

Caractérisation de la propagation de fissure pour l'AS7U05G03 sous un chargement thermomécanique de fatigue

Application au dimensionnement de structures automobiles en alliage d'aluminium Al-Si

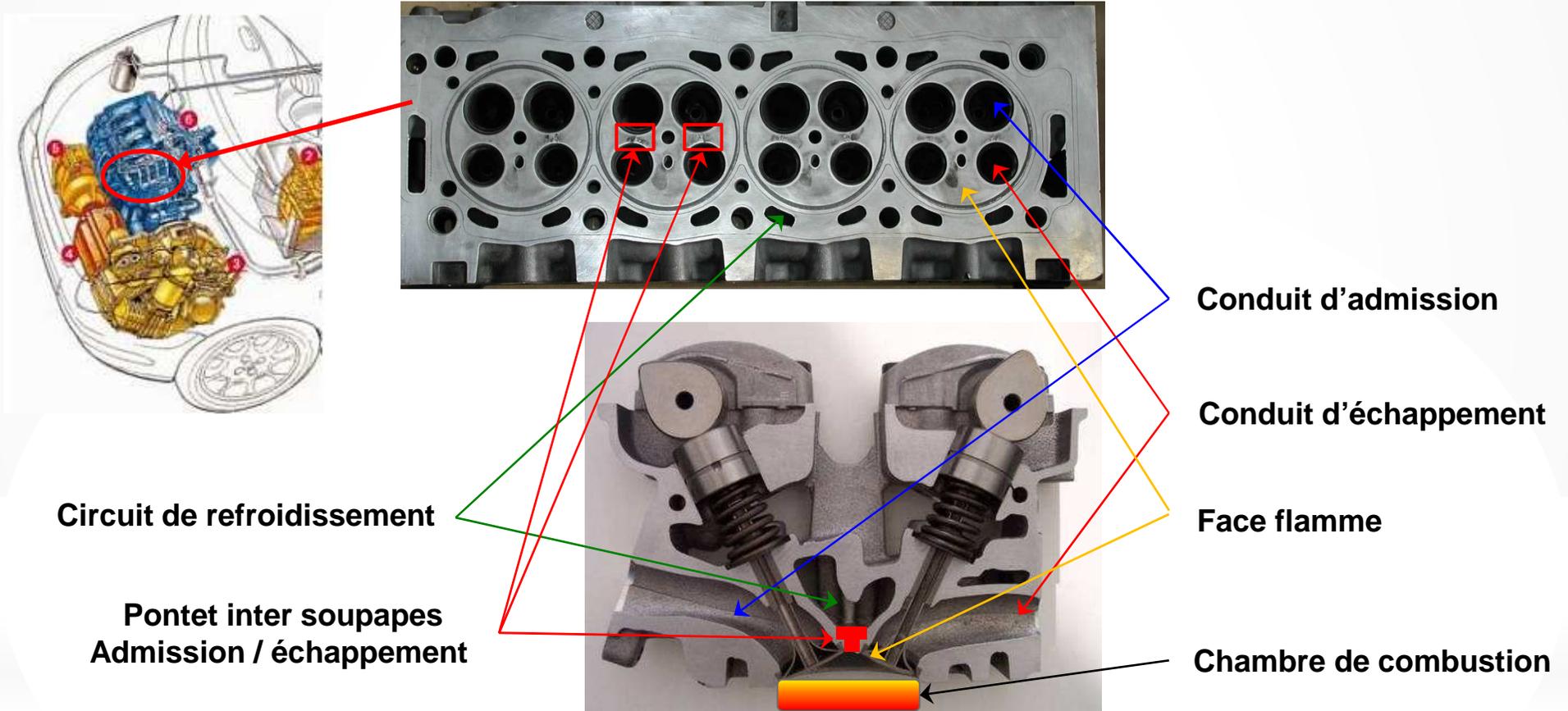
Elias MERHY^{1,*}

¹PSA Peugeot Citroën, Route de Gisy, 78943 Vélizy-Villacoublay Cedex, France

**elias.merhy@mpsa.com*

Problématique industrielle

Fissuration des culasses des moteurs HDI

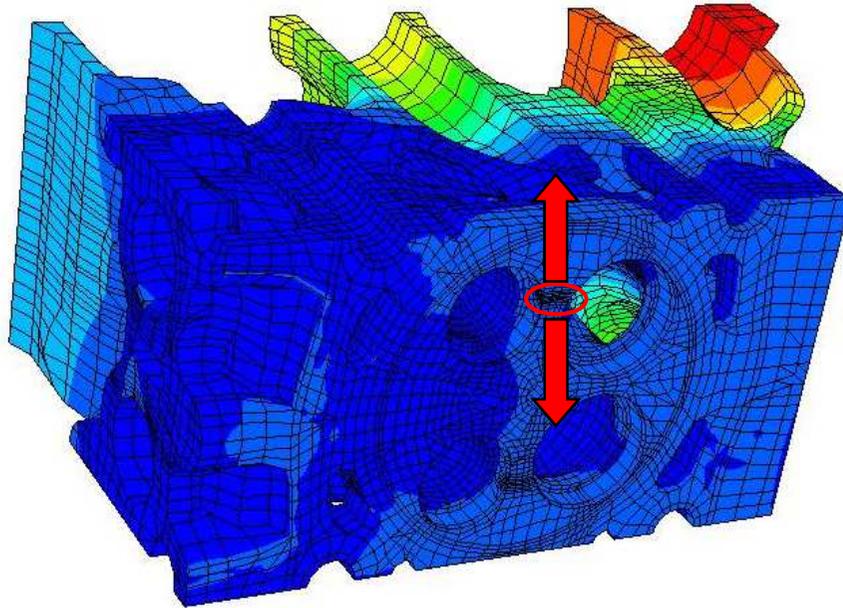


Chargement mécanique : cycles de pression d'explosion

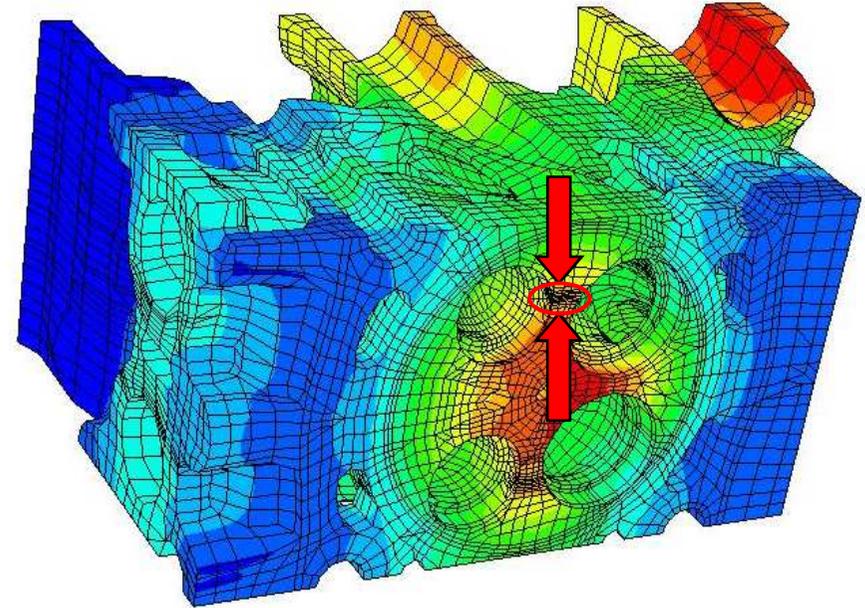
Chargement thermique : cycles démarrage / arrêt du moteur \Rightarrow fissuration du pontet inter soupapes

Problématique industrielle

Chargement thermomécanique des culasses des moteurs HDI



À froid : pontet sollicité en traction
(fretage des sièges)



