

Thermodynamique des Processus Irréversibles  
Quiberon, 16-22 sept. 2018

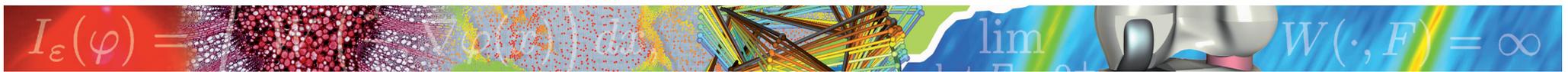
7ème école d'été de mécanique théorique

# Effets de couplage et effets dissipatifs accompagnant la déformation des matériaux solides

(4<sup>ème</sup> partie)

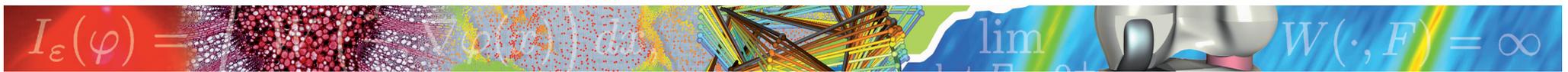
André Chrysochoos  
LMGC, UMR 5508 CNRS-UM





# Programme

- 1 - Cadre thermomécanique et bilan d'énergie  
(TPI-MSG)
- 2 - Quelques éléments rhéologiques à la sauce MSG  
(d'une vision mécanique à vision thermomécanique)
- 3 - Analyse expérimentale des bilans d'énergie  
(imagerie quantitative)
- 4 - Effet du temps : couplage thm et/ou viscosité ?  
(interaction forte et/ou irréversibilité)
- 5 - Effet dissipatif dans les métaux  
(HCF & VHCF)



- 5 -

## Effet dissipatif dans les métaux

HCF

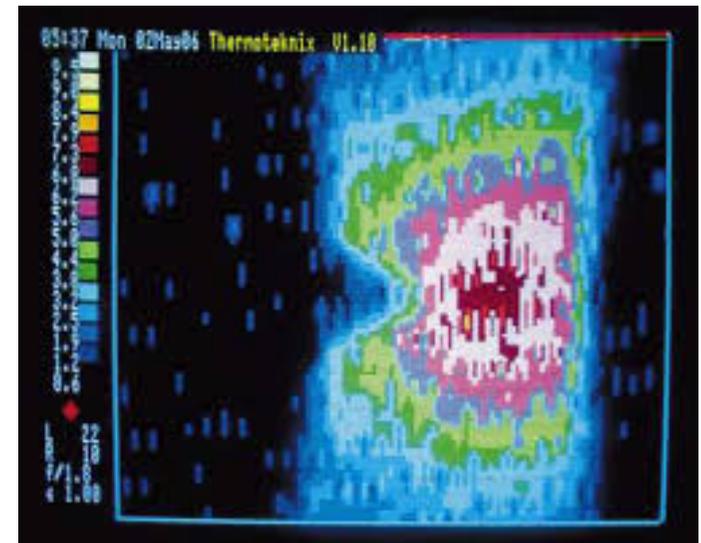


HCF + VHCF



DiSFAT

Fatigue à grand  
et très grand nombres de cycles

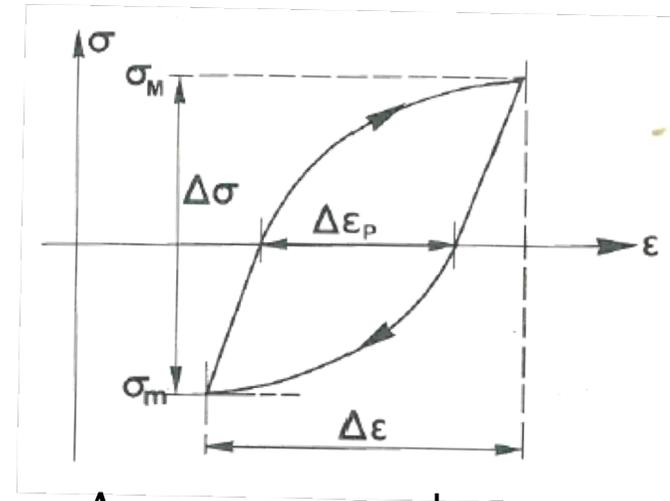
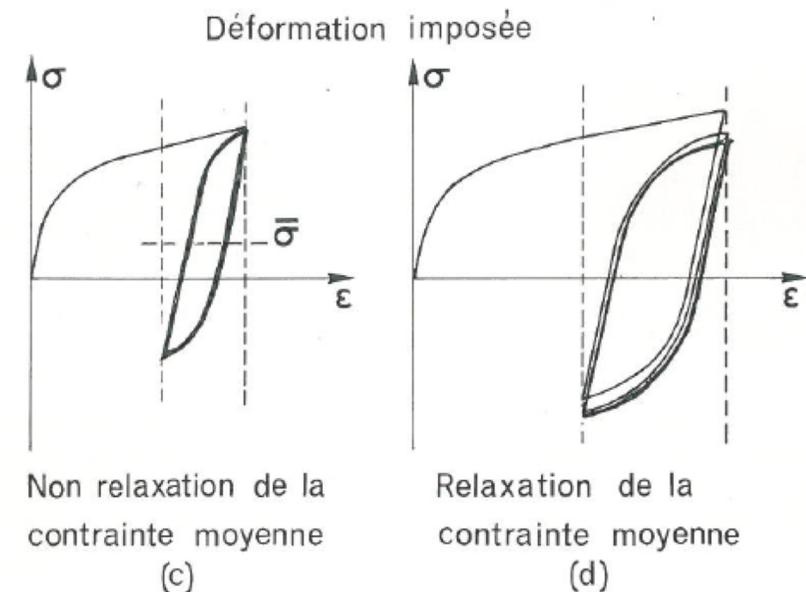
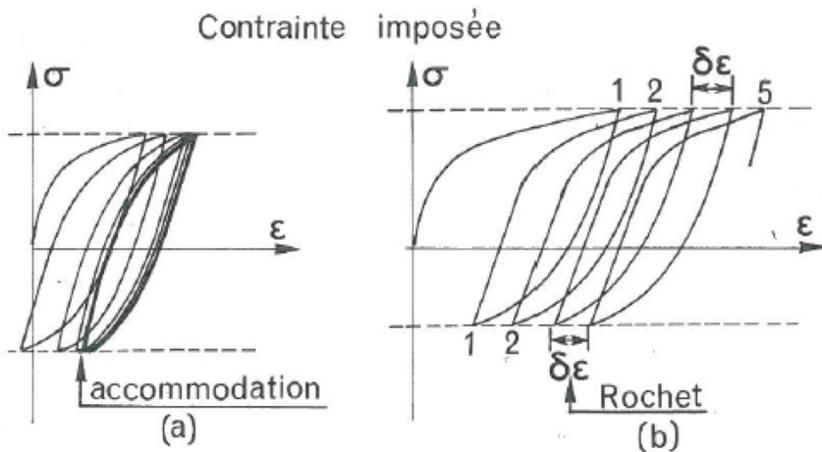


# Stabilisation cyclique

« En général la réponse tend à se stabiliser au bout d'un certain nombre de cycles. »

(J. Lemaitre et J.-L. Chaboche, 1985, Mécanique des Matériaux Solides, Dunod)

## Cycle stabilisé

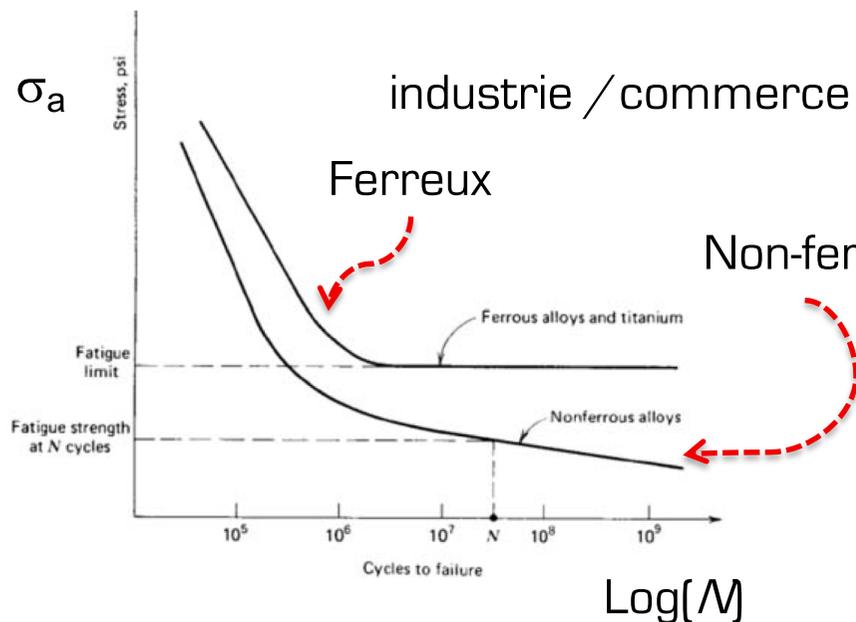


$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad \sigma_M = \frac{\sigma_M + \sigma_m}{2}$$

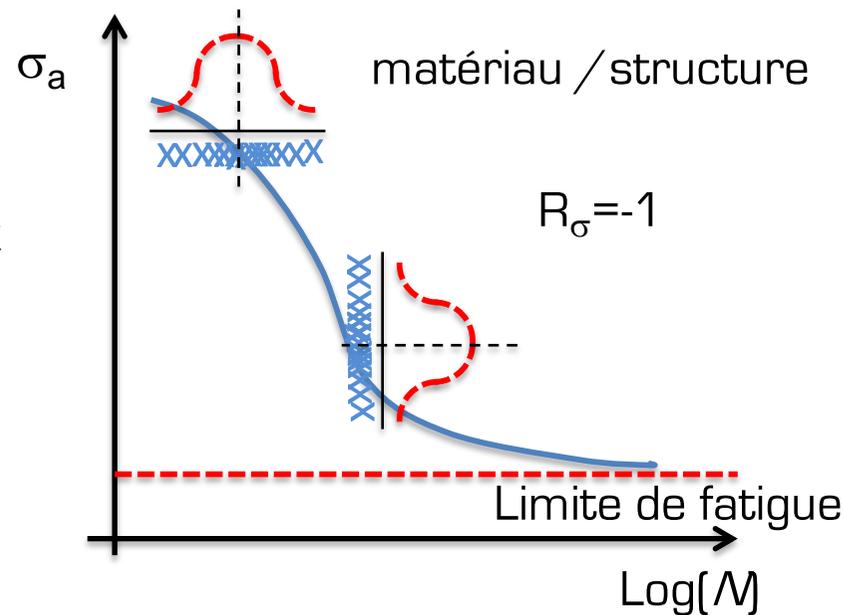
Paramètres importants pour caractériser la tenue en fatigue : Wöhler, diagrammes d'endurance, Haigh, Goodman, ...

$A_h$  : aire d'hystérésis , contenu énergétique ?

# Limite de fatigue



Source internet : vendeur d'acier  
 (acier xx , le top de la légèreté et de la robustesse !)



D'après S. Degallaix et B. Ilschner  
 Caractérisation expérimentale des matériaux  
 Presses Polytechniques et Universitaires Romandes

Limite de fatigue ou d'endurance illimitée : niveau de contrainte au dessous duquel on n'observe pas de rupture ... une vie éternelle, sans irréversibilité ?

Rupture →  $d/dt(\text{Endommagement}) \neq 0$      OK !

