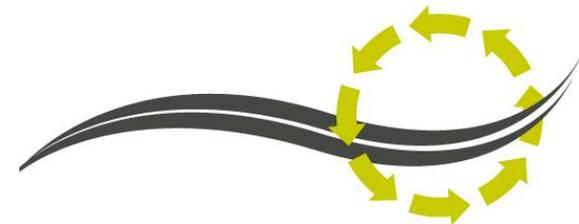


Propriétés Thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés

A. PEDRAZA, H. DI BENEDETTO, C. SAUZÉAT

Université de Lyon / ENTPE

*Journée d'information: Recyclage à fort
taux du laboratoire au chantier*





1. Campagne expérimentale
2. Essai de module complexe
3. Essai de retrait thermique empêché
4. Essai de propagation de fissure
5. Conclusion

Campagne expérimentale



Objectif

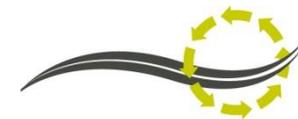
Caractérisation thermomécanique d'enrobés produits avec les paramètres variables suivants:

- Teneur en AE:
 - 0%, 40%, 70% et 100%
- Procédé de fabrication:
 - Chaud et tiède mousse
- Fabrication:
 - Laboratoire ou in-situ (Chantiers)

Caractéristiques de tous enrobés étudiés

- Même granulométrie (sauf 100% AE)
- Même TL=5.4%
- Mêmes granulats d'apport [BBSG 3 0/10]

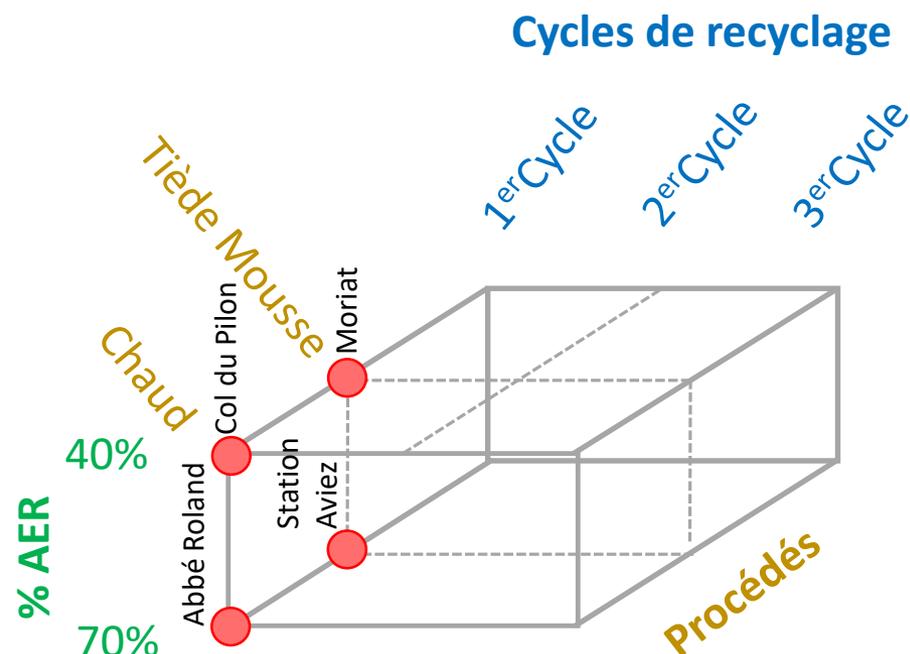
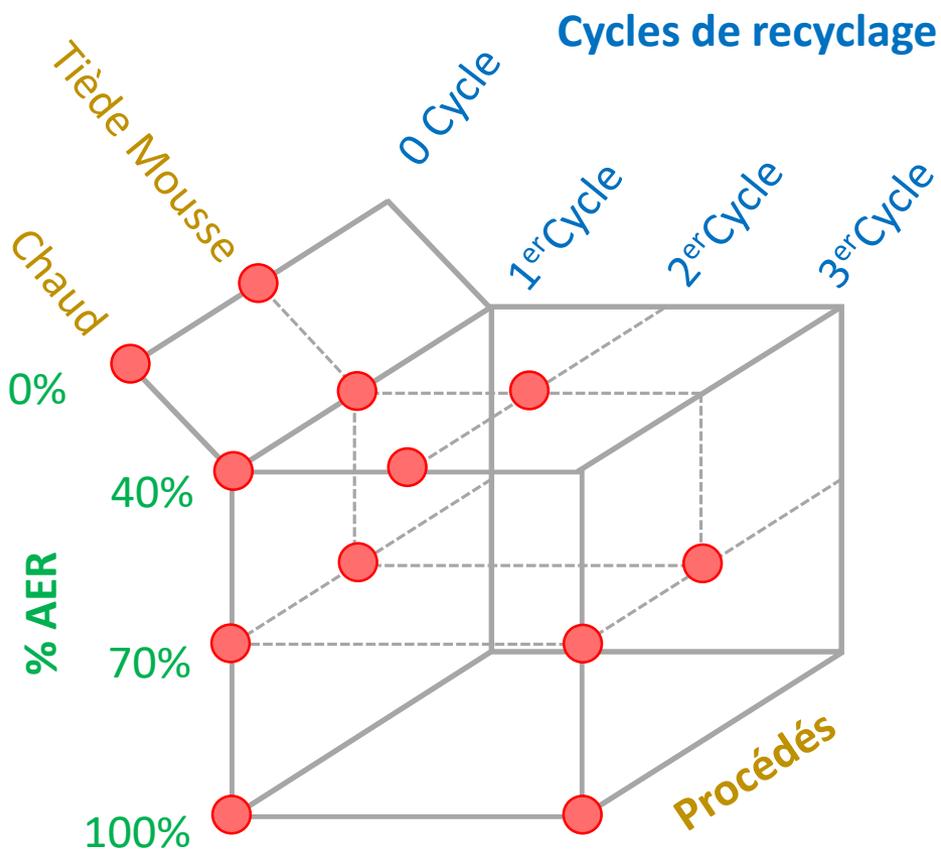
Campagne expérimentale



Matériaux testés

Fabrication en laboratoire

Prélèvement sur chantier



Campagne expérimentale



Essais réalisés



Essai de module complexe
Viscoélasticité linéaire (VEL)



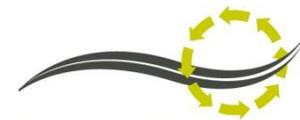
Essai de retrait thermique
empêché (TSRST)
Couplage thermomécanique
(basse température)



Essai de propagation de
fissure

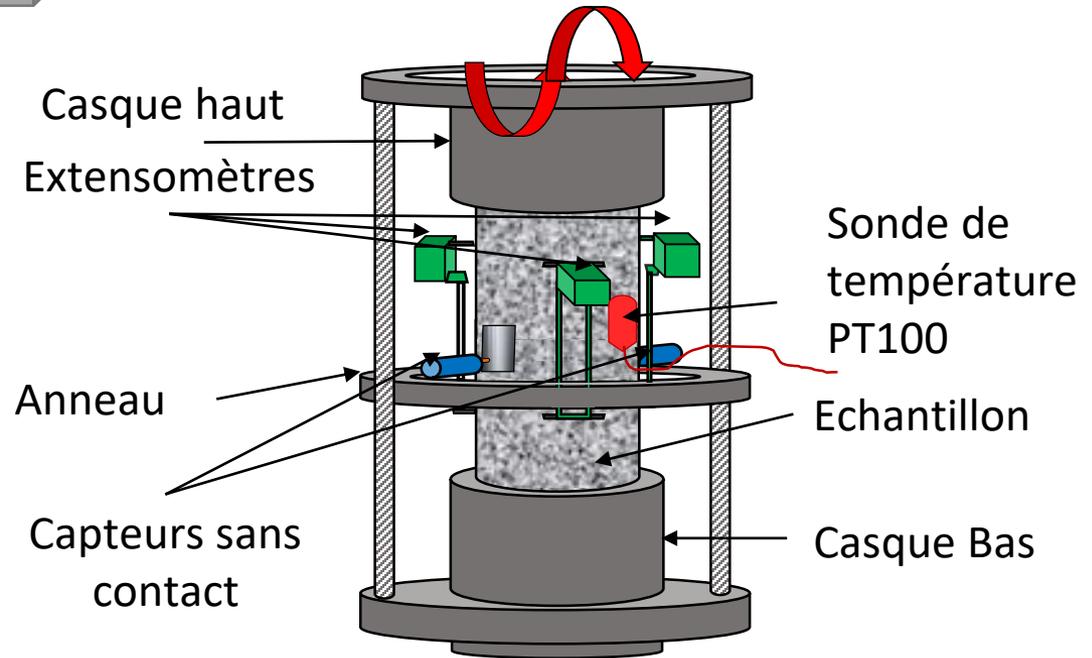
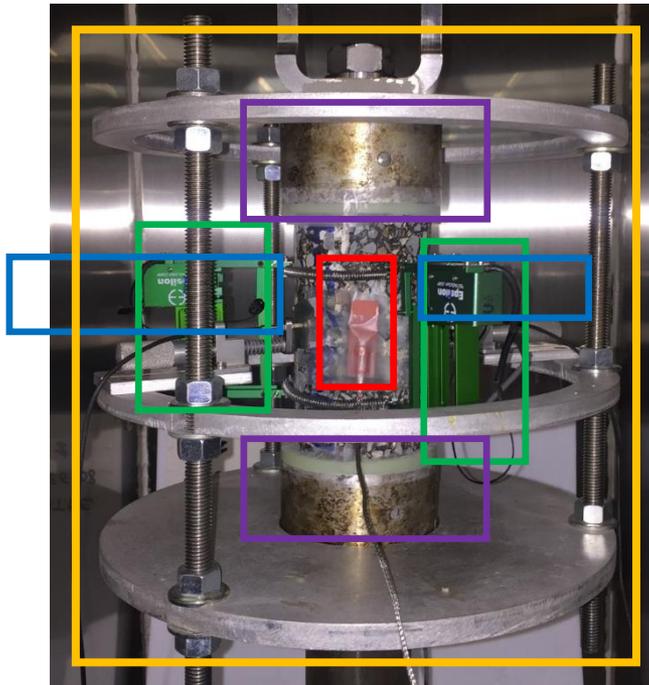
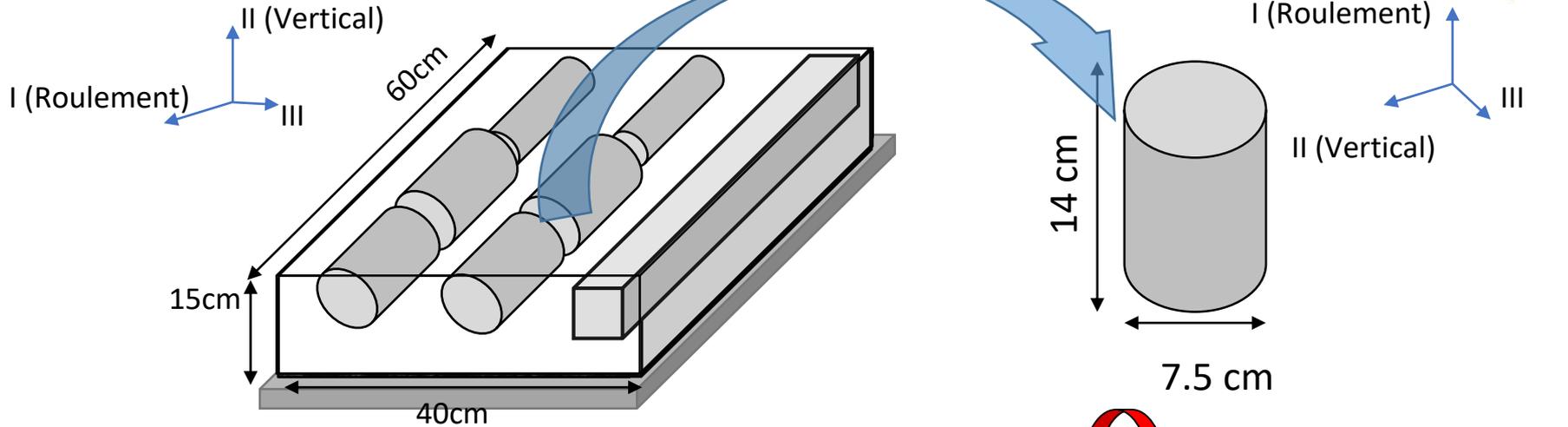
Fissuration à froid, remontée de fissure





2. Essais de module complexe

Dispositif expérimental



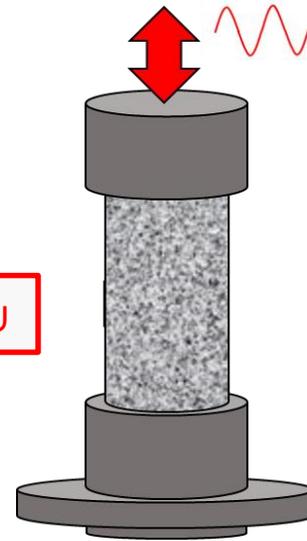
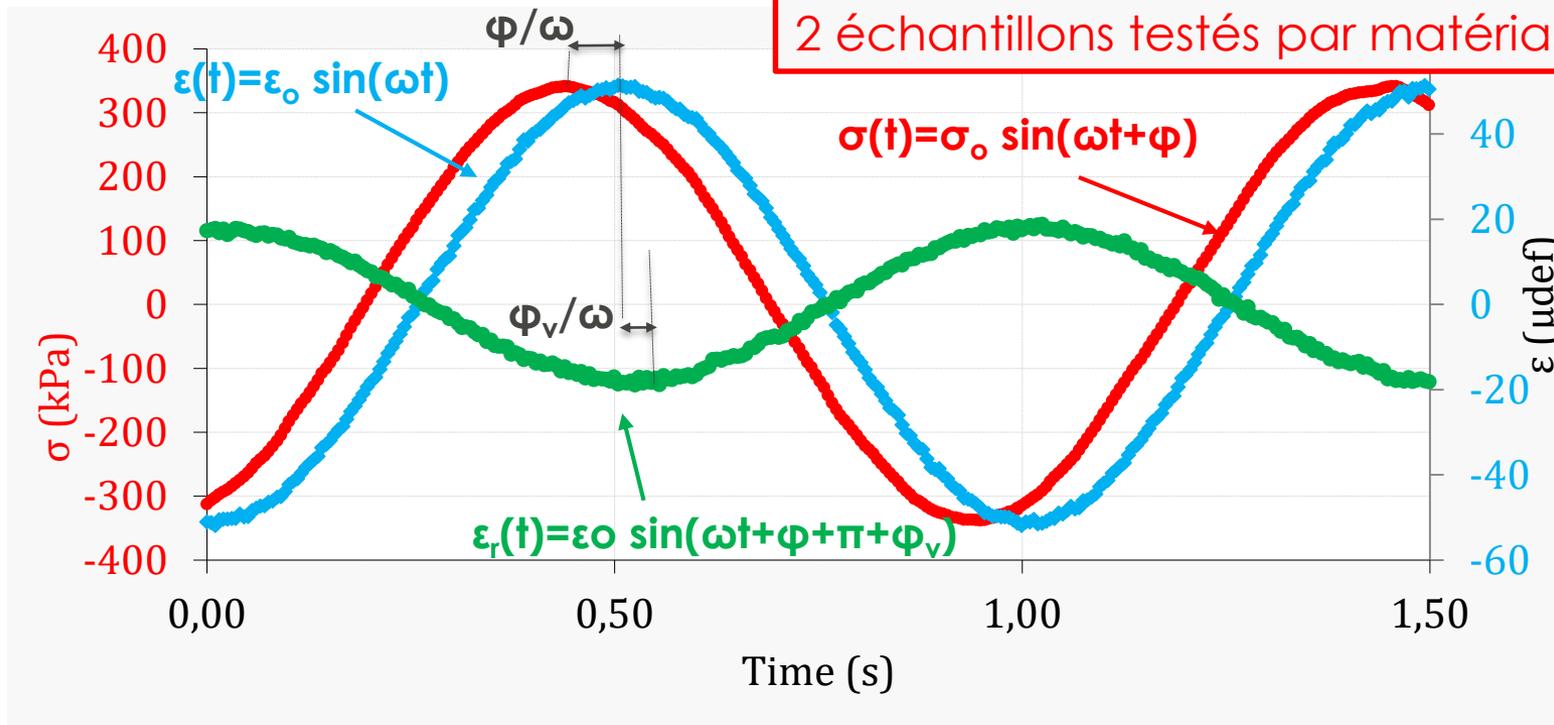
Principe et procédure