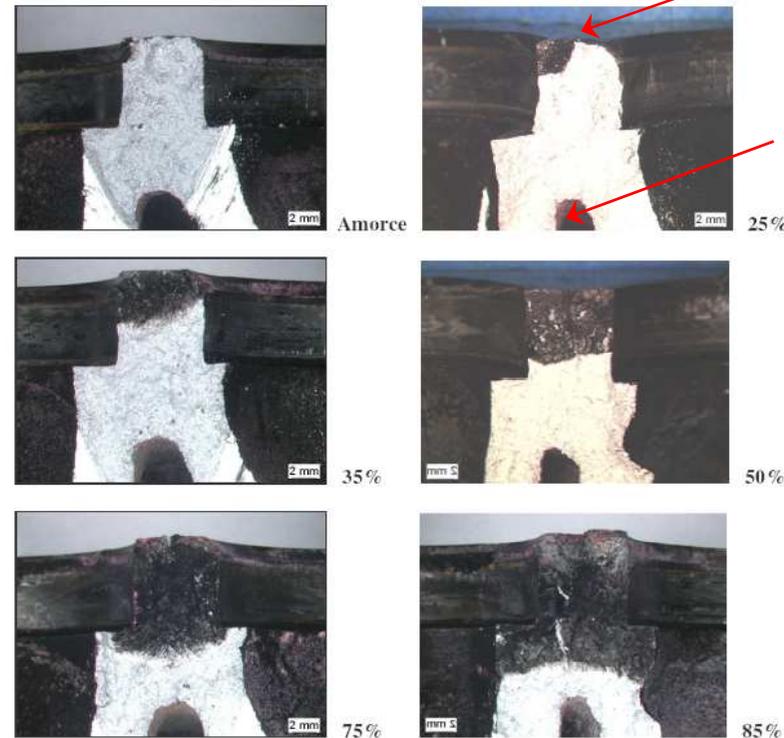
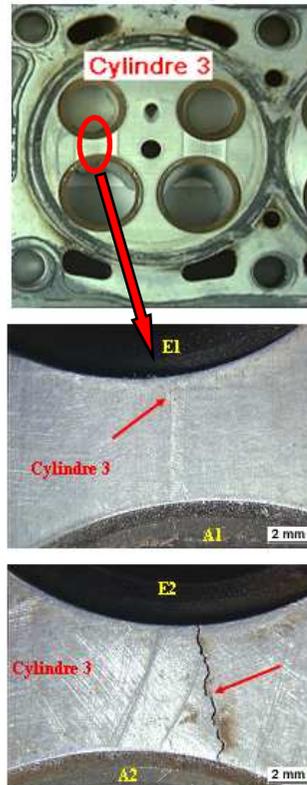
À chaud : pontet sollicité en compression
(gradient thermique)

Cyclage thermique
(cycles démarrage/arrêt) → fatigue thermomécanique (anisotherme)

Problématique industrielle

Essais type choc thermique sur banc chalumeau culasse (PSA)

- Fissuration pontet inter soupapes (Echappement - Admission).
- Amorçage face flamme coté conduit échappement.



Propagation quasiment plane

$N_{propagation} \sim N_{amorçage}$

Jusqu'à présent, PSA utilise l'approche de dimensionnement à l'amorçage de la fissure

Pour un dimensionnement optimal il faut prendre en compte la propagation de la fissure

Simulation EF (sur la structure) :
Trajet de chargement,
Champs mécaniques, ...

Essais à différents :
Amplitude de charge,
Rapport de charge,
température et fréquence

Objectifs :

Méthode de dimensionnement basée sur la tolérance à l'endommagement ;
Loi de propagation sous chargement anisotherme

Gains escomptés :

- Gammes de validation des composants moins sévères
- Gain potentiel en kW sur moteur
- Gain potentiel en coût de développement/fabrication culasse

Plan

1 – Problématique industrielle

2 – Analyse numérique des champs thermomécaniques dans la culasse

3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

4 – Loi de propagation proposée

5 – Conclusions

Plan

1 – Problématique industrielle

2 – Analyse numérique des champs thermomécaniques dans la culasse

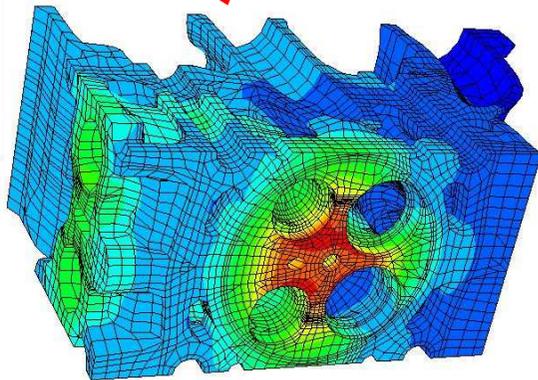
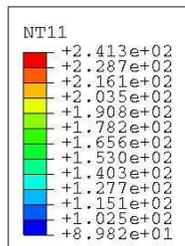
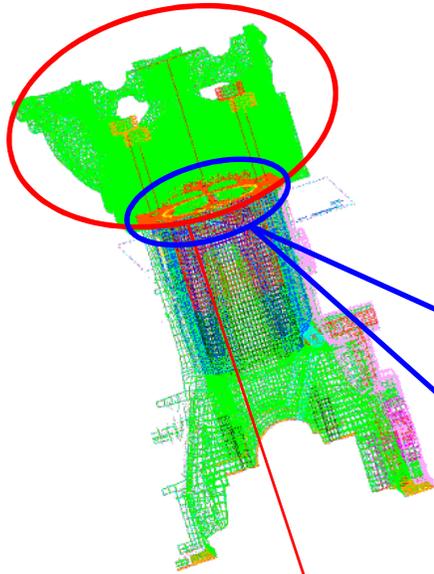
3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

4 – Loi de propagation proposée

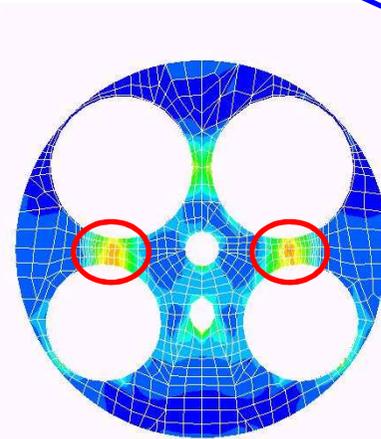
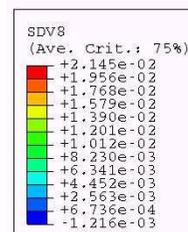
5 – Conclusions

2 – Analyse numérique des champs thermomécaniques dans la culasse

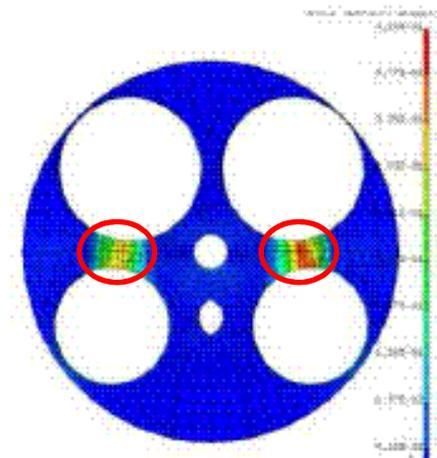
- Modèle EF 3D du bloc cylindre : 350 000 éléments C3D10
- Loi de comportement élasto-viscoplastique à écrouissage cinématique non linéaire (EVP-ECNL)



