



**HAL**  
open science

## TIR & TPI

André Chrysochoos, Eric Charkaluk

► **To cite this version:**

| André Chrysochoos, Eric Charkaluk. TIR & TPI. Doctorat. France. 2014. cel-02057704

**HAL Id: cel-02057704**

**<https://hal.science/cel-02057704>**

Submitted on 5 Mar 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

*30 juin au 4 juillet 2014, Bordeaux*



**QIRT 2014**  
**7-11 July, Bordeaux**



## **TIR & TPI**

*Pourquoi s'investir en thermodynamique  
quand on s'intéresse  
à la thermographie en mécanique des matériaux ?*



A. Chrysochoos (\*), E. Charkaluk (\*\*)





# Programme de l'école d'été TICQ

---

jour	programme
1	physique du rayonnement, matériels IR, métrologie ...
2	cadre thm : température, sources, dissipation, couplage
3	applications à la caractérisation thermophysique des matériaux
4	applications à l'estimation des sources de chaleur
5	synthèses et perspectives d'avenir – conférences

# Menu du jour

---

<b>Jour 2</b>	<b>Entrée du jour (A. Chrysochoos)</b>
1	Premiers contacts avec les effets thermomécaniques
2	D'une mécanique à une thermomécanique
3	Bilan d'énergie et équation de la chaleur
4	Modèles rhéologiques élémentaires
5	Quelques applications

-1-

Premiers contacts  
avec les effets thermomécaniques

# Effets thermiques induits par la déformation

## Nature des sources de chaleur

### ● **Deux expériences à faire soi-même**

- *bande de caoutchouc étirée (lèvres = capteurs thermiques)*

Gough 1805: "...bring the middle of the piece into slight contact with the edges of the lips..."

- *trombone nerveusement malmené (doigts = capteurs thermiques)*

### ● **Analyse énergétique du comportement des matériaux**

- *énergie de déformation (input)*
- *source de couplage : thermo-sensibilité*
- *dissipation : irréversibilité, dégradation matérielle*

# Qu'entend-on par effet thermomécanique ?

“source de couplage”

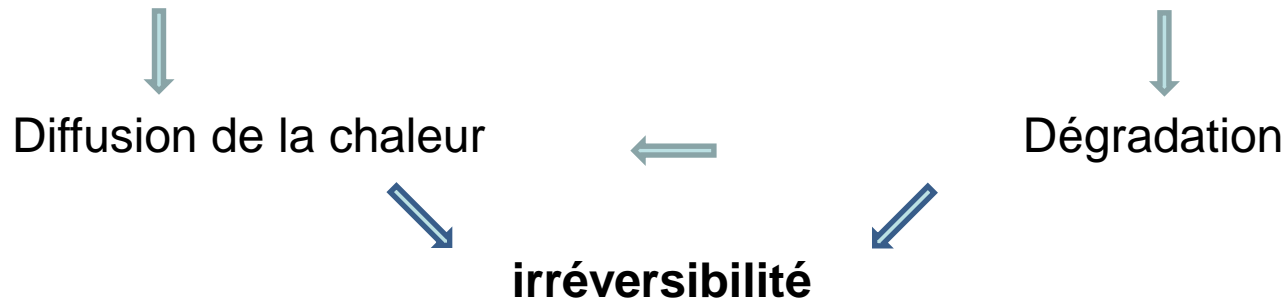
$$s \geq 0, s \leq 0$$

- thermoélasticité
- élas. entropique
- chaleur latente
- ...

“dissipation”

$$s \geq 0$$

- viscosité
- plasticité
- endommagement
- ...

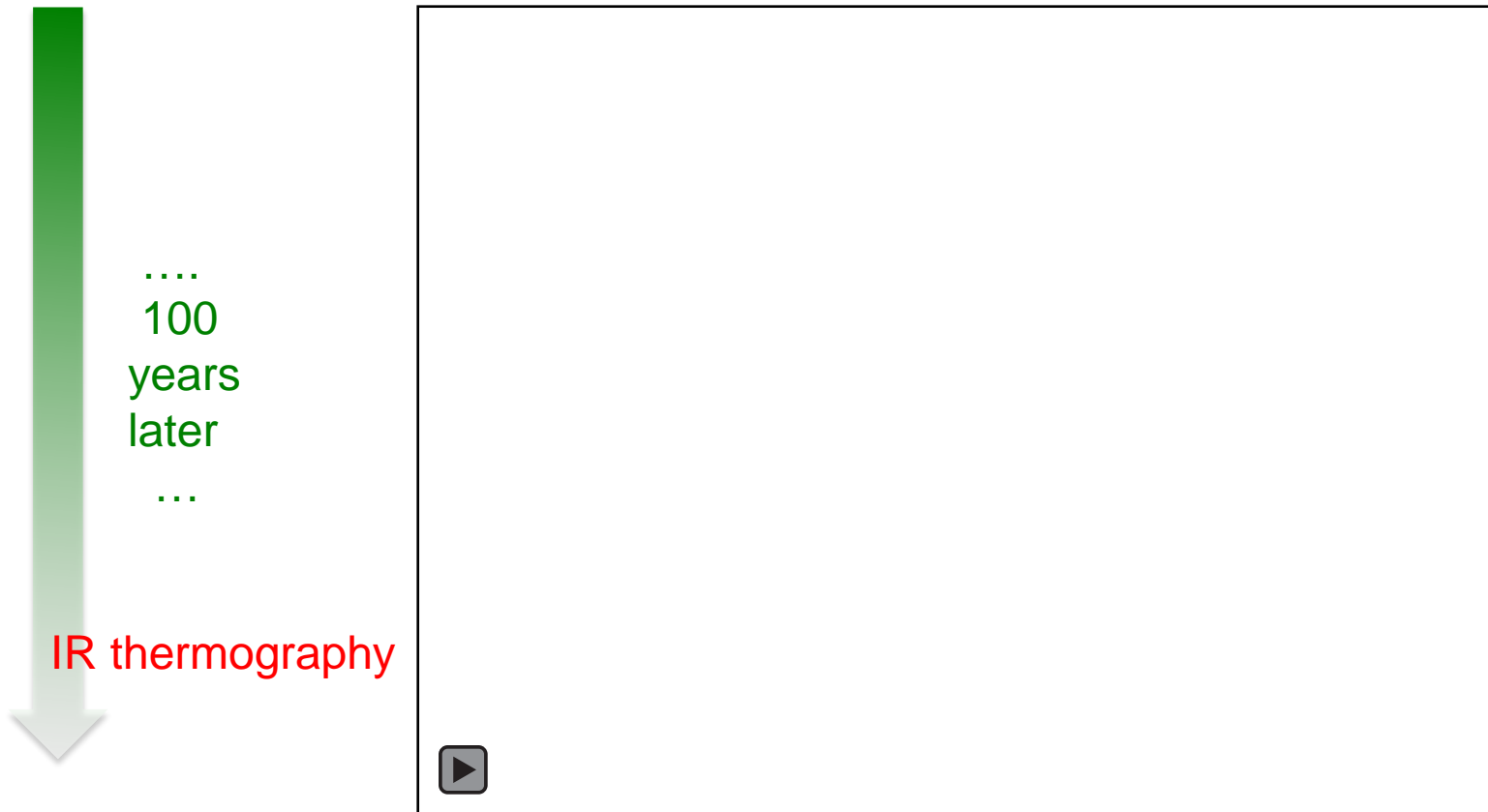


↳ induite par le chargement  $\approx$  couplage “faible”  
effet mécanique induit par \ (induit par le chargement)  $\approx$  couplage “fort”

# Effets thermo-élastiques

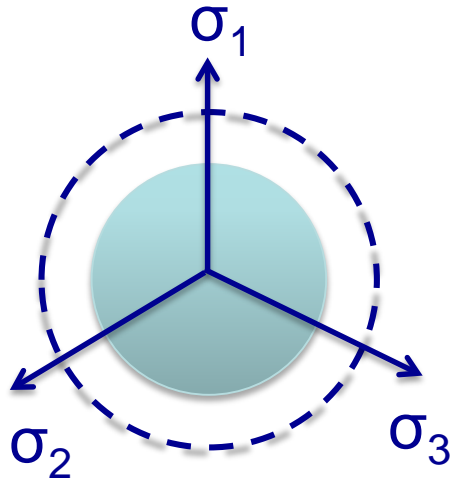
Gough 1805, Joule 1857, Lord Kelvin, 1880

Techniques microcalorimétriques



# Effets thermoélastiques et dissipatifs plastiques

Matériaux thermo-élasto-plastique (cf. Eric Charkaluk)



-2-

D'une mécanique à une thermomécanique  
des milieux continus



# Equations de conservation (cadre mécanique)

Origine	Equation	Nbre	Variable	Nbre
masse	$\dot{\rho} + \rho \operatorname{tr}(\mathbf{D}) = 0$	1	$\rho$	1
PFD résultante	$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{f} = \rho \boldsymbol{\gamma}$	3	$\mathbf{x}, \mathbf{u}$	3
PFD moment	$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^T$	3	$\boldsymbol{\sigma}$	9
cinématique	$\mathbf{F} = \partial \mathbf{x} / \partial \mathbf{X}$	6	$\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{L}, \mathbf{E}, \dots$	6

- › *masse volumique*
- $\mathbf{D}$  tenseur vitesse de déformation
- $\boldsymbol{\sigma}$  tenseur des contraintes de Cauchy
- $\mathbf{f}$  densité massique de force
- © vecteur accélération

19 inconnues pour 13 inconnues  
**Il manque 6 équations**

e.g. milieu élastique

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$$

# D'une mécanique à une thermomécanique des milieux continus

Cf. François Sidoroff, vendredi 4 juillet

## Mécanique

**Variables descriptives** : *des déformations ou des contraintes*

**Equations de comportement** : « *principes* » ou règles de bon sens, *causalité, milieu matériellement simple, objectivité, liaisons internes, homogénéité, isotropie, ... propriétés de mémoire, effet de seuil, ...*

## Thermodynamique

**Variables descriptives** : variables d'état, volume /déformation, pression/contraintes, température, proportion de phase, variable d'endommagement ...