Sollicitation sinusoïdale: ε_o : 50 $\mu\text{m}/\text{m}$

Fréquences: 0.003Hz to 10Hz

Températures: -25 °C à 52°C



- Module complexe

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

- Coefficient de Poisson complexe

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



- Analyse « classique » de E^* @ 15°C/10Hz
- Analyse et modélisation avancées de E^* à l'aide du modèle 2S2P1D

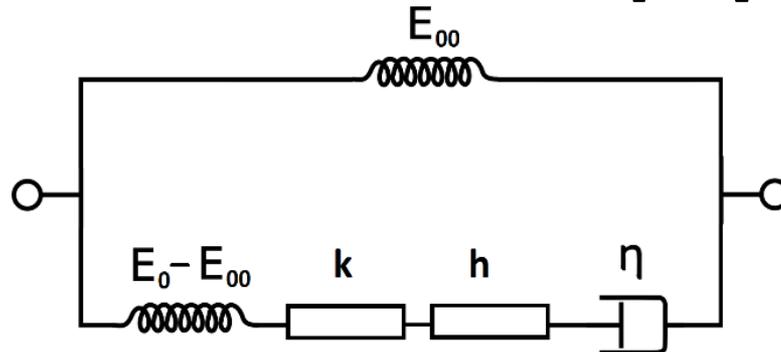
$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta (i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}}$$

7 Constants



2 Constants

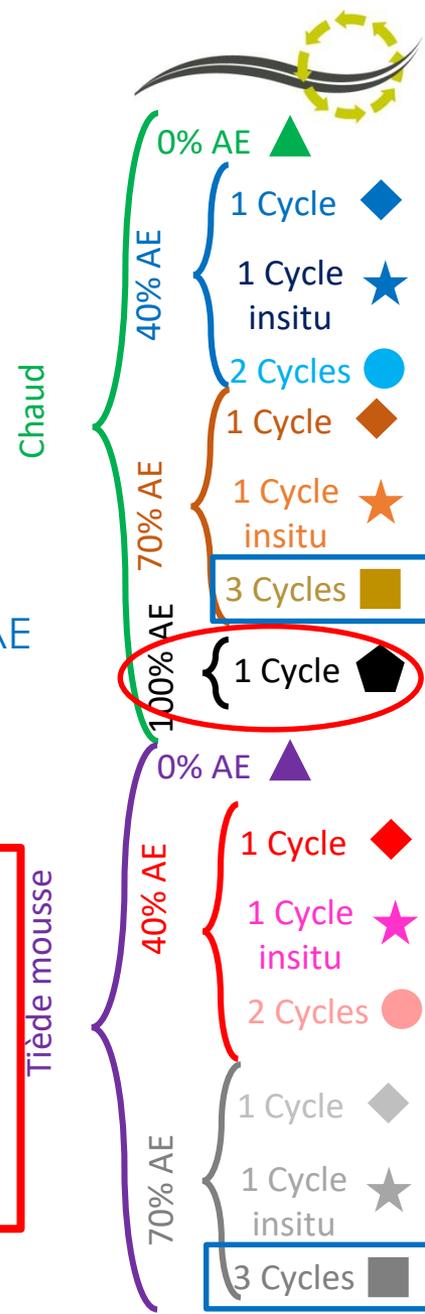
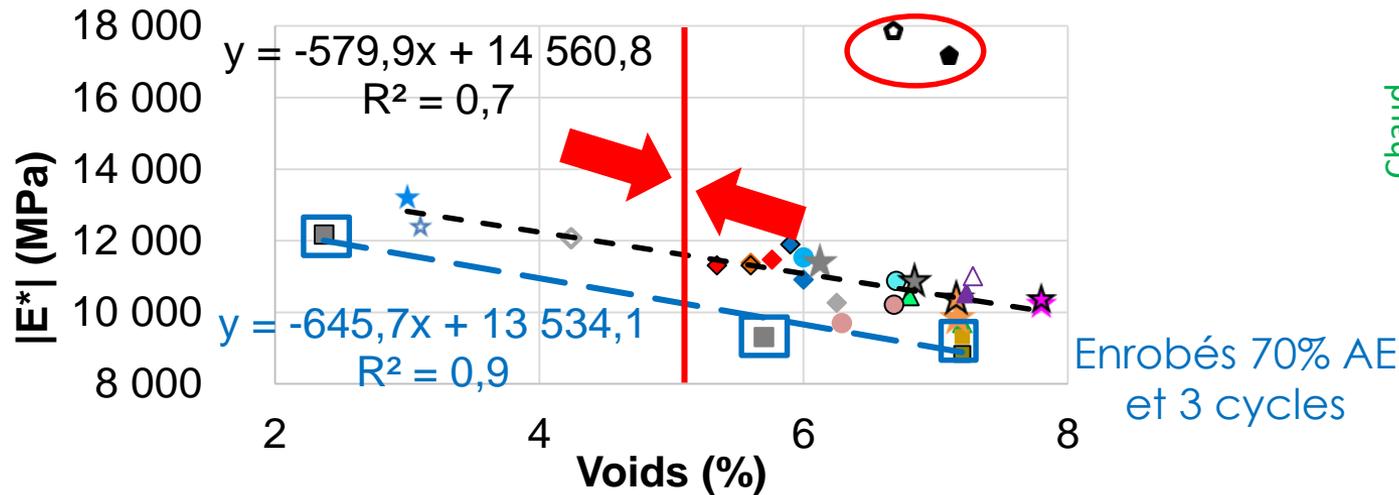
- Loi WLF : + 2 constantes C_1 et C_2



9 Constants

Résultats E* @ 15°C/10Hz

Effet de la teneur en vides

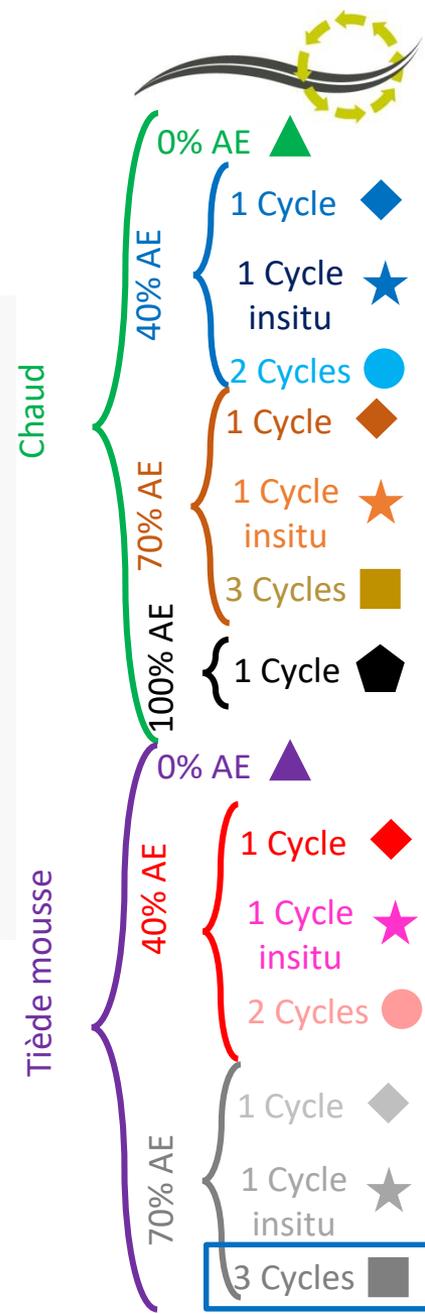
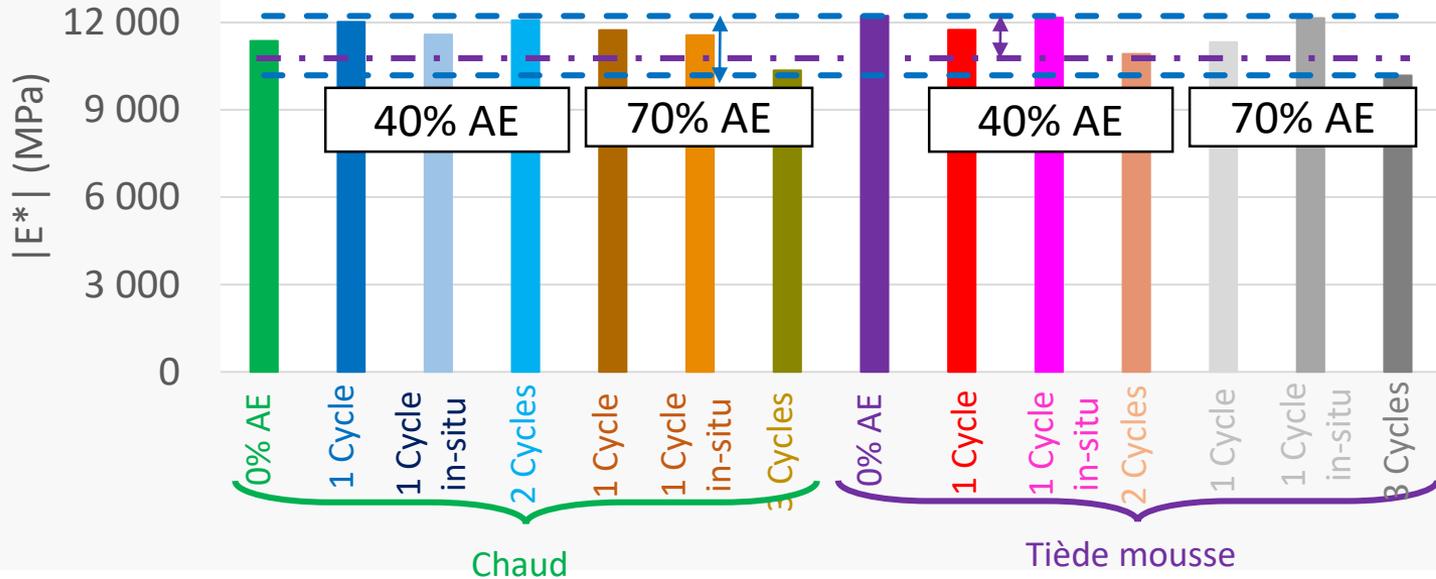


- Pour enrobé avec 100% AE:
 $|E^*|$ @15°C/10Hz enrobé très élevé → non corrigé
- Pour enrobés avec 70%AE et 3^{ème} cycle de recyclage:
 $|E^*|$ @15°C/10Hz plus faibles → correction différente
- Effet important de la teneur en vides → correction à 5% vides

Résultats E* @ 15°C/10Hz

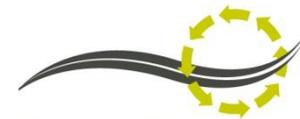
Résultats corrigés à 5% de vides

(valeur moyenne 2 échantillons)

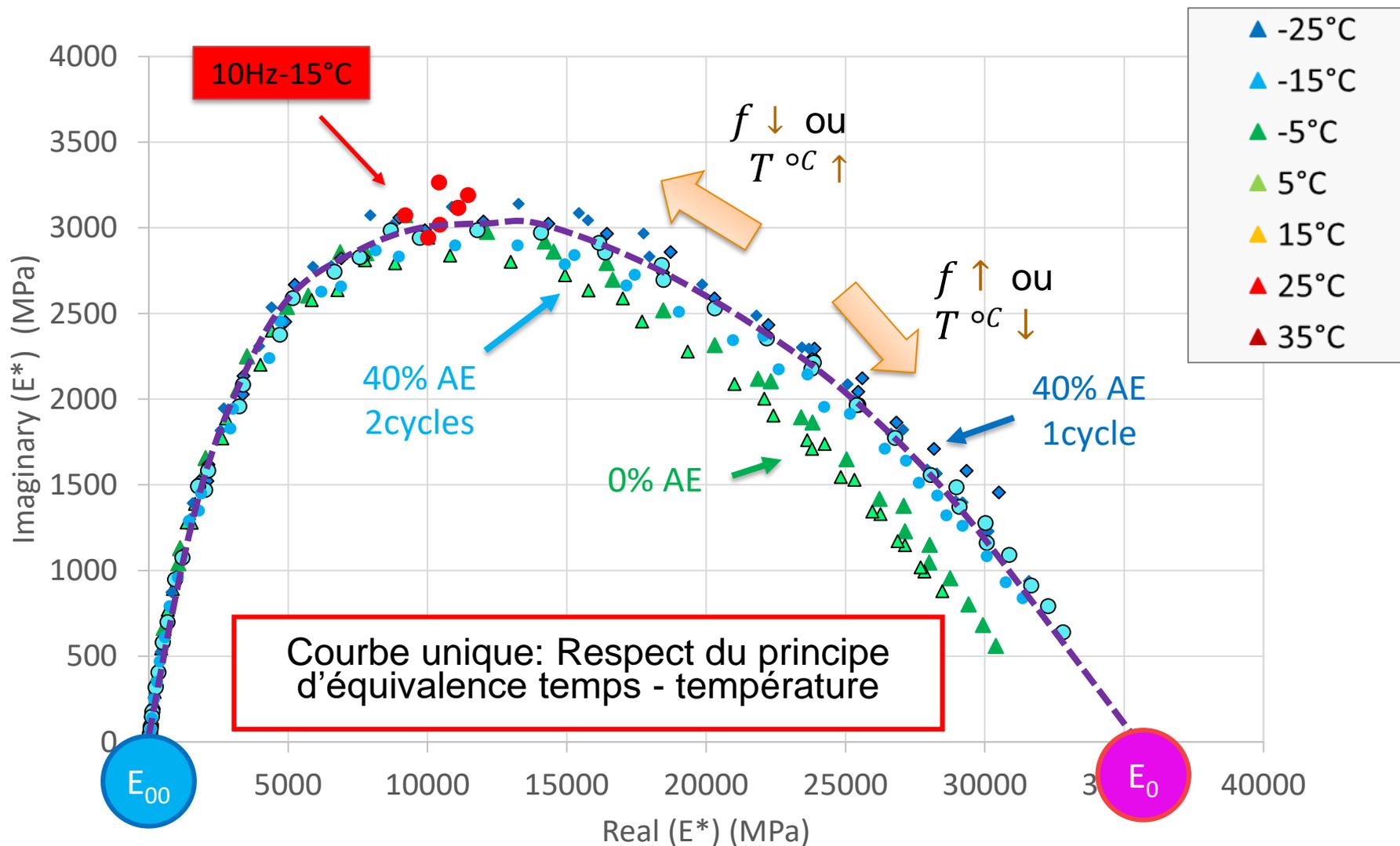


- $|E^*|$ @ 15°C/10Hz assez proches ($\pm 8\%$ et $\pm 5\%$ sans enrobés de 3^{ème} cycle)
- Pas de tendance claire pour les effets:
 - du %AE
 - des cycles de recyclage (1 et 2)
 - des fabrications à chaud ou tièdes
 - des fabrications chantier/laboratoire

