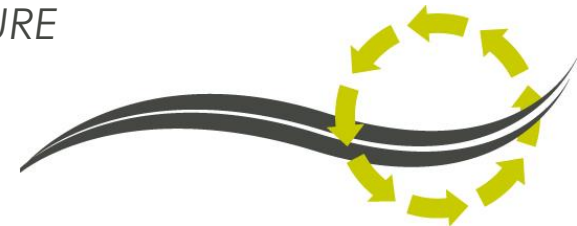


Propriétés Thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés

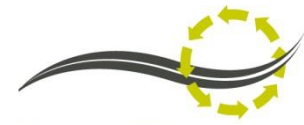
A. PEDRAZA, C. SAUZÉAT, H. DI BENEDETTO

Université de Lyon / ENTPE

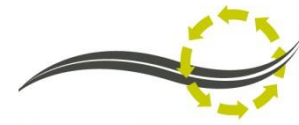
*Journée de restitution ANR IMPROVMURE
6 décembre 2018 – FNTF Paris*



PN MURE - ANR IMPROVMURE



1. Contexte
2. Campagne expérimentale
3. Essais de module complexe
4. Essais TSRST
5. Essais de propagation de fissure
6. Conclusion



Projet ANR IMPROVMURE

Caractériser les propriétés des enrobés multi-recyclés

- Influence d'AE issus de recyclages successifs
- Influence nouvelles techniques de fabrication (fabrication tiède)

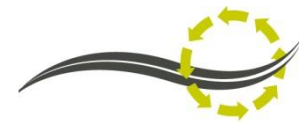


Collaboration ENTPE-EIFFAGE

Thèse Alvaro PEDRAZA

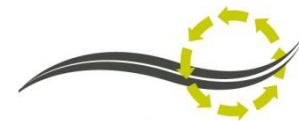
« Propriétés thermomécaniques des enrobés multi-recyclés »

Soutenue le 6 mars 2018



2. Campagne expérimentale

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 PN MURE)

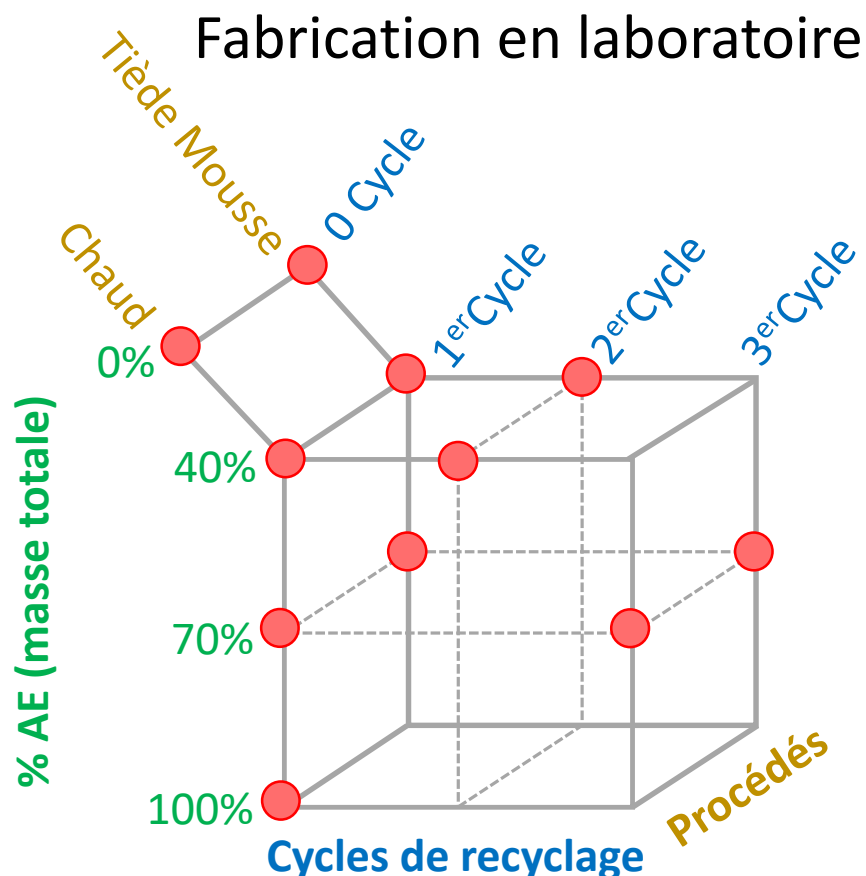
Caractéristiques de tous les enrobés étudiés

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

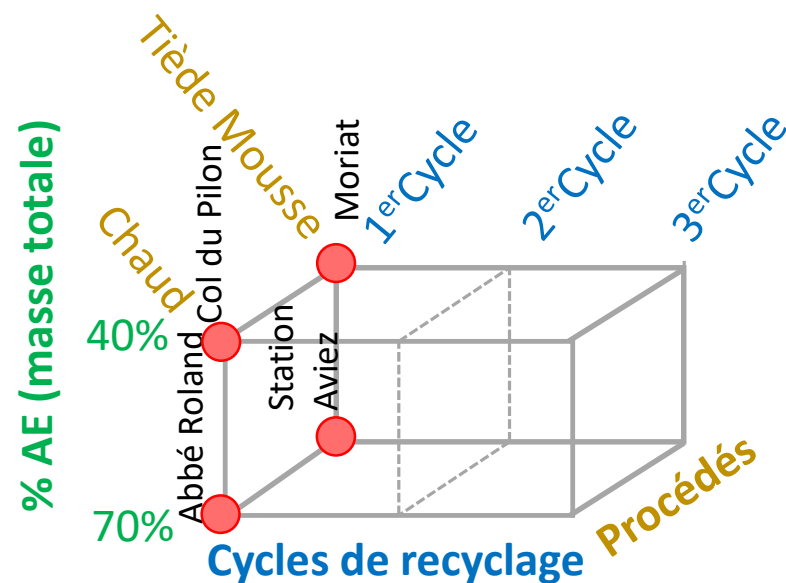
Campagne expérimentale



Matériaux testés

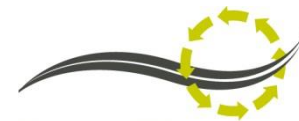


Prélèvement sur chantier



● Matériaux soumis à des essais thermomécaniques (15 Matériaux testés)

Campagne expérimentale



Composition des matériaux en labo

Granulats :

- Granite (Carrière Lafarge à Cusset, 03)
- Filler récupéré au poste SLE (Arnas, 69)

Aggrégats d'enrobés (AE) :

- AE₀ récupéré au poste SLE (Arnas, 69)
- AEn obtenu par vieillissement accéléré en laboratoire (méthode RILEM) des enrobés produits au cycle précédent

Agrégat d'enrobé	Pour la fabrication d'enrobé	Bitume extrait	
		Pénétrabilité (1/10mm)	TBA (°C)
AE ₀	1 ^{er} cycle de recyclage	10	76.2
AE ₁	2 ^{ème} cycle 40%, à chaud	14	72.8
AE ₁	2 cycle 40%, tiède	15	70.0
AE ₂	3 ^{ème} cycle 70%, à chaud	18	67.8
AE ₂	3 ^{ème} cycle 70%, tiède	18	57.9

Campagne expérimentale



Composition des matériaux en labo

Granulats :

- Granite (Carrière Lafarge à Cusset, 03)
- Filler récupéré au poste SLE (Arnas, 69)

} **Projet MURE
(chantiers à 40%)**

Aggrégats d'enrobés (AE) :

- AE0 récupéré au poste SLE (Arnas, 69)
- AEn obtenu par vieillissement accéléré en laboratoire (méthode RILEM) des enrobés produits au cycle précédent

} **Projet MURE
(chantiers à 40%)**

Liant d'apport :

- 3 liants TOTAL

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

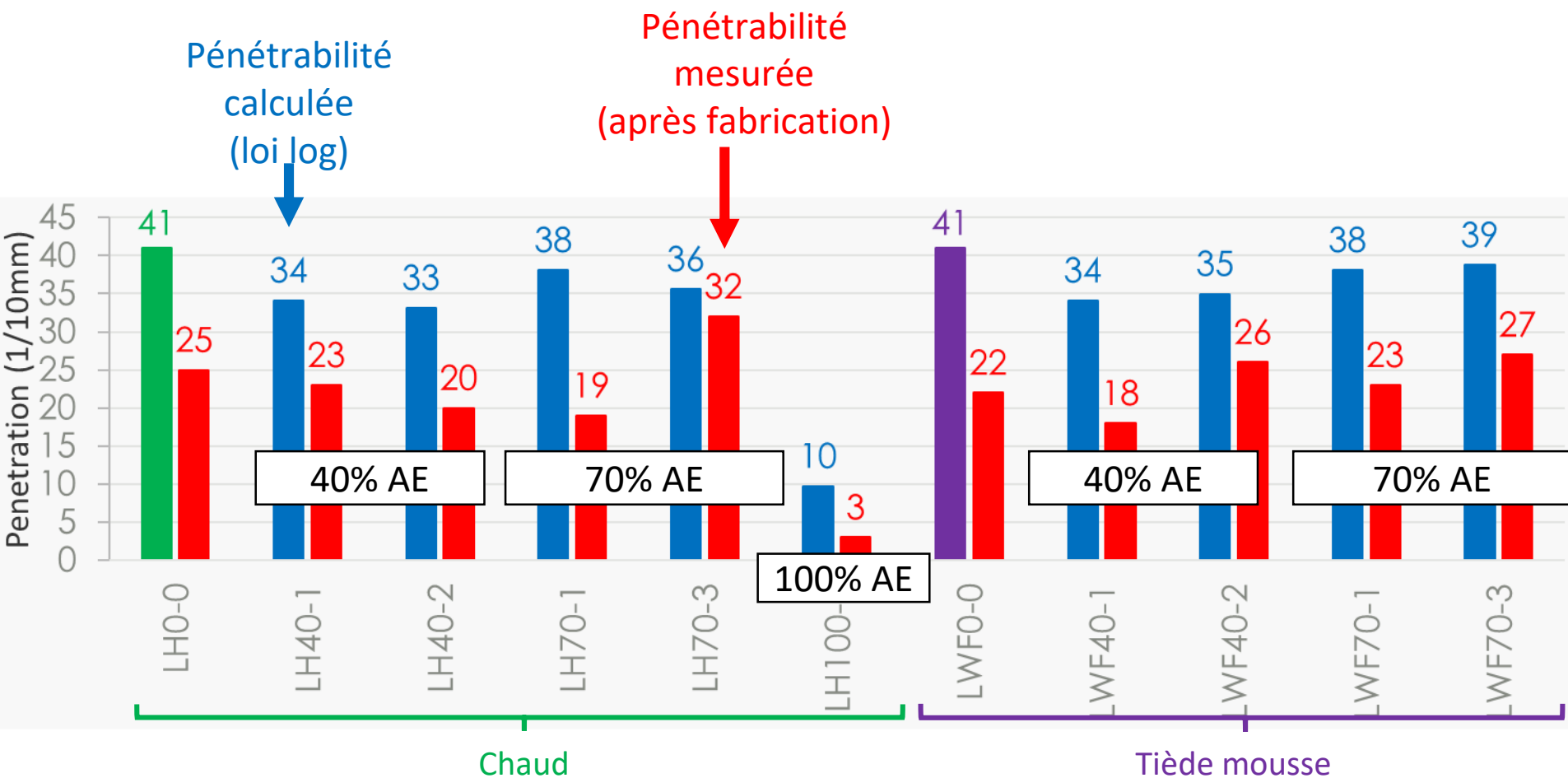
} **Projet
MURE**

Campagne expérimentale



Fabrication des matériaux en labo

Vérification de la correction apportée :

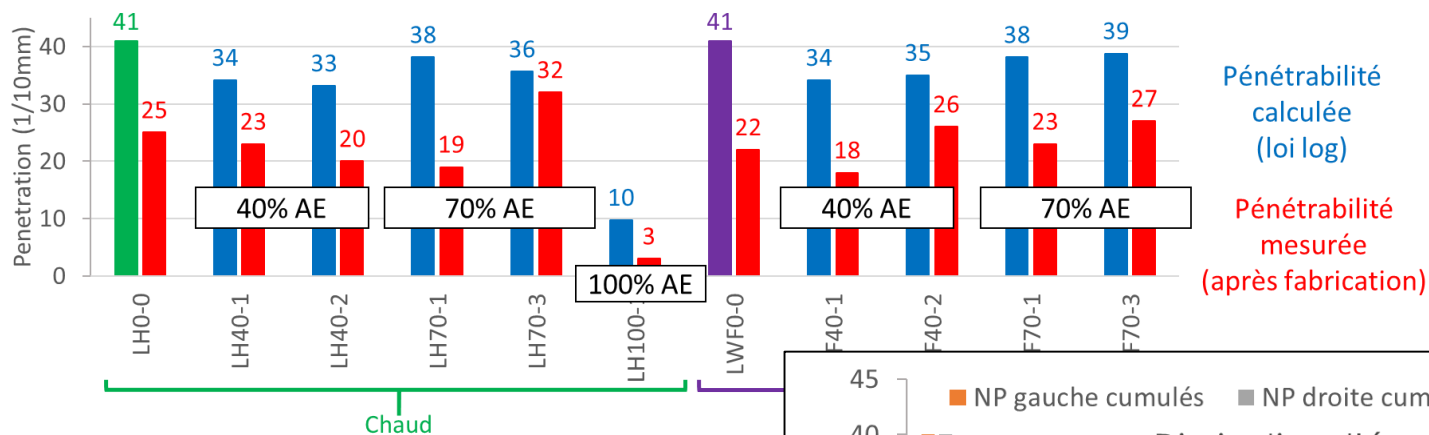


Campagne expérimentale

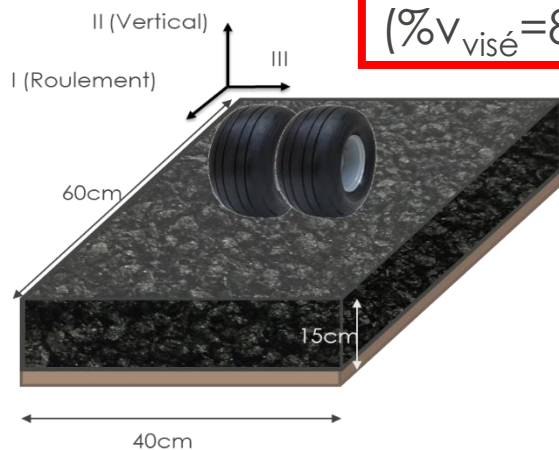


Fabrication des matériaux en labo

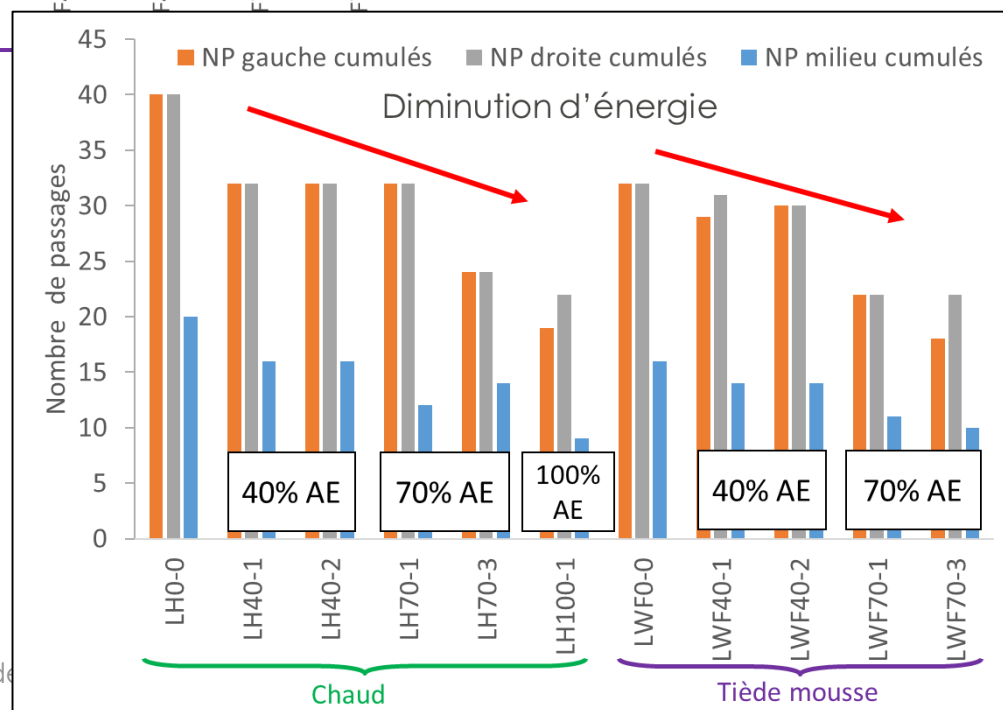
Vérification de la correction apportée :



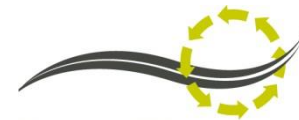
Compactage :



$(\%V_{visé} = 8\%)$



Campagne expérimentale



Essais réalisés



Essai de module complexe

Viscoélasticité linéaire (VEL)



Essai de retrait thermique
empêché (TSRST)

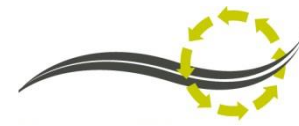
Couplage thermomécanique
(basse température)



