



Module Image 2018



mercredi 28 mars,
institut de botanique - 163, rue Auguste Broussonnet

Modèles thermiques, cinématiques et mécaniques pour l'interprétation des images

Partie 2

Exemples d'application de la thermographie IR en
mécanique des matériaux

B. Wattrisse & A. Chrysochoos
LMGC, UMR 5508, CNRS Université de Montpellier



Très bref historique ...

1805, Gough, caoutchouc naturel

1857, Joule, métaux vs. caoutchouc, μ calorimètre (a)

1900, Charbonnier & Galy Aché, métaux en compression + μ calorimètre

1933, Taylor & Quinney, 1933, métaux en torsion → μ calorimètre

1965, Scanner IR Agema IR Systems

1975, J.J. Moreau, P. Germain, N.Q. Son & B. Halphen, MSG/TPI

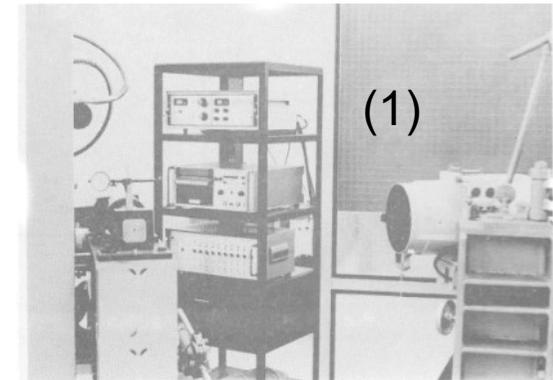
1976, Saix, XC38, flexion, radiomètre (1)

1978, naissance de FLIR

1982, LMA, Thèse de P. Brémond, fatigue, fissure, PVC, Aga 780 (2)

1982, Lemaître & Chaboche, Greco 47 GDE

(a) (Joule, 1857) J.P. Joule, On some thermodynamic properties of solids, *Phil. Mag. 4th Ser.* 14, p.227 (1857)

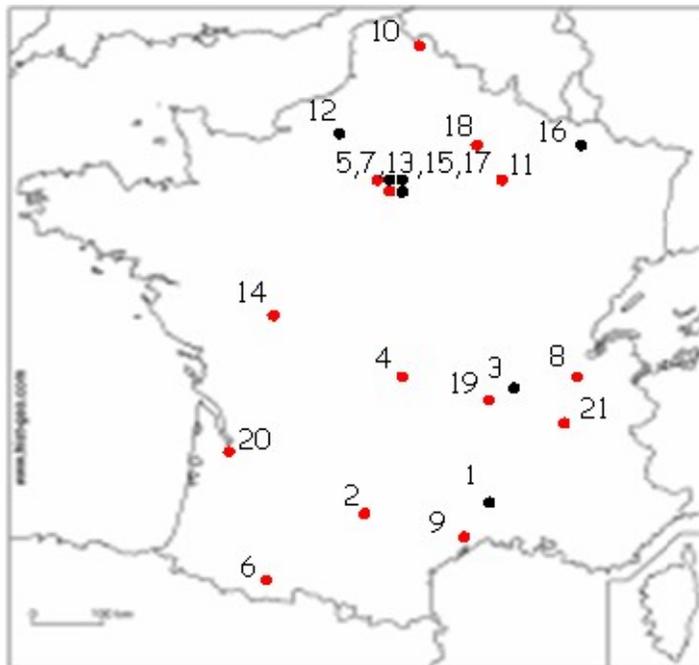


Très bref état des lieux ...

2003-2014

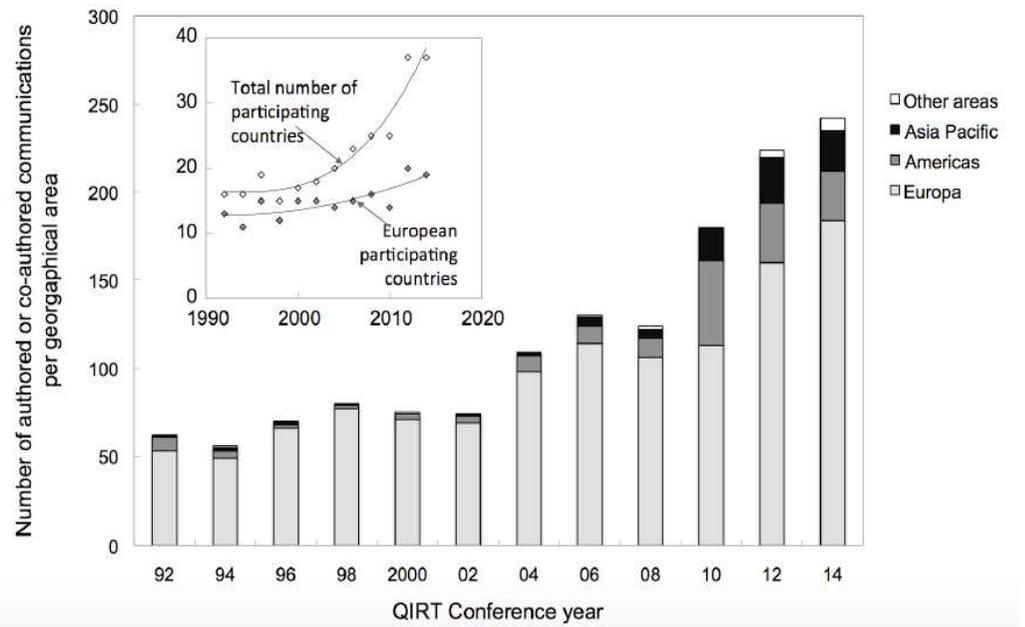


Renouvelé 2 fois !



1992

QIRT
Quantitative InfraRed Thermography



Bilan d'énergie ... à la sauce mécanique

$$\begin{aligned} W_{\text{def}}^{\square} &= \sigma : \dot{\varepsilon} = \sigma^r : \dot{\varepsilon} + \sigma^{ir} : \dot{\varepsilon} \\ &= \underbrace{\sigma^r : \dot{\varepsilon} + A_{\alpha} \dot{\alpha}}_{W_e^{\square} + W_s^{\square}} + d_1 \end{aligned}$$

W_e^{\square} : taux d'énergie élastique

d_1 : dissipation intrinsèque

W_s^{\square} : taux d'énergie stockée



... bilan incomplet !!

Sources de chaleur

- Taux d'énergie interne

$$\rho \dot{e} = \rho C \dot{T} + (\sigma^r : \dot{\varepsilon} + \mathbf{A} \cdot \dot{\alpha}) - (T \sigma^r_{,T} : \dot{\varepsilon} + T \mathbf{A}_{,T} \cdot \dot{\alpha})$$

$$= \rho C \dot{T} + w_e + w_s - w_{thc}$$

« thc » = thermomechanical couplings

- Equation de la chaleur

$$\rho C \dot{T} + \text{div} \mathbf{q} = \underbrace{\sigma^{ir} : \dot{\varepsilon} - \mathbf{A} \cdot \dot{\alpha}}_{d_1} + T \sigma^r_{,T} : \dot{\varepsilon} + T \mathbf{A}_{,T} \cdot \dot{\alpha} + r_e$$

- Commentaires

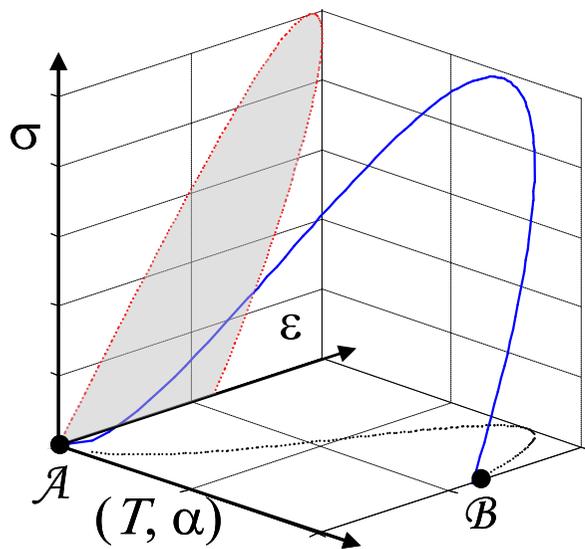
C.1: chaleur spécifique

C.2: $q = -k \cdot \text{grad} T$

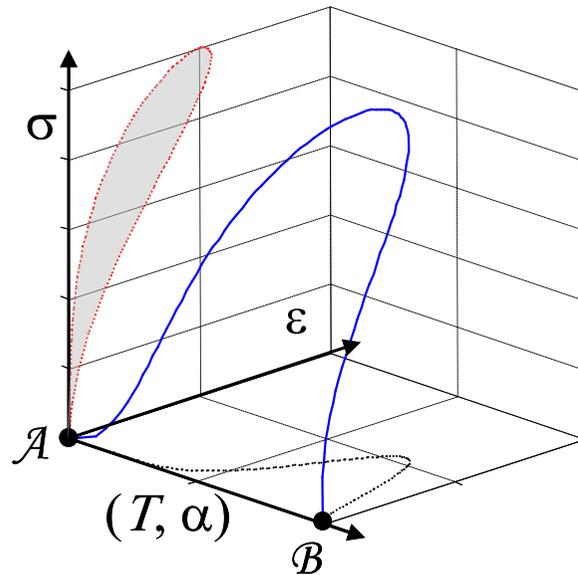
⚠ cinématique nécessaire

$$C.3: \dot{T} = \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T$$

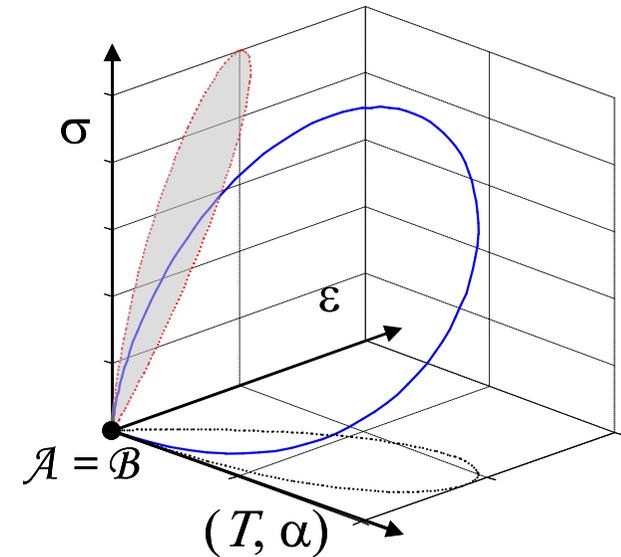
Exemple « élémentaire » de bilan d'énergie



(i) $\mathcal{A} \neq \mathcal{B}$



(ii) $\Sigma_{\mathcal{A}} = \Sigma_{\mathcal{B}}$



(iii) $\mathcal{A} = \mathcal{B}$

$$(i) \quad w_{\text{def}} = \int_{t_{\mathcal{A}}}^{t_{\mathcal{B}}} \sigma : \dot{\varepsilon} dt = \int_{t_{\mathcal{A}}}^{t_{\mathcal{B}}} d_1 dt + \int_{t_{\mathcal{A}}}^{t_{\mathcal{B}}} (\rho \dot{e} - \rho C \dot{T} + w_{\text{thc}}^{\square}) dt$$

(ii) Boucle d'hystérésis : $w_{\text{def}} = A_h$ (chargement uniaxial)



(iii) Charge-décharge = cycle thermodynamique $w_{\text{def}} = \int_{t_{\mathcal{A}}}^{t_{\mathcal{B}}} d_1 dt + \int_{t_{\mathcal{A}}}^{t_{\mathcal{B}}} w_{\text{thc}}^{\square} dt$

Dispositif expérimental

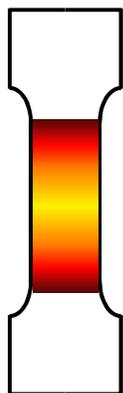


Beaucoup d'aspects matériels, métrologiques, traitement d'images ont été vus dans la 1^{ère} partie du cours

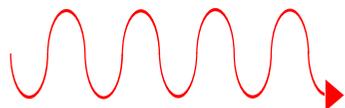
Un minimum de radiométrie IR

Objectifs : mesurer des températures de surface pour « identifier » les sources

cible rayonnante

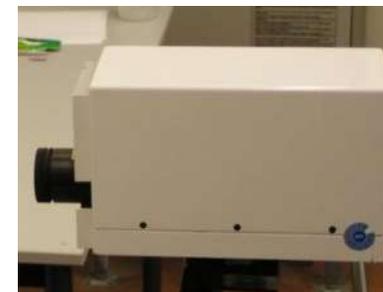


atmosphère



rayonnement I.R.

détecteur IR



$\Delta_\lambda = 3-5 \mu\text{m} / 4-8 \mu\text{m} / 8-12 \mu\text{m}$

Moyen : caméra IR matricielle

détecteur : délivre un signal électrique (V) lié à la puissance rayonnée (W)

exitance : flux global émis par la cible par unité de surface ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

... pour une bande passante donnée

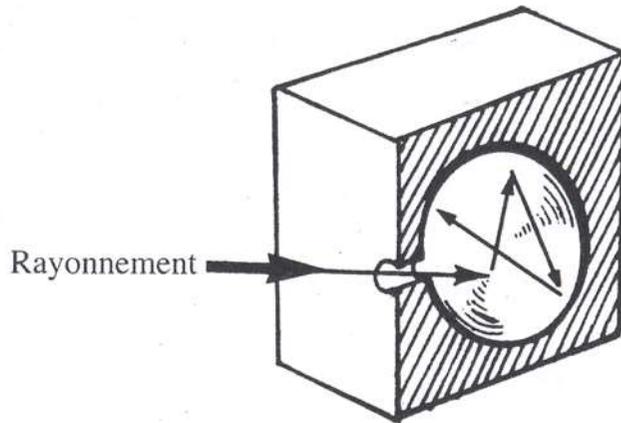
$$R = \int_{\Delta_\lambda} \frac{\partial R(\lambda, T)}{\partial \lambda} d\lambda$$

exitance spectrale
varie avec T !

Une situation sympa ...