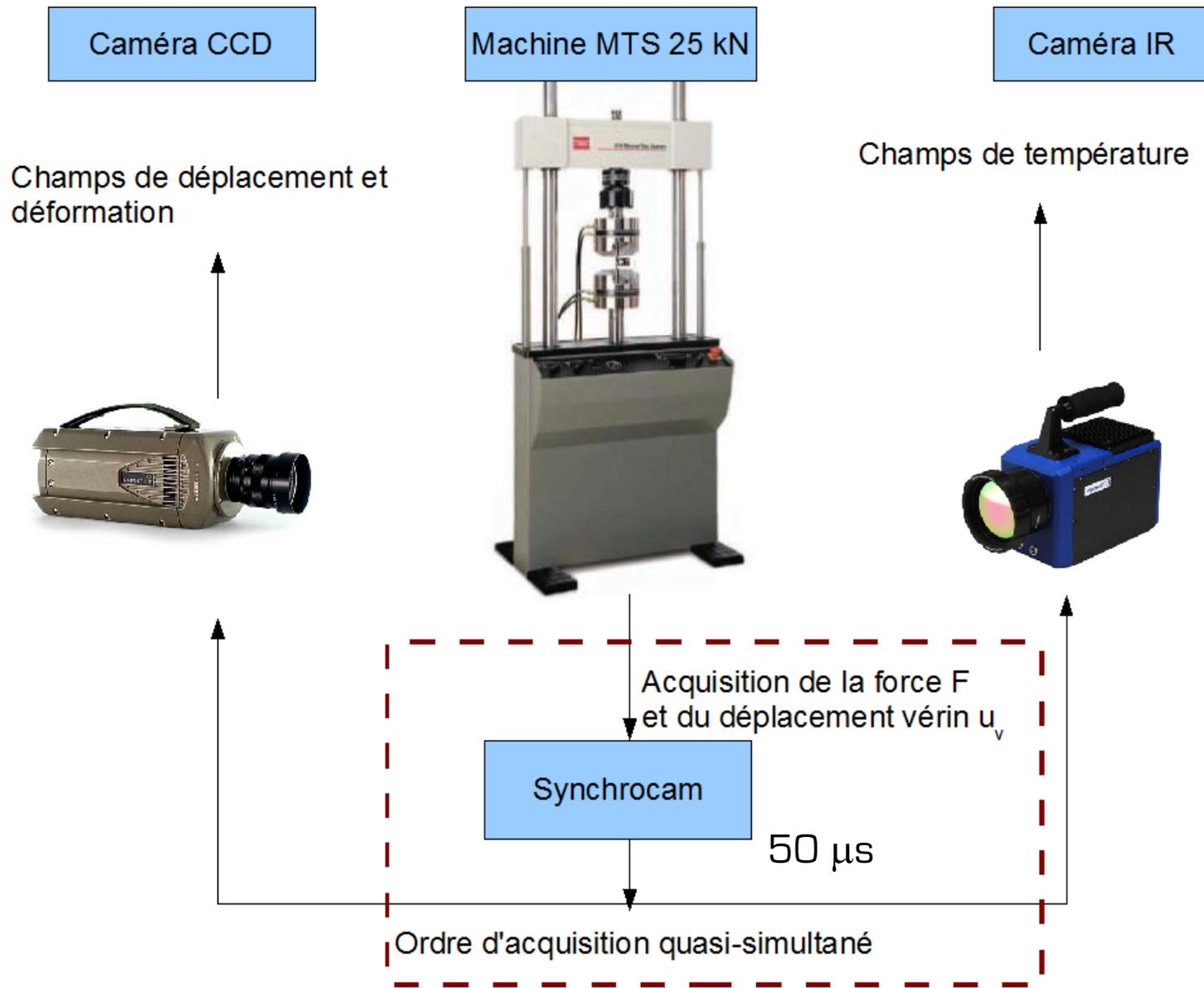


Thermodynamique : irréversibilités sans rupture ?

sans « dérive » de l'état thm ?

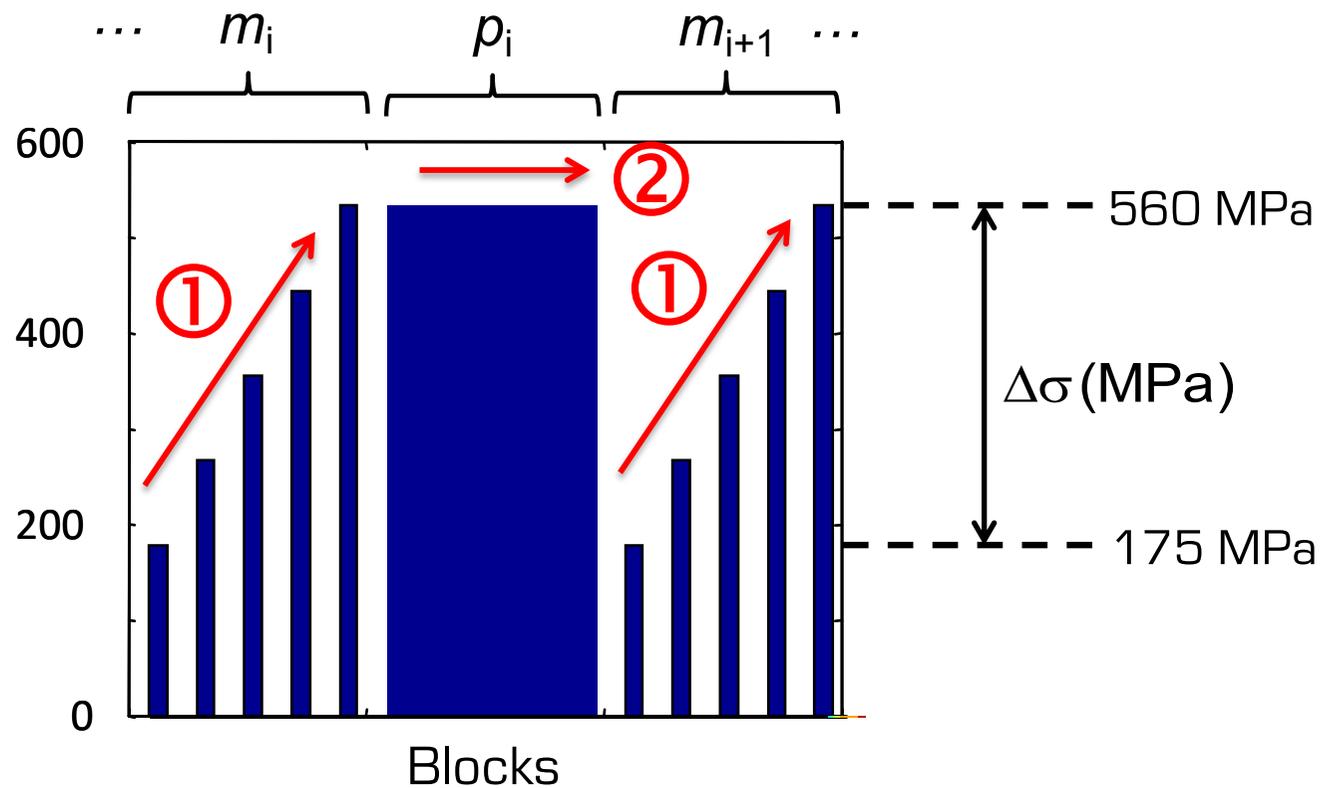
# Dispositif expérimental - Traction/HCF

[B. Berthel, PHD, 2008]



# Fatigue of metals

HCF  
 [Boulangier, PhD 2004]  
 [Berthel, PhD 2008]

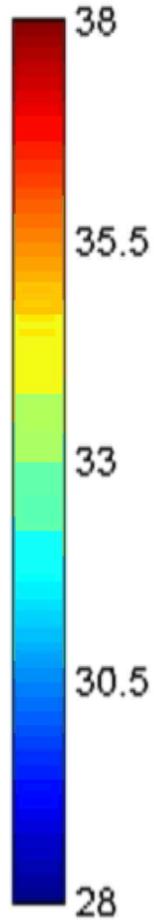
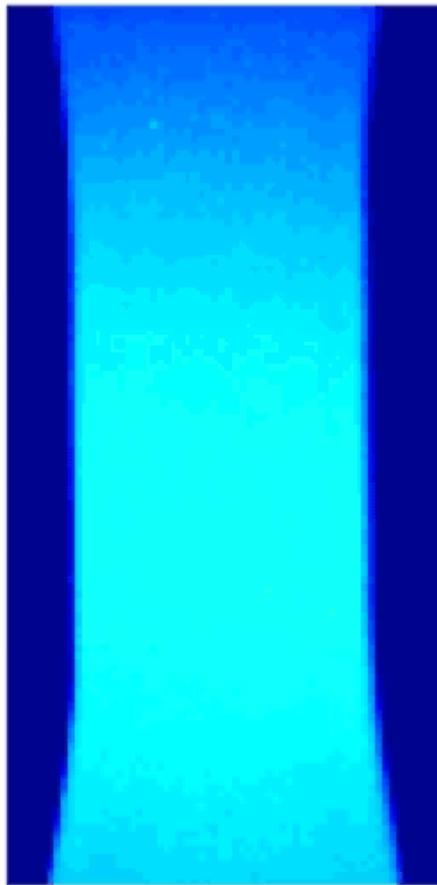


- ①  $m_i$ : series of “mini” cycle blocks (3000 cycles) at different stress ranges:  
**energy balance at “constant fatigue state”**
- ②  $p_i$ : large blocks (100 000 cycles) at constant stress range:  
**energy balance evolution induced by fatigue mechanisms**

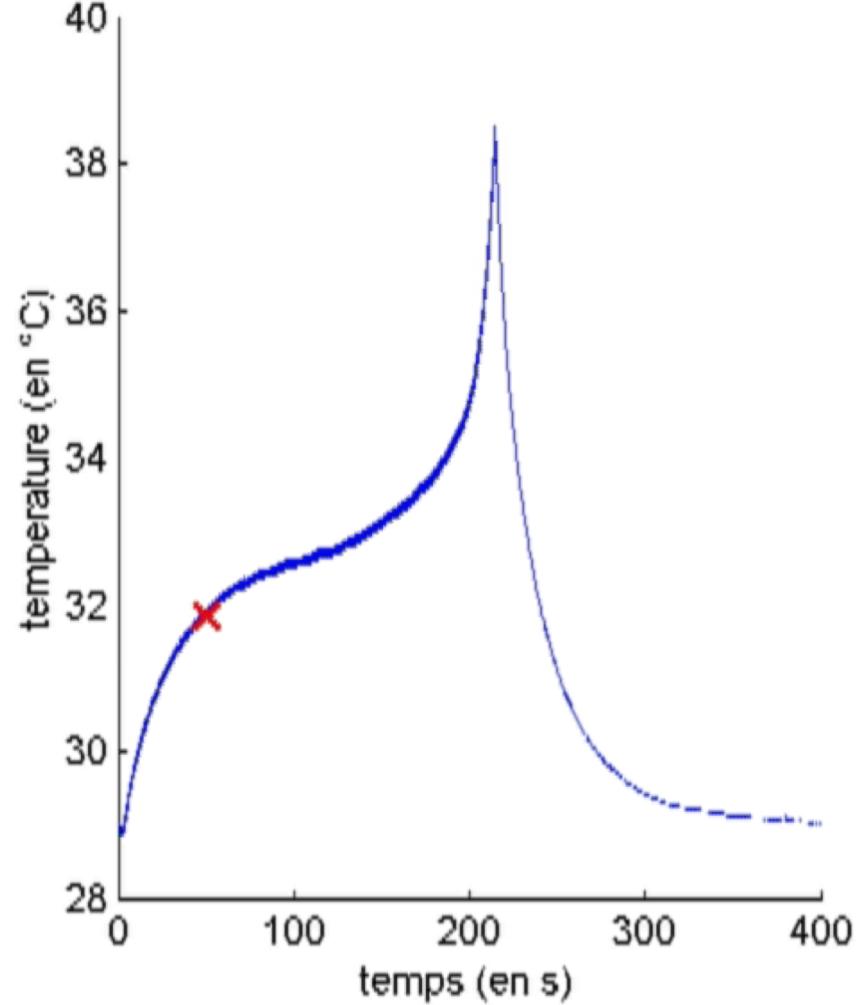
highest stress range  $\approx$  fatigue limit

# HCF : champs de température

Image n° 1000 (en °C)



