

Projet National MURE / ANR IMPROVMURE
« La route MURE pour le recyclage »
Toulouse, le 25 février 2020

ANR IMPROVMURE

Comportement à froid, fissuration, module complexe

Simon POUGET

Routes de France
EIFFAGE



En bref

⇒ Projet ANR :

- Montant global : 2 318 k€
- Dont subvention : 801 k€
- Durée du projet : 48 mois
- Démarrage : 1er mars 2014



⇒ Coordination: EIFFAGE

⇒ Partenariat: ENTPE, UGE, IREX, USIRF, CEREMA



Verrous scientifiques

- ⇒ Influence sur les propriétés Thermo-Mécaniques, Chimiques et Environnementales (TMCE) du :
 - Multi-recyclage
(combien de fois peut-on recycler un enrobé?)
 - Procédé de fabrication
(chaud, tiède mousse & tiède additif)
- ⇒ Plus généralement, identifier les limites scientifiques, techniques et environnementales à l'utilisation d'enrobés contenant des forts taux de multi-recyclés à des températures de fabrication réduite?

Chiffres clés de l'industrie routière française en 2017

- Production d'enrobés : 33,7 millions de tonnes
- Bitume routier : 2,6 millions de tonnes
- Taux de recyclage moyen \approx 19%



Contexte politique

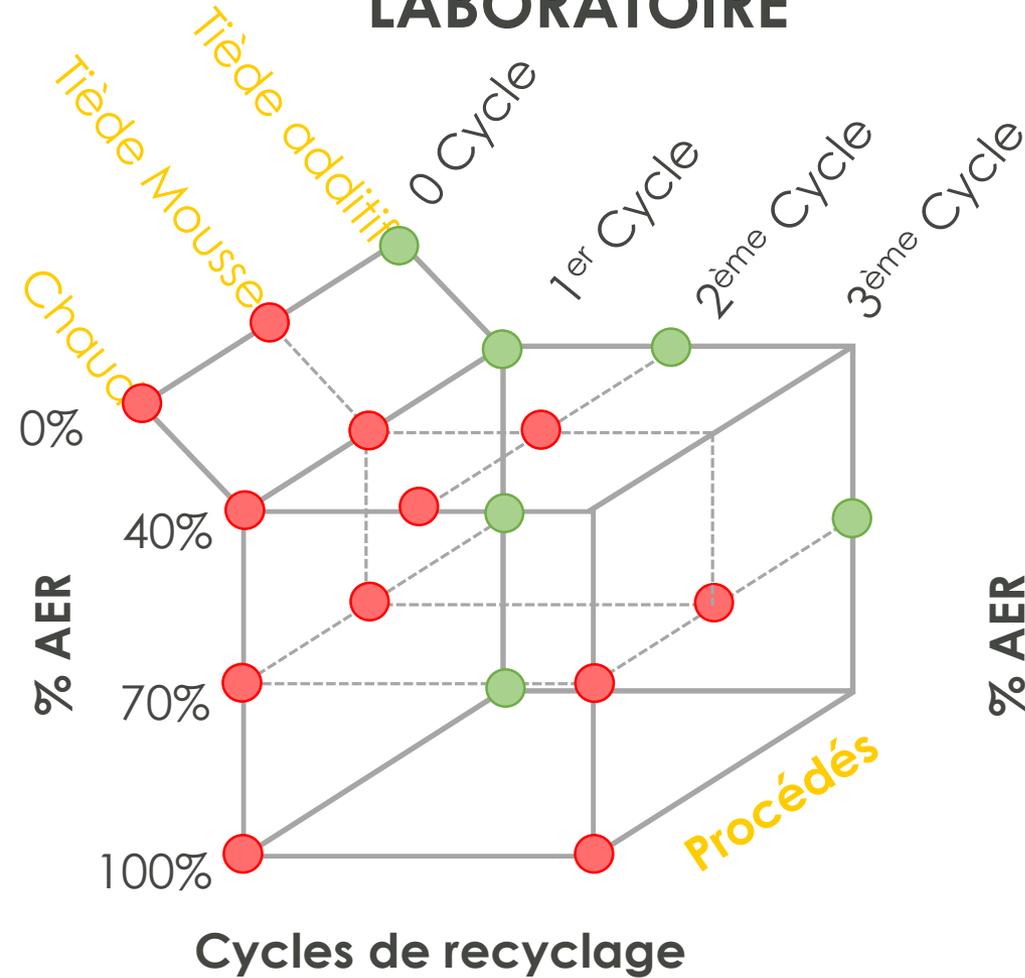
- ⇒ Convention d'Engagement Volontaire (signée en 2009)



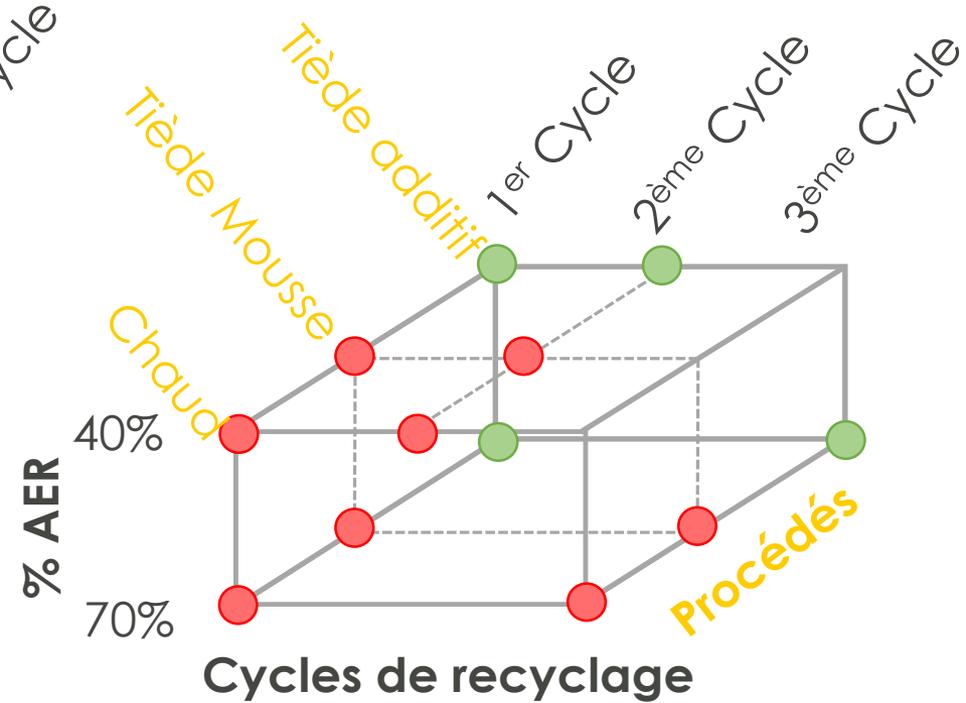
- ⇒ Loi de transition énergétique
Recyclage 70% des déchets de construction (2020)
Économie circulaire

