ Essai de module complexe  
Viscoélasticité linéaire (VEL)



↪ Essai retrait thermique empêché  
(TSRST)  
Couplage thermomécanique  
(basse température)



↪ Propagation de fissure  
Rupture



# Essai de module complexe

## Viscoélasticité linéaire (VEL)

- Sollicitation sinusoïdale
- Amplitude : 50 µm/m

Températures

Fréquences

## Module complexe

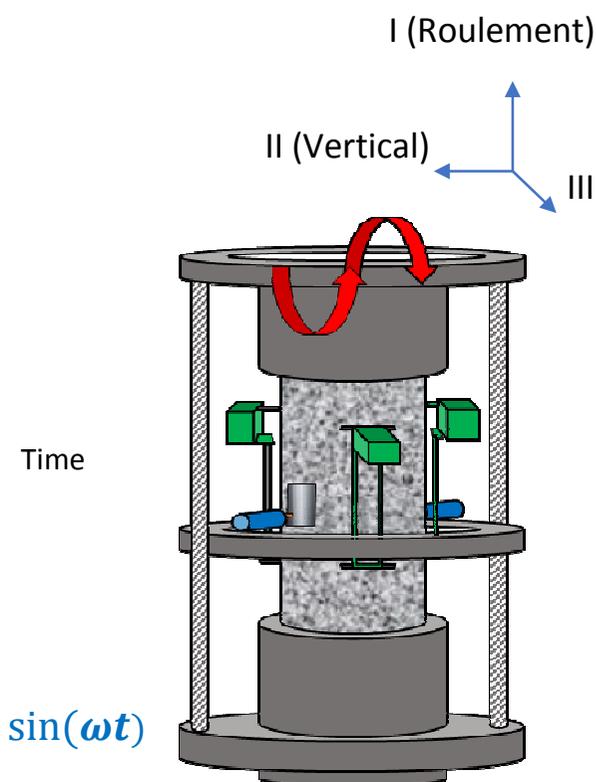
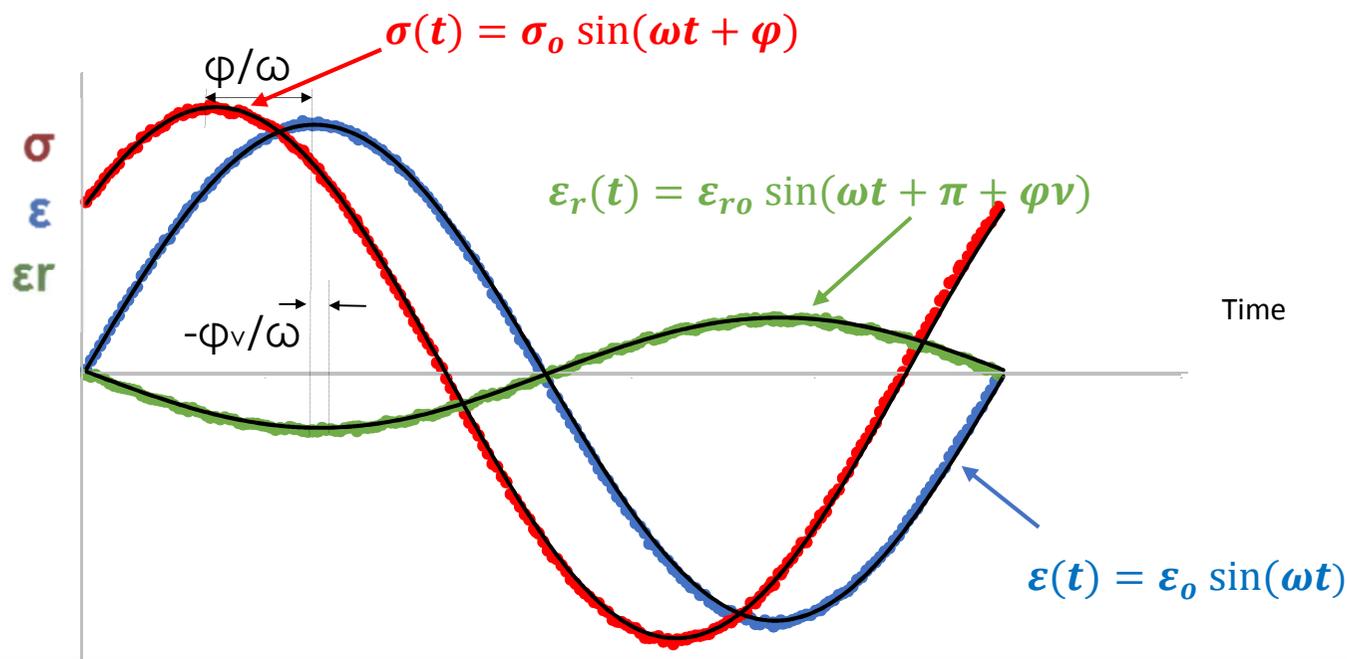
$$E^*(\omega) = \frac{\sigma^*(t)}{\varepsilon^*(t)}$$

$$E^* = E_1 + iE_2$$

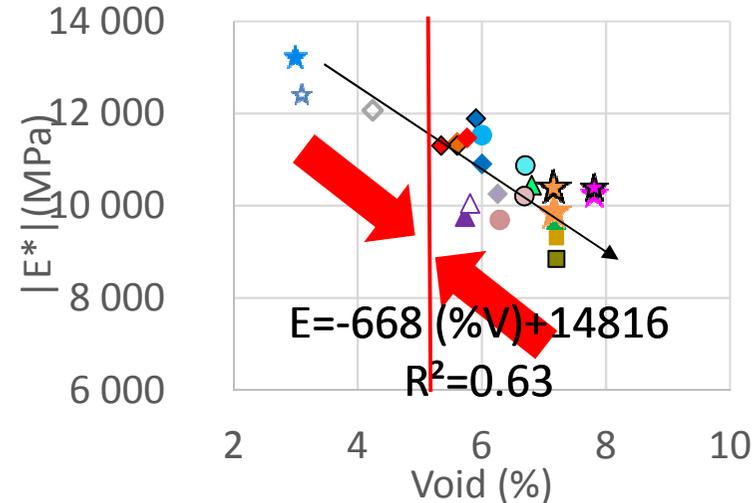
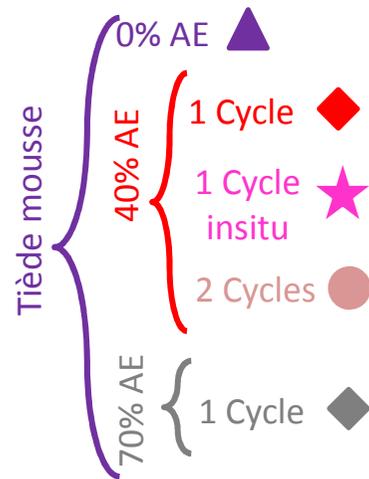
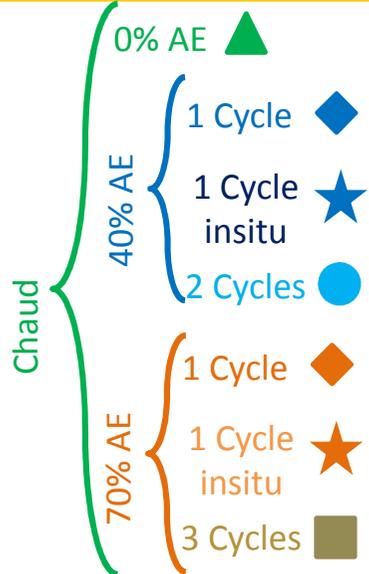
## Coefficient de Poisson