Evolution de la température au centre de l'éprouvette

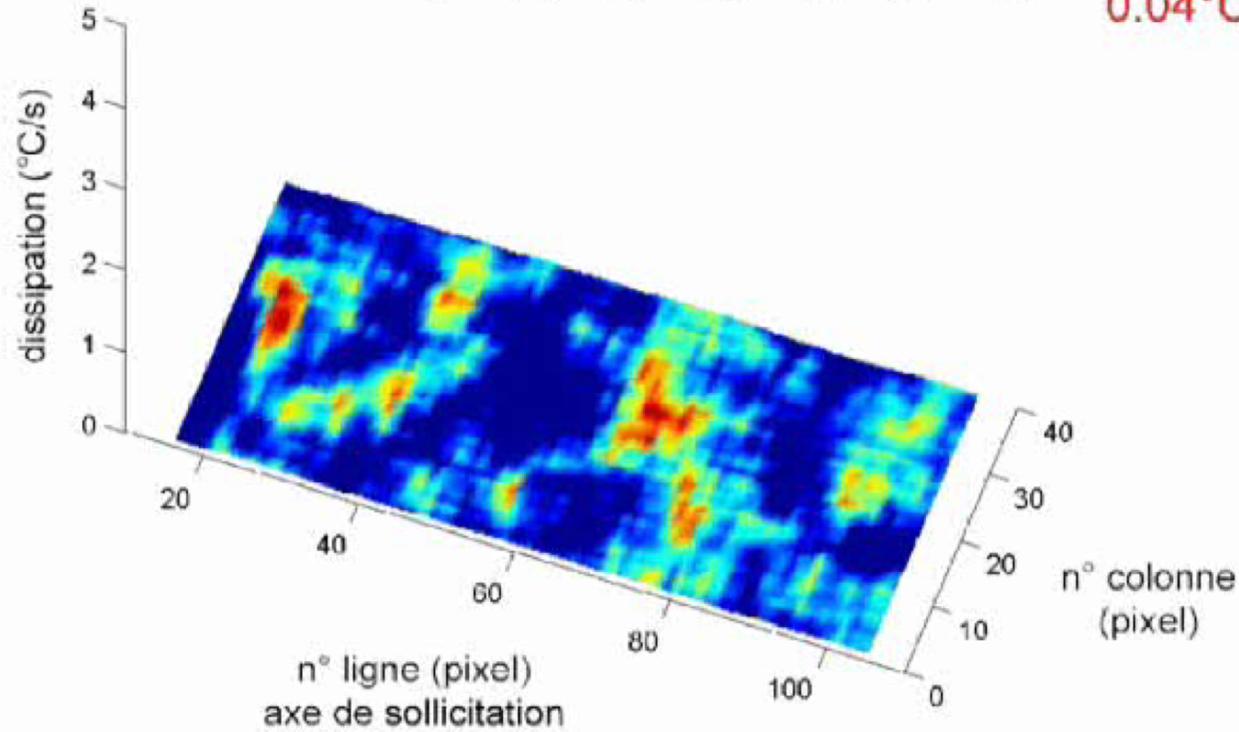
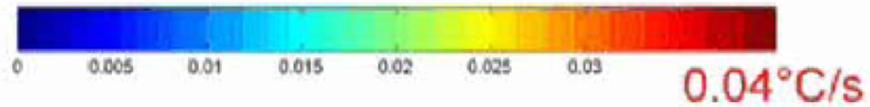


# HCF: champs de dissipation

Amplitude de contrainte $\Delta\sigma/2$	<b>133 MPa</b>
Rapport de charge	$R_\sigma = 0$

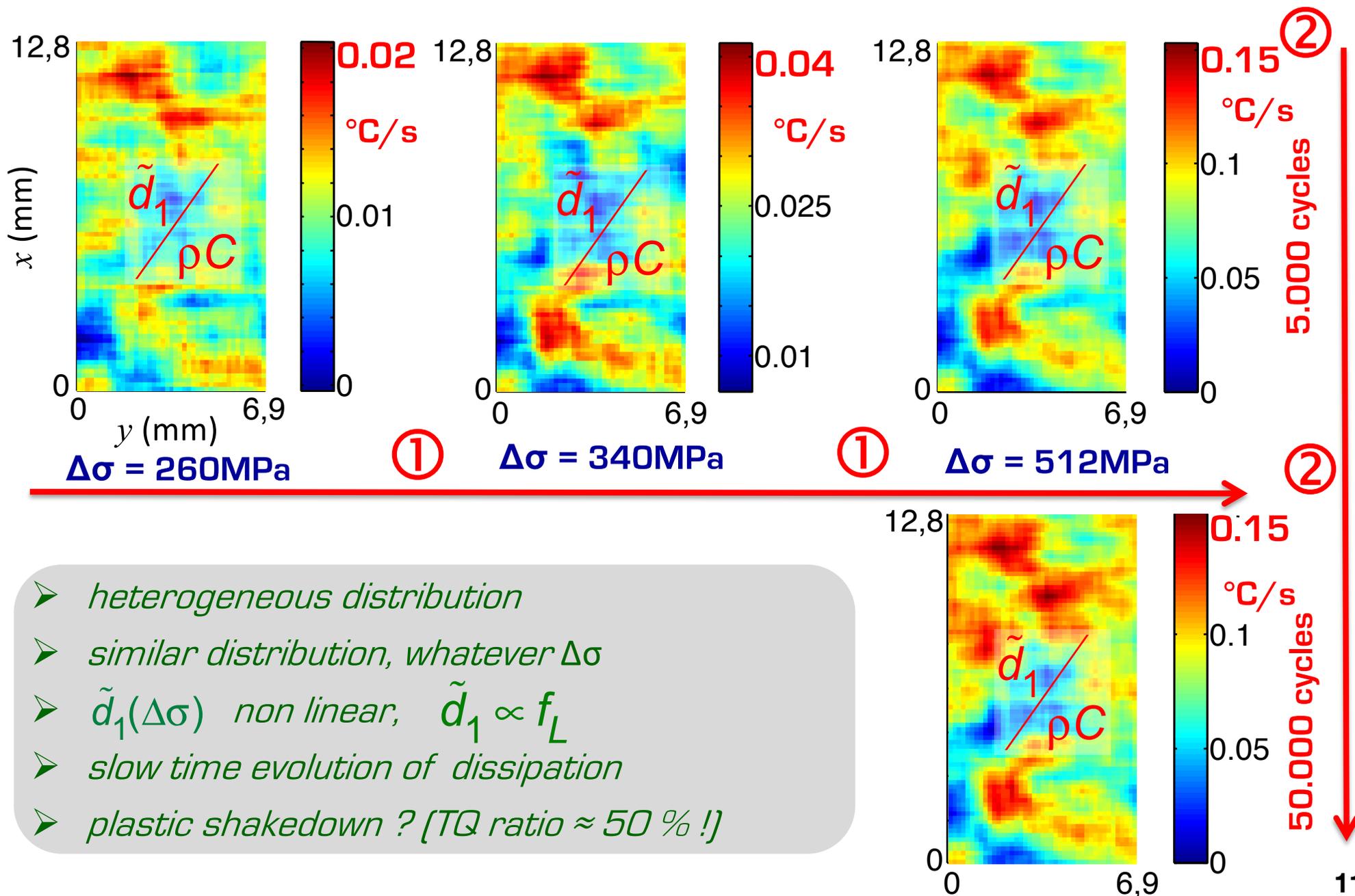
Dimension de la partie utile (h*l*e)	10x9x2.5mm <sup>3</sup>	Nombre de cycles par blocs	20000
Fréquence de sollicitation F <sub>s</sub>	50 Hz	Fréquence d'acquisition F <sub>a</sub>	19 Hz
Temps du bloc	400s	Résolution spatiale	0.196 mm/pixel
Lieu de fissuration	Pixel 96x6	ligne limite de la zone utile	35 à 66

0 cycles 20000



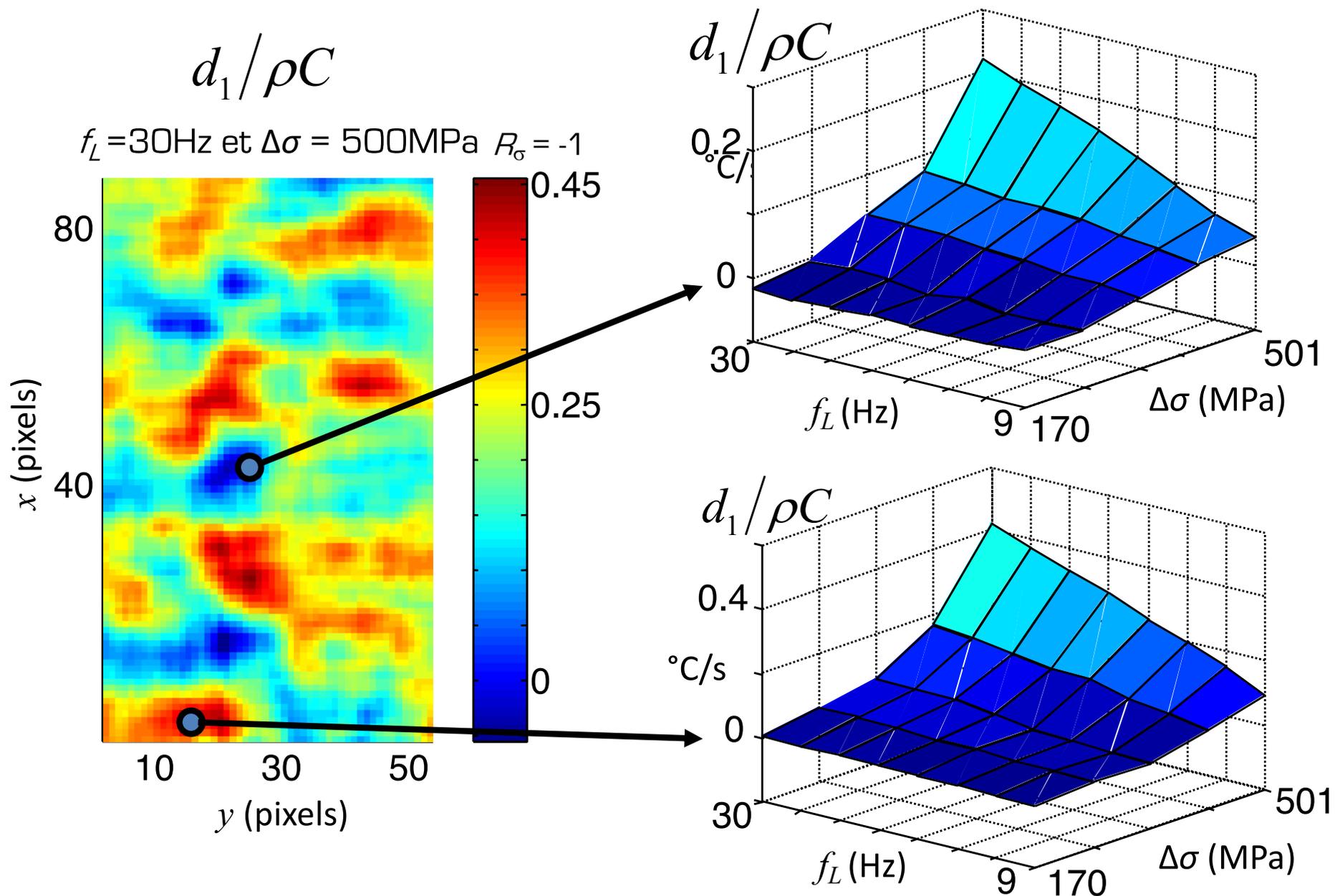
# Dissipation properties (meso)

