

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

7ème école d'été de mécanique théorique

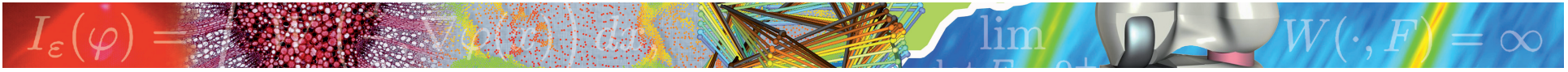
# Effets de couplage et effets dissipatifs accompagnant la déformation des matériaux solides

(4<sup>ème</sup> partie)

André Chrysochoos  
LMGC, UMR 5508 CNRS-UM

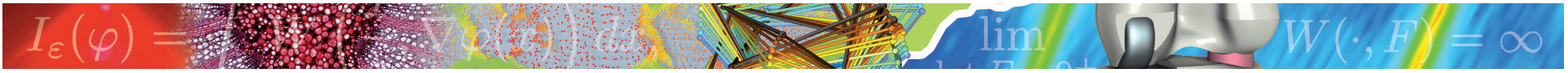


LABORATOIRE DE MÉCANIQUE ET GÉNIE CIVIL - UM/CNRS



## 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

$$I_\varepsilon(\varphi) = \int \nabla \varphi(x) \cdot dx \quad \lim_{F \rightarrow \infty} W(\cdot, F) = \infty$$

HCF



HCF + VHCF



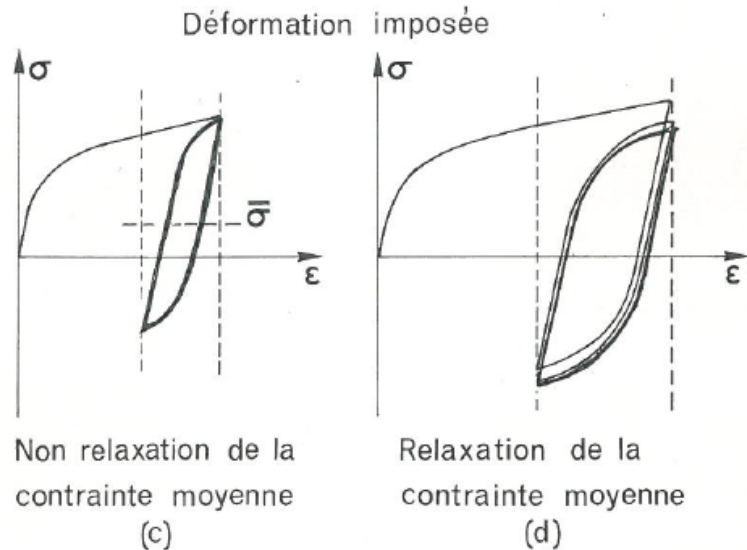
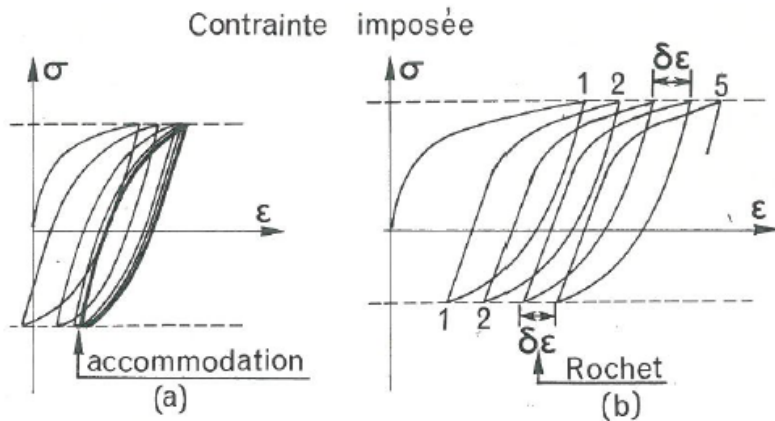
DiSFAT

Fatigue à grand  
et très grand nombres de cycles

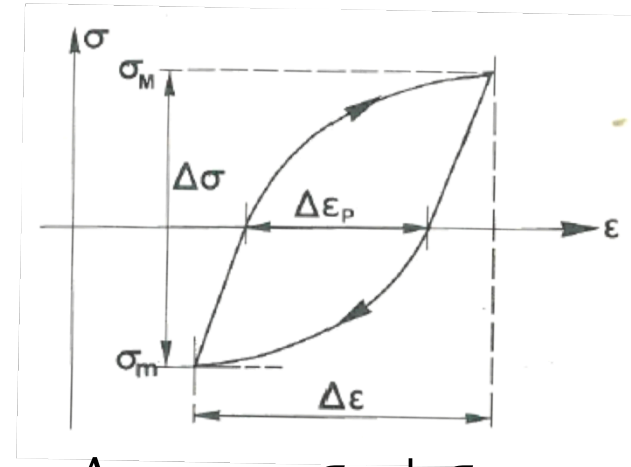


## Stabilisation cyclique

« 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

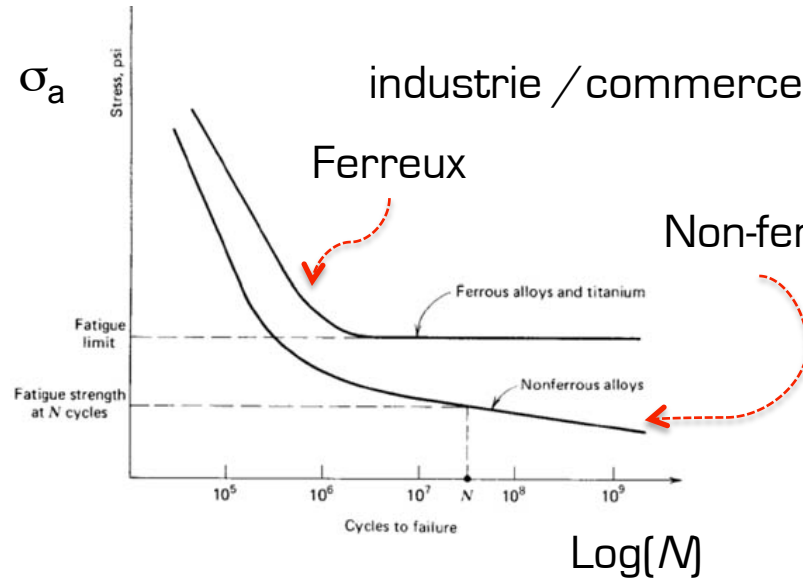


$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad \sigma_M = \frac{\sigma_M + \sigma_m}{2}$$

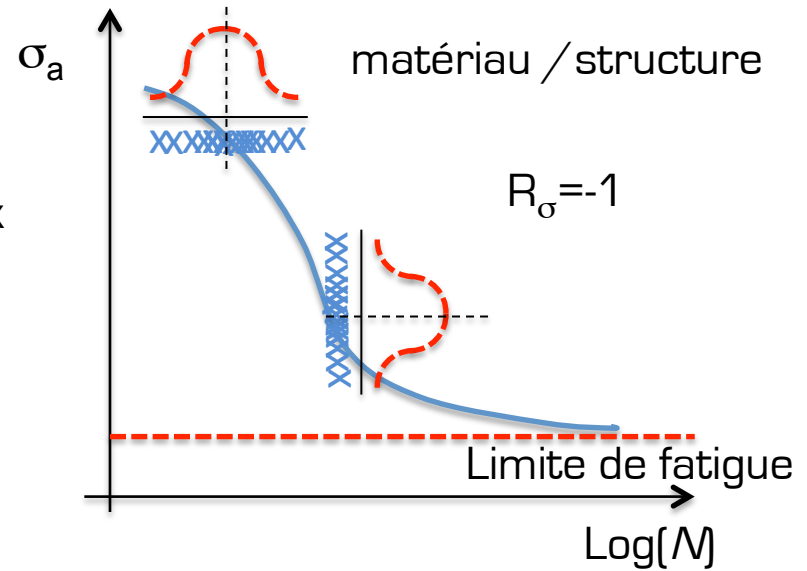
Paramètres importants pour caractériser la tenue en fatigue : Wöhler, diagrammes d'endurance, Haigh, Goodman, ...

$A_h$  : 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. Ilchner  
 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  $\rightarrow d/dt(\text{Endommagement}) \neq 0$  OK !