$$\nu^* = -\frac{\varepsilon_r^*}{\varepsilon^*}$$

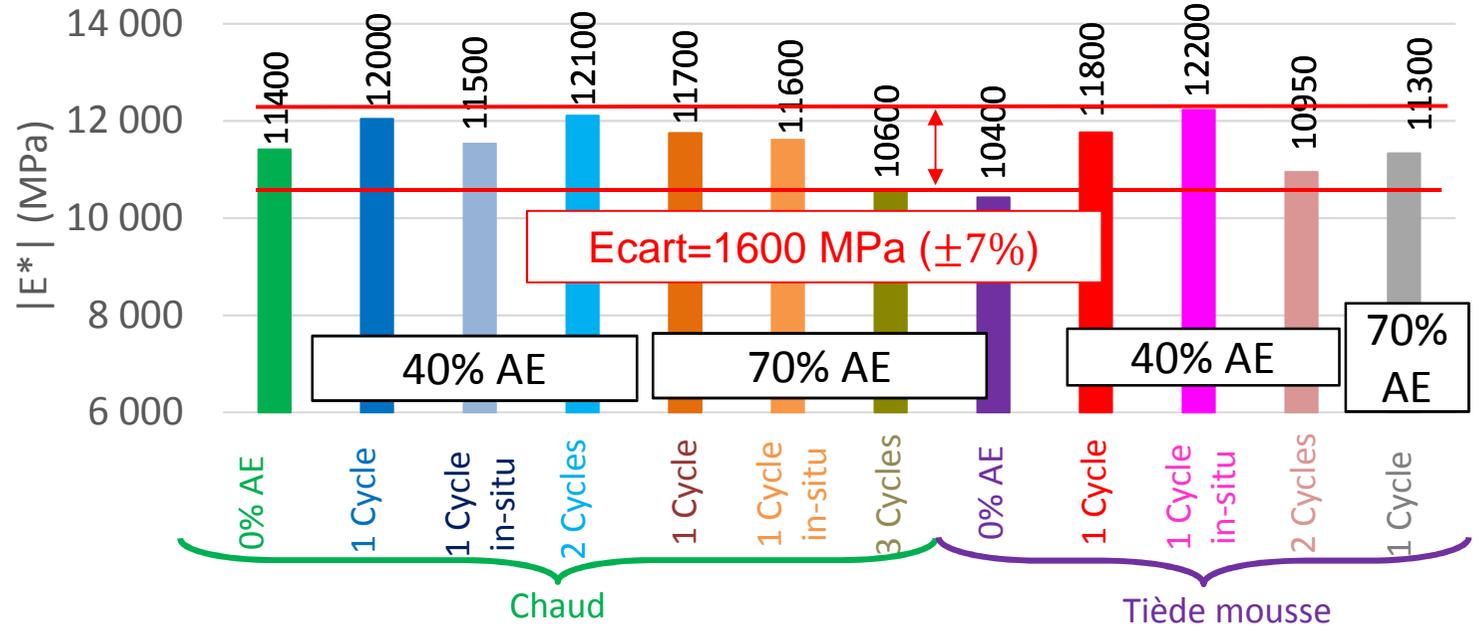
$$\nu^* = \nu_1 + i\nu_2$$



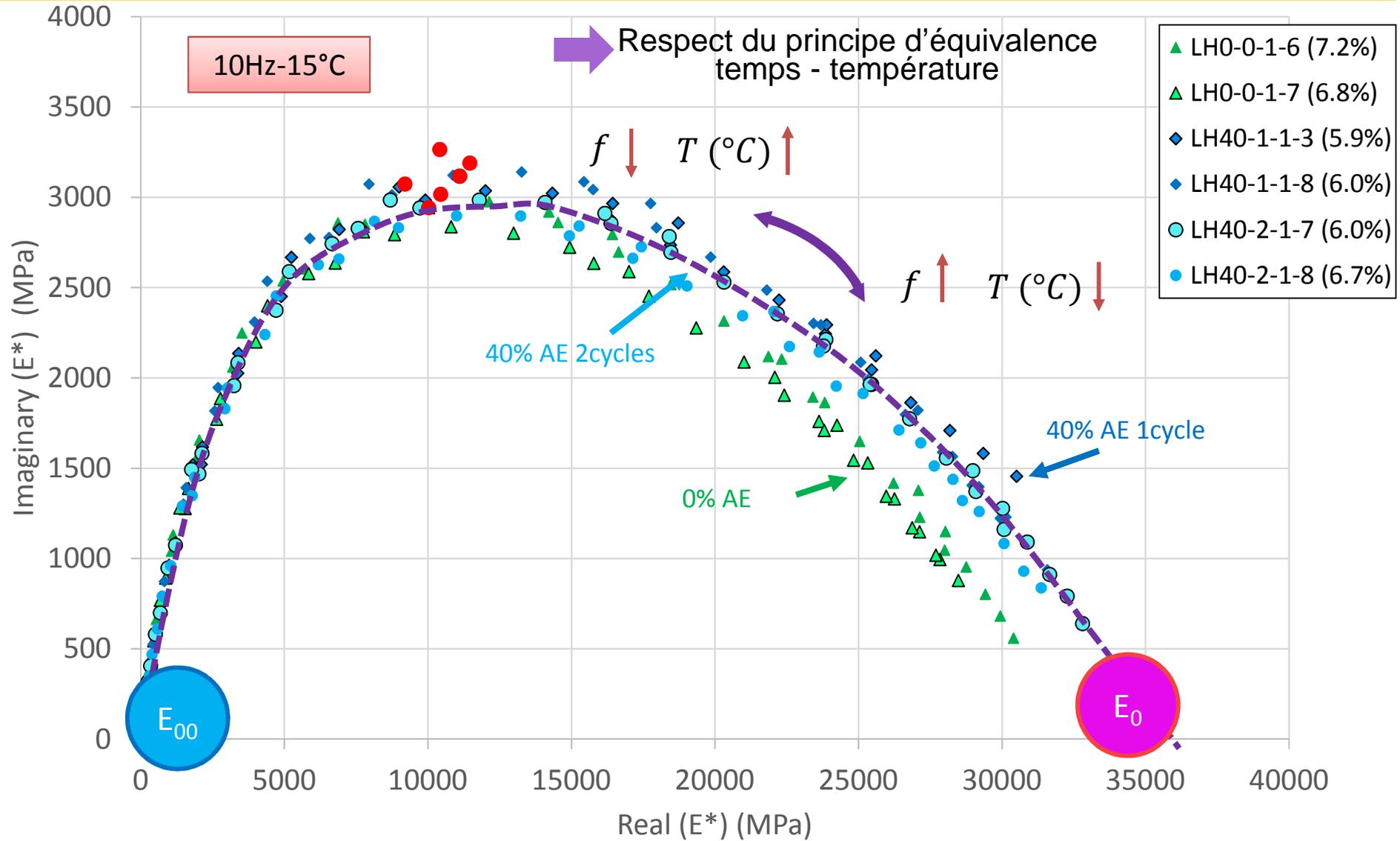
# E\* 15°C/10Hz



## E\* avec 5% de vides



# Cole-Cole E\*

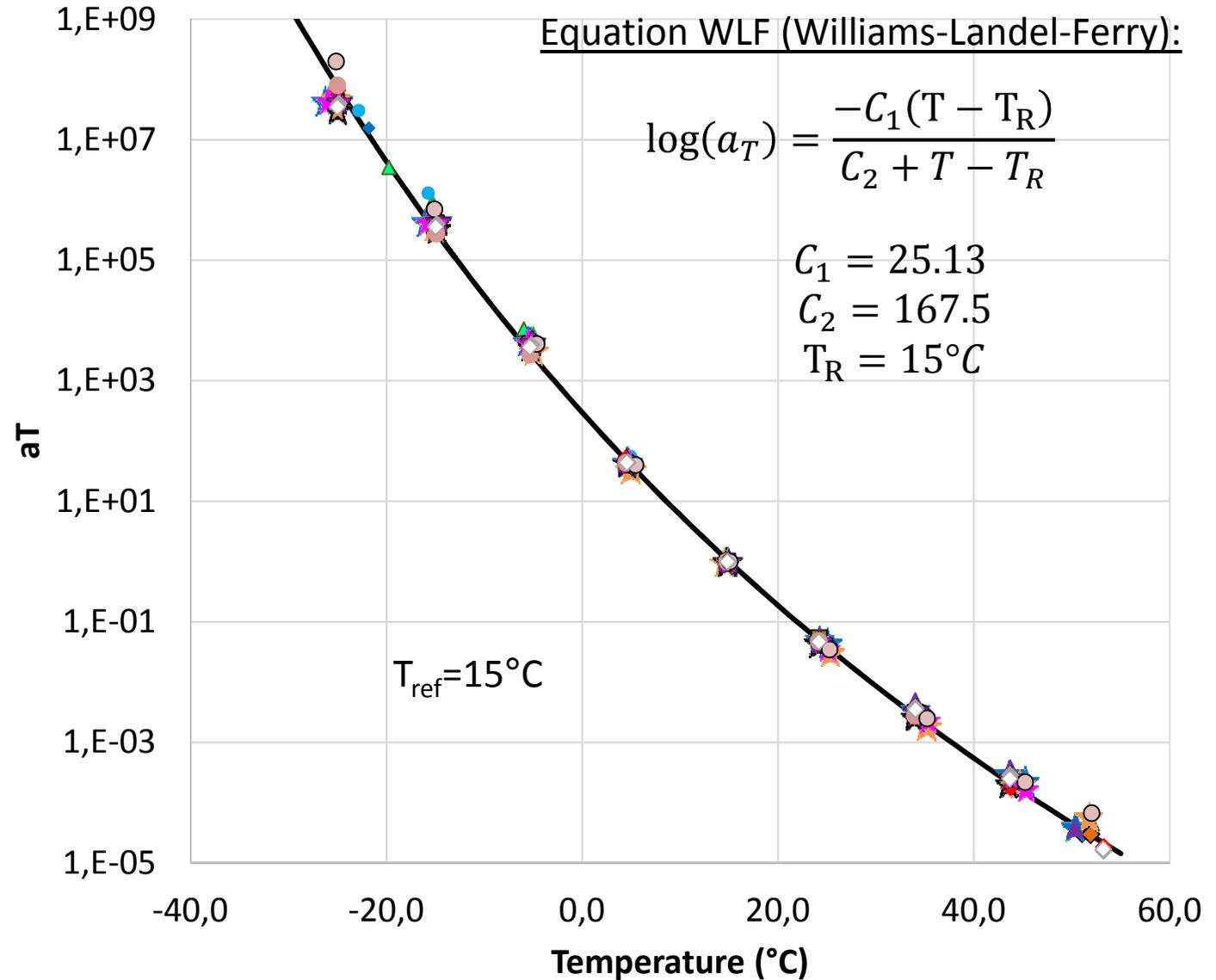