Analyse avancée E*



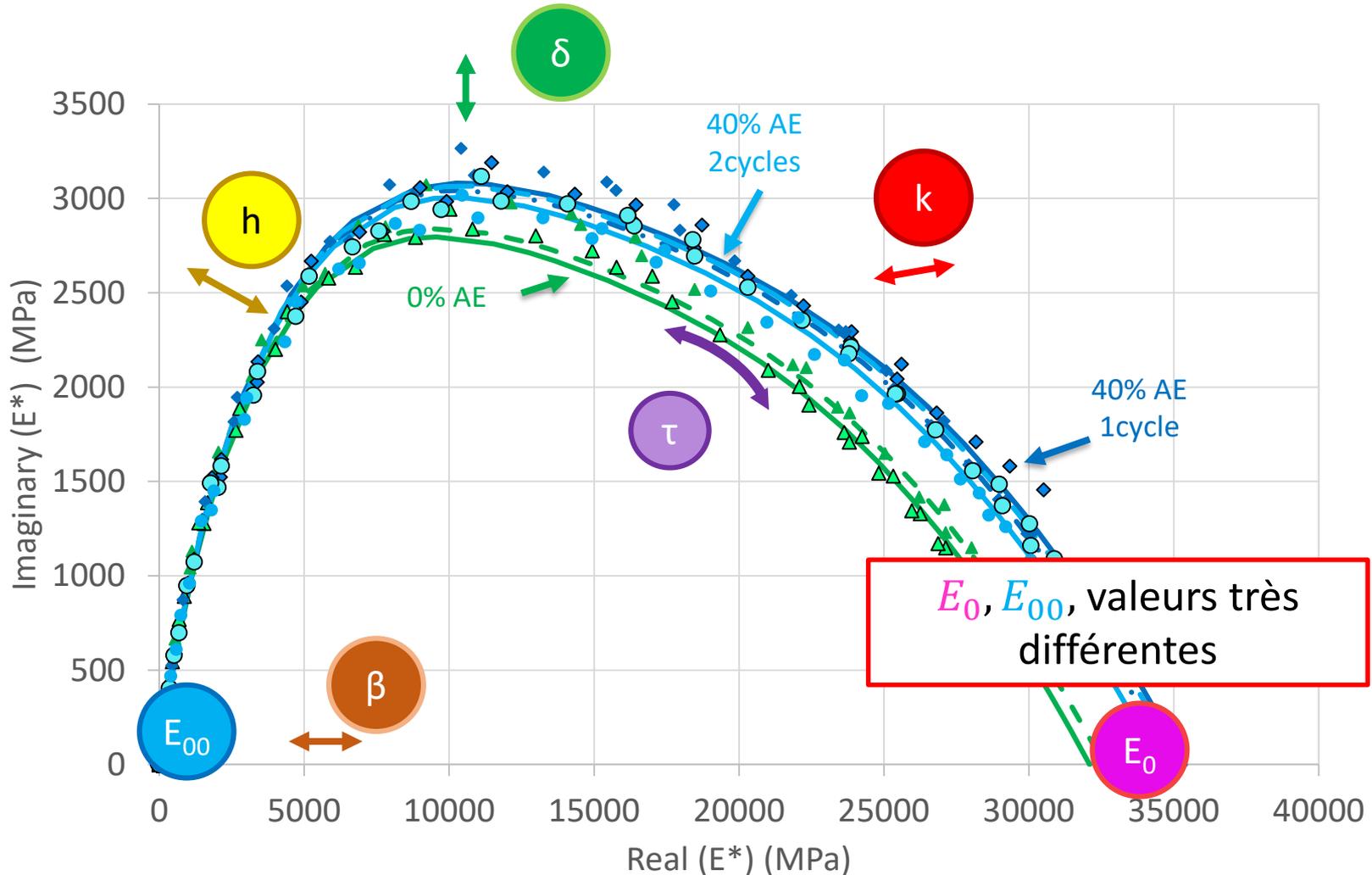
Cole-Cole: évolution de E* sur plage T et f



Analyse avancée E^*



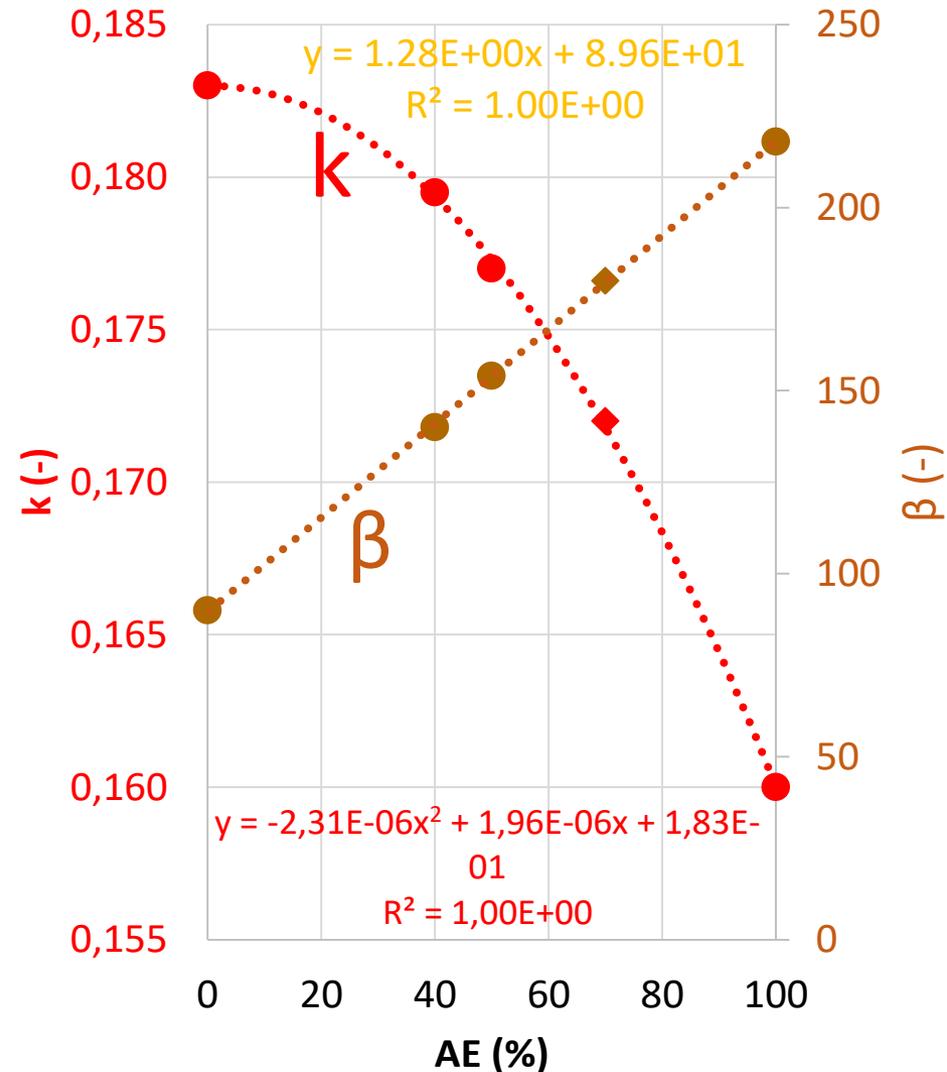
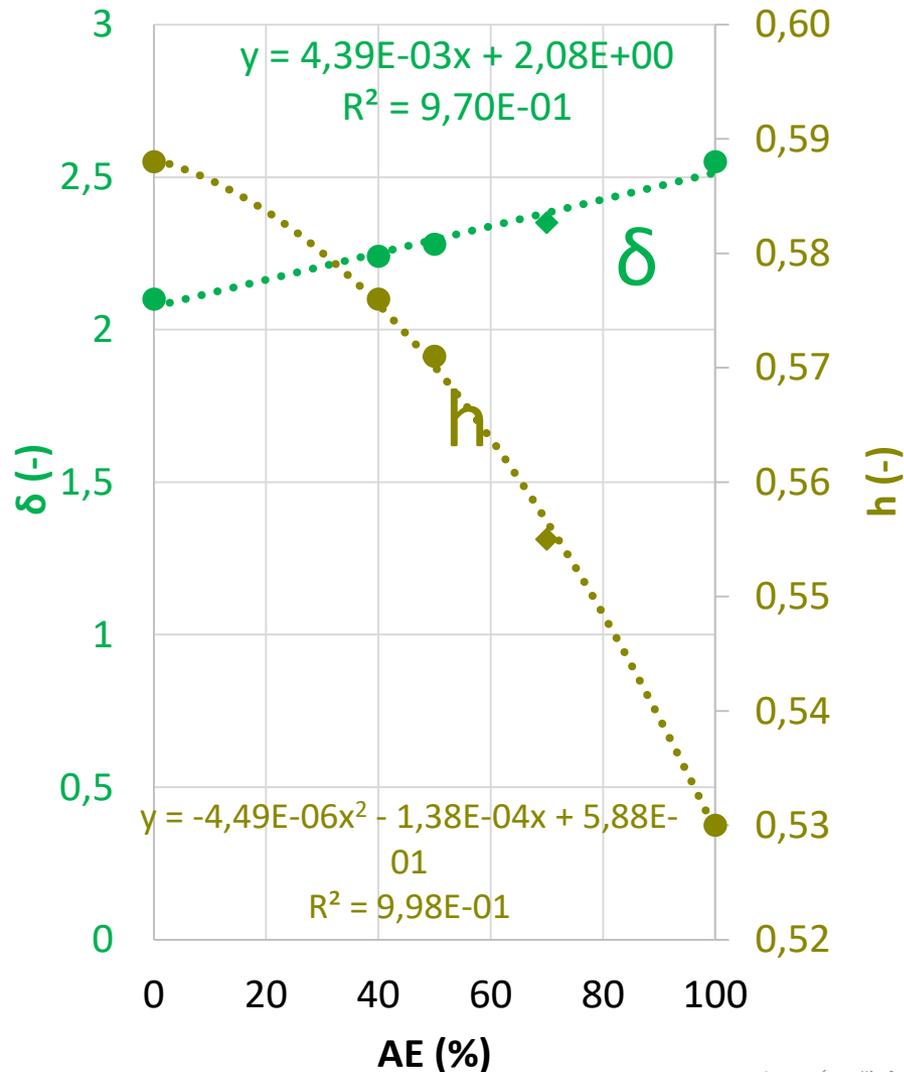
Modélisation 2S2P1D



Analyse avancée E*

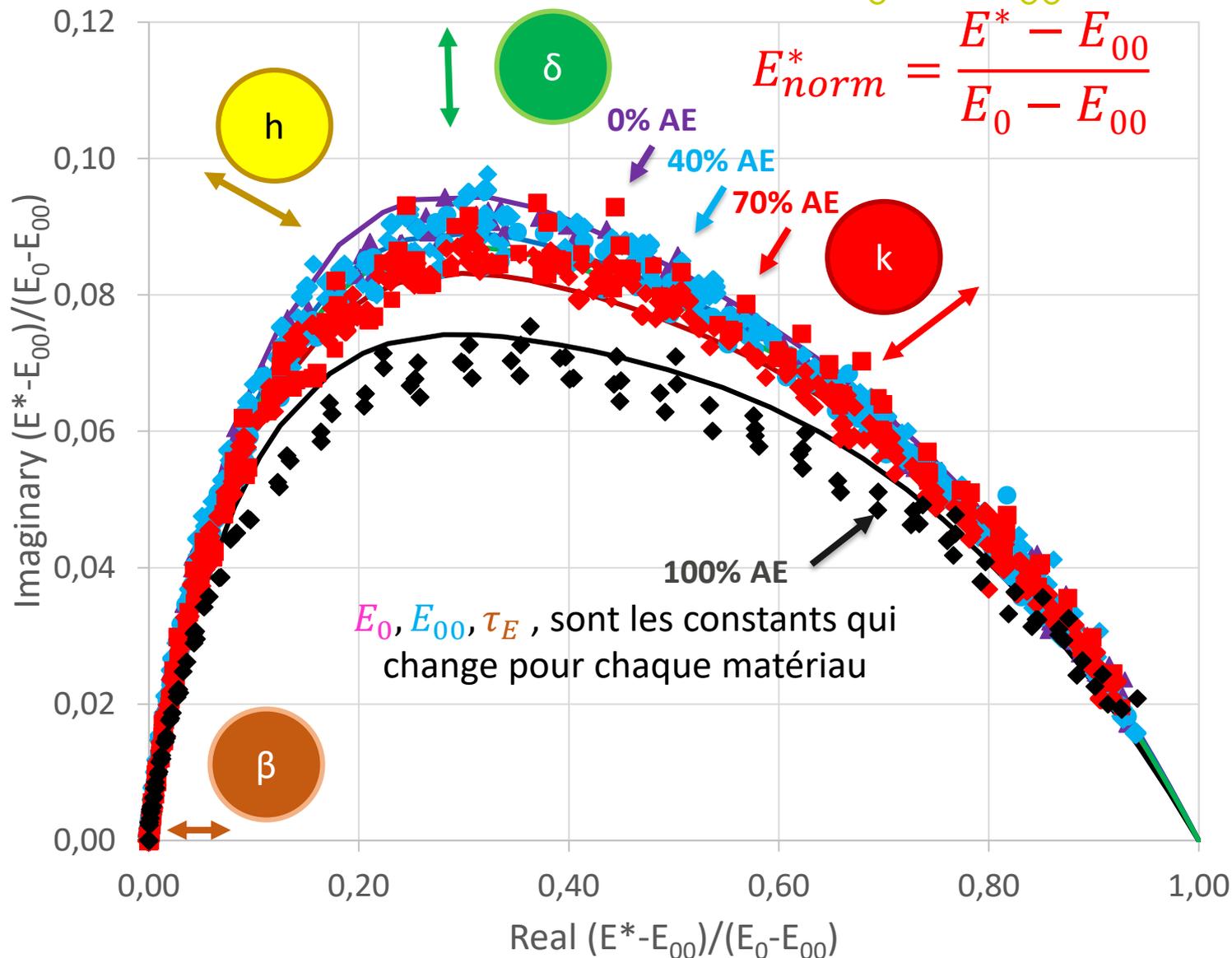
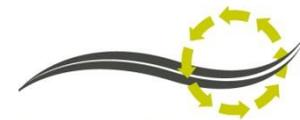