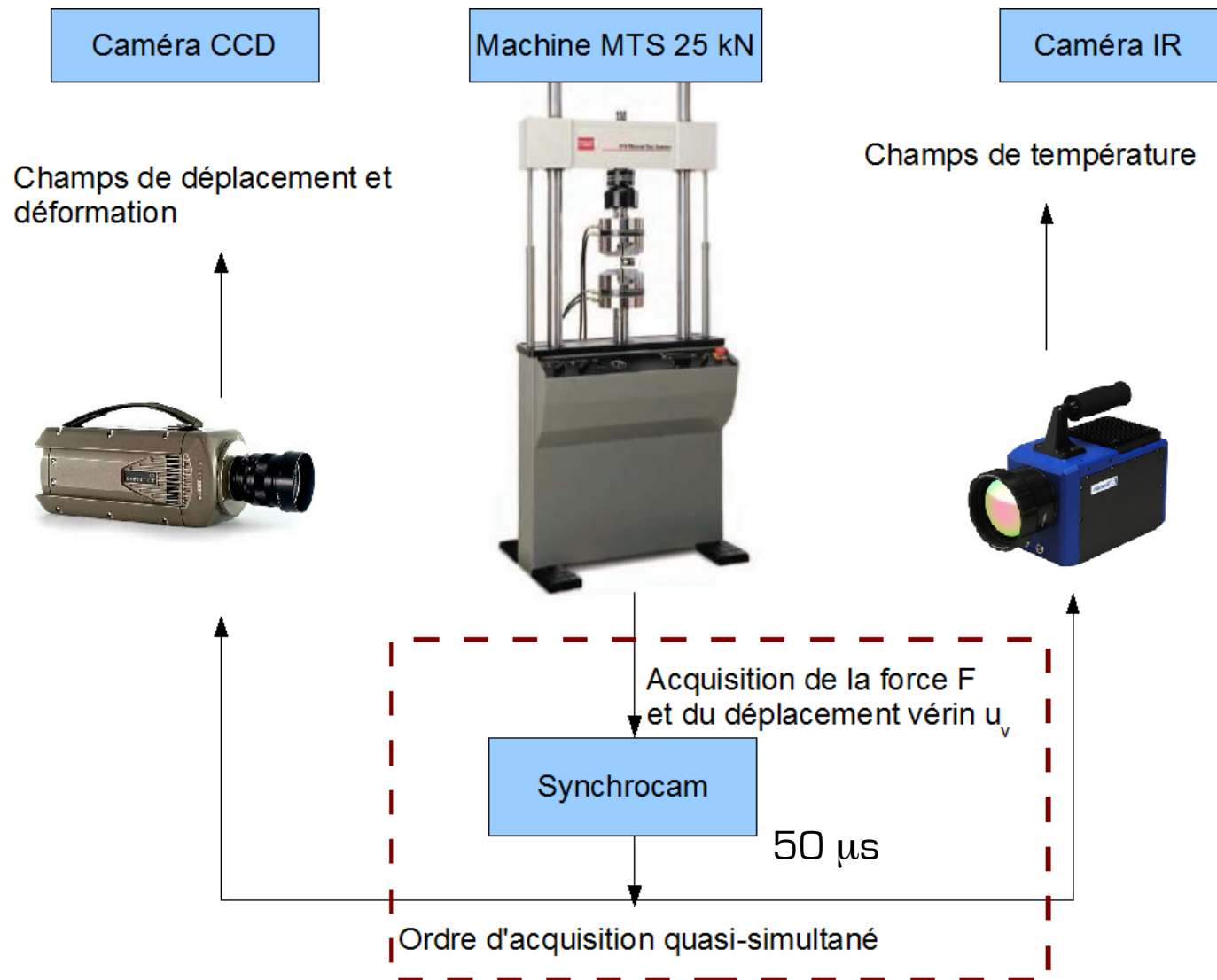


**Thermodynamique : irréversibilités sans rupture ?**

sans « dérive » de l'état thm ?

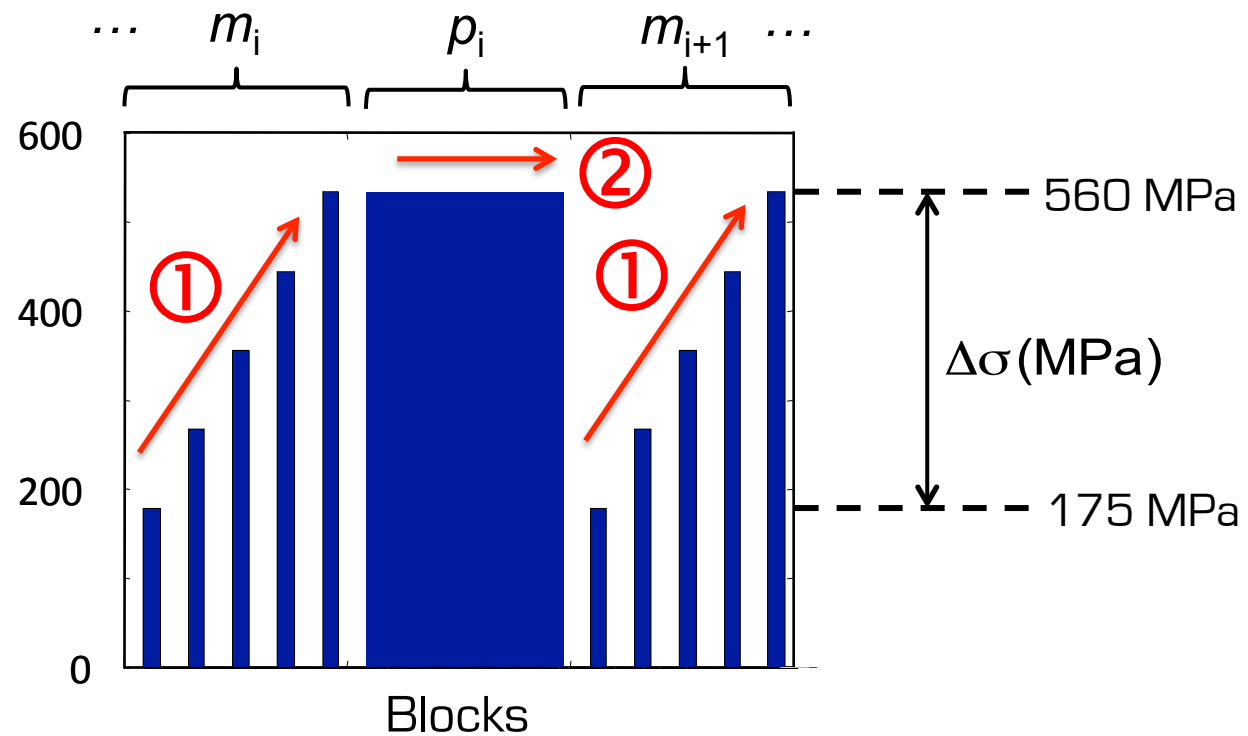
# Dispositif expérimental - Traction/HCF

[B. Berthel, PHD, 2008]



## Fatigue of metals

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

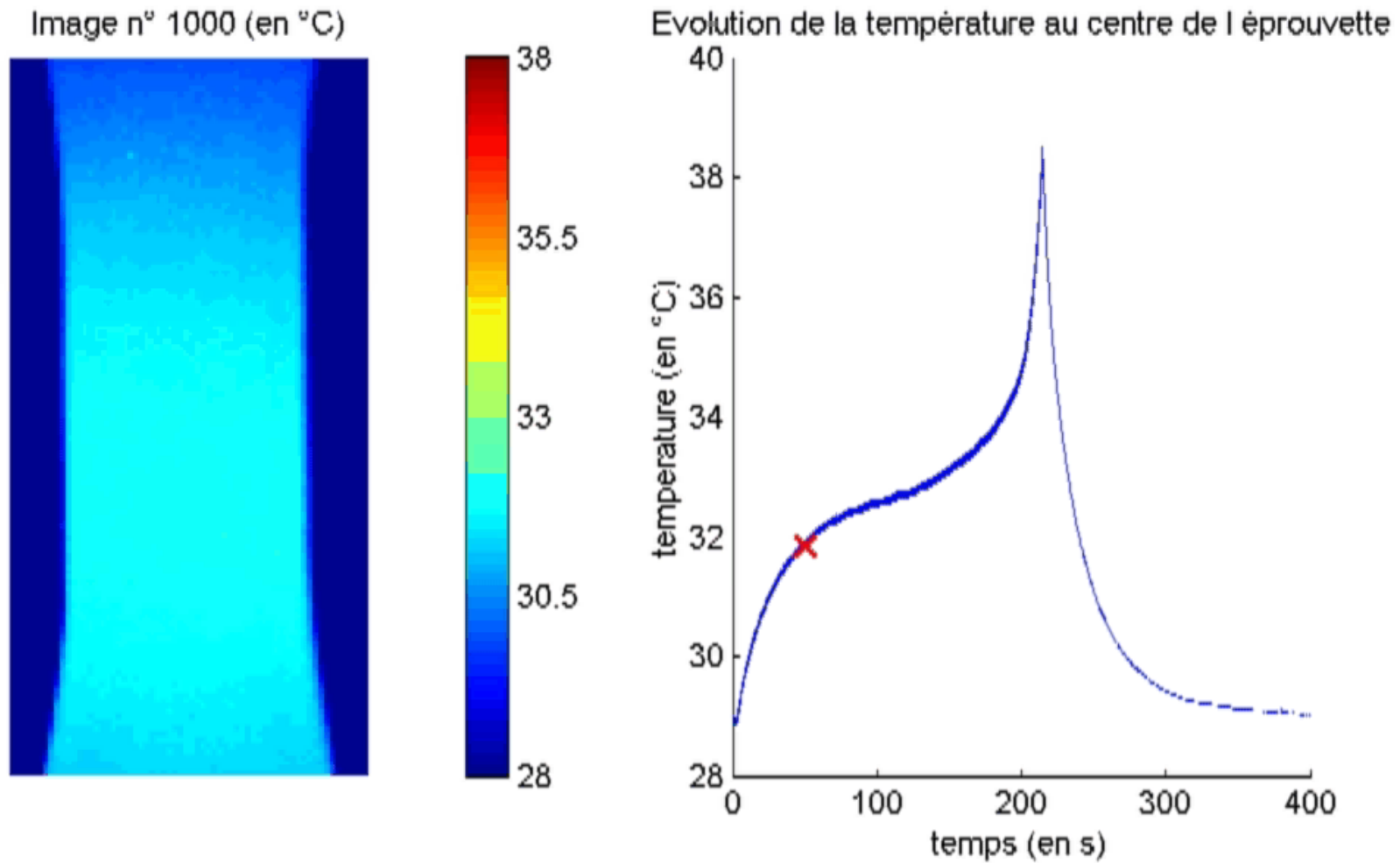


- ①  $m_i$ : series of “mini” cycle blocks (3000 cycles) at different stress ranges: **energy balance at “constant fatigue state”**
- ②  $p_i$ : large blocks (100 000 cycles) at constant stress range: **energy balance evolution induced by fatigue mechanisms**