Matériaux

LABORATOIRE

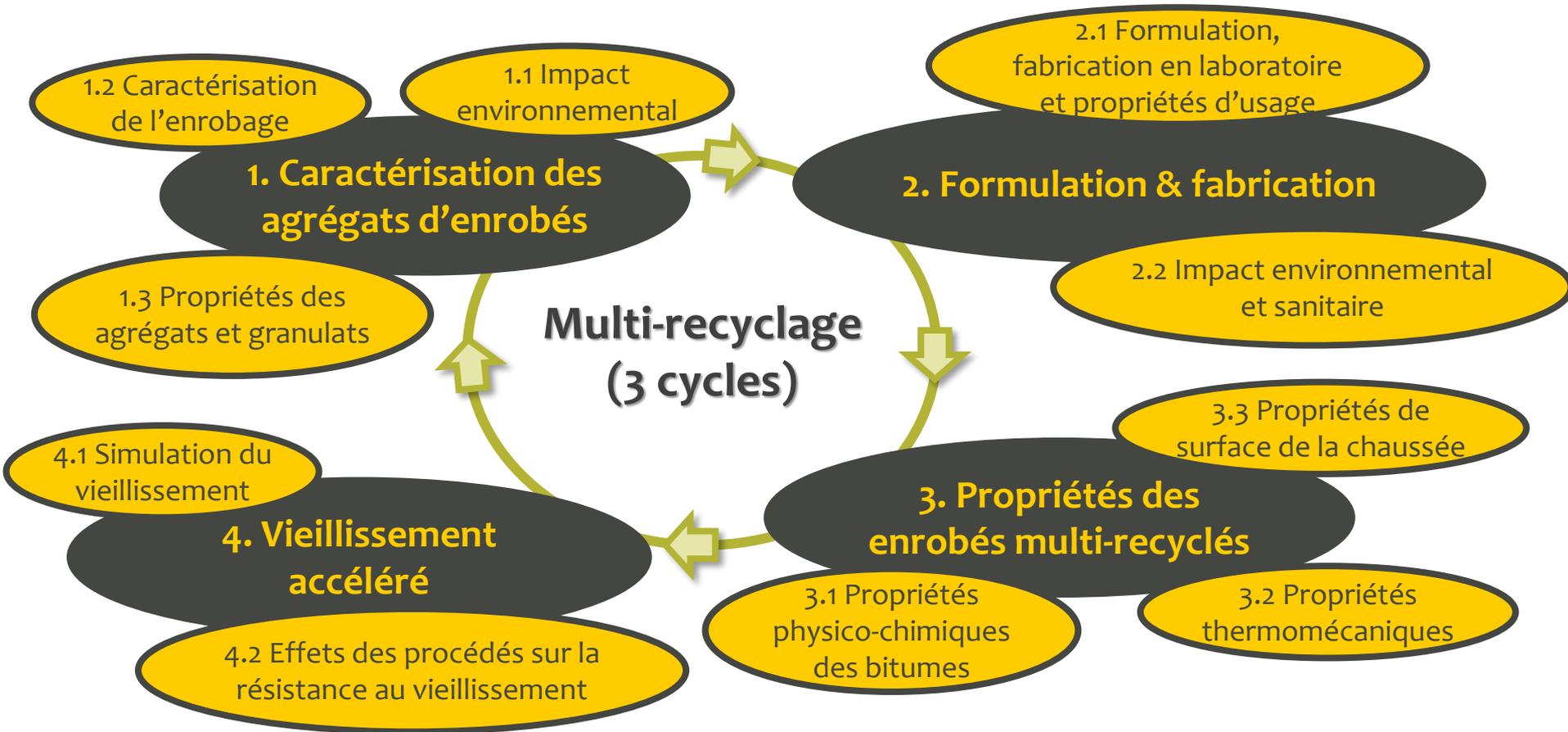


CHANTIERS PN MURE

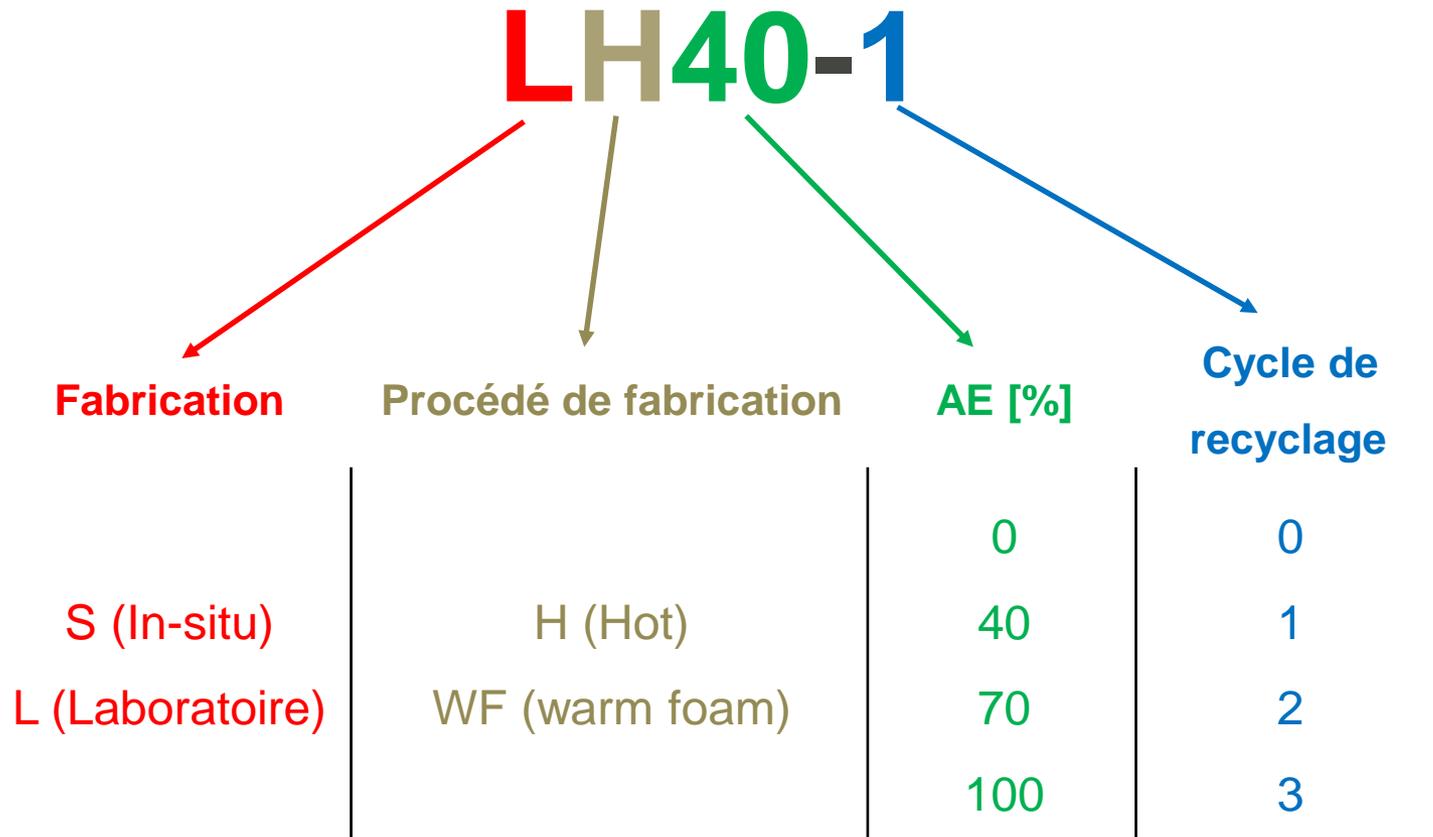


Programme expérimental

2 thèses financées

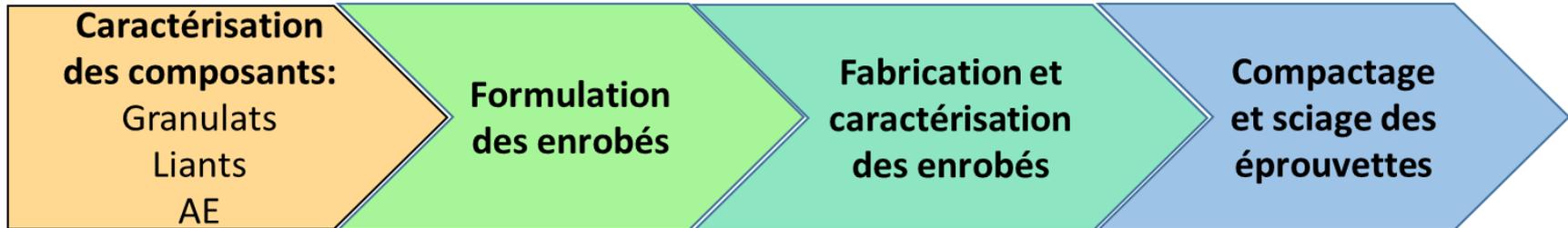


Nomenclature



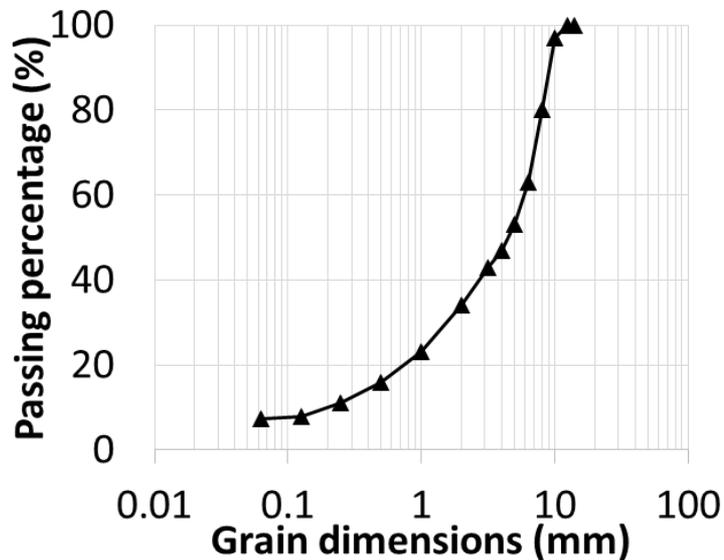
Hypothèses [1/2]

✓ Etapes de la fabrication



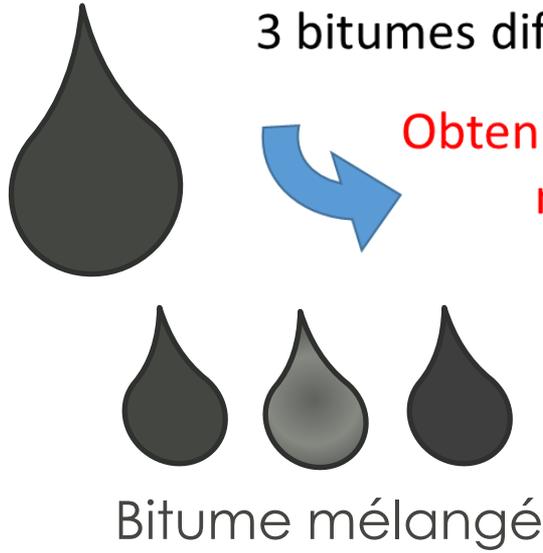
✓ Caractéristiques communes aux enrobés testés

- **Même granulométrie (sauf 100% AE)**
- **Même TL=5.4% (Global)**
- **Mêmes granulats d'apport**



→ BBSG 0/10 de classe 3

Hypothèses [2/2]



3 bitumes différents selon la teneur en AE dans l'enrobé

Obtenir une pénétrabilité identique en supposant un mélange parfait des bitumes (neuf et AE)

$$\log(\text{pen})_{\text{mix}} = a \log(\text{pen})_a + b \log(\text{pen})_b$$

Bitume d'apport

Bitume récupéré AE

a : % (masse) du bitume d'apport

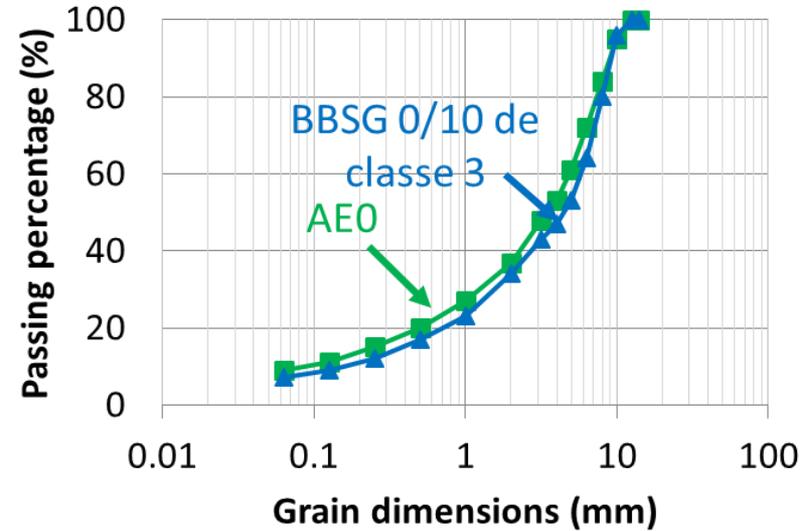
b : % (masse) du bitume des AE

AE (%)	Bitume d'apport	Pénétrabilité (1/10mm)	TBA (°C)
0	35/50	41	52.2
40	50/70	60	48.4
70	160/220	180	39.2