# aT @ 15°C

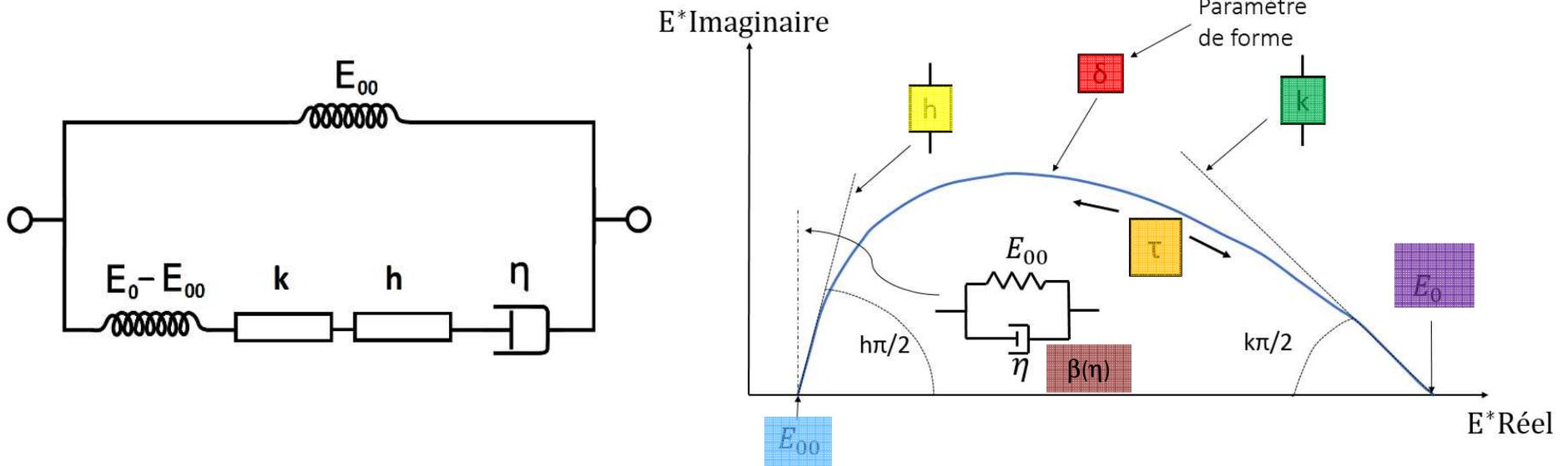
- Chaud**

  - 0% AE ▲
  - 40% AE
    - 1 Cycle ◆
    - 1 Cycle insitu ★
    - 2 Cycles ●
  - 70% AE
    - 1 Cycle ◆
    - 1 Cycle insitu ★
    - 3 Cycles ■
- Tiède mouse**