$f_L = 30\text{Hz}$  and  $R_\sigma = -1$

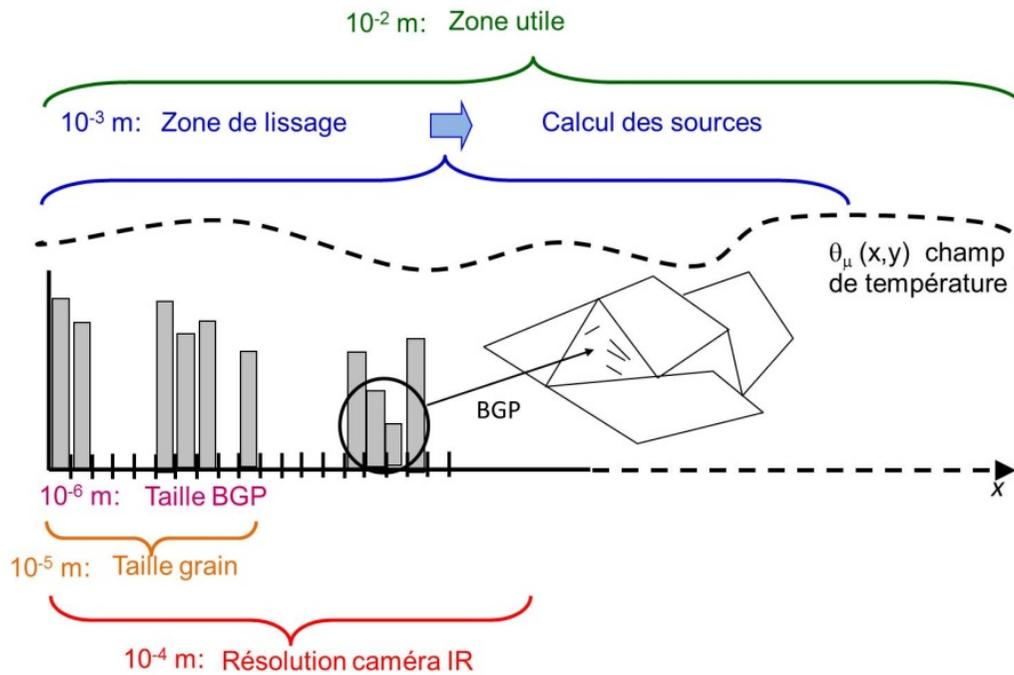


- *heterogeneous distribution*
- *similar distribution, whatever  $\Delta\sigma$*
- *$\tilde{d}_1(\Delta\sigma)$  non linear,  $\tilde{d}_1 \propto f_L$*
- *slow time evolution of dissipation*
- *plastic shakedown ? (TQ ratio  $\approx 50\%$  !)*

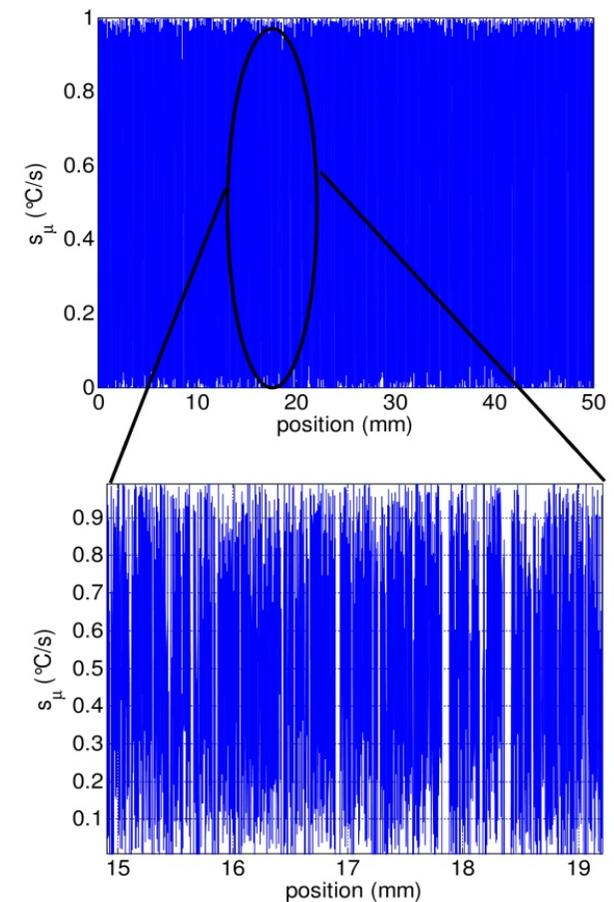
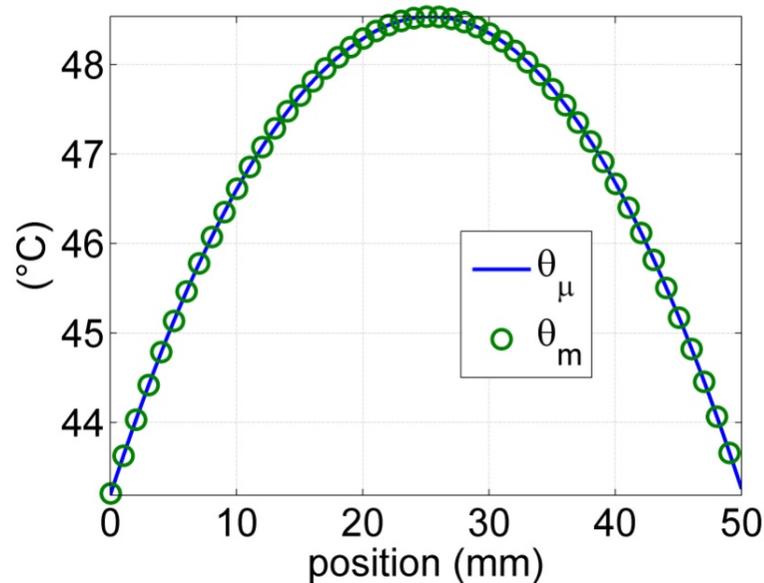
# Evolution de $d_1[f_L, \Delta\sigma]$ de deux zones - DP600



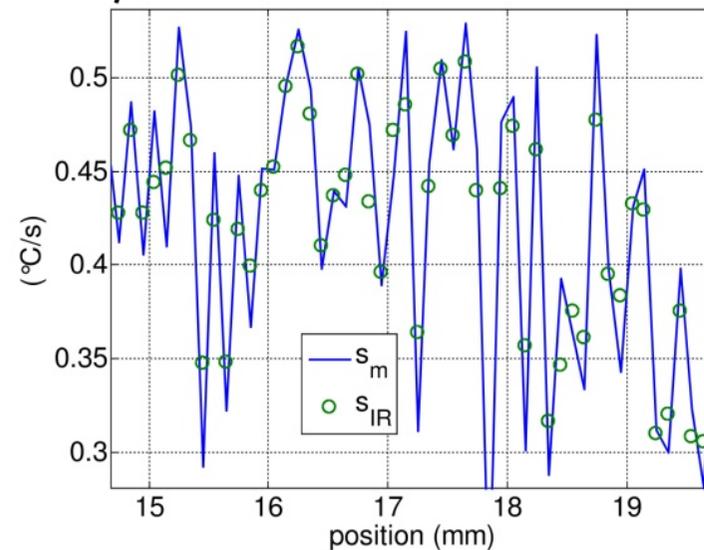
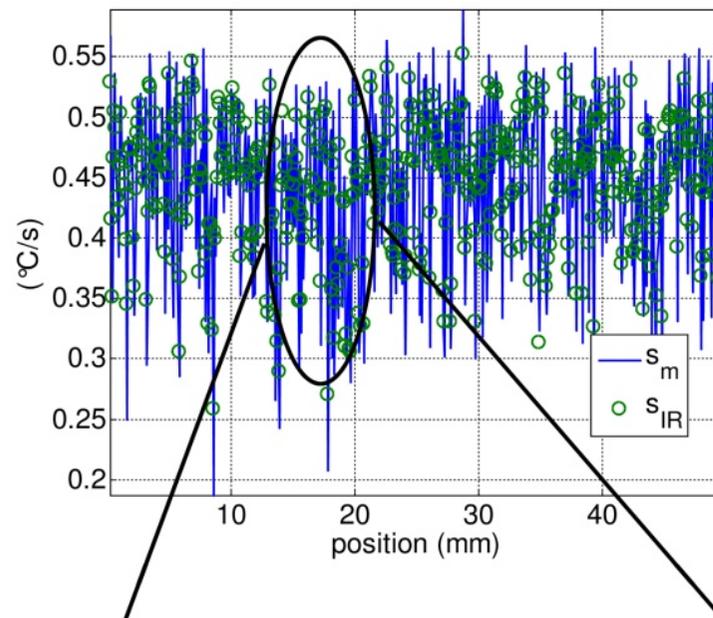
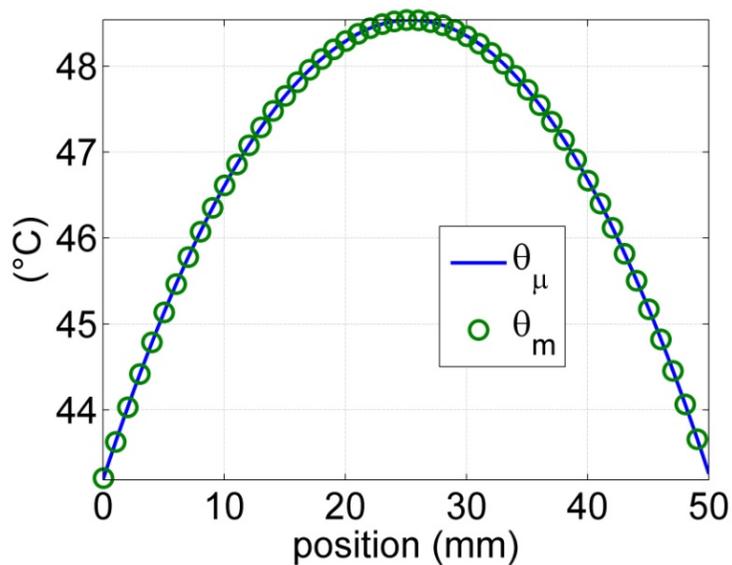
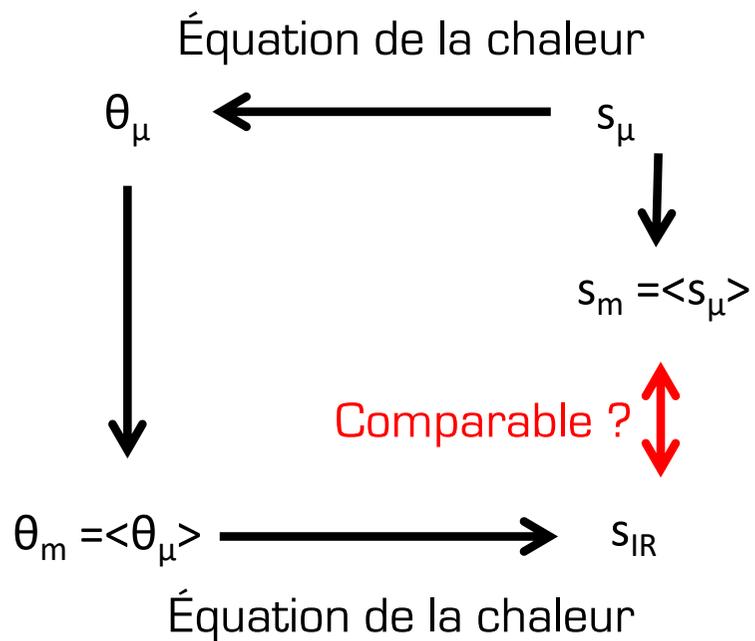
# Localisation des effets dissipatifs en fatigue (micro)



$$\begin{cases} \dot{\bar{\theta}}_\mu + \frac{\bar{\theta}_\mu}{\tau^{1D}} - \frac{k}{\rho C} \left( \frac{\partial^2 \bar{\theta}_\mu}{\partial x_\mu^2} \right) = \frac{\bar{s}_\mu}{\rho C} \\ \bar{\theta}_\mu(x_\mu, t = 0) = 0 \\ \frac{\partial \bar{\theta}_\mu}{\partial x_\mu}(\pm L/2, t) = \pm \lambda \bar{\theta}_\mu(\pm L/2, t) \end{cases}$$