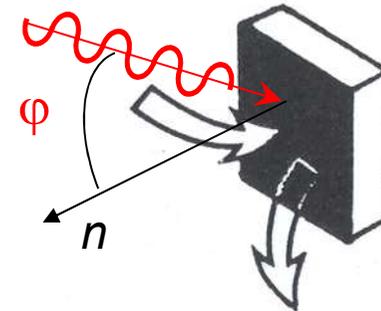
- **Cible** : corps noir capable d'absorber tout rayonnement incident, $\forall \varphi, \forall \lambda$,
(i.e. pas de réflexion, pas de transmission)

cavité presque
totalement fermée



[G. Gausorgues, TEC & DOC, 99]

revêtement
absorbant parfait (*)



(*) peinture noir mat ...
Pub.: 3M velvet coating

- **Atmosphère** : petite distance, air sec, transparent aux IR, transmission parfaite.
(i.e. ce qui est émis par la cible, est reçu par le détecteur)

... où s'appliquent directement les lois du rayonnement

- Loi de Planck

$$\frac{\partial R_{cn}(\lambda, T)}{\partial \lambda} = \frac{2\pi h c^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right) - 1}$$

R : exitance spectrale, $W.m^{-3}$

h : Planck, $6,66.10^{34}$ J.s

k : Boltzmann, $1,38.10^{23}$ J.K⁻¹

c : lumière, 3.10^8 m.s⁻¹

T : température, K

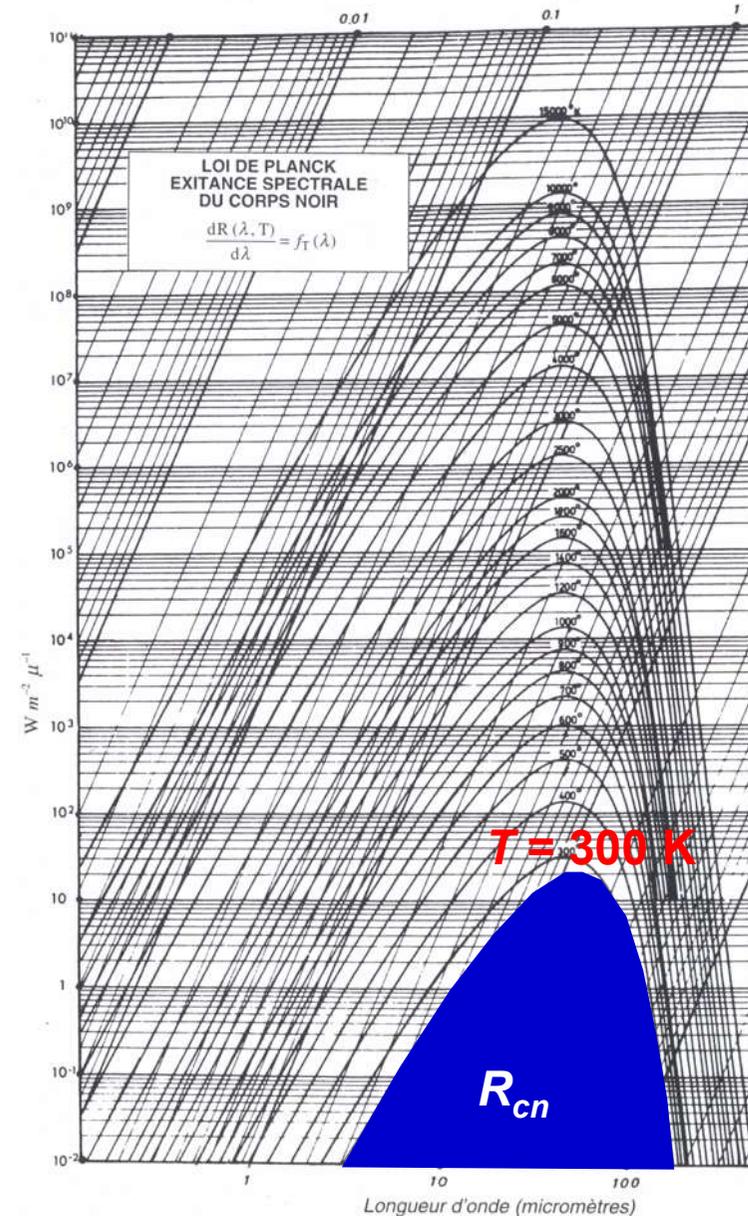
- Loi de Stefan-Boltzmann

$$R_{cn} = \sigma_s T^4$$

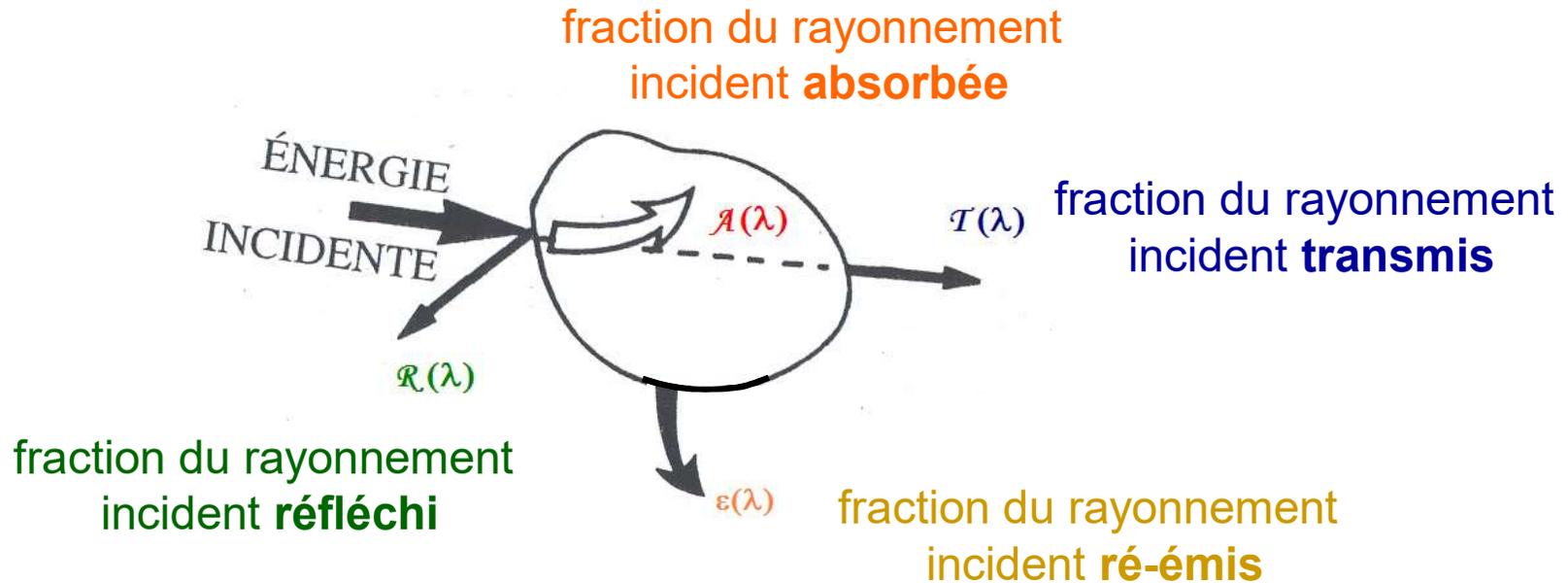
σ_s : constante de Stephan

$$\sigma_s = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,6710^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$$

[G. Gaussorgues]

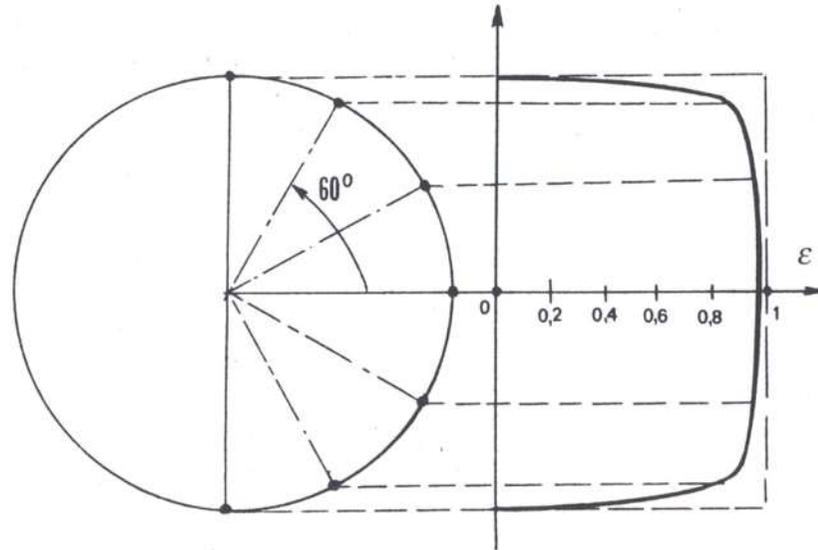


**Cible et environnement quelconques ...
... ça se complique un peu !**



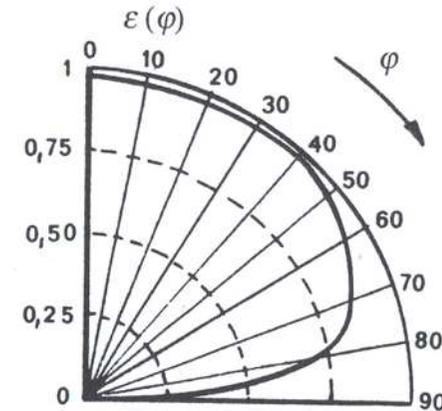
- conservation de l' énergie $A(\lambda) + R(\lambda) + T(\lambda) = 1$
- équilibre « thermodynamique » ... $A(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$

Rôle de l'incidence du rayonnement



émissivité sphère diélectrique

ε : émissivité



φ : angle observation

émissivité de l'eau à $\lambda = 10 \mu\text{m}$

Jusqu'à 45-50 degré, corps lambertiens ... $\partial\varepsilon/\partial\varphi \approx 0$

*Risque faibles : éprouvettes planes \perp axe optique de la caméra
+ corps gris à forte émissivité (peinture)*

$$R_{\Delta\lambda}(T) \approx \varepsilon R_{cn_{\Delta\lambda}}(T)$$

Une caméra IR en quelques chiffres



Cedip MW (4-8 μm)

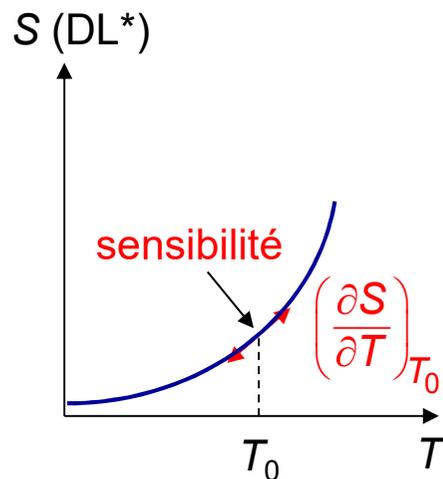
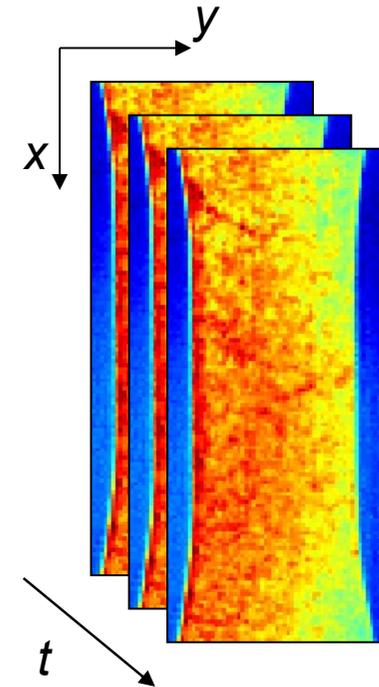
Image : 320×240 pixels

Codage : 14 bits

Fréq. Acq. : 50 images/seconde

Résolution spatiale : 100 $\mu\text{m}/\text{pix}$

NETD : 20 mK à l'ambiante



(*) DL : digital level

NETD : (noise equivalent temperature difference)
Différence de Température Equivalente à la valeur efficace du Bruit mesuré sur le thermosignal

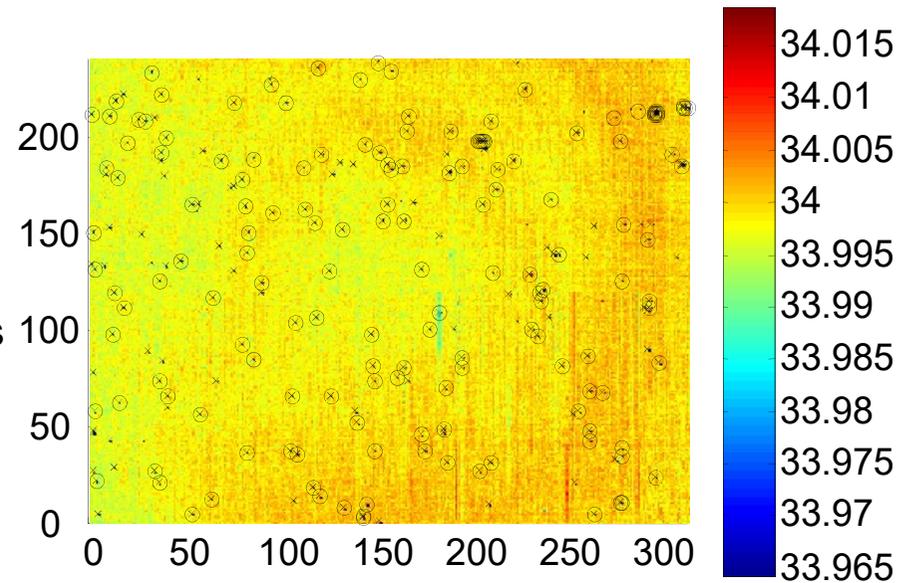
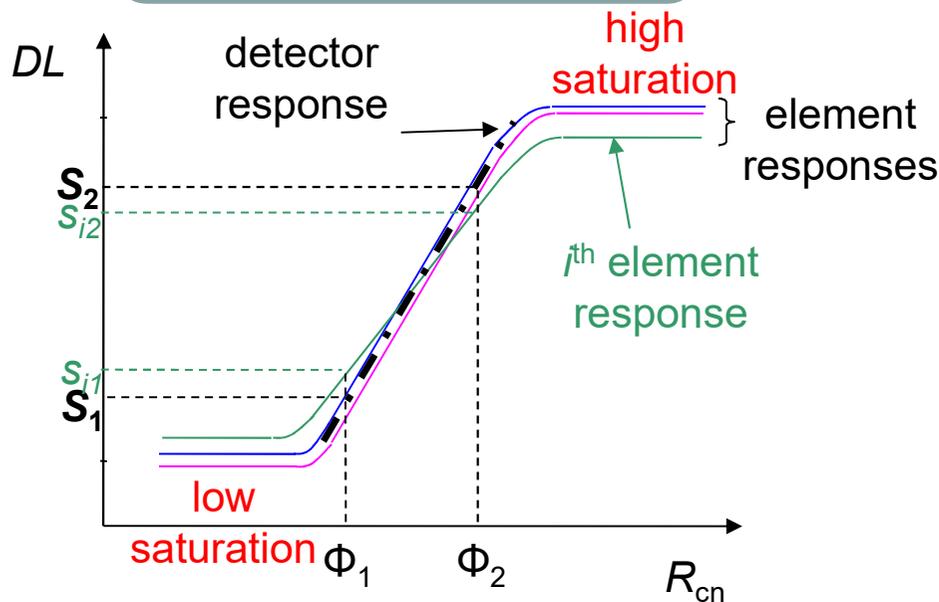
$$\text{NETD}(T_0) = \frac{\text{std}(S)}{\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_{T_0}}$$

Etalonnage : constructeur

- 2 scènes thermiques uniformes (Φ_1 et Φ_2)
feuille blanche + main ...
- 50 % de la dynamique des capteurs (partie linéaire)
- opérations NUC et BPR

$$s_i = a_i \phi + b_i$$

$a_i = \text{gain}$
 $b_i = \text{offset}$

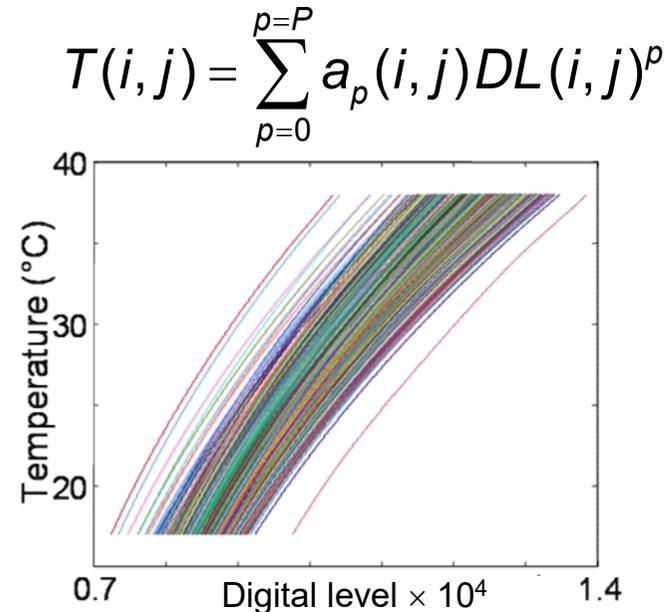
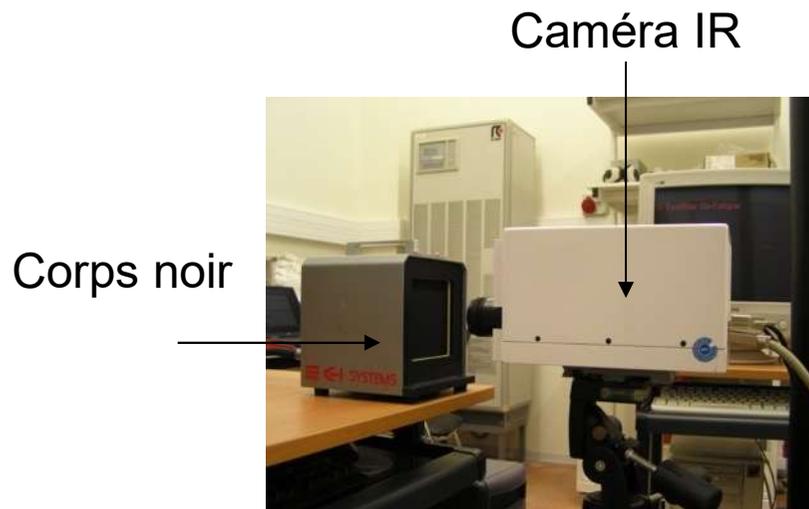


Nb pixels défectueux = 255, soit 0.29%
 $T_{cn} = 34^\circ \text{C}$

Etalonnage : laboratoire

Calibration pixel à pixel

- nécessité d' 1 corps noir plan (20 mK) + 30 k€ (+ 40-120 k€ de caméra !)
- stabilité thermique de la caméra (4-5 h) et de la salle d' essai ...
- étalonnage pixel à pixel (polynôme de degré 5)
- précision 20 mK et plus de remplacement de «bad pixel»
- à refaire dès que l' on modifie un paramètre (temps d' intégration, taille des images, objectif, ...)