Essai de propagation de
fissure

Fissuration à froid, remontée de fissure

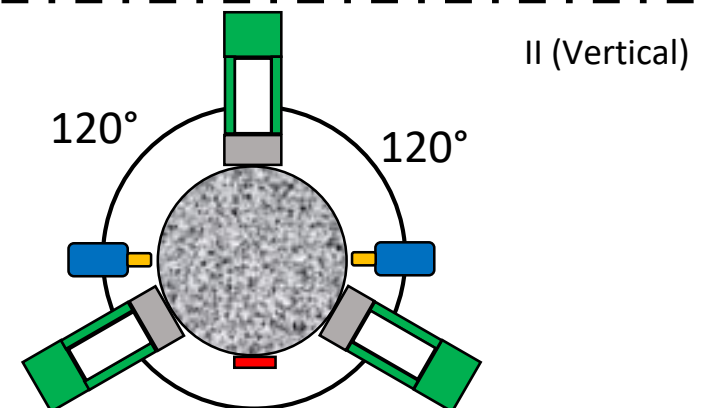
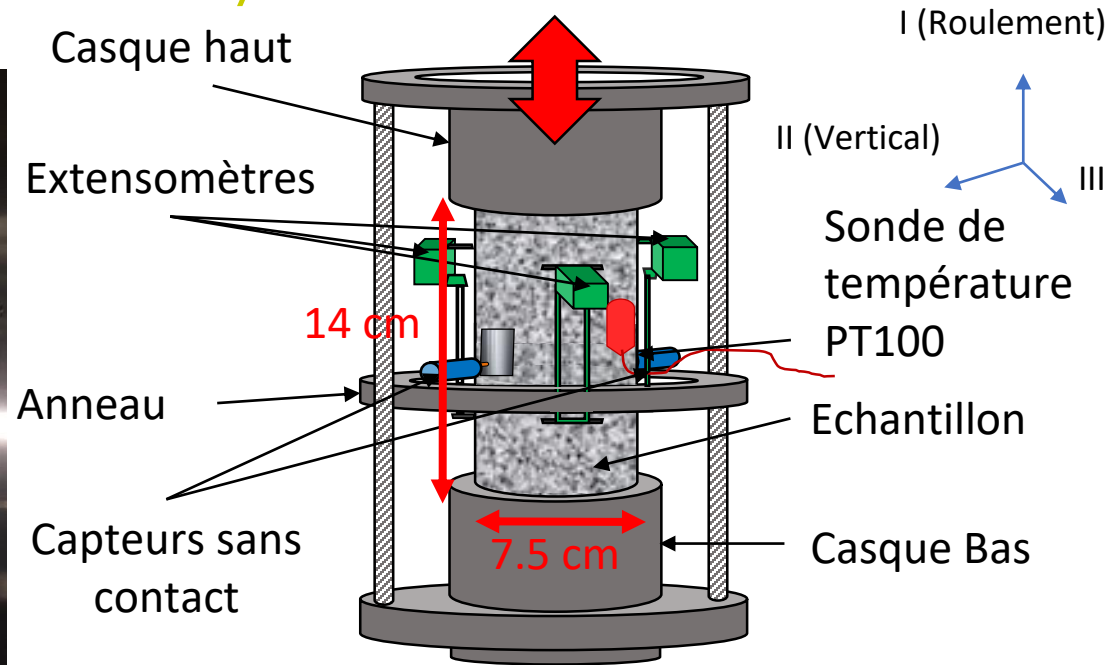
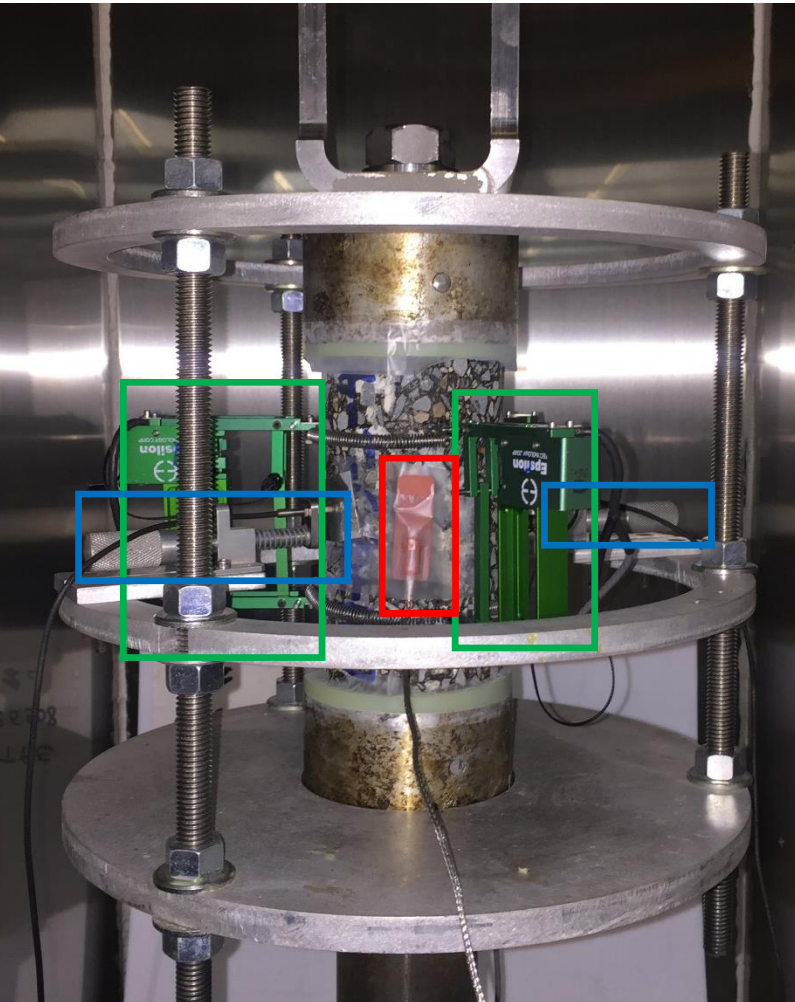
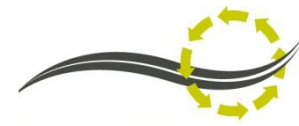




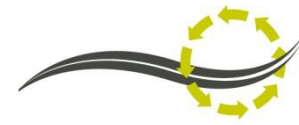
3. Essais de module complexe

Dispositif expérimental

Traction/compression sur cylindre



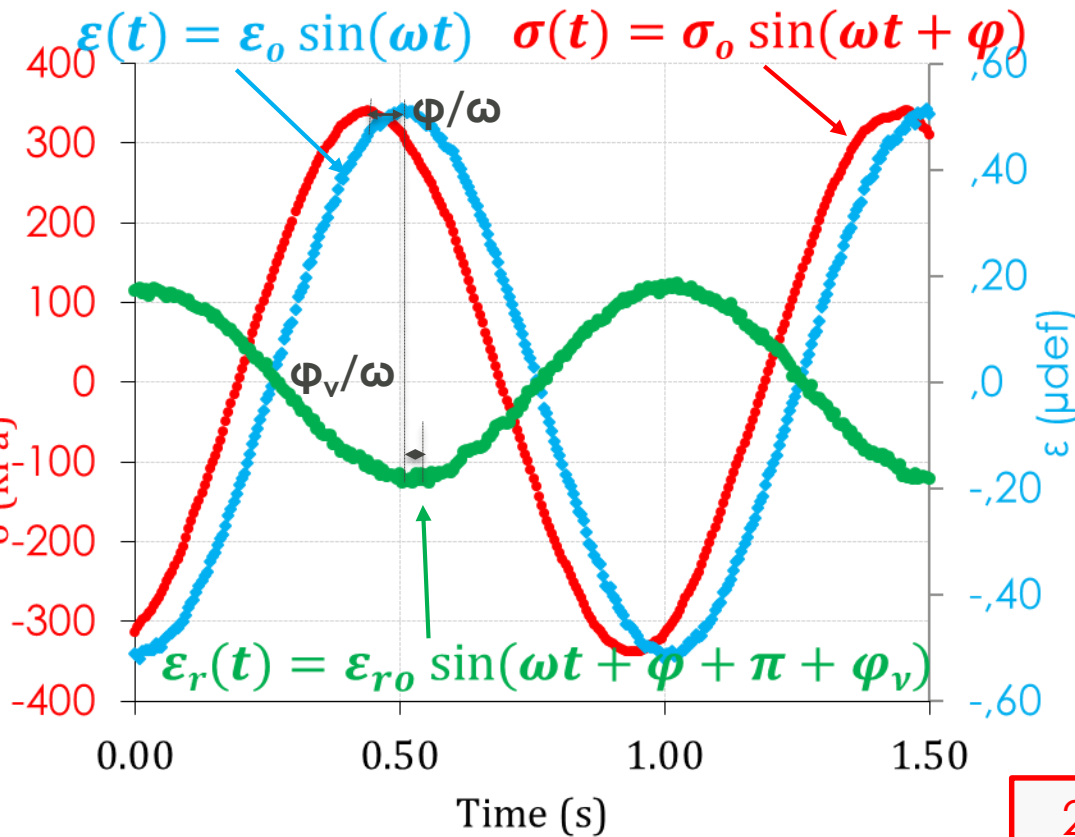
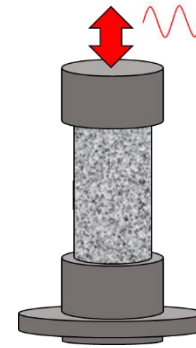
Principe et procédure



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

Fréquences: 0.003Hz to 10Hz

Températures: -25 °C à 52°C



Module complexe

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

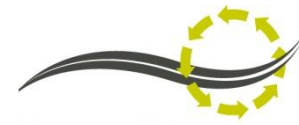
$$E^*(\omega t) = \left| \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \right| e^{i\varphi} = |E^*| e^{i\varphi}$$

Coefficient de Poisson complexe

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

$$\nu^*(\omega t) = \left| \frac{\varepsilon_{r0}}{\varepsilon_0} \right| e^{i\varphi_v} = |\nu^*| e^{i\varphi_v}$$

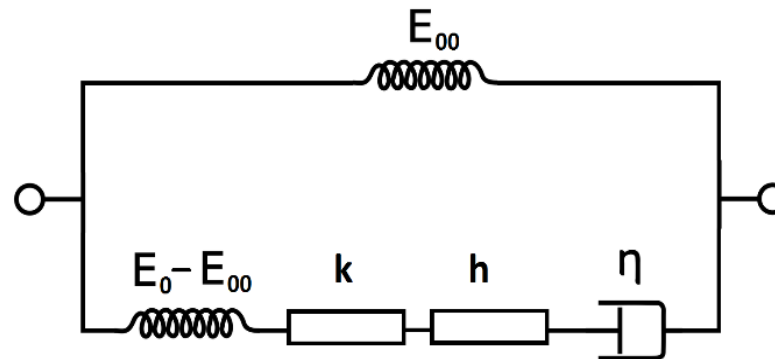
2 échantillons testés par matériau



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

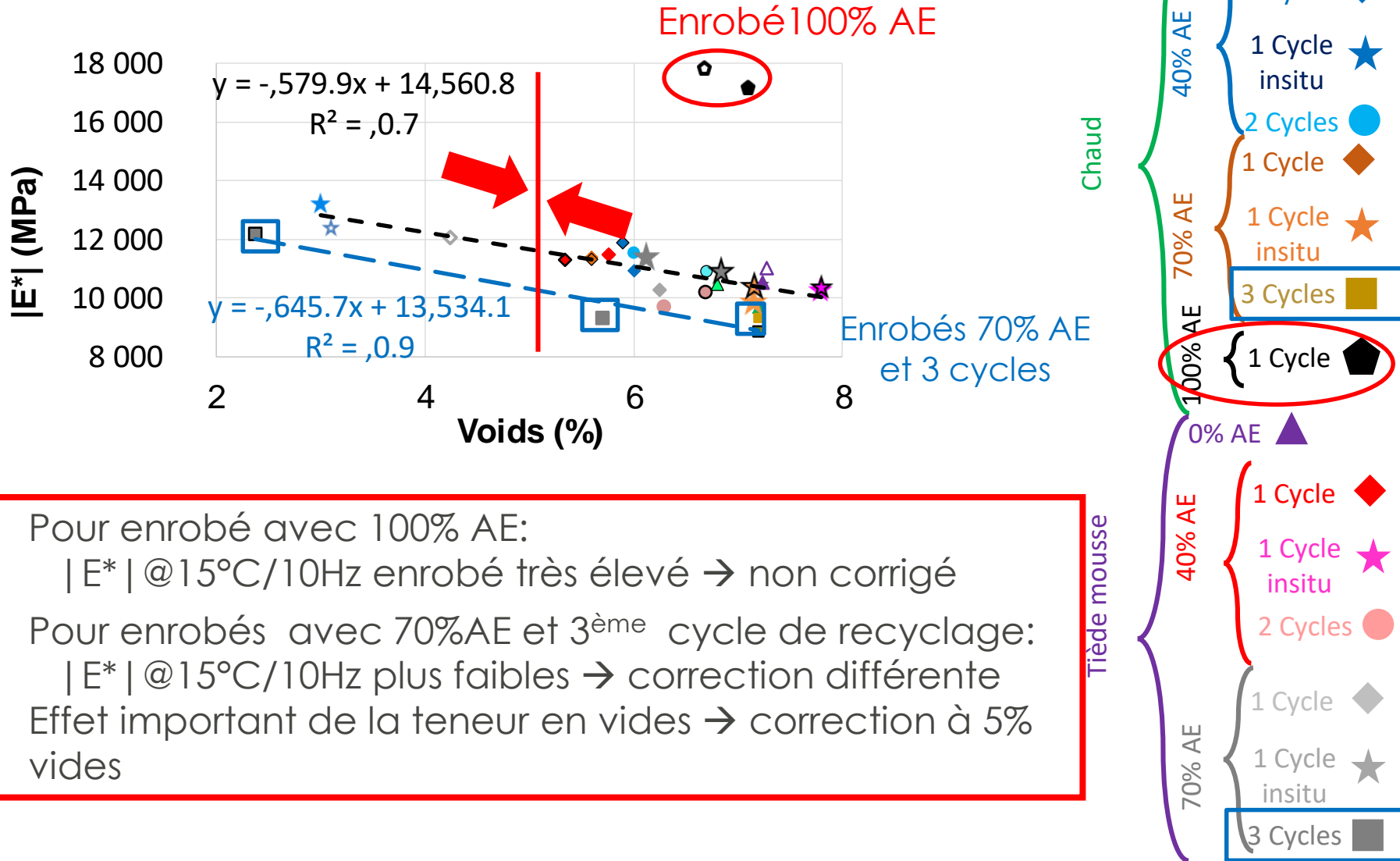
$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau_E)^{-1}} \quad 7 \text{ Constantes}$$