**Deux principes** : conservation de l'énergie et irréversibilité des processus réels

**Equations de comportement** : ... → cadre MSG ...

# Equations de conservation (Cadre thermomécanique)

masse :  $\dot{\rho} + \rho \operatorname{tr}(\mathbf{D}) = 0$

PFD-R :  $\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{f} = \rho \boldsymbol{\gamma}$

PFD-M :  $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^T$

énergie :  $\rho \dot{e} = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D} - \operatorname{div} \mathbf{q} + r_e$

entropie :  $r_{si} = \rho \dot{s} - \frac{r_e}{T} + \operatorname{div} \left( \frac{\mathbf{q}}{T} \right) = \frac{d}{T} \geq 0$

dissipation :  $d = T r_{si} \geq 0$

(via l'inégalité de Clausius-Duhem)

**dissipation intrinsèque**

$$d_1 = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D} - \rho \mathbf{e}_{,\varepsilon} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \rho \mathbf{e}_{,\alpha} \cdot \dot{\boldsymbol{\alpha}} \geq 0$$

**dissipation thermique**


$$d_2 = -\mathbf{q} / T \cdot \nabla T \geq 0$$

$e$  specific internal energy  
 $\mathbf{q}$  heat influx vector  
 $r_e$  external heat supply  
 $r_{si}$  entropy production  
 $s$  specific entropy  
 $T$  absolute temperature  
 $d$  dissipation

# Equations de comportement

Formalisme des matériaux standard généralisés

[Halphen & Nguyen, 75]

state variables	$\{T, \varepsilon, \alpha\}$	 HPP
internal/free energy potential	$e(s, \varepsilon, \alpha)$ $\psi(T, \varepsilon, \alpha)$	
state equations	$-s = \psi_{,T}$ $\sigma^r = \rho \psi_{,\varepsilon}$ $\mathbf{A}_\alpha = \rho \psi_{,\alpha}$	
dissipation potential evolution equations	$\varphi(q, \dot{\varepsilon}, \dot{\alpha}; T, \dots)$ $-\frac{\nabla T}{T} = \varphi_{,q}$ $\sigma^{ir} = \varphi_{,\dot{\varepsilon}}$ $X_{\dot{\alpha}} = \varphi_{,\dot{\alpha}}$	

**irreversibilité**

Dégradation matérielle

Diffusion de la chaleur

$$d_1 = \sigma^{ir} : \dot{\varepsilon} + X_{\dot{\alpha}} \cdot \dot{\alpha}$$

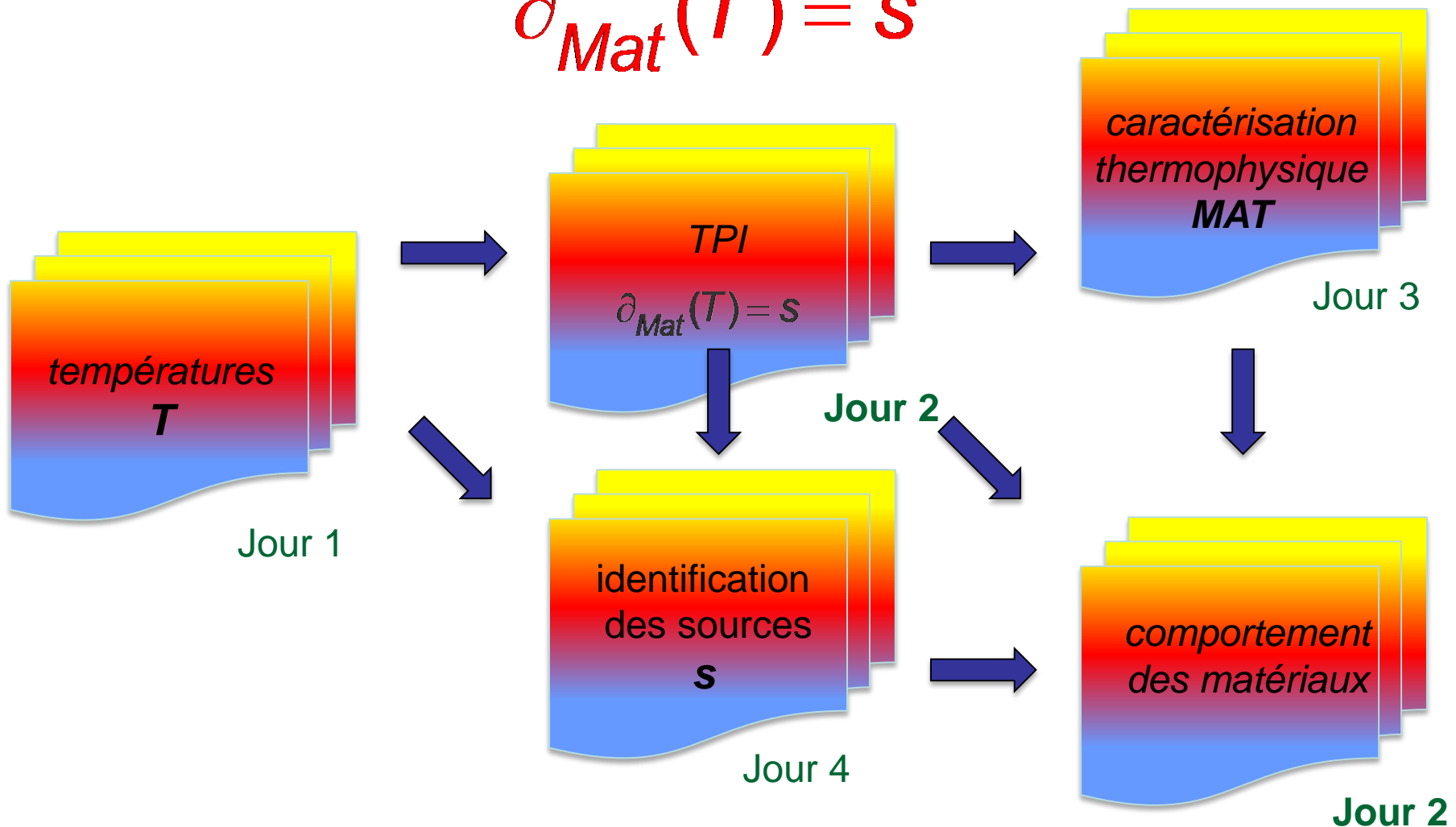
$$d_2 = \varphi_{,q} \cdot q = -\frac{\nabla T}{T} \cdot q$$

-3-

## Bilan d'énergie et équation de la chaleur

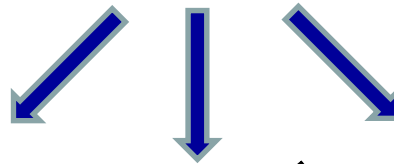
# Equation de diffusion de la chaleur

$$\partial_{Mat}(T) = s$$



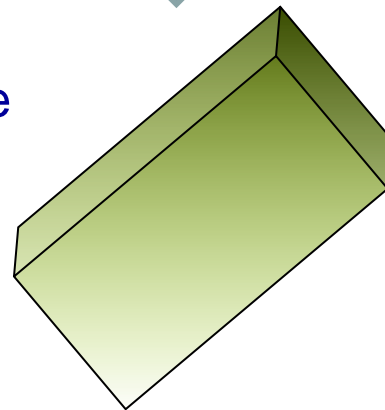
# Bilan d'énergie (I)

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



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

$d_1$  : dissipation intrinsèque



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

... bilan incomplet !!



# Bilan d'énergie (II)

- taux d'énergie interne

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

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

- équation de la chaleur

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

- commentaires

$d_1$

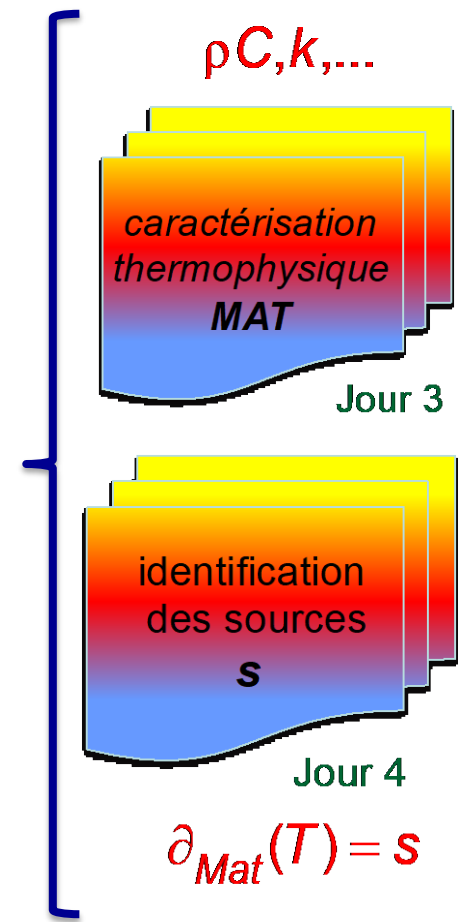
C.1: C chaleur spécifique ou capacité calorifique