Formule 100% AE

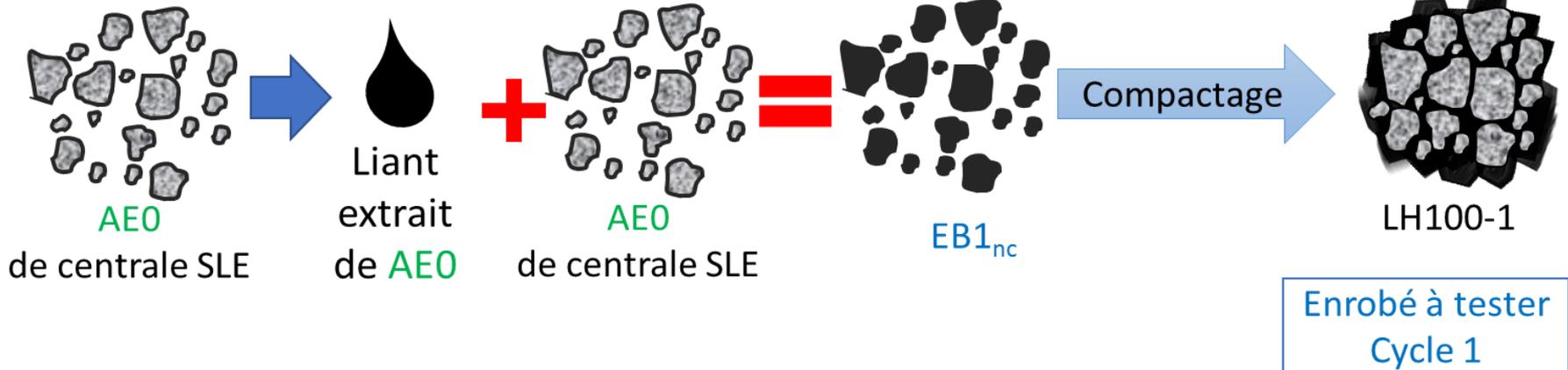
Caractéristiques communes aux enrobés :

- ~~Même granulométrie~~
- Même TL=5.4%
- [BBSG 3 0/10]

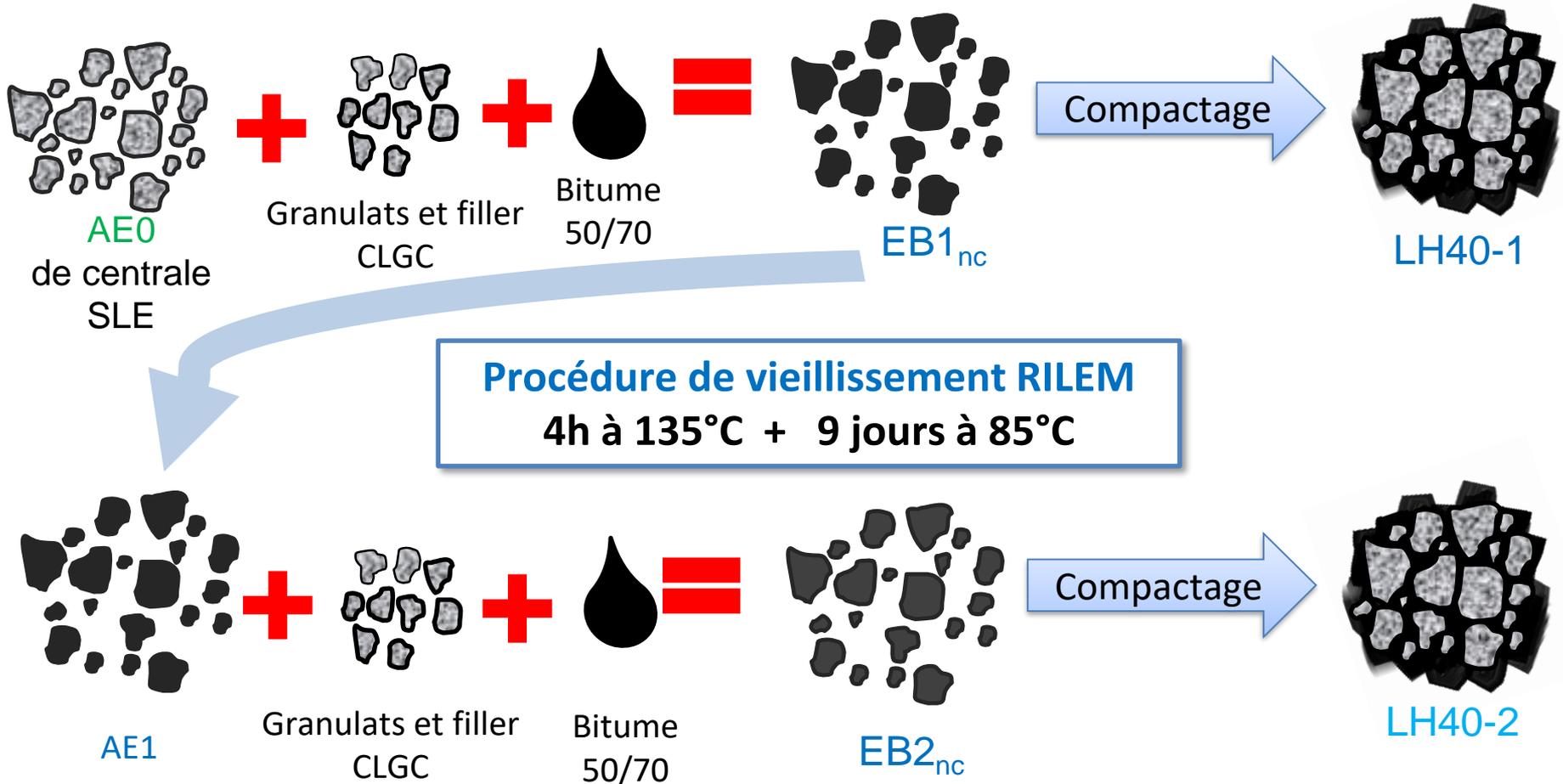


$TL_{initiale} = 4.16\%$

$TL_{à\ compléter} = 1.24\%$



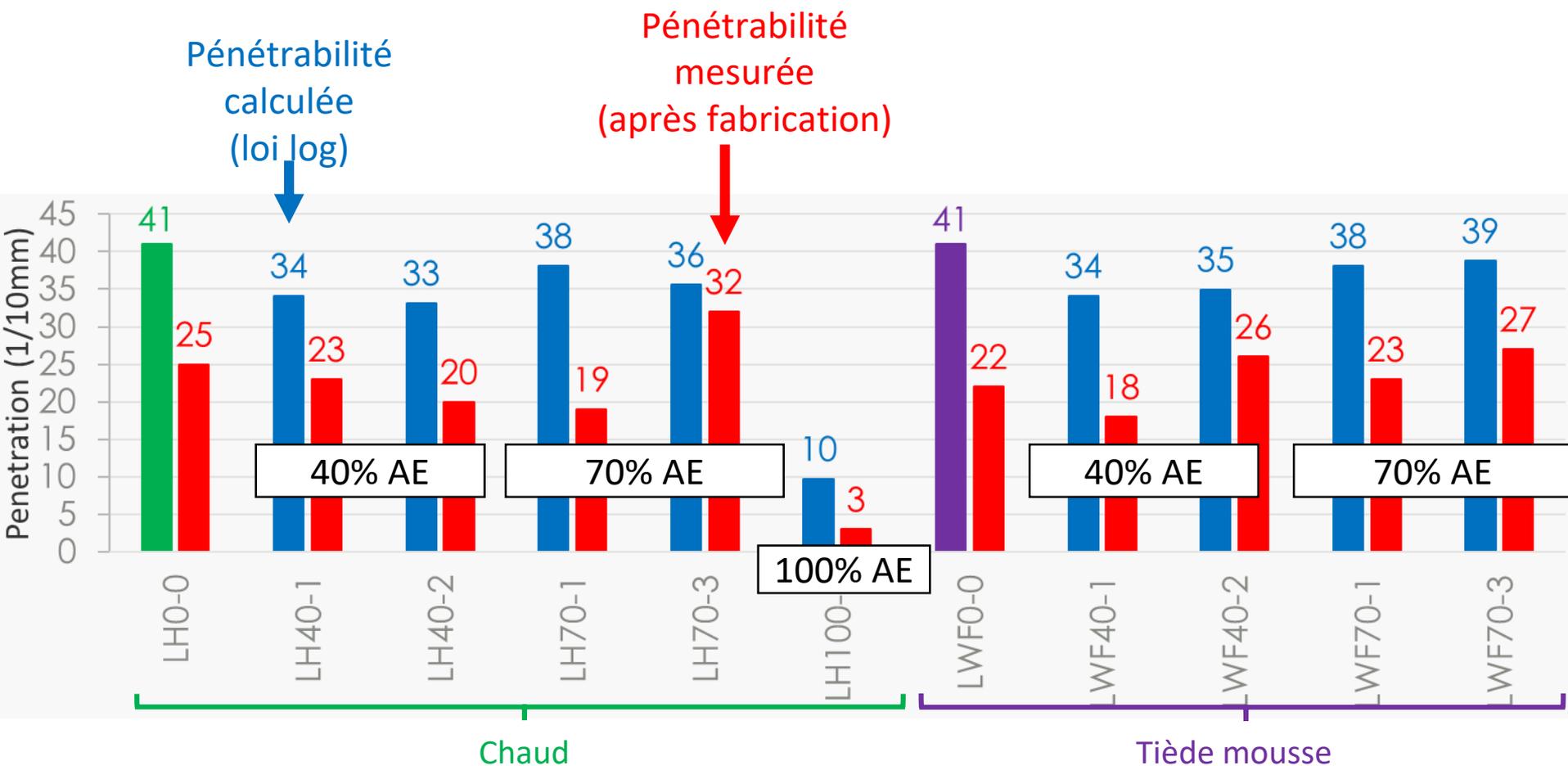
Multirecyclage en laboratoire



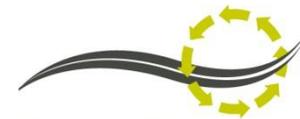
Campagne expérimentale

Fabrication des matériaux en labo

Vérification de la correction apportée :



Campagne expérimentale



Essais réalisés



Essai de module complexe
Viscoélasticité linéaire (VEL)