Heat rate assessments

Heat equation averaged over the thickness of a thin, flat sample

$$\rho C \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + v_x \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \frac{\bar{\theta}}{\tau_{th}} \right) - k \left(\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2} \right) = \bar{W}_h$$

1980-90

- *Direct estimate of heat sources using noisy and discrete thermal data*
 - Image processing has evolved with the increasing performance of IR cameras
- *Estimate of the partial derivative operators*
 - mono-detector**
 - thermal data projection onto spectral solutions (1990)
 - CCD cameras**
 - convolutive filtering by DFT (2000)
 - local l.sq. fitting (2004)
 - POD: pre-filtering of thermal fields (1D : 2014 - 2D : 2017)



Main refs:
IJES : 2000
EXP-MECH : 2007
JoMMS : 2010
EXP-MECH : 2014
QIRT : 2017



2000-18

Ô temps ! suspend ton vol ...

1990, 28 ans déjà !!

caméra Agéma 880,
signal vidéo numérisé

2 image/s

IBM 80286

Dos 4.1 , DD 60 Mo

NETD : 200 mK

carte des températures

1 « point chaud »

$\theta = 3.5^\circ \text{ C}$

carte des sources de chaleur

2 fils chauffés par effet Joule

puissance : $3 \cdot 10^{-2} \text{ W}$

Photo d' écran, programmation turbo Pascal



Deux autres modèles thermiques bien commodes

Modèle 1D : intégration dans une section droite , échanges linéaires

$$\rho C \left(\dot{\bar{\theta}} + \frac{\bar{\theta}}{\tau_{th}^{1D}} \right) - k \Delta_x \bar{\theta} = \bar{w}_h \dot{}$$

Pour $\bar{\theta}$, on prend des thermo - profils moyennés suivant la largeur

$$\bar{\theta}_{jk} = \frac{1}{(M-m)} \sum_{i=m}^M \theta_{ijk}^{IR}$$

Modèle local 0D : _ distribution homogène de sources, utilisation de la solution spectrale pour des CL linéaires homogènes ; diffusion = problème différentiel

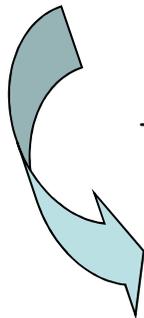
$$\rho C \left(\dot{\theta} + \frac{\theta}{\tau_{eq}} \right) = w_h \dot{}$$

Champs discrets et bruités de température

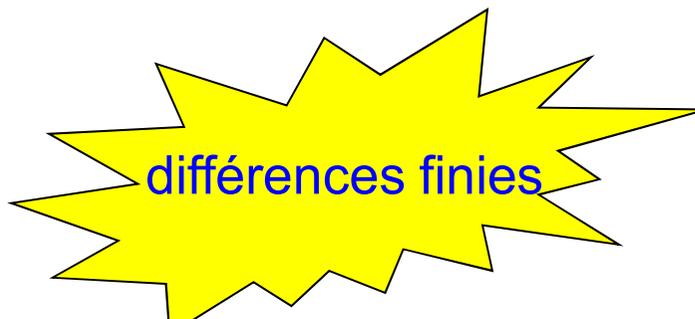
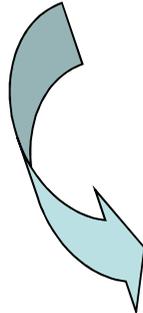
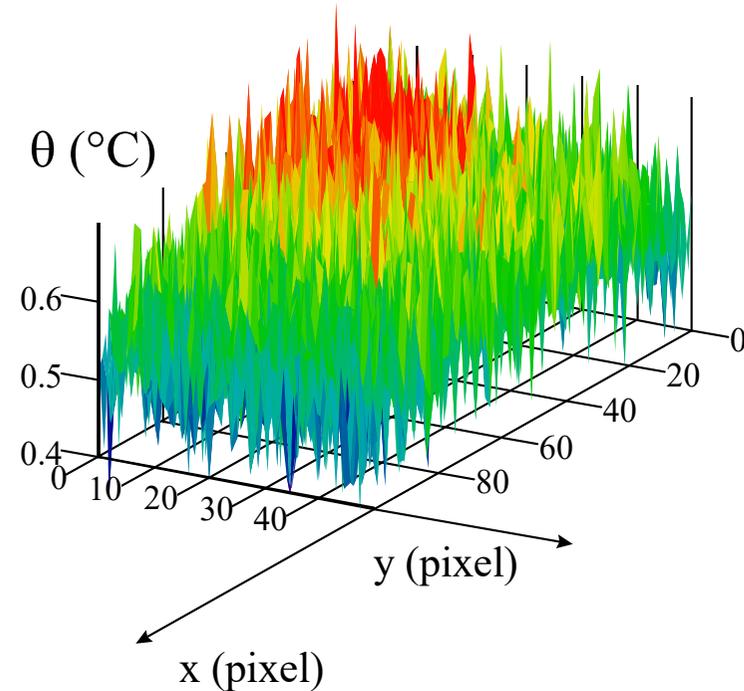
Bruit thermique

- spectre de puissance uniforme
- distribution de probabilité gaussienne

Calcul des sources


$$\frac{d}{dt}, \Delta_{x,y}$$

Amplification bruit (Δ surtout !!)



différences finies

Base spectrale et seuillage

Hyp: existence d' une solution spectrale

utilisation de
la **base spectrale**
de l' opérateur $-\Delta_{x,y}$:
expression de $f_k(x)$,
 $g_l(y)$, λ_k et μ_l

$$\Delta_{xy}\theta_{ap}(x,y) = \sum_{k=1}^{n_k} \sum_{l=1}^{n_l} a_{kl}(t)(\lambda_k + \mu_l)f_k(x)g_l(y)$$

$$\theta(x,y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} a_{kl}(t)f_k(x)g_l(y)$$

Fonctions propres orthogonales

$$\begin{aligned} -\Delta_x f_k(x) &= \lambda_k f_k(x) \\ -\Delta_y g_l(y) &= \mu_l g_l(y) \end{aligned}$$



calcul du laplacien



$$\theta_{ap}(x,y) = \sum_{k=1}^{n_k} \sum_{l=1}^{n_l} a_{kl}(t)f_k(x)g_l(y)$$

Approximation de θ_{mes}
calcul des a_{kl} par projection

Points délicats :

- calcul numérique-analytique des vvp,
- calcul numérique des projections (a_{kl}) : très long, calcul d' intégrales ...
- méthode limitée au 1D ou 2D stationnaire

Filtrage convolutif « passe-bas »

signal mesuré : θ_{mes}

TFD :

- Shannon
- périodisation

$$\begin{aligned}\Delta_{xy}\theta_{\text{filtr}} &= \text{TFD}^{-1}(\text{TFD}(\theta_{\text{mes}}).\text{TFD}(\Delta_{xy}\phi)) \\ &= (\theta_{\text{mes}} * \Delta_{xy}\phi)\end{aligned}$$

calcul du laplacien

$\text{TFD}(\theta_{\text{mes}})$



Choix du filtre ϕ

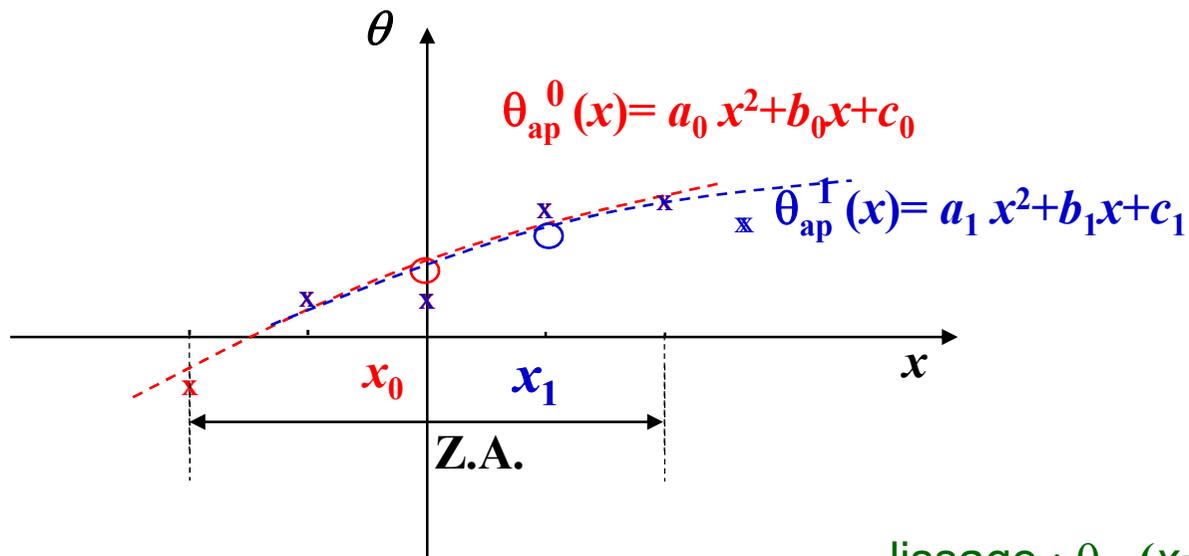
$$\begin{aligned}\theta_{\text{filt}} &= \text{TFD}^{-1}(\text{TFD}(\phi).\text{TFD}(\theta_{\text{mes}})) \\ &= \theta_{\text{mes}} * \phi\end{aligned}$$

Points délicats :

- choix du filtre : (fréquence de coupure f_c)
- périodisation : temps CPU long

Lissages locaux

Approximation locale du champ de températures



- lissage : $\theta_{lis}(x=x_0) = a_0 x_0^2 + b_0 x_0 + c_0$

- dérivation : $\Delta_x \theta_{lis}(x=x_0) = 2 a_0$

Points délicats :

- choix des paramètres :
 - type de fonction d'approximation
 - zone d'Approximation

Proper Orthogonal Decomposition ... some words

- **POD applications:** model order reduction, turbulence models, data compression, ...
Hotelling (1933), Karhunen (1946), Loève (1955)
- **Interest:** to approximate a high dimension system by another one of significantly smaller size
to determine a basis of orthogonal modes representative of the “most likely accomplishments”

- **Thermal images:**

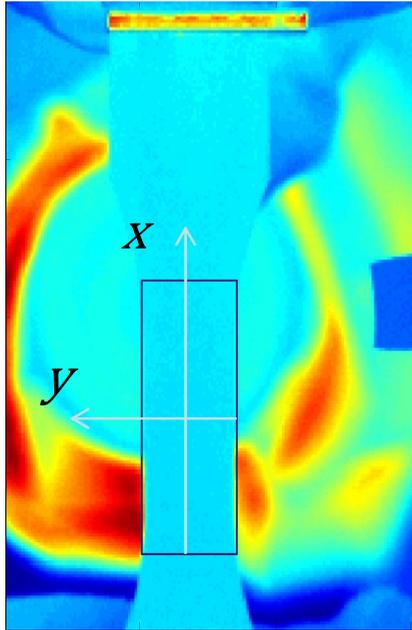
$$\vartheta(x_i, y_j, t_k) \simeq \sum_{p=1}^P a_p(t_k) \Phi_p(x_i, y_j)$$

where $\Phi_p(x_i, y_j)$ components of the POM, eigen “vector” of the “snapshots” matrix

$$A = \Theta \Theta^T$$

$$A \tilde{\Phi}_p = \omega_p \tilde{\Phi}_p$$

Benchmark test: a penalizing case



- 2D heat diffusion problem (averaged over the thickness)

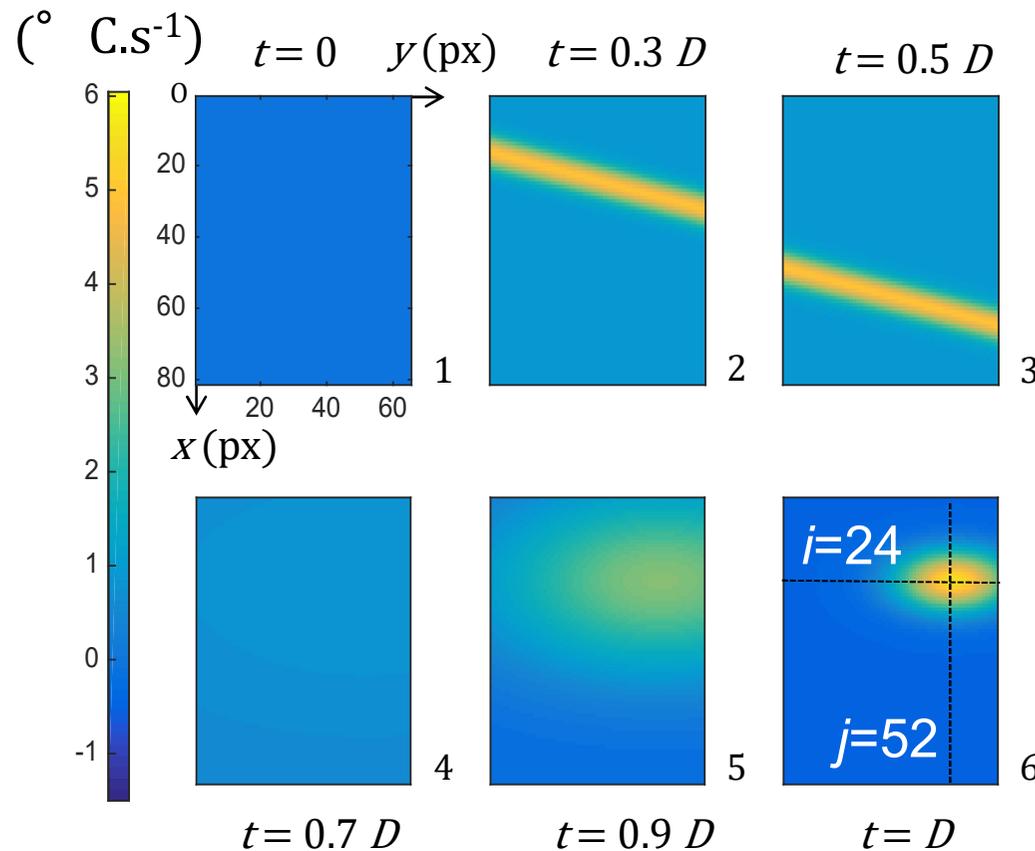
$$\begin{cases} \rho C \left(\frac{\partial \bar{\vartheta}_i(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\bar{\vartheta}_i(x, y, t)}{\tau_{th}^{2D}} \right) - k_c \left(\frac{\partial^2 \bar{\vartheta}_i(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\vartheta}_i(x, y, t)}{\partial y^2} \right) = \bar{s}^h(x, y, t), \\ \frac{\partial \bar{\vartheta}_i}{\partial x} \left(\pm \frac{L}{2}, y, t \right) = \mp \lambda_x \bar{\vartheta}_{i \pm \frac{L}{2}} \left(\pm \frac{L}{2}, y, t \right), \quad \frac{\partial \bar{\vartheta}_i}{\partial y} \left(x, \pm \frac{l}{2}, t \right) = \mp \lambda_y \bar{\vartheta}_{i \pm \frac{l}{2}} \left(x, \pm \frac{l}{2}, t \right) \\ \bar{\vartheta}_i(x, y, 0) = 0 \end{cases}$$

- Domain : $-L/2 \leq x \leq L/2, -l/2 \leq y \leq l/2, 0 \leq t \leq D$

- Material of high thermal diffusivity (pure copper : $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)
- High longitudinal heat exchange coefficient ($\lambda_x = 170 \text{ W/m/K}$)
- Noise superimposition (rnd / $\delta\theta = 70 \text{ mK}$)
- Complex heat source distribution ...