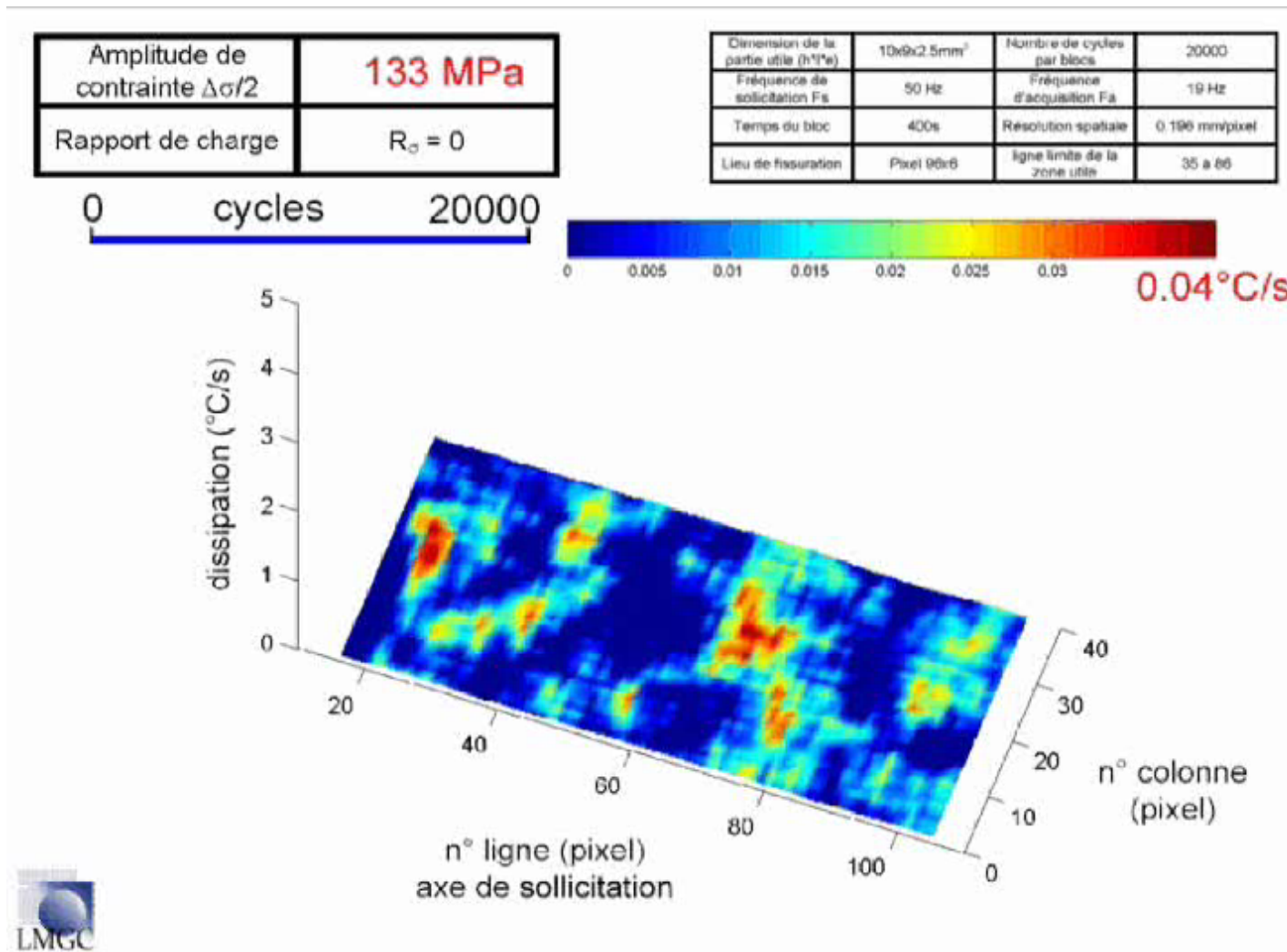
highest stress range  $\approx$  fatigue limit



## HCF : champs de température

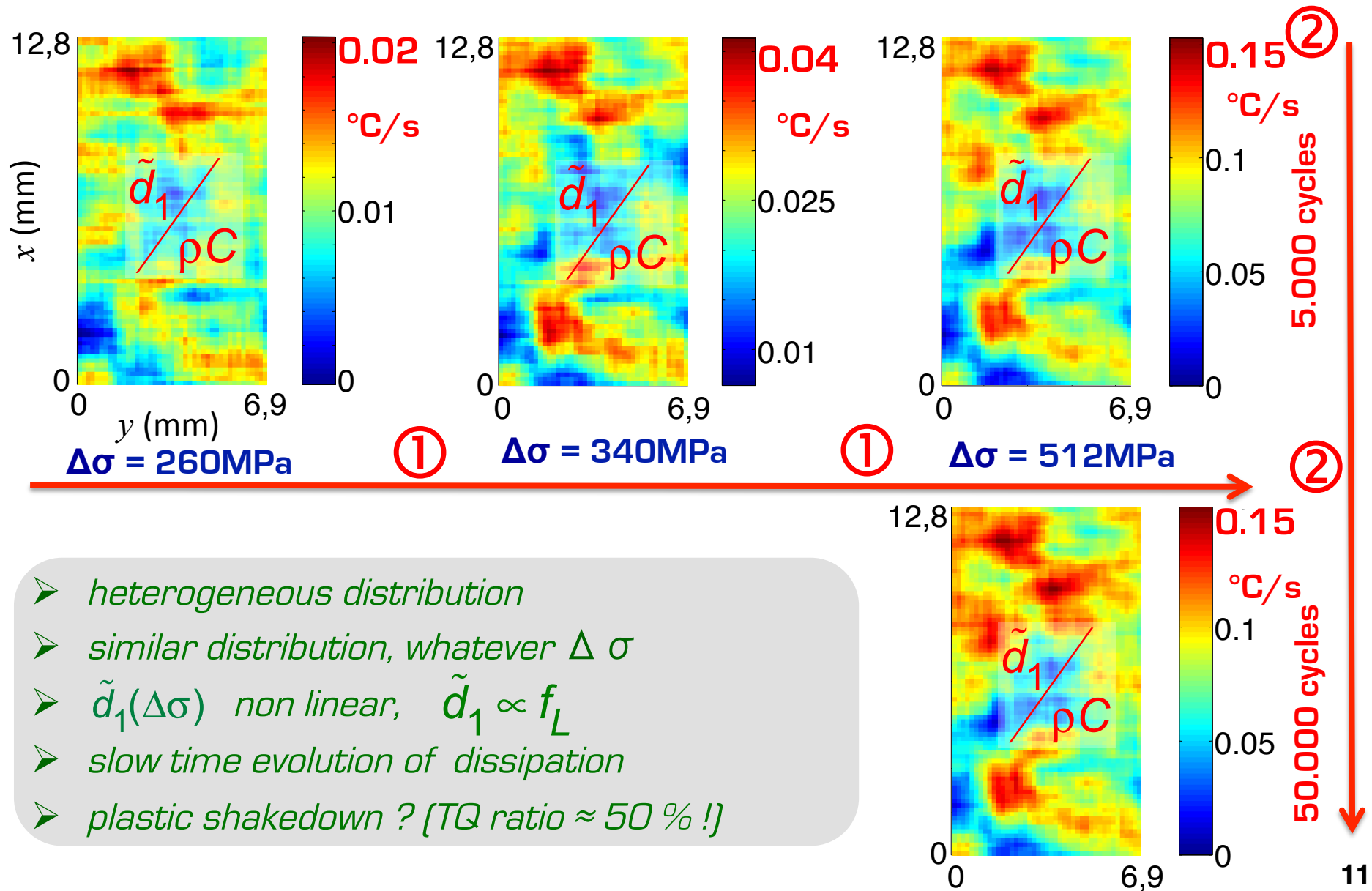


## HCF: champs de dissipation



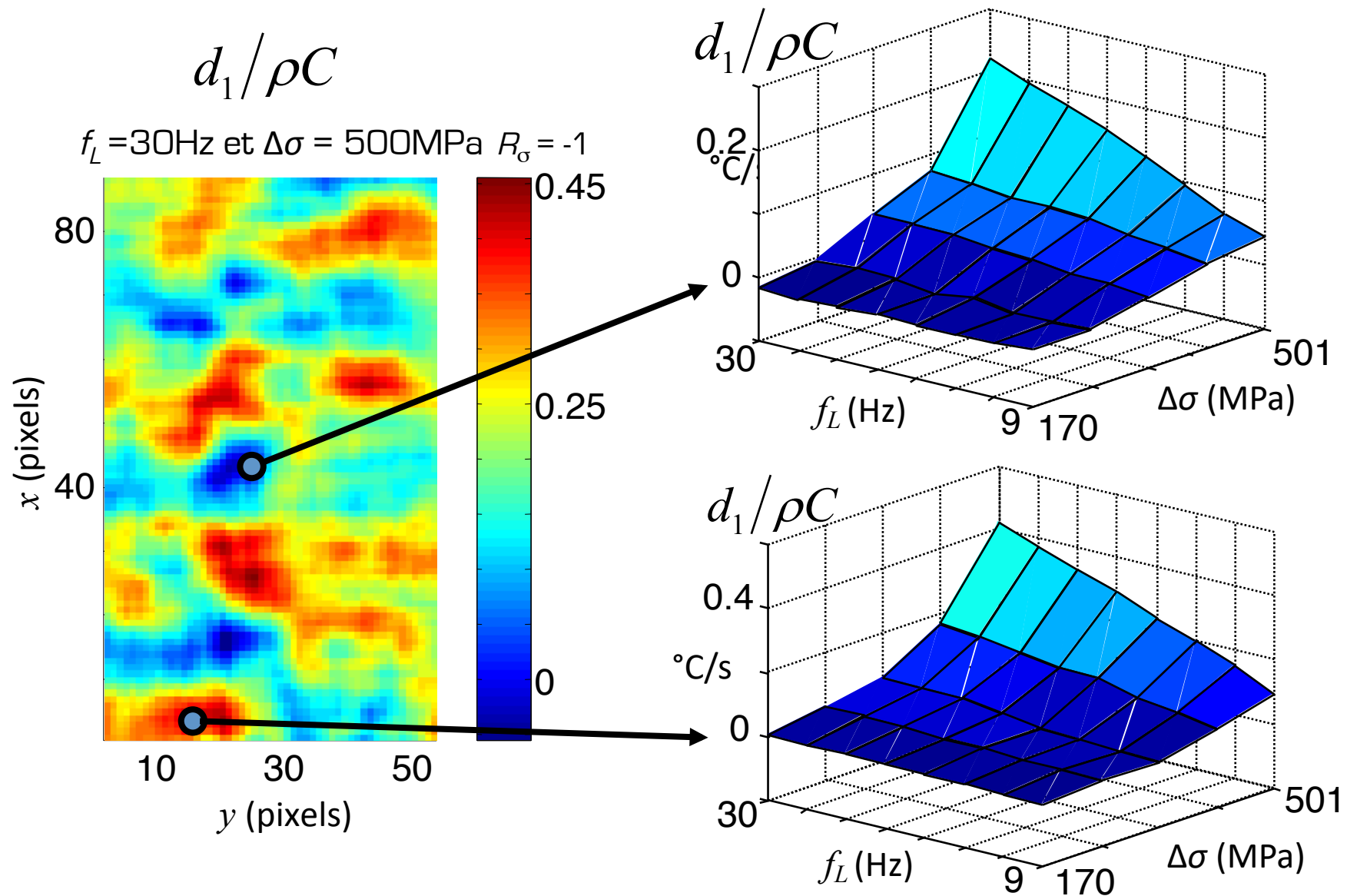
## Dissipation properties (meso)