Température

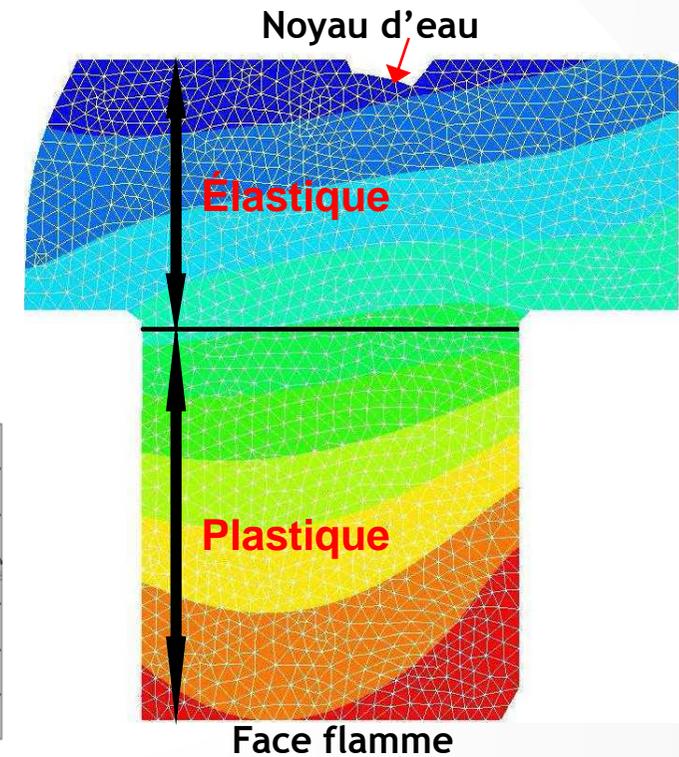
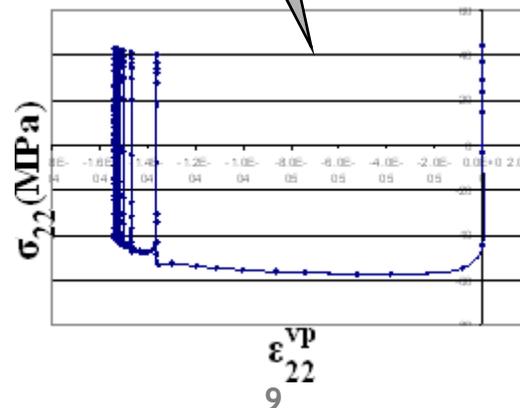
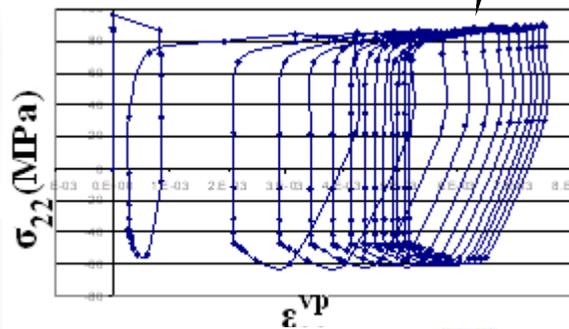
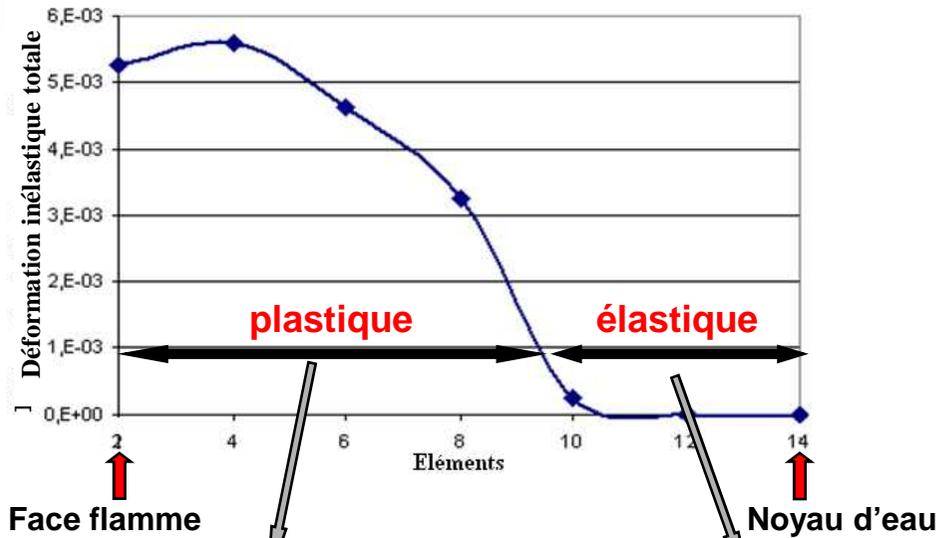
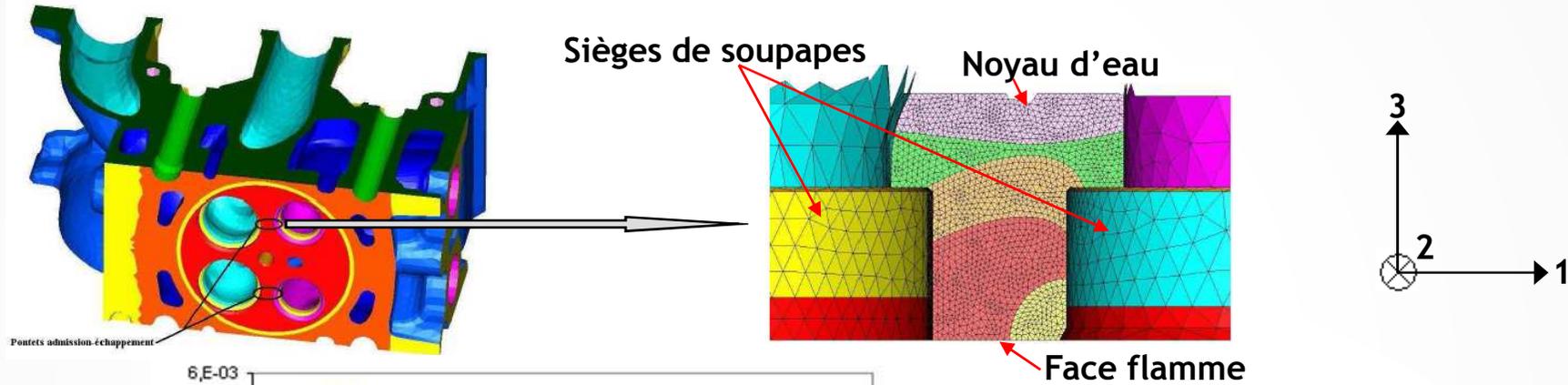


Déformation
inélastique cumulée



Énergie dissipée

2 – Analyse numérique des champs thermomécaniques dans la culasse



2 – Analyse numérique des champs thermomécaniques dans la culasse

Bilan de l'analyse numérique

- Vérification de la **criticité du pontet** inter soupape
- Chargement **anisotherme** à **rapport de charge négatif** ($R < 0$)
- Deux zones de comportement différent dans le pontet:
 - 1 - Zone à comportement **élastique**
 - 2 - Zone à comportement **plastique**

Plan

1 – Problématique industrielle

2 – Analyse numérique des champs thermomécaniques dans la culasse

3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

4 – Loi de propagation proposée

5 – Conclusions

3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

Essais réalisés

Chargement anisotherme à $R < 0$
(T varie, effet compression)

Matériau élasto-viscoplastique
(effet du temps/fréquence)

Caractérisation générale de
La propagation de la fissure



46 essais de fissuration
(isothermes et anisothermes)

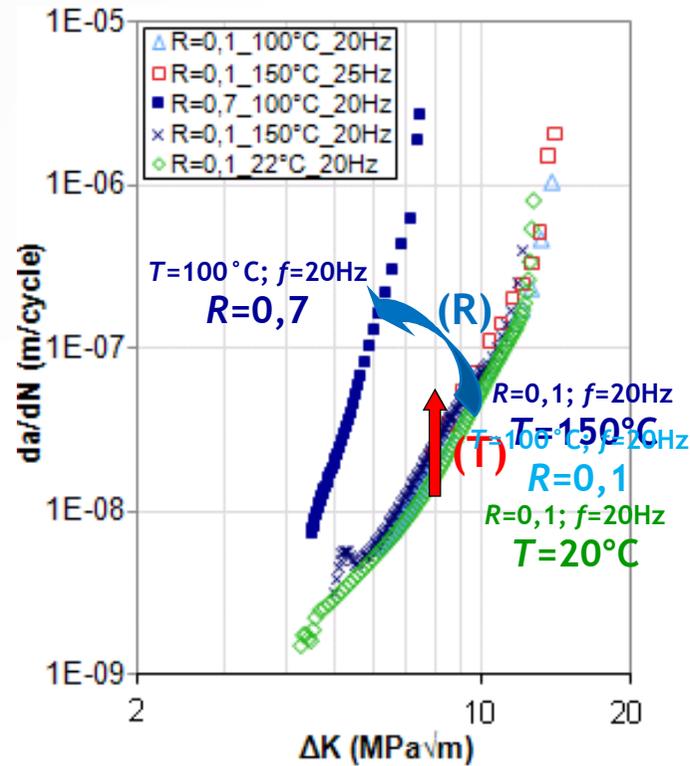
T varie : 20 °C, 100 °C, 150 °C et 170 °C