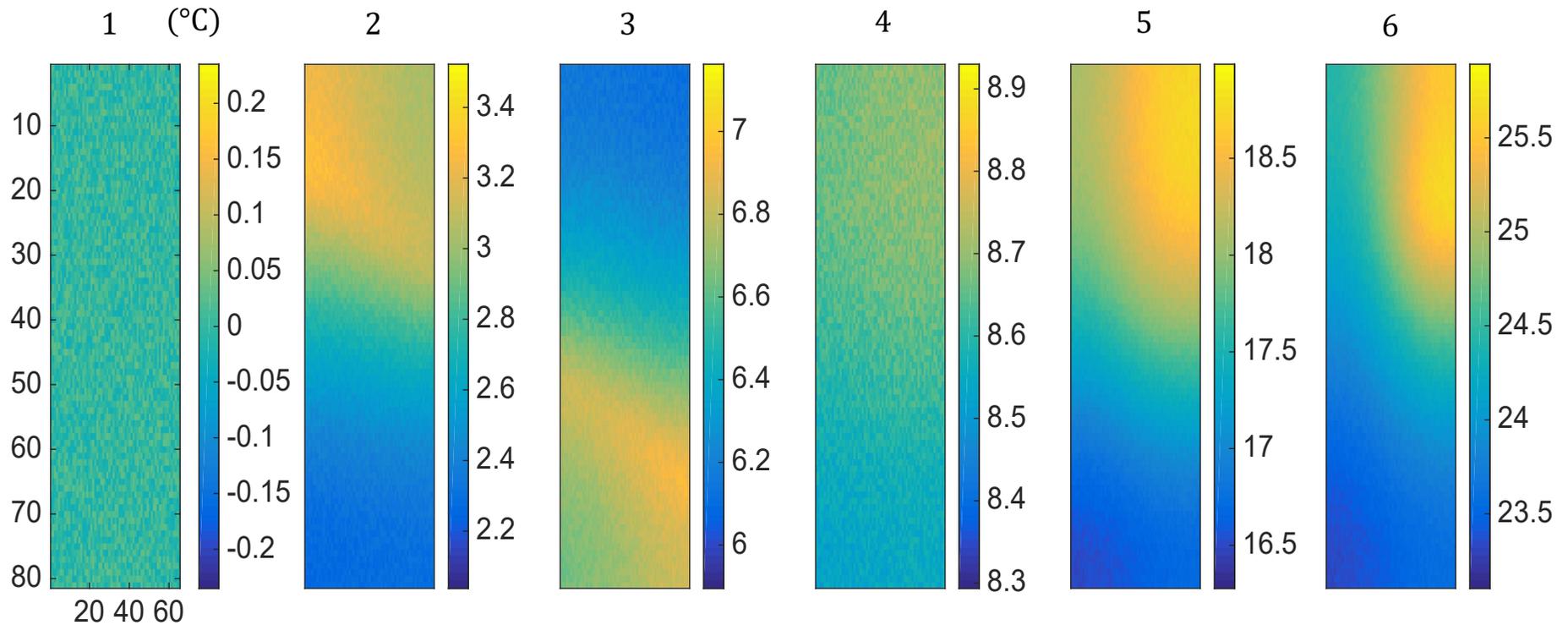
Heat source fields

- $0 \leq t \leq D$ $\bar{s}^{the} = s_0^{the} \sin(2\pi f_L t)$ cyclique coupling source
- $0.1 D \leq t \leq 0.6 D$ $\bar{s}_L^{dis} = s_L^0 \exp(-a_L [x - p_L y - v_L(t - t_L^0)]^2)$ Lüders' band
- $0.6 D \leq t \leq D$ $\bar{s}_N^{dis} = s_N^0 \tilde{t}^2 \exp(-a_N r^2(x, y) / [1 - \alpha_N \tilde{t}])$ localization



	s^{the}	$(s^{dis})_L$		$(s^{dis})_N$	
s_0^{the}	1	s_L^0	4	s_N^0	6
f_L	0.05	a_L	$3e^{-3}$	a_N	$6.25 e^{-6}$
		p_L	0.25	a_N	10^{-4}
		t_L^0	120		

Noisy temperature fields



$$\bar{\vartheta}_r = \bar{\vartheta}_i + N_g$$

- Peak-to-peak signal noise $N_g = 70$ mK
- Regularizing effect of heat diffusion

Lifting of the heat diffusion problem

$$\bar{\vartheta}_r \quad \bar{\vartheta}_s + \bar{\vartheta}_\ell = \bar{\vartheta}_i + N_g = \bar{\vartheta}_r$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C \left(\frac{\partial \bar{\vartheta}_\ell(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\bar{\vartheta}_\ell(x, y, t)}{\tau_{th}^{2D}} \right) - k_c \left(\frac{\partial^2 \bar{\vartheta}_\ell(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\vartheta}_\ell(x, y, t)}{\partial y^2} \right) = 0 \\ \bar{\vartheta}_\ell \left(\pm \frac{L}{2}, y, t \right) = \bar{\vartheta}_r \left(\pm \frac{L}{2}, y, t \right), \quad \bar{\vartheta}_\ell \left(x, \pm \frac{l}{2}, t \right) = \bar{\vartheta}_r \left(x, \pm \frac{l}{2}, t \right), \\ \bar{\vartheta}_\ell(x, y, 0) = 0, \end{array} \right.$$

$$\bar{\vartheta}_\ell \longrightarrow \bar{\vartheta}_s$$

$$\bar{\vartheta}_s = \bar{\vartheta}_r - \bar{\vartheta}_\ell$$

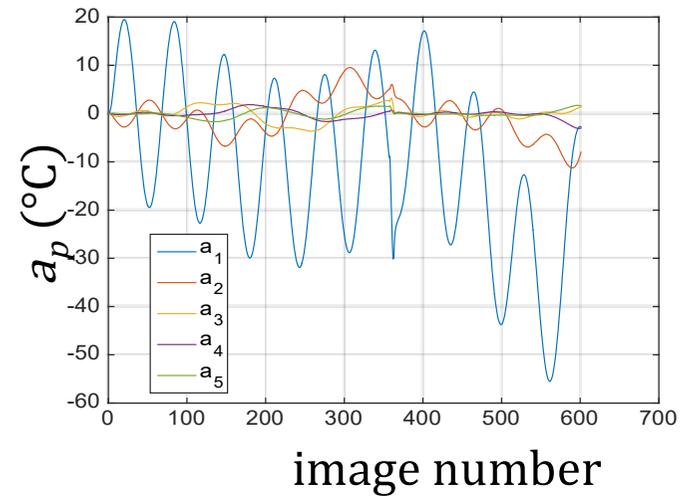
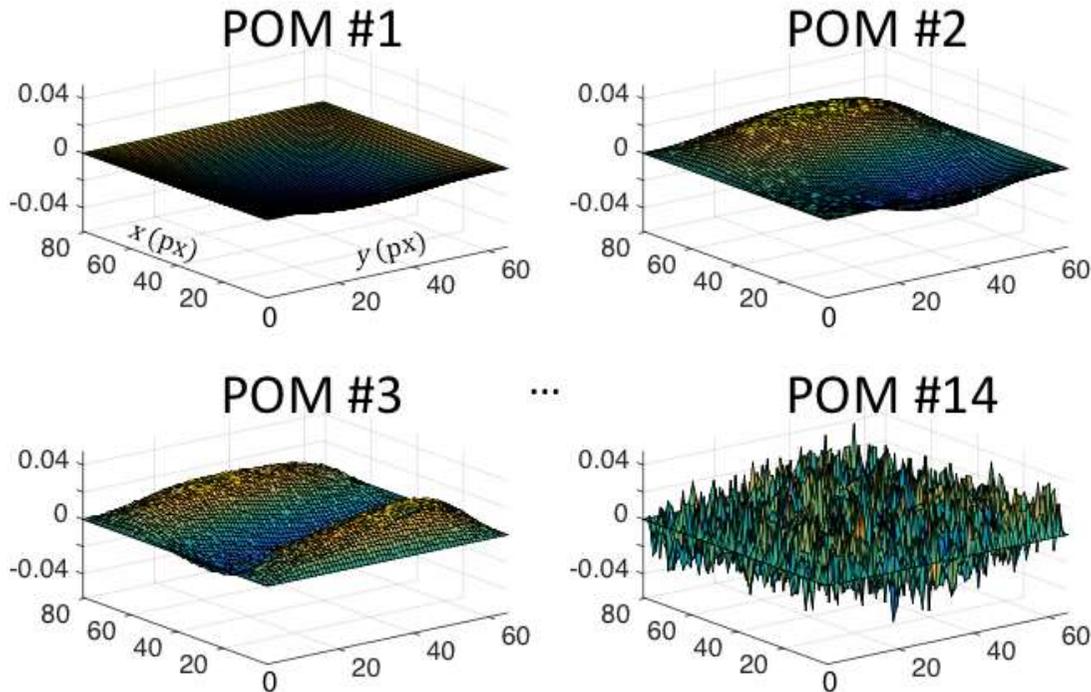
$$\left\{ \begin{array}{l} \rho C \left(\frac{\partial \bar{\vartheta}_s(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\bar{\vartheta}_s(x, y, t)}{\tau_{th}^{2D}} \right) - k_c \left(\frac{\partial^2 \bar{\vartheta}_s(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\vartheta}_s(x, y, t)}{\partial y^2} \right) = \bar{s}^h(x, y, t), \\ \bar{\vartheta}_s \left(\pm \frac{L}{2}, y, t \right) = 0, \quad \bar{\vartheta}_s \left(x, \pm \frac{l}{2}, t \right) = 0, \\ \bar{\vartheta}_s(x, y, 0) = 0, \end{array} \right.$$

POD of $\bar{\vartheta}_s$ data

First POMs and components

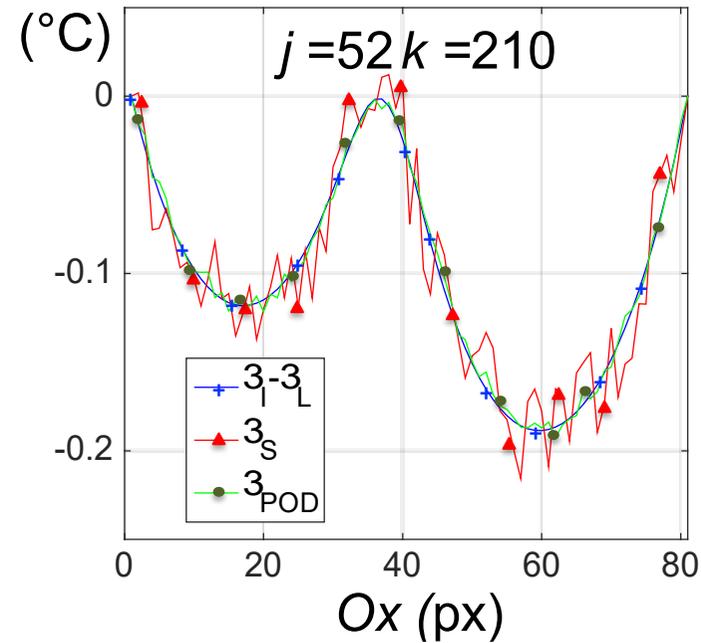
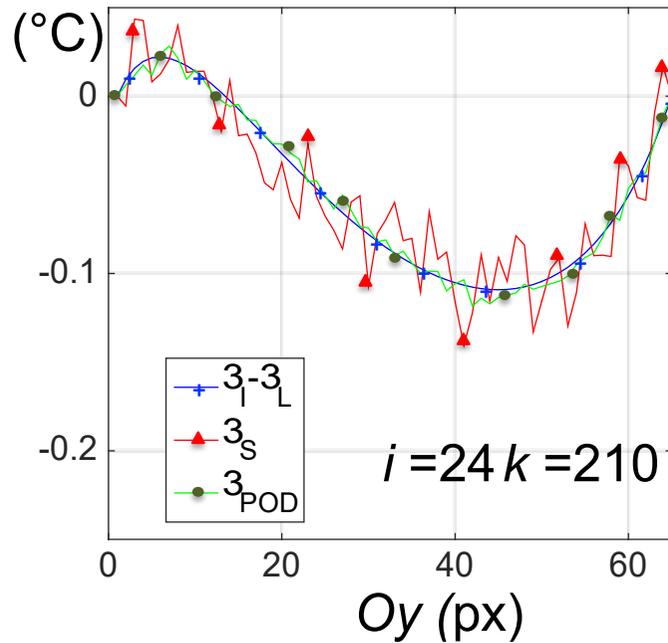
$$A\tilde{\Phi}_p = \omega_p \tilde{\Phi}_p$$

$$\vartheta_{POD}(x_i, y_j, t_k) \simeq \sum_{p=1}^P a_p(t_k) \Phi_p(x_i, y_j)$$



Examples of thermo-profile

- number of POMs = 14
- $Ng = 0.07 \times (\text{rnd}_{ij} - 0.5)$



- reduction of the noise amplitude
- curvature preservation

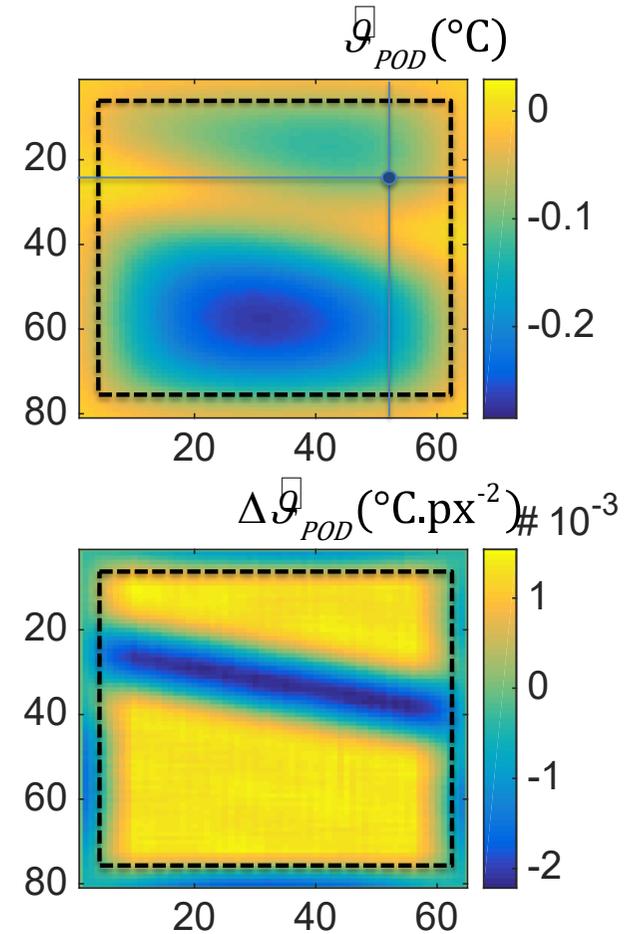
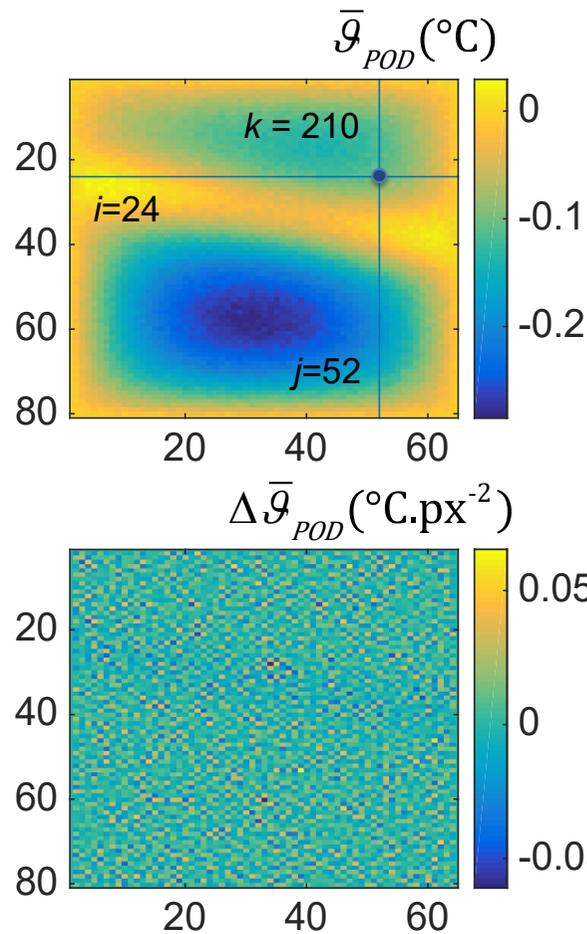
Laplacian operator estimates