Loi WLF : + 2 constantes C_1 et C_2 2 Constantes



Résultats E* @ 15°C/10Hz

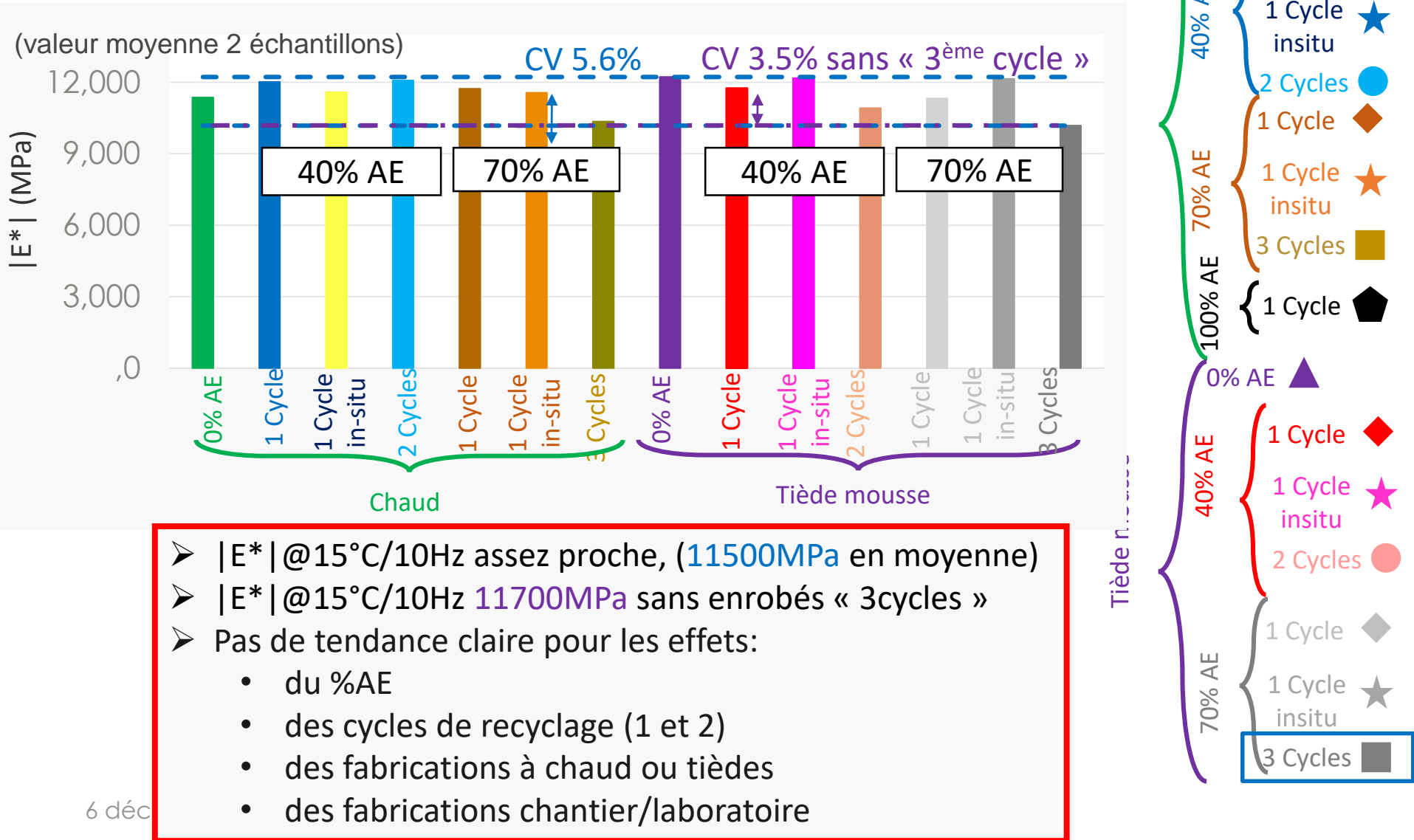
Effet de la teneur en vides



- 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

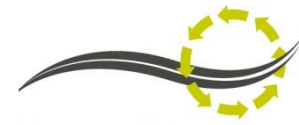
Résultats E* @ 15°C/10Hz

Résultats corrigés à 5% de vides

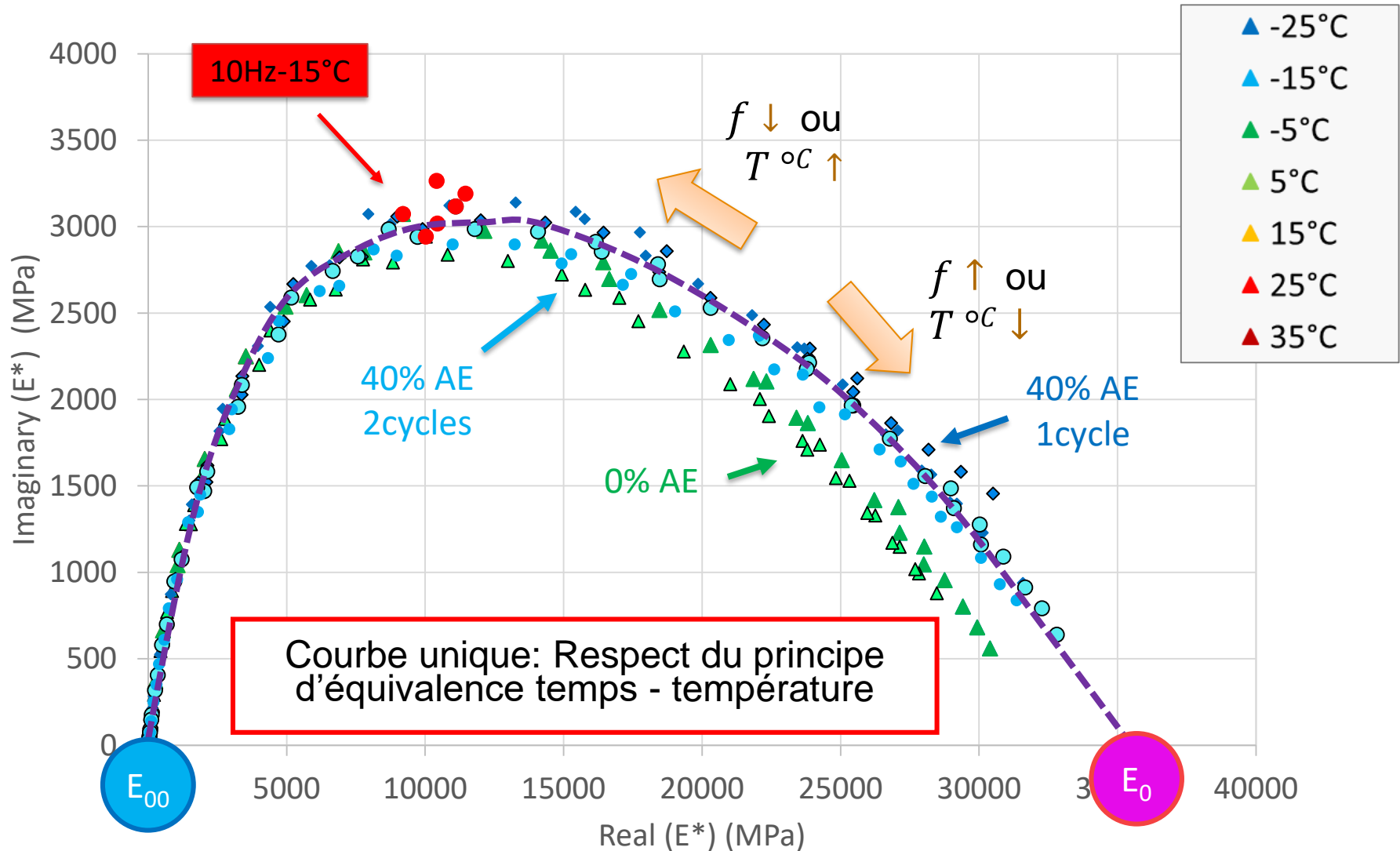


- |E*| @15°C/10Hz assez proche, (11500MPa en moyenne)
- |E*| @15°C/10Hz 11700MPa sans enrobés « 3cycles »
- Pas de tendance claire pour les effets:
 - du %AE
 - des cycles de recyclage (1 et 2)
 - des fabrications à chaud ou tièdes
 - des fabrications chantier/laboratoire

Analyse avancée E*



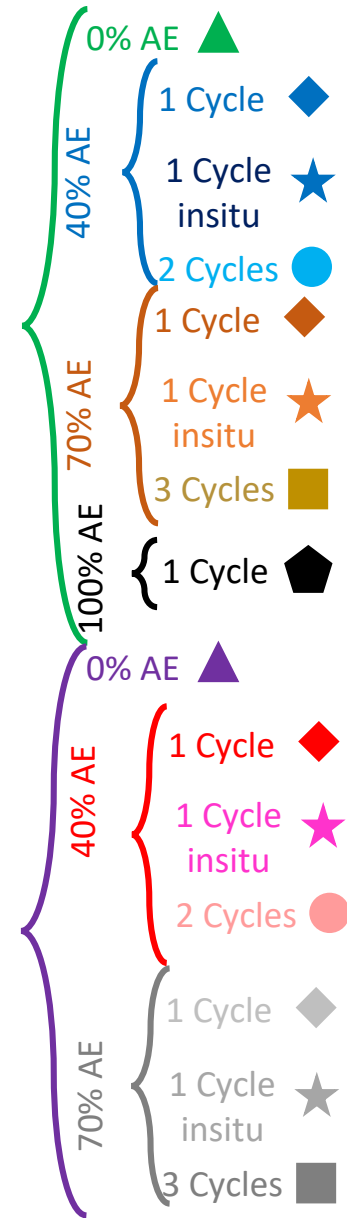
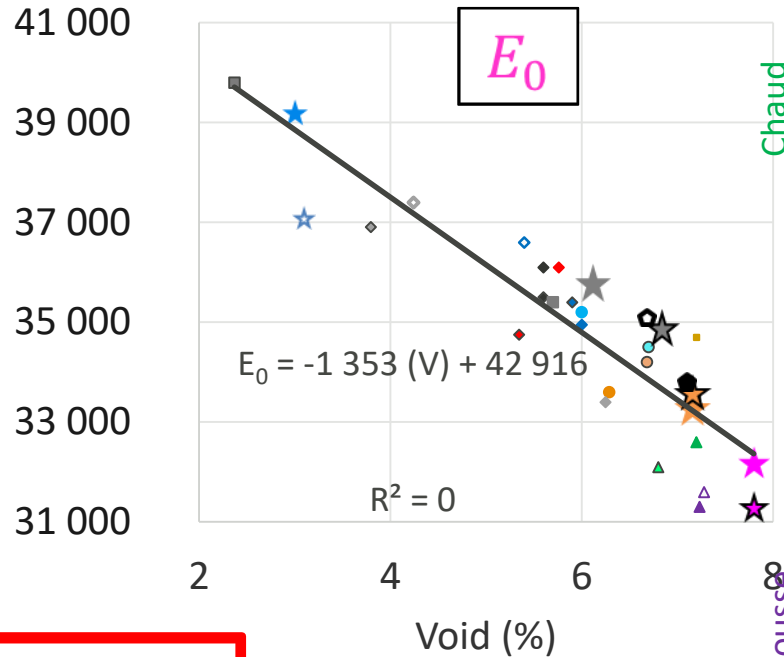
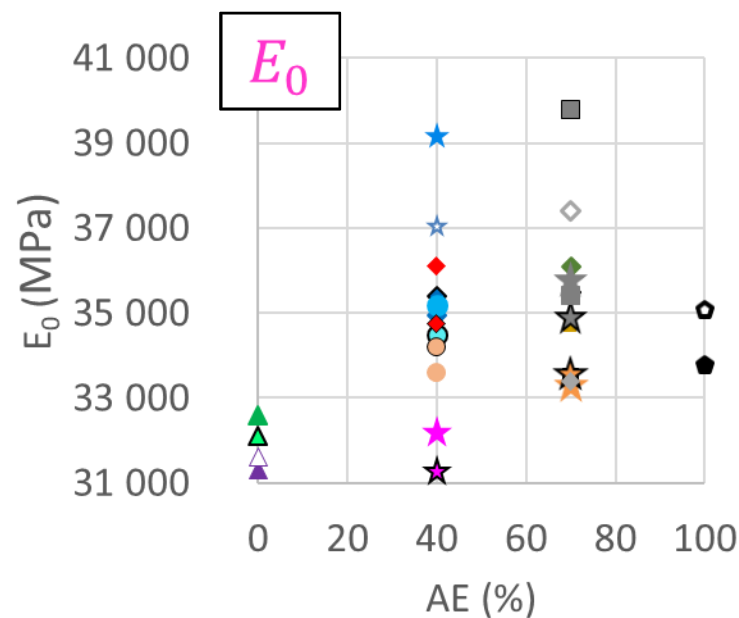
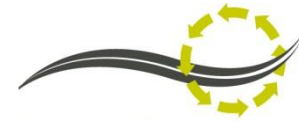
Cole-Cole: évolution de E* sur plage T et f



Analyse avancée E*

Paramètres E_0 et E_{00}

(Paramètres dépendant du squelette granulaire)

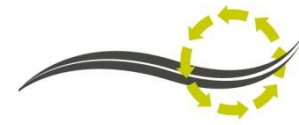


E_0 :

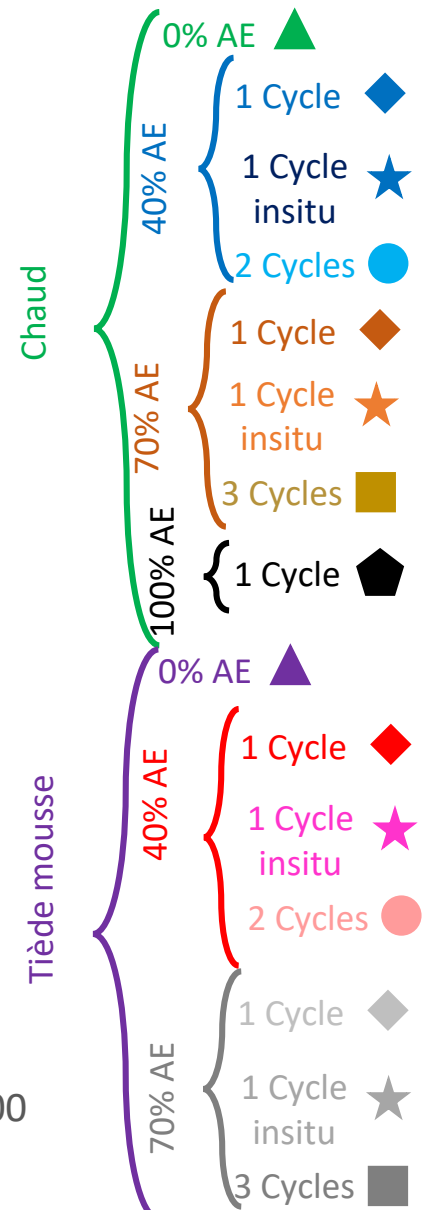
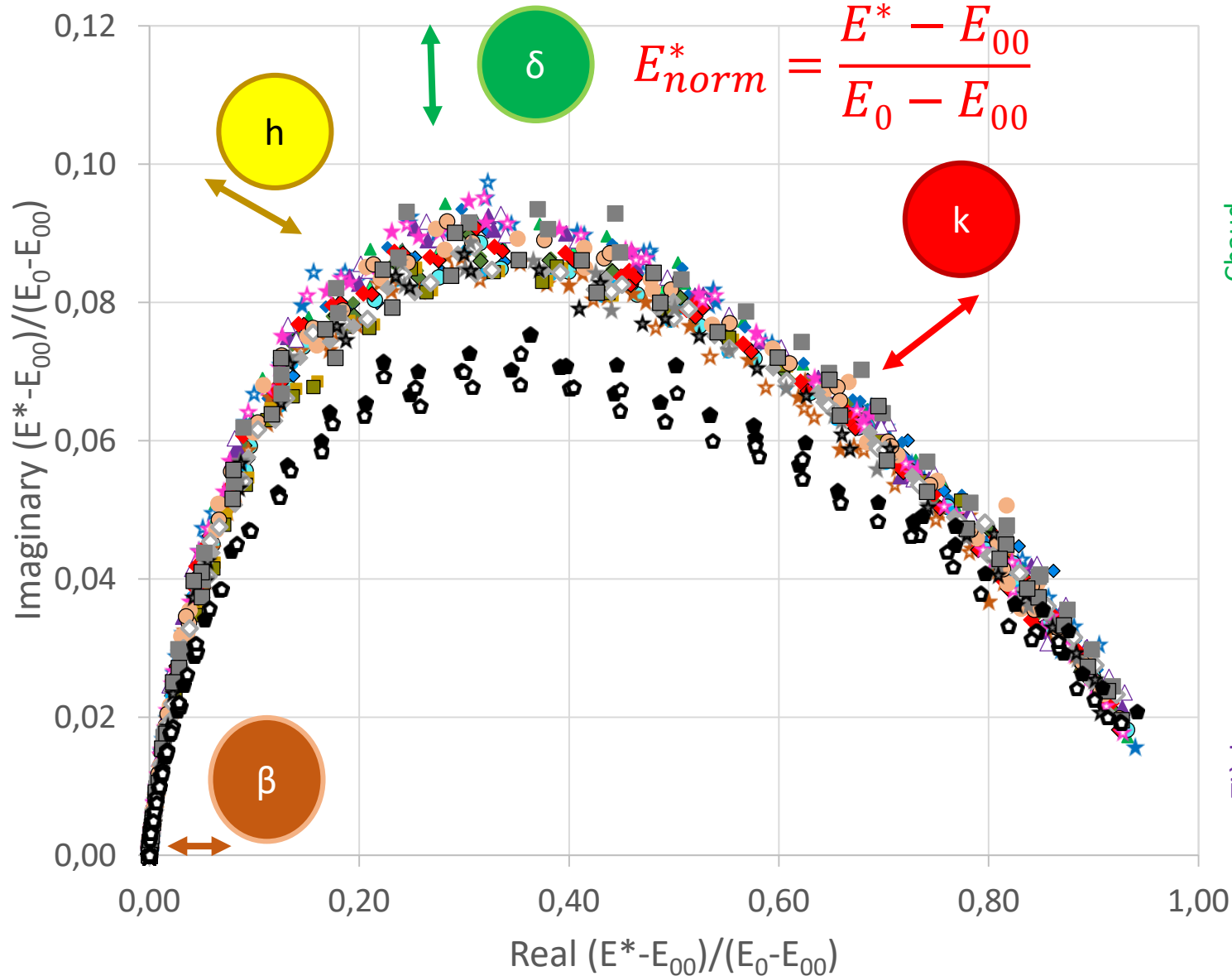
- clairement dépendant du % Vides
- indépendant du %AE,
- indépendant de la fabrication à chaud/tiède,
- indépendant de la fabrication labo /chantier