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



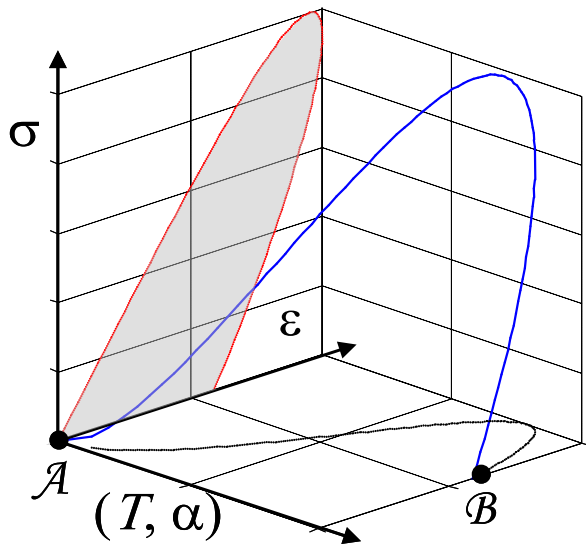
cinématique requise

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

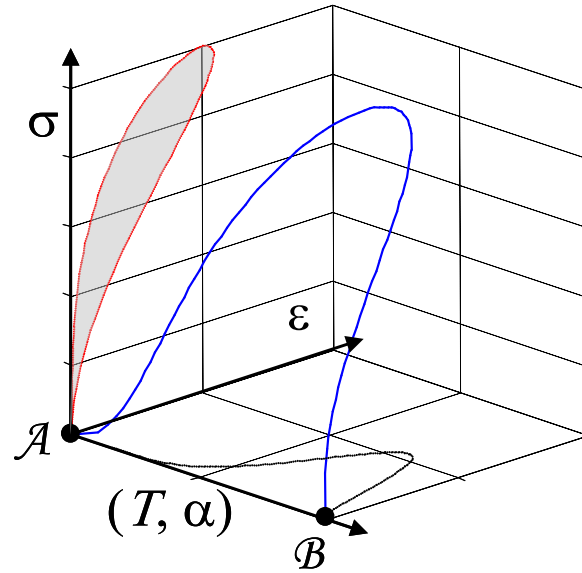




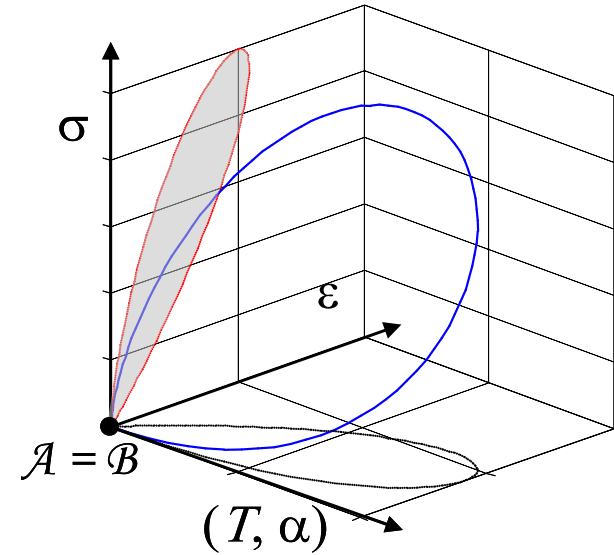
## Bilan d'énergie (III)



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



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



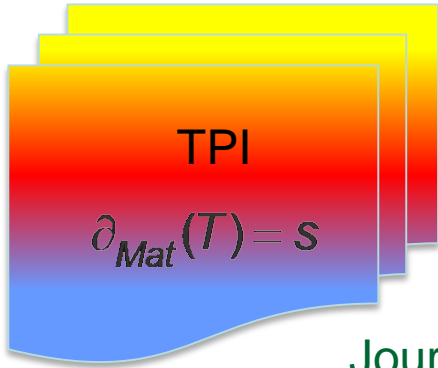
(iii)  $\mathcal{A} = \mathcal{B}$

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

(ii) Boucle d'hystérésis:  $w_{\text{def}} = A_h$  si ... and  $A_h$  induite par ...



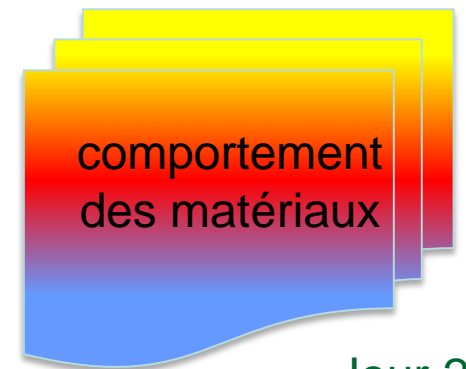
(iii) Cycle charge-décharge = cycle thermodynamique  $w_{\text{def}} = \int_{t_{\mathcal{A}}}^{t_{\mathcal{B}}} d_1 dt + \int_{t_{\mathcal{A}}}^{t_{\mathcal{B}}} w_{\text{thc}}^{\square} dt$



Jour 2

-4-

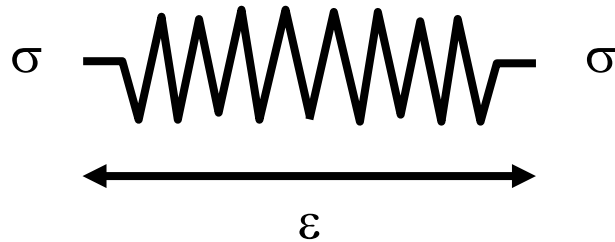
# Analyse thermomécanique de quelques modèles élémentaires



Jour 2

# Comportement élastique isotherme

## Caractéristiques Physiques



$$\sigma = E \varepsilon$$
$$d_1 = 0$$

**Stocke tout !!**

**Ne dissipe rien !!**

## Modélisation thermomécanique

Variables d'état

$$\{T = T_0, \varepsilon\}$$

Energie libre (volumique)

$$\psi(T = T_0, \varepsilon) = \frac{1}{2} E \varepsilon^2$$

Potentiel de dissipation

$$\varphi(\dot{\varepsilon}) \equiv 0$$



Loi d'état

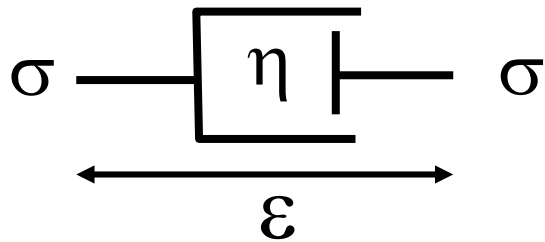
$$\sigma^r = \psi_{,\varepsilon} = E \varepsilon$$

Loi complémentaire

$$\sigma^{ir} = \varphi_{,\dot{\varepsilon}} = 0 ; d_1 = \sigma^{ir} \dot{\varepsilon} = 0$$

# Comportement visqueux isotherme

## Caractéristiques Physiques



$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon}$$
$$d_1 = \sigma \dot{\varepsilon} = \eta \dot{\varepsilon}^2$$

**Ne stocke rien !  
Dissipe tout !**

## Modélisation thermomécanique

Variables d'état

$$\{T = T_0, \varepsilon\}$$

Energie libre (volumique)

$$\psi(T = T_0, \varepsilon) \equiv 0$$

Potentiel de dissipation

$$\varphi(\dot{\varepsilon}) = \frac{1}{2} \eta \dot{\varepsilon}^2$$

Loi d'état

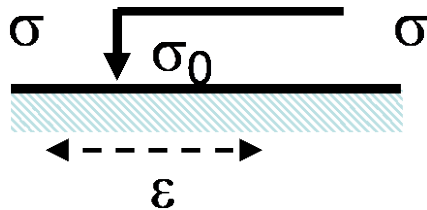
$$\sigma^r = \psi_{,\varepsilon} = 0$$

Loi complémentaire

$$\sigma^{ir} = \varphi_{,\dot{\varepsilon}} = \eta \dot{\varepsilon}$$

# Comportement plastique parfait isotherme

## Caractéristiques Physiques



$$\dot{\varepsilon} = \begin{cases} 0 & \text{si } |\sigma| < \sigma_0 \\ 0, & \text{si } |\sigma| = \sigma_0 \text{ et } \frac{d}{dt}|\sigma| < 0 \\ \lambda \frac{\sigma}{|\sigma|}, \lambda \in \mathbb{R}^{*+} & \text{si } |\sigma| = \sigma_0, \frac{d}{dt}|\sigma| = 0 \end{cases}$$

$$d_1 = \sigma_0 |\dot{\varepsilon}|$$

**Ne stocke rien ! Dissipe tout !**

## Modélisation thermomécanique

Variables d'état

$$\{T = T_0, \varepsilon\}$$

Energie libre (volumique)

$$\psi(T = T_0, \varepsilon) \equiv 0$$

Potentiel de dissipation

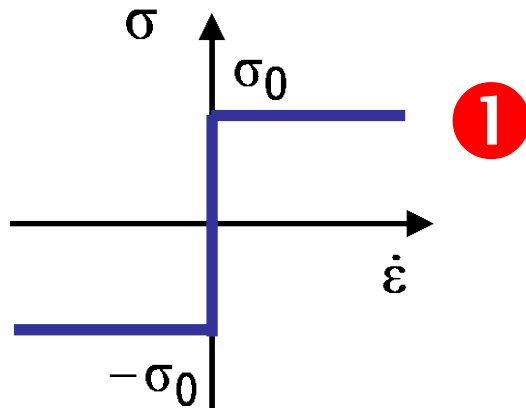
$$\varphi(\dot{\varepsilon}) = \sigma_0 |\dot{\varepsilon}|$$

Loi d'état

$$\sigma^r = \psi_{,\varepsilon} = 0$$

Loi complémentaire

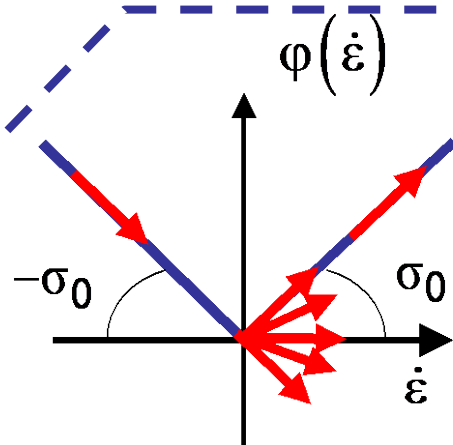
$$\sigma^{ir} = \varphi_{,\dot{\varepsilon}} = \begin{cases} \sigma_0 \operatorname{sgn}(\dot{\varepsilon}) & \text{si } \dot{\varepsilon} \neq 0 \\ |\sigma| < \sigma_0 & \text{si } \dot{\varepsilon} = 0 \end{cases}$$



$$\sigma^{ir} = \begin{cases} \sigma_0 \operatorname{sgn}(\dot{\epsilon}) & \text{si } \dot{\epsilon} \neq 0 \\ |\sigma| < \sigma_0 & \text{si } \dot{\epsilon} = 0 \end{cases}$$

sous-différentielle

$$\sigma^{ir} \in \partial\phi$$



Analyse convexe :  
fonction indicatrice

$$\partial\phi = \begin{cases} \partial\phi / \partial\dot{\epsilon} = \pm\sigma_0 \\ -\sigma_0 < \sigma < +\sigma_0 \end{cases}$$