- direct computation using a finite difference method

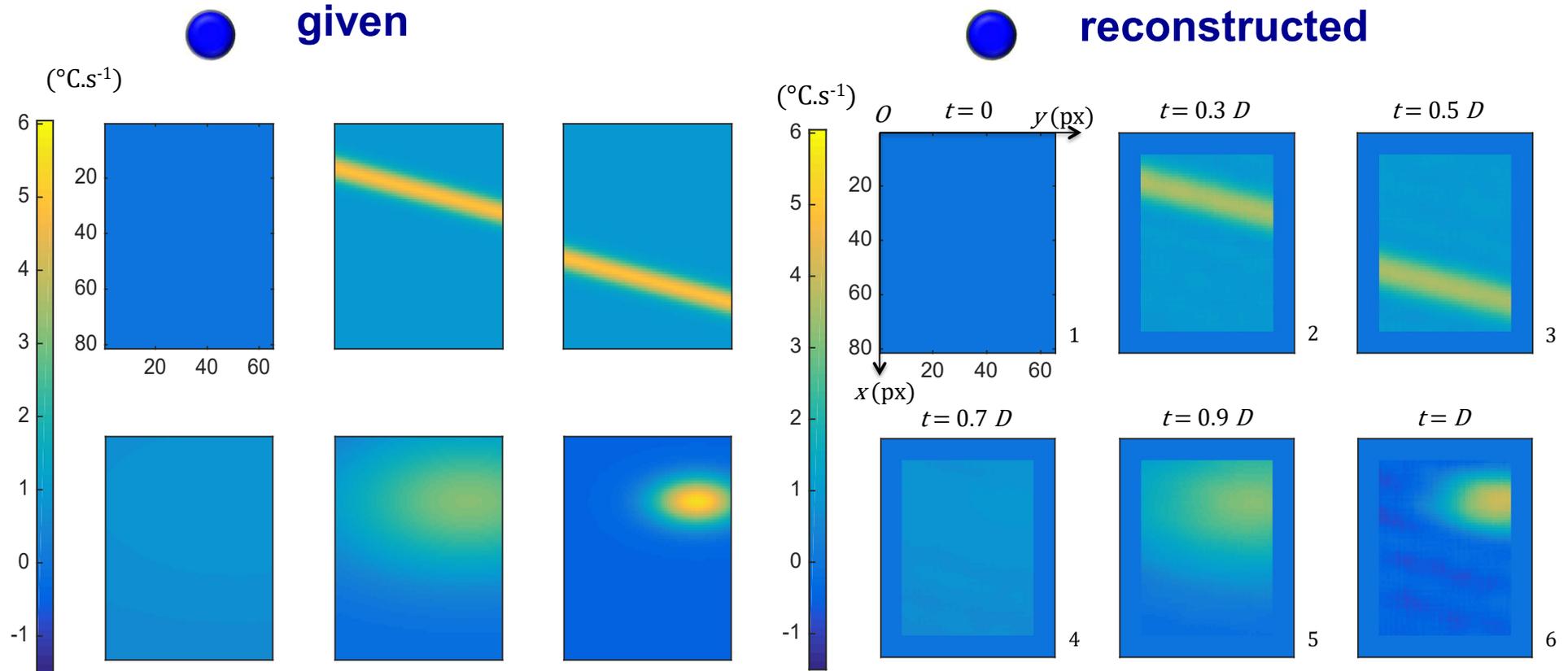
- «slight» 2D convolutive filtering prior to a finite difference computation

Remember !

- High diffusivity
- Poor SNR
- Complex HS Distribution



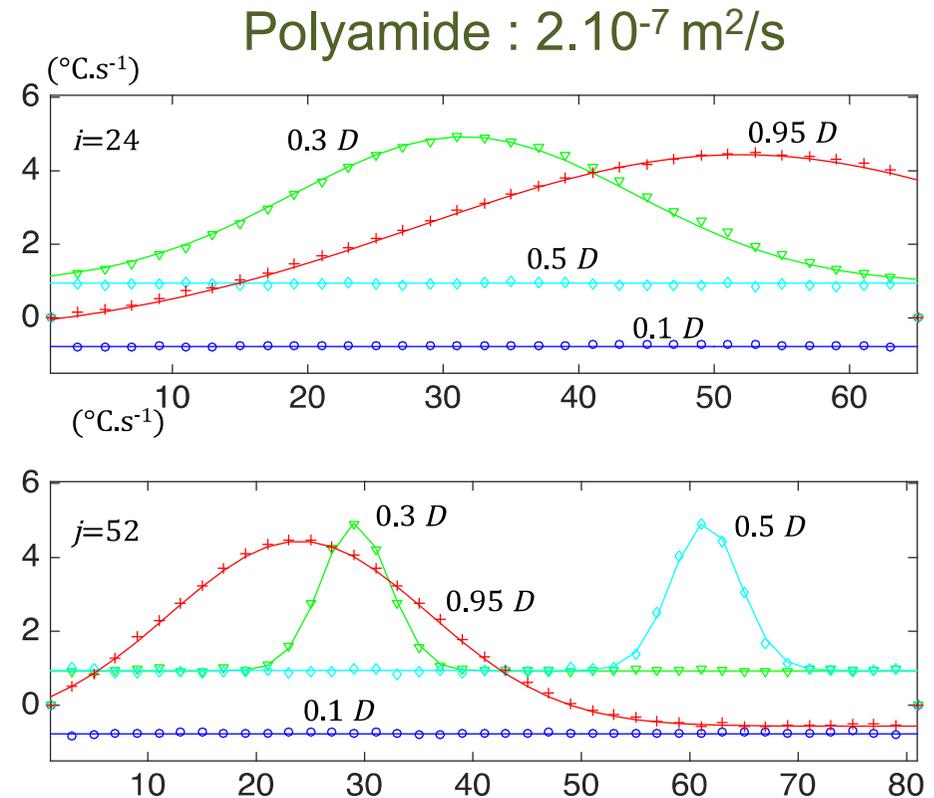
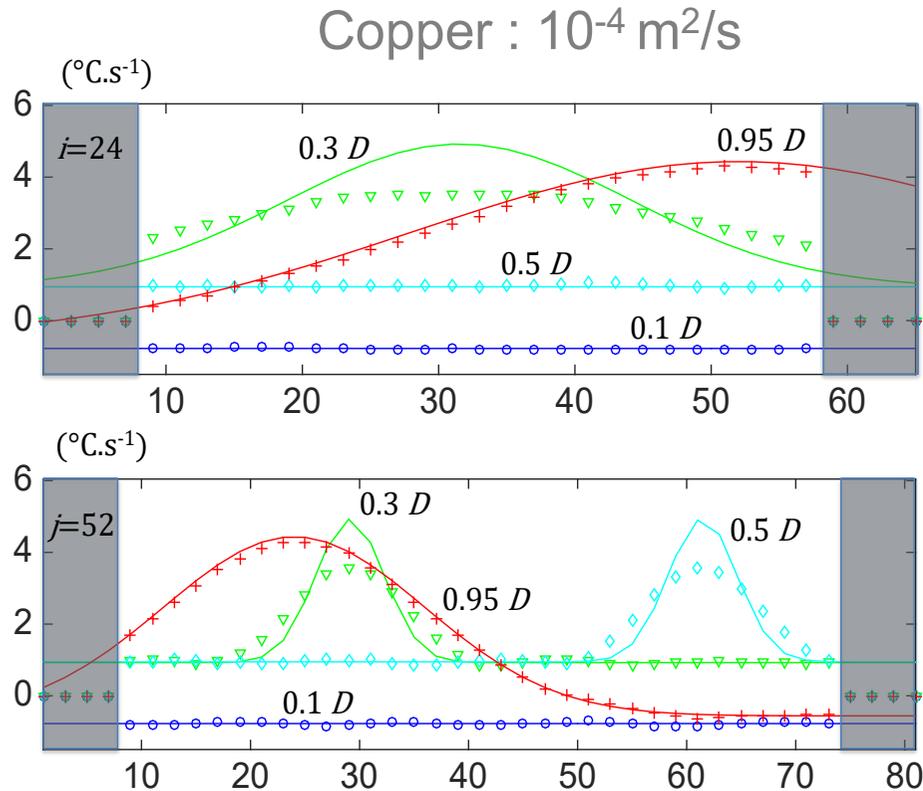
Heat source fields



- filtering induces a slight crushing of thermoprofiles
- and thus a spreading of sources
- loss of part of the HS field due to zero-padding

Heat source profiles

continuous lines : given sources ; symbols : reconstructed sources



● High diffusivity : Slight spreading of HS concentration due to filtering!

● Low diffusivity : POD directly used. Direct estimates using FD!

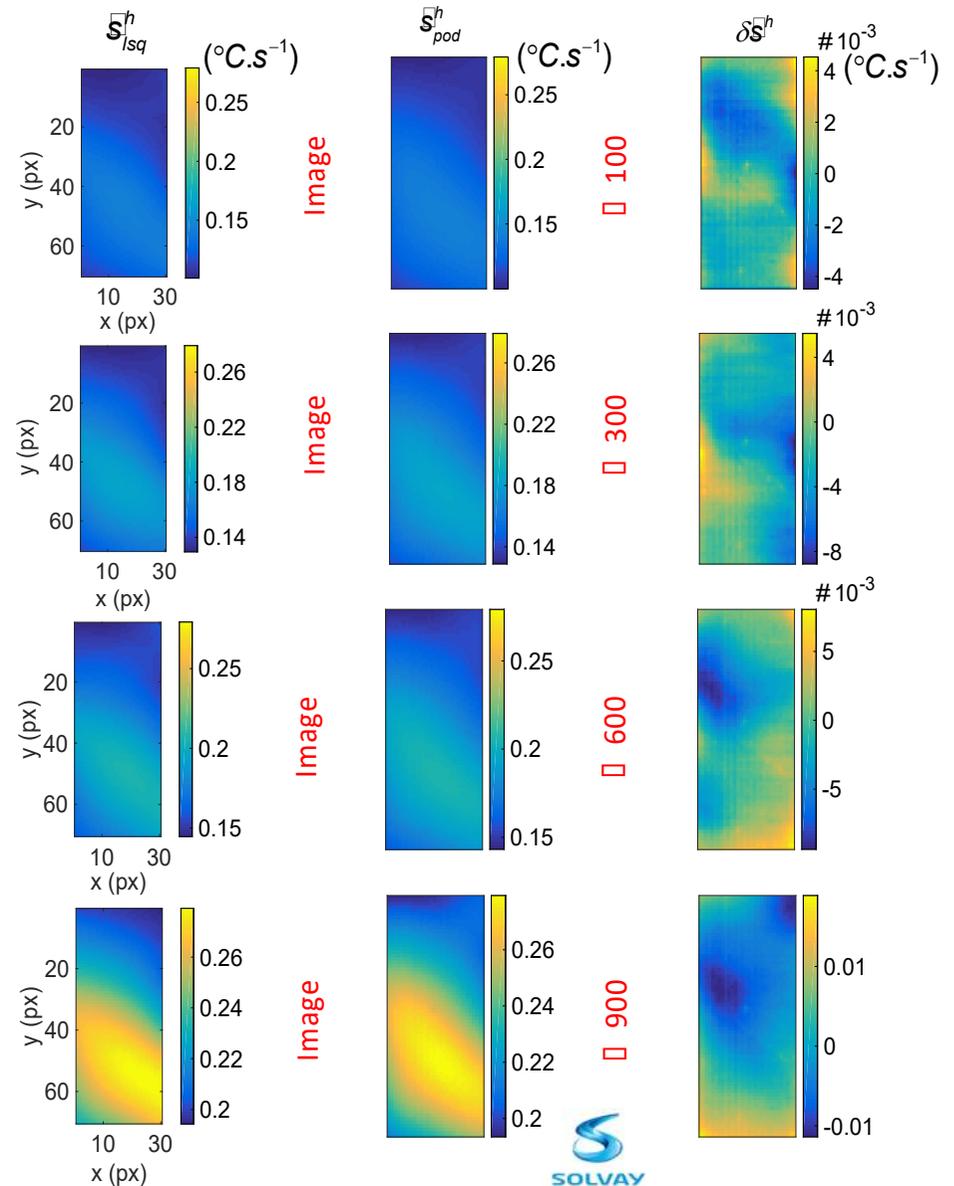
LSQ vs. POD

- Fatigue test on short glass fiber reinforced PA 6.6
 $R_\sigma = 0.1$, $f_L = 10$ Hz
 Mean dissipation per cycle

- LSQ vs. POD : low mismatch!
 $|\delta s| \leq 10^{-2} \text{ } ^\circ \text{C.s}^{-1}$

- JACKPOT : CPU times !
 POD/LSQ $\approx 10^{-3}$!
 Data : 60 Go

- 3 months \rightarrow 1 hour
 PC: Intel Core i7 2.5 GHz processor
 RAM: 16 GB



Exemples illustratifs

Effets thermiques, effets dissipatifs et de couplage

- ✧ Thermoélasticité
- ✧ Thermo-élasto-plasticité des métaux
- ✧ Pseudoélasticité des AMF
- ✧ Thermo vs. visco. élasticité (DMA)
- ✧ Fatigue à grand nombre de cycles des aciers

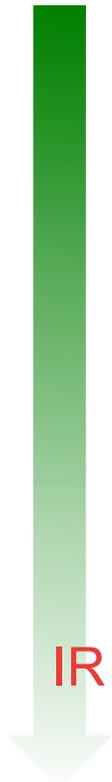
Thermoélasticité

Gough 1805, Joule 1857, Lord Kelvin, 1880

Techniques microcalorimétriques



William Thomson
Lord Kelvin (1824-1907)

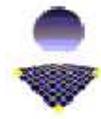


....
+ de 100
ans après

...