R varie : -1, -0.5, 0.1, 0.7

f varie : 0.005Hz, 0.05Hz, 1Hz, 20Hz

3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

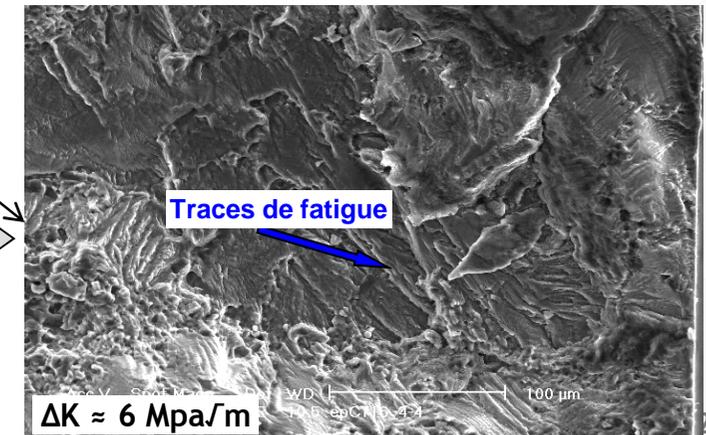
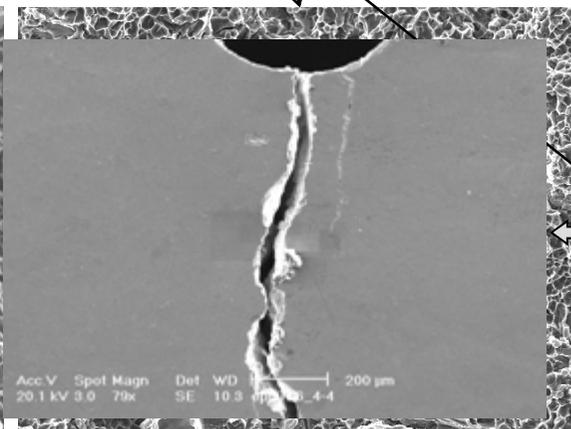
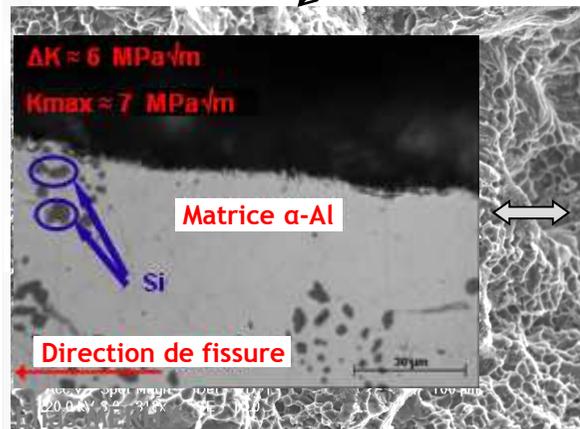
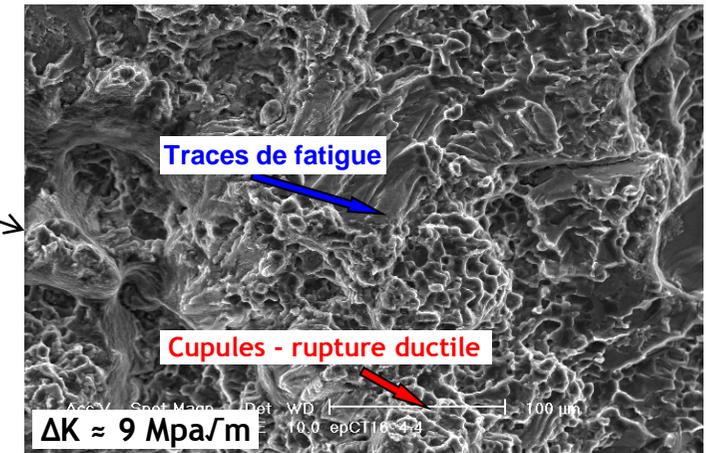
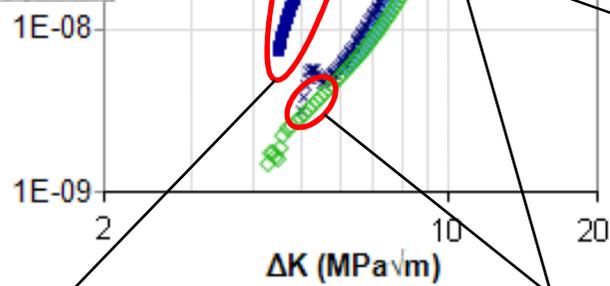
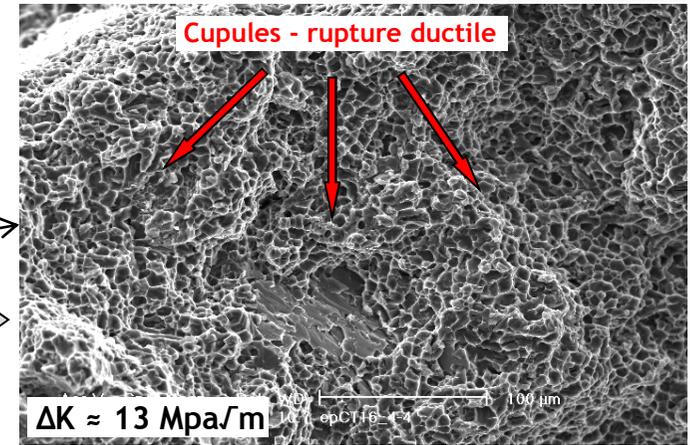
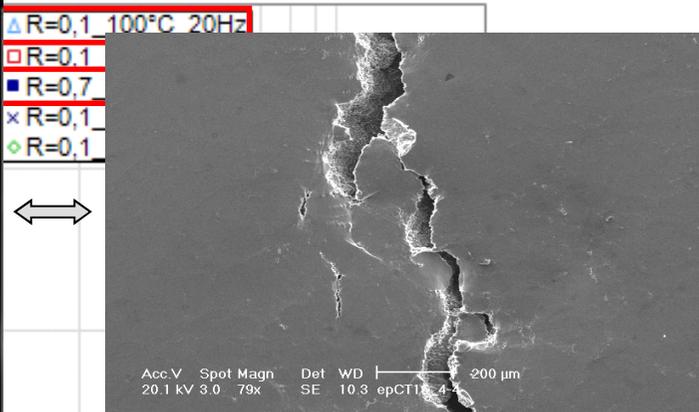
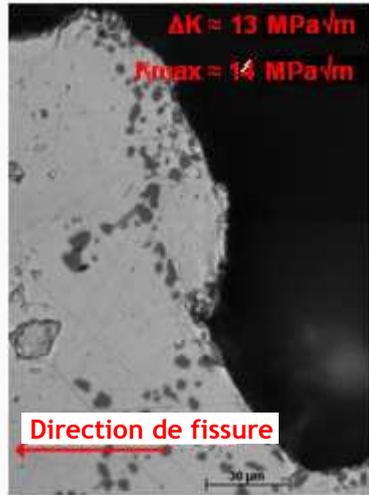
Essais isothermes sur CT16 à $R > 0$ et ΔK croissant



Effet important de
plasticité cumulée ?