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



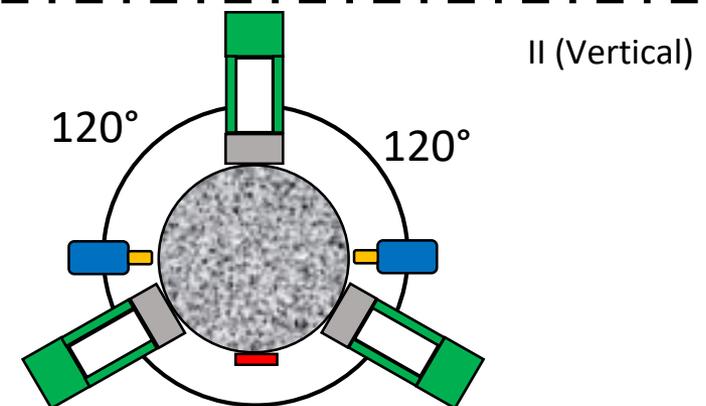
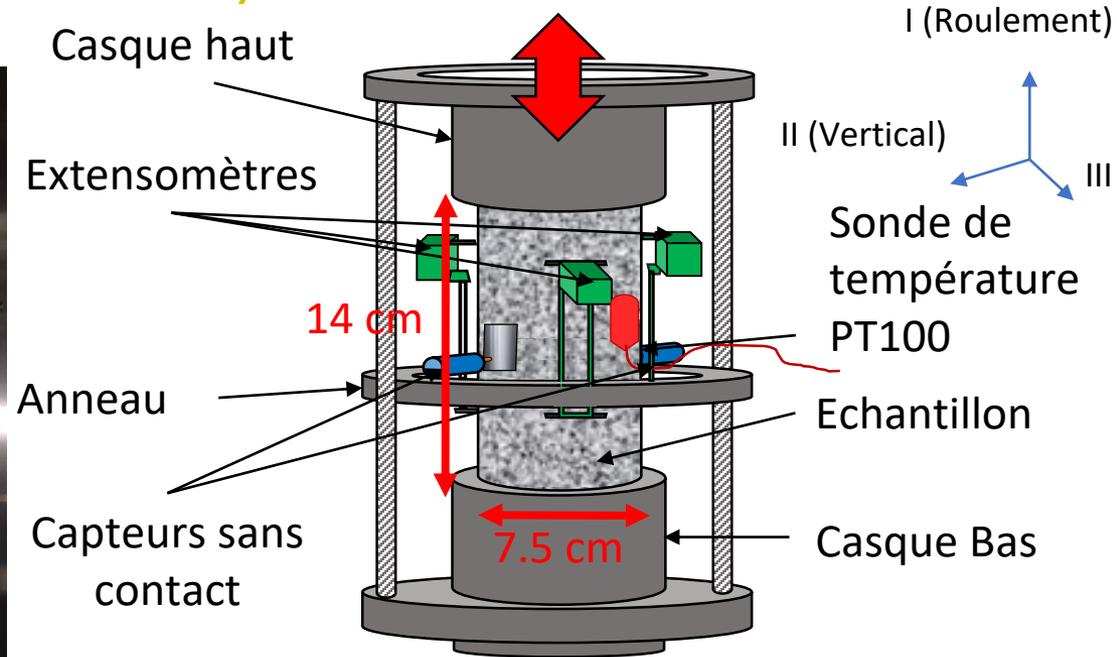
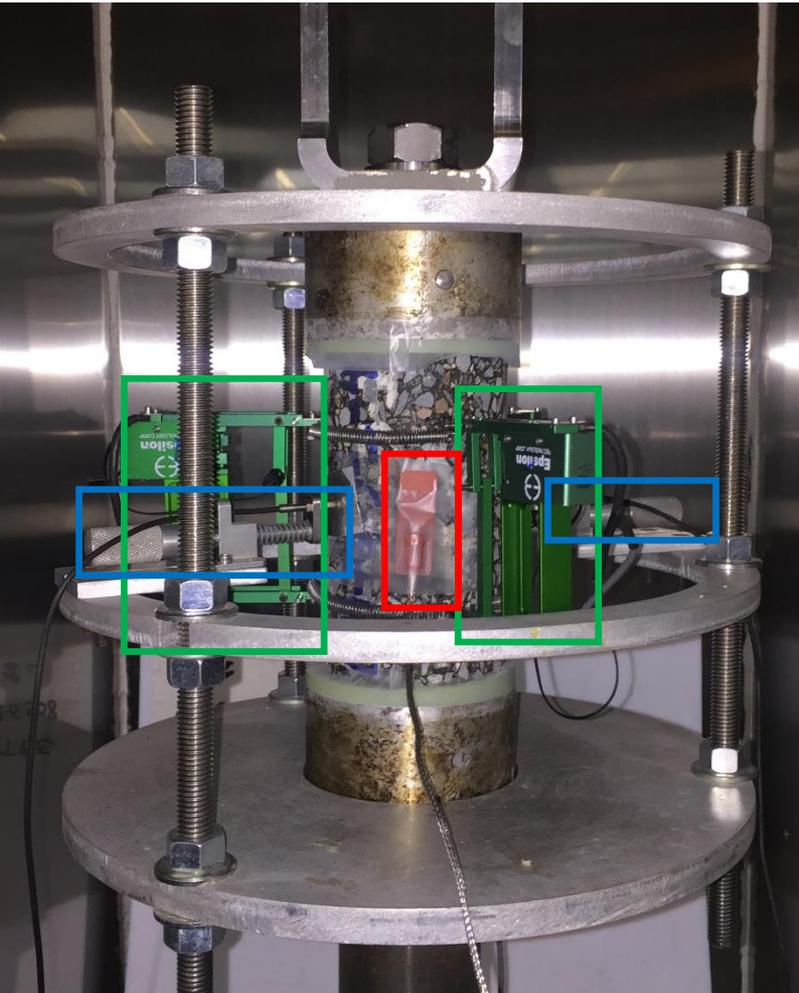
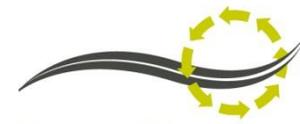
Essai de propagation de
fissure
Fissuration à froid, remontée de fissure