  - 0% AE ▲
  - 40% AE
    - 1 Cycle ◆
    - 1 Cycle insitu ★
    - 2 Cycles ●
  - 70% AE
    - 1 Cycle ◆



# Modèles analogique 2S2P1D (Olard and Di Benedetto 2003) et 2S2P1D en 3D (Di Benedetto et al. 2007)



$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta (i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}}$$

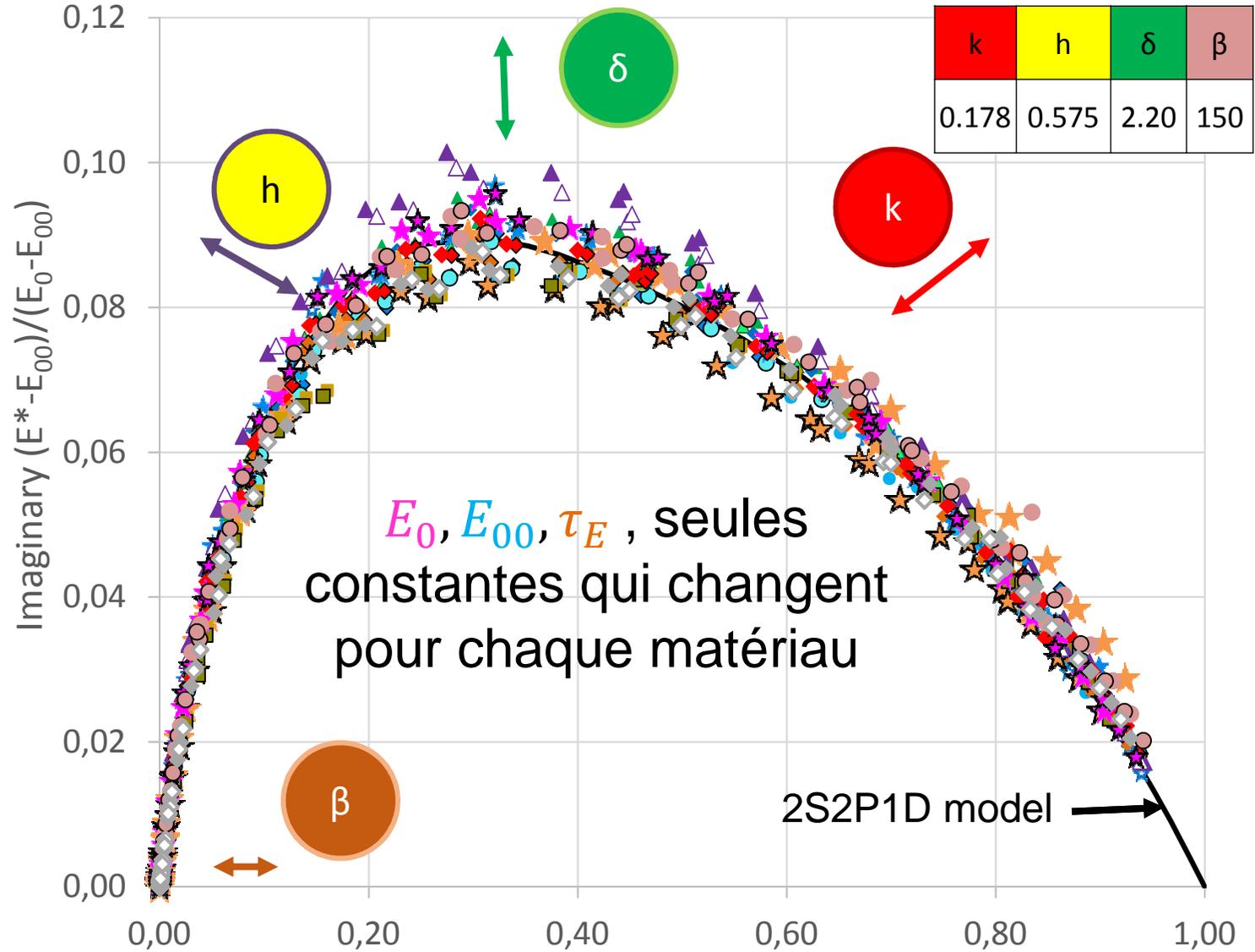
$$v^*\left(\omega \cdot \frac{\tau}{\tau_v}\right) = v_{00} + (v_0 - v_{00}) \frac{E^*(\omega) - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad \gamma = \frac{\tau}{\tau_v}$$