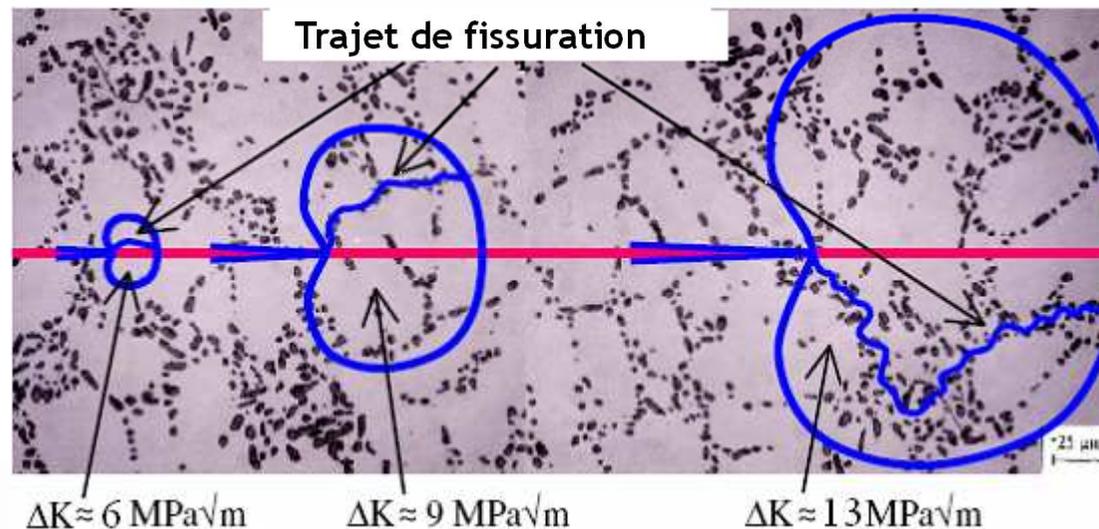
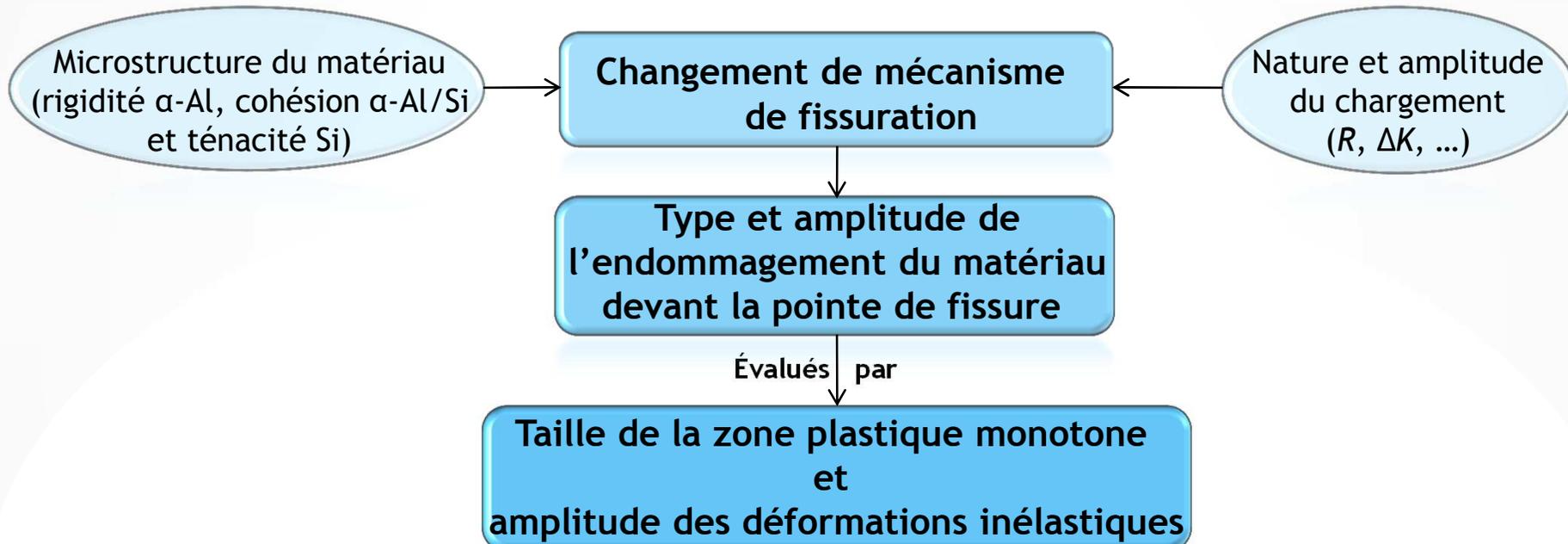
3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

Essais isothermes sur CT16 à $R > 0$ et ΔK croissant



3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

Essais isothermes sur CT16 à $R > 0$ et ΔK croissant

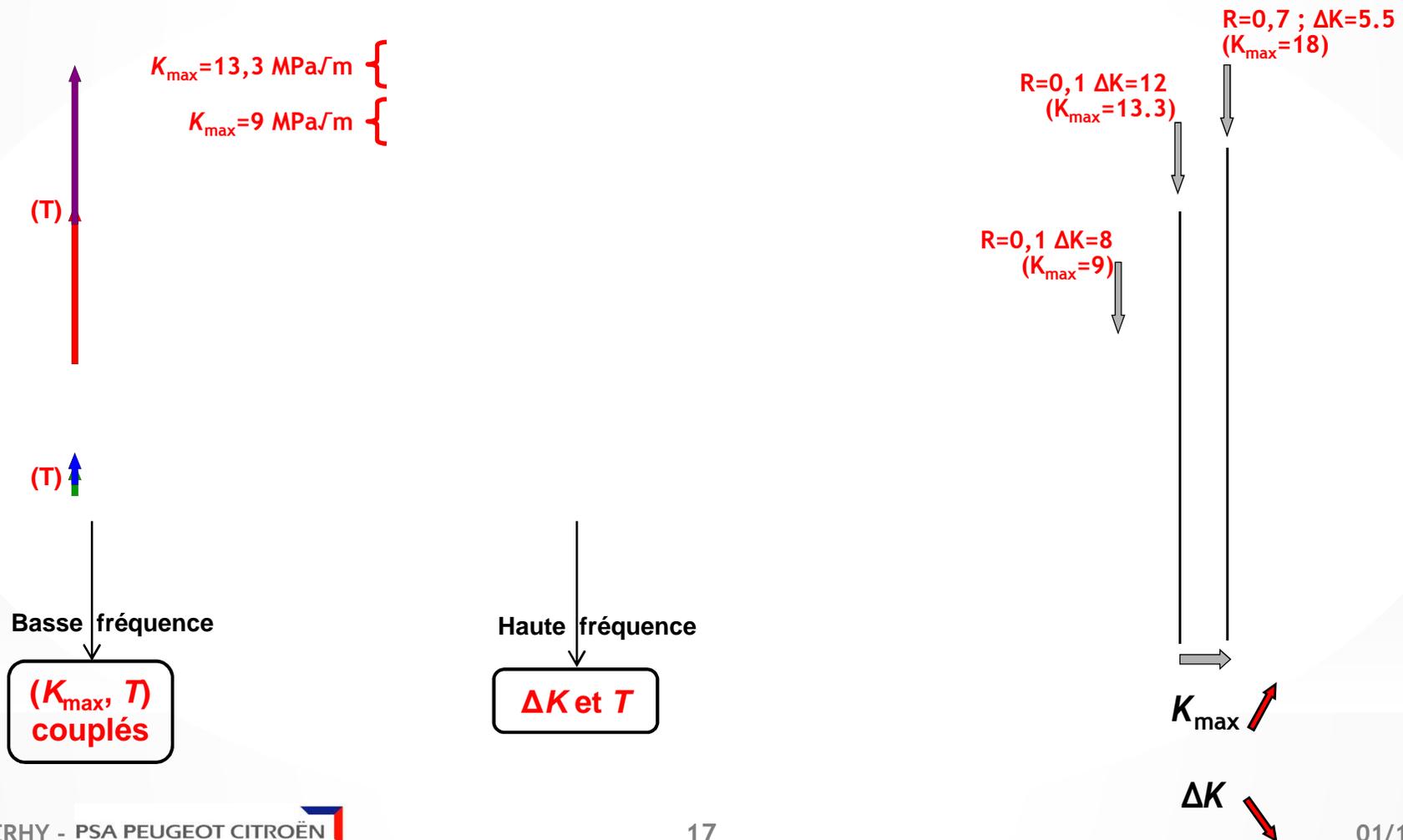


3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

Effets de fatigue + **Chargement monotone** + **Matériau EVP**
Chargement industriel à basse fréquence
(~ 0,005 Hz)