Evolution de 4 constantes 2S2P1D: δ , h , k et β



Cole-Cole E^* norm

Module E^* normalisé: effet E_0 et E_{00} annulé

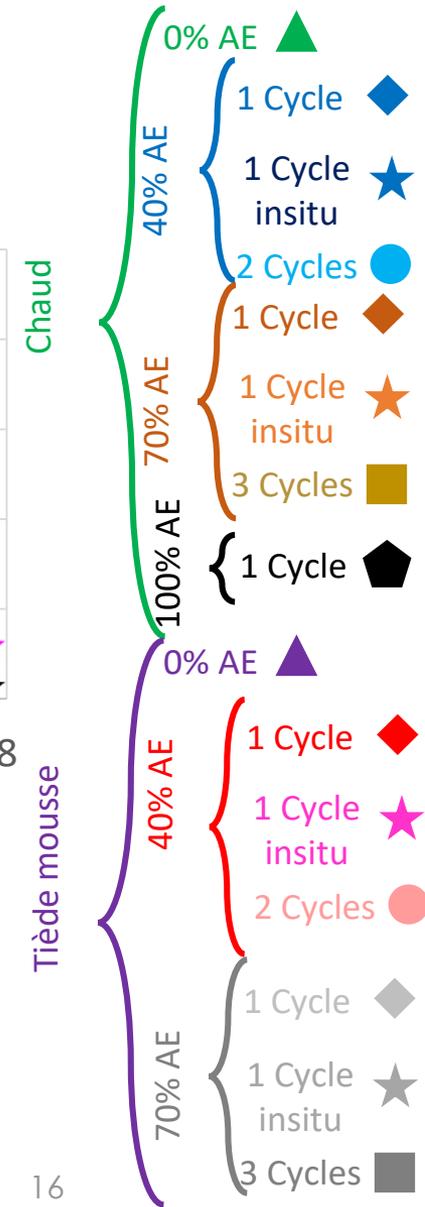
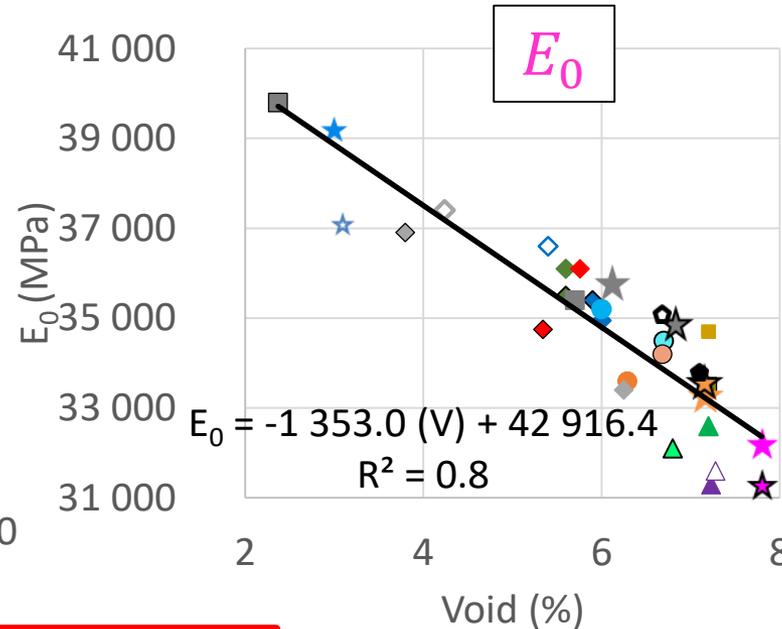
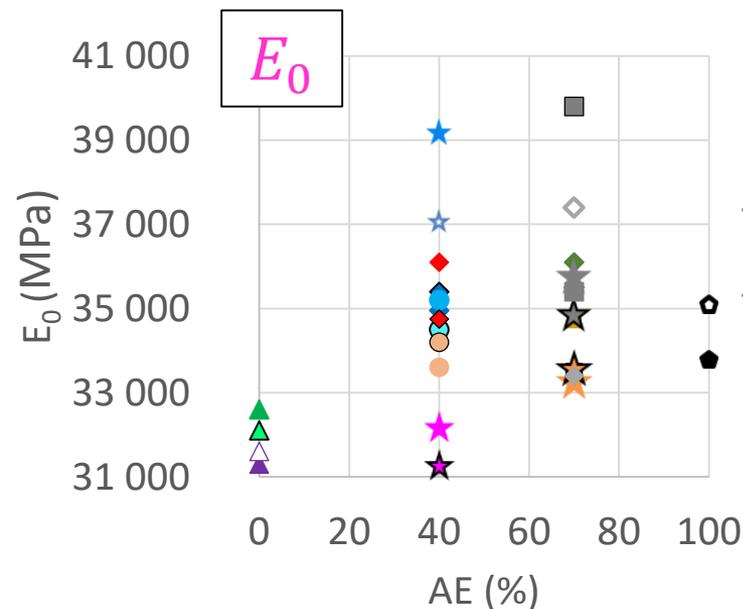


- 0% AE ▲
- 40% AE
 - 1 Cycle ◆
 - 1 Cycle insitu ★
 - 2 Cycles ●
- 70% AE
 - 1 Cycle ◆
 - 1 Cycle insitu ★
 - 3 Cycles ■
- 100% AE
 - 1 Cycle ◆

Analyse avancée E*

Paramètres E_0 et E_{00}

(Paramètres dépendant du squelette granulaire)



E_0 :

- clairement dépendant du % Vides
- indépendant du %AE,
- indépendant de la fabrication à chaud/tiède,
- indépendant de la fabrication labo /chantier

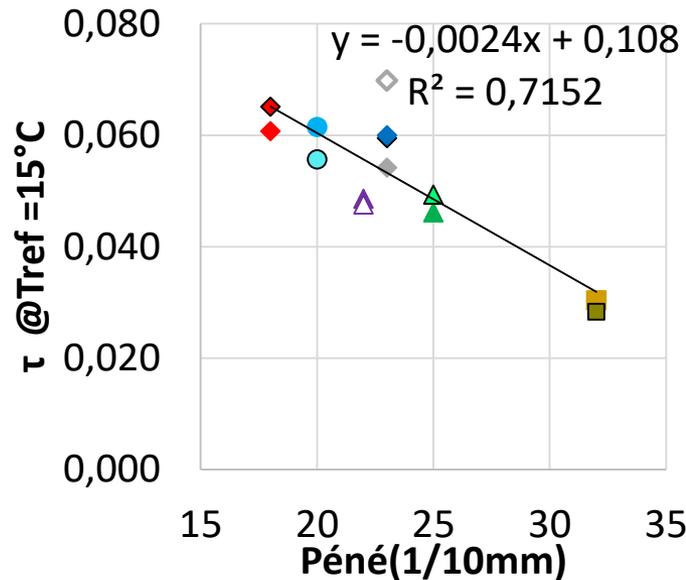
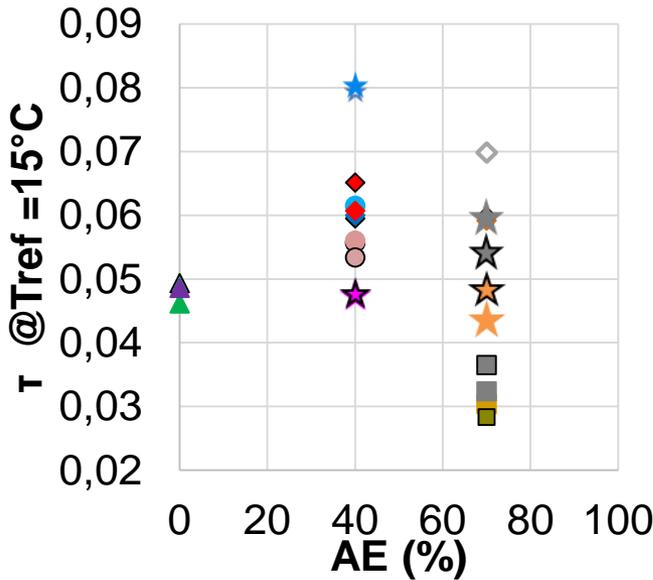
E_{00}
Aucune corrélation claire

Analyse avancée E*

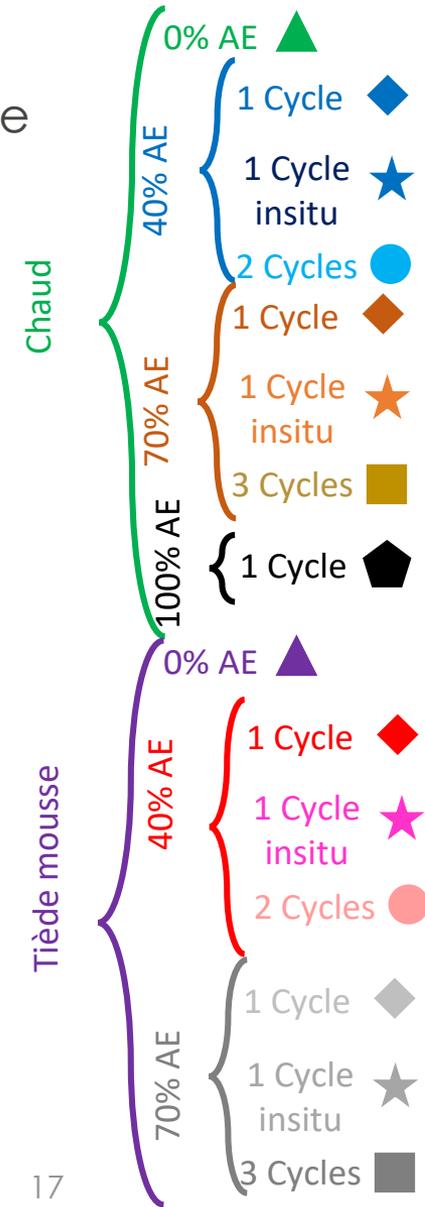


Paramètre τ_E @15°C (T_{ref})

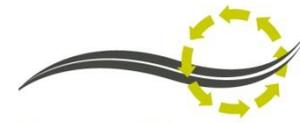
Paramètre intervenant pour l'équivalence temps-température (→lié au bitume)



- τ_E :
- dépendant de la péné. du bitume
 - indépendant du %AE,
 - indépendant de la fabrication à chaud/tiède,
 - indépendant de la fabrication labo /chantier



Conclusions

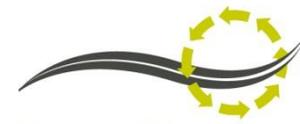


➔ Analyse « classique »: E^* 15°C/10Hz

- Influence importante du % vides
- Après correction, aucune dépendance (%AE, cycles, chaud/tiède, chantier/lab) notable ($\pm 5\%$ écart) sauf diminution après 3 cycles de recyclage

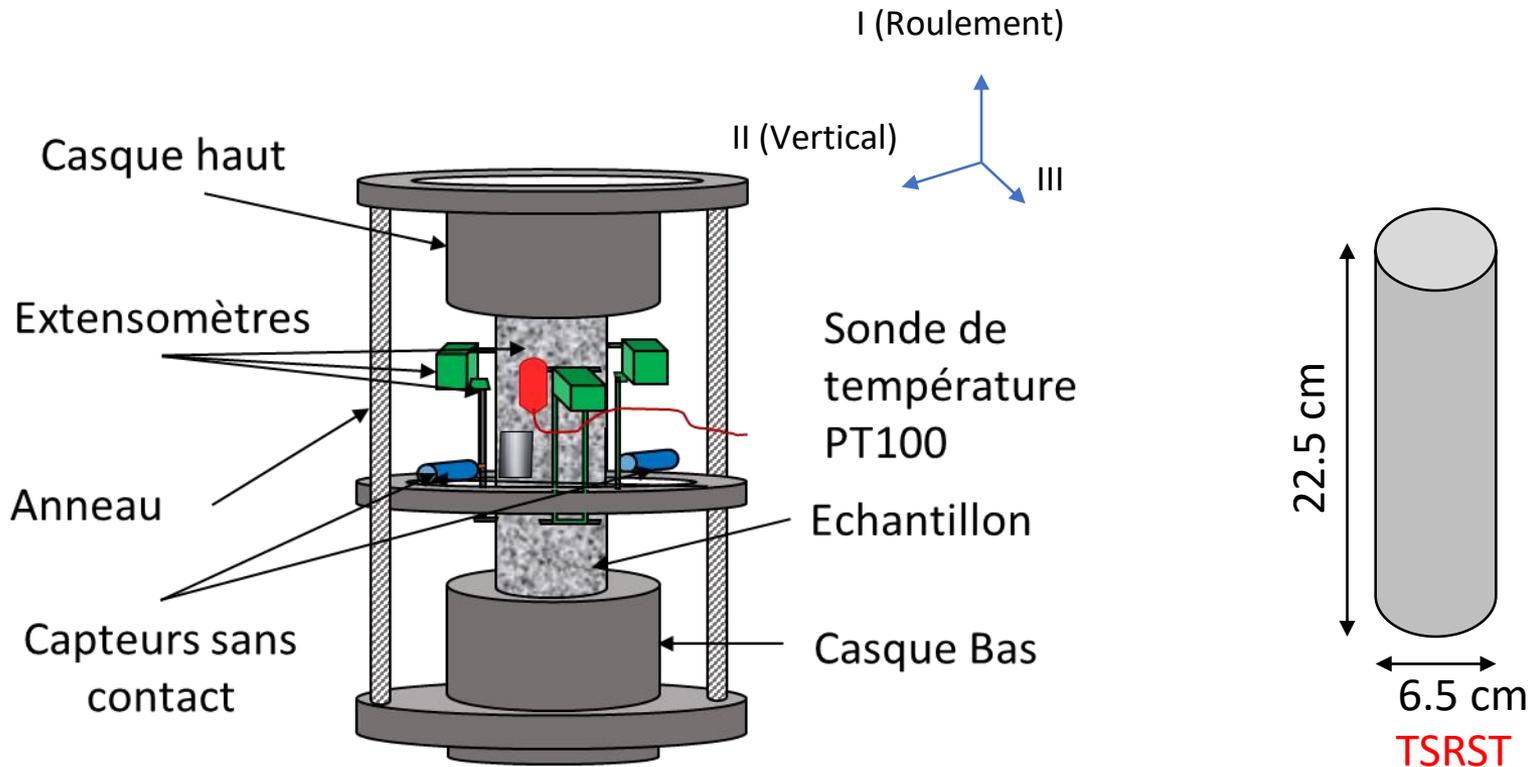
➔ Analyse avancée : modèle 2S2P1D

- Paramètres k , h , δ , β liés au %AE
- E_0 uniquement dépendant de la teneur en vides
- E_{00} aucune dépendance claire
- τ_E dépendant de la pén. du liant extrait
- a_T identiques pour tous les matériaux sauf LH100-1 (non présenté)



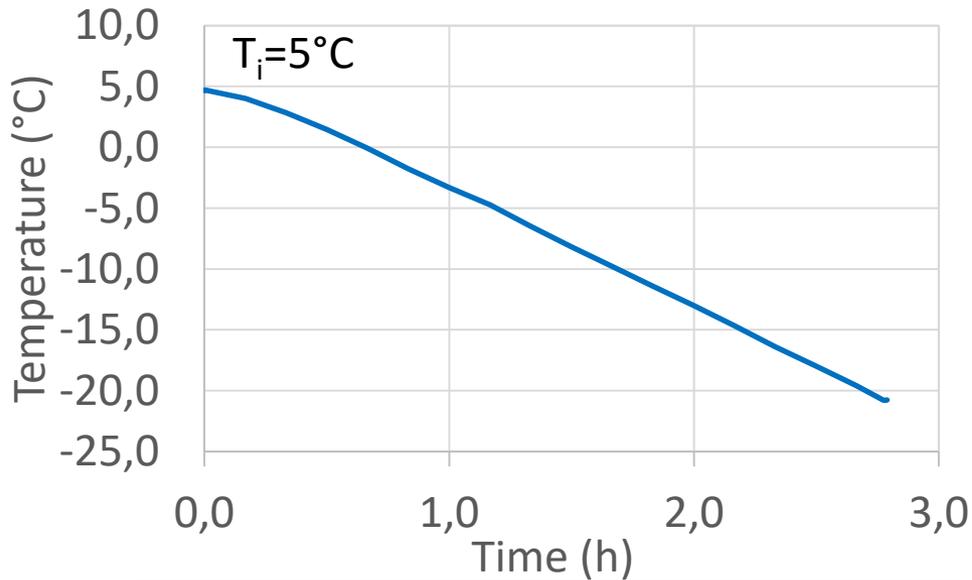
3. Essais de retrait thermique empêché (TSRST)

Dispositif expérimental essai « TSRST » (Thermal Stress Restrained Specimen)