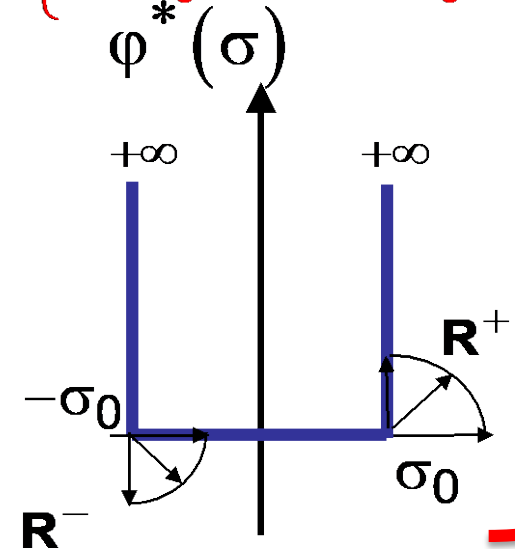
Fonction seuil

$$f(\sigma) = |\sigma| - \sigma_0 \leq 0$$

Forme duale

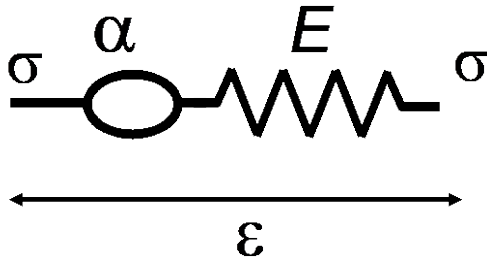
$$\dot{\epsilon} \in \partial\phi^*$$

$$\dot{\epsilon} = \begin{cases} 0 & \text{si } -\sigma_0 < \sigma < \sigma_0 \\ \lambda \frac{\sigma}{|\sigma|} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma}, \lambda \in \mathbb{R}^+ & \text{si } |\sigma| = \sigma_0 \end{cases}$$



# Comportement thermoélastique linéaire

## Caractéristiques Physiques



$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \theta$$

$$\begin{cases} d_1 = 0 \\ d_2 = -\frac{\text{grad}T}{T} \cdot q \end{cases}$$

Stockage méca. & therm. !  
Dissipation thermique !

## Modélisation thermomécanique

$$\{\theta = T - T_0, \varepsilon\}$$

$$\psi(\theta, \varepsilon) = \frac{1}{2} E (\varepsilon - \lambda_{th} \theta)^2 - \frac{\rho_0 C_0}{2T_0} (1 + \chi) \theta^2$$

$$\varphi(\dot{\varepsilon}, q; T) = \frac{1}{2T} q \cdot K^{-1} q$$

$$\sigma^r = \psi_{,\varepsilon} = E (\varepsilon - \lambda_{th} \theta)$$

$$s = -\psi_{,T} = \frac{\rho_0 C_0}{T_0} (1 + \chi) \theta$$



s volumique

$$\sigma^{ir} = \varphi_{,\dot{\varepsilon}} = 0$$

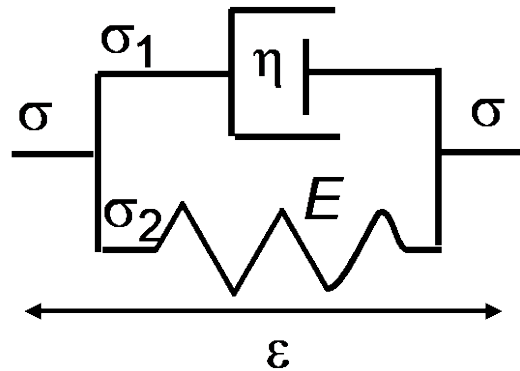
$$-\frac{\text{grad}T}{T} = \varphi_{,q} = \frac{K^{-1} q}{T} \quad (q = -K \text{grad}T)$$

$$\chi = \frac{E \lambda_{th}^2 T_0}{\rho_0 C_0}$$

# Comportement viscoélastique linéaire isotherme

## Kelvin-Voigt

### Caractéristiques Physiques



amortisseur

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \eta \dot{\varepsilon} \\ \sigma_2 = E \varepsilon \\ \sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \end{array} \right.$$

ressort

structure //

### Modélisation thermomécanique

$$\{ T = T_0, \varepsilon \}$$

$$\psi(T = T_0, \varepsilon) = \frac{1}{2} E \varepsilon^2$$

$$\varphi(\dot{\varepsilon}) = \frac{1}{2} \eta \dot{\varepsilon}^2$$

Loi d'état

$$\sigma^r = \psi_{,\varepsilon} = E \varepsilon$$

Loi complémentaire

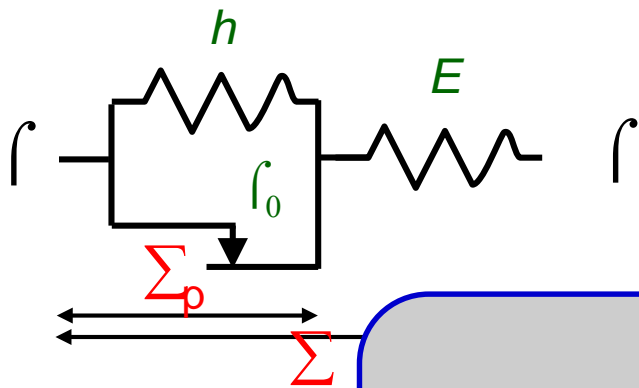
$$\sigma^{ir} = \eta \dot{\varepsilon}$$

$$\sigma = \underbrace{E \varepsilon}_{\sigma^r} + \underbrace{\eta \dot{\varepsilon}}_{\sigma^{ir}}$$

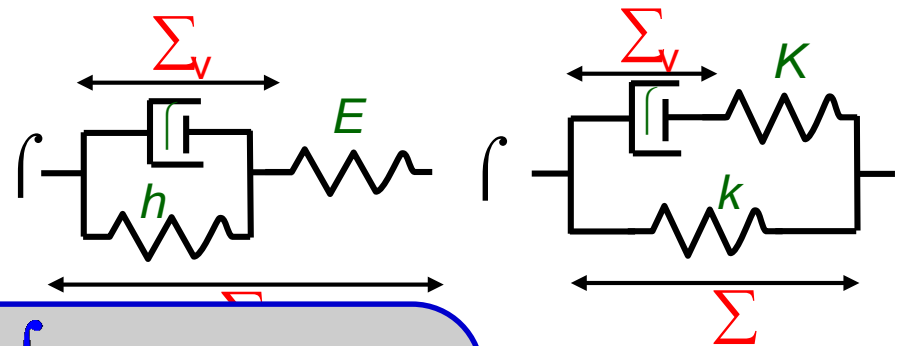


# Bilan d'énergie sur un cycle de chargement (I)

Prager (cf. E.Charkaluk)  
Écrouissage cinématique linéaire  
isotherme



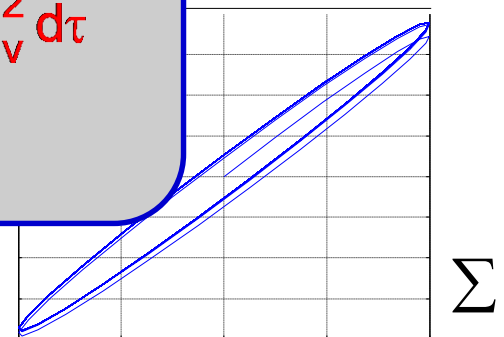
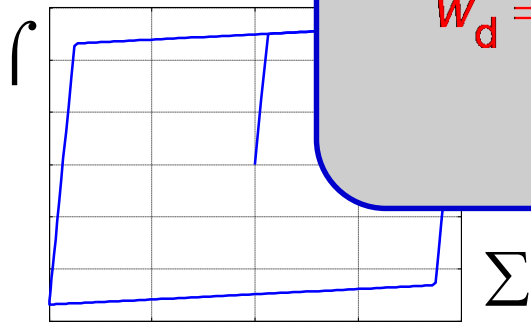
Poynting-Thomson (or Zener)  
Viscoélasticité isotherme



$$A_h = \int_C \sigma \dot{\epsilon} d\tau$$

$$w_d = \int_C \sigma_0 |\dot{\epsilon}_p| d\tau \text{ ou } \int_C \mu \dot{\epsilon}_v^2 d\tau$$

$$A_h = w_d$$



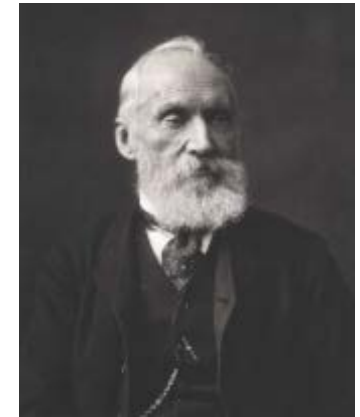
# Bilan d'énergie sur un cycle de chargement (II)

Le plus simpliste des modèles termélastiques

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \lambda_{th}(T - T_0) \\ \dot{T} + \frac{T - T_0}{\tau_{th}} = -\frac{E\lambda_{th}T\dot{\varepsilon}}{\rho C} \end{cases}$$