➤ Loi WLF : + 2 constantes  $C_1$  et  $C_2$

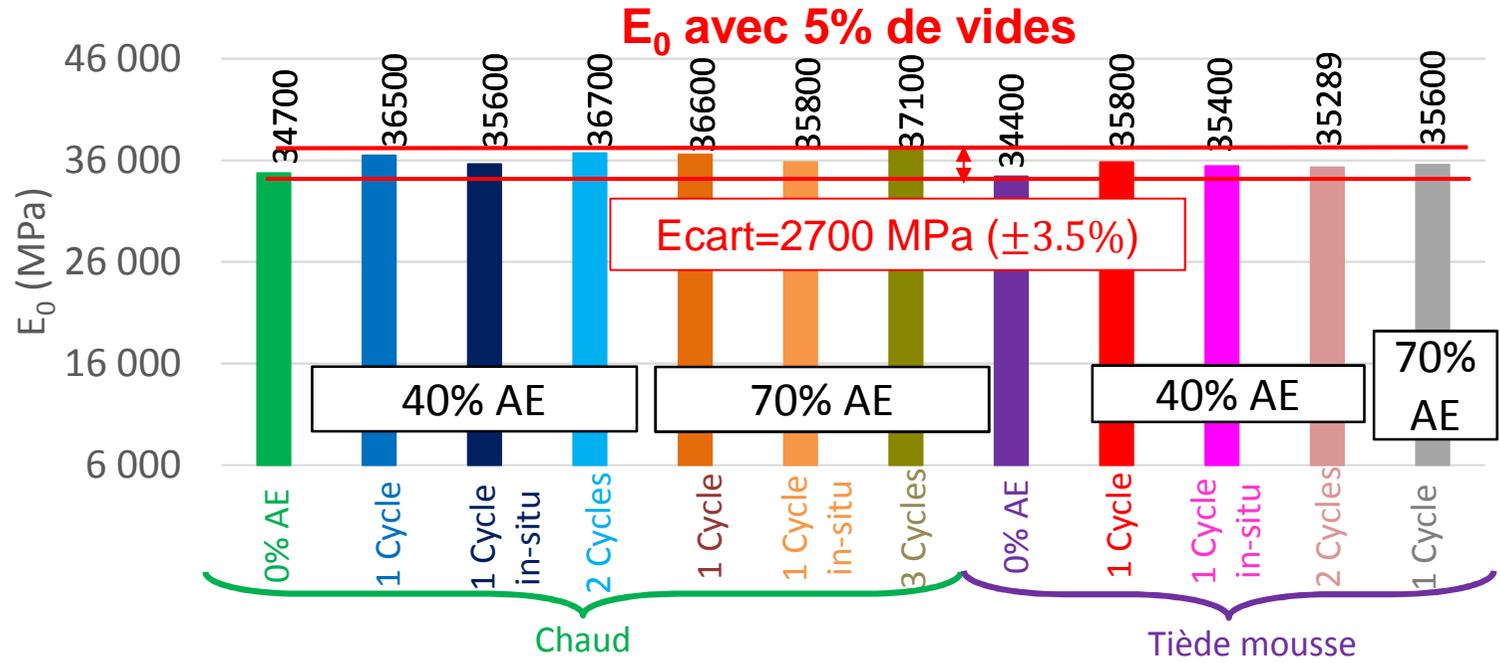
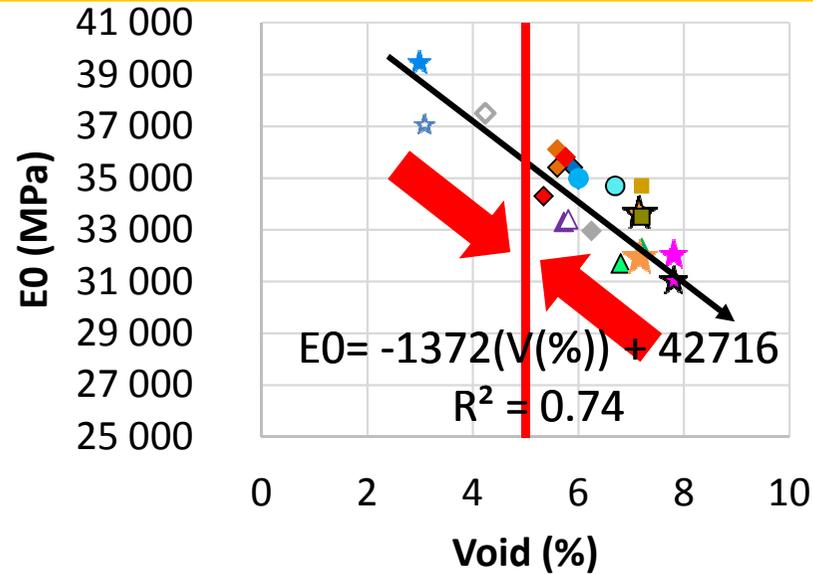
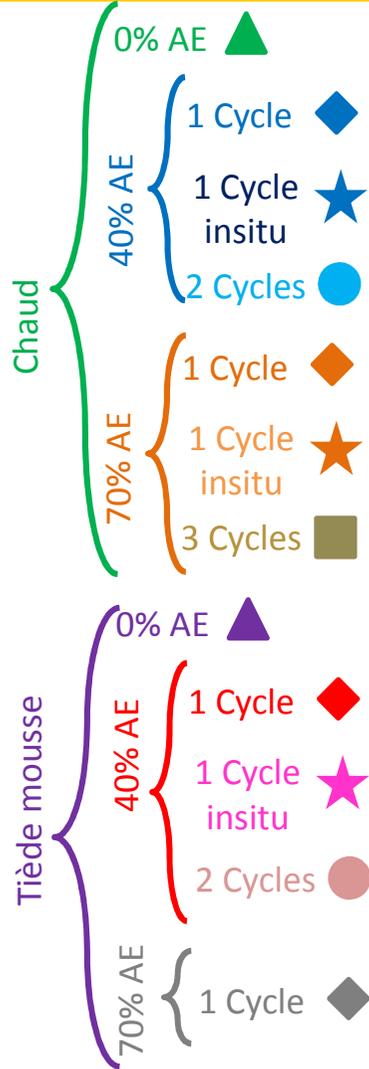
10+2 CONSTANTES