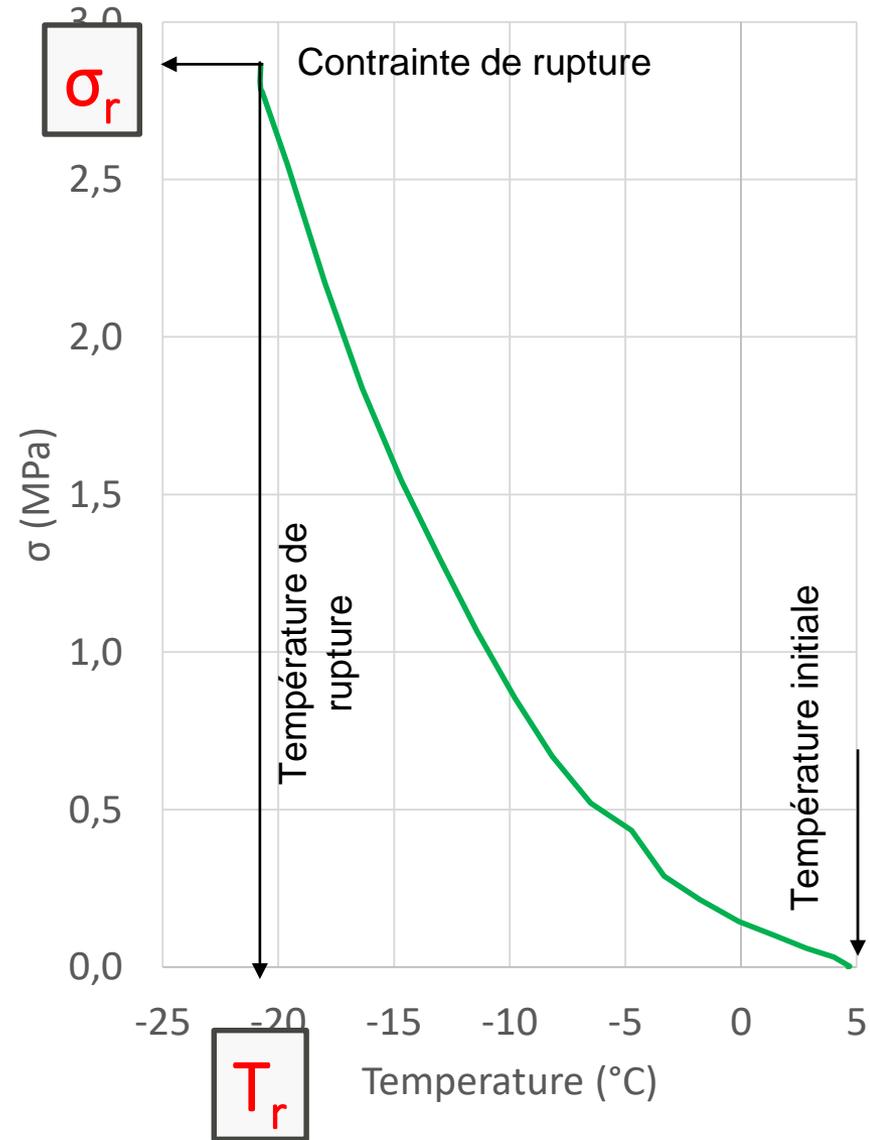
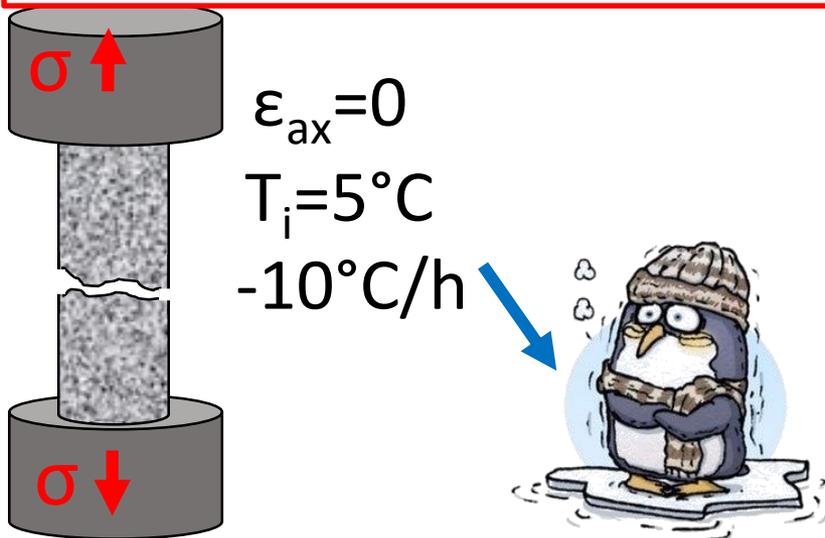


Même dispositif que le essai de
module complexe

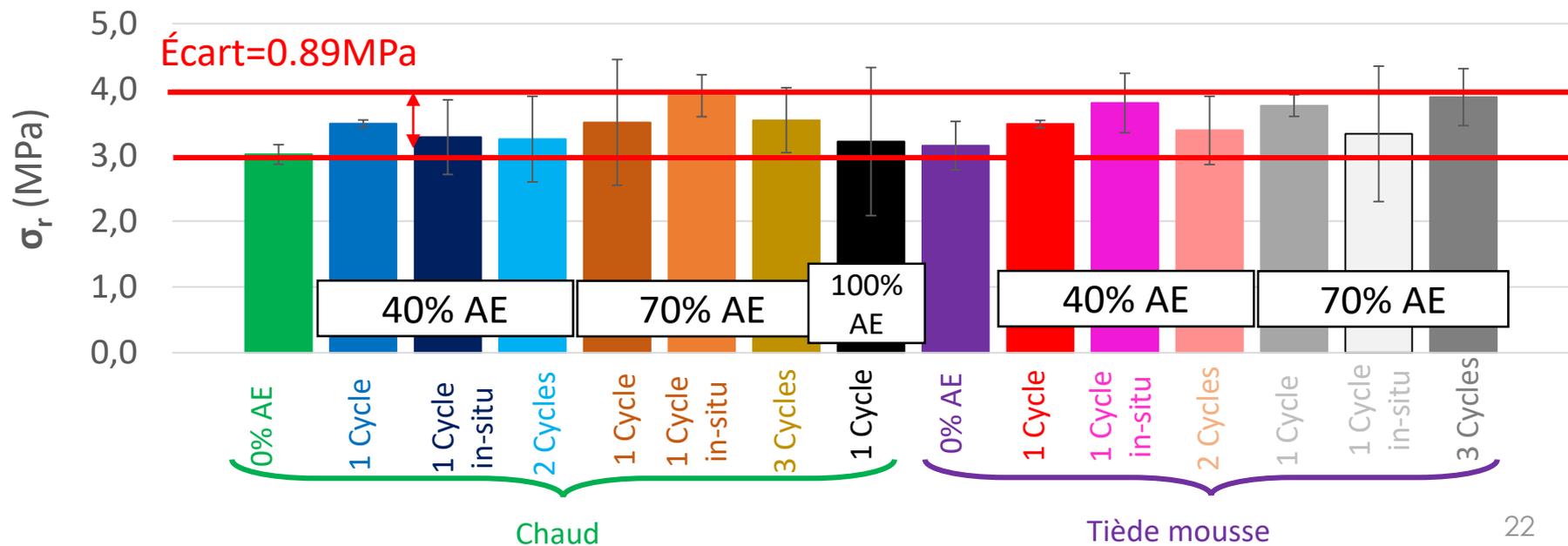
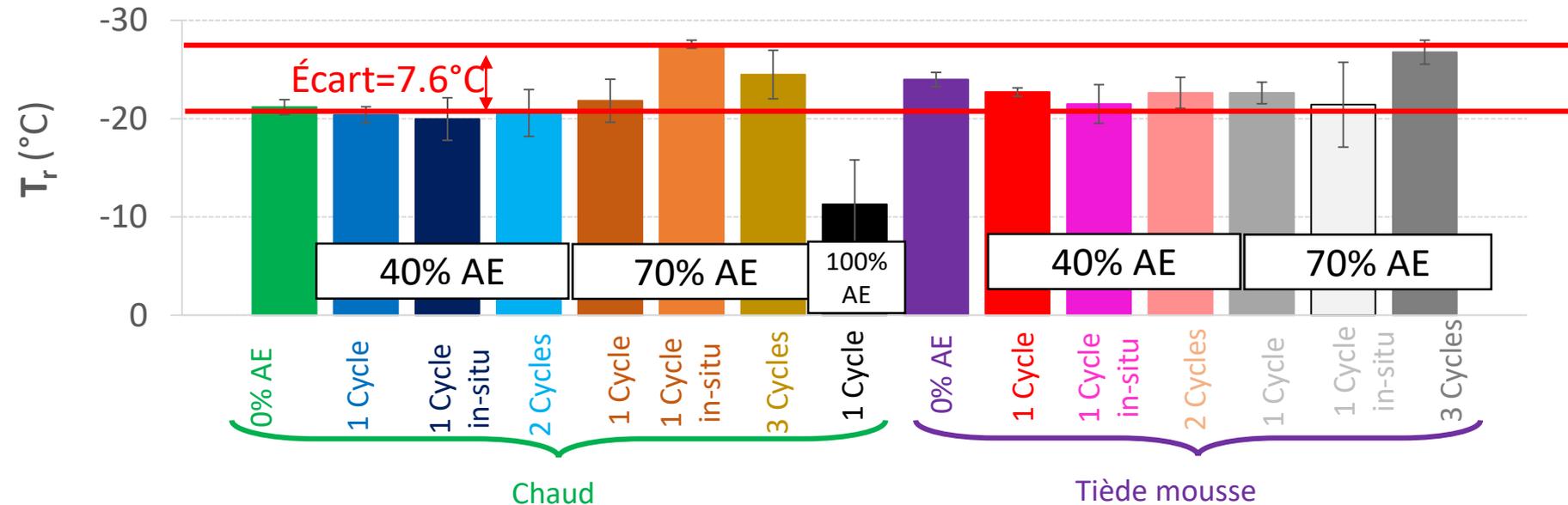
Procédure de l'essai TSRST



3 échantillons testés par matériau



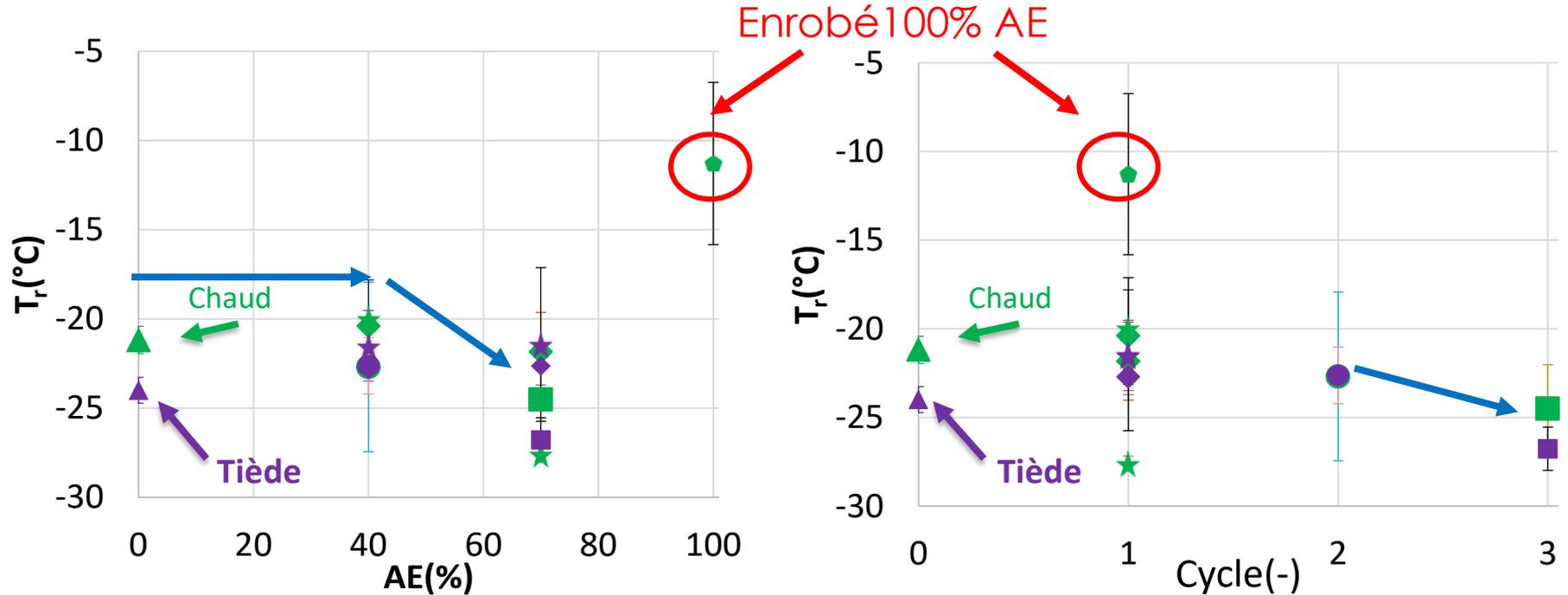
Contrainte et température de rupture



Température de rupture



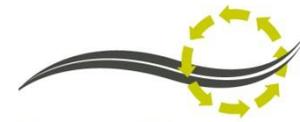
Effets du %AE et cycle de recyclage



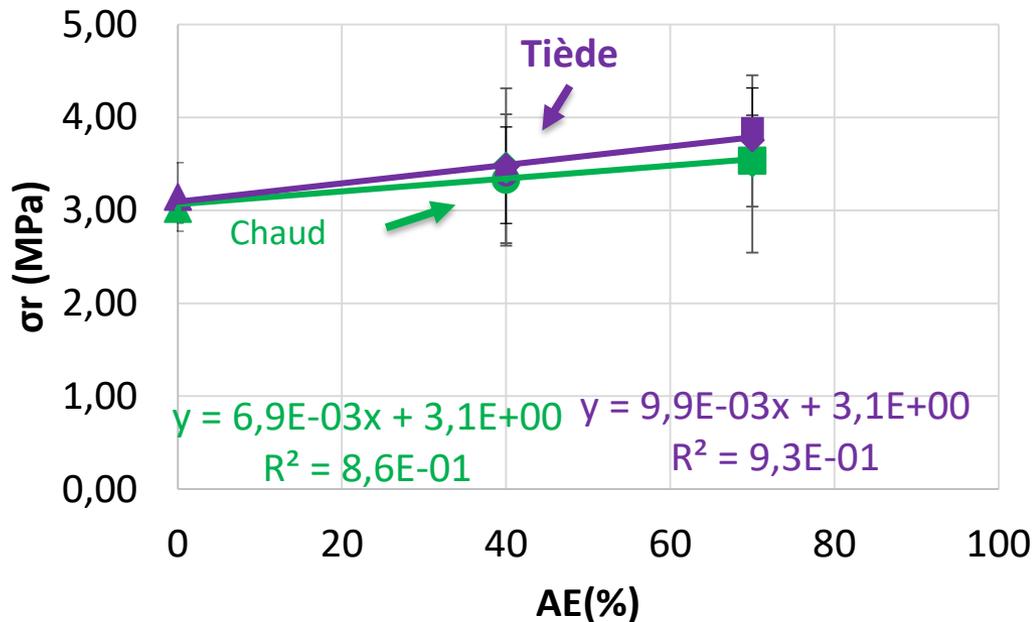
T_r :

- Plus élevée pour enrobé avec 100% AE (*a priori moins bon*)
- Plus basse avec 70% d'AE (*a priori meilleur, bitume d'apport?*)
- Plus basse après 3 cycles de recyclage (*a priori meilleur, bitume d'apport?*)

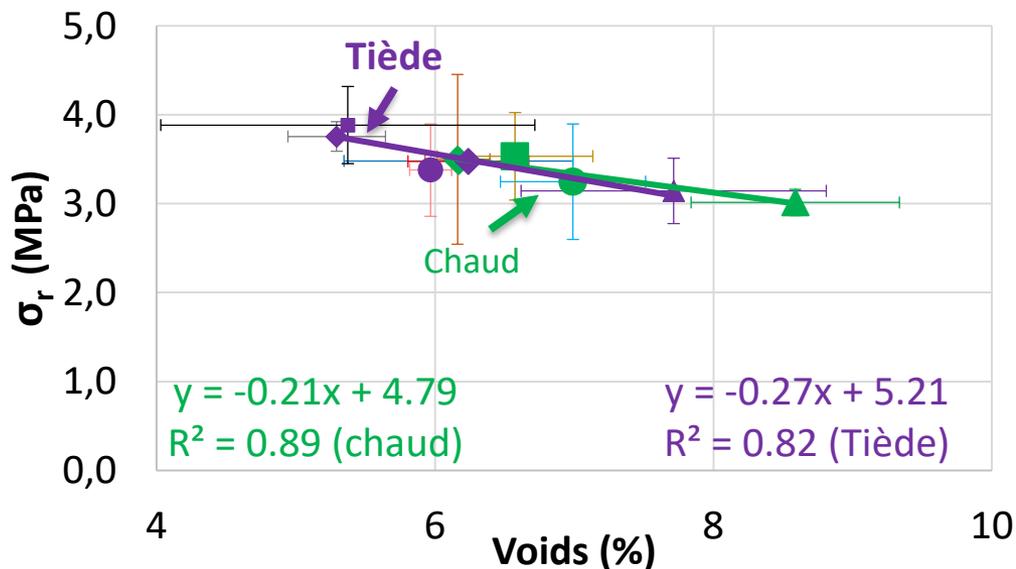
Contrainte de rupture (σ_r)