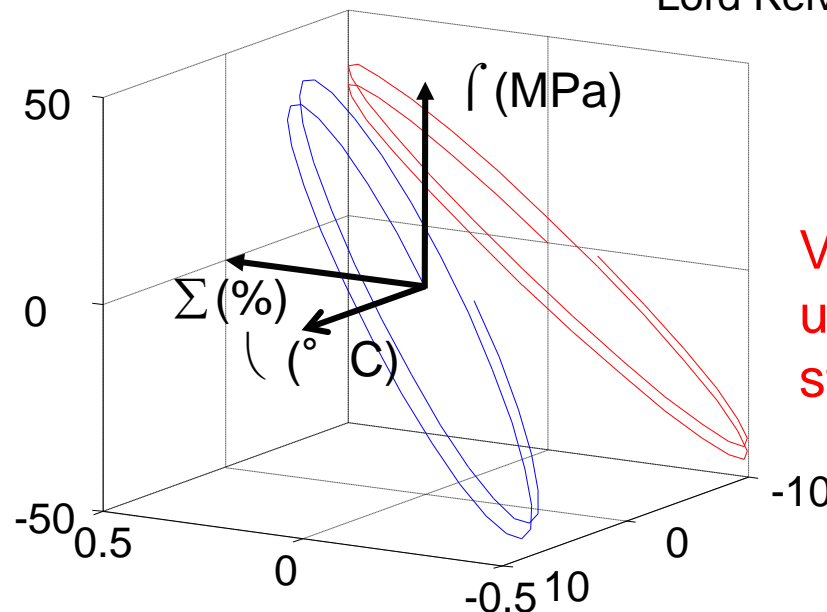
Approche « 0D »  
Fuites linéaires



William Thomson  
Lord Kelvin (1824-1907)

$E = 1000 \text{ MPa}$   
 $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$   
 $C = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$L_{th} = 50 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1} \times 100$   
 $\tau_{th} = 30 \text{ s}$   
 $T_0 = 294 \text{ K}$

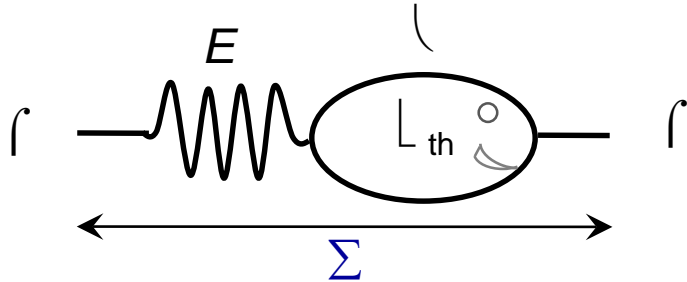


Vers  
un cycle  
stabilisé ...

$$A_h = w_{the}$$

# Couplage ou dissipation ?

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



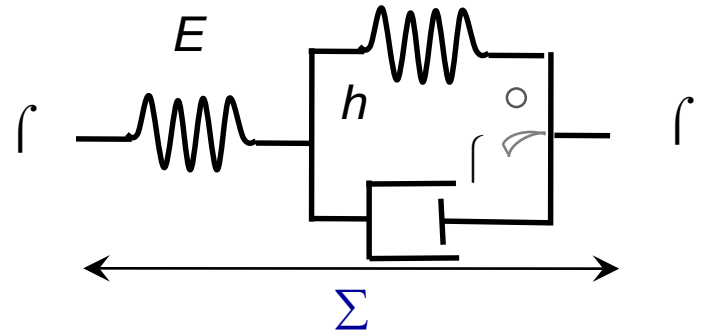
variables d'état ( $\lambda, \Sigma$ )

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

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 ( $\Sigma, \Sigma_v$ )

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

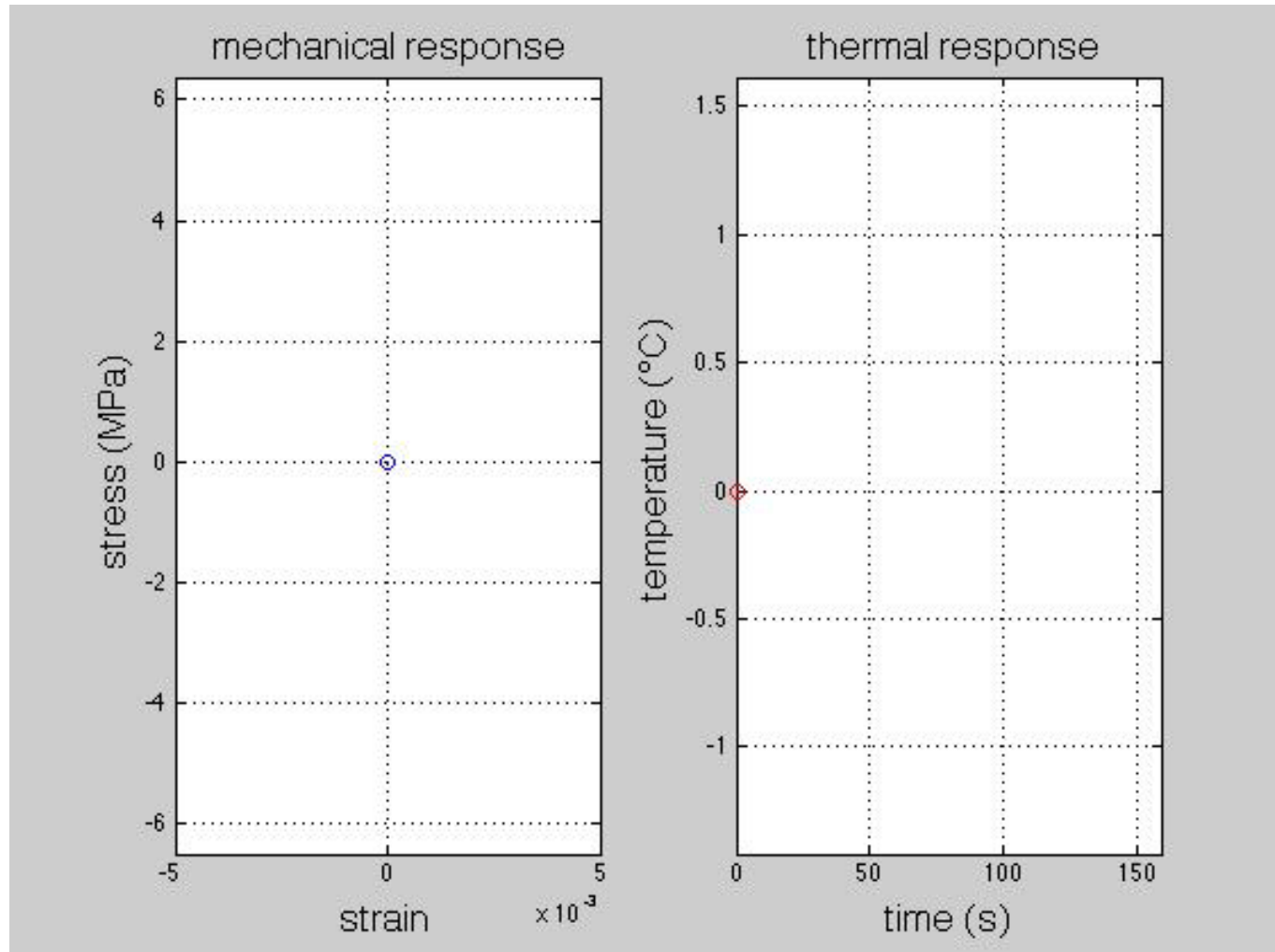
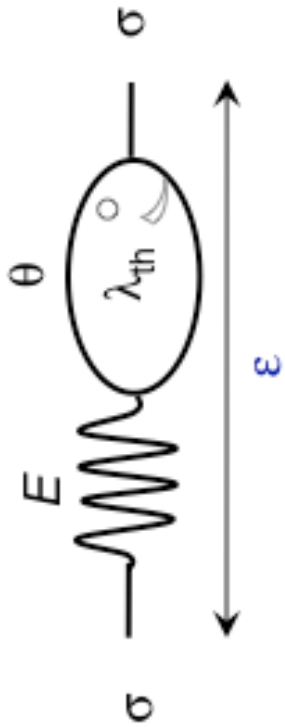
équation rhéologique