IR thermography

[90-00]



Essai cyclique (domaine "thermoélastique")

$R = 0$, $\Delta\sigma = 360$ MPa , fréquence = 1 Hz

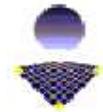
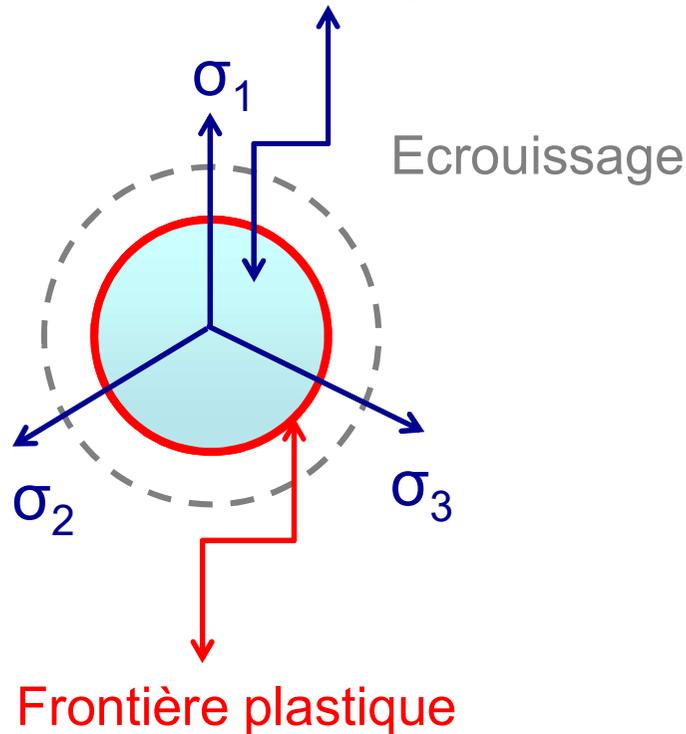
Matériau : acier pour emboutissage

Equipe Thermomécanique des Matériaux
Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil - UMR 5508
Université Montpellier II

Matériaux thermo-élasto-plastique

Taylor-Quinney 1933

Domaine « élastique »



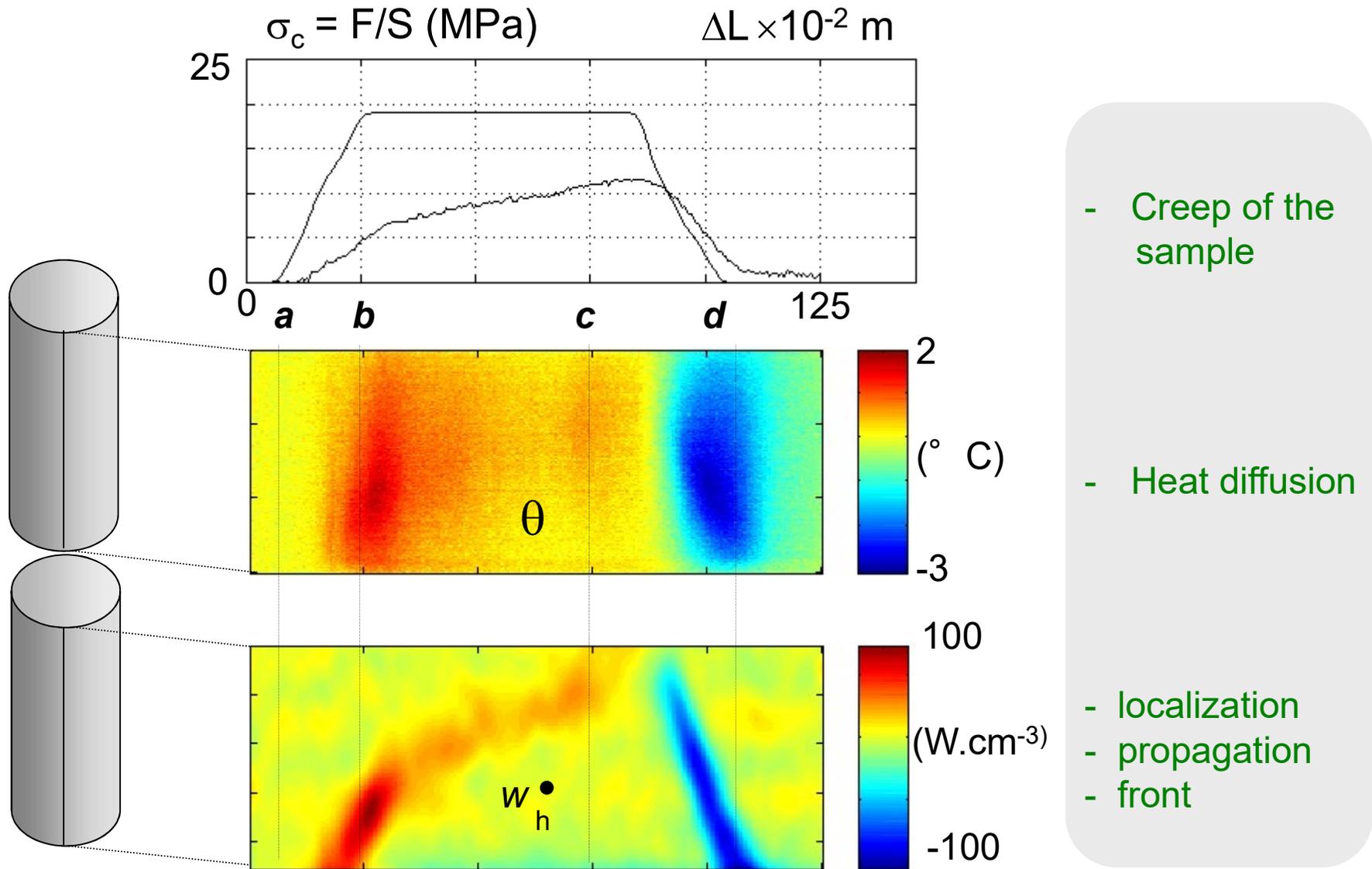
Essai de traction ondulée

$$|\dot{\sigma}| = 40 \text{ MPa.s}^{-1}$$

Matériau : acier pour emboutissage

Equipe Thermomécanique des Matériaux
Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil - UMR 5508
Université Montpellier II

Pseudo-élasticité des AMF (transformation de phase)

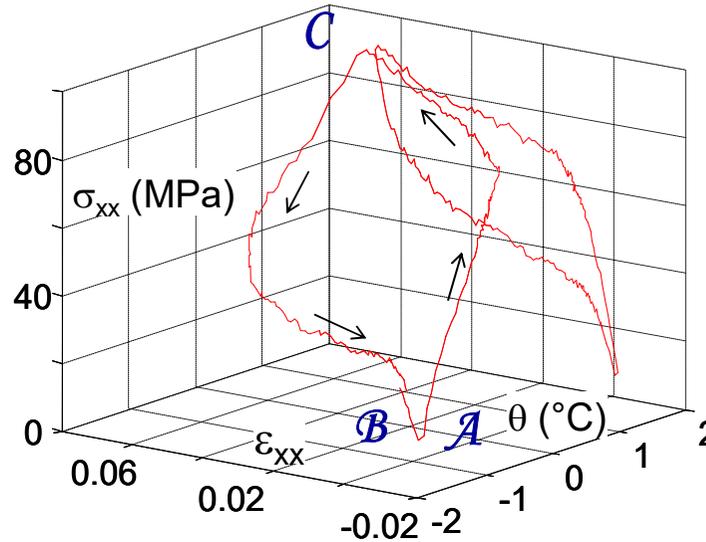


Energy balance for "pseudoelastic" SMA

$$\mathcal{A}_h \approx 1,9 \text{ MJ.m}^{-3}$$

$$w_{\text{def}}]_{\mathcal{A}}^{\mathcal{C}} = 4,9 \text{ MJ.m}^{-3}$$

$$w_h]_{\mathcal{A}}^{\mathcal{C}} = 28 \text{ MJ.m}^{-3}$$



$$R_M = \frac{\mathcal{A}_h}{w_{\text{def}}} \approx 0,39$$

$$0 \leq R_T = \frac{\oint w_h \cdot d\tau}{\oint |w_h| \cdot d\tau} \approx 0,026 \leq 1$$

CuAlBe

specimen response (macroscale)

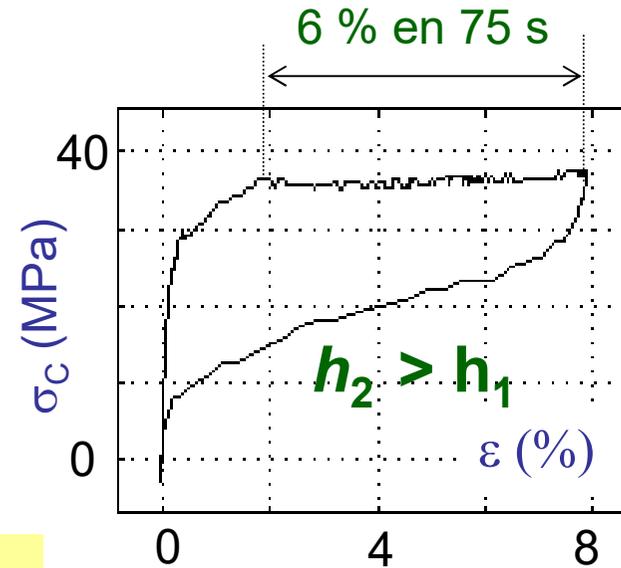
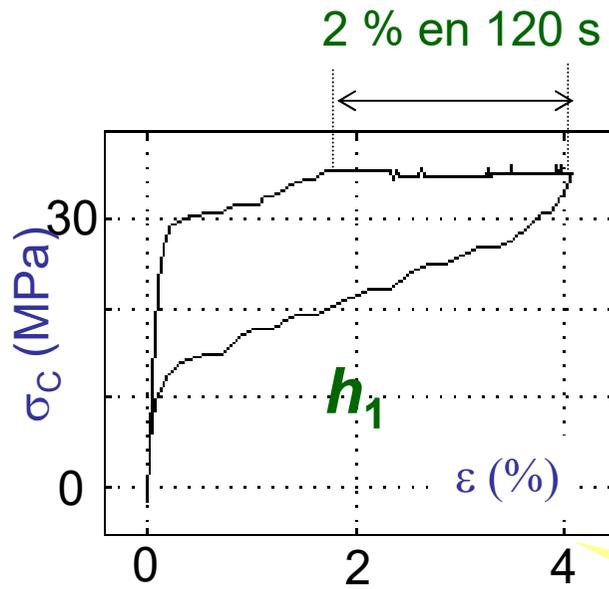
[S. Vigneron, PhD 09]

$R_T = 0$ non dissipative (intrinsically) + isothermal or adiabatic process

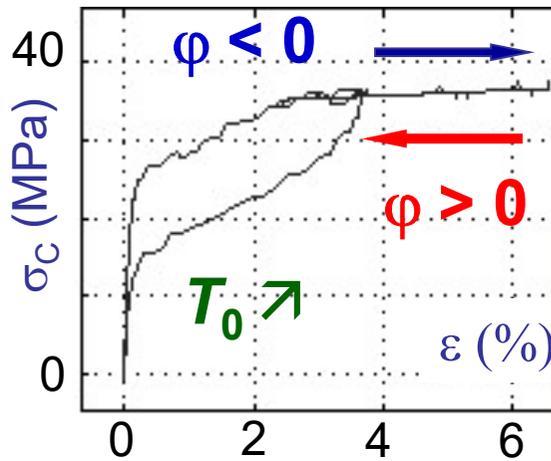
$R_T = 1$ purely dissipative (intrinsically) process without any coupling effect

strong thermomechanical couplings

Effets du temps et de structure dans les AMF



$$\varphi = -h (T - T_0)$$

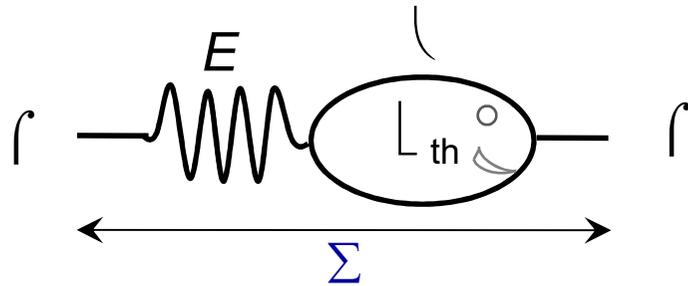


creep + hysteresis
 (≠ viscosity !!)
 coupling + heat diffusion

Creep due to heat diffusion
 Inversion of heat flux :
 « reverse creep »
 dependent behavior

Thermo. vs. visco. élasticité

Couplage thermomélastique (i.e. $d_1=0$)
couplage fort



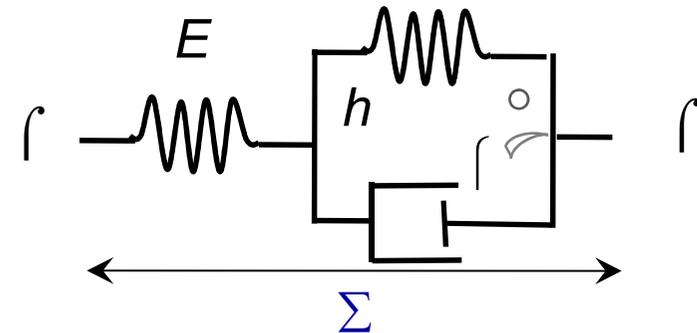
variables d'état (λ, Σ)

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \lambda_{th} \theta \\ \dot{\theta} + \frac{\theta}{\tau_{th}} = -\frac{E\lambda_{th}(T_0 + \theta)\dot{\varepsilon}}{\rho_0 C_0} \end{cases}$$

équation rhéologique

$$\sigma + \tau_{th} \dot{\sigma} \approx E\varepsilon + E\tau_{th}(1 + \chi)\dot{\varepsilon}$$

Processus dissipatif visqueux
couplage faible



variables d'état (Σ, Σ_v)

$$\begin{cases} \sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_v) \\ \sigma = h\varepsilon_v + \mu \dot{\varepsilon}_v \end{cases}$$

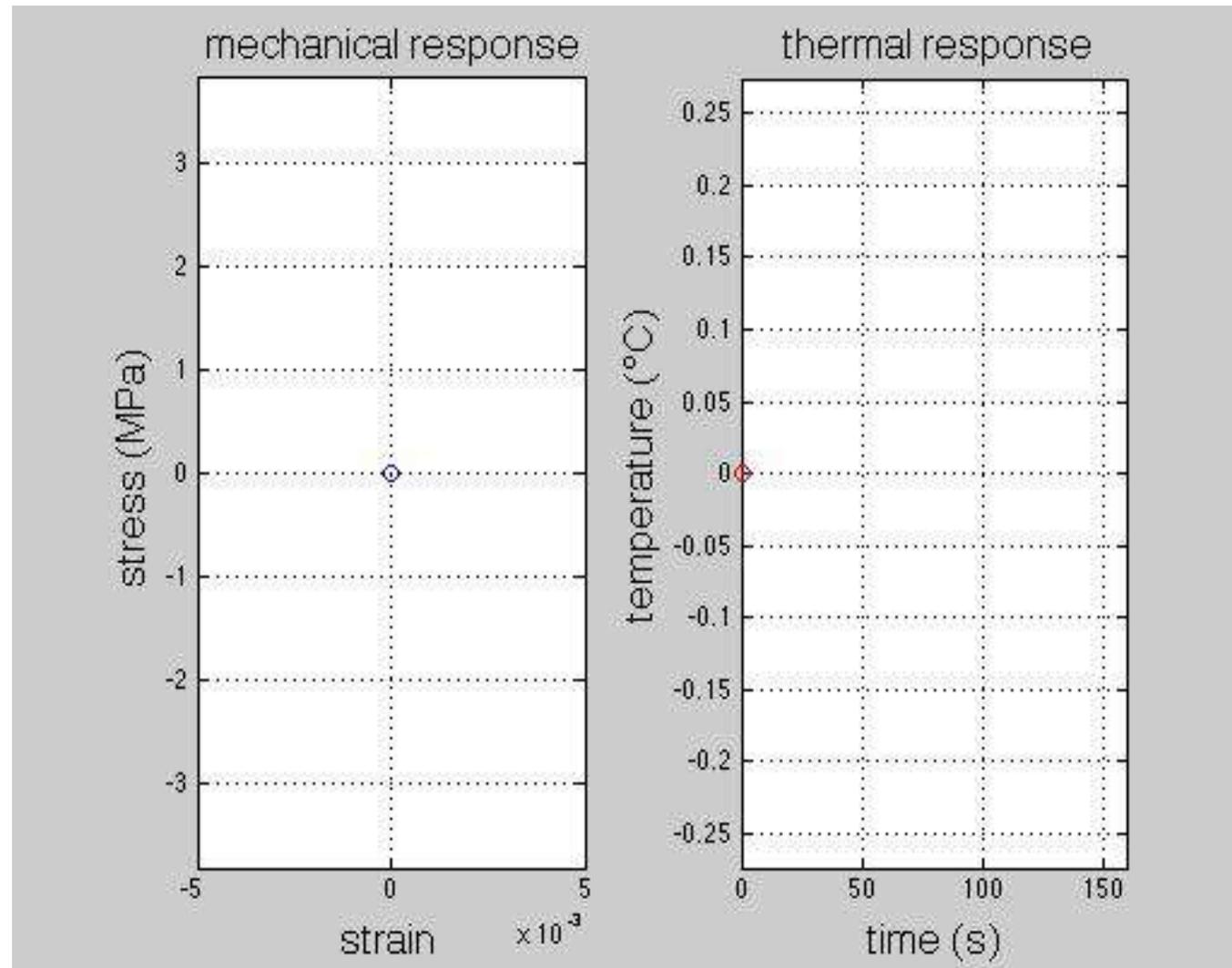
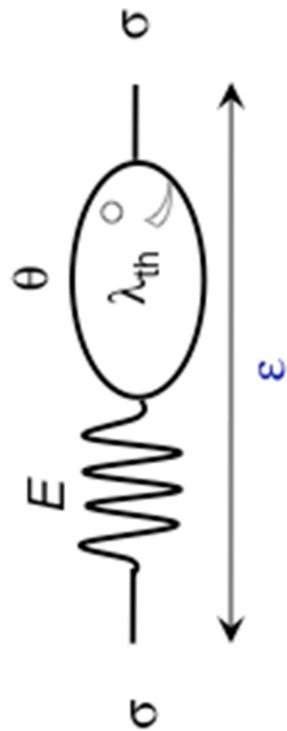
équation rhéologique

$$\sigma + \frac{\mu}{E+h} \dot{\sigma} = \frac{Eh}{E+h} \varepsilon + \frac{E\mu}{E+h} \dot{\varepsilon}$$