Effets du %AE et %vides pour fabrication laboratoire (sauf LH100-1)



- σ_r :
- Liée au %AE et fabrication chaud/tiède
 - Mais **effet** du %vides

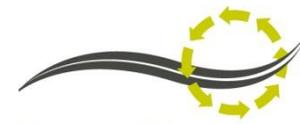


Conclusions



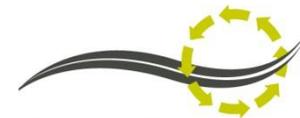
→ TSRST

- Température de rupture:
 - peu influencée par %AE, nombre de cycle, type de fabrication
 - sauf enrobés 70% AE (effet du bitume d'apport ?)
 - et 100% AE (matériau différent)
- Contrainte de rupture:
 - influencée par teneur en vides

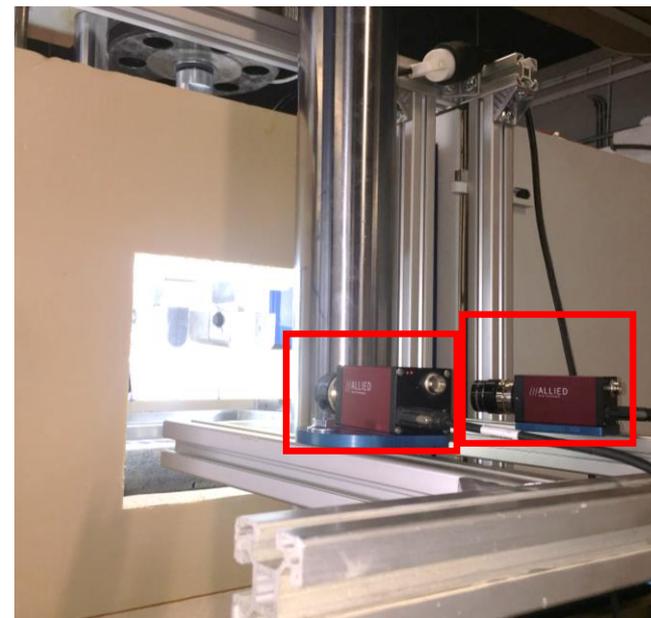
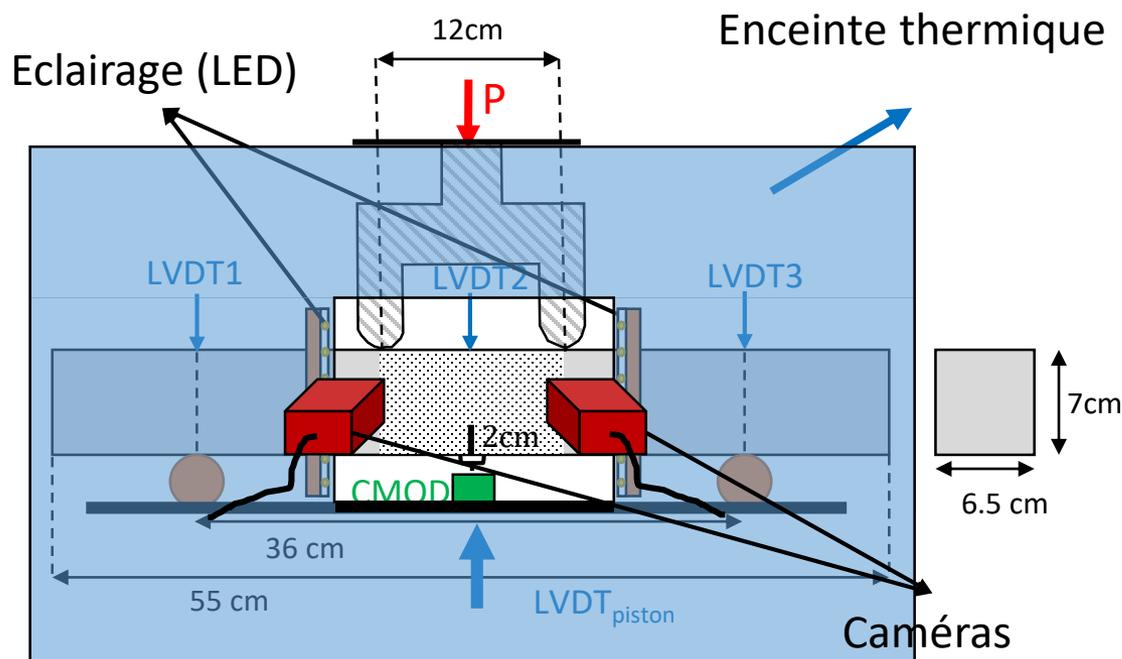


4. Essais de propagation de fissure

Dispositif expérimental



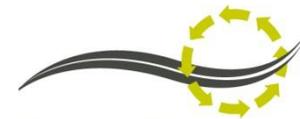
Essai de propagation en flexion 4 points



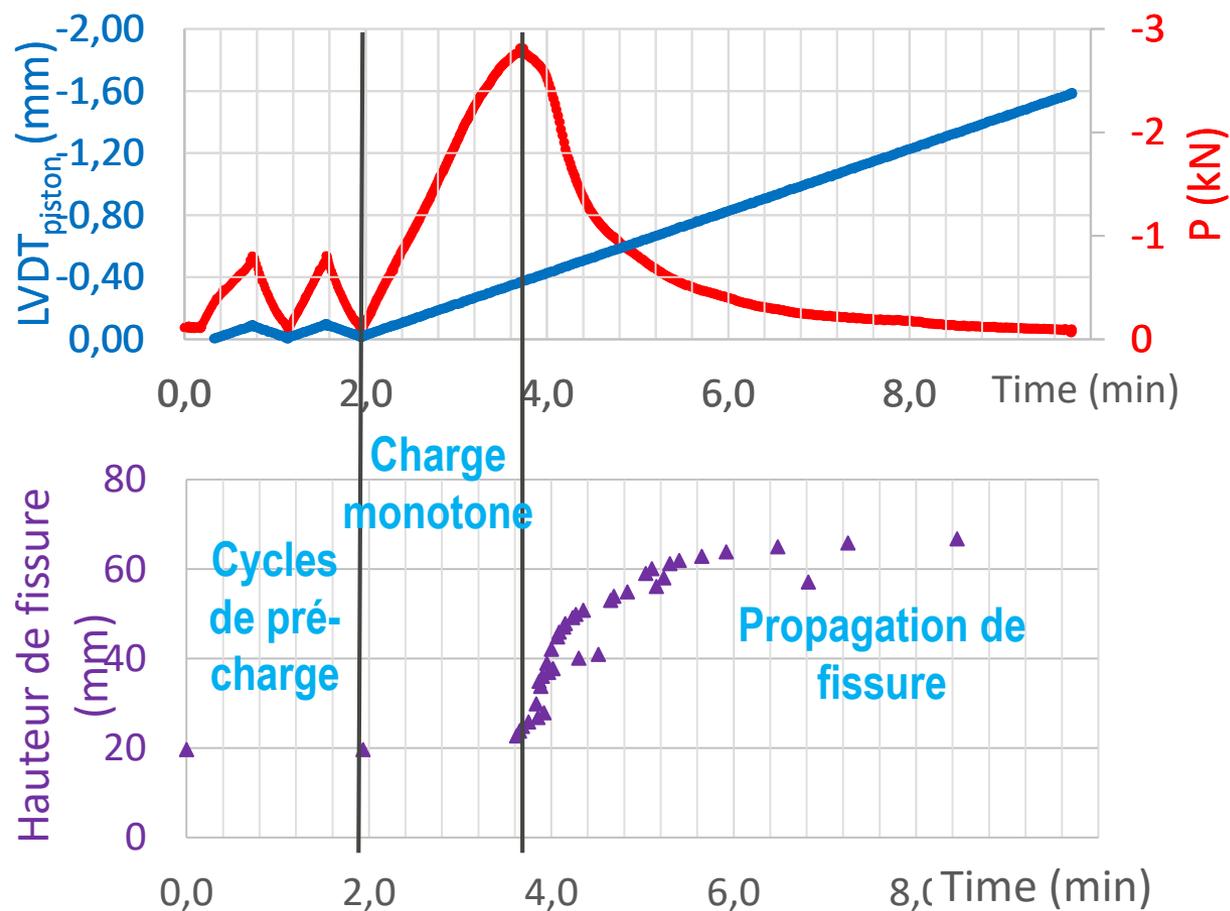
Mesures:

- Force (*Capteur presse*)
- Déplacement Piston (*LVDT piston*)
- Flèche (*LVDTs*)
- Ouverture de fissure (*CMOD*)
- Hauteur de fissure (détaillé dans la suite)

Procédure d'essai



- ⇒ Vitesse imposée : 0,2 mm/min
- ⇒ Température : -5°C et -15°C

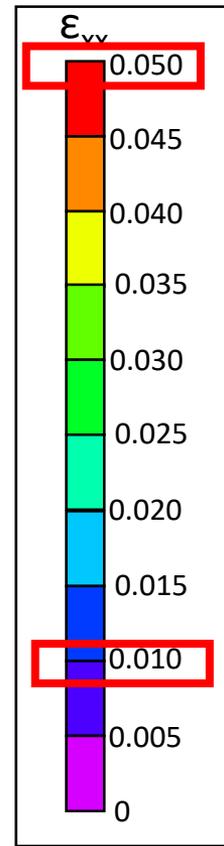
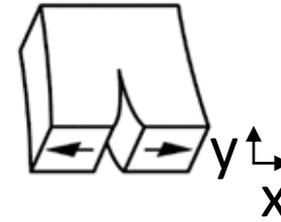
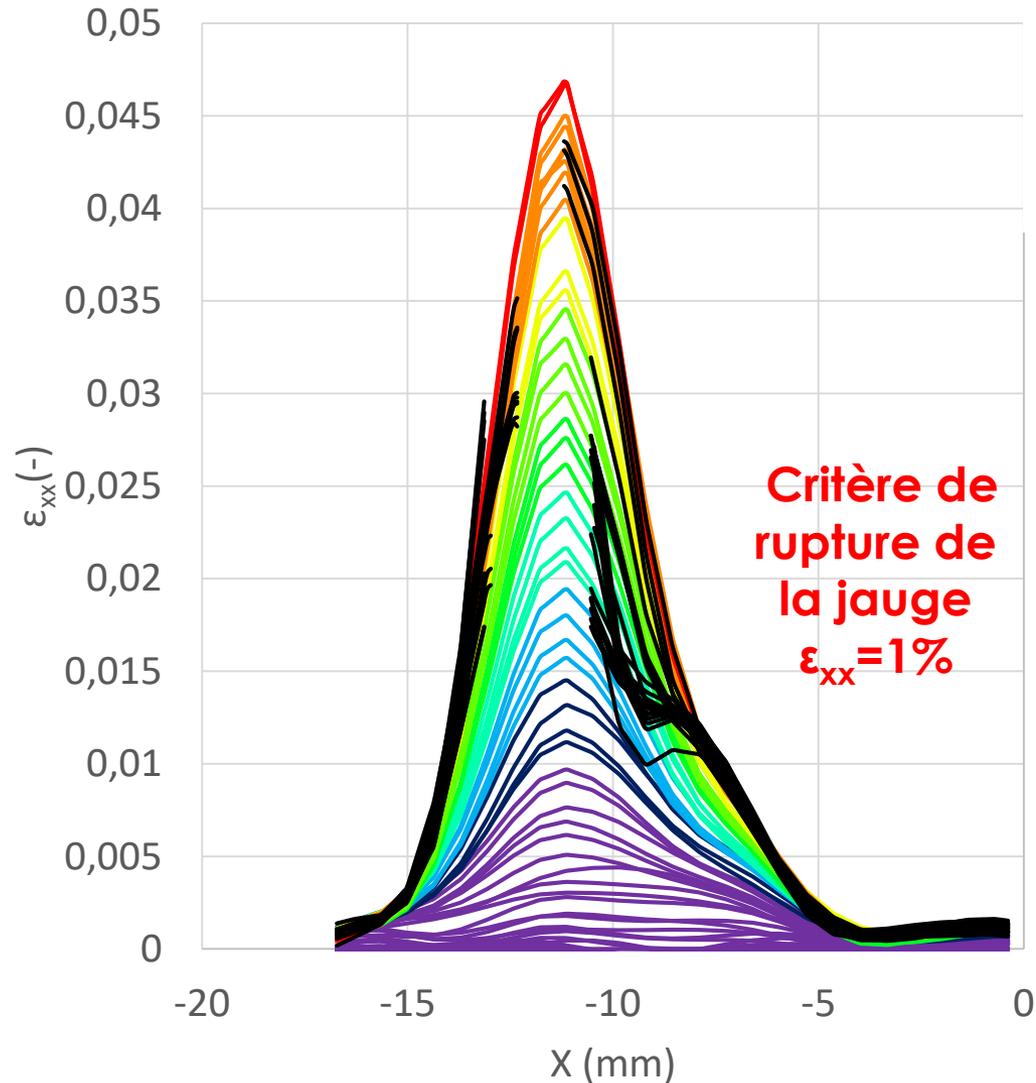
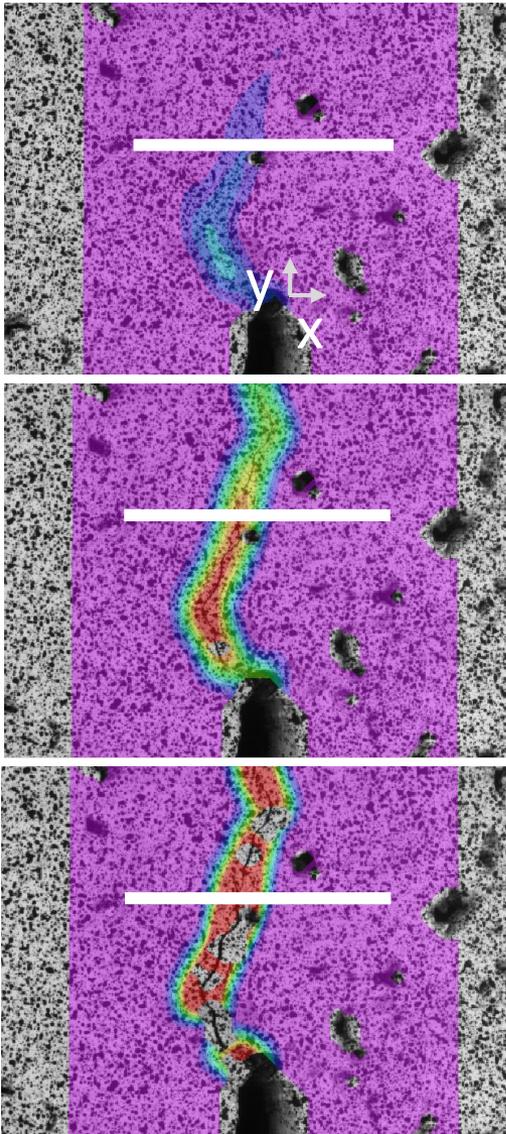
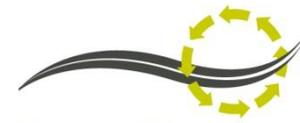




- ⇒ Analyse de l'évolution de la hauteur de fissure:
 - À l'aide des caméras (jauge virtuelle)
 - Méthode de calcul inverse (DRCL développée à l'ENTPE)
- ⇒ Analyse des propriétés de fissuration (mécanique linéaire de la rupture)
 - Résistance
 - Taux de restitution d'énergie
 - Facteur d'intensité de contrainte