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

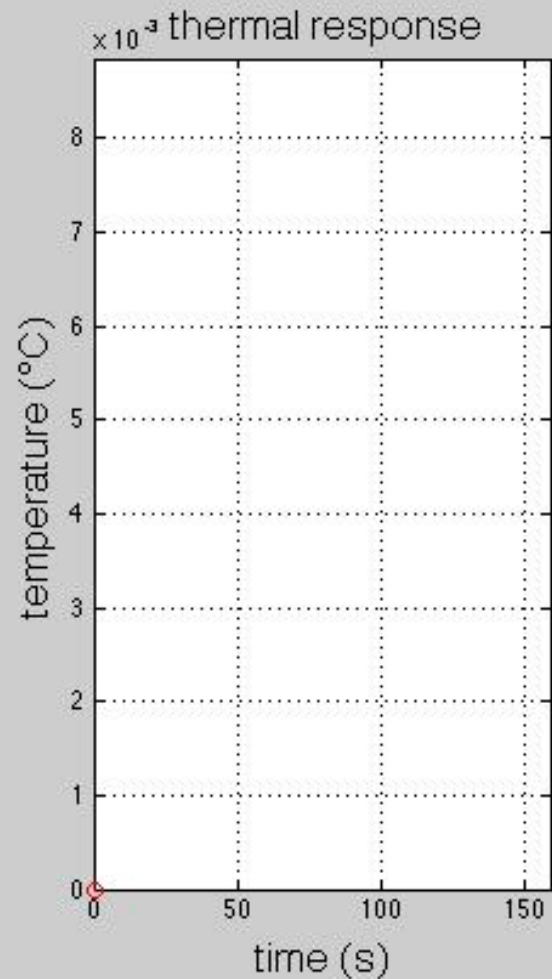
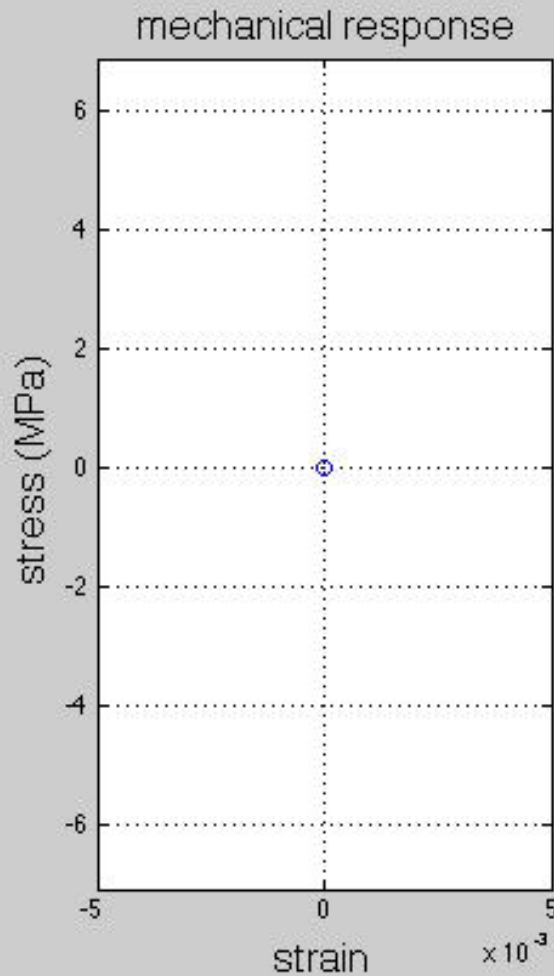
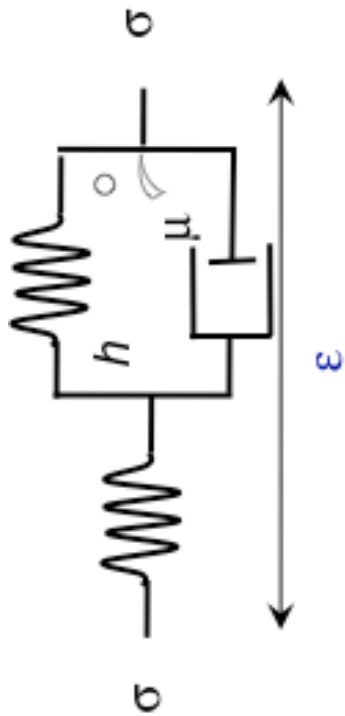


Visco-analyse de polymère (DMA)

# Effets thermoélastiques : couplage fort



# Effets visqueux : couplage faible

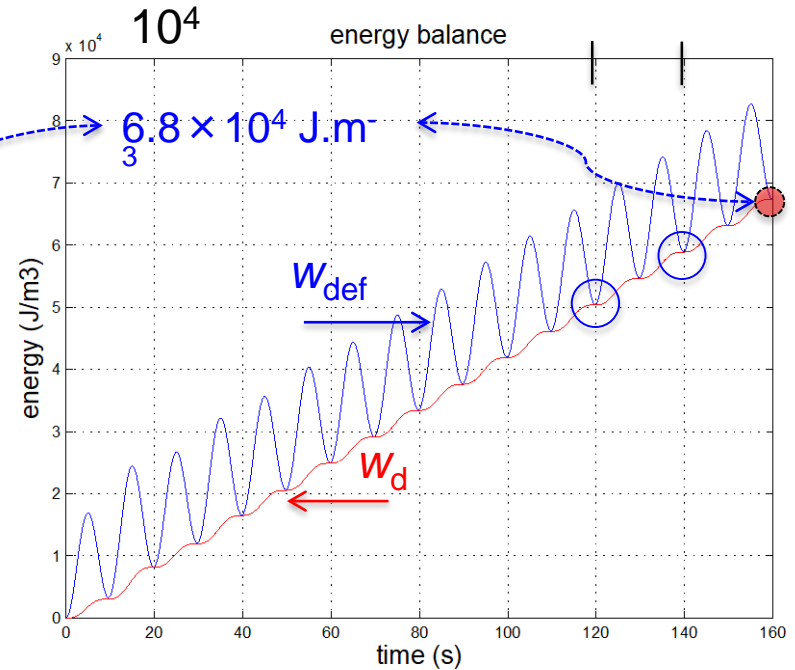
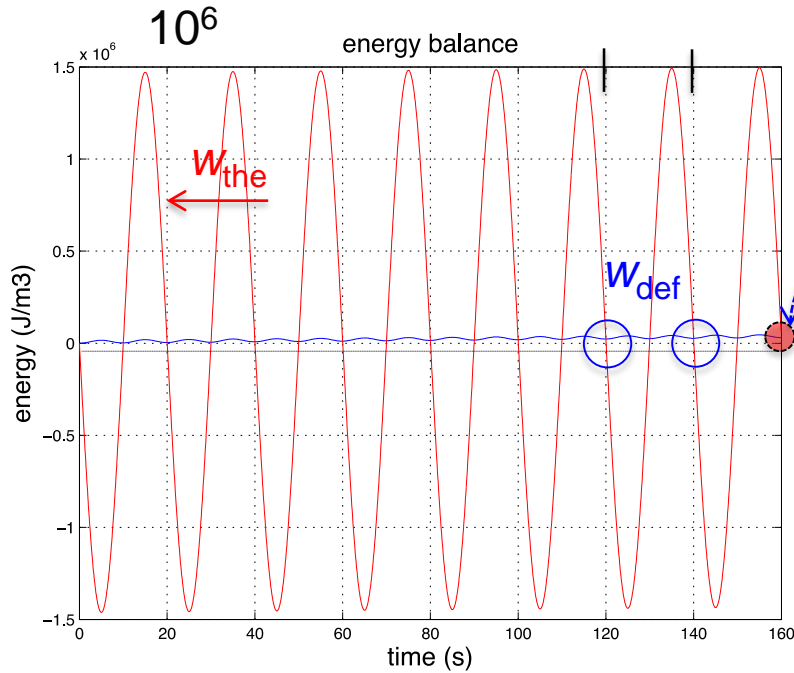


# Bilan d'énergie : étude comparative

Thermoélasticité

vs.

Viscoélasticité



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

étendues

$$W_d \leq W_{def}$$

Bilan d'énergie sur un nombre entier de cycles

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

$$W_d = W_{def}$$



-5-

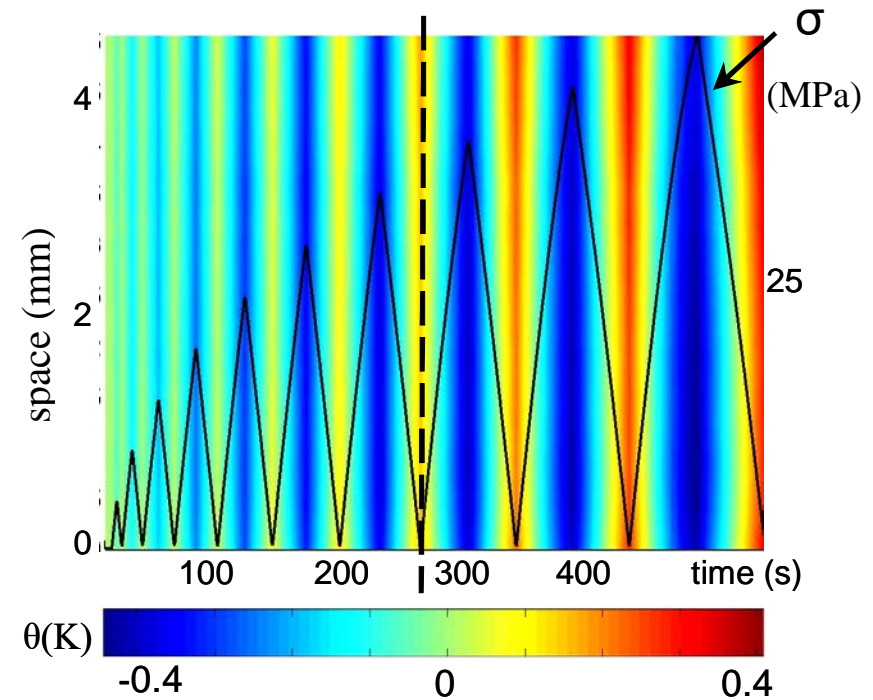
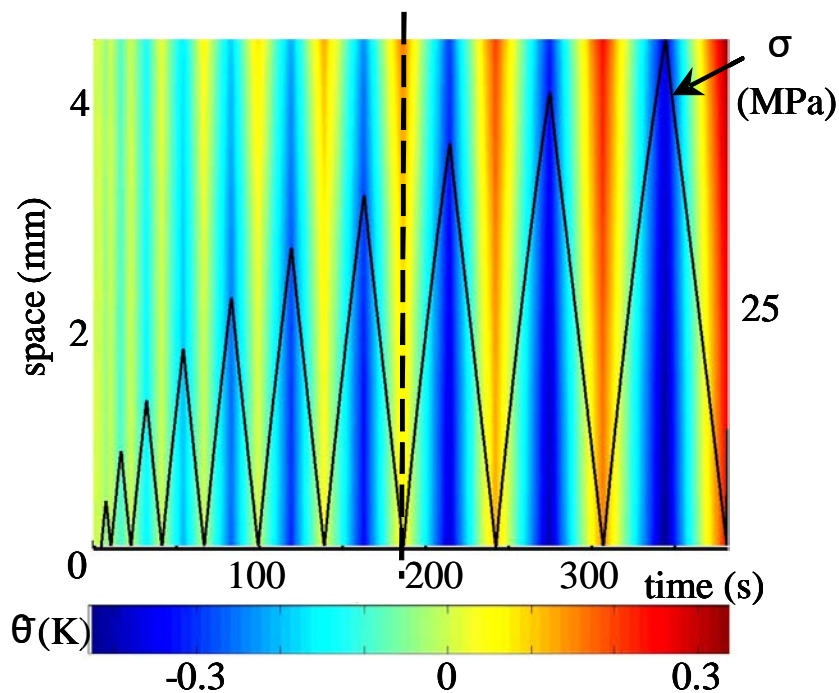
Quelques applications