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

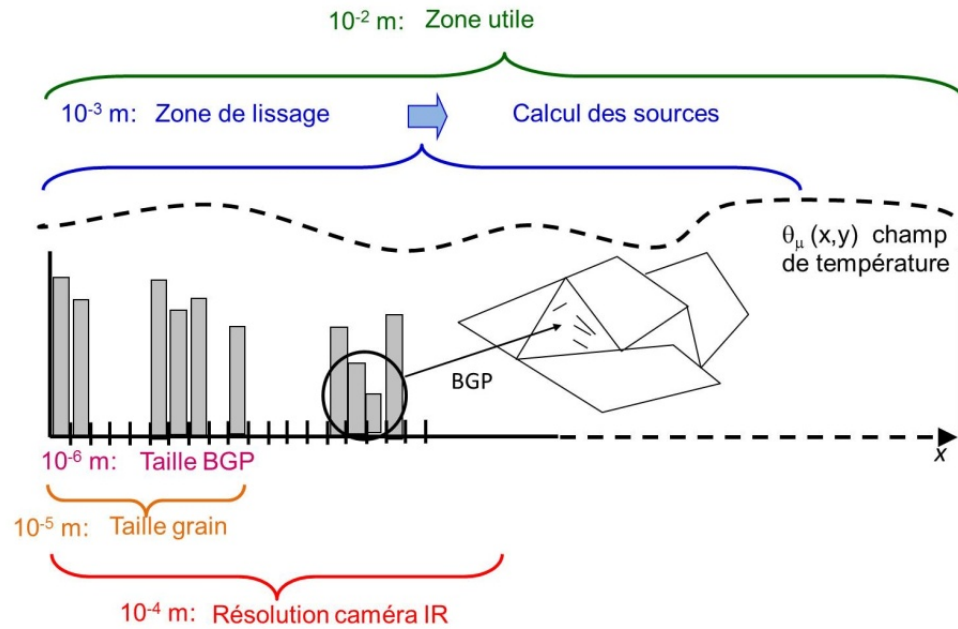


- *heterogeneous distribution*
- *similar distribution, whatever  $\Delta\sigma$*
- *$\tilde{d}_1(\Delta\sigma)$  non linear,  $\tilde{d}_1 \propto f_L$*
- *slow time evolution of dissipation*
- *plastic shakedown ? [TQ ratio  $\approx 50\%$  !]*

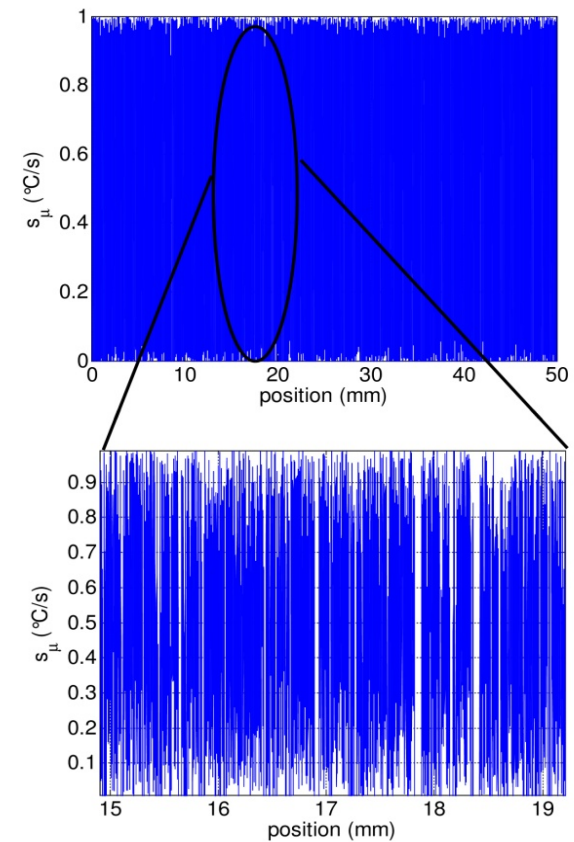
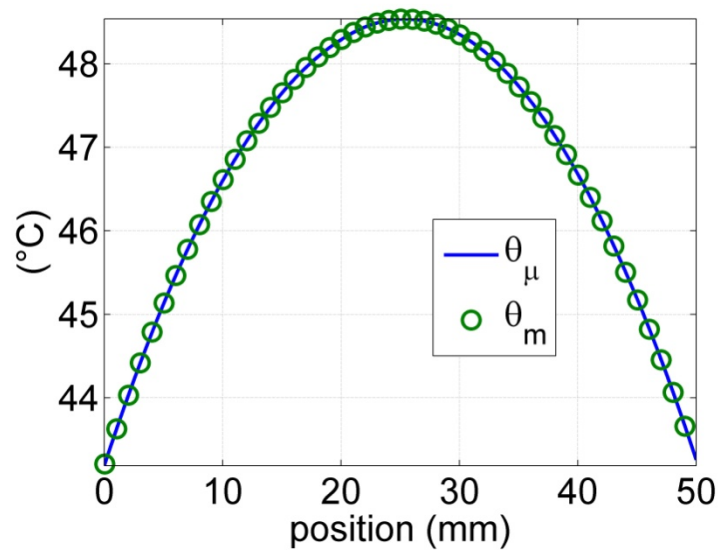
## Evolution de $d_1[f_L, \Delta\sigma]$ de deux zones - DP600



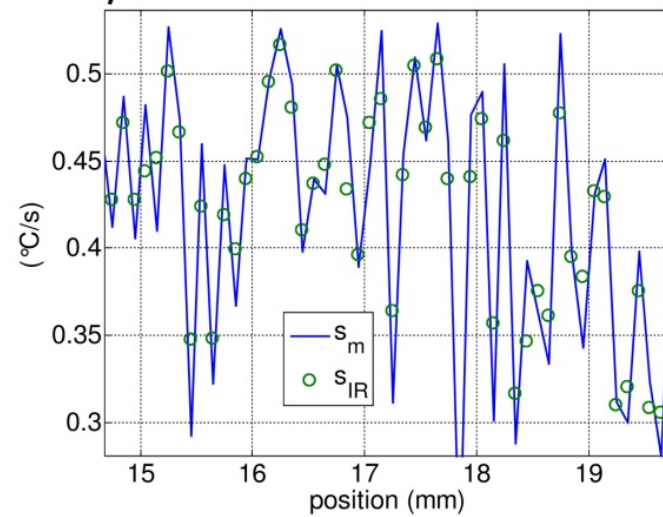
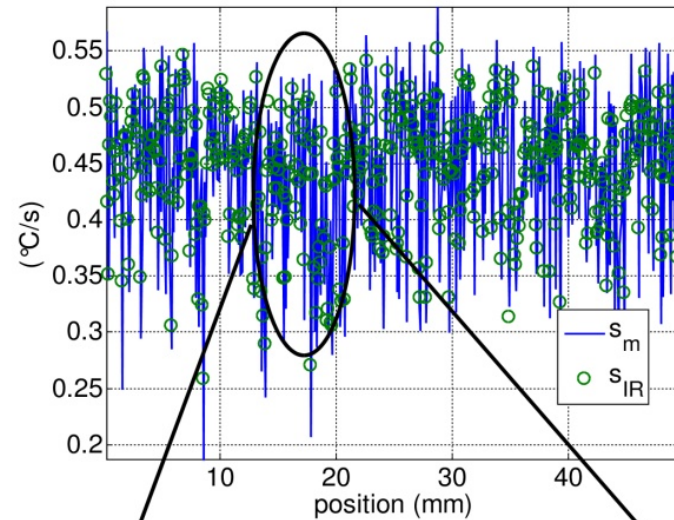
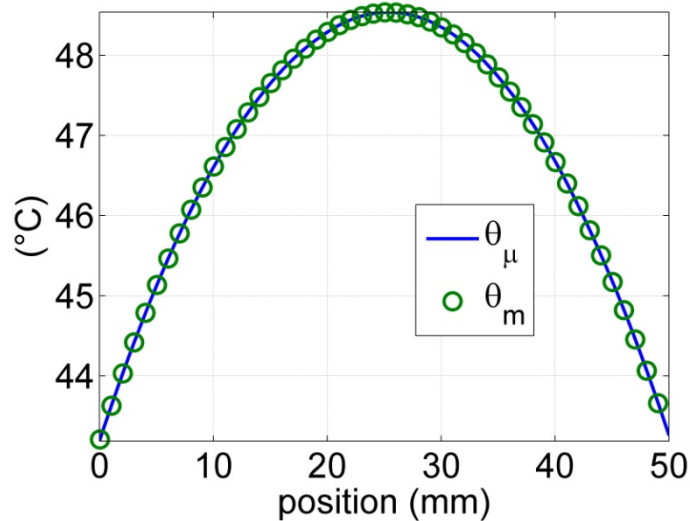
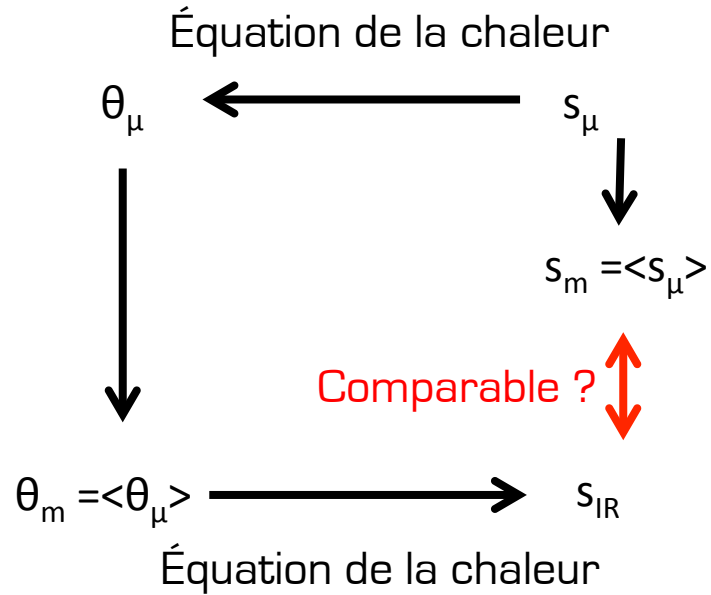
## Localisation des effets dissipatifs en fatigue (micro)