Analyse de la hauteur de fissure

Caméras : Jauge virtuelle de fissuration

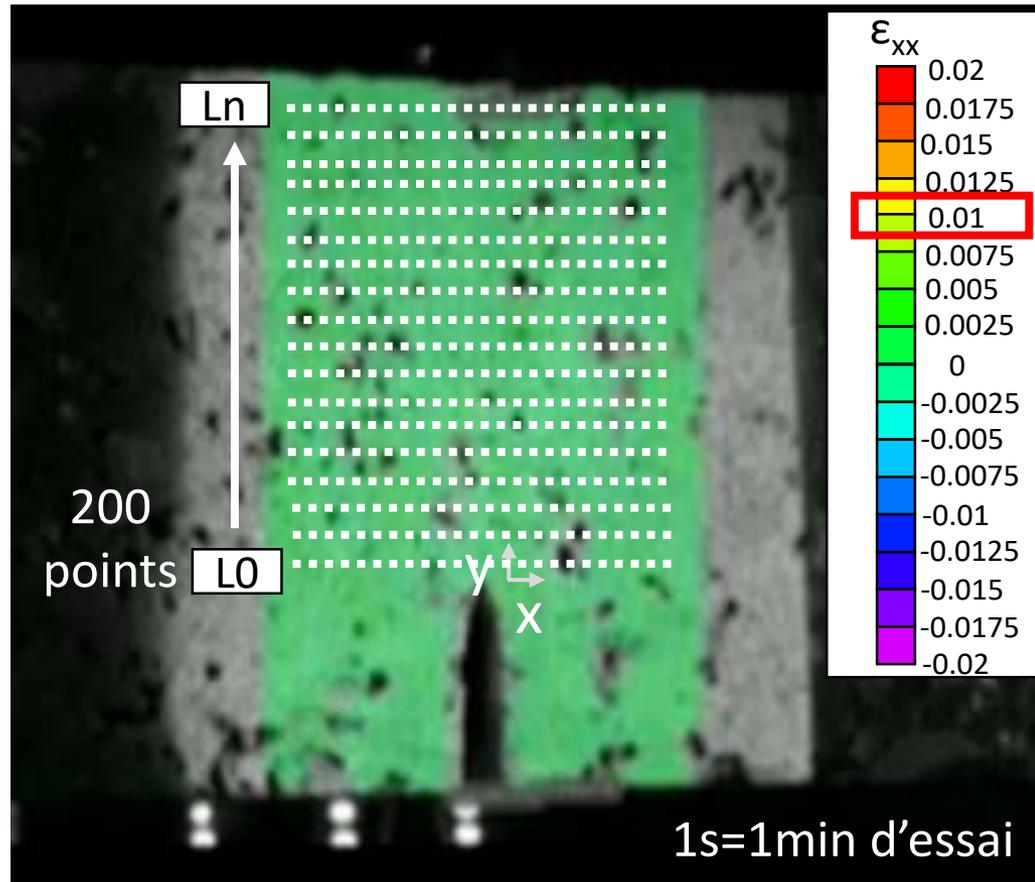


Aanalyse de la hauteur de fissure



Caméras : Jauge virtuelle de fissuration

Ex: enrobé 0%AE à chaud

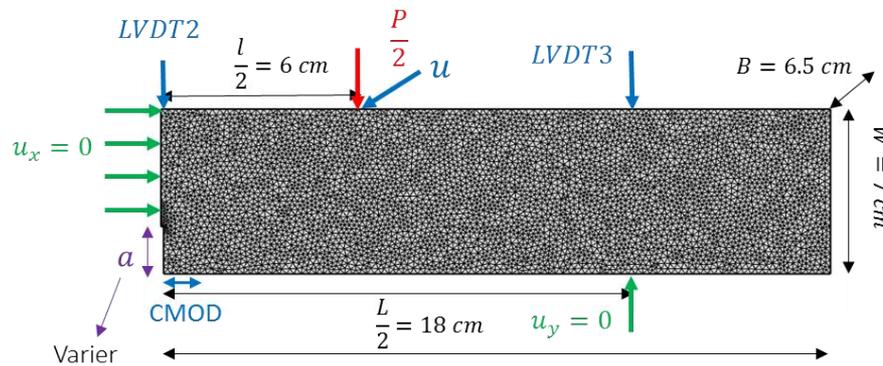


Analyse de la hauteur de fissure

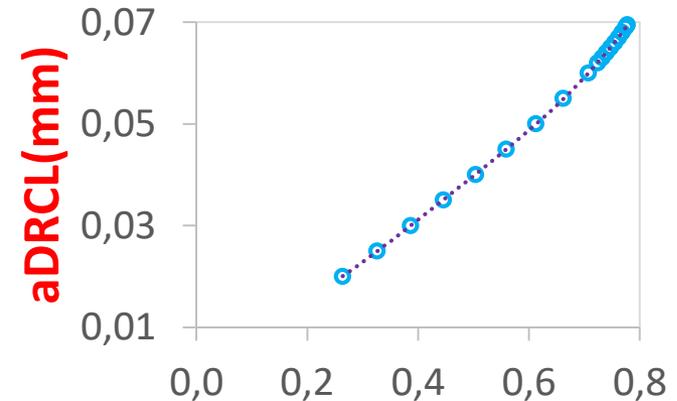


Méthode de calcul inverse: DRCL

- Hauteur de fissure obtenue par calcul inverse VEL par éléments finis des déplacements mesurés (LVDTs et CMOD)



$K_{IC} = 1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$
 $E = 10^4 \text{ MPa}$
 $\nu = 0$

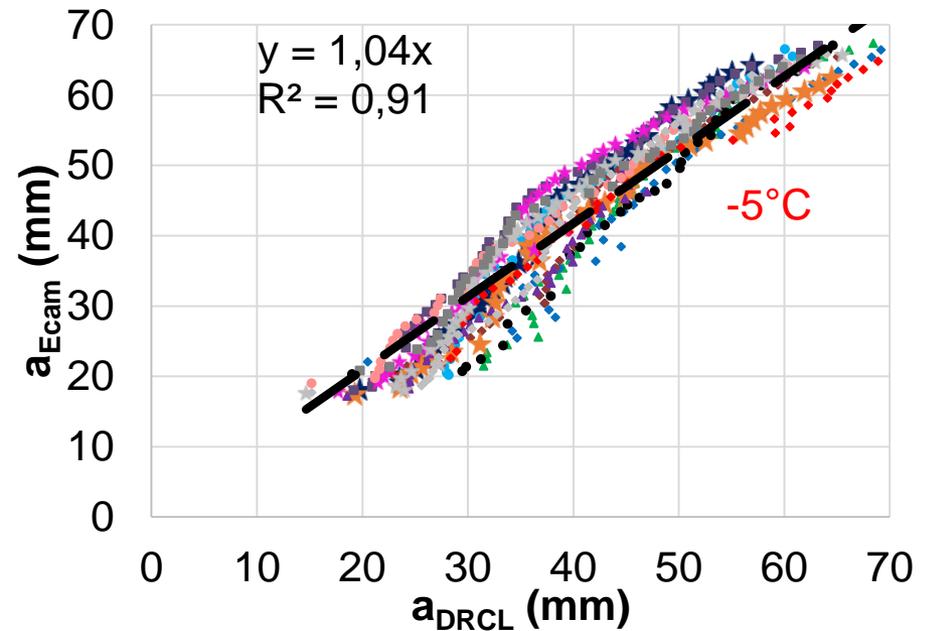
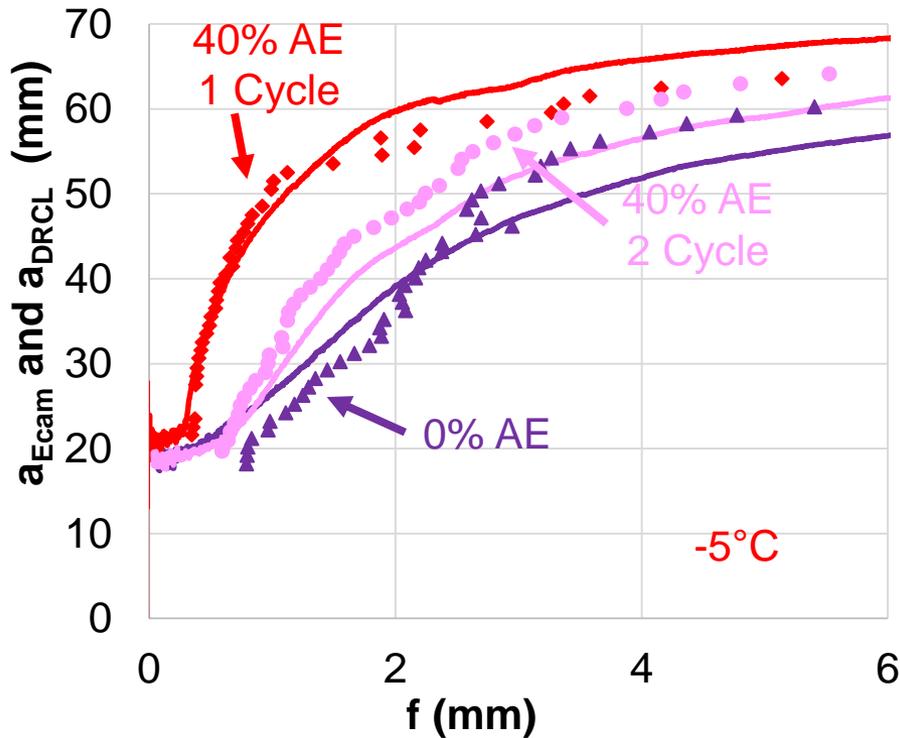


$$rd = \frac{CMOD}{f}$$

Analyse de la hauteur de fissure



Comparaison caméras/DRCL

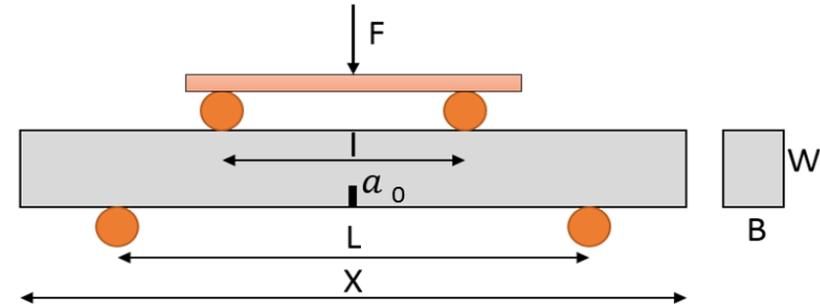
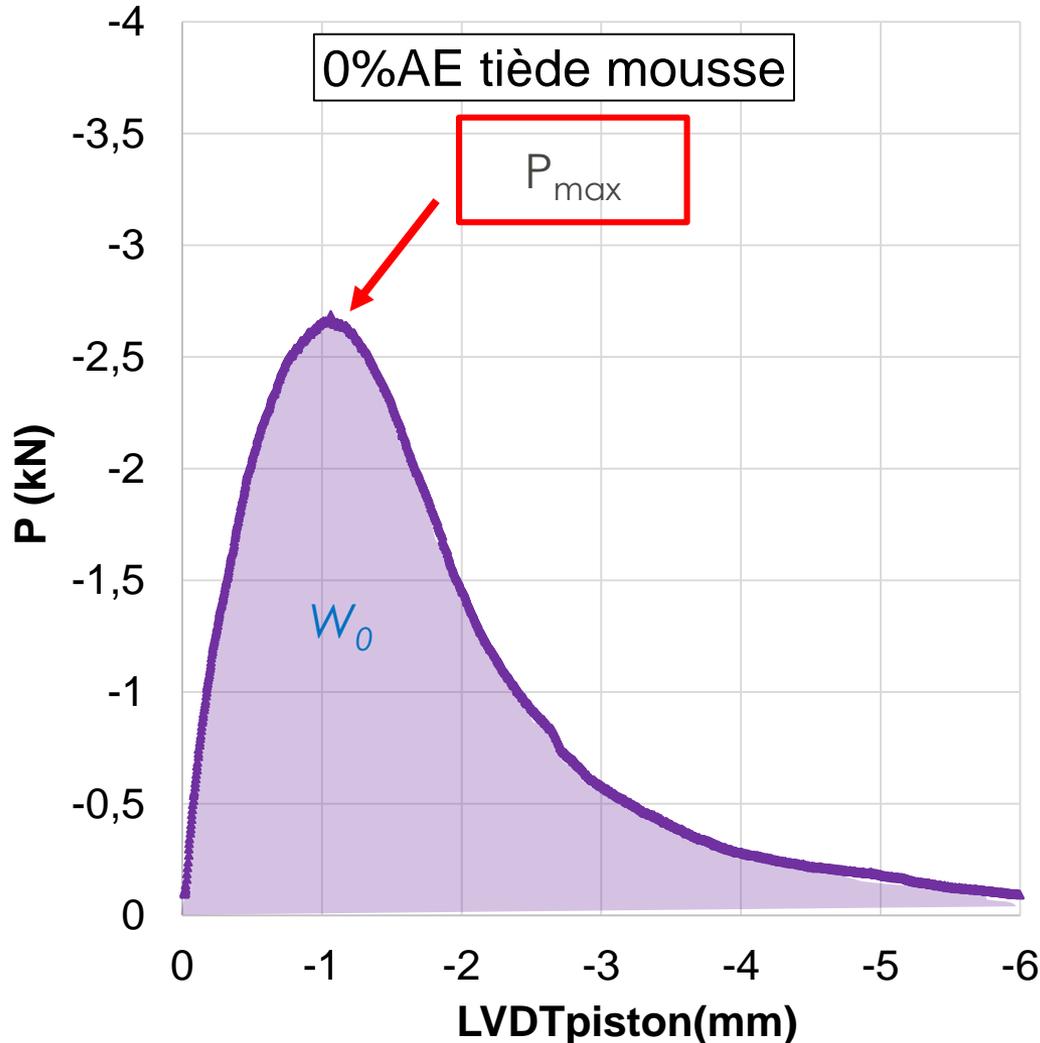