# PMMA & PC : polymères à l'état vitreux

*HPP isotherme : le royaume de la viscoélasticité linéaire*

J. Alfrey (48), M. Biot (65), F. Sidoroff (70-75)

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

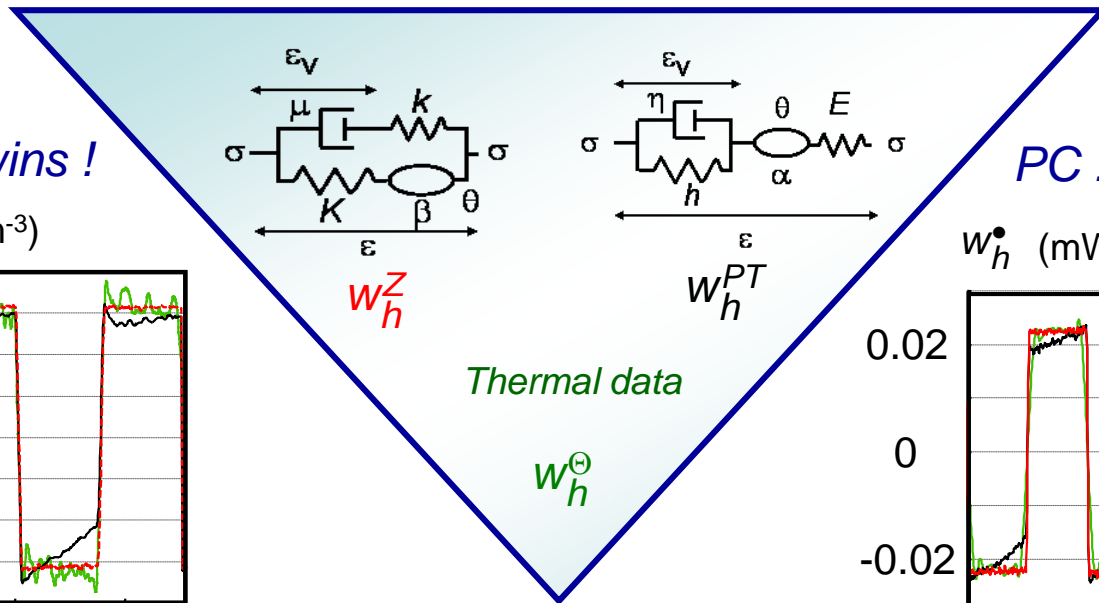


[S. Moreau, PhD 03]

**Conclusion** : processus non isotherme + effets de couplages.... 

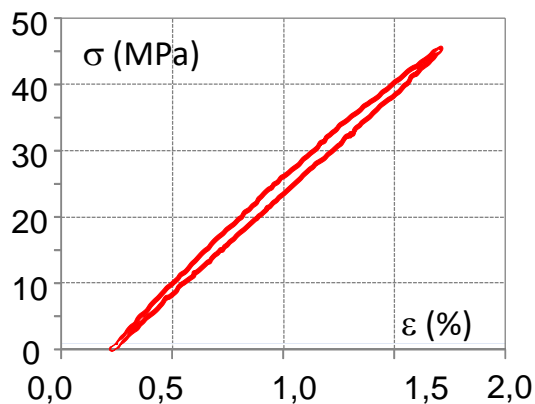
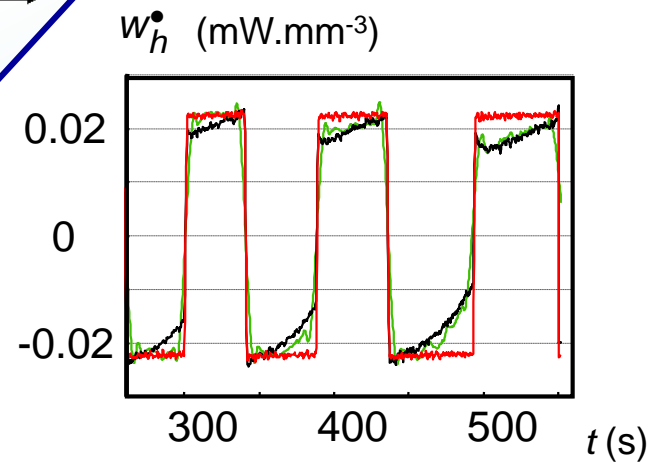
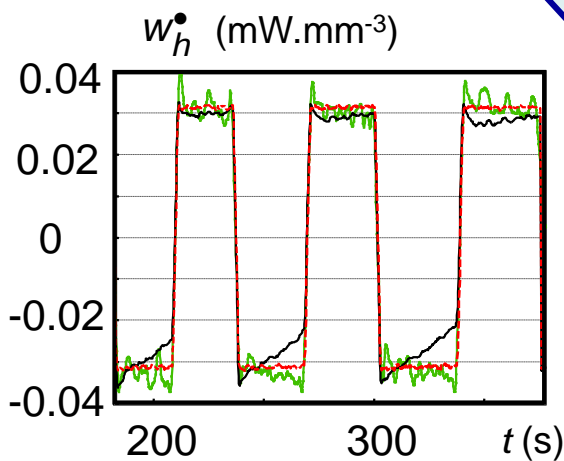


# PMMA & PC : polymères à l'état vitreux

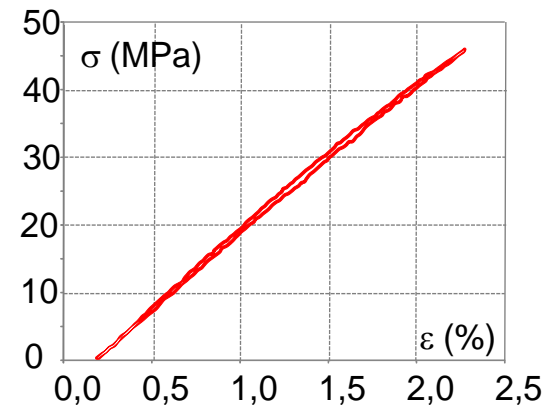


PMMA : Zener wins !

PC : Poynting wins !



$A_h \approx W_{the}$



# Caoutchouc naturel

Effet entropique : Gough (1805) – Joule (1857)

$e(s, \varepsilon) = e_c(T)$  analogie des gaz parfaits

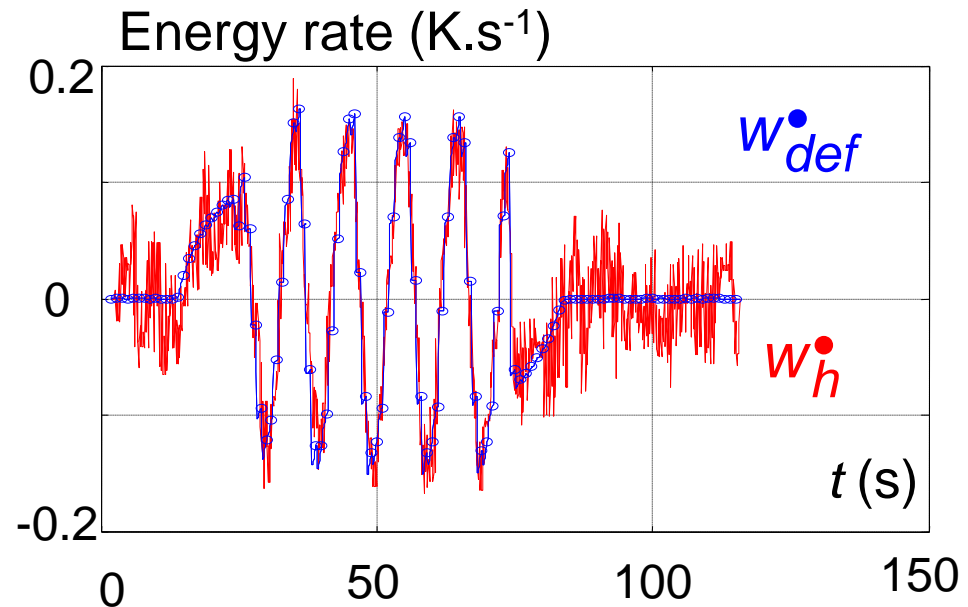
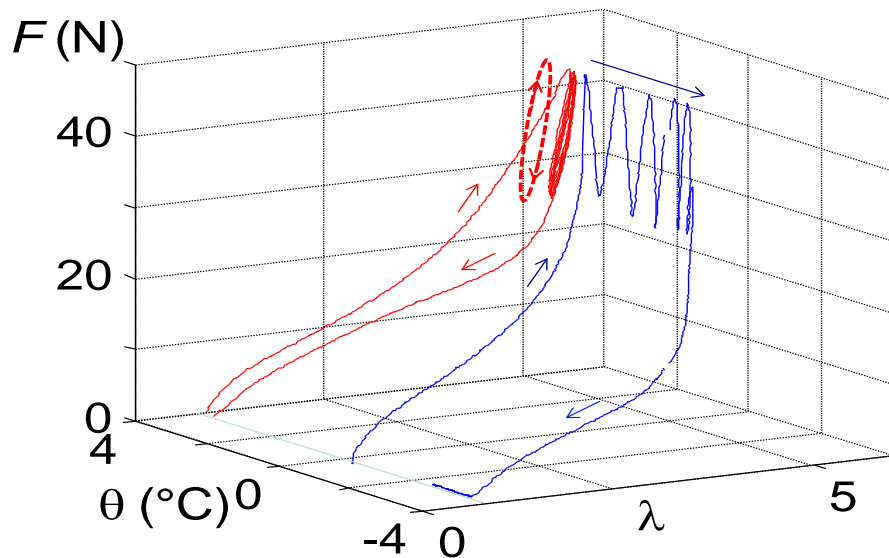
$$\Psi_c(T, \varepsilon) = TK_1(\varepsilon) + K_2(T)$$

$$\dot{w}_{def} = \dot{w}_h$$

[Saurel, PhD 99]