# Localisation des effets dissipatifs en fatigue (micro)



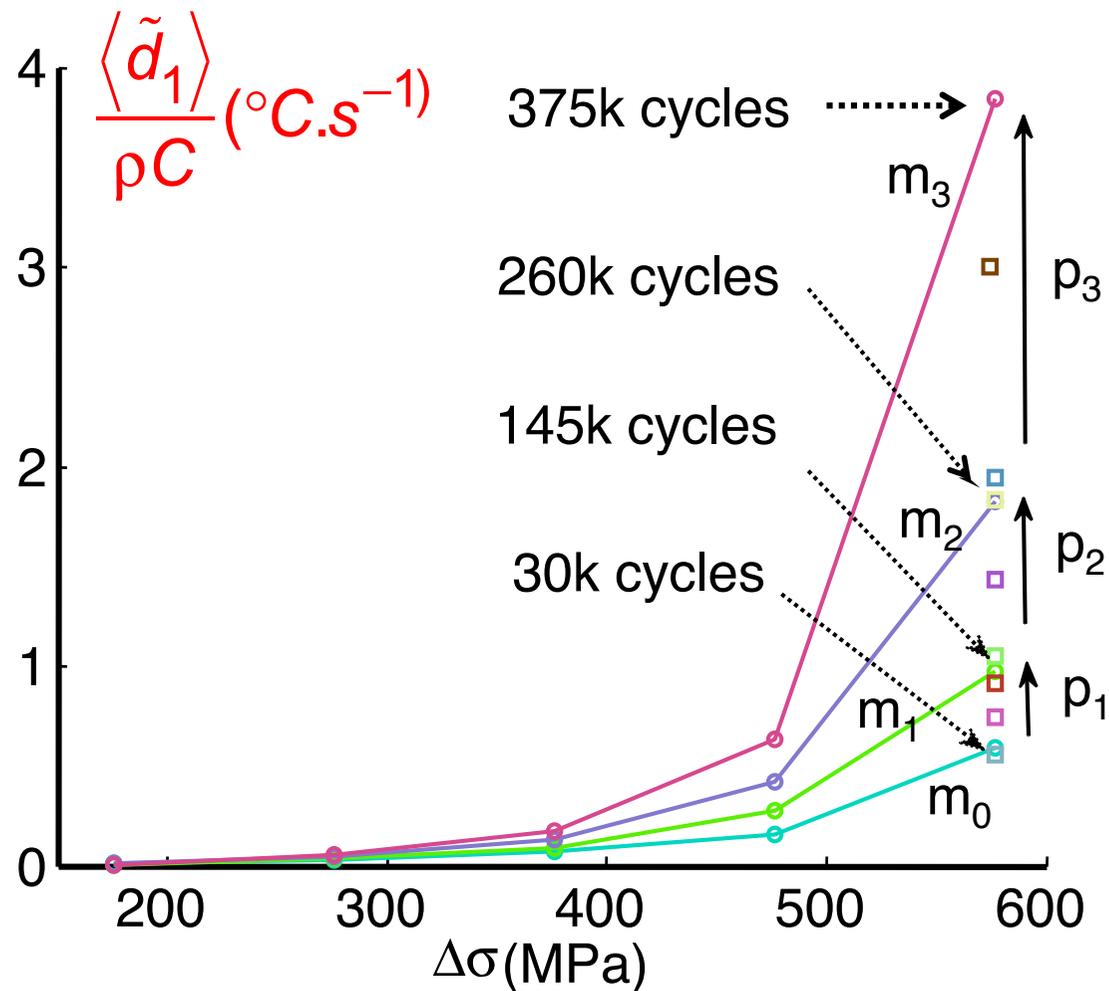
## Dissipation properties (macro)

DP 600 steel - « Luong's elbow » - self-heating curves

Interpretation of curves

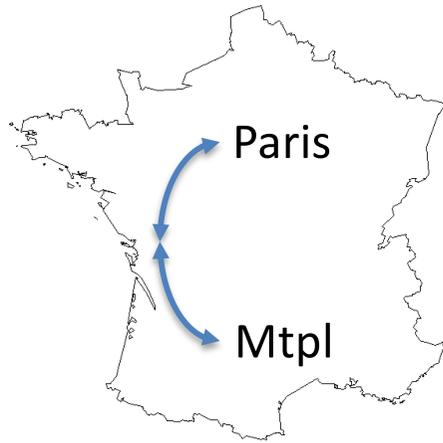
$m_i$  = dissipation induced by activated "micro-defects" at constant fatigue state for different stress ranges

$p_i$  = dissipation drift at constant stress range, reflecting a slow evolution of the fatigue state

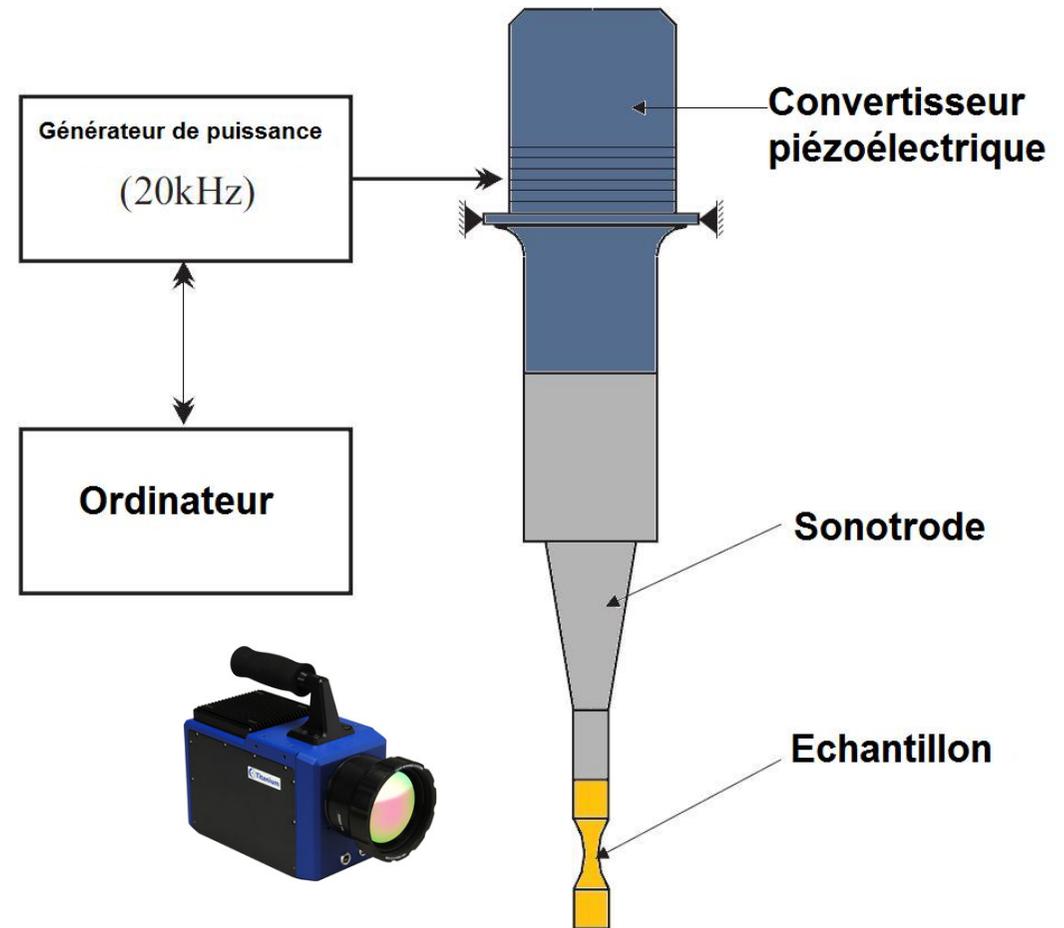


➤ *energy safeguard: kinetics of fatigue progress*

# Dispositif expérimental - VHCF



HCF and VHCF  
[Blanche, PhD 2012]



**Systeme elastique et en vibration libre**

[Bathias & Paris, 2004]

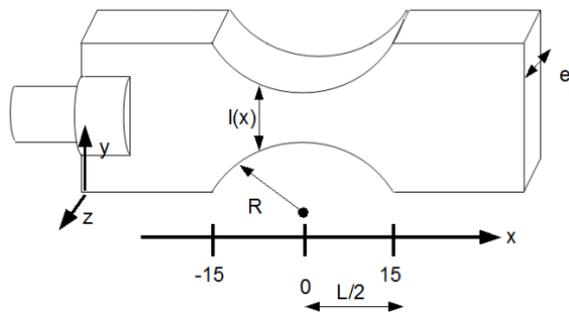
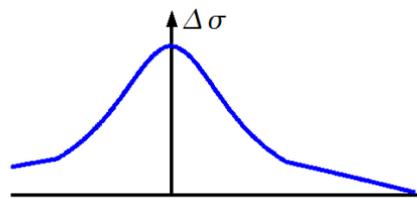
$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} - c^2 \left( \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \frac{S'(x)}{S(x)} \right) = 0$$

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = 0 \quad \text{à chaque extrémité}$$

**Résonance uniquement selon le premier mode de vibration longitudinale**

$$u(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} u_n(x, t) = u_0(x, t) = U(x) \sin(\omega_0 t)$$

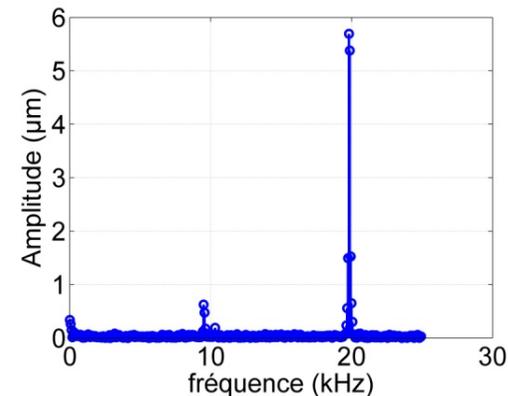
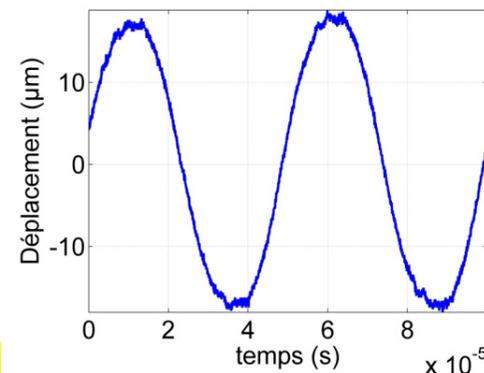
**Contrainte**