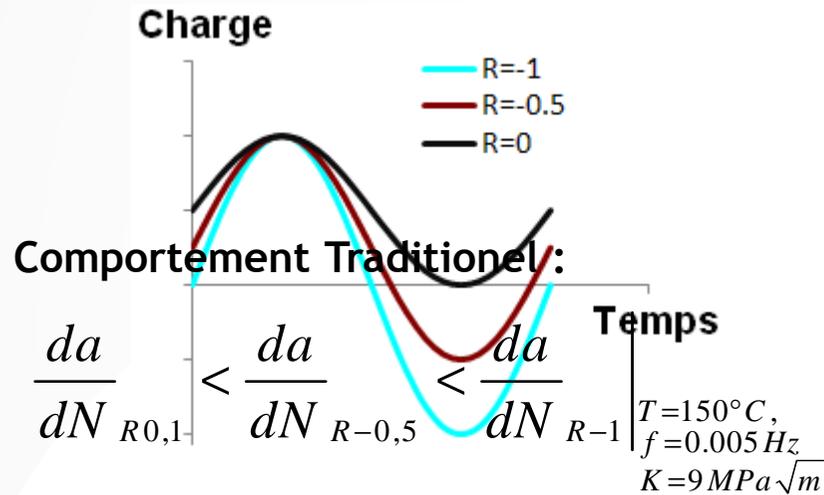


Essais isothermes sur CT16 à $R > 0$, ΔK constant et fréquence variable



3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

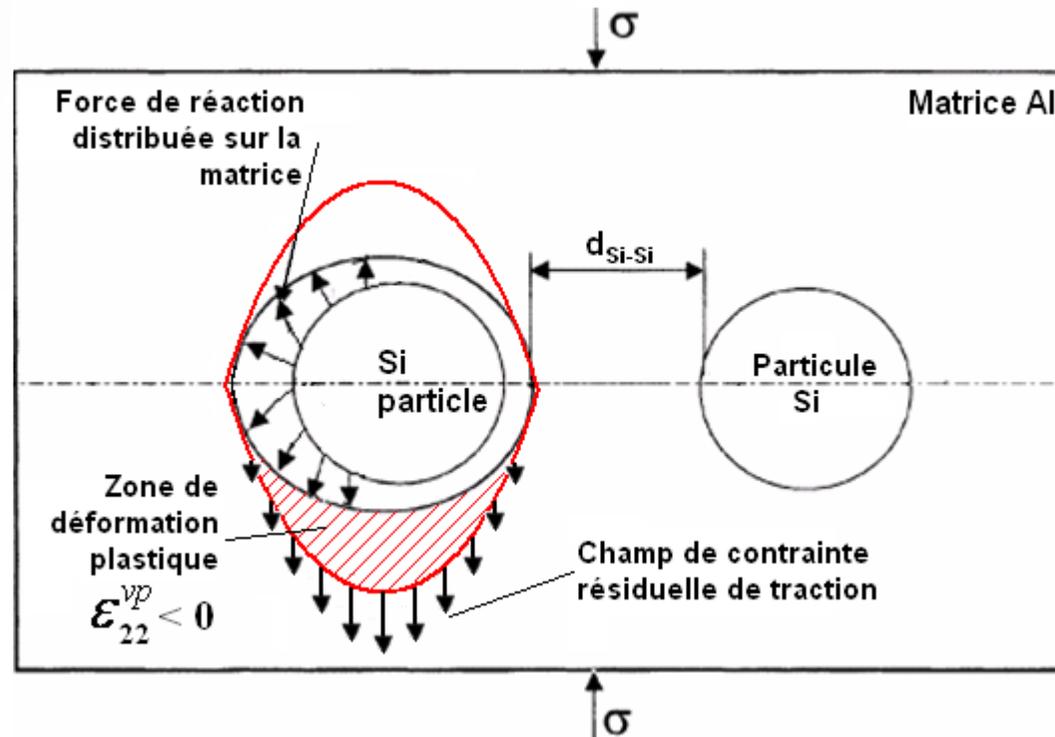
Essais isothermes sur SEN à $R < 0$, ΔK constant et fréquence variable



$$\frac{da}{dN}_{R0,1} = \frac{da}{dN}_{R-0,5} = \frac{da}{dN}_{R-1} \left| \begin{array}{l} T=150^{\circ}C, \\ f=0.005 Hz \\ K=13.3 MPa\sqrt{m} \end{array} \right.$$

3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

Essais isothermes sur SEN à $R < 0$, ΔK constant et fréquence variable



Sous compression macroscopique :

- Déformation elliptique de la matrice au niveau de l'interface α -Al/Si
- Particule Si non déformé \implies compatibilité d'interface \implies force de réaction sur la matrice
- x dislocations géométriquement nécessaires \implies activation de systèmes de glissement additionnels $\implies \epsilon_{22}^{vp} < 0$
- Champ local de contrainte résiduelle de traction

3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

Essais isothermes sur SEN à $R < 0$, ΔK constant et fréquence variable

$$\frac{da}{dN}_{R < 0} = \Delta a|_{1 \text{ cycle}} = \int_t^{t+t^+} \frac{da}{dt} dt + \int_{t+t^+}^{t+T} \frac{da}{dt} dt = \frac{da^+}{dN}_{R < 0} + \frac{da^-}{dN}_{R < 0}$$

Hypothèse: $\frac{da^+}{dN}_{R < 0} = \frac{da}{dN}_{R=0} \Big|_{K_{\max}, f, T}$

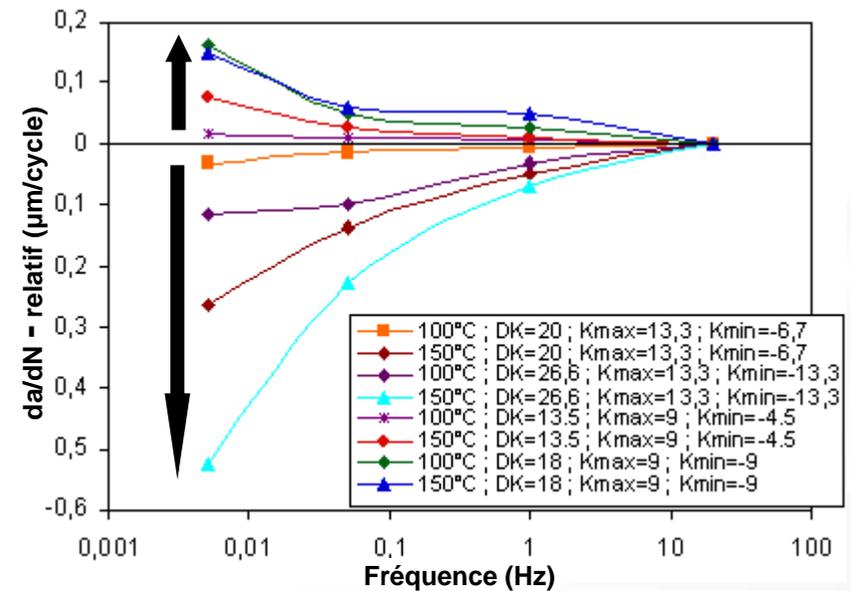
$$\frac{da^-}{dN}_{R < 0} = \frac{da}{dN}_{R < 0} - \frac{da}{dN}_{R=0} \Big|_{K_{\max}, f, T}$$

$$\frac{da^-}{dN}_{R < 0(\text{Rel})} = \frac{da^-}{dN}_{R < 0} - \frac{da^-}{dN}_{R < 0(20\text{Hz})}$$

Parameters pilotes:
 $(K_{\max}) > (K_{\min}, T) + f$

$K_{\max}=9$:
 K_{\min} &/ou T

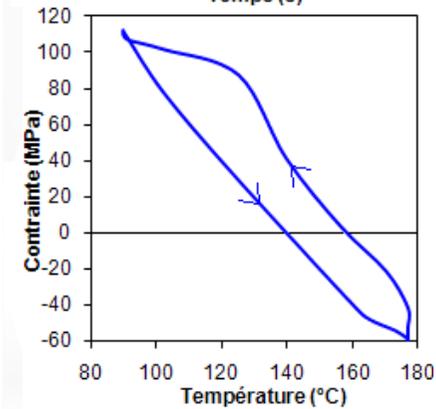
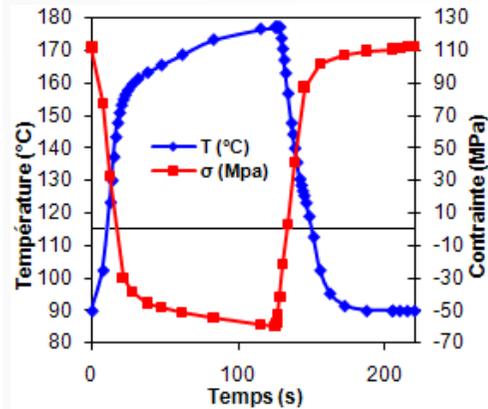
$K_{\max}=13.3$:
 K_{\min} &/ou T