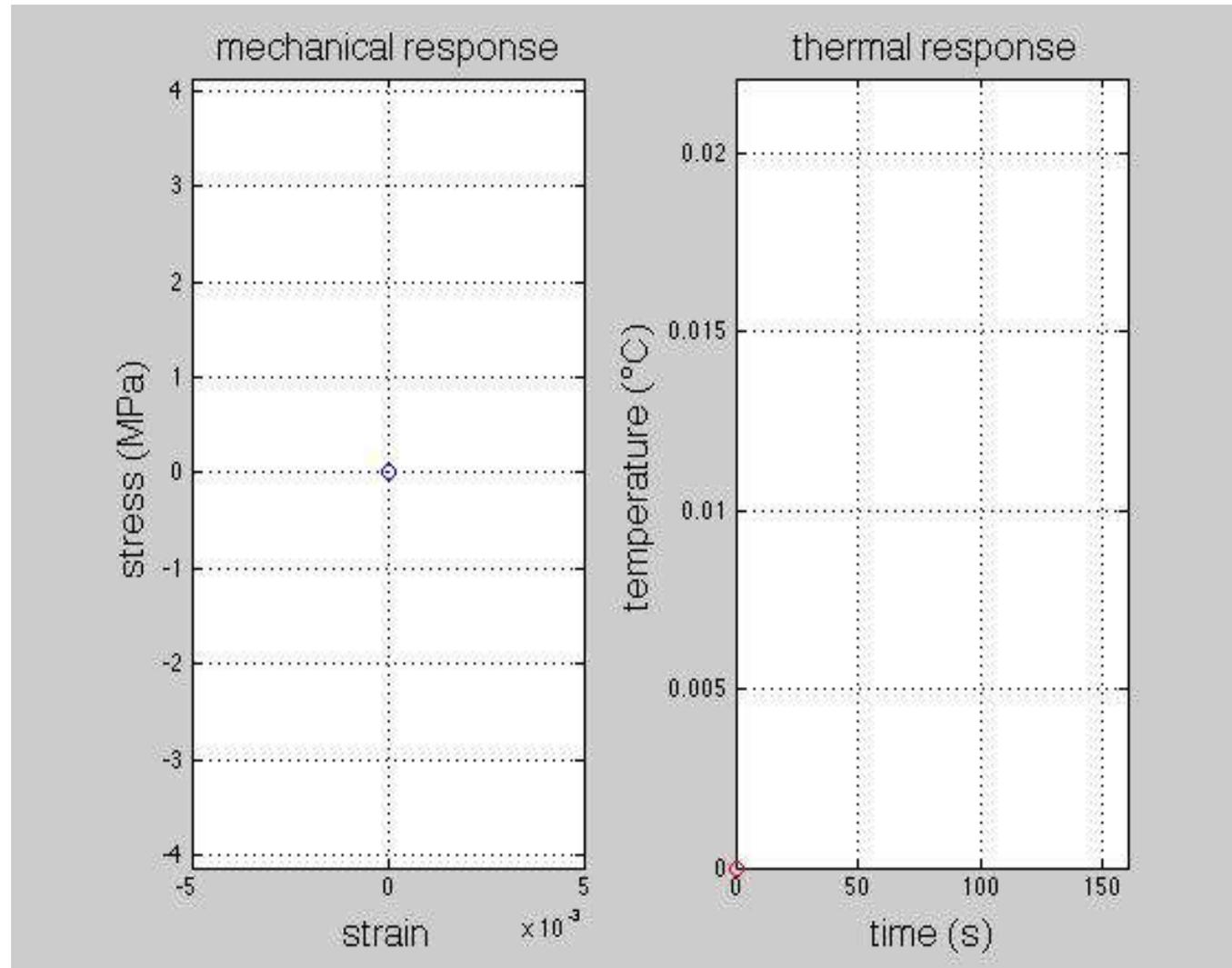
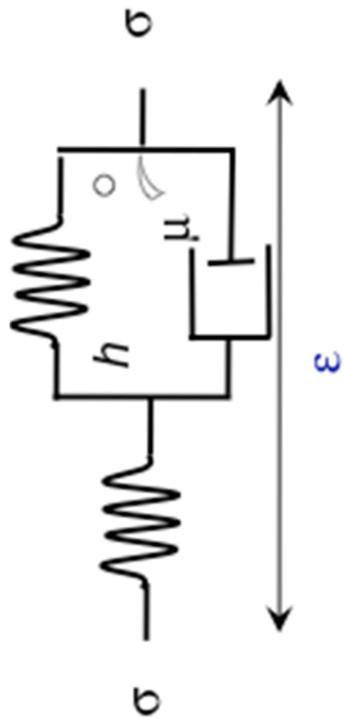


Visco-analyse de polymère (DMA)

Effets thermoélastiques : couplage fort



Effets visqueux : couplage faible

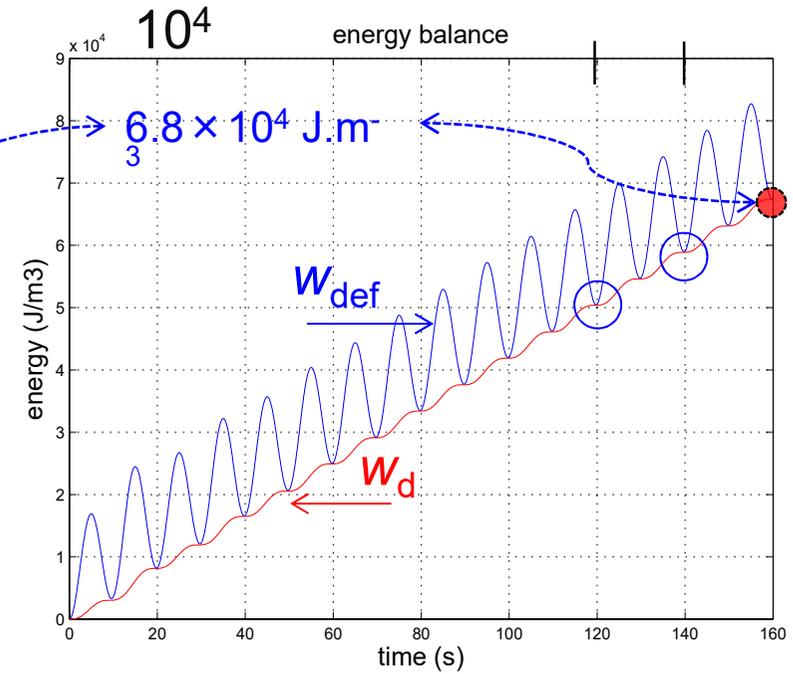
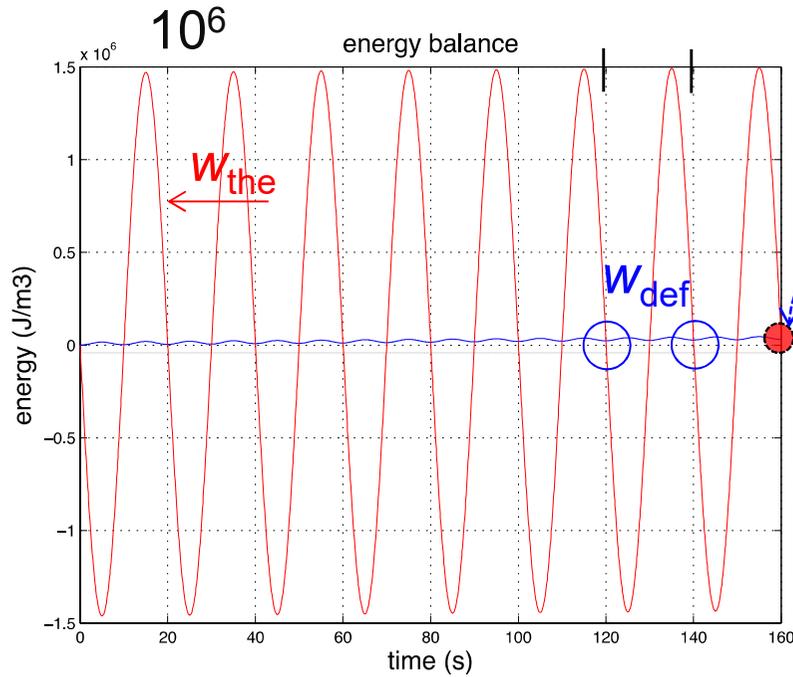


Comparaison des bilans d'énergie

Thermoélasticité

vs.

Viscoélasticité



$$\Delta W_{the} \gg \Delta W_{def}$$

Δ = étendues

$$W_d \leq W_{def}$$

$$W_{the} = W_{def}$$

$$W_d = W_{def}$$

Viscoelasticity vs. thermoelastic coupling

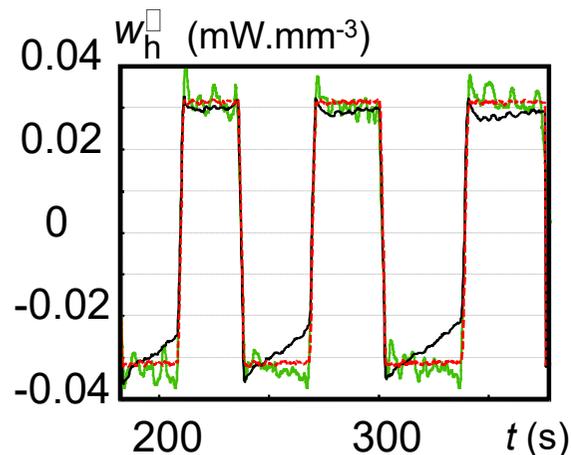
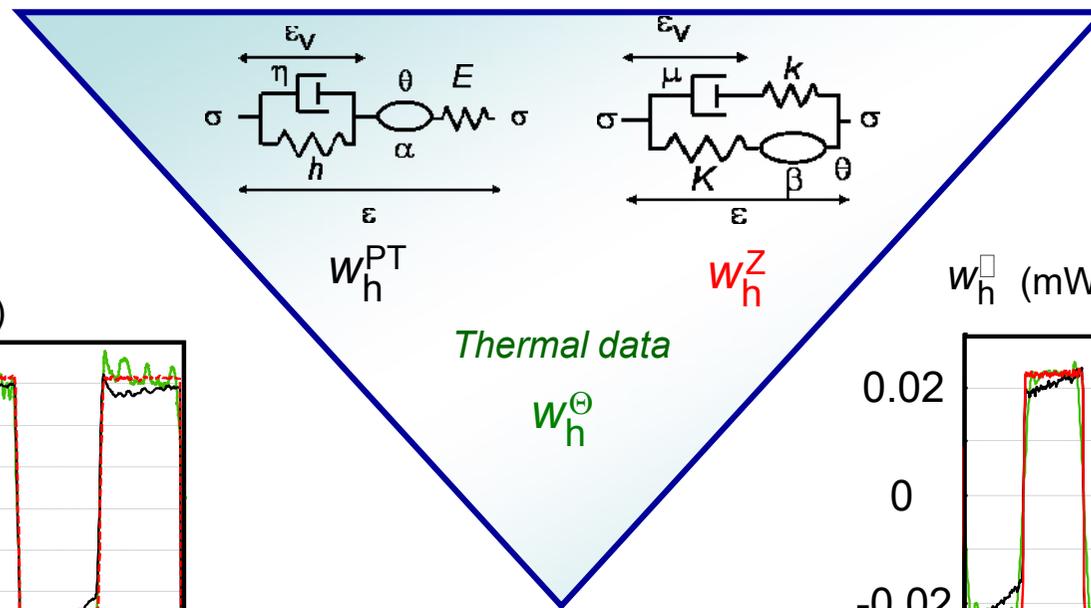
Isothermal linear viscoelasticity : J. Alfrey (48), M. Biot (65), F. Sidoroff (70-75)

Equivalence of series and parallel models (e.g. P.T. and Z. models)

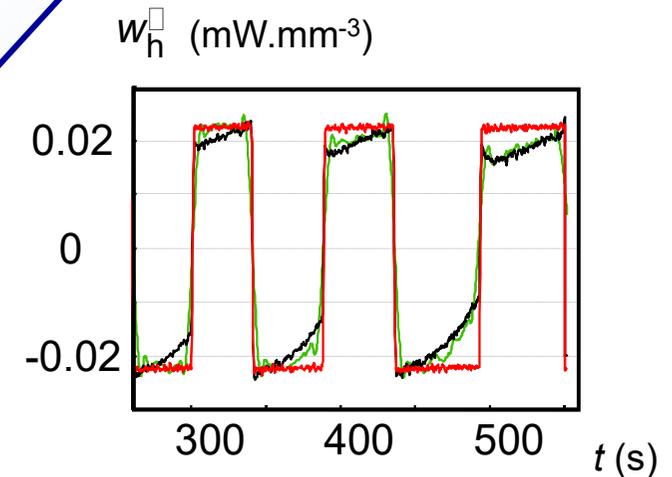
Introduction of thm couplings



[S. Moreau, PhD 03] PMMA, PC



PMMA : Zener wins !

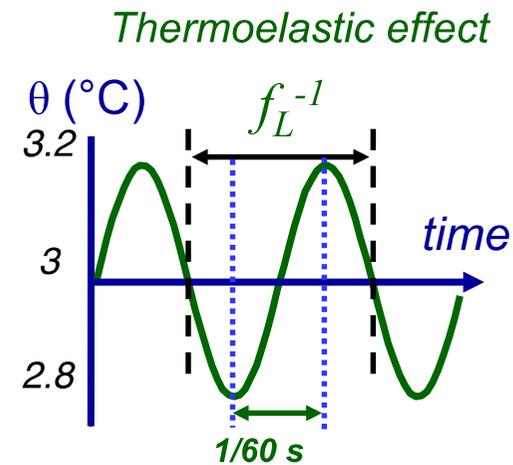
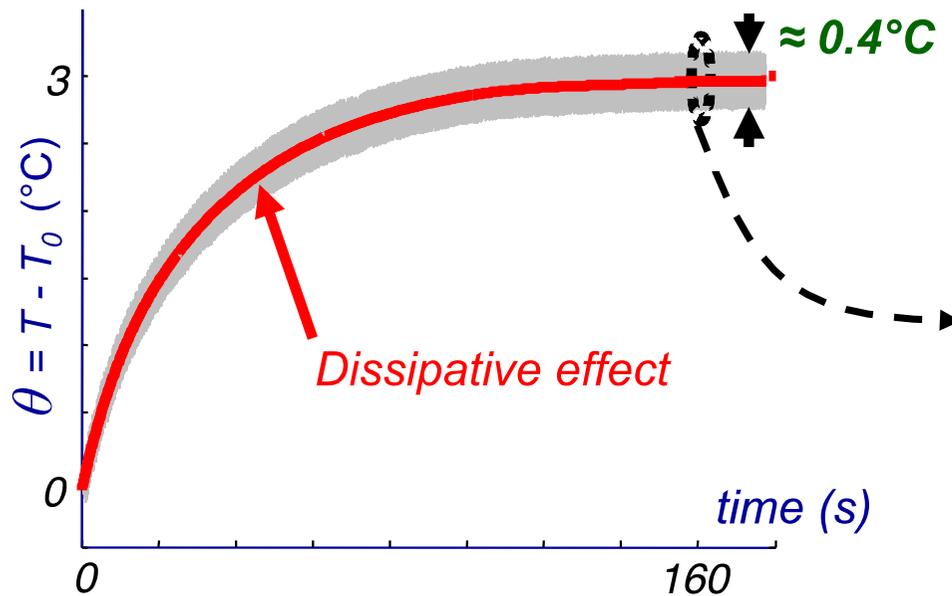
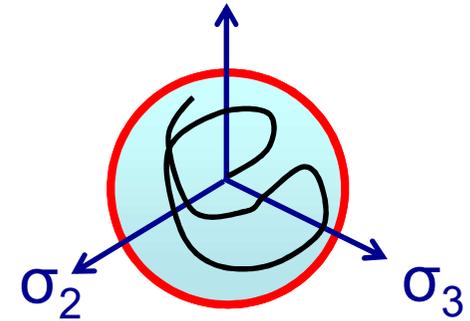


PC : Poynting Thomson wins !