# Cole-Cole $E^*_{norm} = (E^* - E_{00}) / (E_0 - E_{00})$

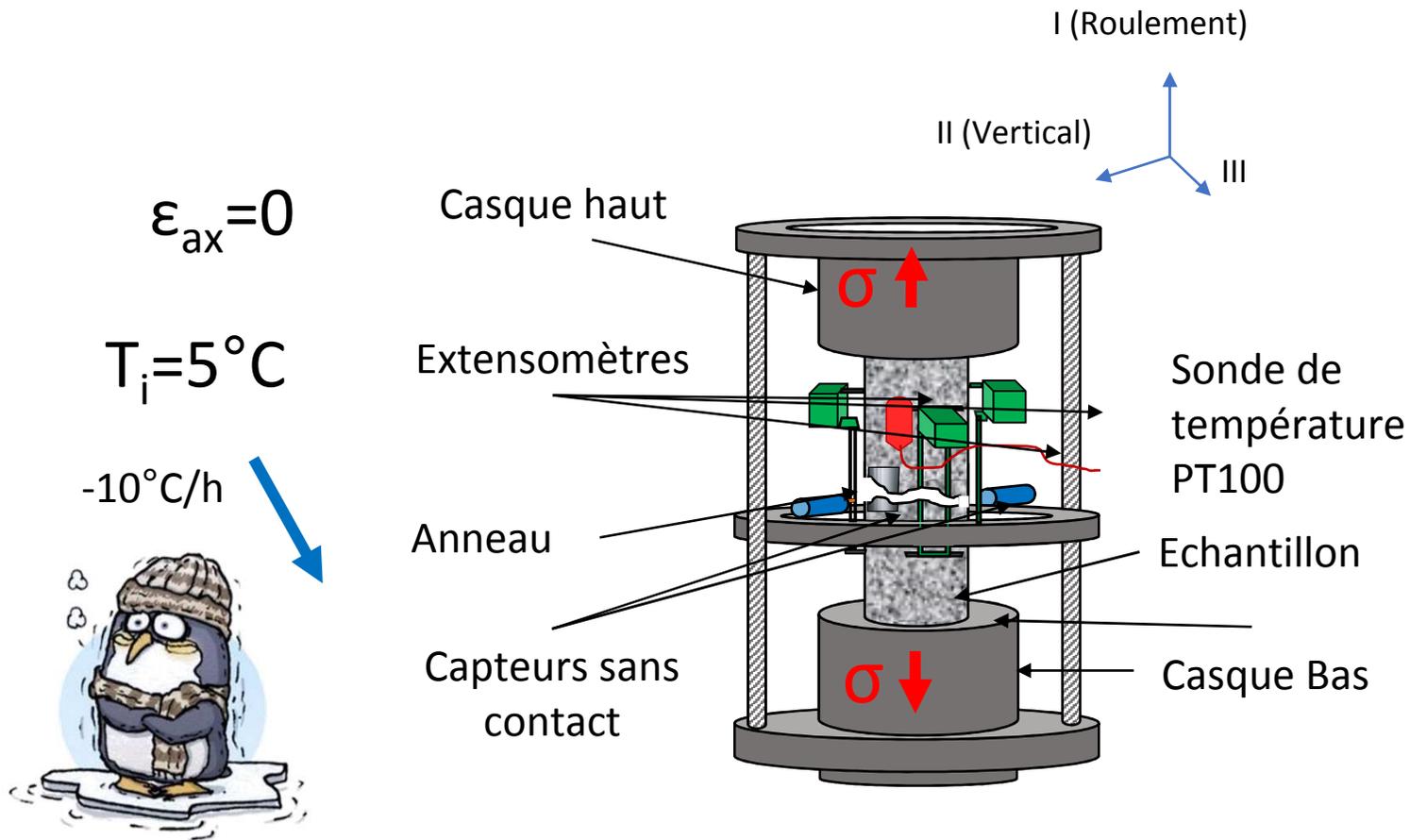
- Chaud**
  - 0% AE ▲
  - 40% AE
    - 1 Cycle ◆
    - 1 Cycle insitu ★
    - 2 Cycles ●
  - 70% AE
    - 1 Cycle ◆
    - 1 Cycle insitu ★
    - 3 Cycles ■
- Tiède mouise**
  - 0% AE ▲
  - 40% AE
    - 1 Cycle ◆
    - 1 Cycle insitu ★
    - 2 Cycles ●
  - 70% AE
    - 1 Cycle ◆



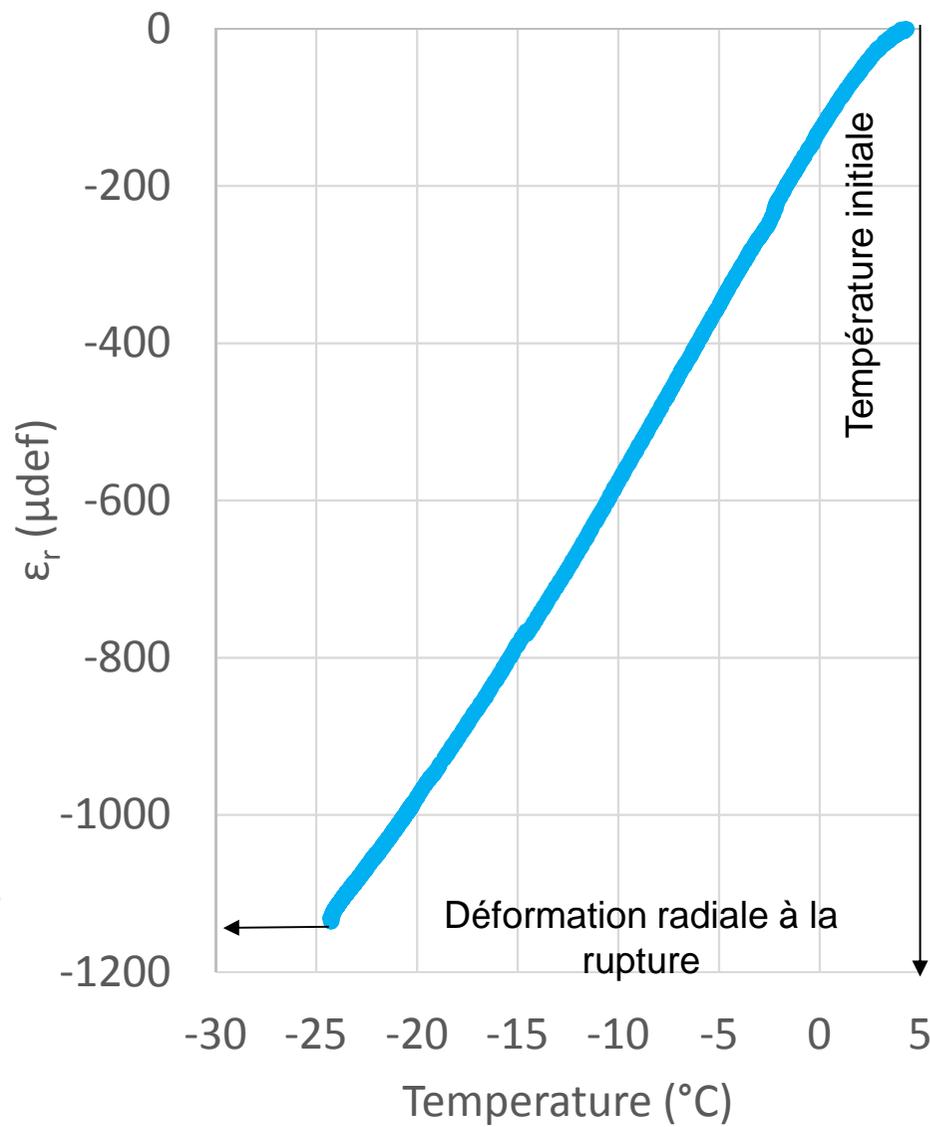
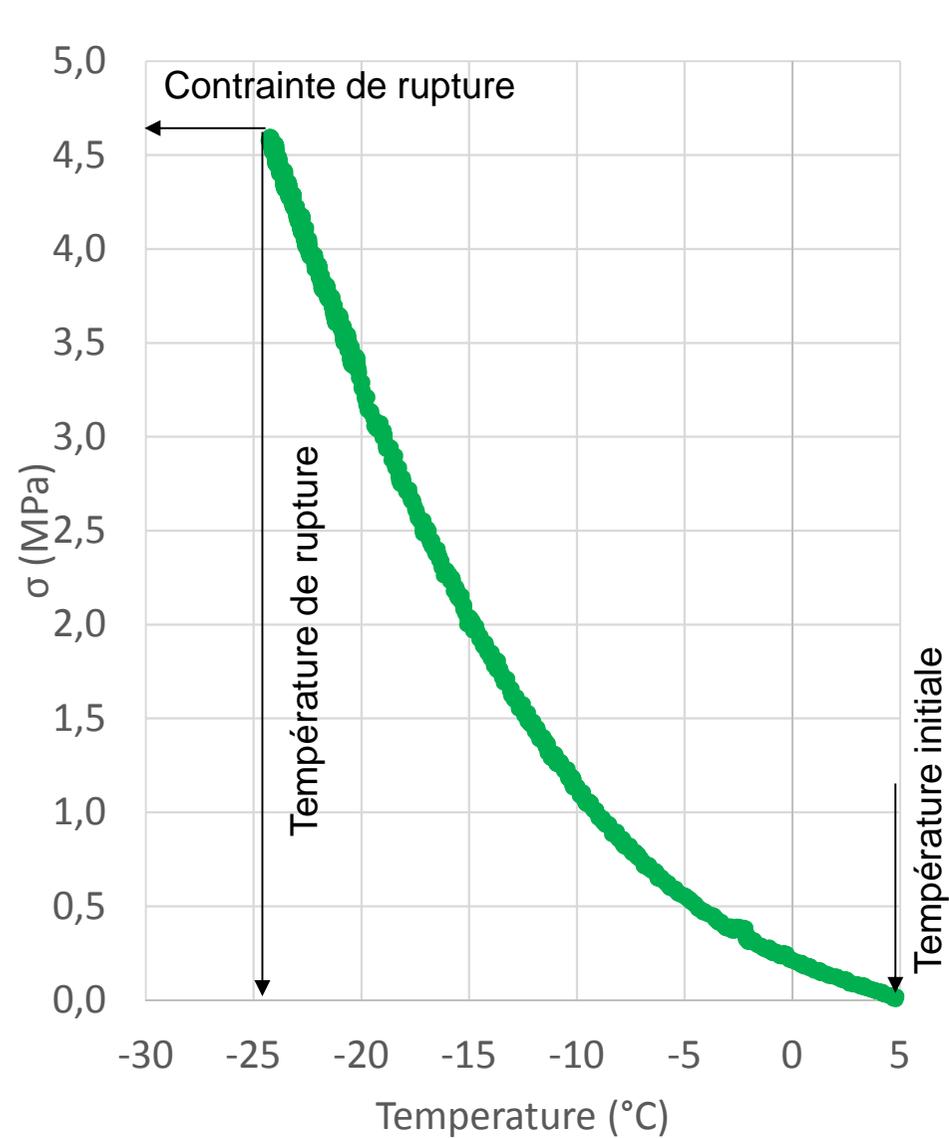
# Analyse E<sub>0</sub>