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



# Localisation des effets dissipatifs en fatigue (micro)



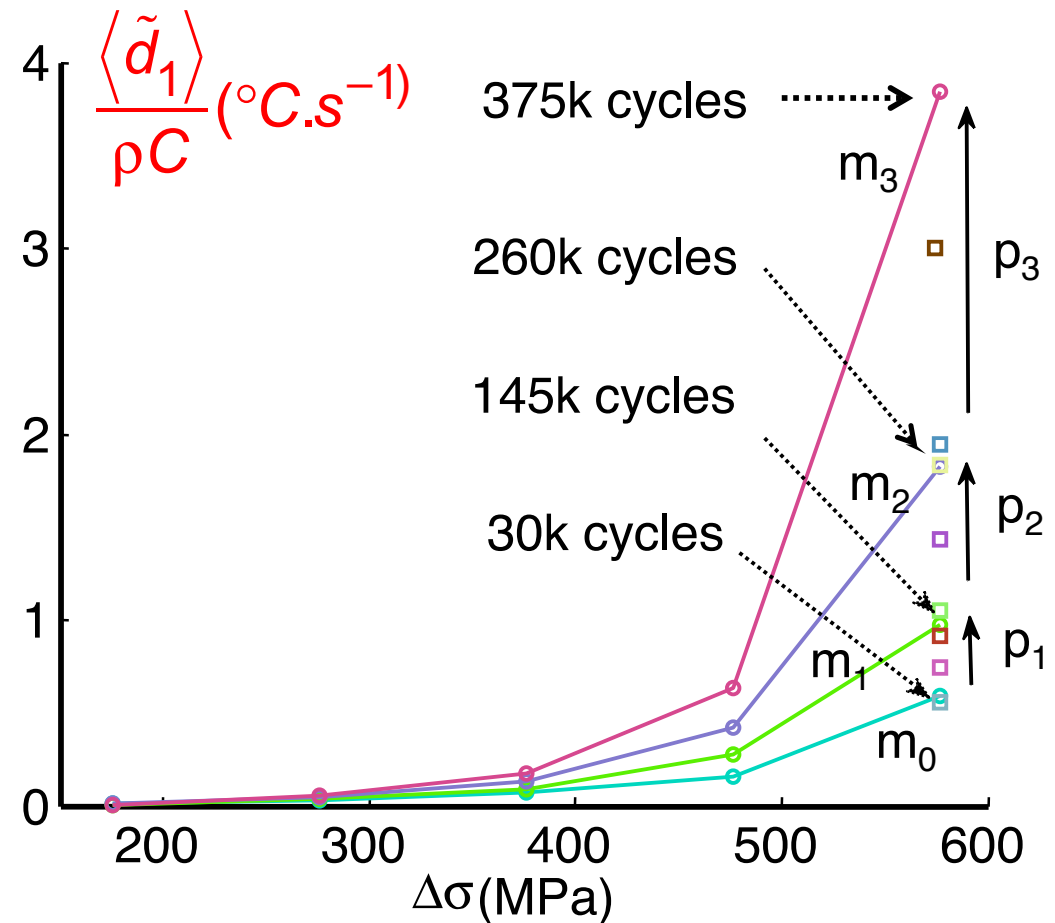
## Dissipation properties (macro)

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

Interpretation of curves

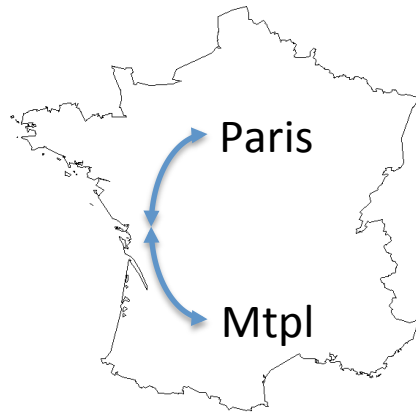
$m_i$  = dissipation induced by activated "micro-defects" at constant fatigue state for different stress ranges

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

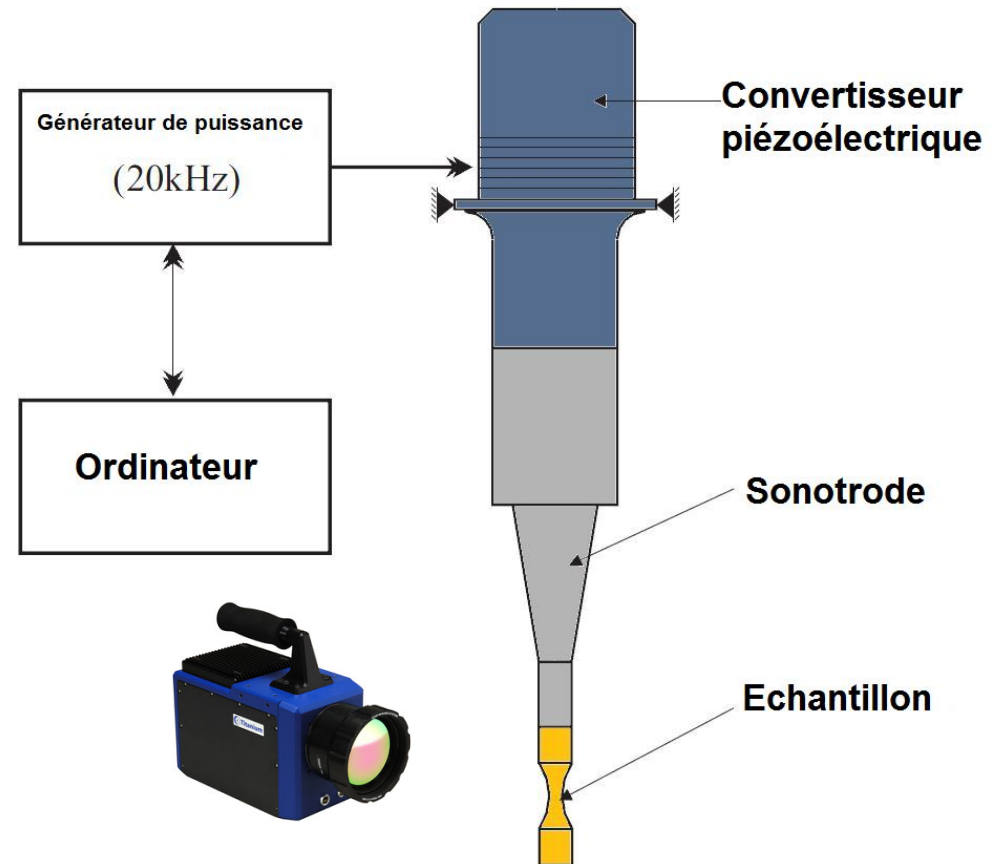


➤ energy safeguard: kinetics of fatigue progress

# Dispositif expérimental - VHCF



HCF and VHCF  
[Blanche, PhD 2012]





Système élastique et en vibration libre

[Bathias & Paris, 2004]

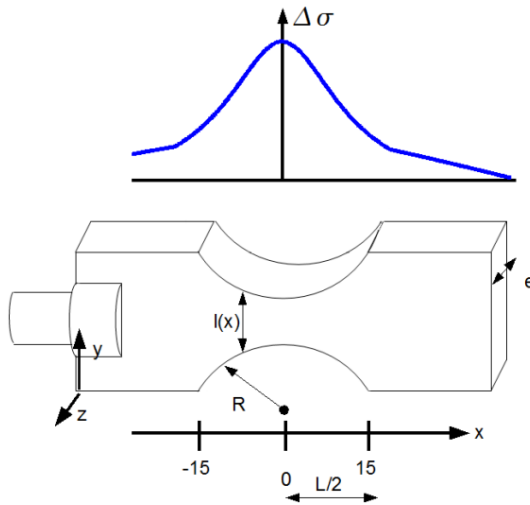
$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} - c^2 \left( \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \frac{S'(x)}{S(x)} \right) = 0$$

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

Résonance uniquement selon le premier mode de vibration longitudinale

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

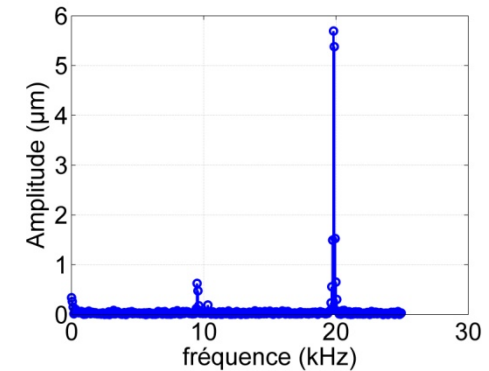
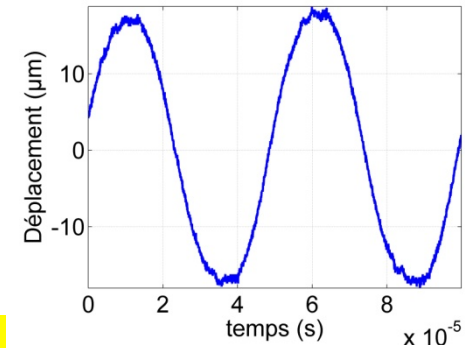
Contrainte