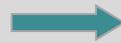
Fatigue (à GNC) des matériaux

HCF test on DP 600 steel

$\Delta\sigma = 500 \text{ MPa}$, $R_\sigma = \sigma_{min} / \sigma_{max} = -1$ et $f_L = 30 \text{ Hz}$



0.4° C every 1/60 s



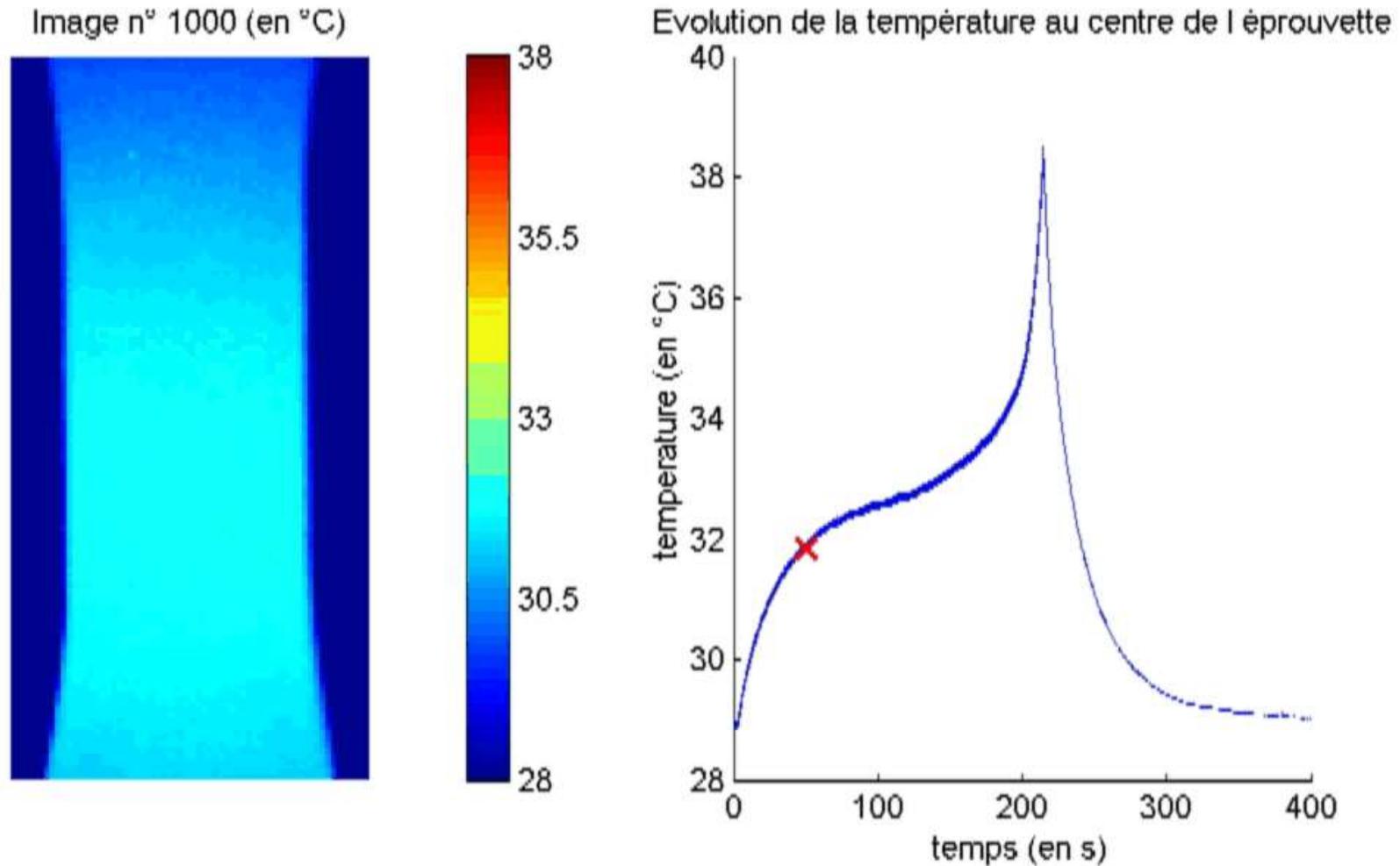
$$\frac{\Delta s_{the}}{\tilde{d}_1 \rho C} \approx 75 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$$

3° C within 160 s



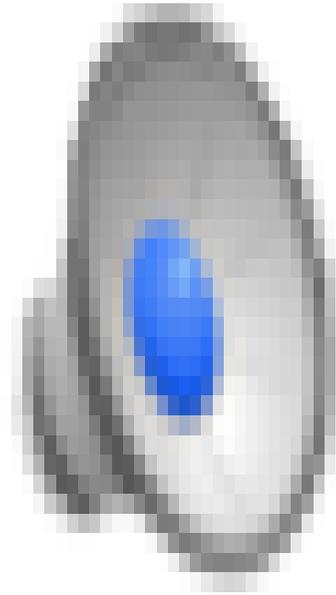
$$\frac{\tilde{d}_1 \rho C}{\rho C} \approx 0.1 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$$

Fatigue à grand nombre de cycles



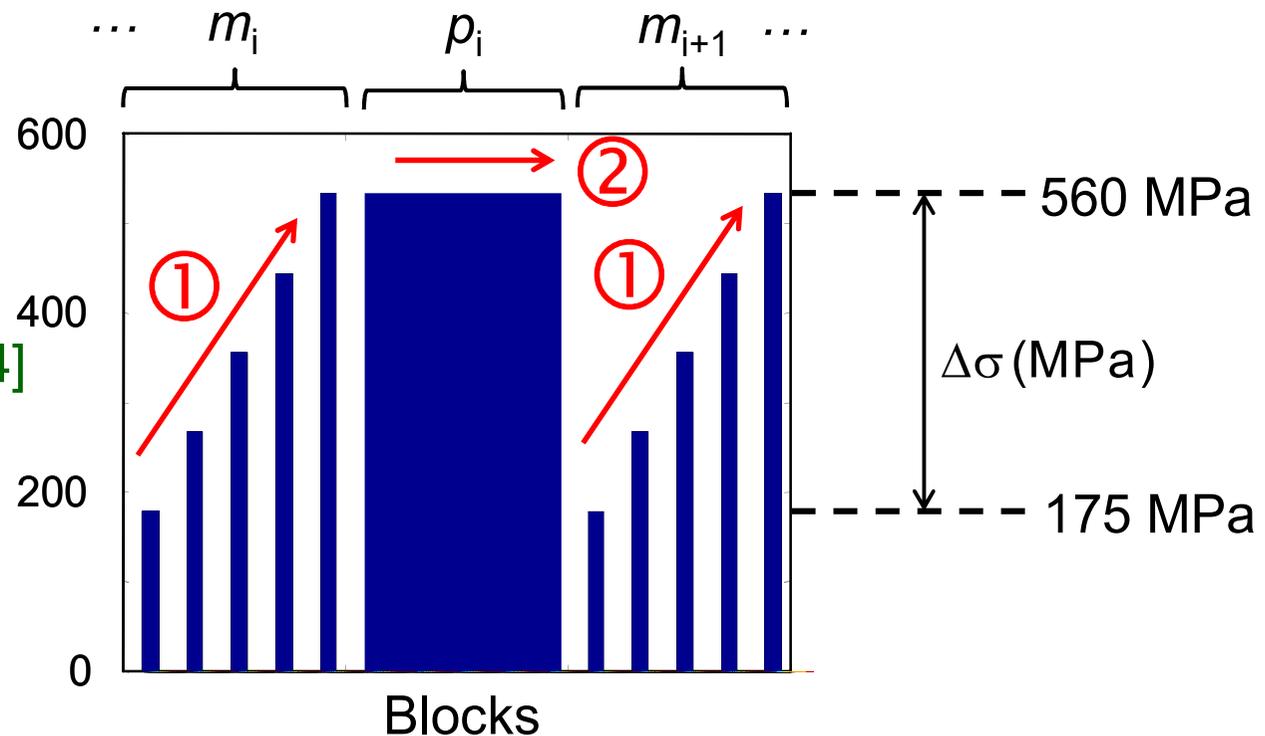
[Boulanger et al., PhD 2004]

Champs (chants ?) de dissipation



Fatigue des aciers

[Boulanger, PhD 2004]
[Berthel, PhD 2008]
[Blanche, PhD 2012]

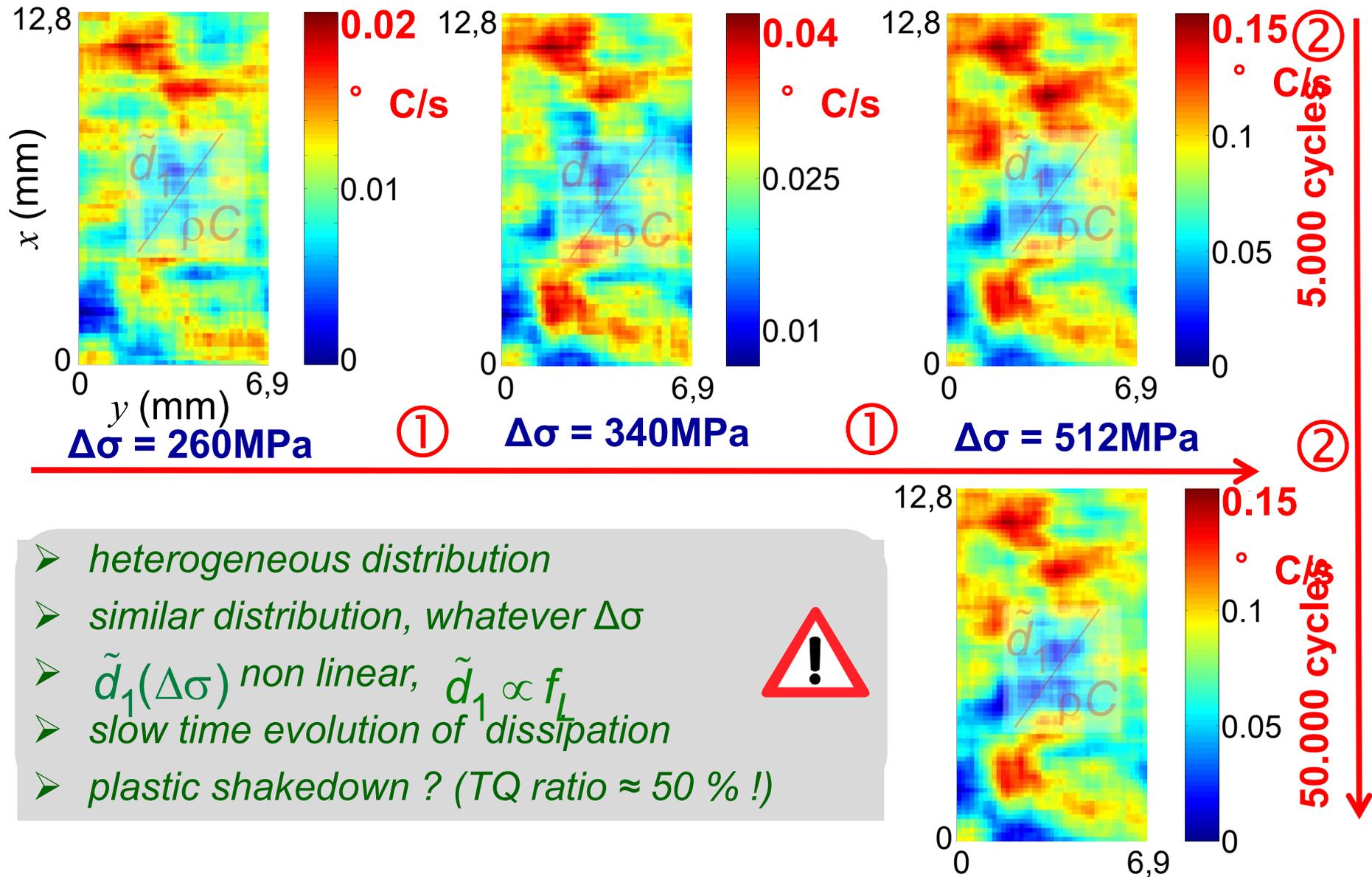


- ① m_i : series of “mini” cycle blocks (3000 cycles) at different stress ranges:
energy balance at “constant fatigue state”
- ② p_i : large blocks (100 000 cycles) at constant stress range:
energy balance evolution induced by fatigue mechanisms

highest stress range \approx fatigue limit

Propriétés de la dissipation (I)

$f_L = 30\text{Hz}$ 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 $\approx 50\%$!)

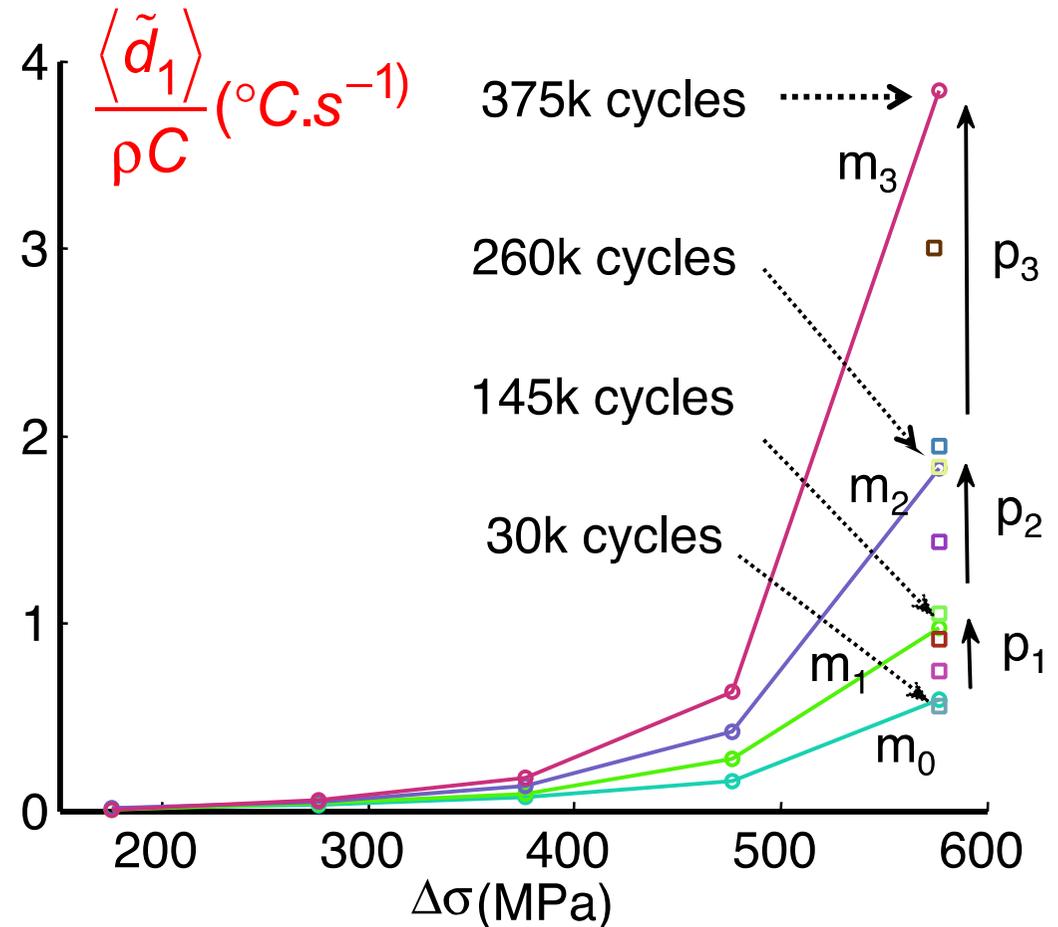


Propriétés de la dissipation (II)

Interpretation of curves

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

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



➤ *energy safeguard: kinetics of fatigue progress*

Quelques conclusions

- ❑ Imagerie → mesures de champs
Matériau vs. Structure
- ❑ Température, 1^{ère} variable d'état...
Effet thermique vs. effet calorimétrique
Pas totalement intrinsèque
- ❑ Sources de différentes natures
Source de couplage: thermo-sensibilité du matériau
Source dissipative : dégradation matérielle
- ❑ Bilan d'énergie et lois de comportement
Énergie « stockée », source de couplage / lois d'état
Énergie dissipée / lois d'évolution
- ❑ Comportement dépendant du temps
[d_1 (viscosité)] vs. [couplage thm + d_2 (diffusion)]



**DU
CÔTÉ
/ISOTHERME
DE LA FORCE
TOMBER TU NE DOIS !**