E_{00}
Aucune corrélation claire

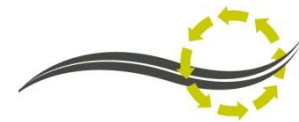
Analyse avancée E*



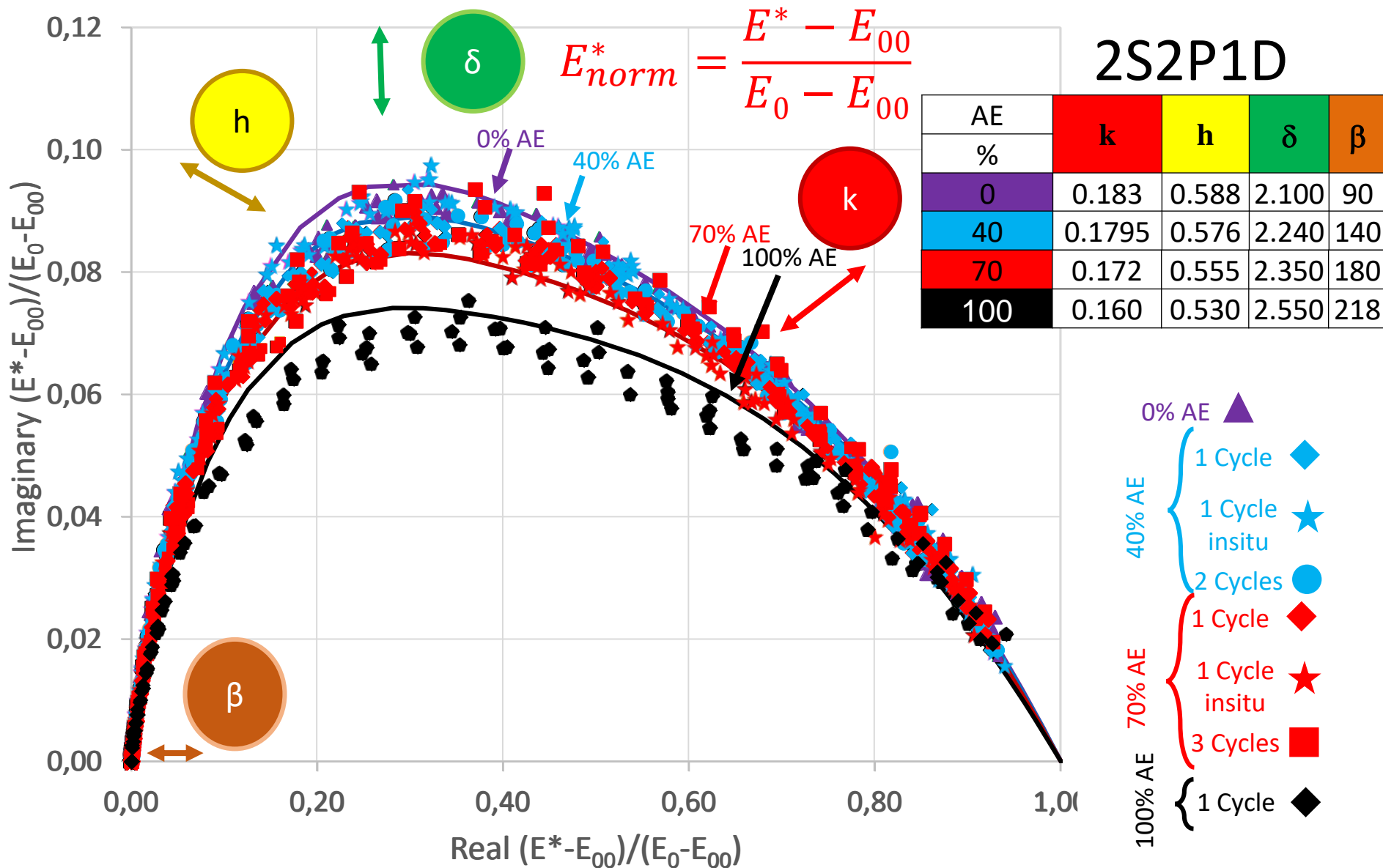
Cole Cole : courbes normalisées



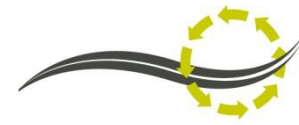
Analyse avancée E*



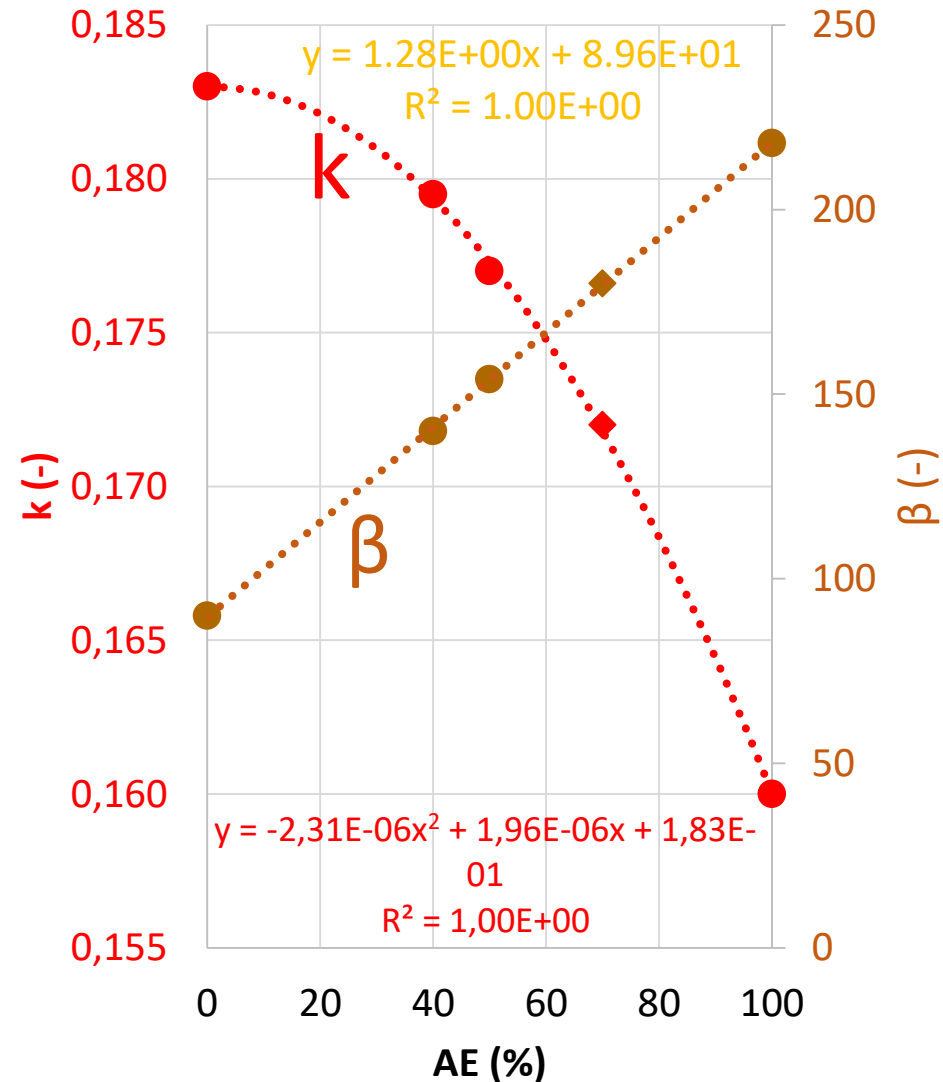
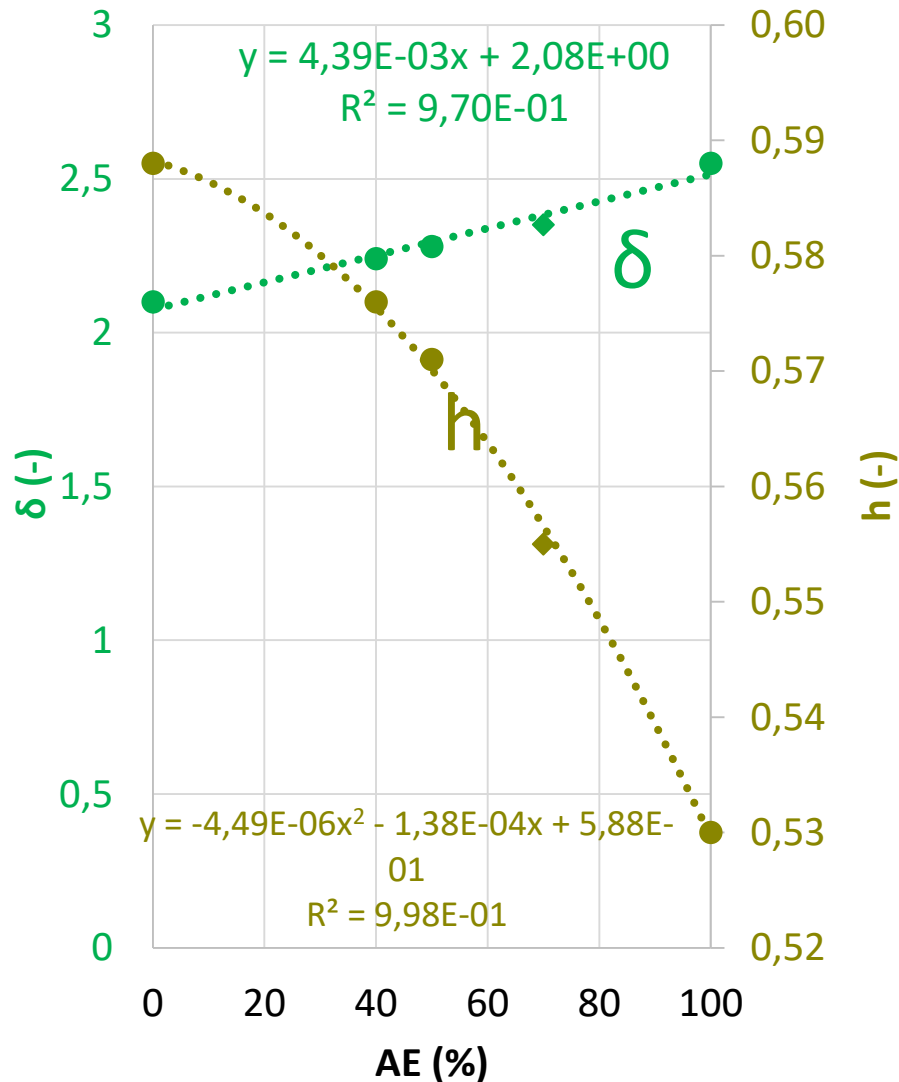
Cole Cole : courbes normalisées



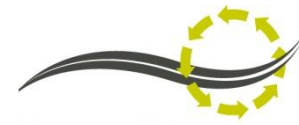
Analyse avancée E*



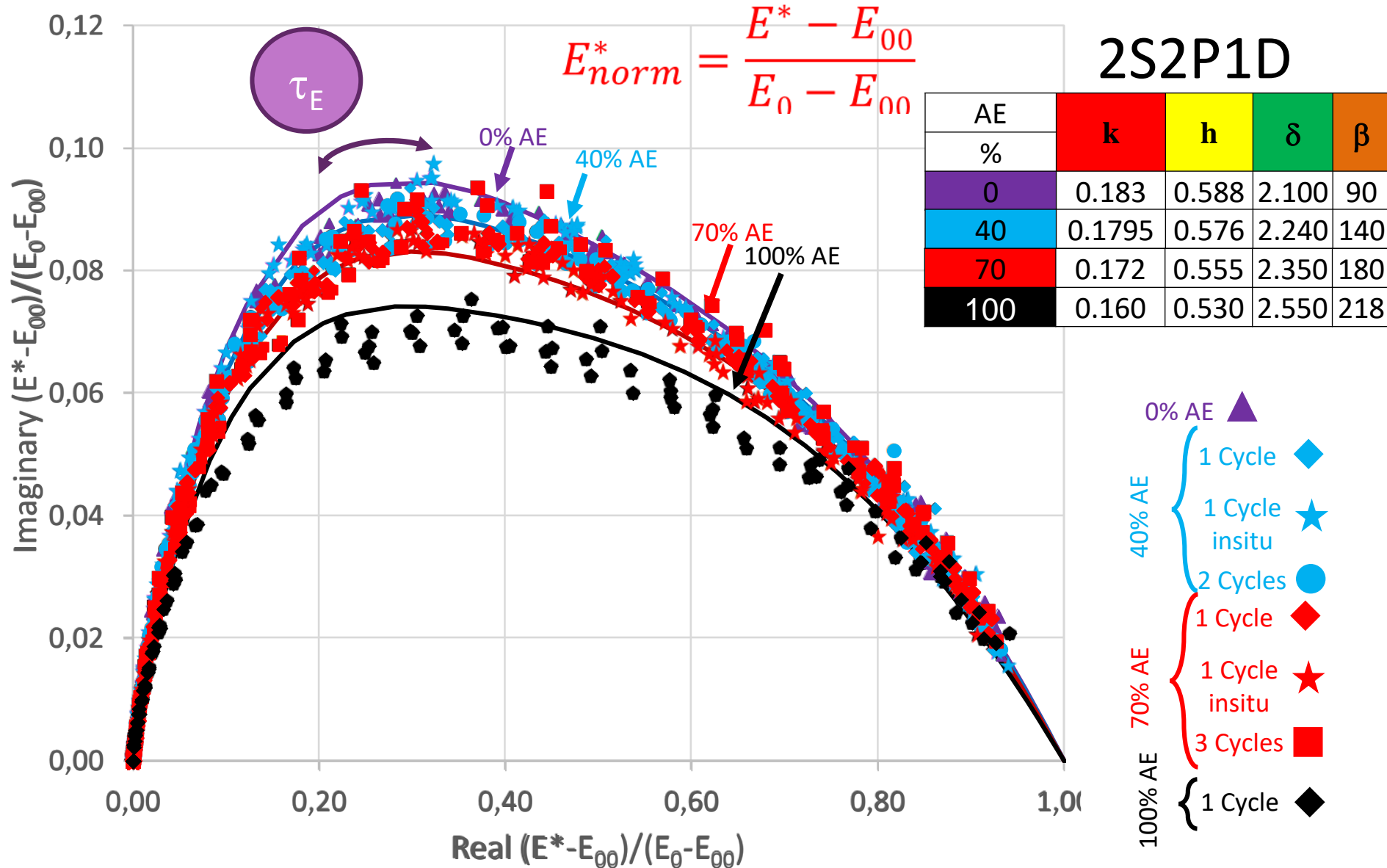
Evolution de 4 constantes 2S2P1D: δ , h , k et β



Analyse avancée E*



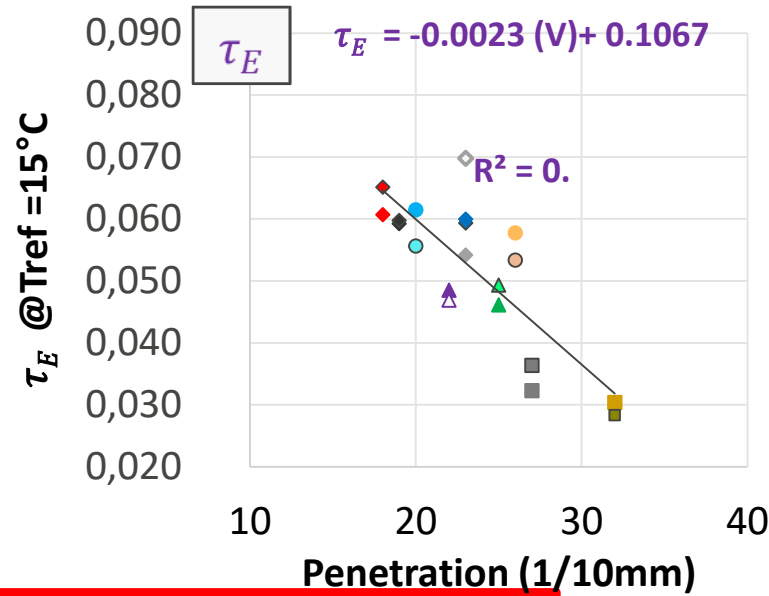
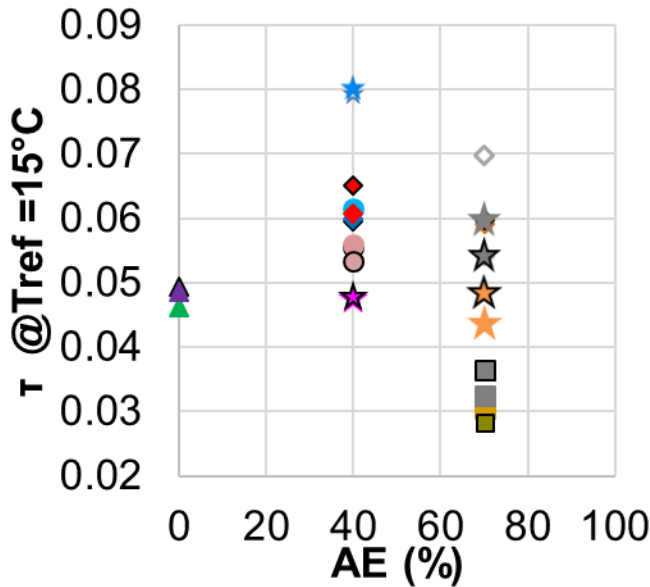
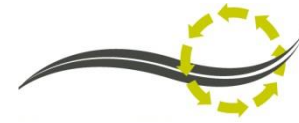
Cole Cole : courbes normalisées



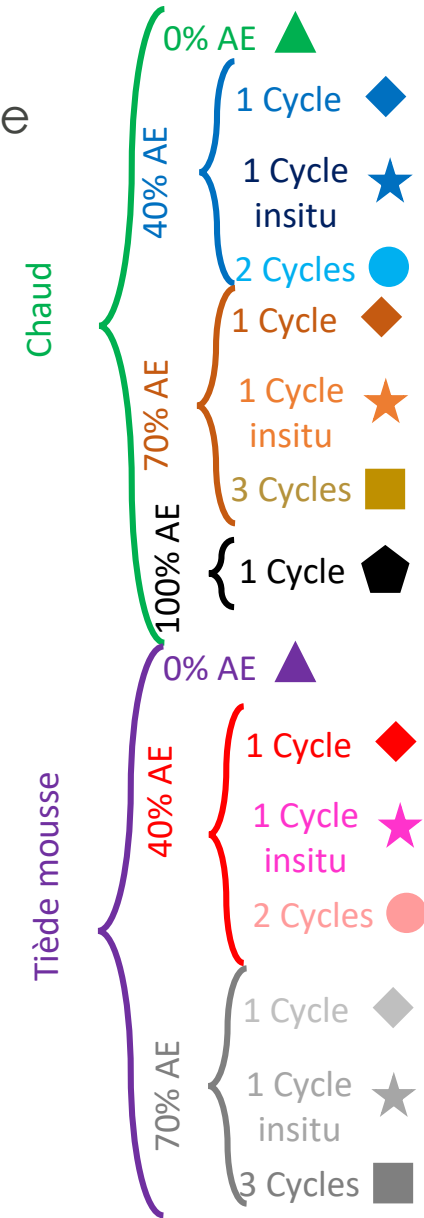
Analyse avancée E*

Paramètre τ_E @15°C (T_{ref})

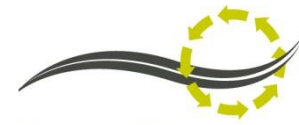
Paramètre intervenant pour l'équivalence temps-température (→lié au bitume)