Module complexe

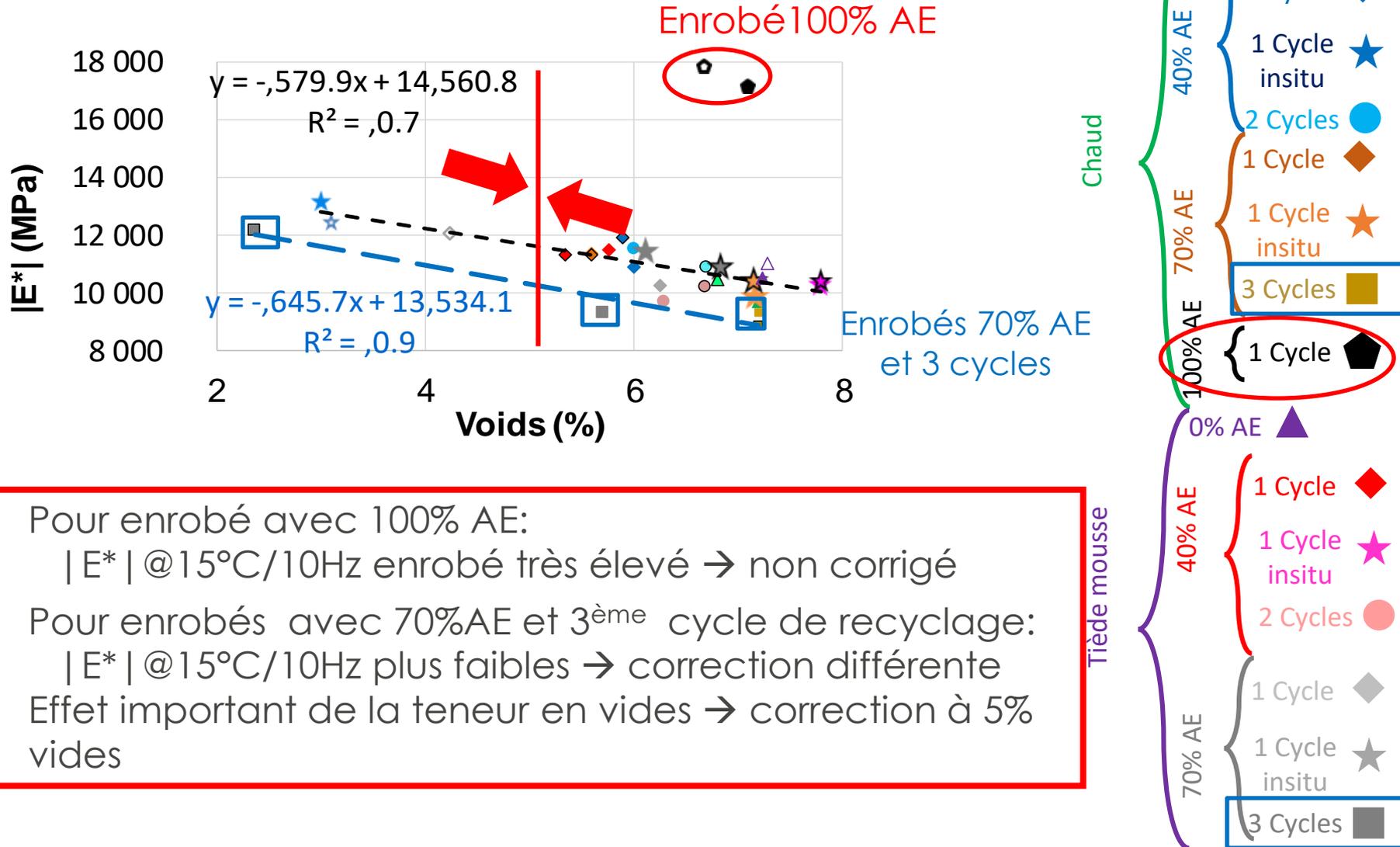
Dispositif expérimental

Traction/compression sur cylindre



Résultats E* @ 15°C/10Hz

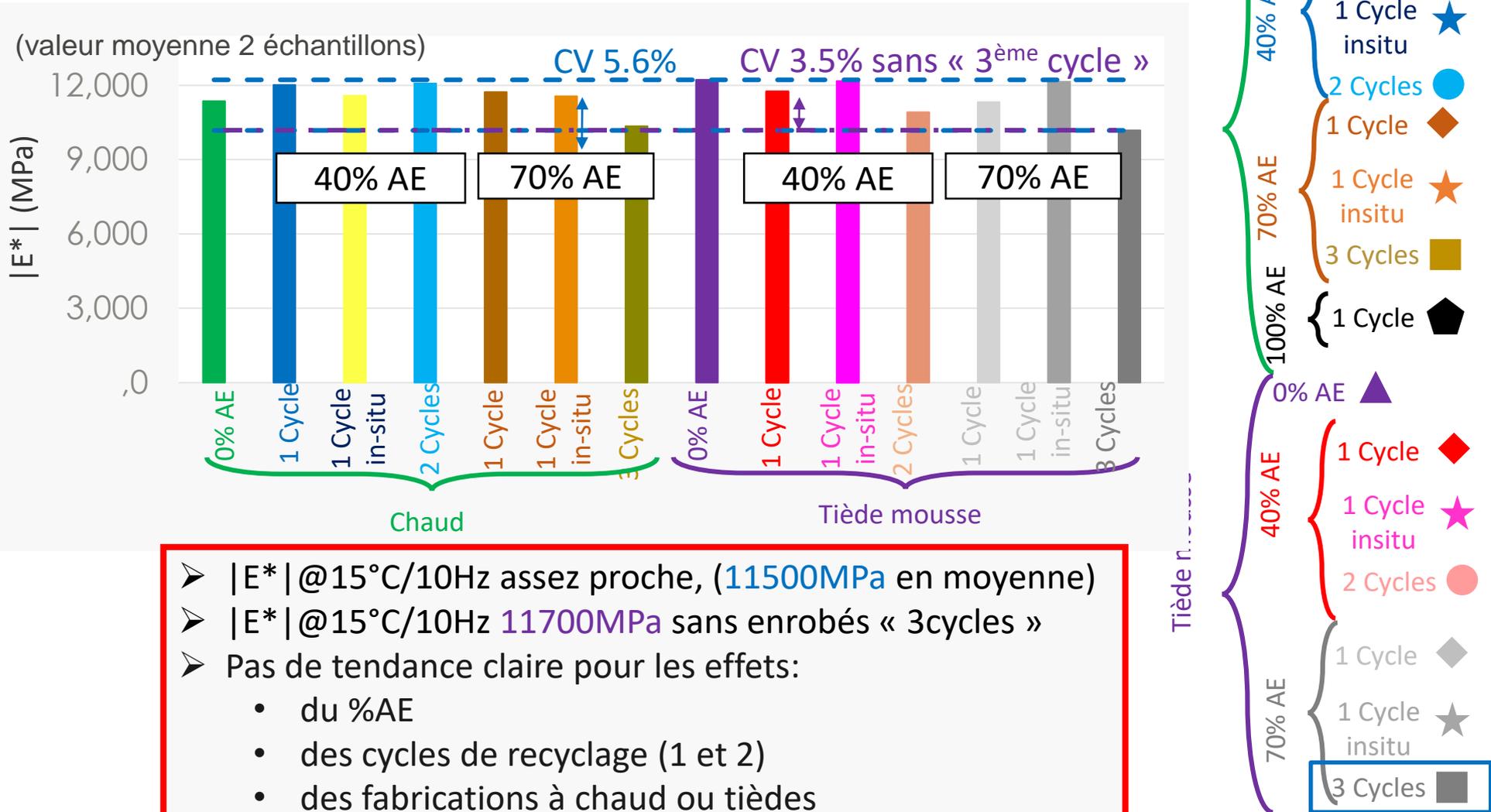
Effet de la teneur en vides



- 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

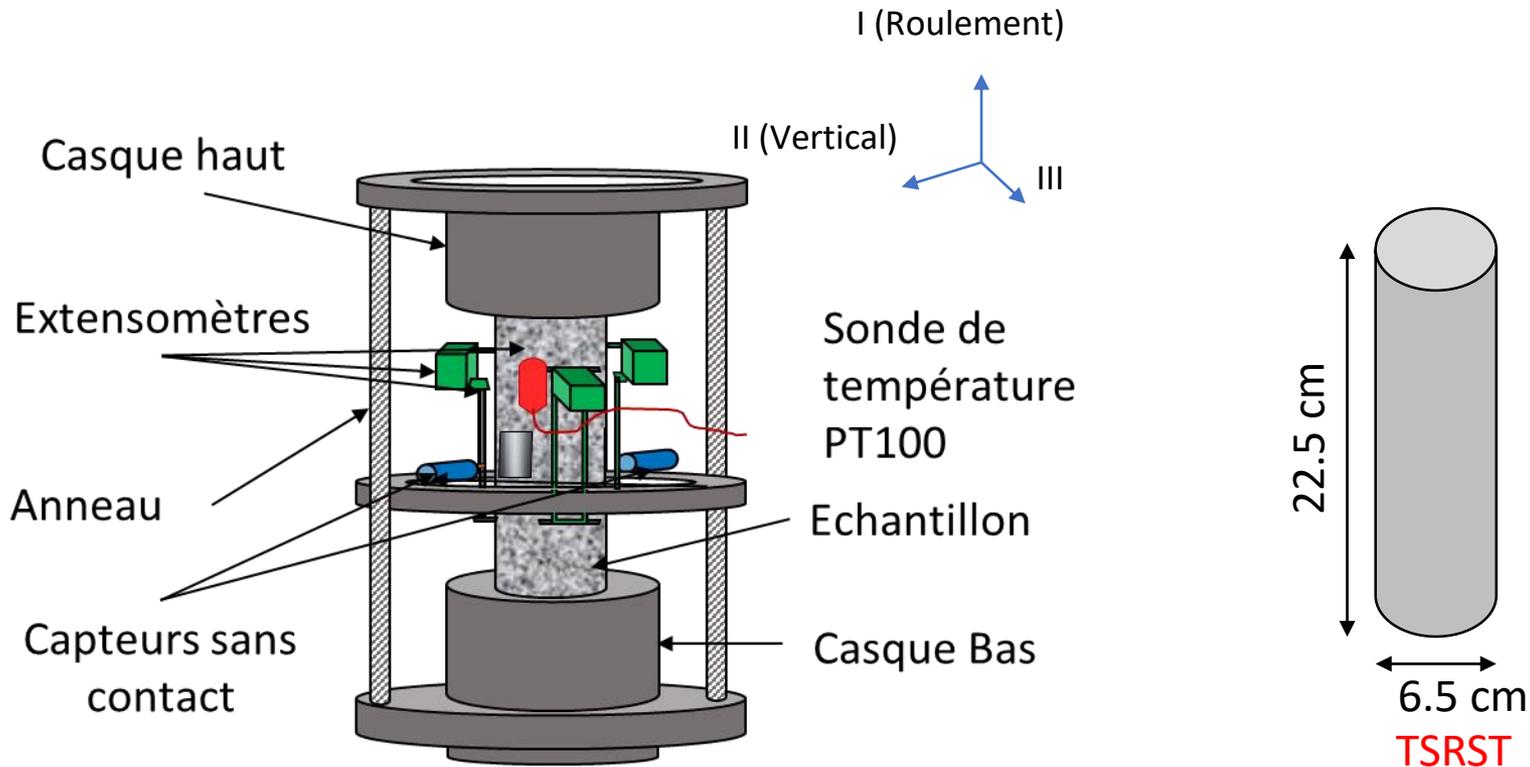
Résultats corrigés à 5% de vides



- |E*| @15°C/10Hz assez proche, (11500MPa en moyenne)
- |E*| @15°C/10Hz 11700MPa sans enrobés « 3cycles »
- 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

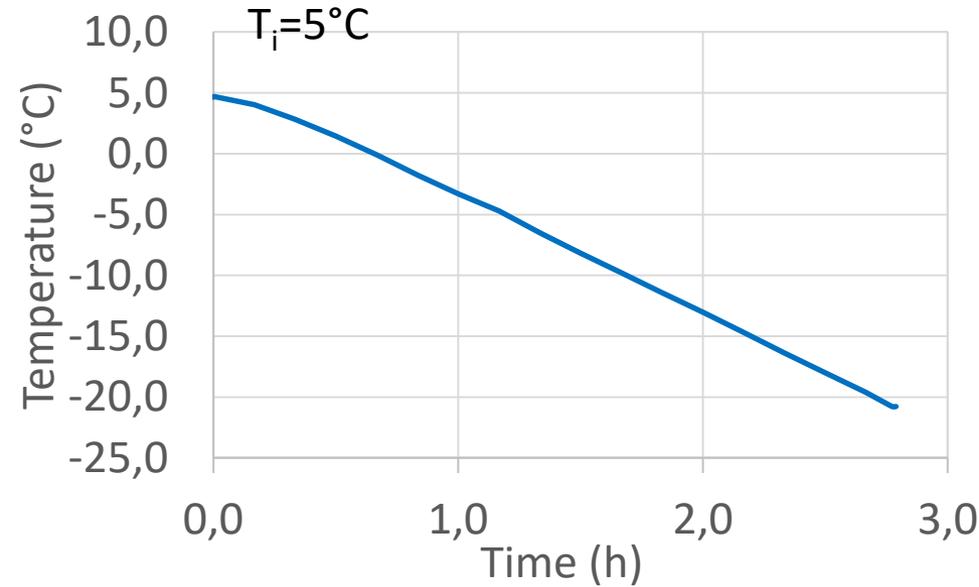
Retrait thermique empêché (TSRST)