Calibration

$F_L = 20\ 000\ \text{Hz} !!$

Spectre



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

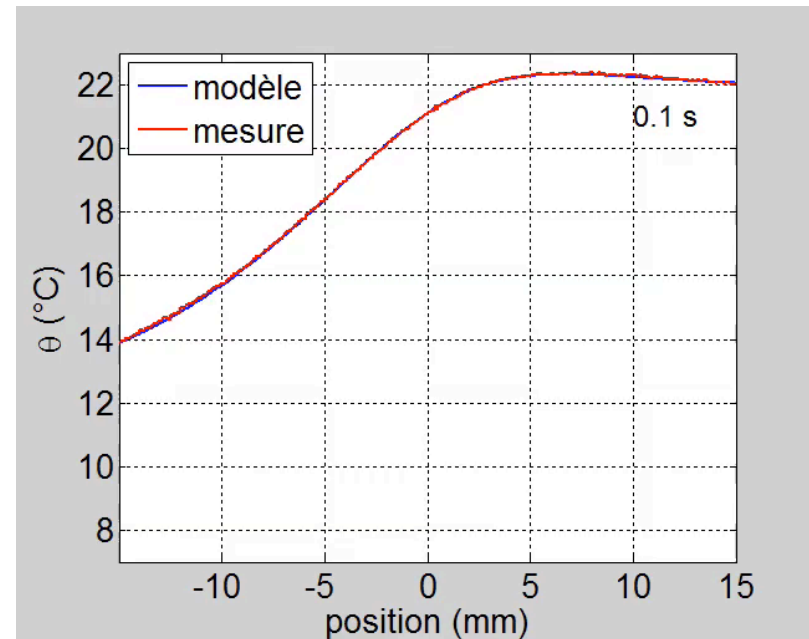
1 – Détermination des sources  
lissage (moindres carrés) de la température

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

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

2- Vérification

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



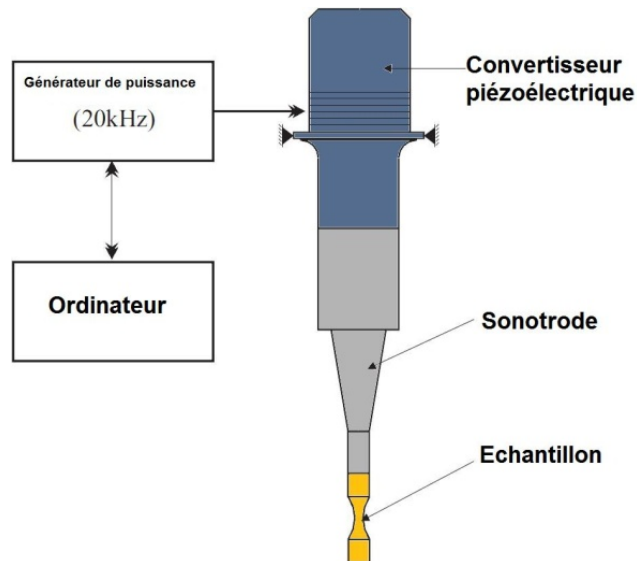
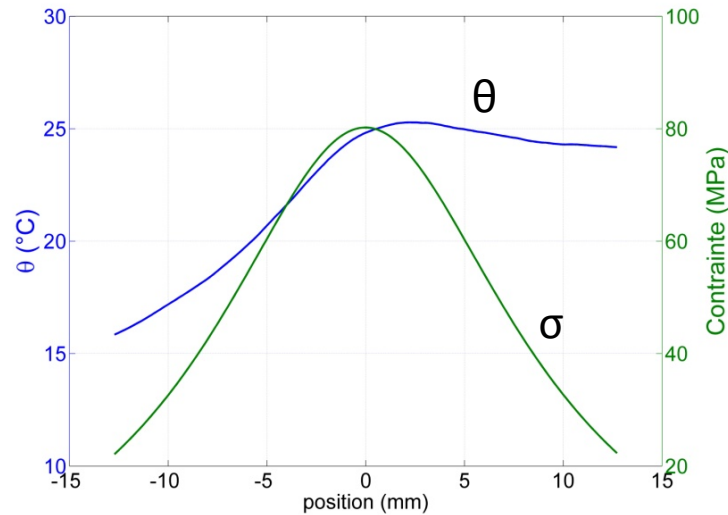
Dissymétries des CL + jet d'air (effet convectif) + fuites longitudinales importantes

1D

# Relèvement des thermoprofiles

Dissymétrie du champ de température

Décomposition de la température



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

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

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

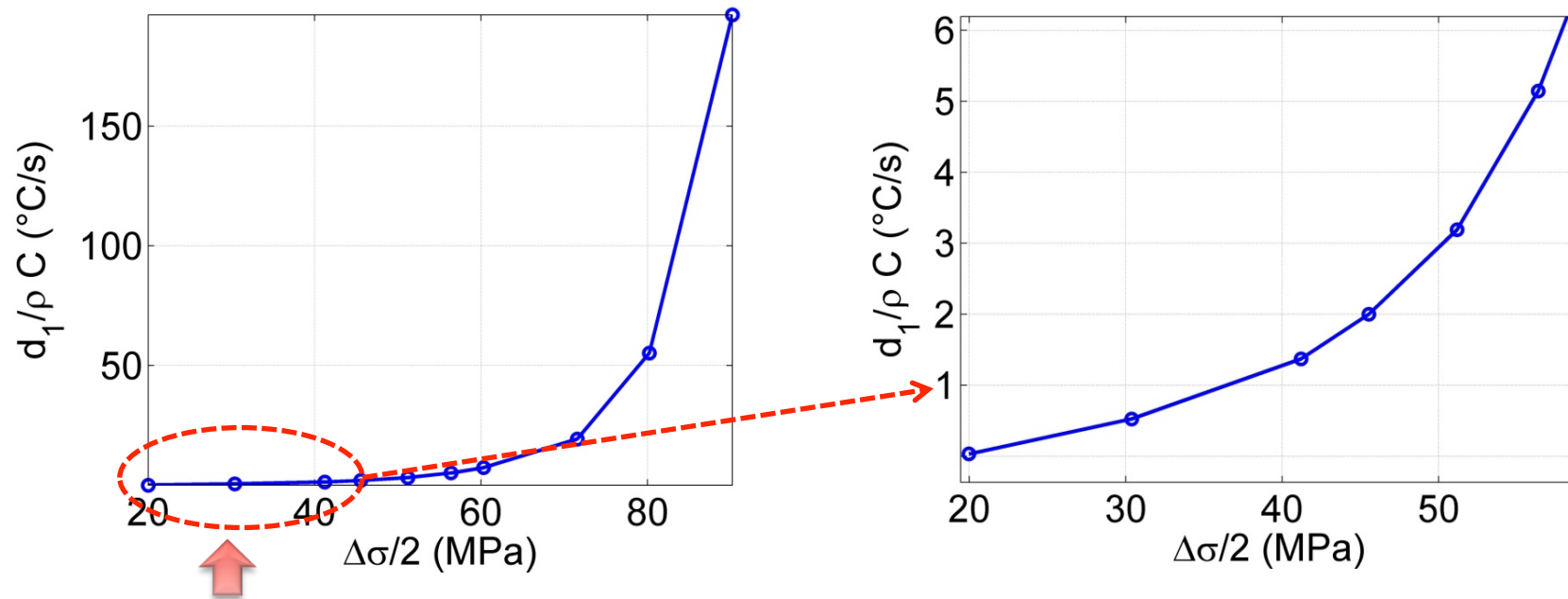
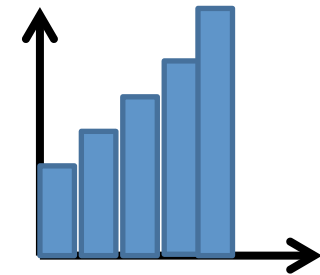
$$\begin{cases} \dot{\bar{\theta}}_{ss} + \frac{\bar{\theta}_{ss}}{\tau^{1D}} - \frac{k}{\rho C} \left( \frac{\partial^2 \bar{\theta}_{ss}}{\partial x^2} + \frac{\partial \bar{\theta}_{ss}}{\partial x} \frac{S'}{S} \right) = 0 \\ \bar{\theta}_{ss}(x, t = 0) = \bar{\theta}(x, t = 0) \\ \bar{\theta}_{ss}(x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

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

## Limite de fatigue

Cuivre  
 20 kHz  
 $R_\sigma = -1$

Essai VHCF sur du cuivre

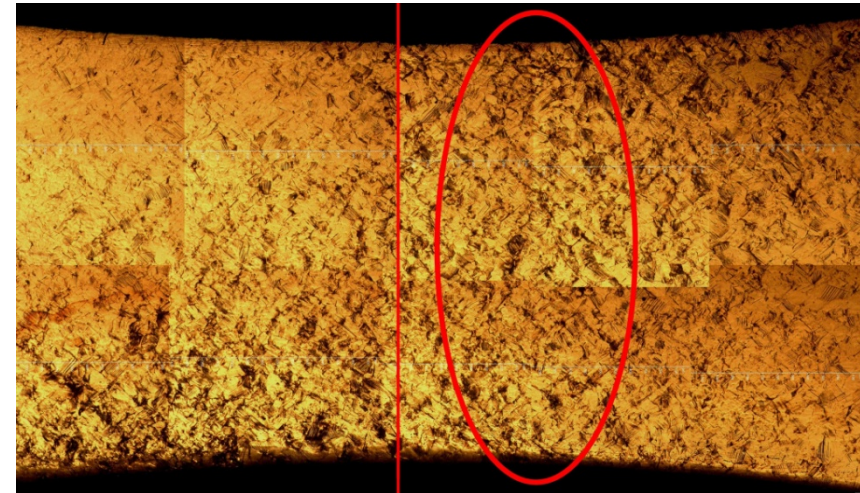
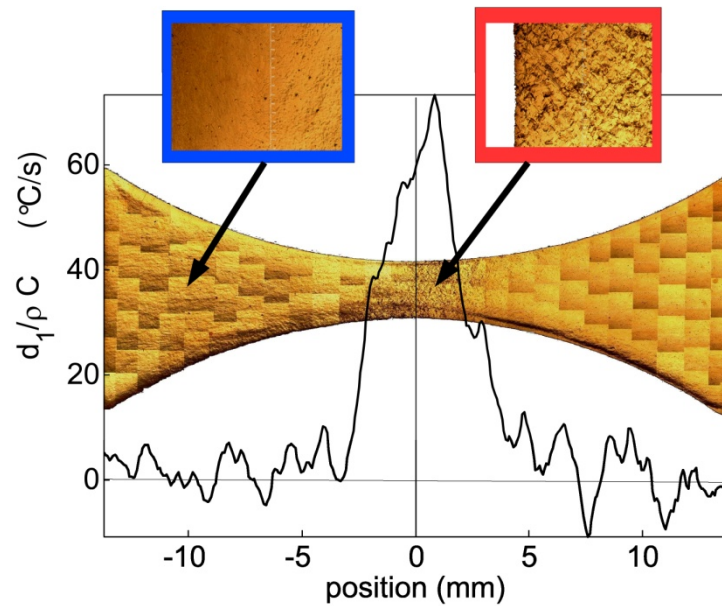