- 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

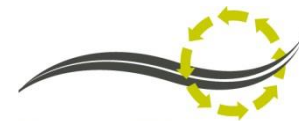


➔ Analyse « classique »: E^* 15°C/10Hz

- Influence importante du % vides
- Après correction d'effet de vides, aucune dépendance notable (AE%, cycles, chaud/tiède, chantier/labo - CD=3.5%) sauf diminution après 3 cycles de recyclage

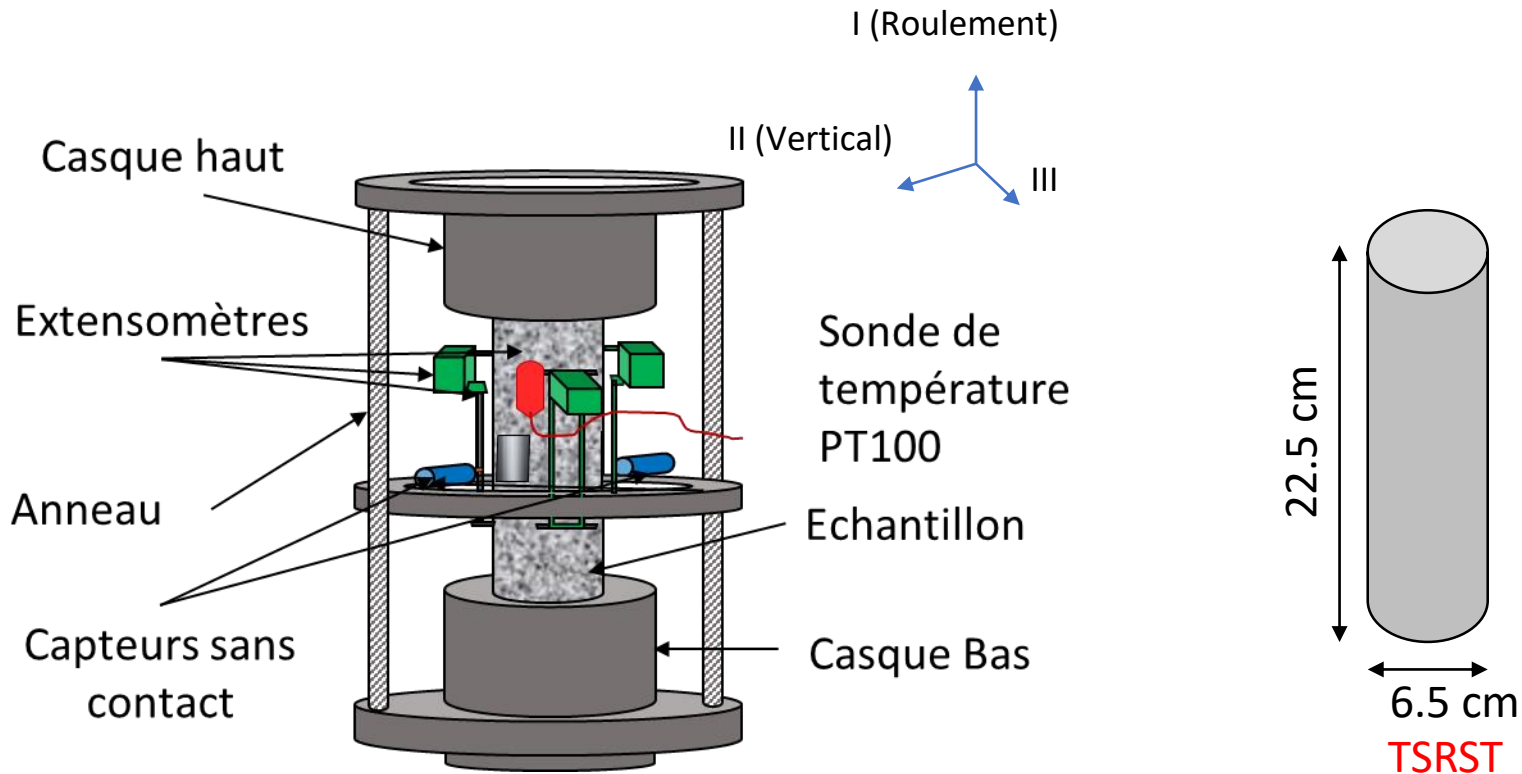
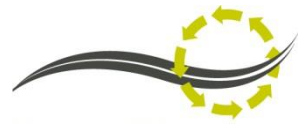
➔ Analyse avancée : modèle 2S2P1D

- Le Principe d'Equivalence Temps Température (PETT) vérifié pour E^* (et v^* , non présenté)
- a_T identiques pour tous les matériaux sauf LH100-1 (non présenté)
- Pour chaque AE%, k , h , δ , β identiques pour E^*_{Norm} (idem et mêmes valeurs pour v^*_{Norm} , non présenté)
- E_0 , τ_E et τ_v dépendants de la teneur en vides; τ_E dépendant de la pénétrabilité du liant extrait des enrobés
- E_{00} , v_0 et v_{00} , aucune dépendance claire.



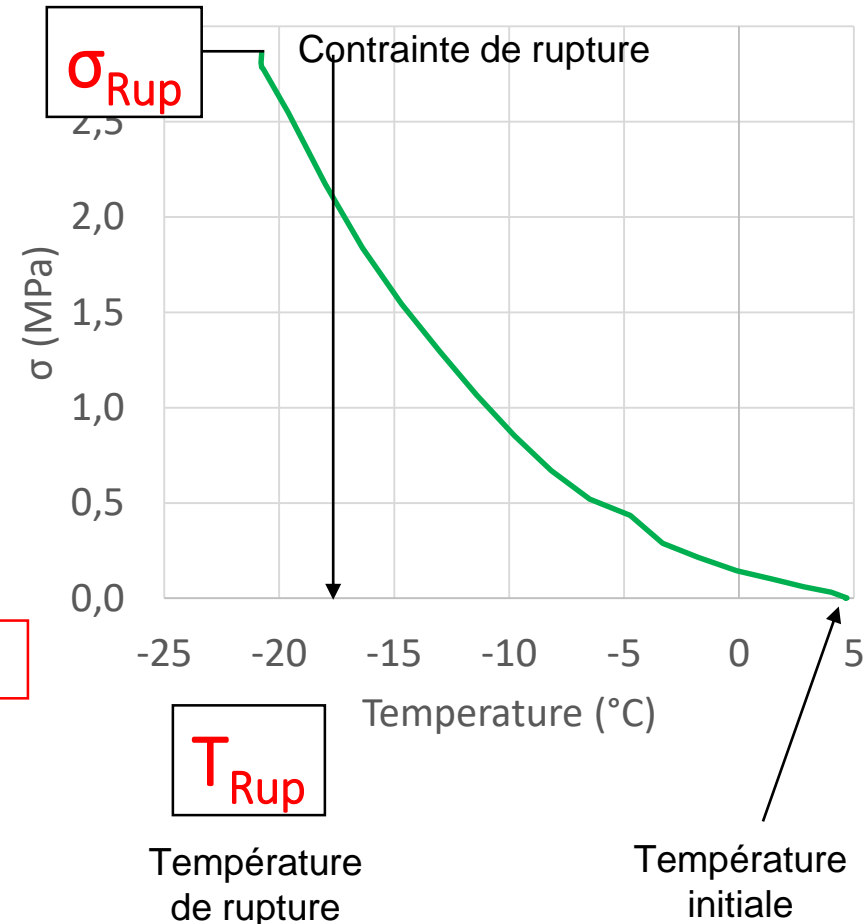
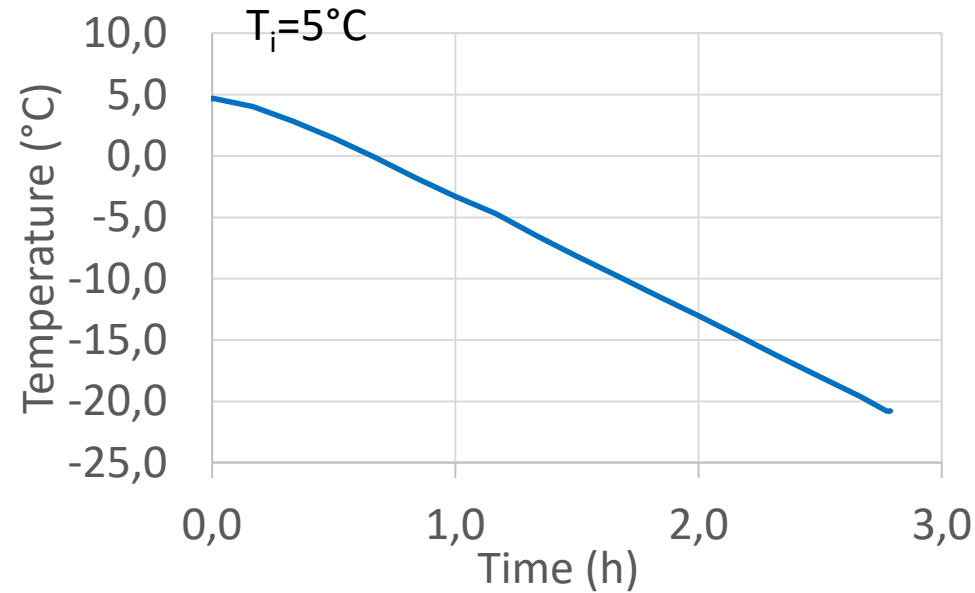
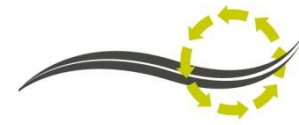
4. Essais de retrait thermique empêché (TSRST)

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

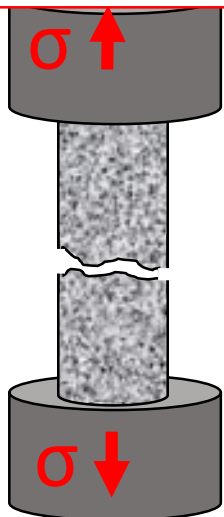


**Même dispositif que le essai de
module complexe**

Procédure de l'essai TSRST



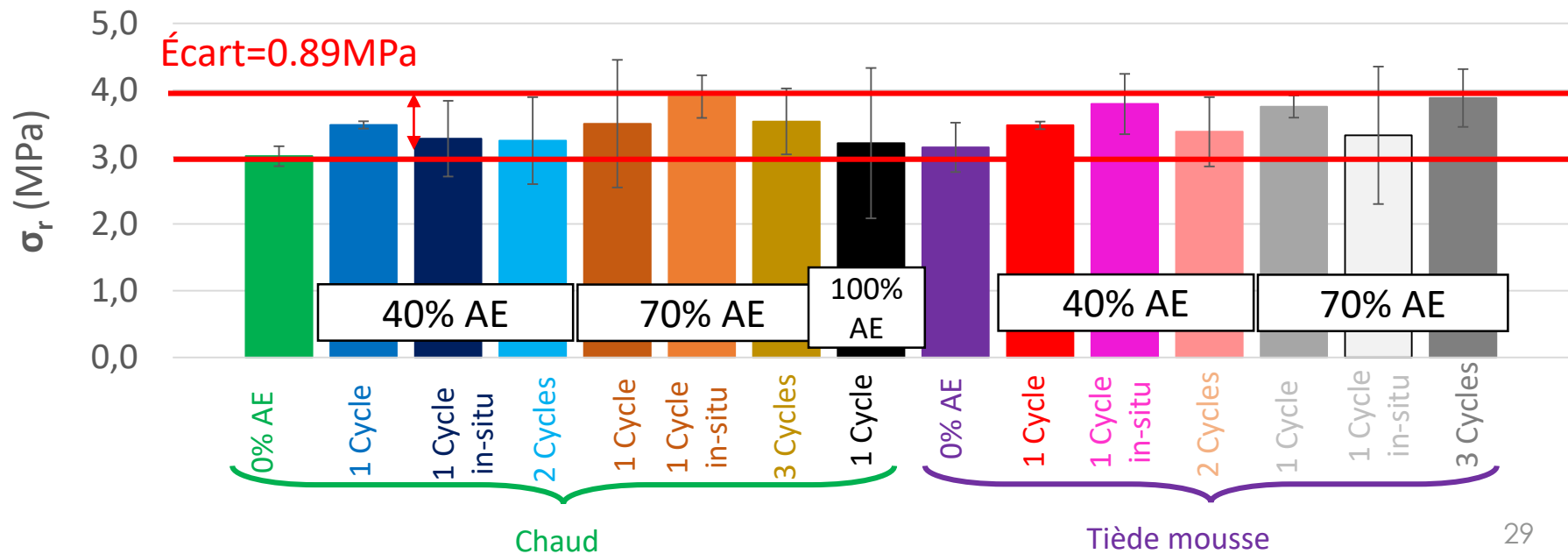
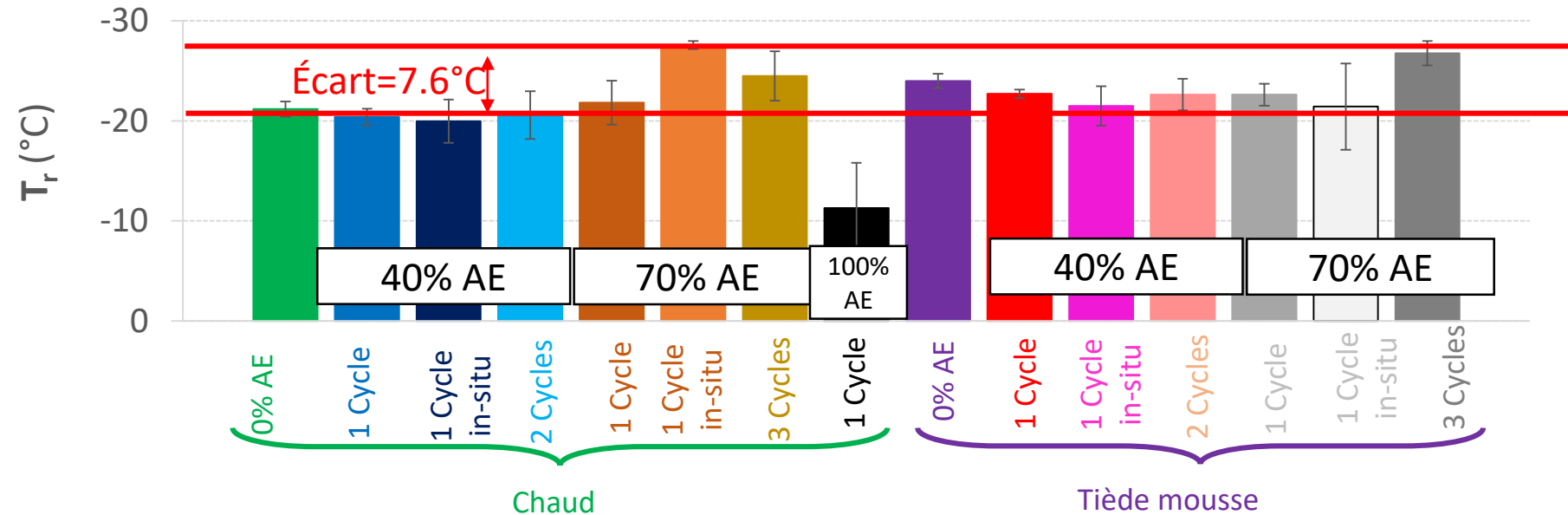
Moyenne sur 3 échantillons testés par matériau



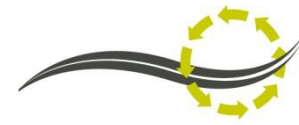
$\epsilon_{ax} = 0$
 $T_i = 5^\circ\text{C}$
 -10°C/h