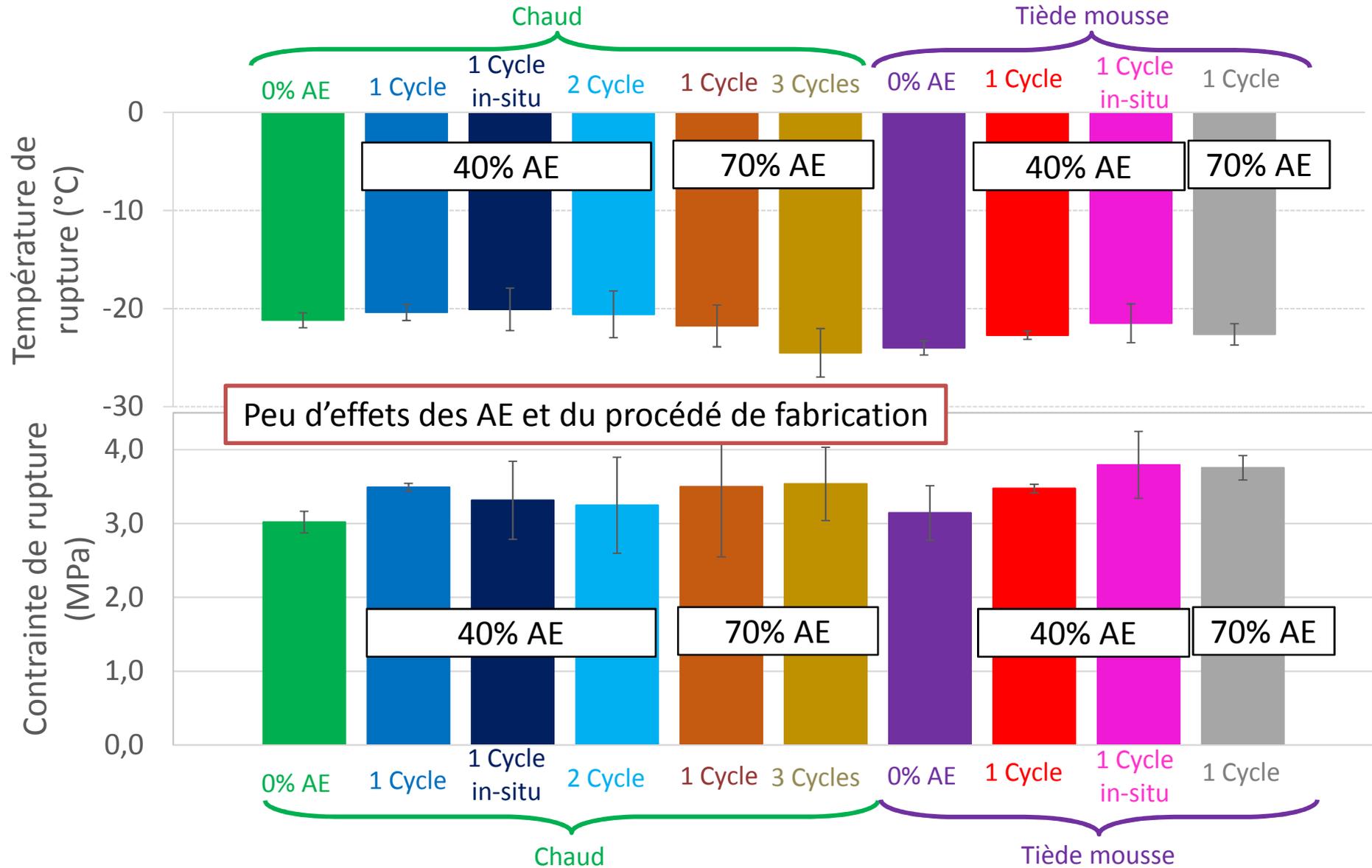
# Essai « TSRST » (Thermal Stress Restrained Specimen Test)