Seuil d'apparition de bande de glissement [Phung, PhD 2012]

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

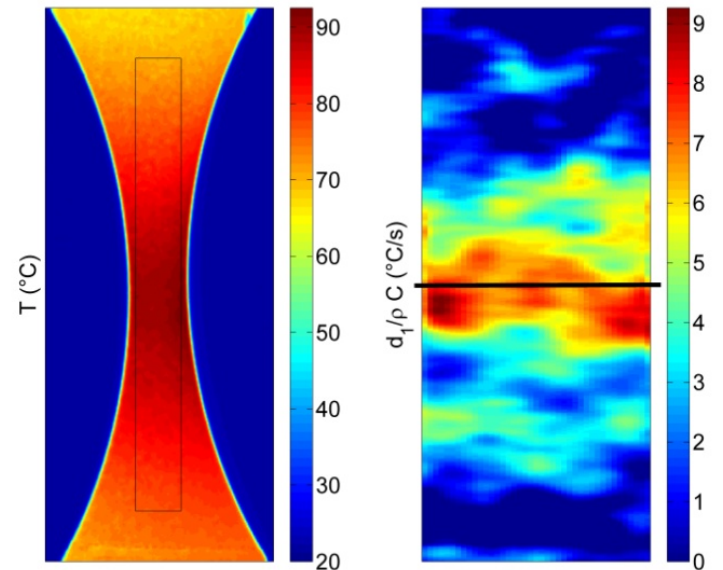
Étude plus approfondie des mécanismes microstructuraux dans les thèses de Ngoc-Lam Phung, Chong Wang et Nicolas Marti

# VHCF : Fer Armco

Milieu d'essai

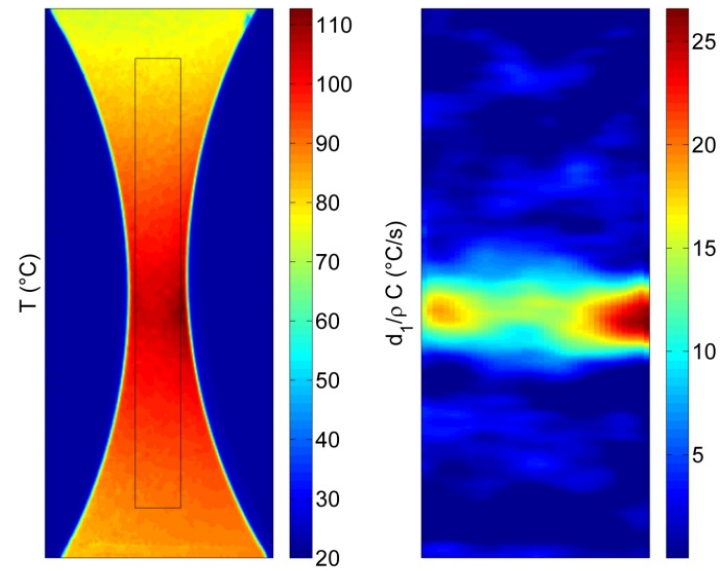
Fer Armco, 20 kHz  
 $R_\sigma = -1$ ,  $\Delta \sigma / 2 = 120$  MPa