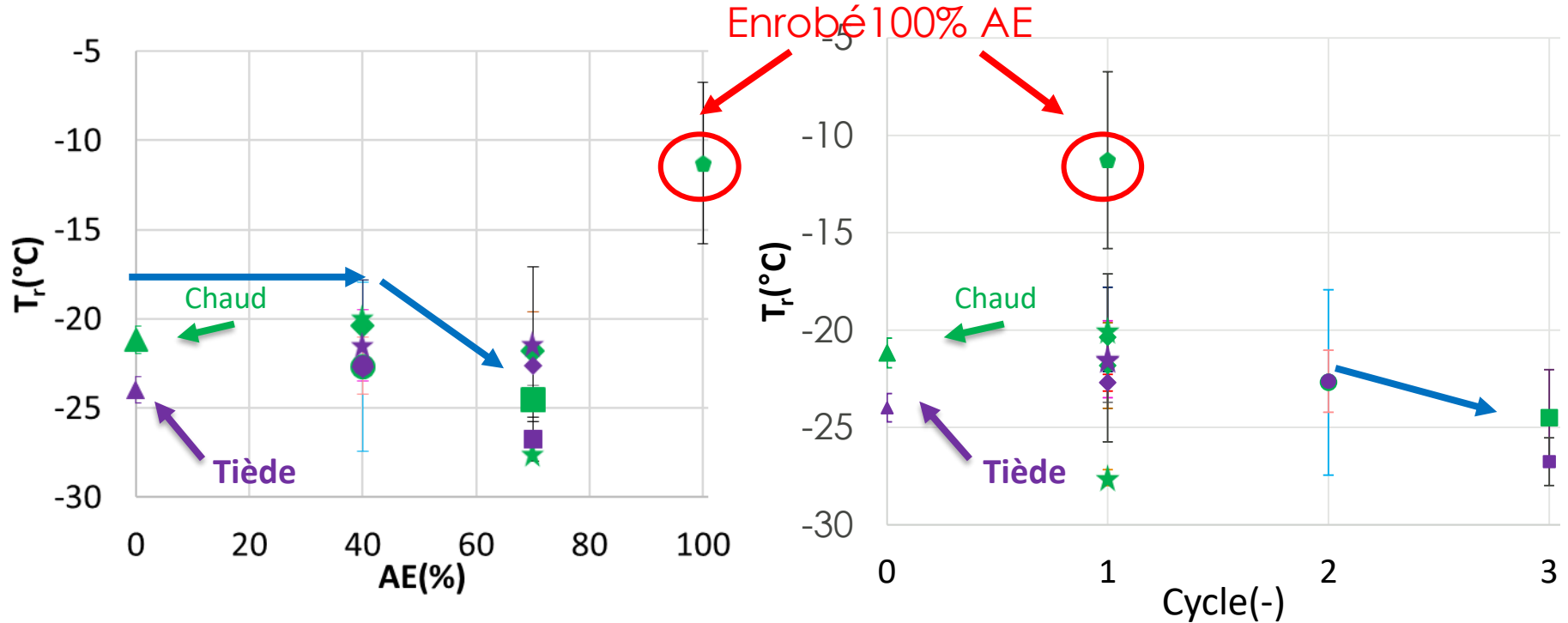
Contrainte et température de rupture



Température de rupture



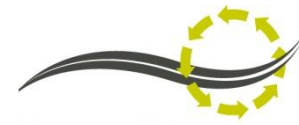
Effets du %AE et cycle de recyclage



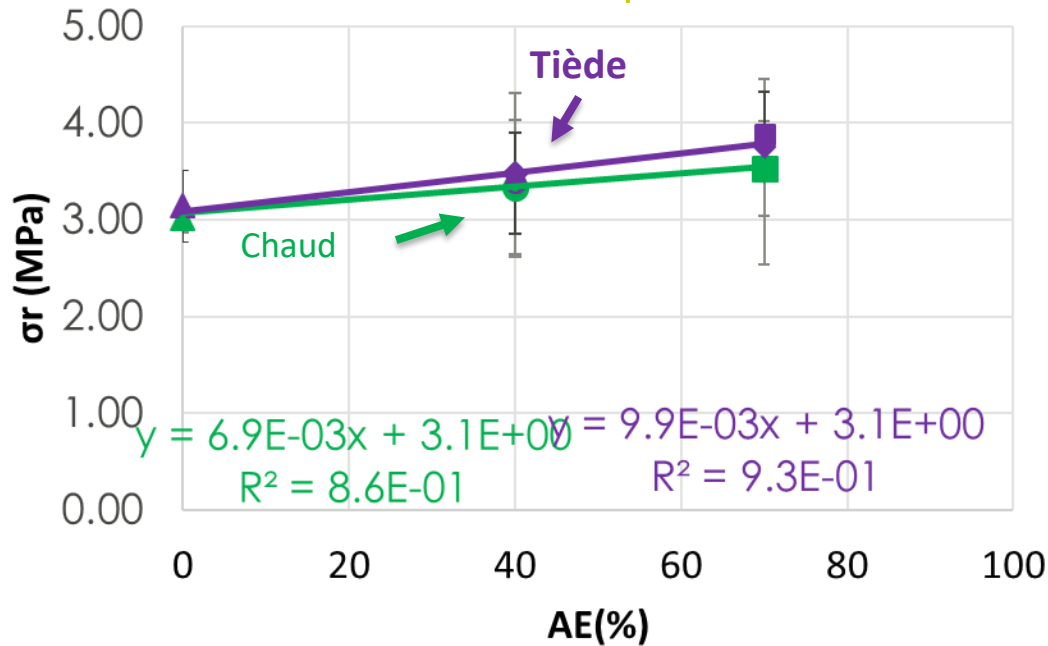
T_r :

- 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?*)

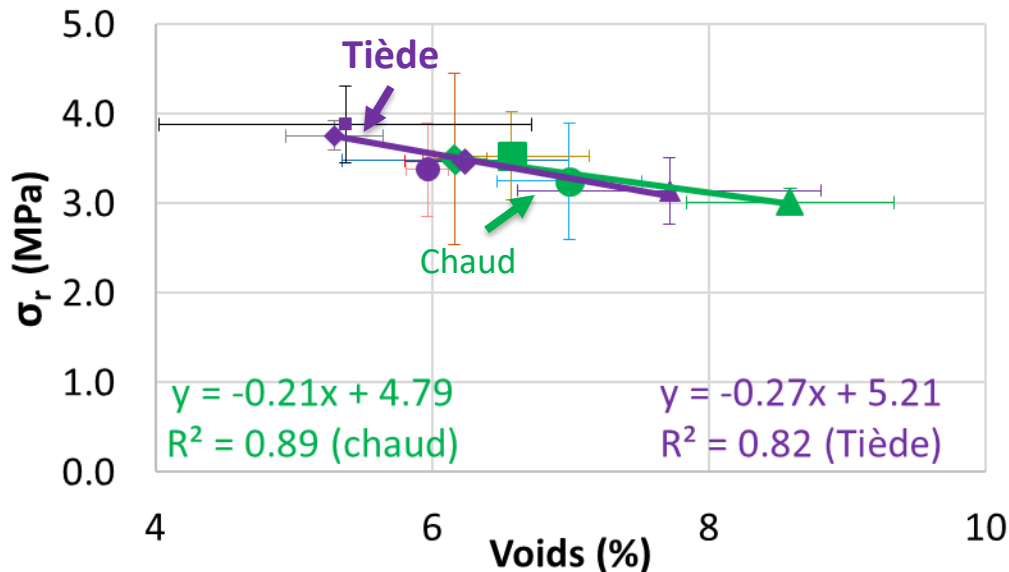
Contrainte de rupture (σ_r)



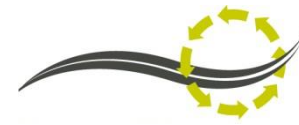
Effets du %AE et %vides pour fabrication laboratoire (sauf LH100-1)



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

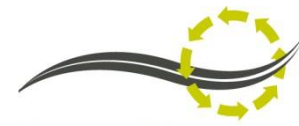


Conclusions



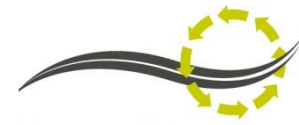
→ TSRST

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

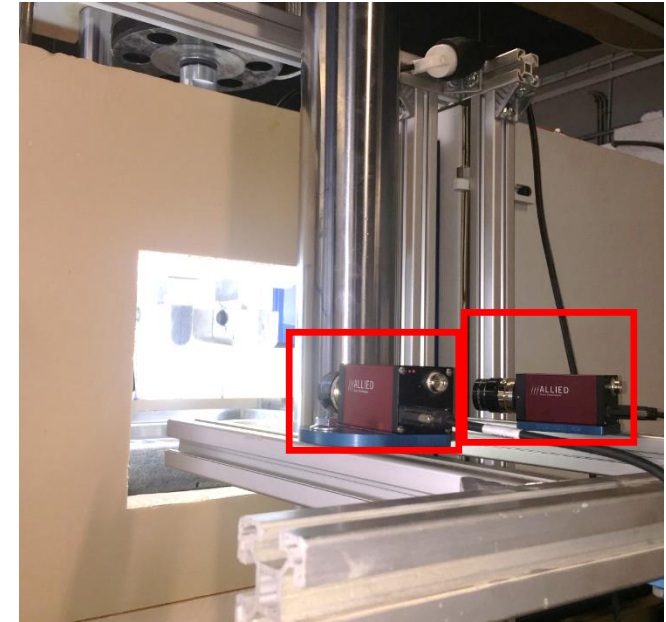
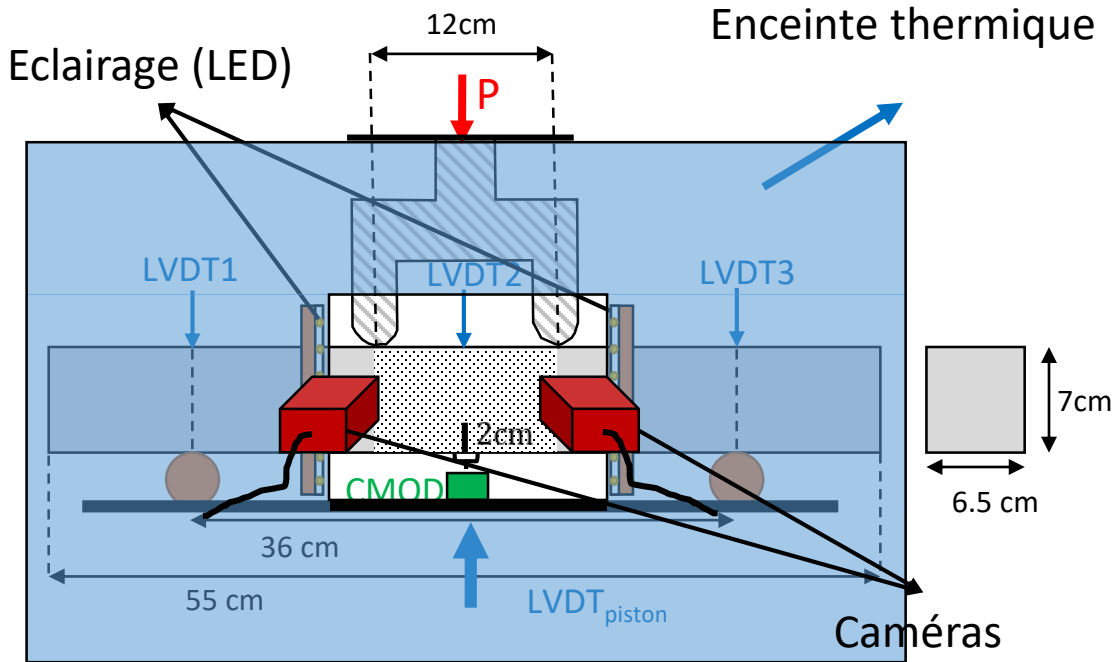


5. Essais de propagation de fissure

Dispositif expérimental



Essai de propagation en flexion 4 points



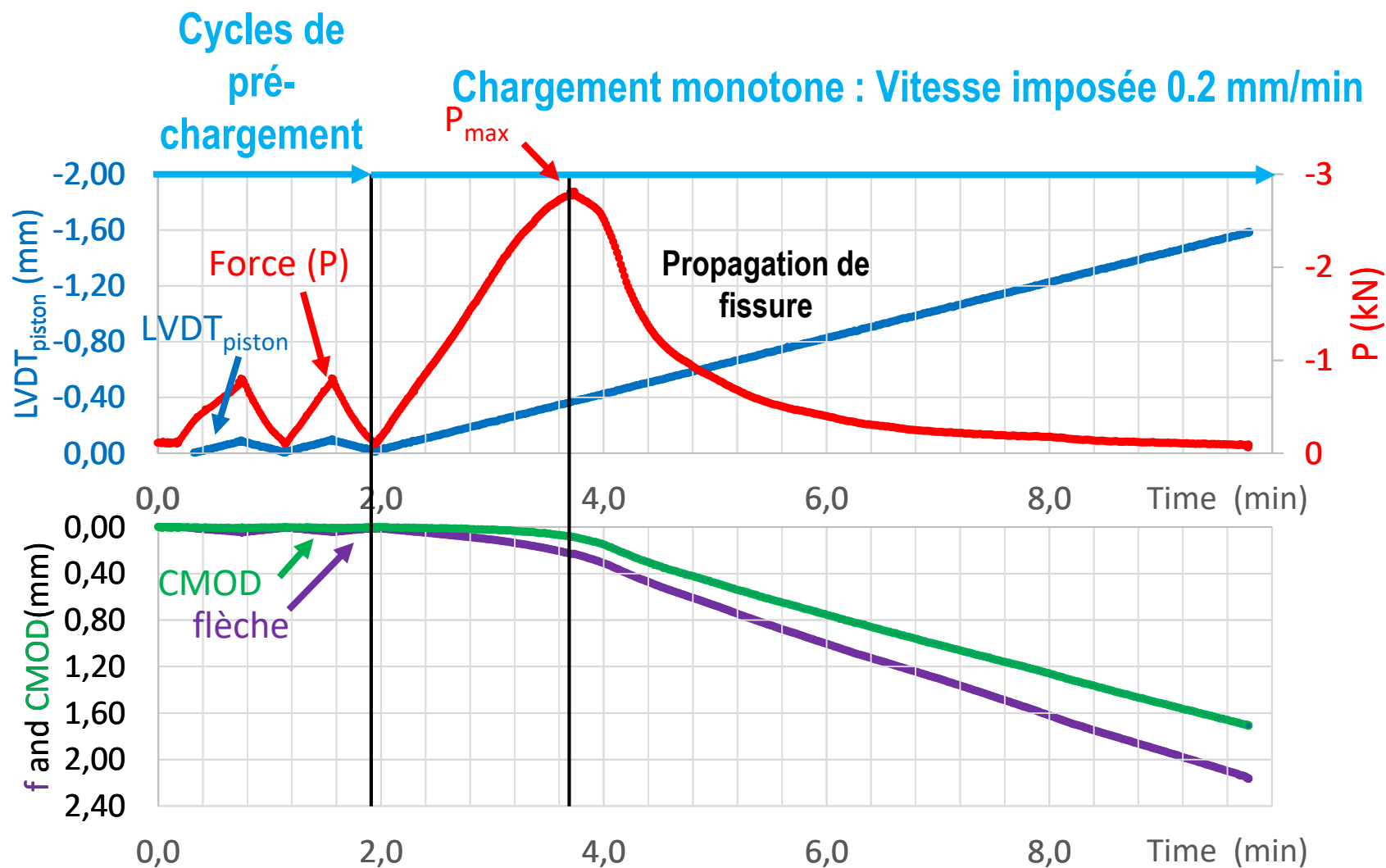
Mesures:

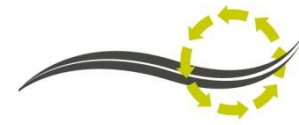
- Force (*Capteur presse*)
- Déplacement Piston (*LVDT piston*)
- Flèche (*LVDTs*)
- Ouverture de fissure (*CMOD*)
- Hauteur de fissure (détaillé dans la suite)

Procédure d'essai



- Température : -5°C et -15°C

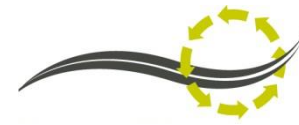




- ⇒ Analyse de l'évolution de la hauteur de fissure:
 - À l'aide des caméras (jauge virtuelle)
 - Méthode de calcul inverse (DRCL développée à l'ENTPE)

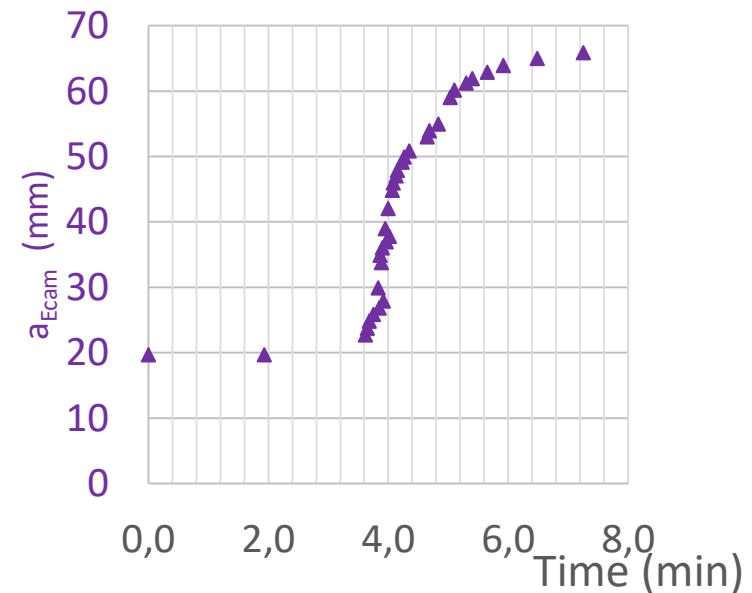
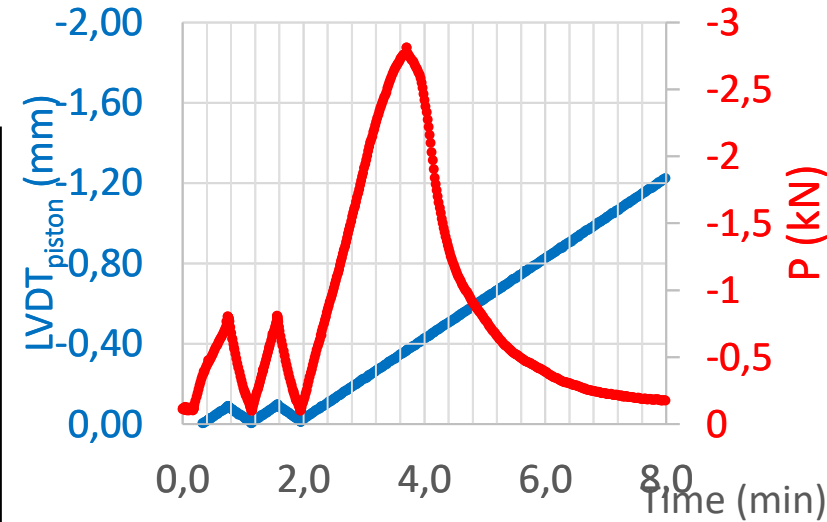
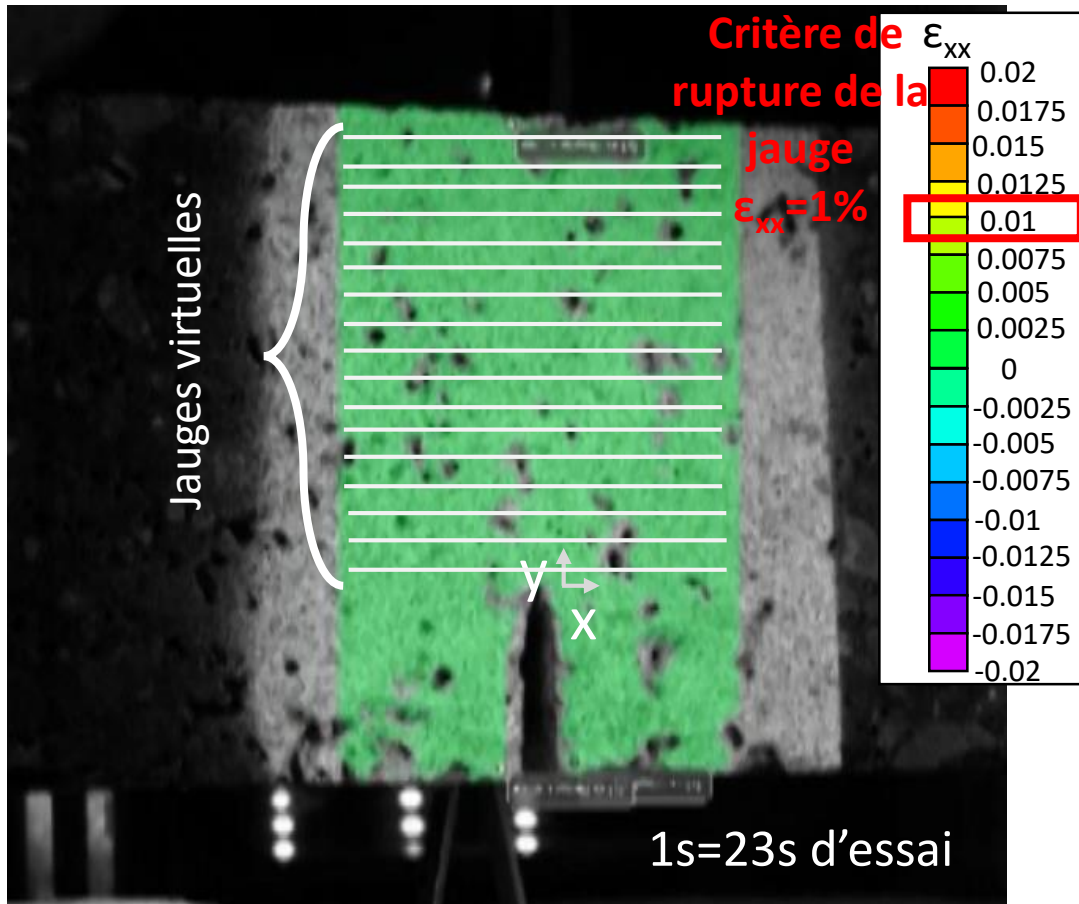
- ⇒ Analyse des propriétés de fissuration (mécanique linéaire de la rupture)
 - Résistance
 - Taux de restitution d'énergie
 - Facteur d'intensité de contrainte