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

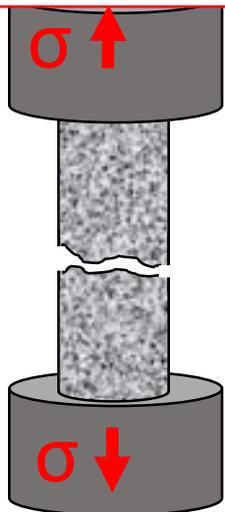


Même dispositif que le essai de
module complexe

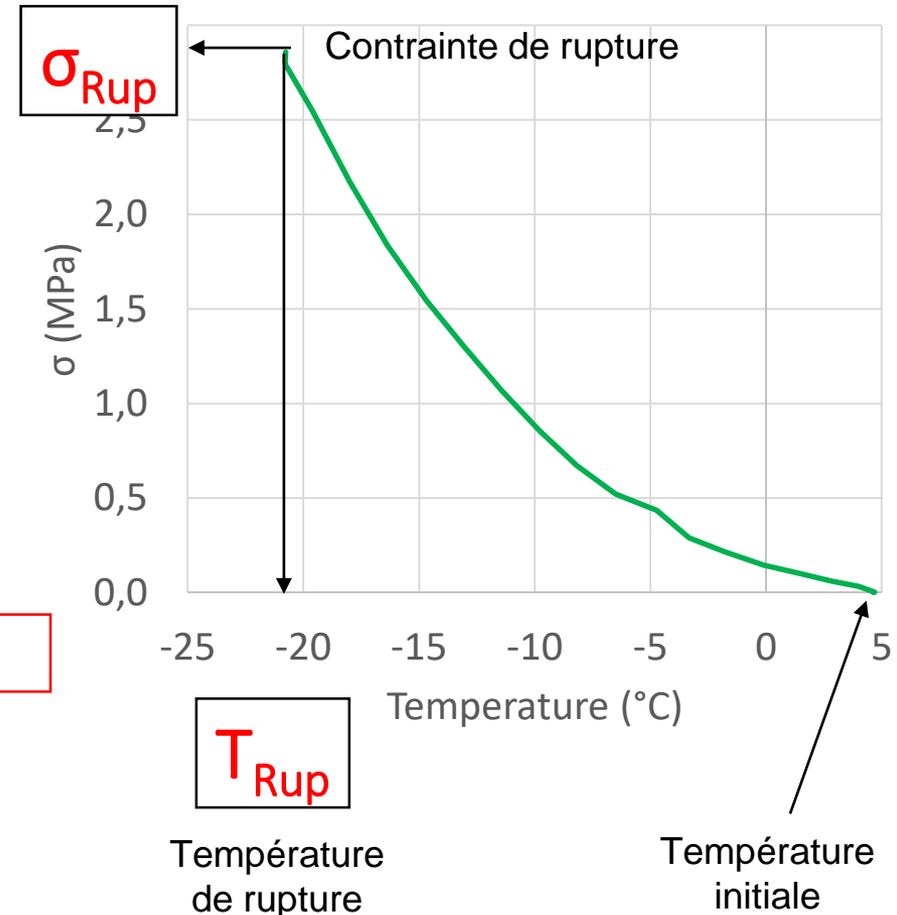
Procédure de l'essai TSRST



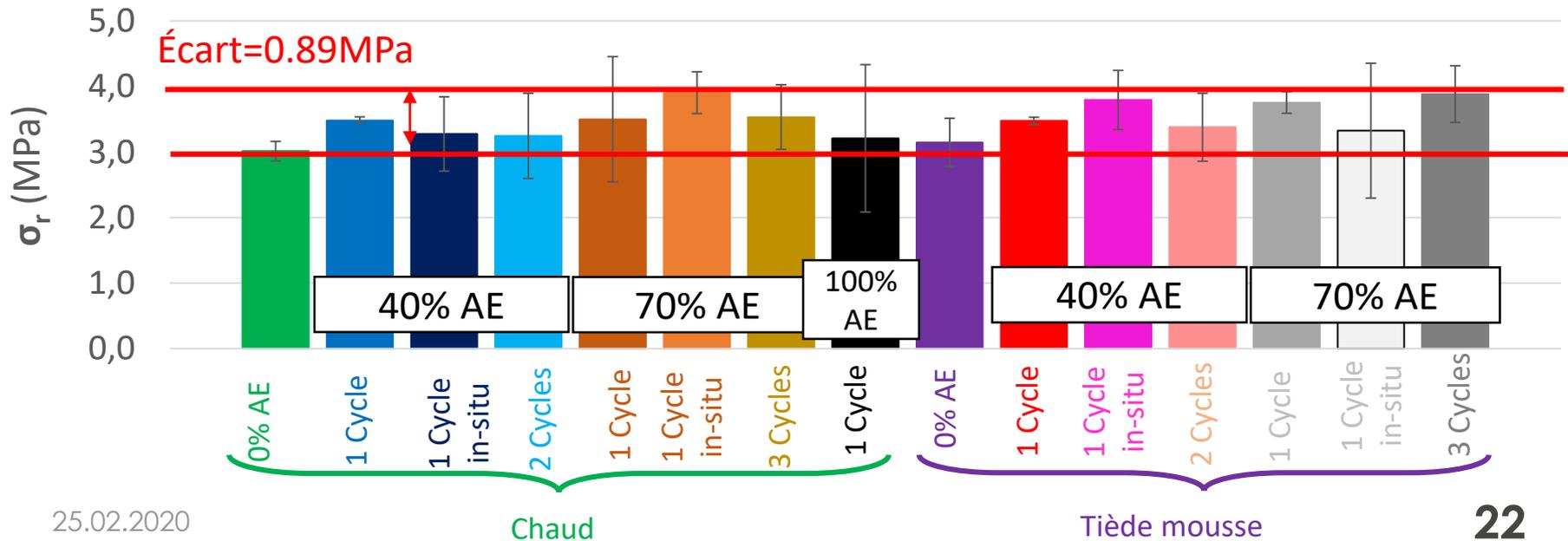
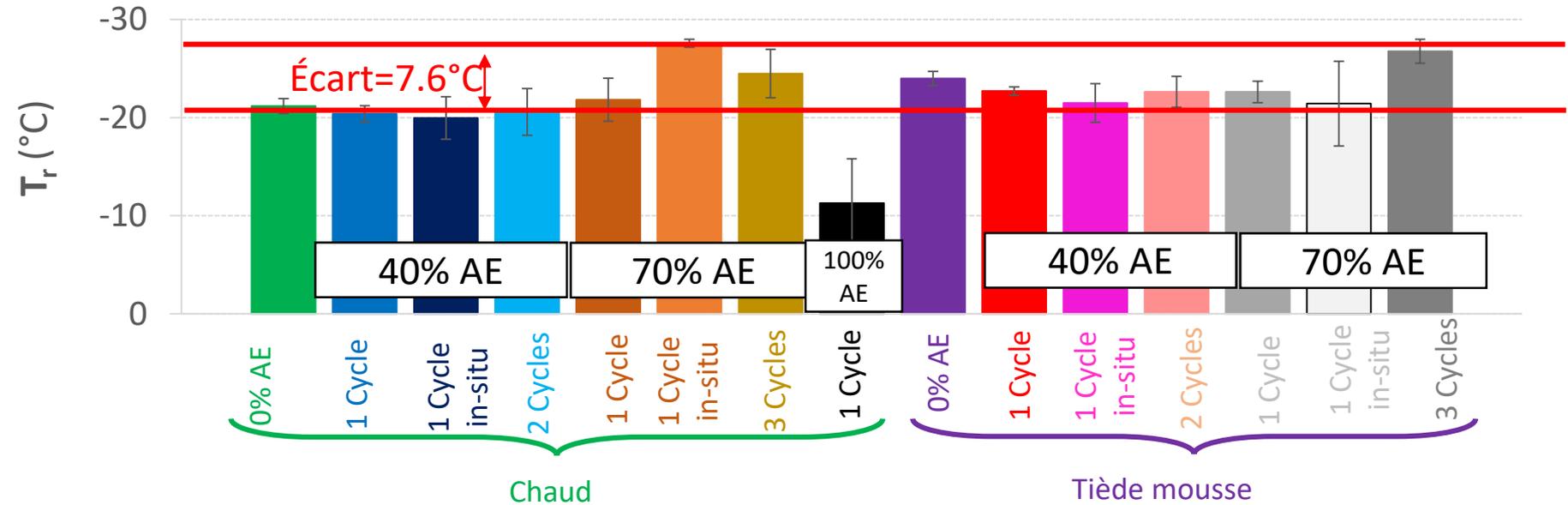
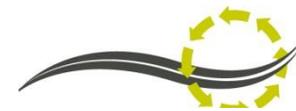
Moyenne sur 3 échantillons testés par matériau



$\varepsilon_{ax} = 0$
 $T_i = 5^\circ\text{C}$
 -10°C/h



Contrainte et température de rupture



Conclusions

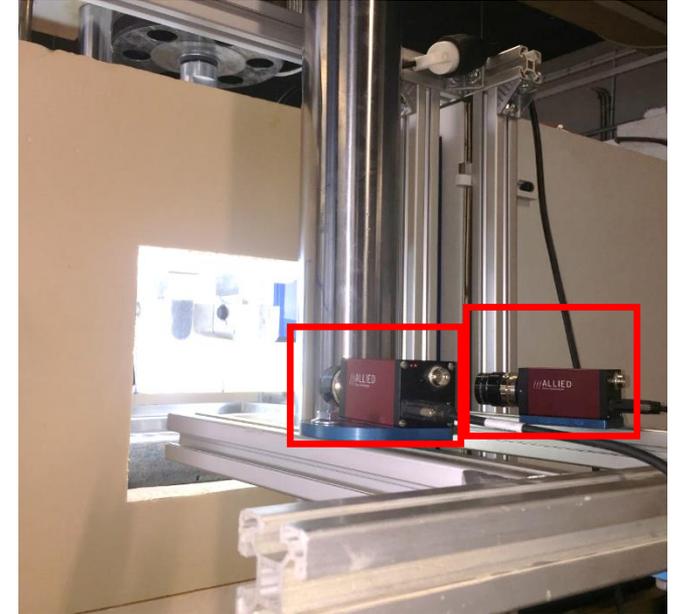
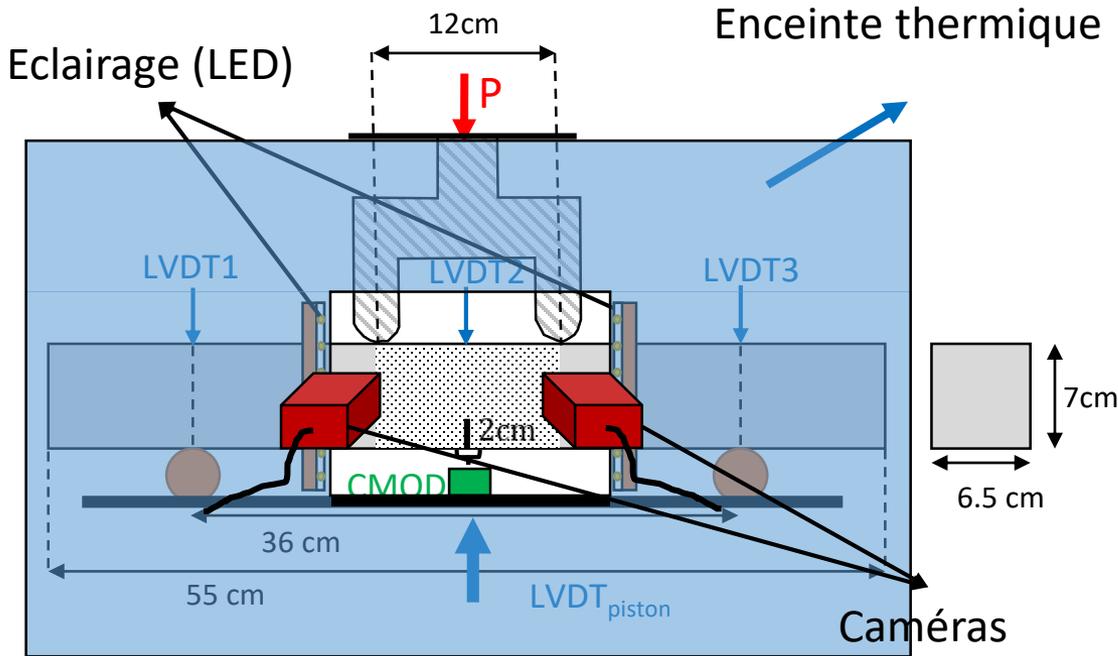
→ TSRST