Fin d'essai



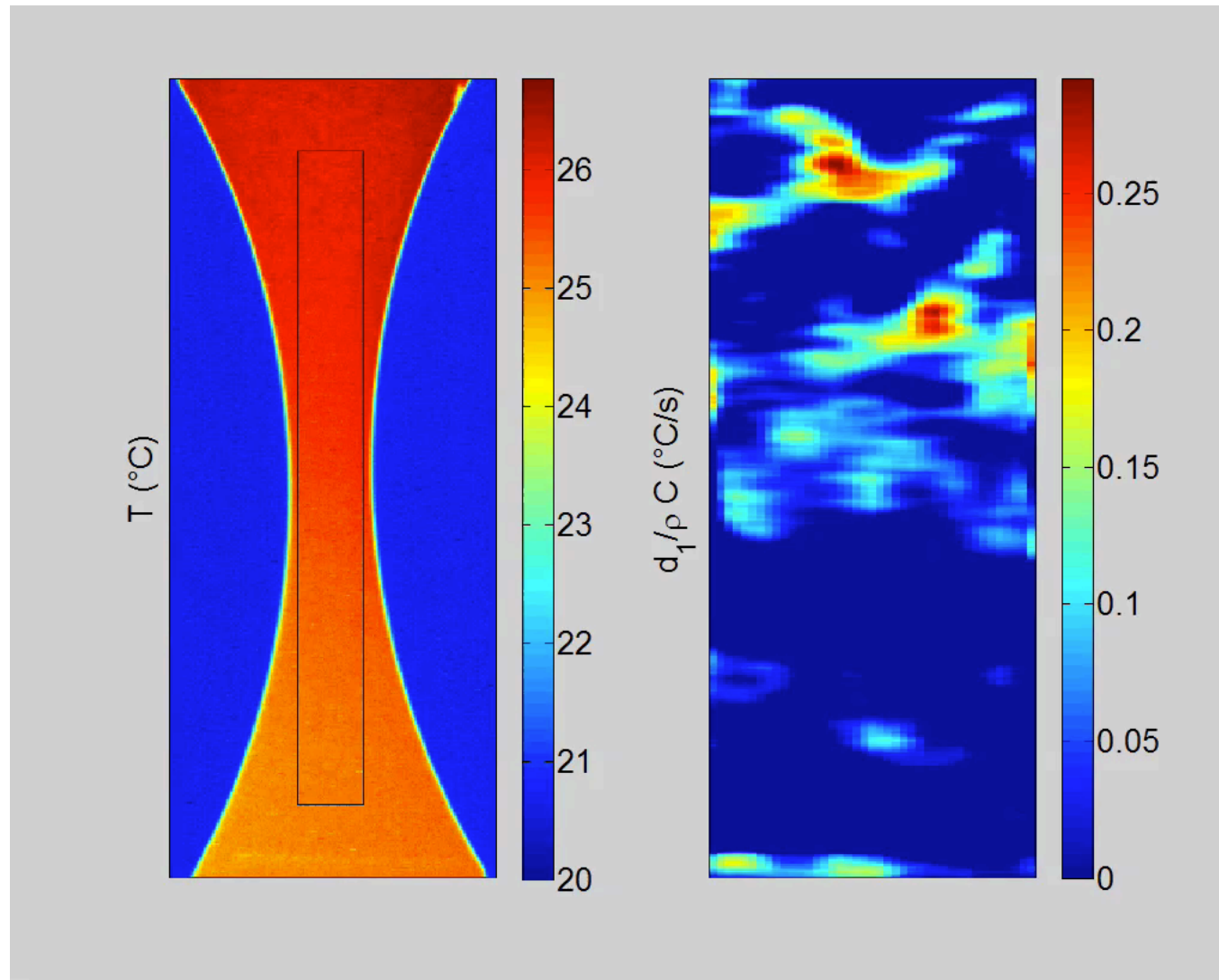
$2.5 \cdot 10^6$  cycles

2D

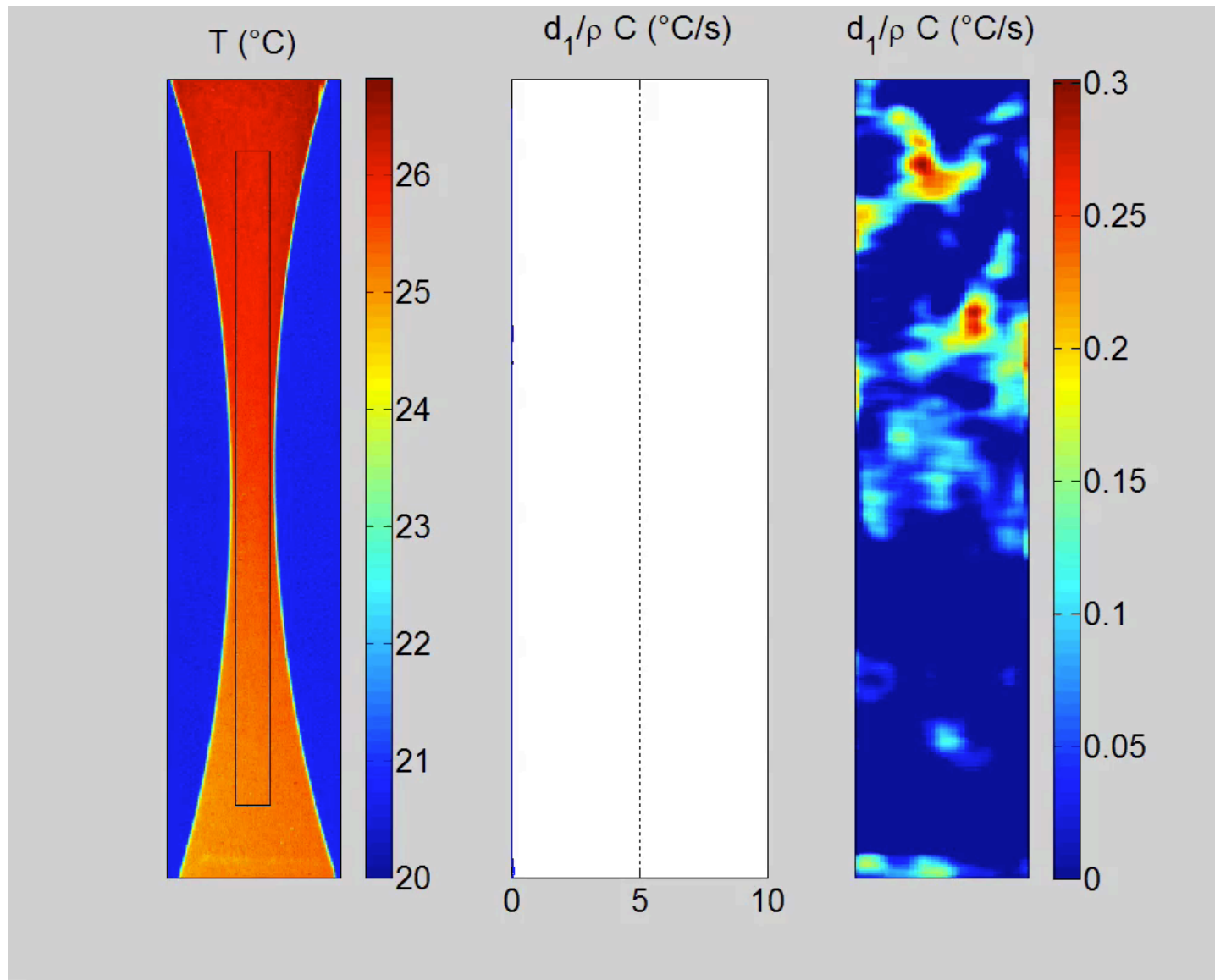


$5.10^6$  cycles

# VHCF : une petite animation

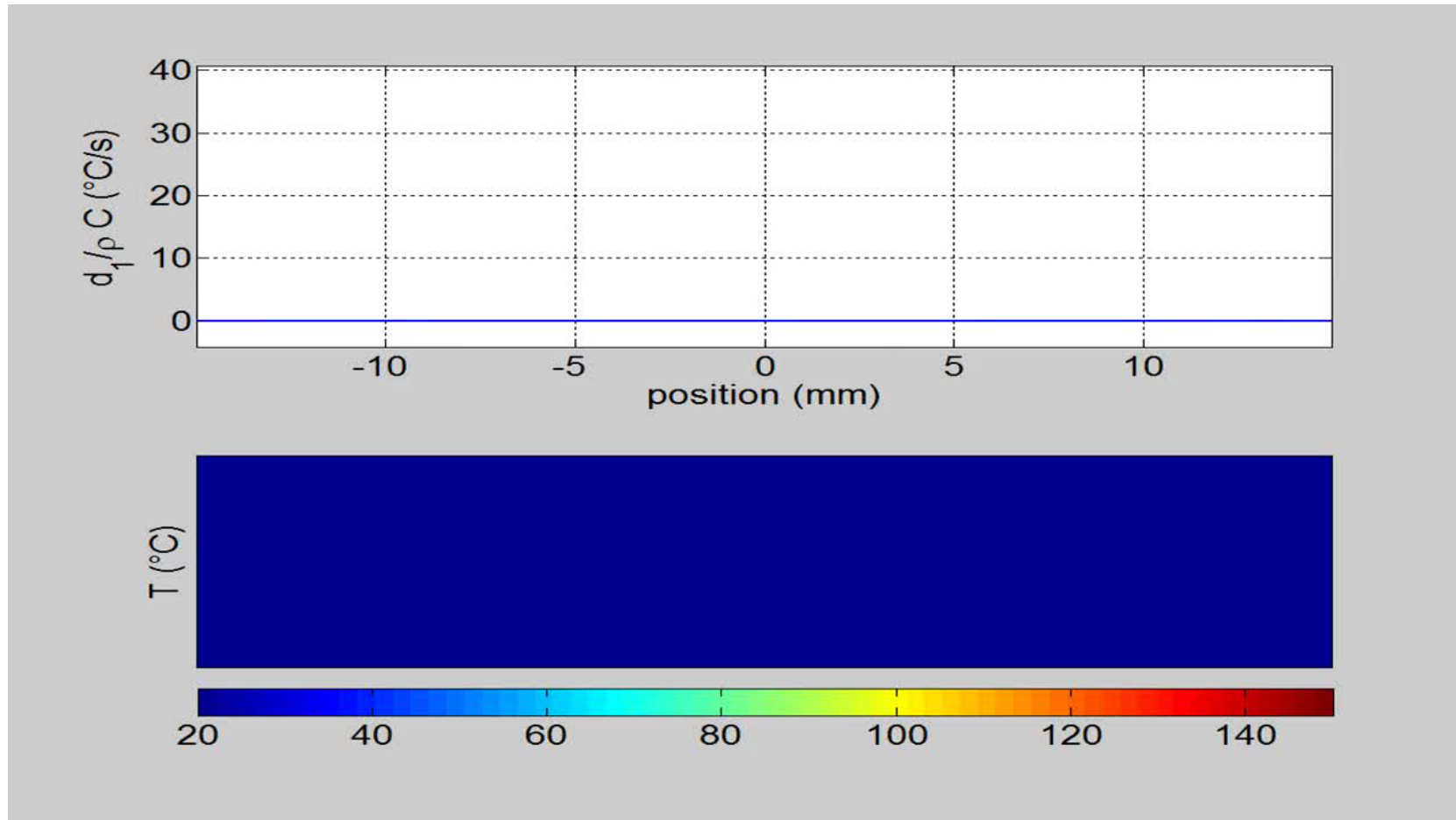


# VHCF : une autre ...

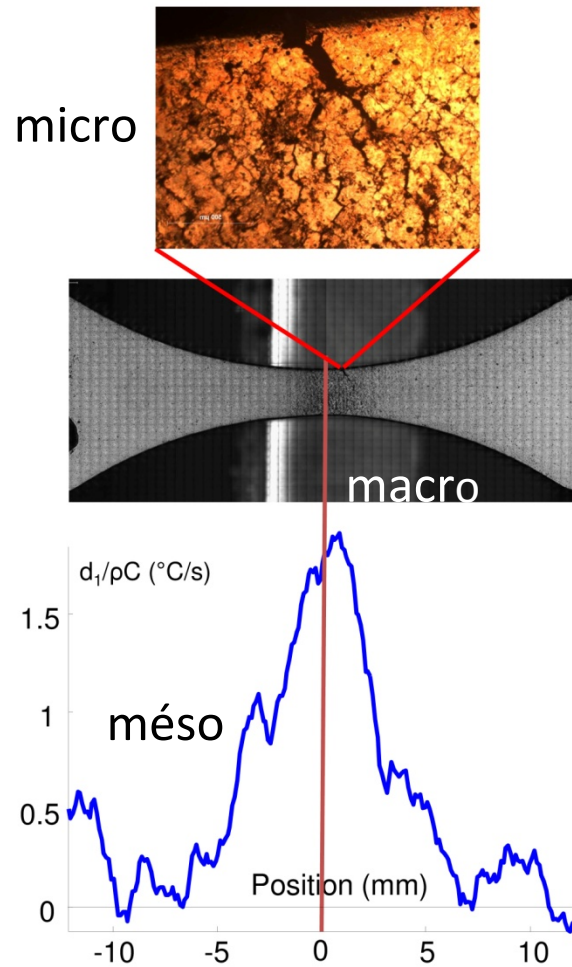




# VHCF : une dernière, pour la route ...



## Méso-micro (VHCF) : bilan



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

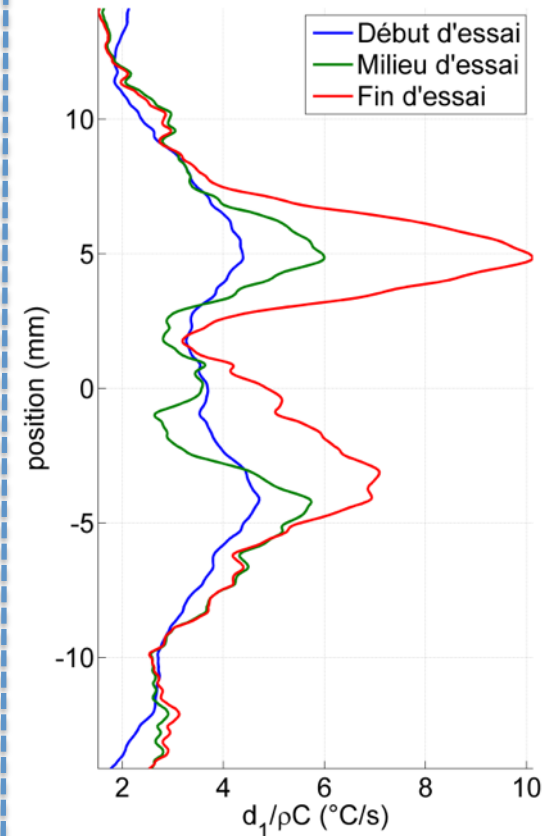
[Blanche, PhD 2012]  
 [Ngoc-Lam Phung, PhD 2012] [\*]  
 [Chong Wang, PhD 2013][\*\*]

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

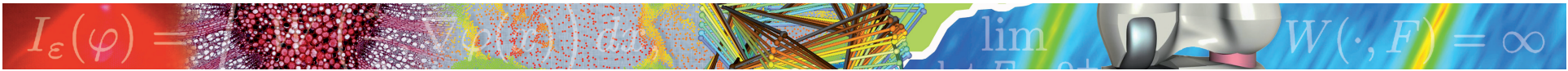
Excellente corrélation  
 entre champs (méso)  
 de la dissipation et les  
 concentrations de BGPs  
 (micro).

Conditions initiales !

مکتوب



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



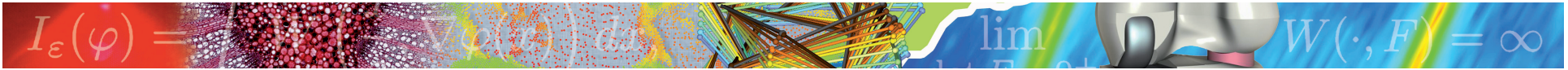
## Quelques mots de conclusion

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

- MSG : un cadre cohérent et souple.
- Définition sans ambiguïté des divers effets énergétiques
- Des degrés de liberté 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 → 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