Analyse de la hauteur de fissure

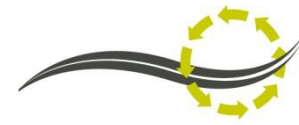


Caméras : Jauge virtuelle de fissuration

Ex: enrobé 40% AE avec 2 cycles à chaud

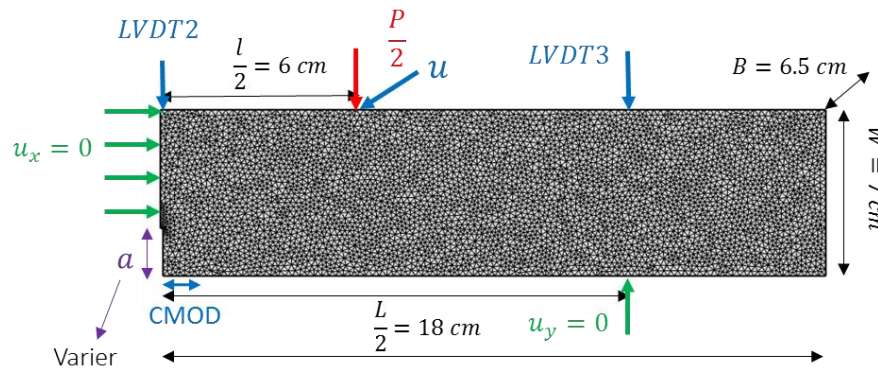


Analyse de la hauteur de fissure



Méthode de calcul inverse: DRCL

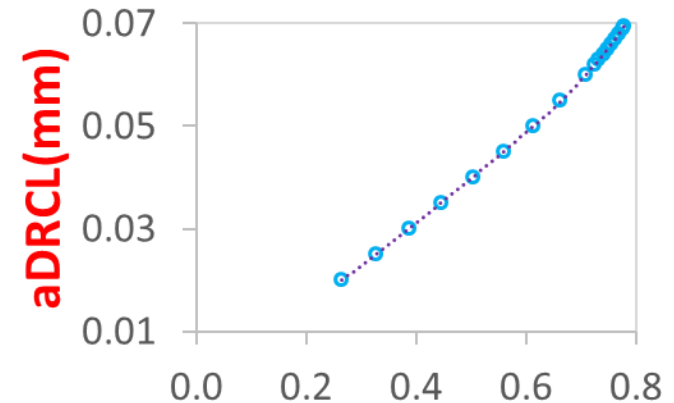
- Hauteur de fissure obtenue par calcul inverse VEL par éléments finis des déplacements mesurés (LVDTs et CMOD)



$$K_{IC} = 1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

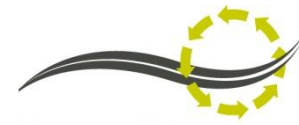
$$E = 10^4 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0$$

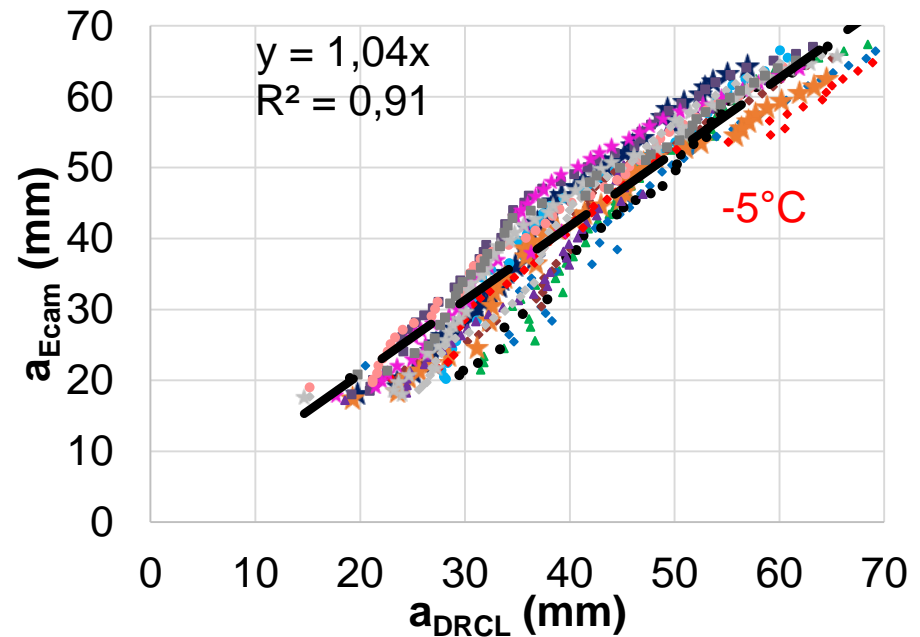
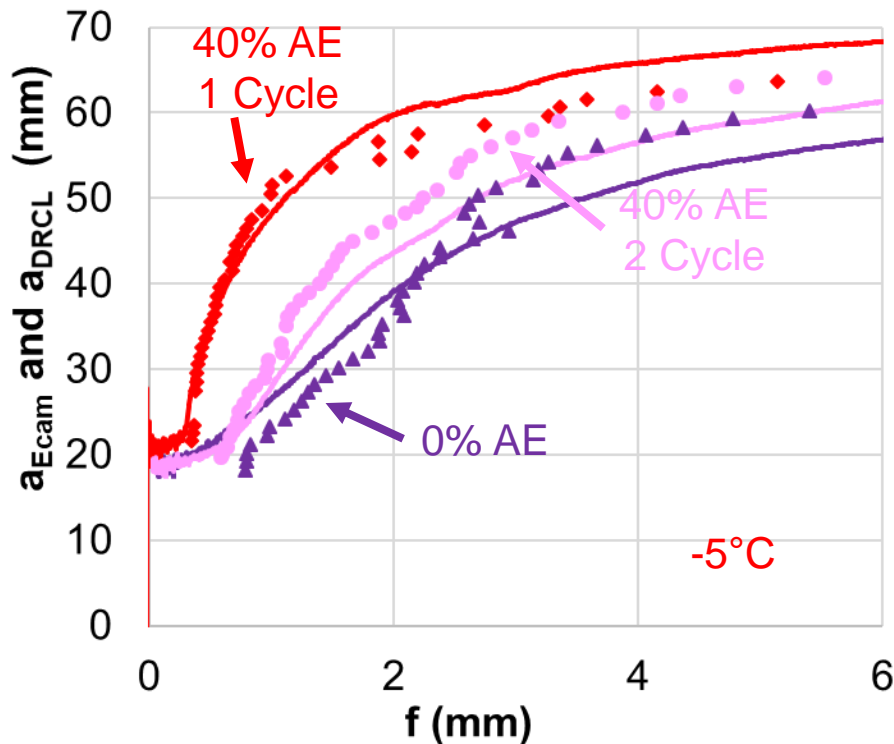


$$rd = \frac{\text{rd}=\text{CMOD}/f}{f}$$

Analyse de la hauteur de fissure



Comparaison caméras/DRCL

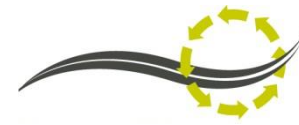


a_{Ecam} et a_{DRCL} : Bonne corrélation entre les deux approches

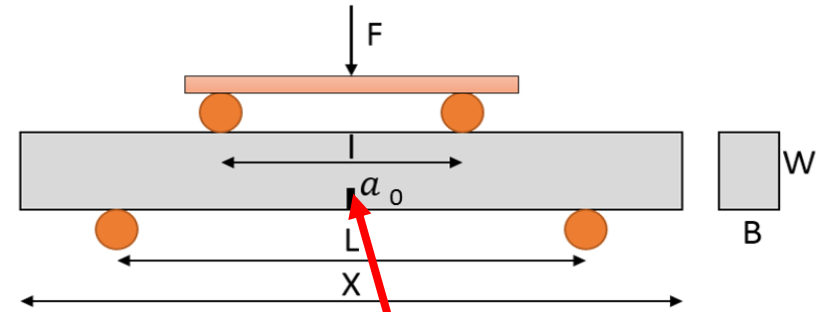
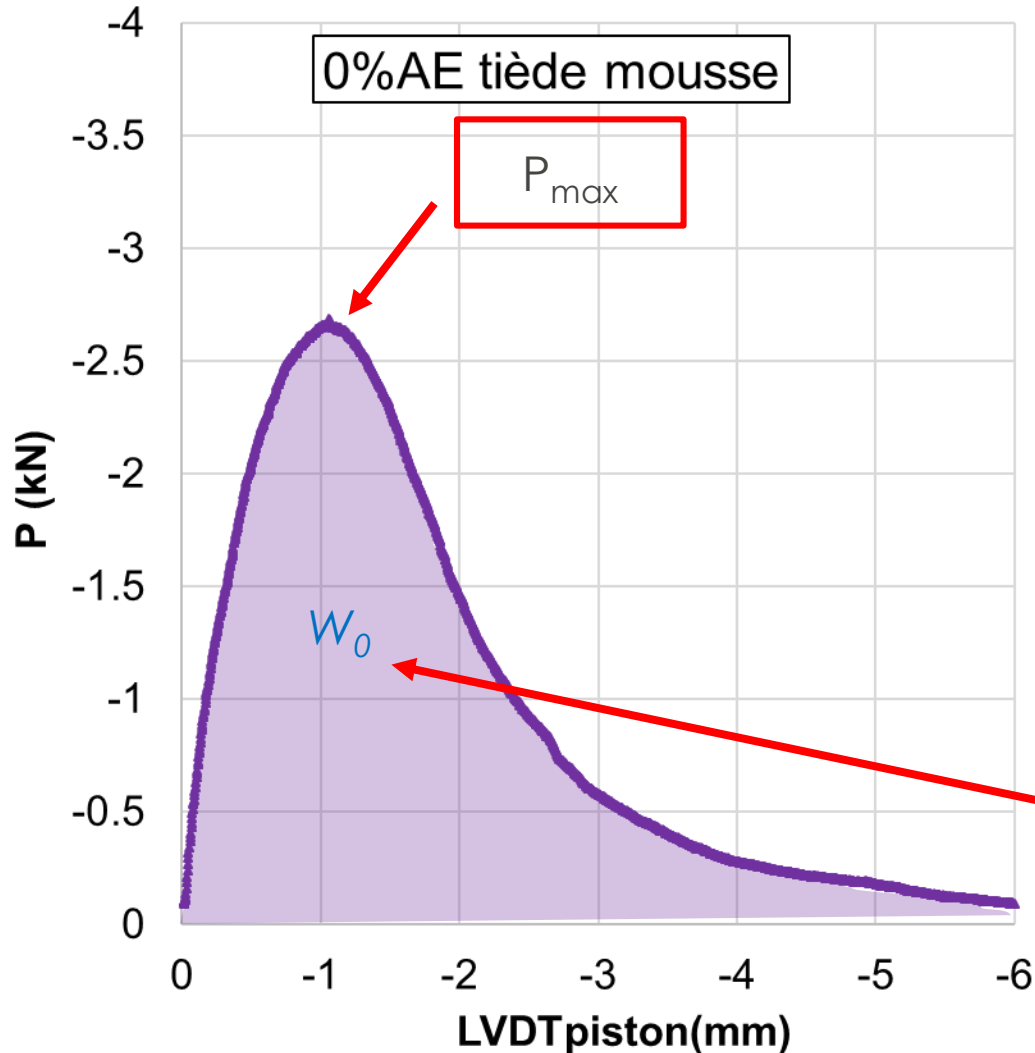
a_{Ecam} → obtenue avec mesures en surface

a_{DRCL} (CMOD, f) → mesure en volume de l'échantillon

Analyse des propriétés de fissuration



Définition des paramètres



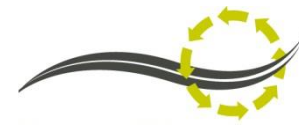
$$K_{IC} = \frac{3P(L-l)}{2BW^2} Y(a) \sqrt{a}$$