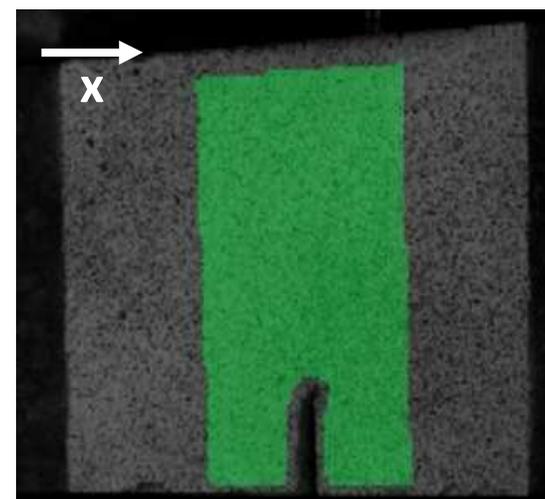
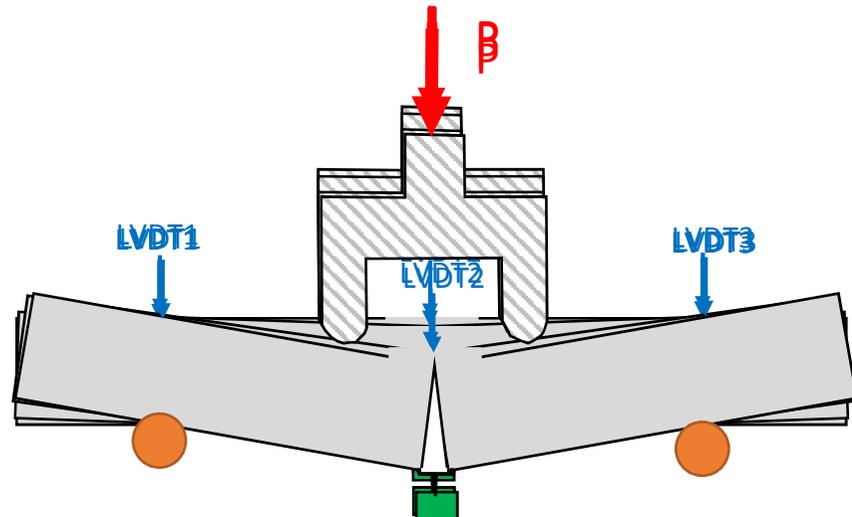
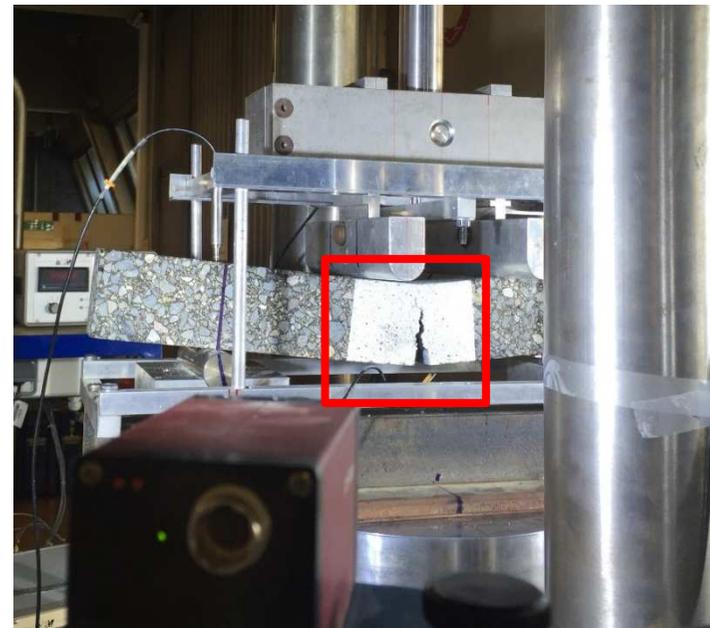
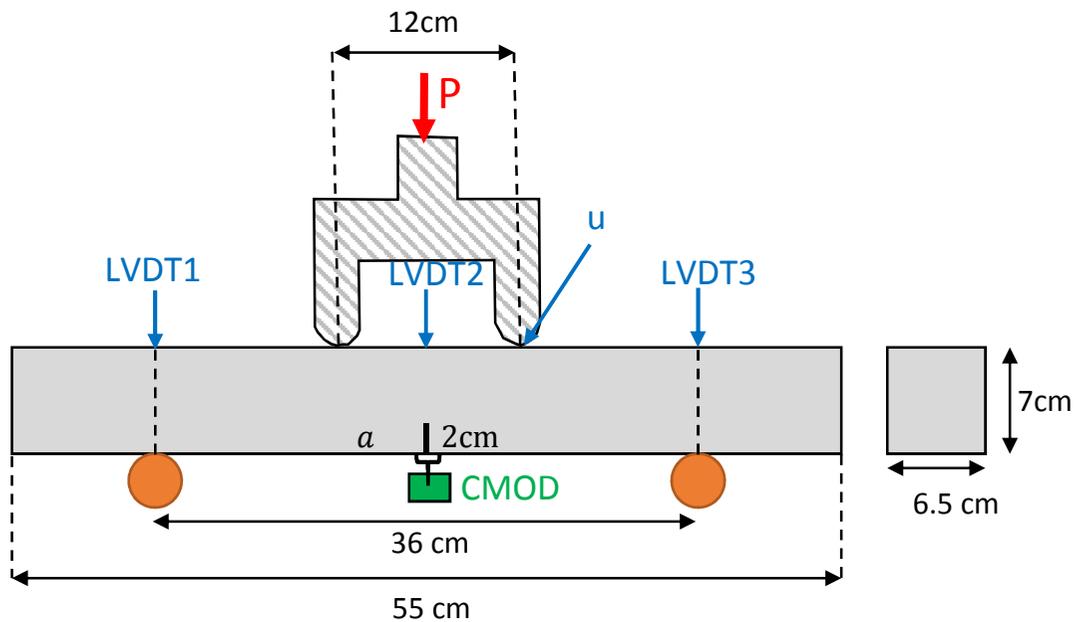
# Essai TSRST



# Analyse de Résultats



# Essai de propagation de fissure



Champ de déformation  $\epsilon_{xx}$

## Conclusions

### → Module Complexe (approche 3D)

- $E^*$  15°C/10Hz sensiblement affecté ( $\pm 7\%$ ) par %AE, nombre de cycles et type de fabrication, si même %vides
- Même courbe  $E^*$  et  $v^*$  normalisée: Les paramètres  $k$ ,  $h$ ,  $\delta$ ,  $\beta$  du modèle 2S2P1D sont identiques pour tous les matériaux étudiés. Seuls  $E_0$ ,  $E_{00}$ ,  $\tau_E$ ,  $v_0$ ,  $v_{00}$  et  $\tau_v$ , différent selon matériaux et nombre de recyclage
  - même  $aT$  pour tous les matériaux
  - $E_0$  peu ( $\pm 3.5\%$ ) affecté par %AE et nombre de cycle et le type de fabrication, si même %vides

## Conclusions

### → TSRST

- La température et la contrainte de rupture des matériaux testés sont peu influencées par %AE, nombre de cycle, type de fabrication

### → Propagation de fissure

- Essais en cours

**A suivre...**

**Merci de votre attention**

**ALVARO FABIÁN PEDRAZA PEÑA**  
**École Nationale des Travaux Publics de l'État**  
**alvaro.pedraza@entpe.fr**