Calibration

$f_L = 20\,000 \text{ Hz} !!$

Spectre



# Calcul 1D des sources de chaleur (least squares fitting)

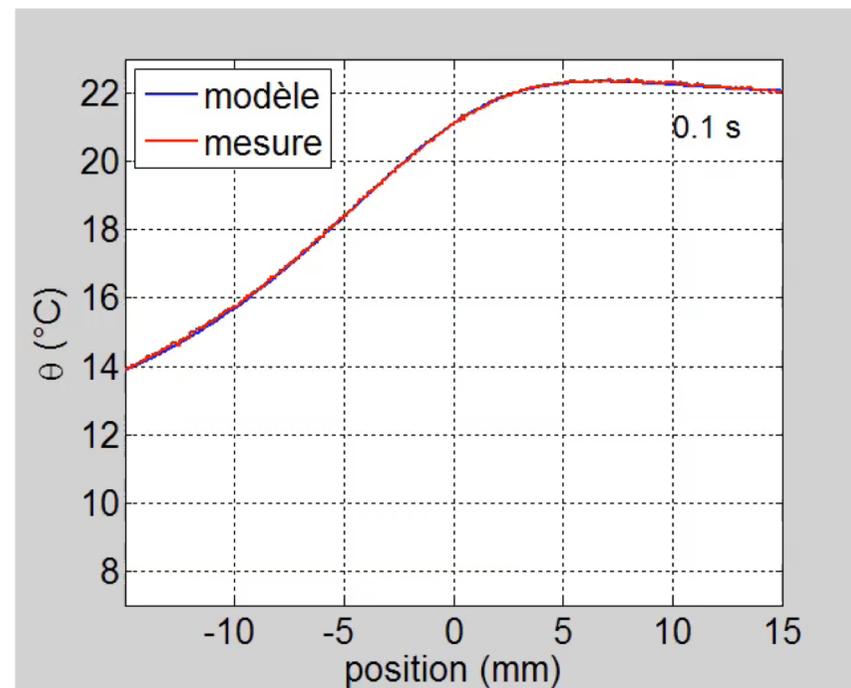
1 – Détermination des sources  
lissage (moindres carrés) de la température

$$S = \dot{\bar{\theta}}_{app} + \frac{\bar{\theta}_{app}}{\tau^{1D}} - \frac{k}{\rho C} \left( \frac{\partial^2 \bar{\theta}_{app}}{\partial x^2} + \frac{\partial \bar{\theta}_{app}}{\partial x} \frac{S'}{S} \right)$$

$$\tau^{1D}(x) = \frac{\rho C S(x)}{2h(e + l(x))}$$

2- Vérification

$$\begin{cases} \dot{\bar{\theta}}^{num} + \frac{\bar{\theta}^{num}}{\tau^{1D}} - \frac{k}{\rho C} \left( \frac{\partial^2 \bar{\theta}^{num}}{\partial x^2} + \frac{\partial \bar{\theta}^{num}}{\partial x} \frac{S'}{S} \right) = 0 \\ \bar{\theta}^{num}(x, t = 0) = \bar{\theta}^{exp}(x, t = 0) \\ \bar{\theta}^{num}(x = \pm L/2, t) = \bar{\theta}^{exp}(x = \pm L/2, t) \end{cases}$$



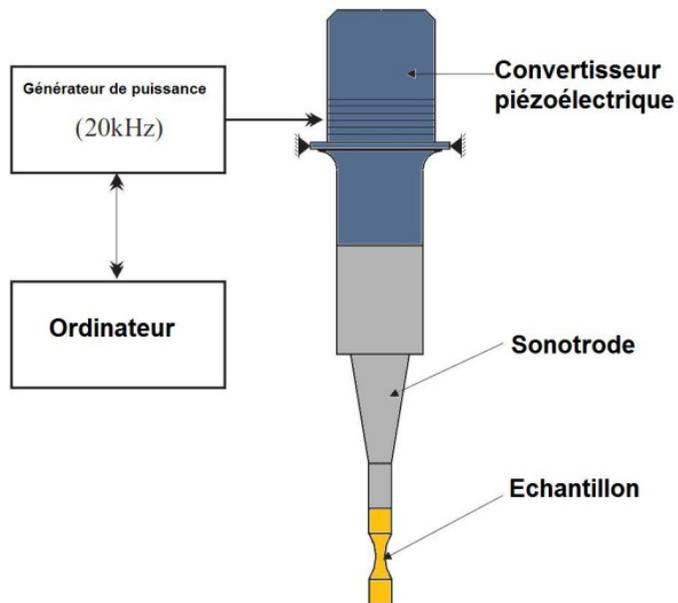
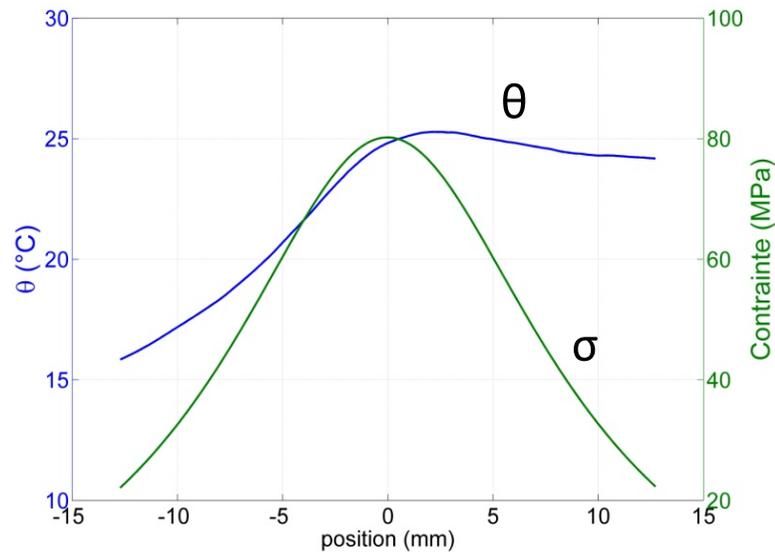
1D

Dissymétries des CL + jet d'air (effet convectif) + fuites longitudinales importantes

# Relèvement des thermoprofils

Dissymétrie du champ de température

Décomposition de la température



$$\theta = \theta_{as} + \theta_{ss}$$

$$\begin{cases} \dot{\bar{\theta}} + \frac{\bar{\theta}}{\tau^{1D}} - \frac{k}{\rho C} \left( \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x^2} + \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} \frac{S'}{S} \right) = \frac{\bar{s}}{\rho C} \\ \bar{\theta}(x, t = 0) \\ \bar{\theta}(x = \pm L/2, t) \end{cases}$$

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_{as} + \bar{\theta}_{ss}$$

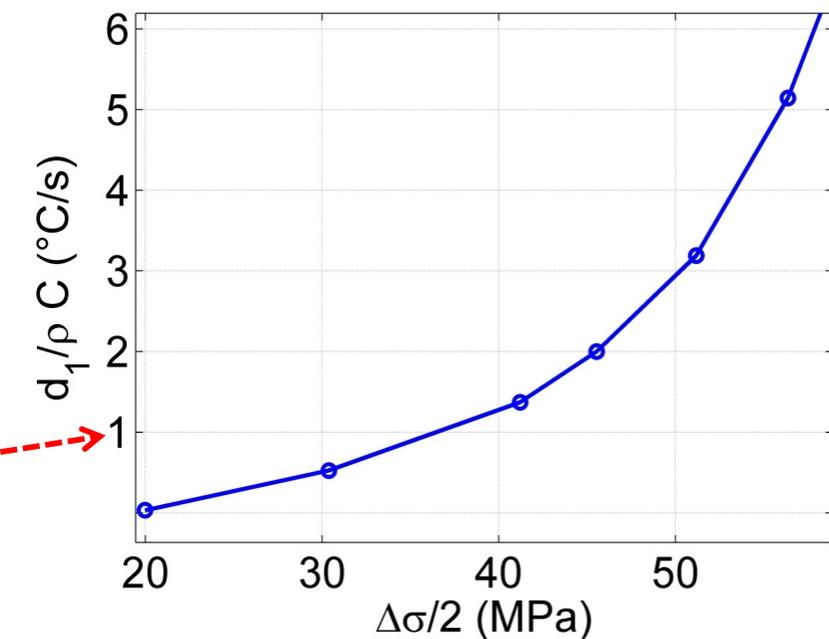
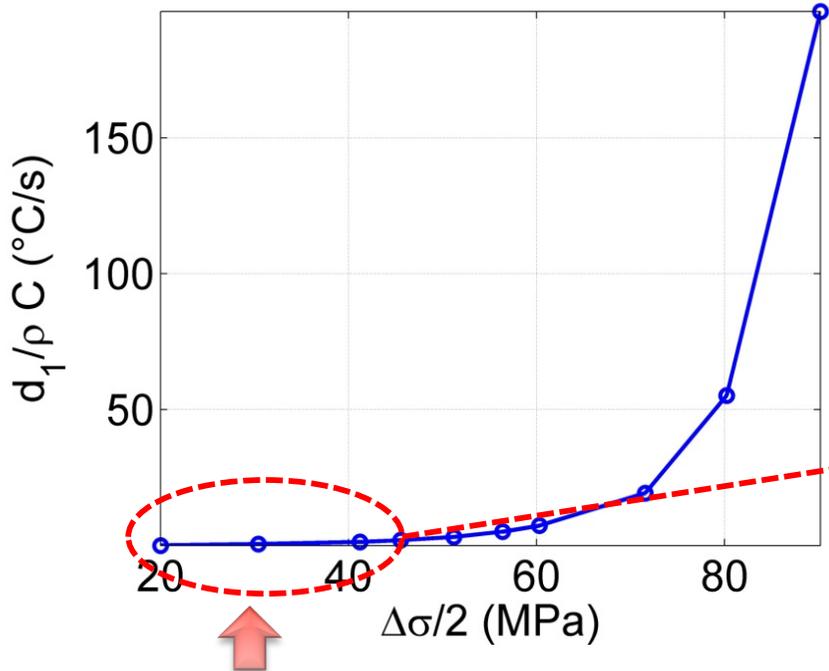
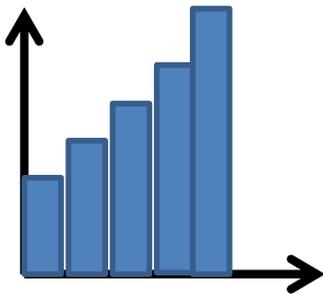
$$\begin{cases} \dot{\bar{\theta}}_{ss} + \frac{\bar{\theta}_{ss}}{\tau^{1D}} - \frac{k}{\rho C} \left( \frac{\partial^2 \bar{\theta}_{ss}}{\partial x^2} + \frac{\partial \bar{\theta}_{ss}}{\partial x} \frac{S'}{S} \right) = 0 \\ \bar{\theta}_{ss}(x, t = 0) = \bar{\theta}(x, t = 0) \\ \bar{\theta}_{ss}(x = \pm L/2, t) = \bar{\theta}(x = \pm L/2, t) \end{cases}$$

$$+ \begin{cases} \dot{\bar{\theta}}_{as} + \frac{\bar{\theta}_{as}}{\tau^{1D}} - \frac{k}{\rho C} \left( \frac{\partial^2 \bar{\theta}_{as}}{\partial x^2} + \frac{\partial \bar{\theta}_{as}}{\partial x} \frac{S'}{S} \right) = \frac{\bar{s}}{\rho C} \\ \bar{\theta}_{as}(x, t = 0) = 0 \\ \bar{\theta}_{as}(x = \pm L/2, t) = 0 \end{cases}$$

# Limite de fatigue

Cuivre  
20 kHz  
 $R_\sigma = -1$

Essai VHCF sur du cuivre

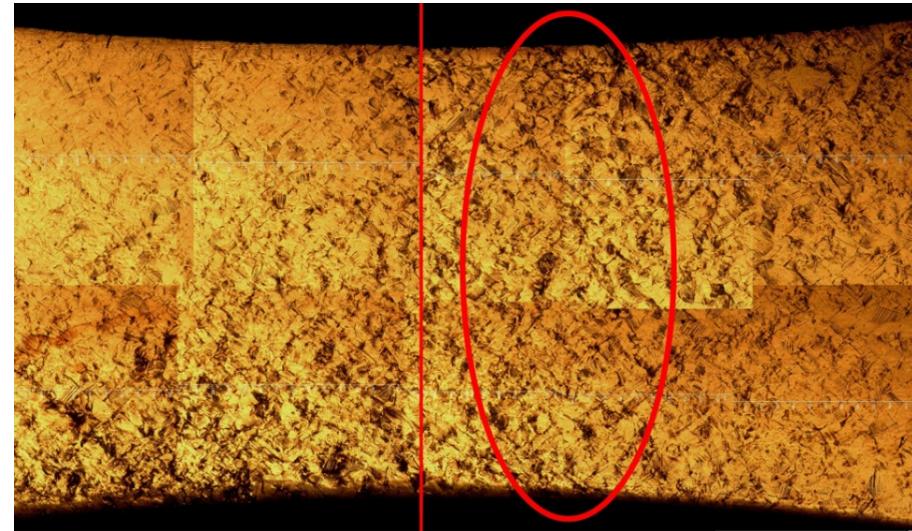
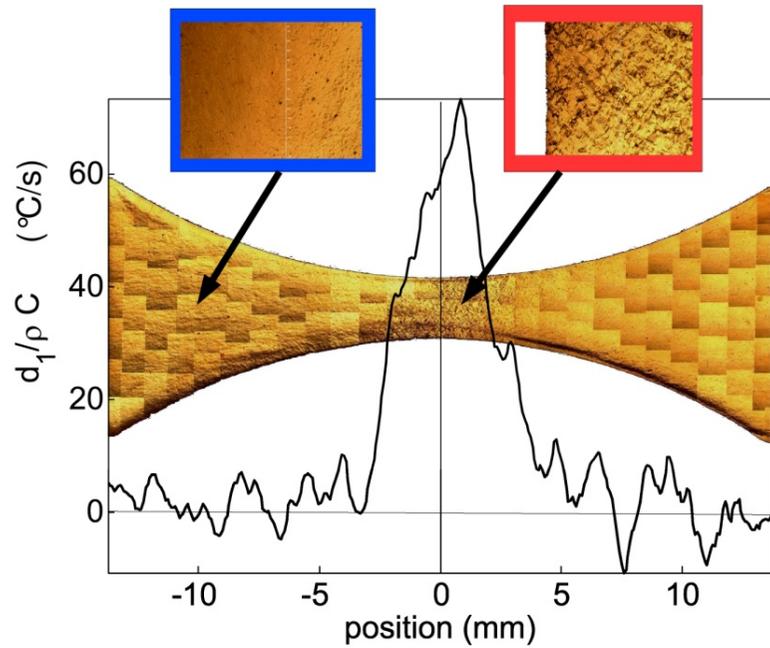


Seuil d'apparition de bande de glissement [Phung, PhD 2012]

Dissipation quelle que soit l'amplitude de la contrainte  
→ Pas de « domaine élastique »[\*] (idem pour le laiton et le fer Armco)

(\* ) aux plus basses étendues de contrainte expérimentalement accessibles...