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

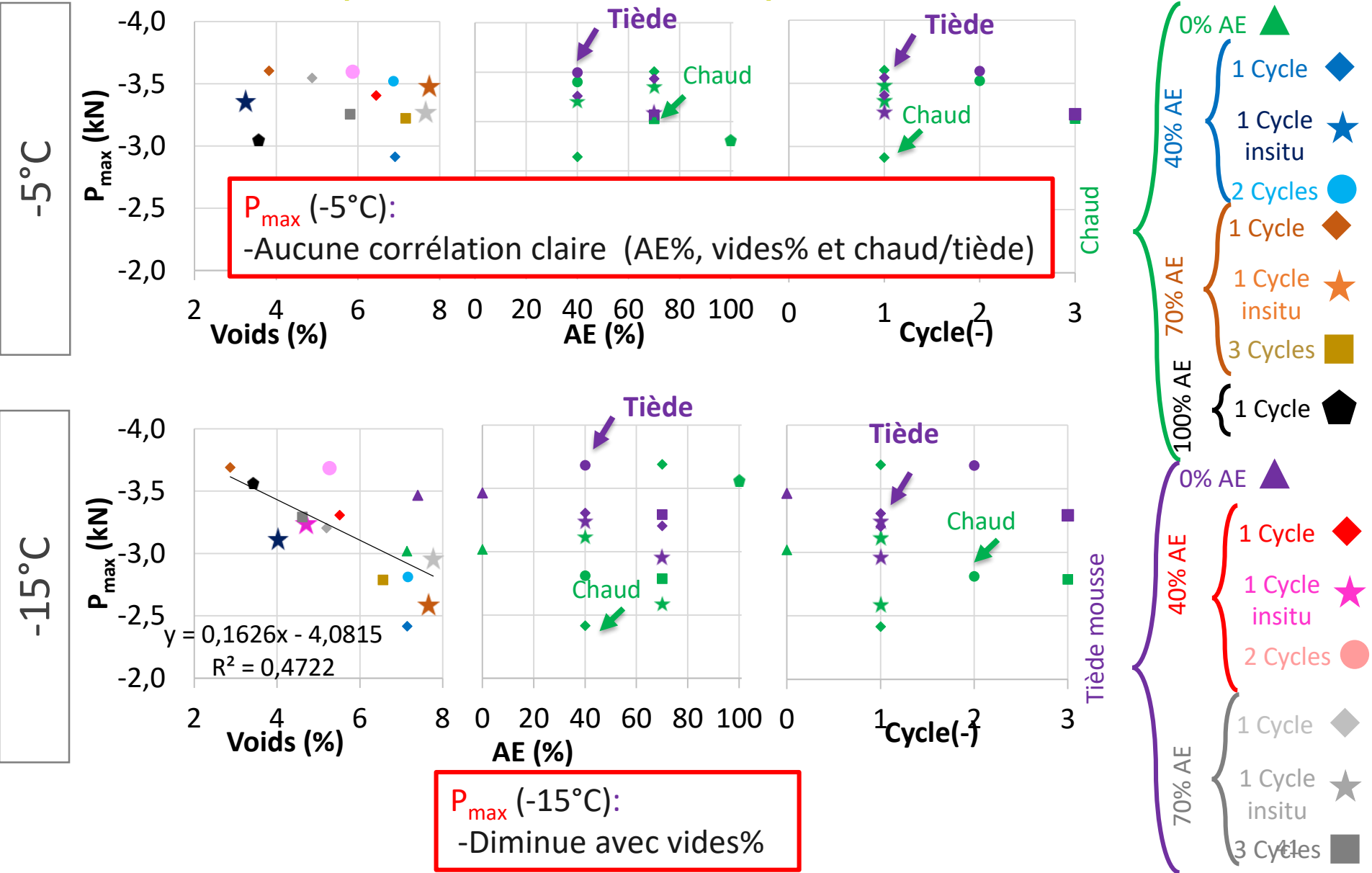
$$G_f = \frac{W_0}{B(W - a_0)}$$

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

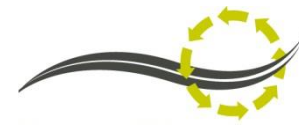
Analyse des propriétés de fissuration



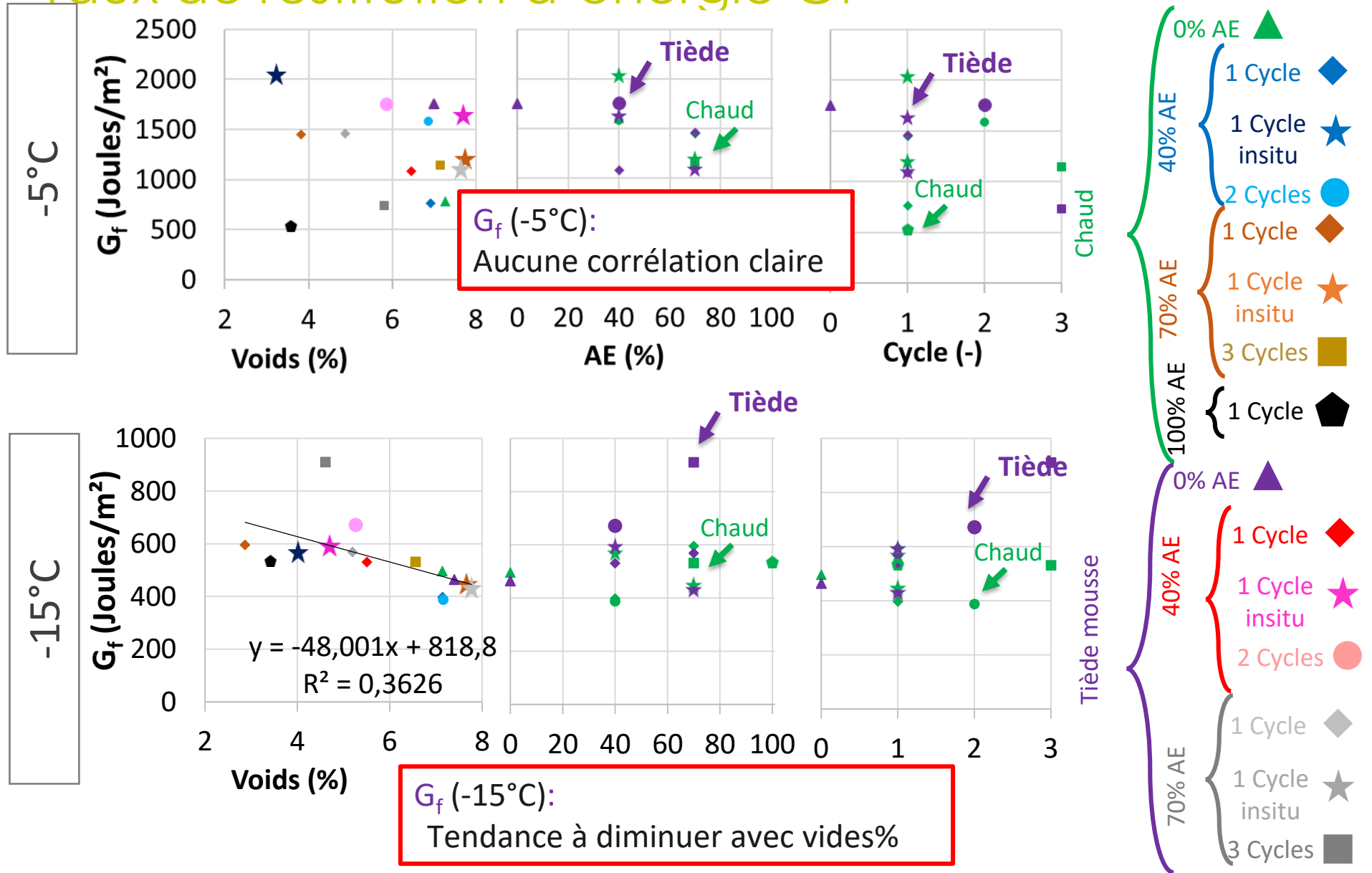
Résistance (force maximale)



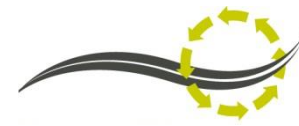
Analyse des propriétés de fissuration



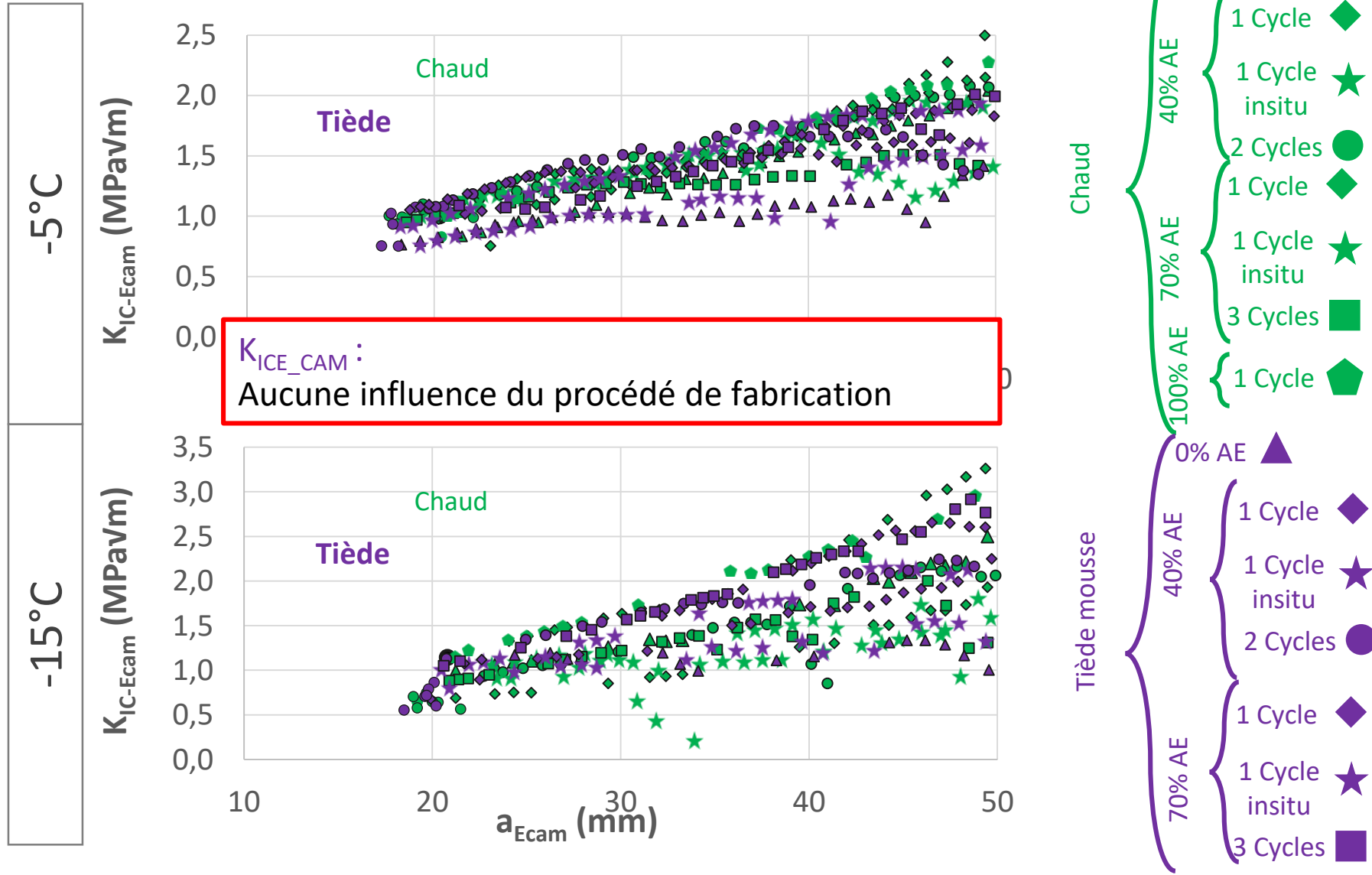
Taux de restitution d'énergie G_f



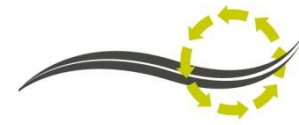
Analyse des propriétés de fissuration



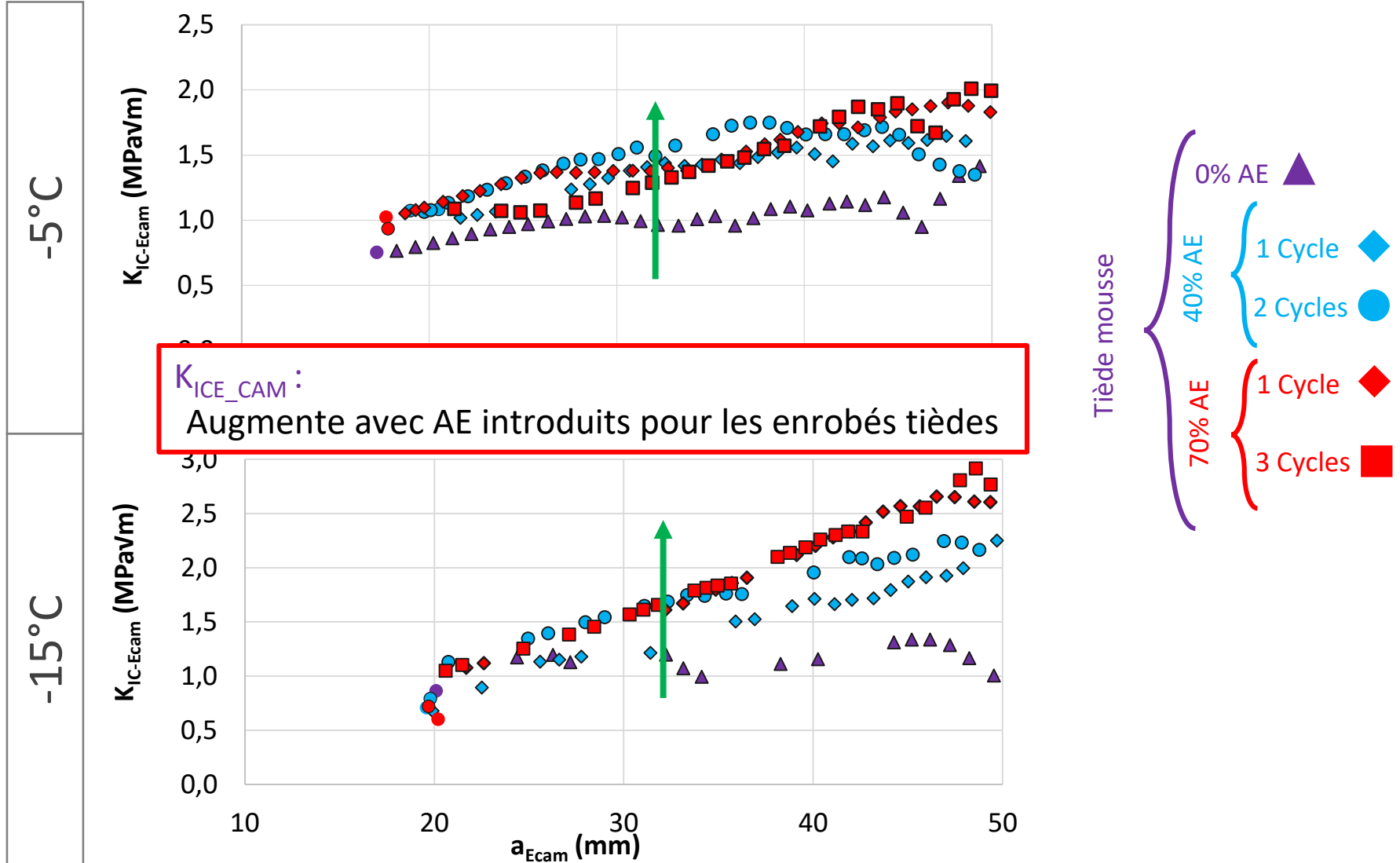
Facteur d'intensité de contraintes K_{IC}

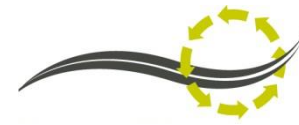


Analyse des propriétés de fissuration



Facteur d'intensité de contraintes K_{IC}



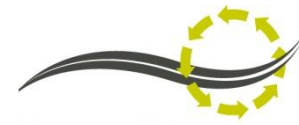


→ Propagation de fissure

- 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})



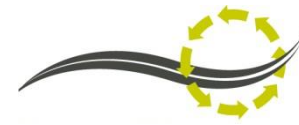
6. Conclusion



- ✓ Viscoélasticité linéaire
 - **Propriétés VEL proches** pour les enrobés avec **0%, 40% et 70% d'AE**.
 - Enrobé avec 100% d'AE comportement différent.
 - Constantes 2S2P1D dépendantes de AE%, vides% et pénétrabilité.

- ✓ Comportement à basse température
 - **Températures de rupture peu influencées** par procédé de fabrication, AE%, vides% et cycle de recyclage.

- ✓ Propagation de fissure
 - Nouvelle méthode d'estimation de hauteur de fissure par corrélation d'images, donnant des résultats comparables à la méthode DRCL
 - **Propriétés de propagation de fissures similaires** et peu influencées par procédé de fabrication, AE%, vides% et cycle de recyclage.



✓ Viscoélasticité linéaire

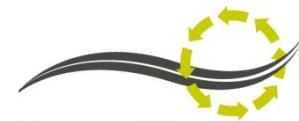
- **Propriétés VEL proches** pour les enrobés avec **0%, 40% et 70% d'AE**.
- Enrobé avec 100% d'AE comportement différent.

Les enrobés:

- contenant des AE,
- ou fabriqués selon un procédé tiède / chaud,
- ou multi-recyclés

ont des propriétés similaires (ou améliorées), à condition de maîtriser la formulation (bitume d'apport).

- Nouvelle méthode d'estimation de hauteur de fissure par corrélation d'images, donnant des résultats comparables à la méthode DRCL
- **Propriétés de propagation de fissures similaires** et peu influencées par procédé de fabrication, AE%, vides% et cycle de recyclage.



Merci de votre attention !



Cluster F

3 Technical Committees

- ✓ 264-RAP (G. Tebaldi)
- ✓ 272-PIM (E. Chailleux)
- ✓ 278-CHA (H. Baaj)

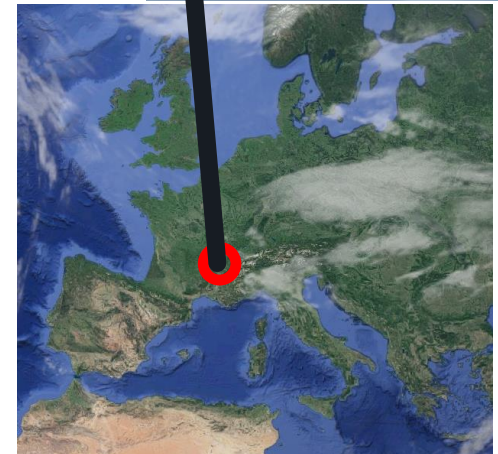
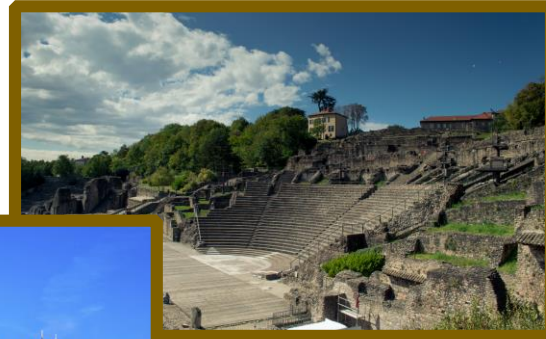
With the support of



ISBM Lyon 2020
June 8th - 10th 2020
Lyon, France

Chairmen: H. Di Benedetto, C. Sauzéat
General secretary: S. Mangiafico





Welcome to Lyon in June 2020

RILEM ISBM Lyon 2020



- 3-day conference (Mon-Wed) + meetings/workshop before or after
- Plenary and parallel sessions dedicated to each TC, poster sessions and keynote lectures
- Stands for exhibitors
- ISI-indexed proceedings + selection of papers for publication of extended articles on RMPD and JTE

AREAS OF INTEREST

Bituminous materials (bitumen, mastics, mixtures)

- ✓ Recycling
- ✓ Phase and interphase behaviour
- ✓ Cracking and healing
- ✓ Modification and innovative materials
- ✓ Durability and environmental aspects
- ✓ Testing (laboratory, in situ, accelerated) and modelling

Road, railway and airport pavement structures

- ✓ Surface characteristics
- ✓ Structure performance, modelling and design
- ✓ Non-destructive testing
- ✓ Back-analysis
- ✓ Life Cycle Assessment

RILEM, a long history of successful international conferences!