3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

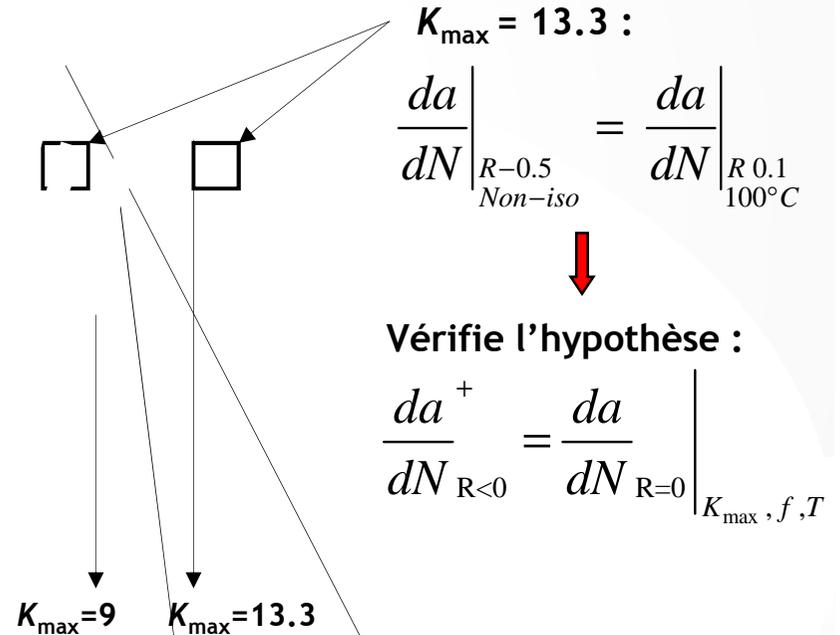
Essais anisotherme sur SEN sous :

$R = -0.5$, $f \approx 0.005\text{Hz}$, $T_{\min}(\sigma_{\max}) = 90^\circ\text{C}$, $T_{\max}(\sigma_{\min}) = 170^\circ\text{C}$ et ΔK croissant



Pour les mêmes K_{\max} , T et f :

$$\frac{da}{dN}_{R=-0.5}^{\text{aniso}} = \underbrace{\frac{da}{dN}_{R=0.1}}_{+}^{T_{\sigma_{\max}}} + \underbrace{\frac{da}{dN}_{R=-0.5}}_{-}^{T_{\sigma_{\min}}} - \frac{da}{dN}_{R=0.1}^{T_{\sigma_{\min}}}$$



3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

Bilan sur la caractérisation expérimentale de la propagation

- Mécanisme de propagation progressive et mixte (à $R > 0$) :
Fissuration par fatigue à faible $K \rightarrow$ Rupture ductile à K élevé.
- Effet notable de la fréquence sur la vitesse de propagation :
 - à haute fréquence : $(\Delta K, T)$
 - à basse fréquence : (K_{\max}, T)
- La partie compressive des cycles à $R < 0$ provoque une augmentation de la vitesse de propagation totale due à un effet de plastification locale induisant des $\sigma^{\text{res}} > 0$.
- Pour un chargement cyclique anisotherme et à $R < 0$, la vitesse de propagation peut être déduite des vitesses sous conditions isothermes et à $R > 0$ et $R < 0$.
- Vitesse de propagation peut être caractérisée par r_p^{mon} et $\Delta \varepsilon_{\text{éq}}^{\text{vp}}$.

Plan

1 – Problématique industrielle

2 – Analyse numérique des champs thermomécaniques dans la culasse

3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

4 – Loi de propagation proposée

5 – Conclusions

4 – Loi de propagation proposée

$\Delta \varepsilon_{\dot{\varepsilon}q}^{vp}(r, \theta)$ et $r_p^{\text{mon}}(\theta = 0^\circ)$ sous forme de relations analytiques :

$$\frac{da}{dN} = C_1 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_p^{\text{mon}}(\theta=0)} \Delta \varepsilon_{\dot{\varepsilon}q}^{vp}(r, \theta) r dr d\theta$$

Solution asymptotique (HRR) de Riedel et Rice pour un matériau viscoélastique

loi de fluage en puissance de type Norton :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \dot{\varepsilon}_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n$$

Solution de Riedel et Rice en fluage primaire:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}(r, \theta, t) = \dot{\varepsilon}_0 \left(\frac{K_I^2(t)(1-\nu^2)}{\dot{\varepsilon}_0 \sigma_0 I_n r E(n+1)t} \right)^{\frac{n}{n+1}} \tilde{\varepsilon}_{ij}(\theta, n)$$

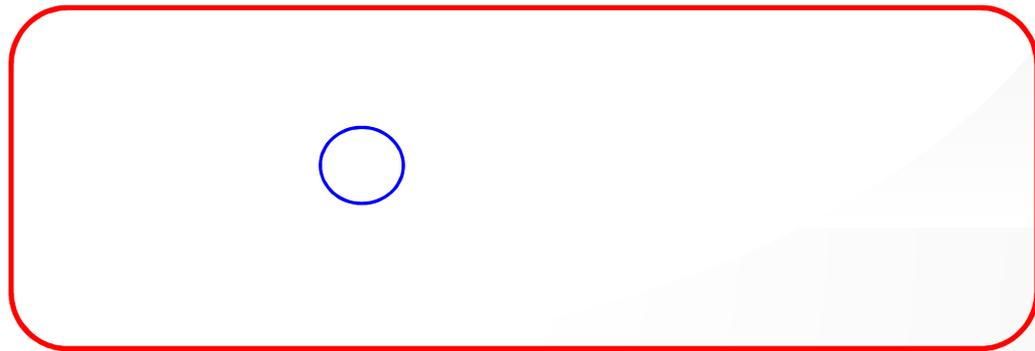
Solution proposée pour l'AS7U05G03 (matériau élasto-viscoplastique)

Vitesse de déformation viscoplastique :

$$\dot{\varepsilon}_{\dot{\varepsilon}q}^{vp} = \left\langle \frac{J_2(\sigma_{ij} - X_{ij}) - \sigma_y(T)}{\eta(T)} \right\rangle^{m(T)}$$

Solution équivalente à celle de Riedel et Rice :

$$\dot{\varepsilon}_{\dot{\varepsilon}q}^{vp}(r, t, T) = \dot{\varepsilon}_0 \left(\frac{K_I^2(t) \left(\frac{\sigma_v(r, t, T)}{\sigma_y(T) + X(r, t, T) + \sigma_v(r, t, T)} \right)^2 (1-\nu^2)}{\dot{\varepsilon}_0 \sigma_y(T) r E(m(T)+1)t \eta(T)} \right)^{\frac{m(T)}{m(T)+1}}$$