# Comparaison microstructure/dissipation en VHCF



Cuivre  
 20 kHz  
 $R_\sigma = -1$   
 $\Delta\sigma/2 = 67$  MPa  
 $10^7$  cycles

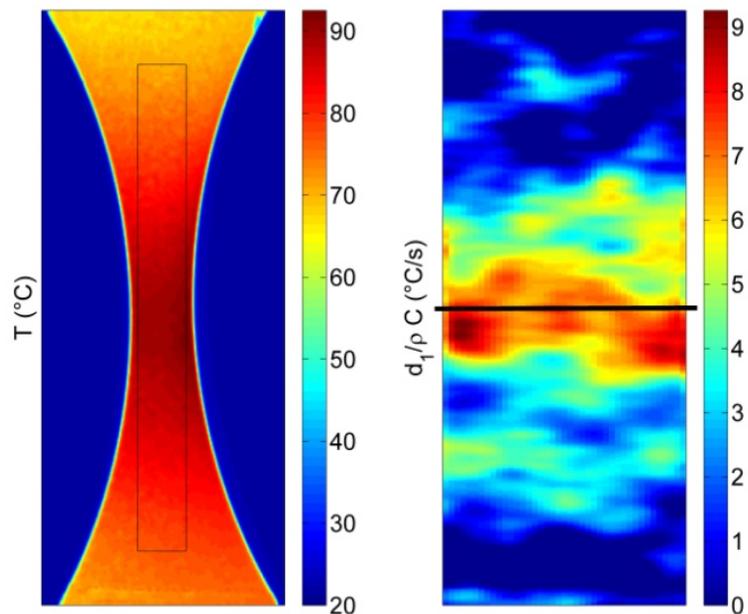
Étude plus approfondie des mécanismes microstructuraux dans les thèses de Ngoc-Lam Phung, Chong Wang et Nicolas Marti

# VHCF : Fer Armco

Milieu d'essai

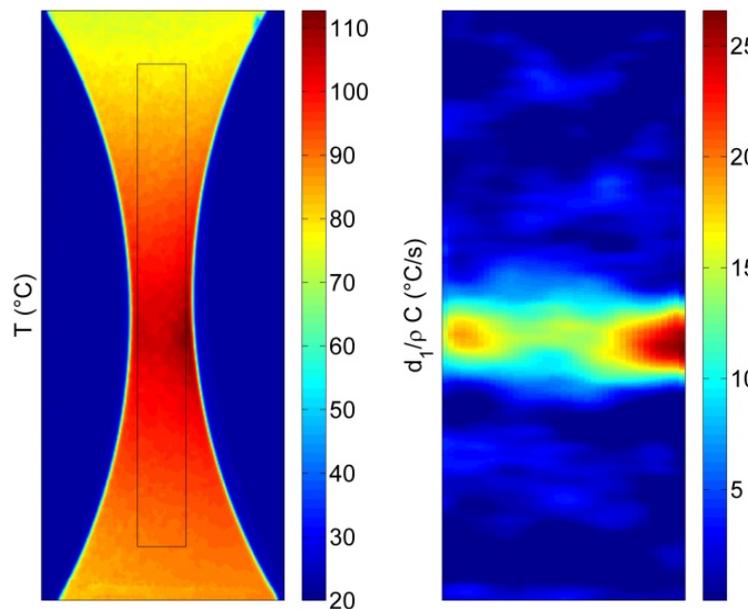
Fer Armco, 20 kHz  
 $R_\sigma = -1$ ,  $\Delta\sigma/2 = 120$  MPa