Bonne corrélation entre les 2 approches

Analyse des propriétés de fissuration



Définition des paramètres



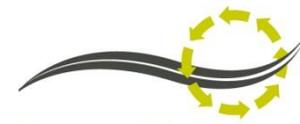
$$G_f = \frac{W_0}{B(W - a_0)}$$

Taux de restitution d'énergie :
énergie nécessaire pour atteindre
la rupture

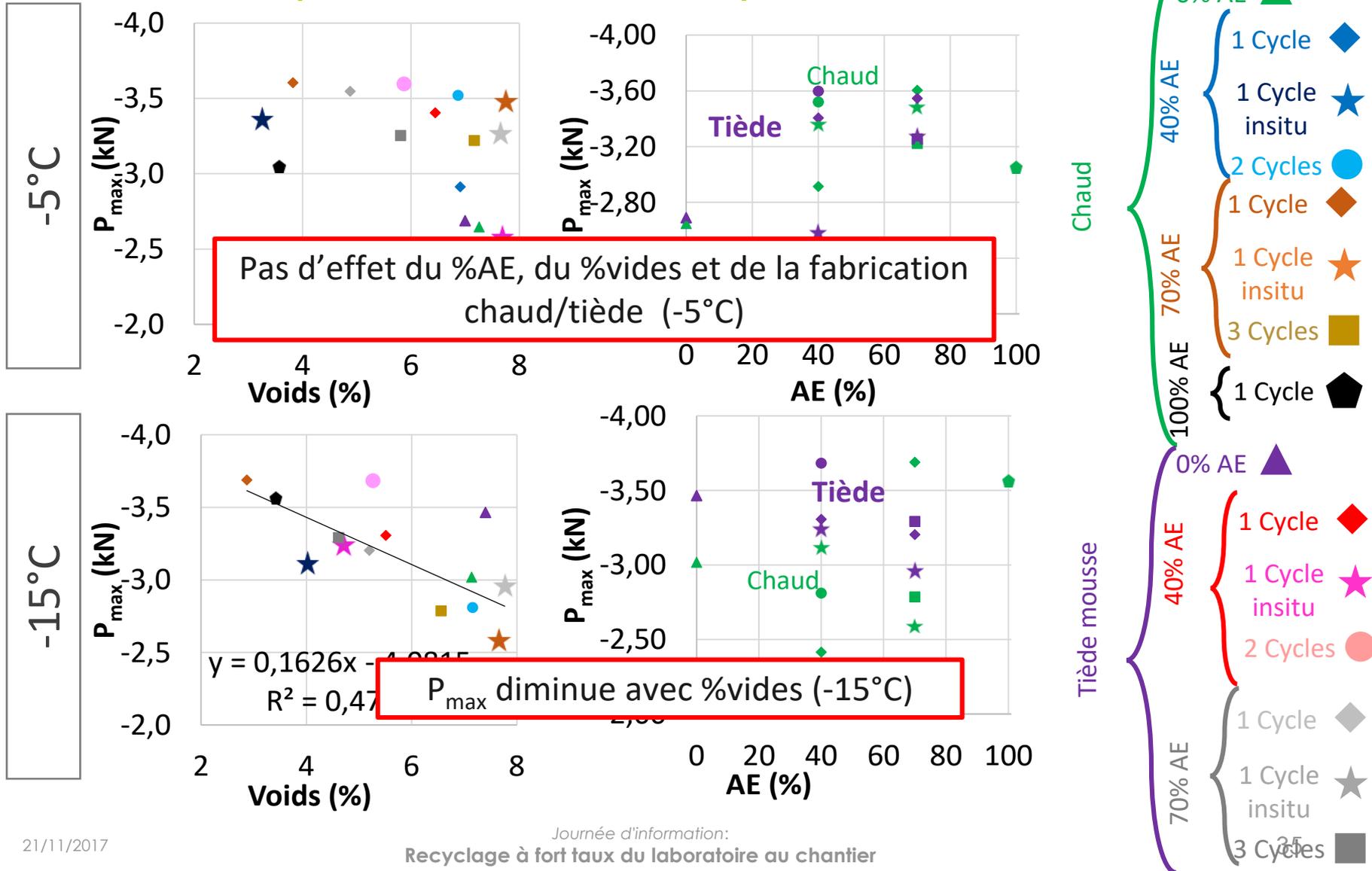
$$K_{IC} = \frac{3P(L - l)}{2BW^2} Y(a)\sqrt{a}$$

Facteur d'intensité de contrainte :
lié à la valeur limite de la
contrainte en pointe de fissure
pour propager la fissure

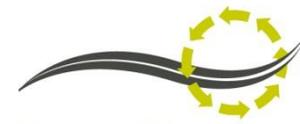
Analyse des propriétés de fissuration



Résistance (force maximale)

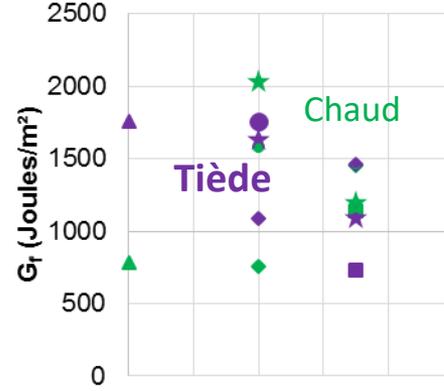
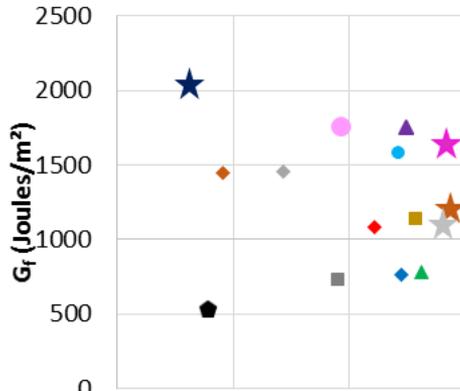


Analyse des propriétés de fissuration



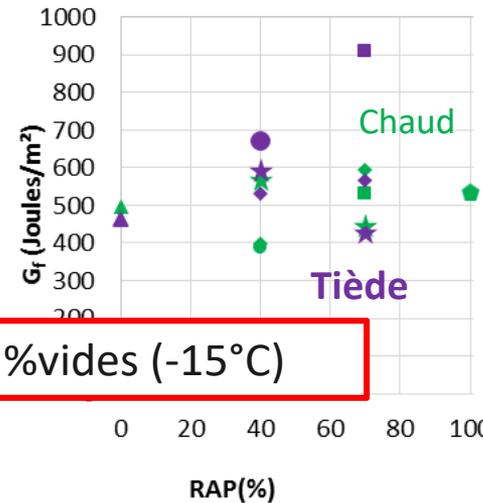
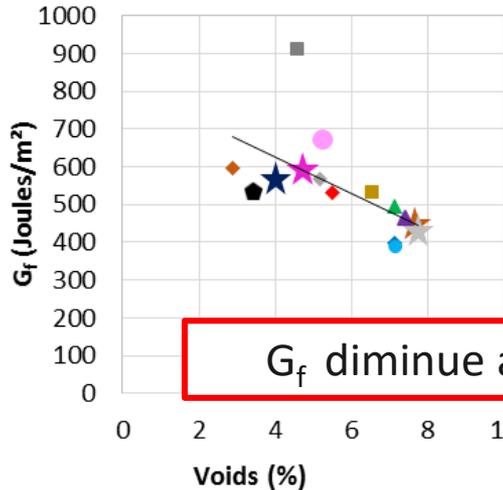
Taux de restitution d'énergie G_f

-5°C

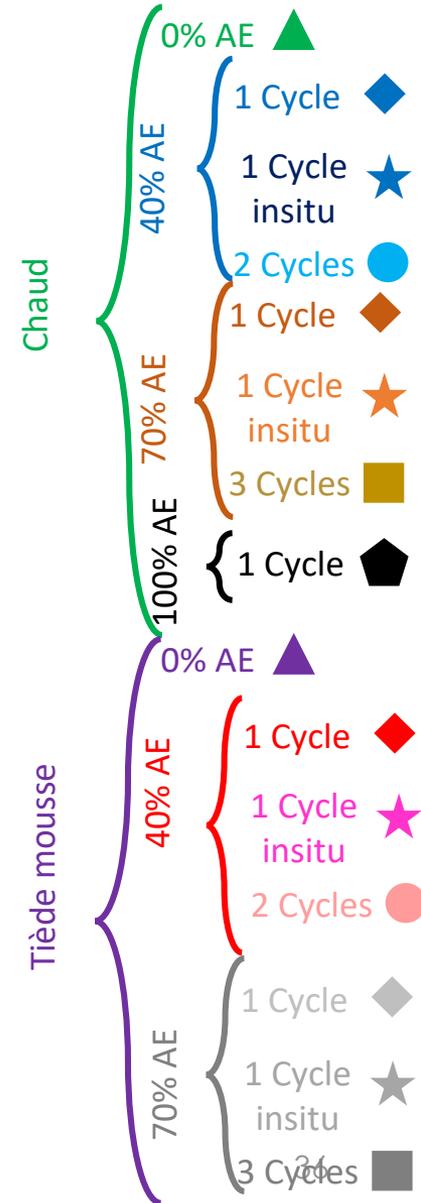


Pas d'effet du %AE, du %vides et de la fabrication chaud/tiède (-5°C)

-15°C



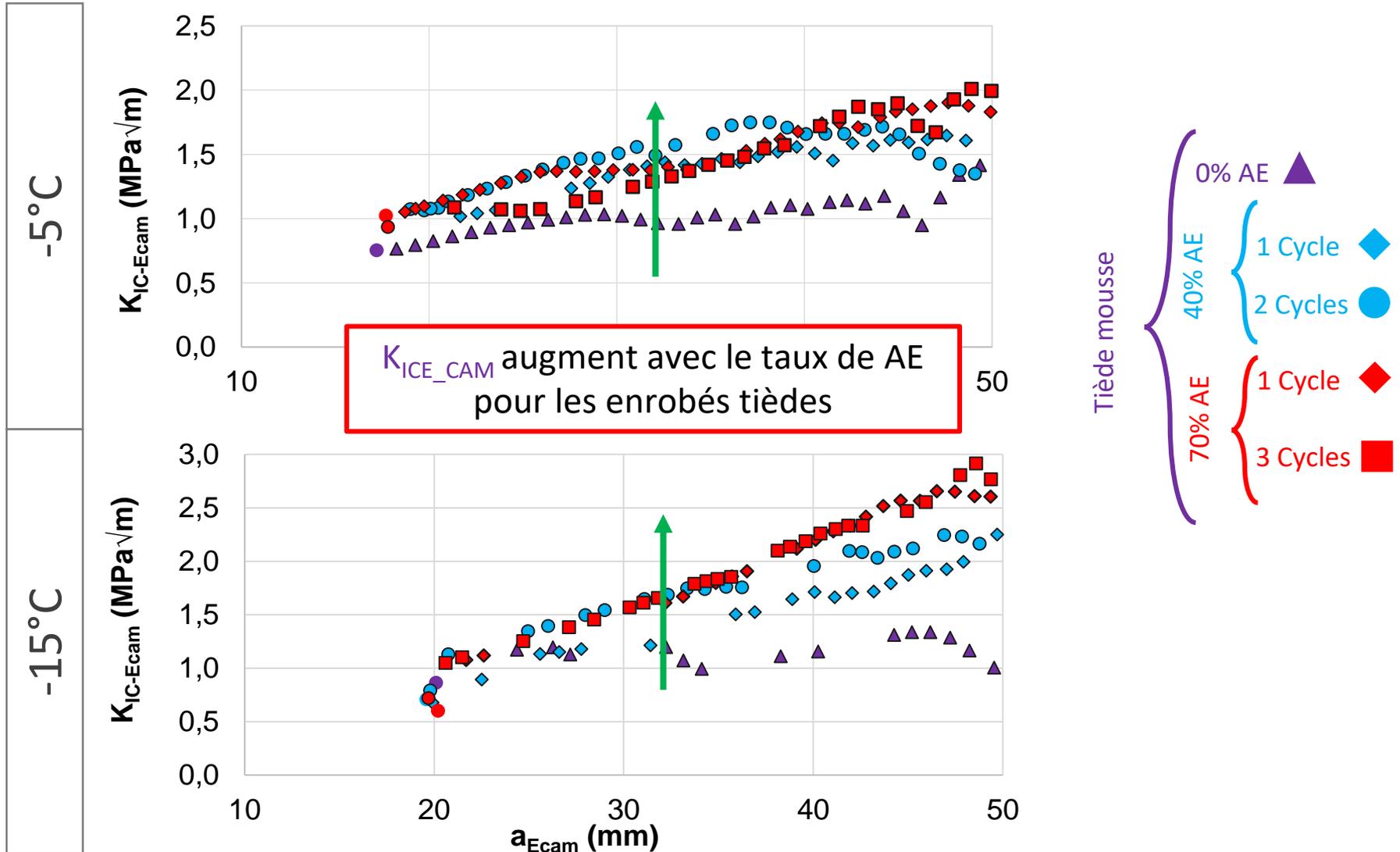
G_f diminue avec %vides (-15°C)



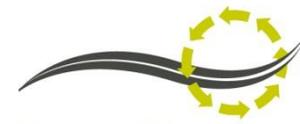
Analyse des propriétés de fissuration



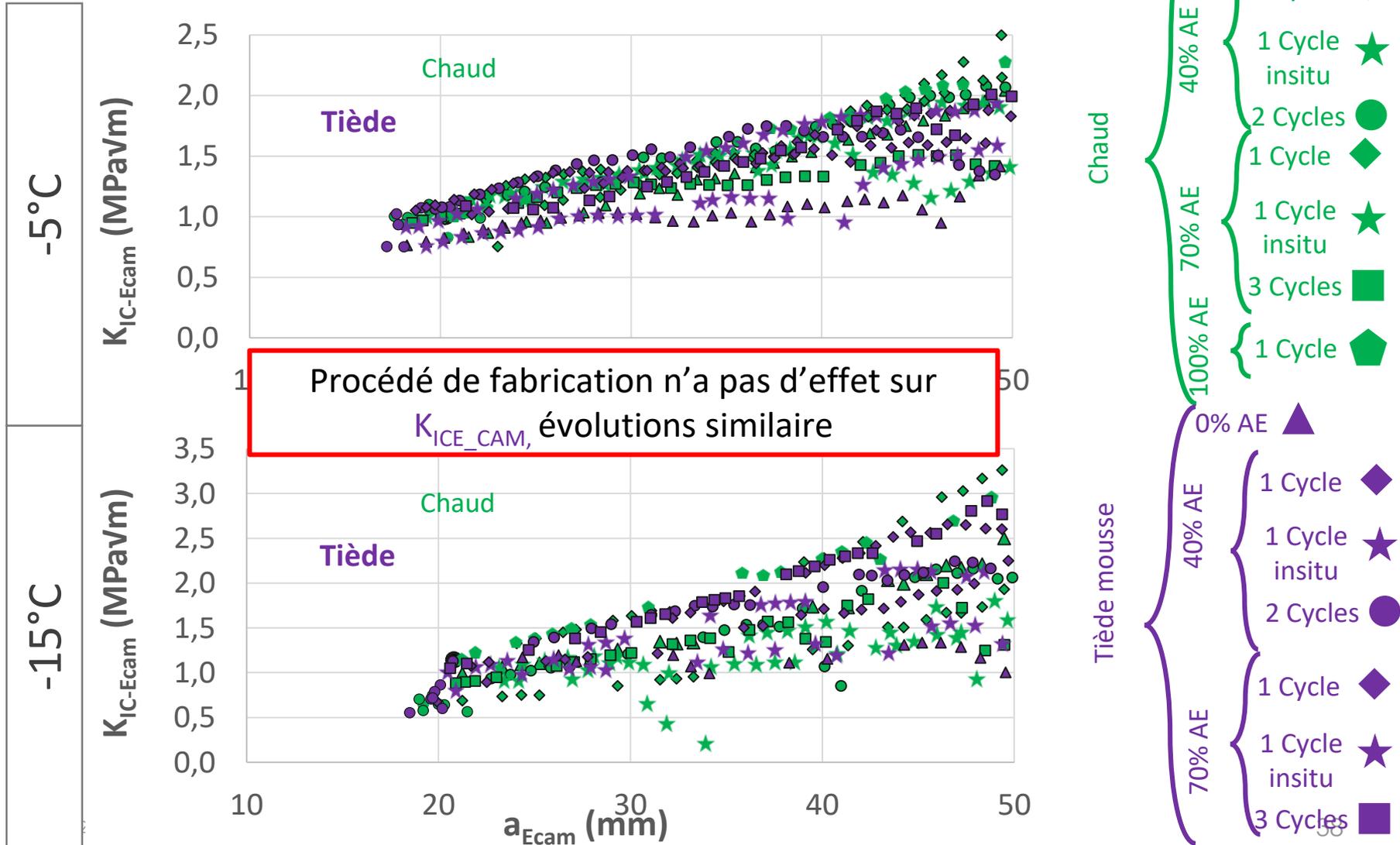
Facteur d'intensité de contraintes K_{IC}



Analyse des propriétés de fissuration



Facteur d'intensité de contraintes K_{IC}





→ Propagation de fissure

- Propriétés de fissuration ne semblent pas fortement influencée par :
 - %AE, cycles de recyclage, fabrication à chaud/tiède, fabrication chantier/ labo
- Seule influence possible :
 - %vides à -15°C sur la résistance et taux de restitution d'énergie
 - résistance à la propagation possiblement améliorée par %AE pour enrobés tièdes (K_{IC})



Module complexe

- ⇒ Propriétés VEL proches pour les enrobés avec 0%, 40% et 70% d'AE.

TSRST

- ⇒ Température de rupture peu influencées par procédé de fabrication, AE%, teneur en vides et cycle de recyclage.

Propagation de fissure

- ⇒ Propriétés de propagation de fissures similaires.