4 – Loi de propagation proposée

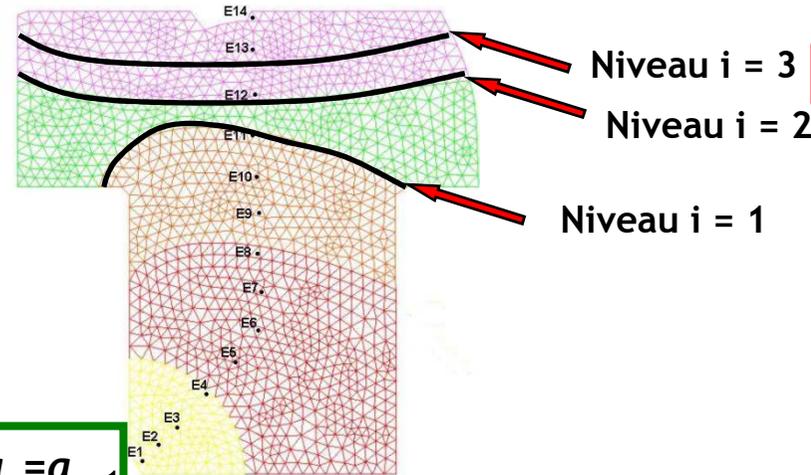
Validation de la loi

**Inclus :
effet d'histoire**

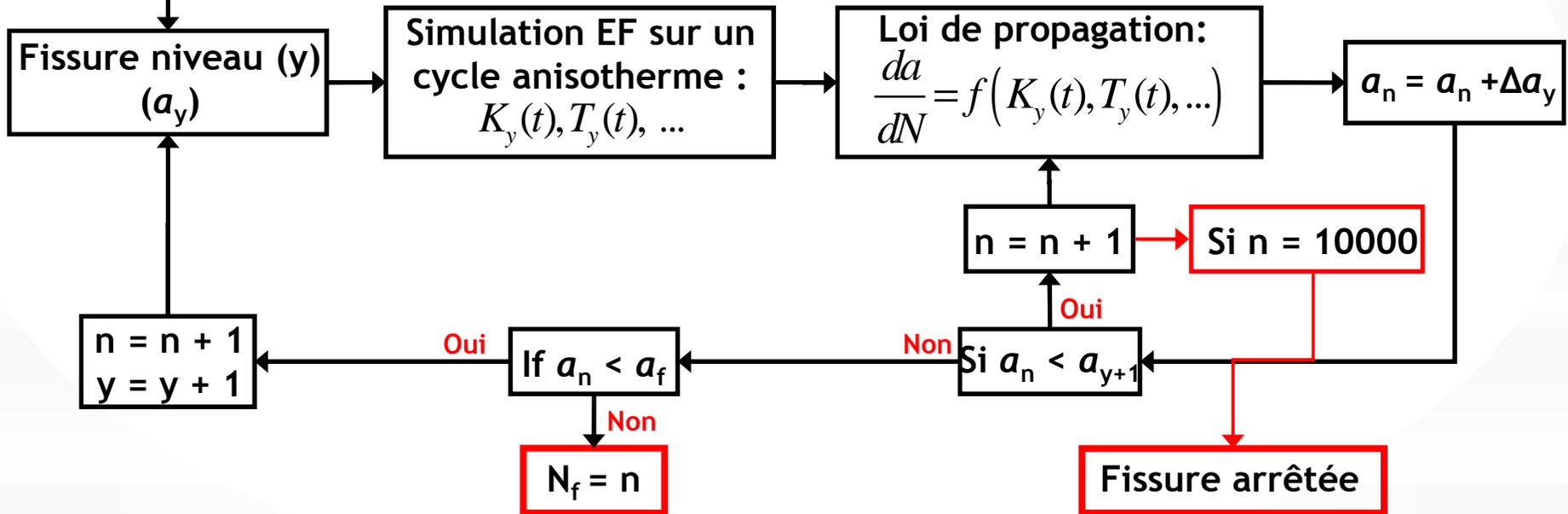
**Inclus :
effet d'histoire + effet compression**

4 – Loi de propagation proposée

Implémentation et démarche numérique

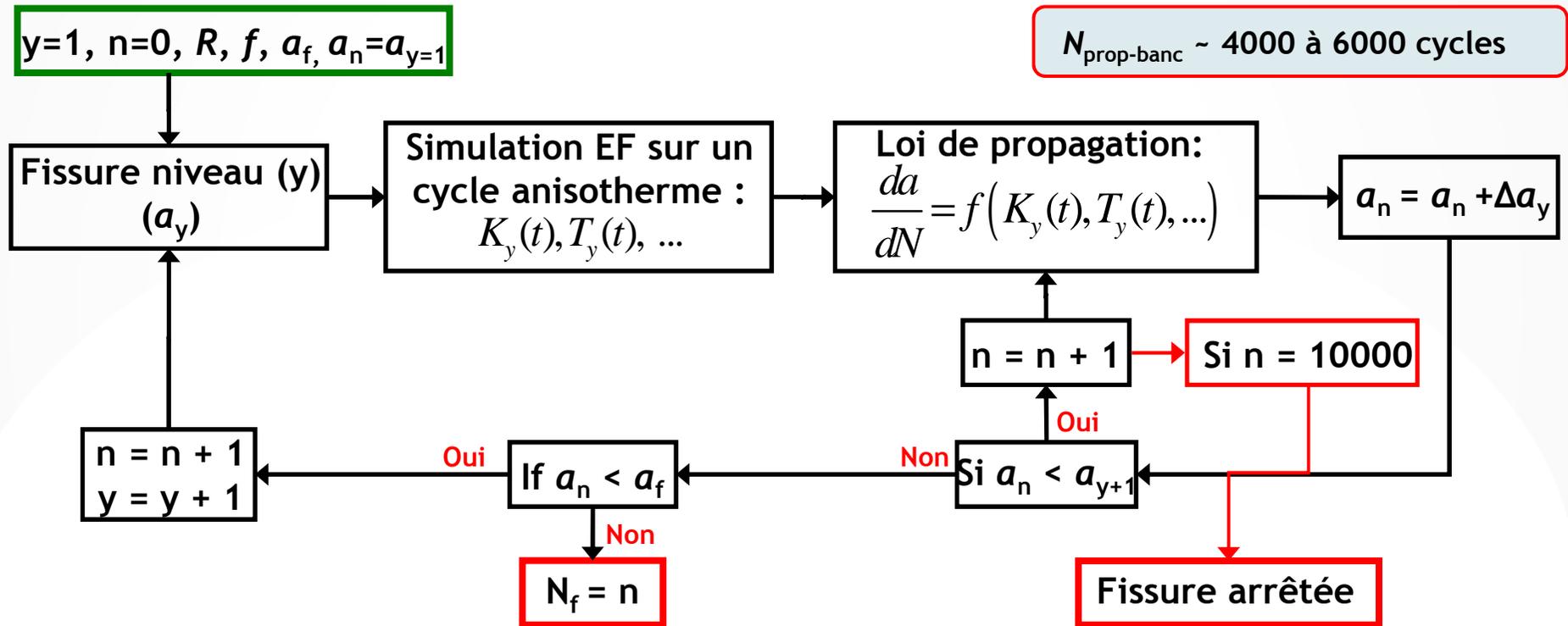


$y=1, n=0, R, f, a_f, a_n=a_{y=1}$



4 – Loi de propagation proposée

Implémentation et démarche numérique



Niveau de fissure (y)	ΔK (MPa√m)	K_{max} (MPa√m)	$J_{c\ max}$ (MPa.m)	J_p^* (MPa.m)	$K_{p,max}$ (MPa√m)	da/dN (μm/cycle)	$\Delta a = a_{y+1} - a_y$ (μm)	N (cycle)
1	18,7467	12,093	2,0697	0,3054	12,9598	0,6417	0.85399	1330
2	19,6737	12,691	2,2793	0,3430	13,6176	0,5269	0.90778	1722
3	20,1124	12,974	2,3820	0,3557	13,9139	0,6204	0.85811	1383

Nombre de cycles totale de propagation dans la zone élastique ($N_{prop-élast}$) = **4435**

Plan

1 – Problématique industrielle

2 – Analyse numérique des champs thermomécaniques dans la culasse

3 – Caractérisation expérimentale de la propagation de la fissure

4 – Loi de propagation proposée

5 – Conclusions

5 – Conclusions

- Mécanisme de propagation de fissure dans l'AS7U05G03 lié à la microstructure (α -Al / ténacité Si / cohésion α -Al, Si et le SDAS) ; Influencées par r_p^{mon} et $\Delta\varepsilon_{\text{éq}}^{\text{vp}}$
- Fatigue à faible $K \rightarrow$ Rupture ductile à K élevé
- Nouvelle loi de propagation à **1 paramètre matériau (C_1 ou C_2)** a été proposée et validée.
 - Loi basée sur la somme de $\Delta\varepsilon_{\text{éq}}^{\text{vp}}$ devant la pointe
 - Loi prend en compte les effets de :
 - + Fatigue
 - + Chargement monotone
 - + Histoire (Plasticité cumulée)
 - + Chargement compressif

Merci pour votre attention