Fin d'essai



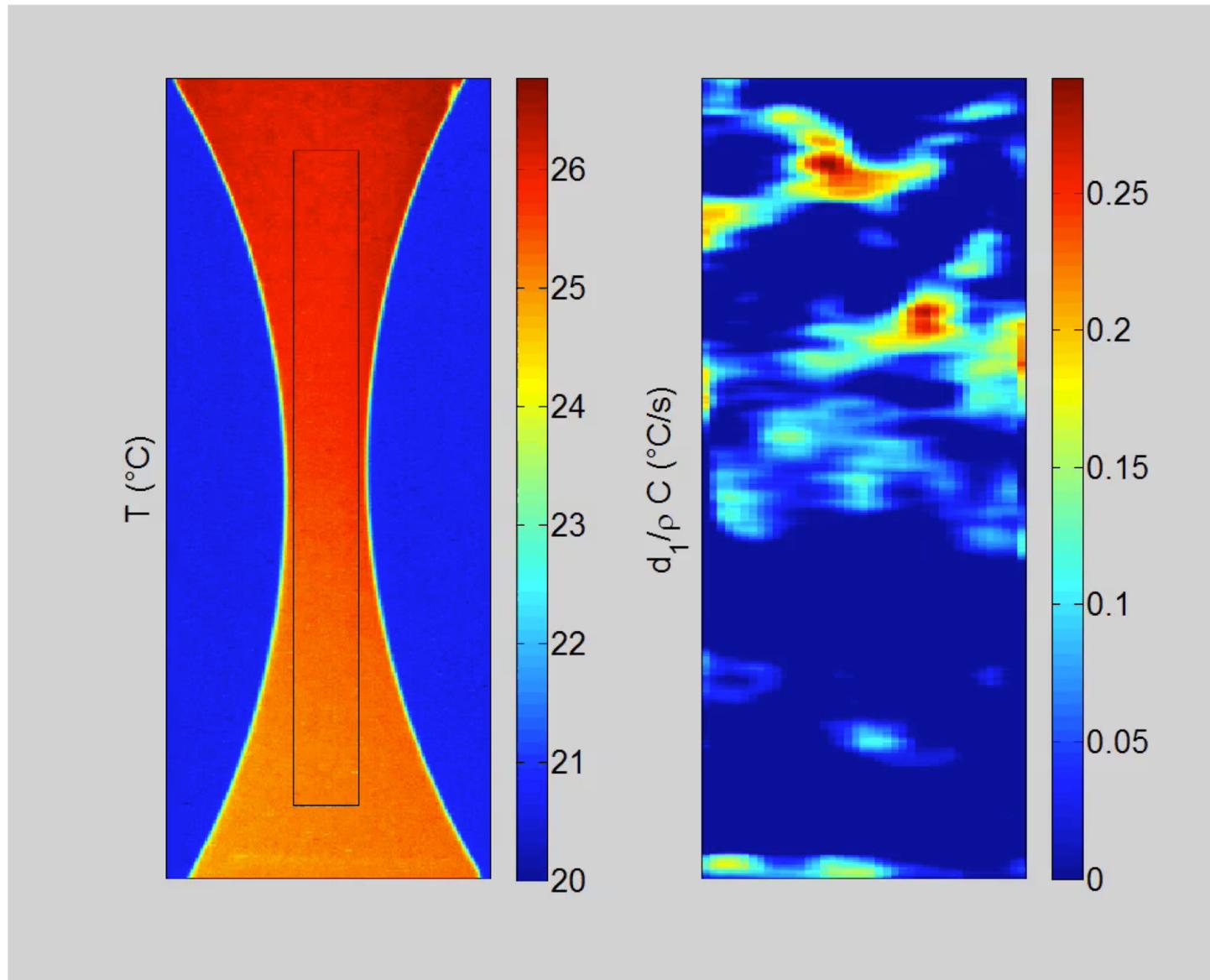
$2.5 \cdot 10^6$  cycles

2D

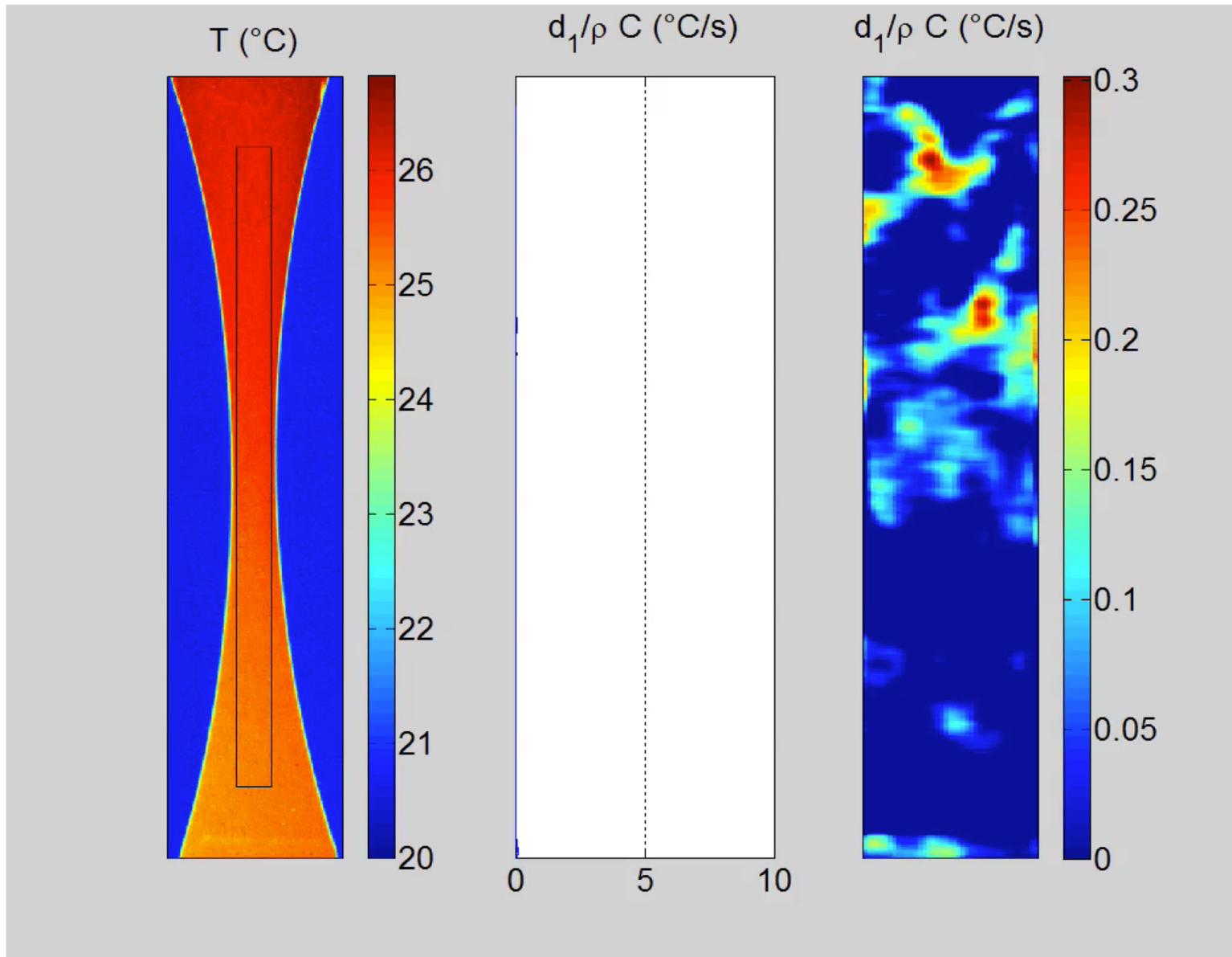


$5.10^6$  cycles

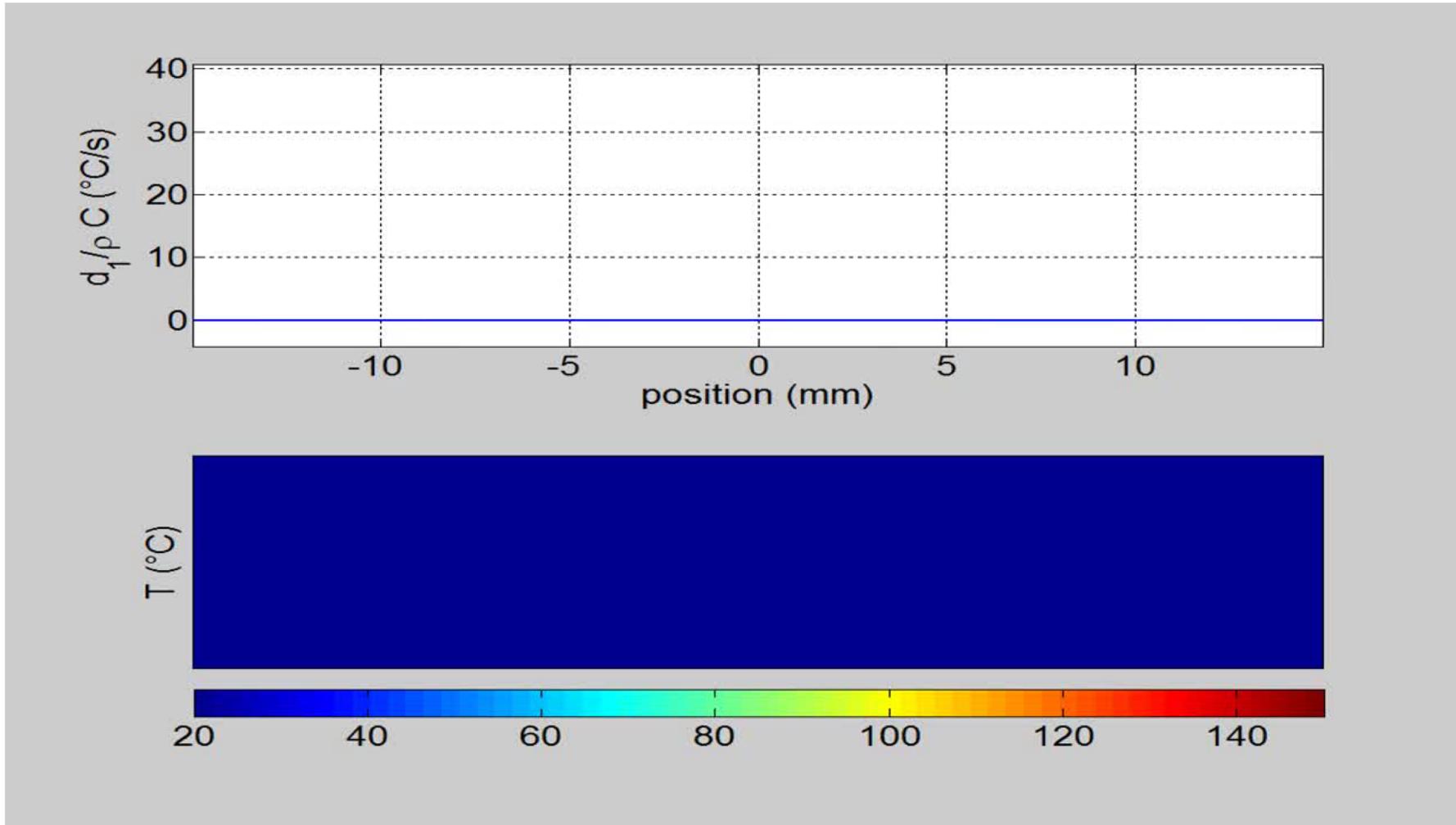
# VHCF : une petite animation



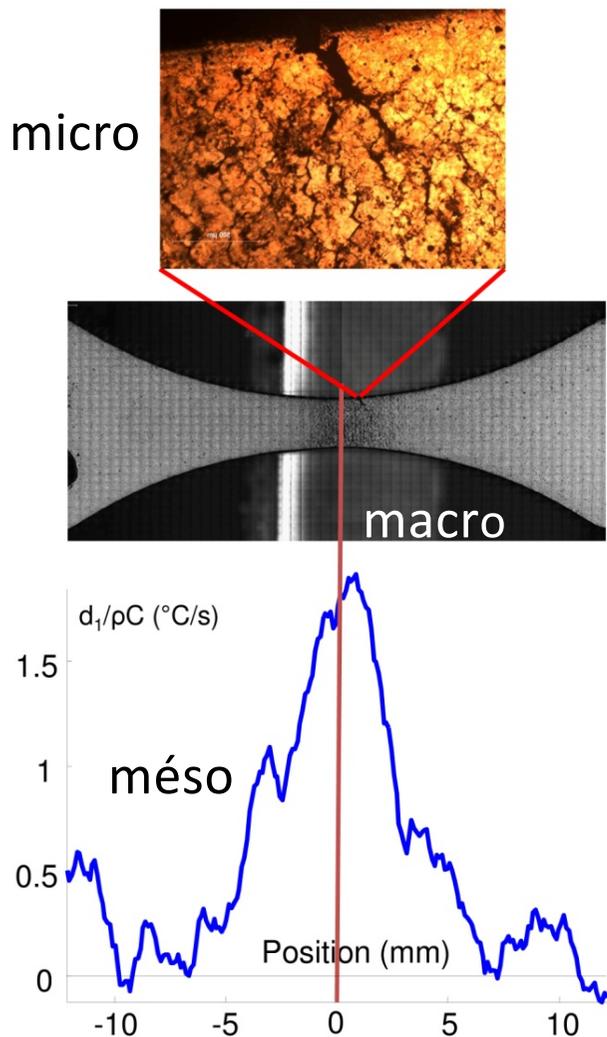
# VHCF : une autre ...



# VHCF : une dernière, pour la route ...



# Méso-micro (VHCF) : bilan



Cuivre, 20 kHz  
 $R_\sigma = -1$ ,  $\Delta\sigma/2 = 51$  MPa  
 $10^6$  cycles

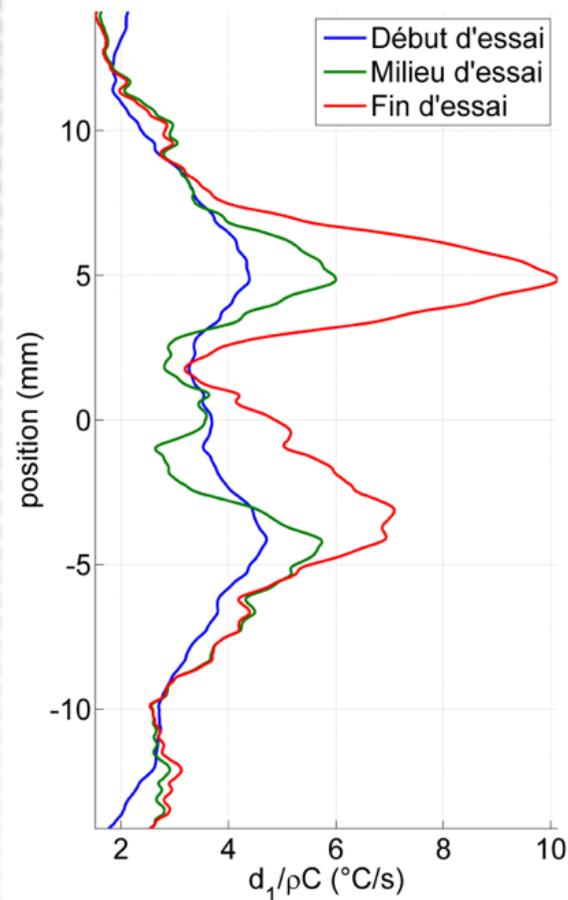
[Blanche, PhD 2012]  
 [Ngoc-Lam Phung, PhD 2012][\*]  
 [Chong Wang, PhD 2013][\*\*]

**ANR Disfat (VHCF à 20 kHz)**  
**A. Blanche**  
**PIMM (\*) + LEME (\*\*)**

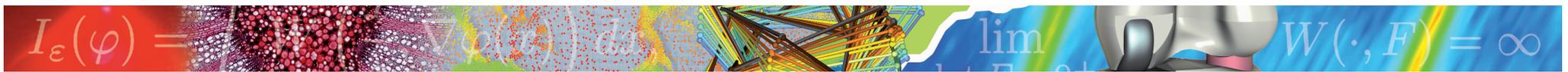
Excellente corrélation  
 entre champs (méso)  
 de la dissipation et les  
 concentrations de BGP  
 (micro).

Conditions initiales !

مکتوب



Fer Armco, 20 kHz  
 $R_\sigma = -1$ ,  $\Delta\sigma/2 = 84$  MPa  
 $5 \cdot 10^6$  cycles



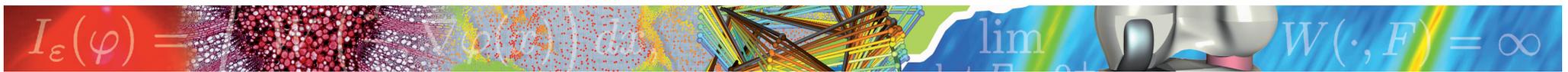
## Quelques mots de conclusion

### 1 - Cadre thermomécanique et bilan d'énergie

- MSG : un cadre cohérent et souple.
- Définition sans ambiguïté des divers effets énergétiques
- Des degré de libertés mais ...
- ... obligation d'aller, jusqu'au bout, dans l'analyse des mécanismes dissipatifs et de couplage (la température n'est pas un paramètre et encore moins un paramètre contrôlable).
- Thermodynamique : un monde bien vivant – e.g. : modèles non local ?

### 2 – Quelques éléments rhéologiques à la sauce MSG

- Superposer systématiquement à une vision mécanicienne, le caractère énergétique des mécanismes de déformation
- Variable d'état - variables conjuguées, flux – force
- La validité thermomécanique d'un modèle ne se limite pas à ne pas violer le 2<sup>nd</sup> principe.
- Bilan d'énergie (1<sup>er</sup> principe), tout aussi important



### 3 - Analyse expérimentale des bilans d'énergie

- Métrologie délicate, encore du travail 2D  $\rightarrow$  3D / FFM % FEM.
- Thermique 3D (Terahertz ; Trèfle, LMGC, ...)
- Acquisition de champs cinématiques et thermiques
- Estimation des contraintes et donc de l'énergie de déformation
- Passage des températures aux sources
- Détection des effets « locaux » ; facilite le dialogue multi-échelles

### 4 - Effet du temps : couplage thm et/ou viscosité ?

- Polymères, caoutchouc, AMF : des mécanismes de couplages prépondérants.
- Effets du temps : effets de couplage + dissipation thermique et/ou dissipation intrinsèque (visqueuse).

### 5 - Effet dissipatif dans les métaux (fatigue)

- Vie éternelle : pas de dissipation intrinsèque (pas vu !) ou on dissipe tout (sans stockage, pas vu non plus).
- Rôle très important des conditions initiales (en fatigue mais pas seulement...).



Merci pour votre attention