- Température de rupture:
 - peu influencée par %AE, nombre de cycle, type de fabrication
 - sauf enrobés 70% AE avec 1 et 3 cycles
 - et 100% AE (matériau différent)
- Contrainte de rupture:
 - influencée par teneur en vides

Propagation de fissure

Dispositif expérimental

Essai de propagation en flexion 4 points

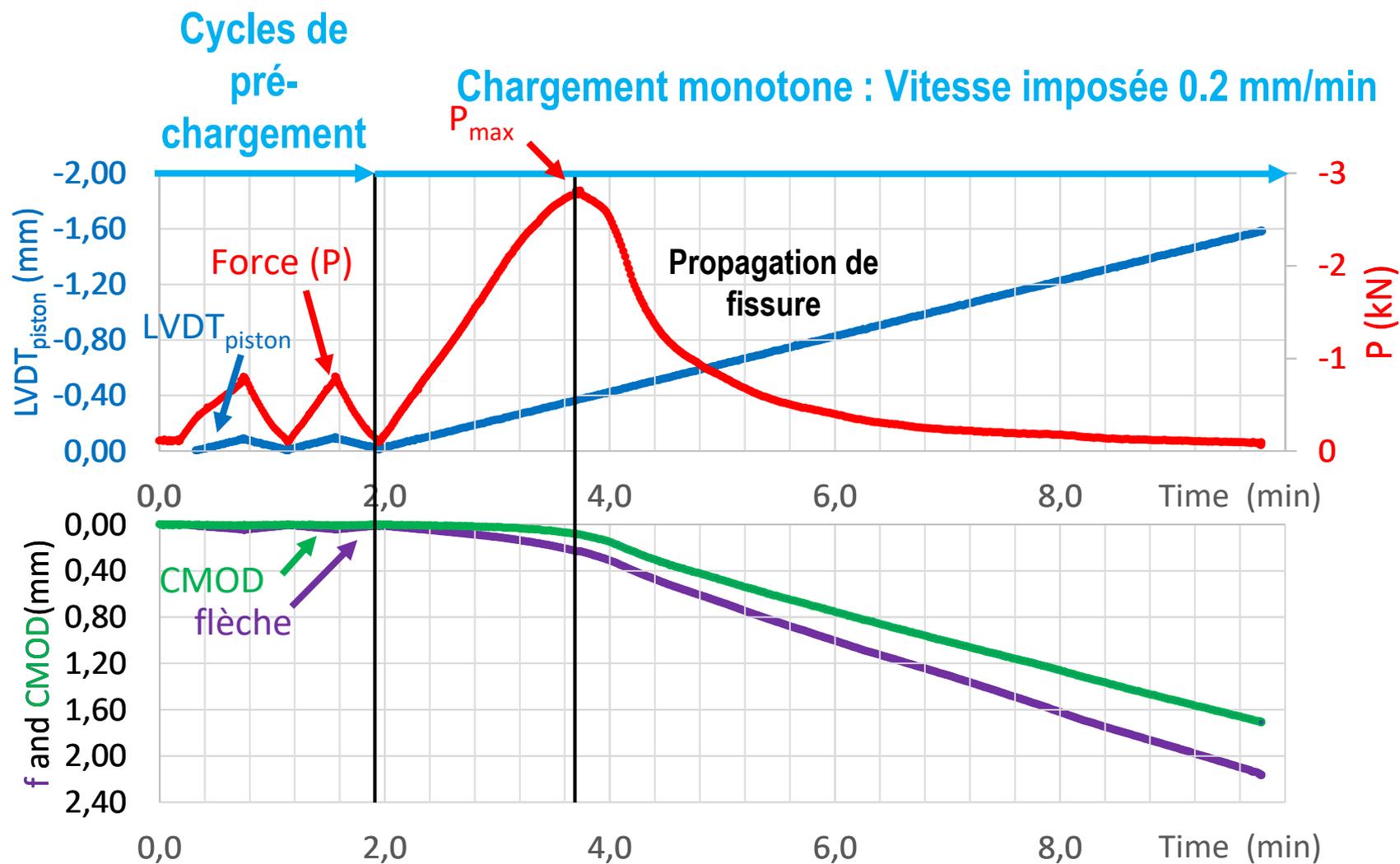


Mesures:

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

Procédure d'essai

- ⇒ Température : -5°C et -15°C



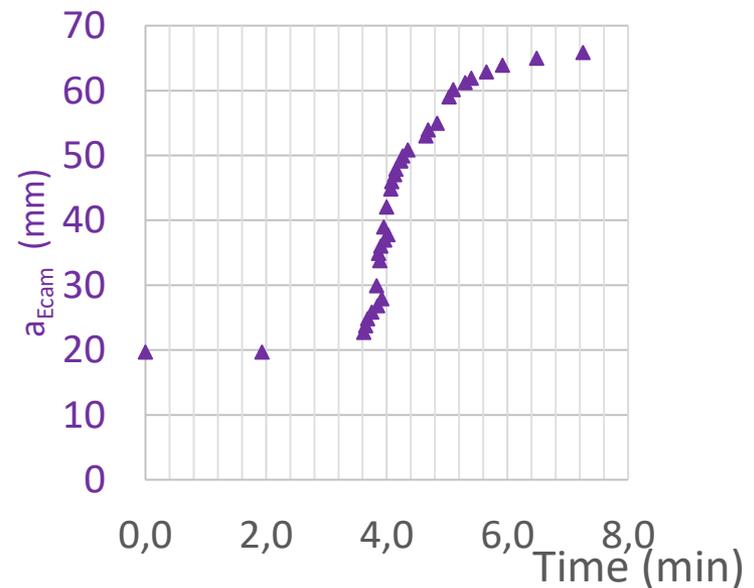
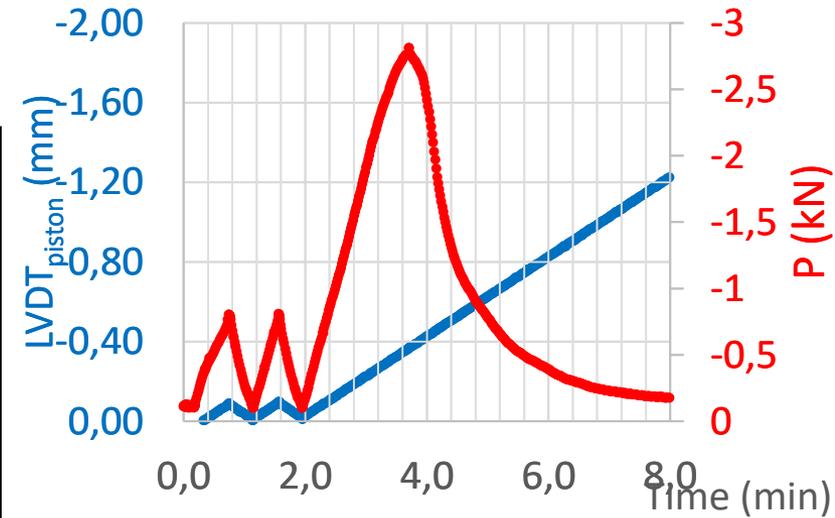
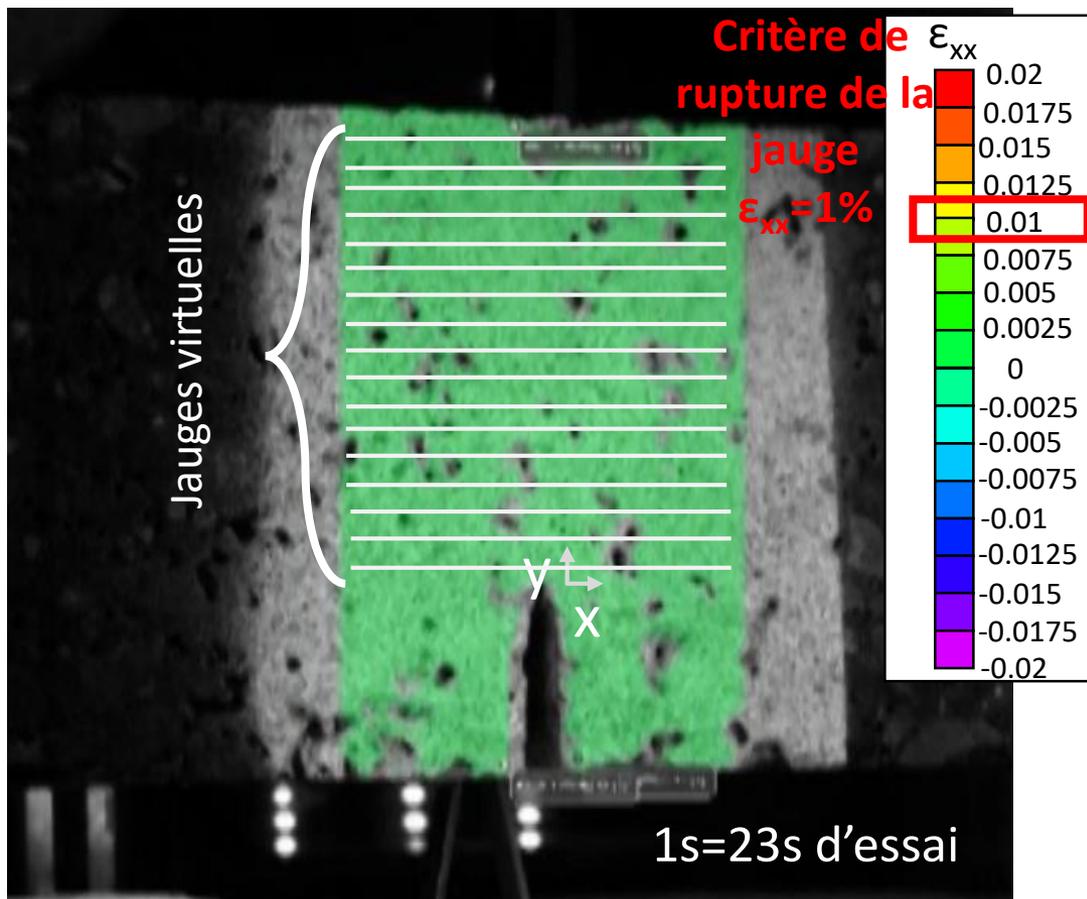
Analyse des essais

- ⇒ 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

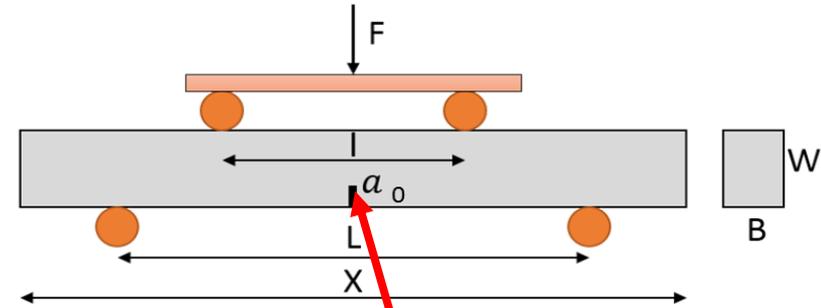
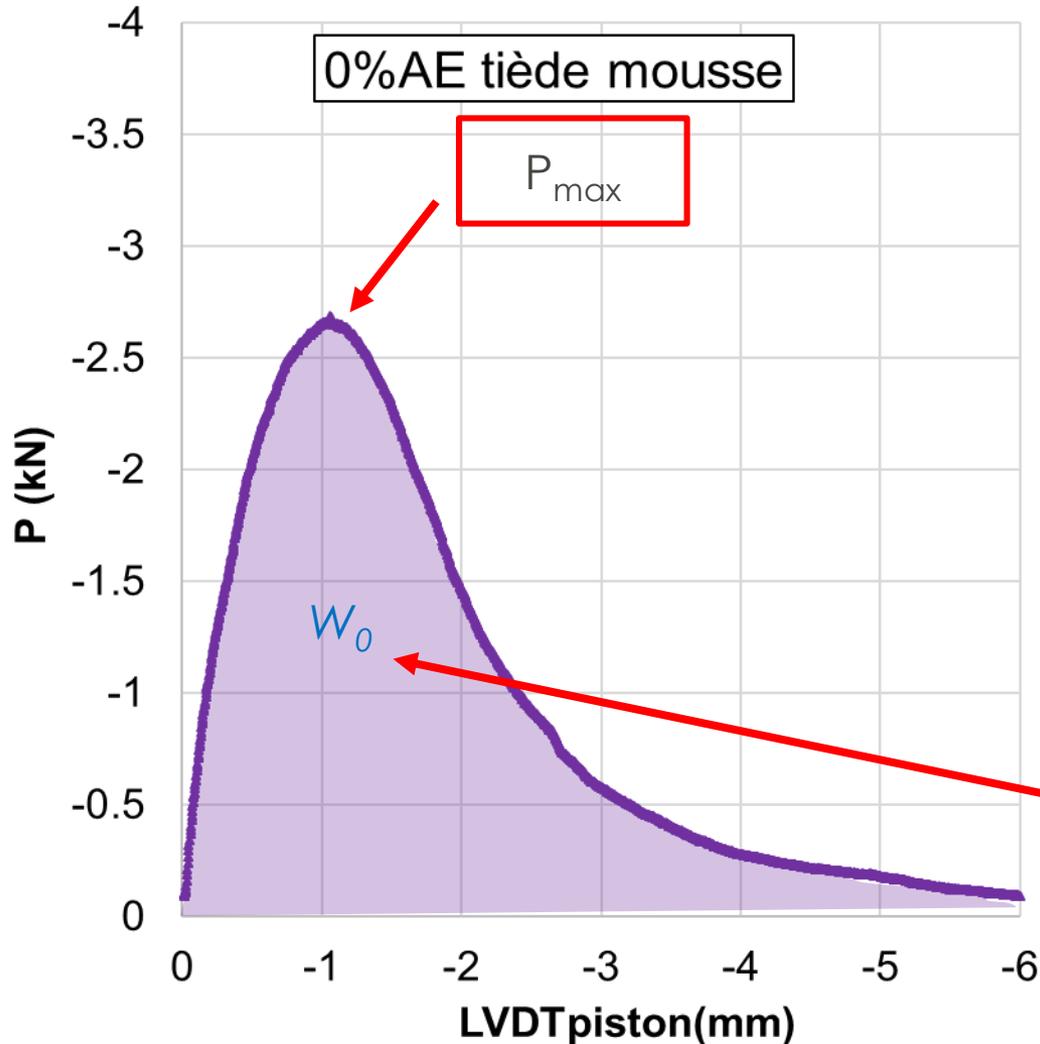
Caméras : Jauge virtuelle de fissuration

Ex: enrobé 40% AE avec 2 cycles à chaud



Analyse des propriétés de fissuration

Définition des paramètres



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

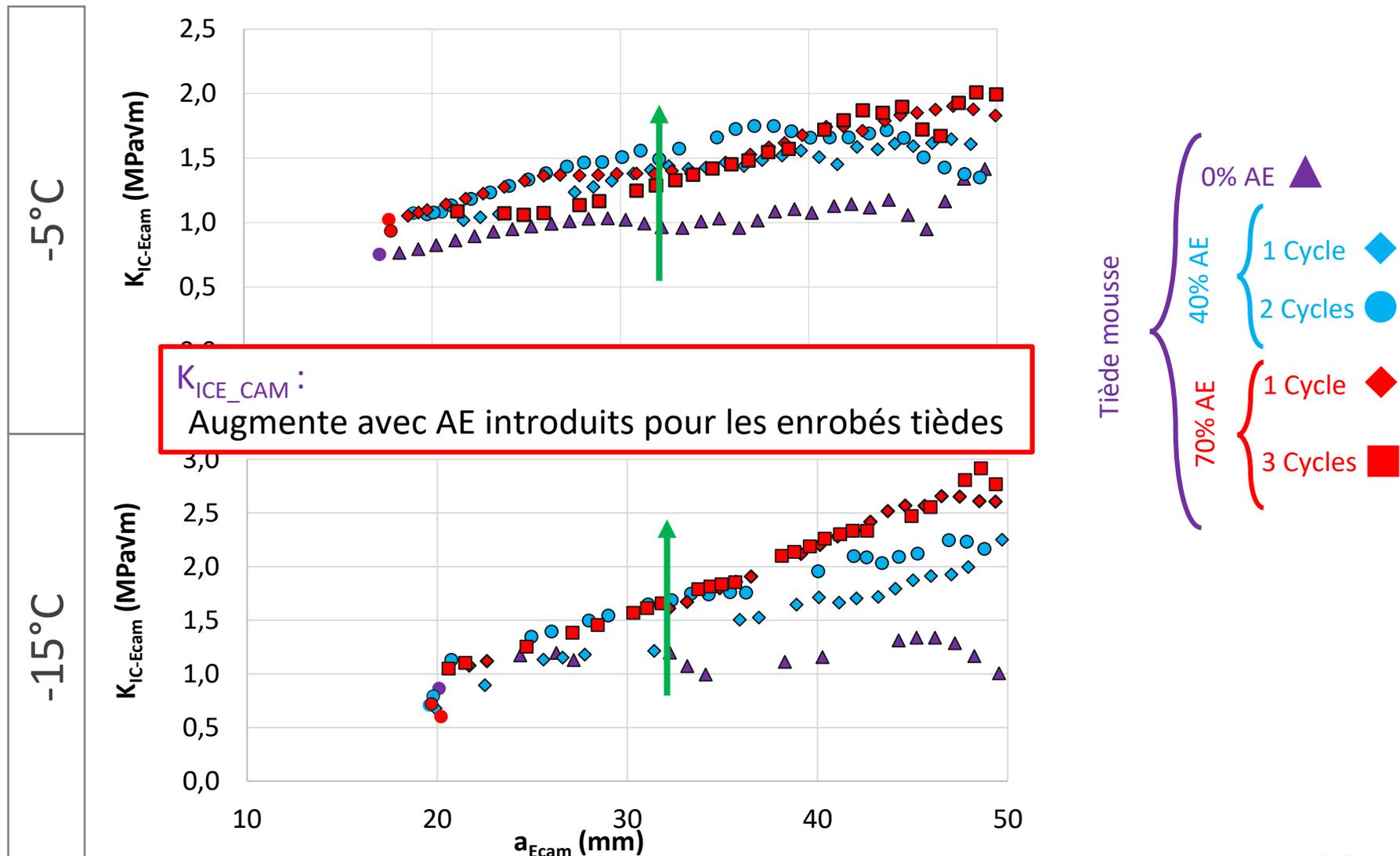
Facteur d'intensité de contrainte :
lié à la valeur limite de la
contrainte en pointe de fissure
pour propager la fissure

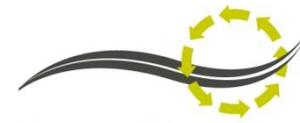
$$G_f = \frac{W_0}{B(W - a_0)}$$

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

Analyse des propriétés de fissuration

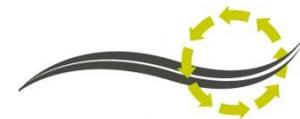
Facteur d'intensité de contraintes K_{IC}





→ 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})



BILAN IMPROVMURE

- 2 thèses
- 17 livrables
- ≈ 20 articles scientifiques
- 3 journées thématiques
- 1 site internet (www.improvmure.fr)
- 1 journée de restitution

MERCI DE VOTRE ATTENTION