[Honorat, PhD 06]

[Caborgan, PhD 11]



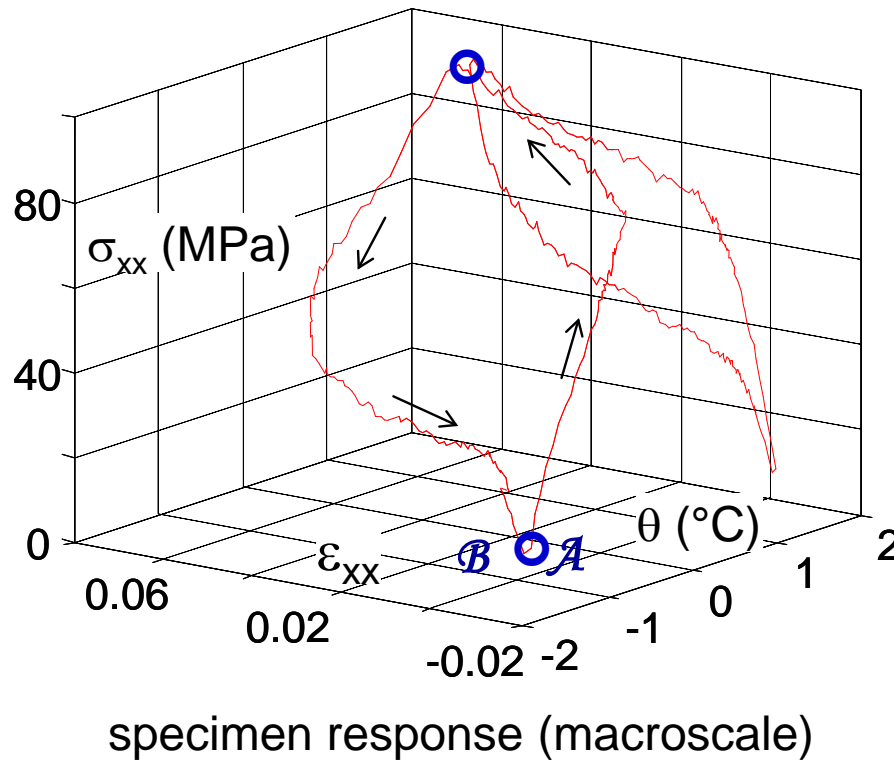
# Pseudoélasticité des AMF (I)

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

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

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

**CuAlBe**



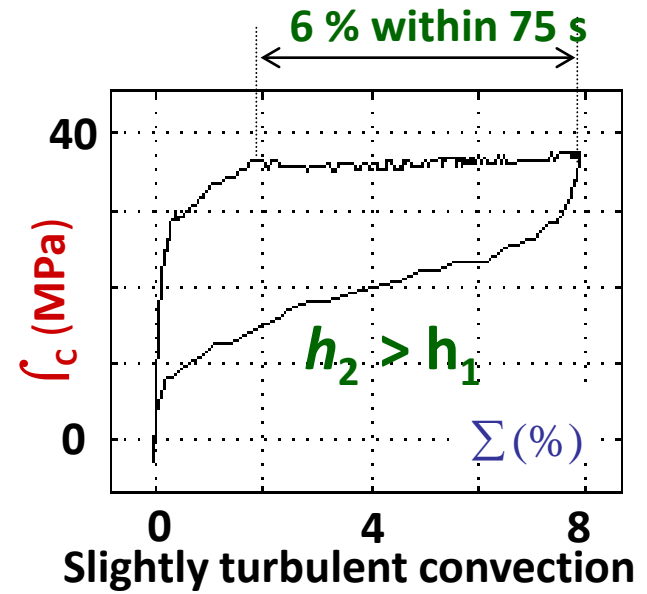
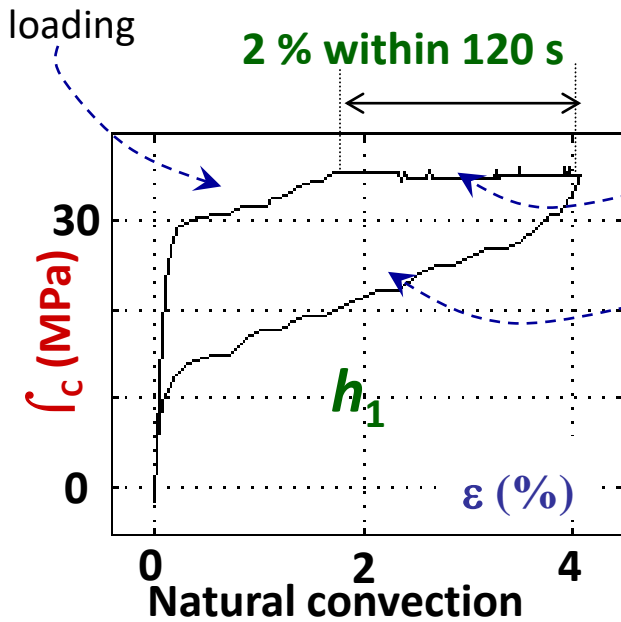
$$R_M = \frac{\mathcal{A}_h}{w_{\text{def}}} \approx 0,39$$

$$R_T^{(*)} = \frac{\int_C w_h^{\bullet} d\tau}{\int_C |w_h^{\bullet}| d\tau} \approx 0,026$$

[Pham, PhD 94]  
 [Löbel, PHD 98]  
 [Leclerc, PHD 01]  
 [Vigneron, PhD 09]

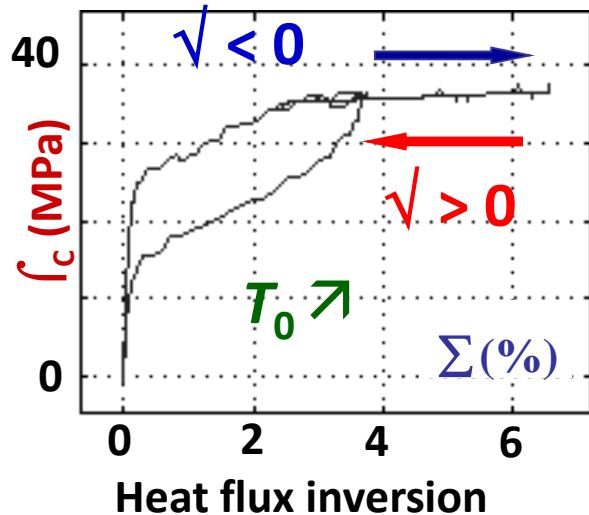
(\*)  $R_T = 0$  non dissipative (intrinsically) + isothermal or adiabatic process  
 $R_T = 1$  purely dissipative (intrinsically) process without any coupling effect

# Pseudoélasticité des AMF (II)



CuZnAl

macro



Creep strain rate : thermal boundary cond.

Viscosity ? Reverse creep ?

Low dissipation ( $R_T < 5\%$ )

ThM couplings = Rate dependent behavior

[X. Balandraud, PHD 00]

# Pseudoélasticité des AMF (I)

Numerical tests :

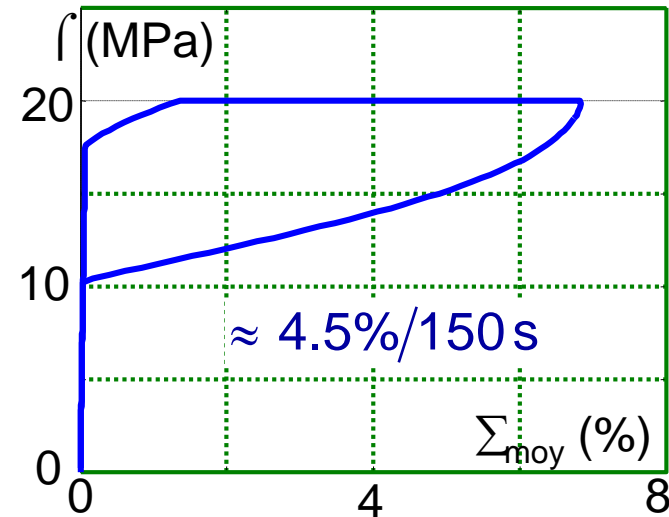
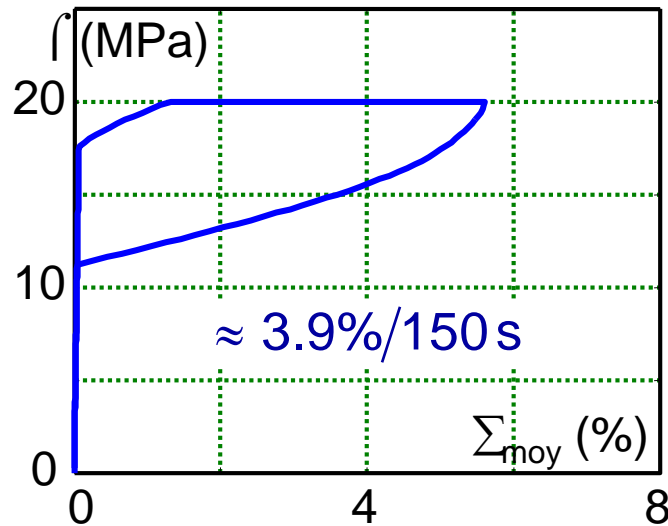
$$h_1 = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$$

natural convection

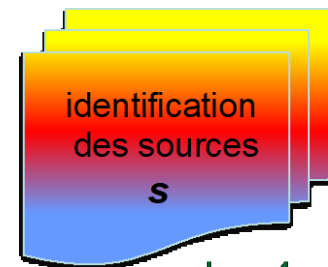
macro

$$h_2 = 60 \text{ W/m}^2\text{K}$$

low turbulence



- effet de fluage sans viscosité
- comportement dépendant du temps : couplage + diffusion
  - . effets de structure... front de changement de phase
  - . boucle d'hystérésis... sans dissipation

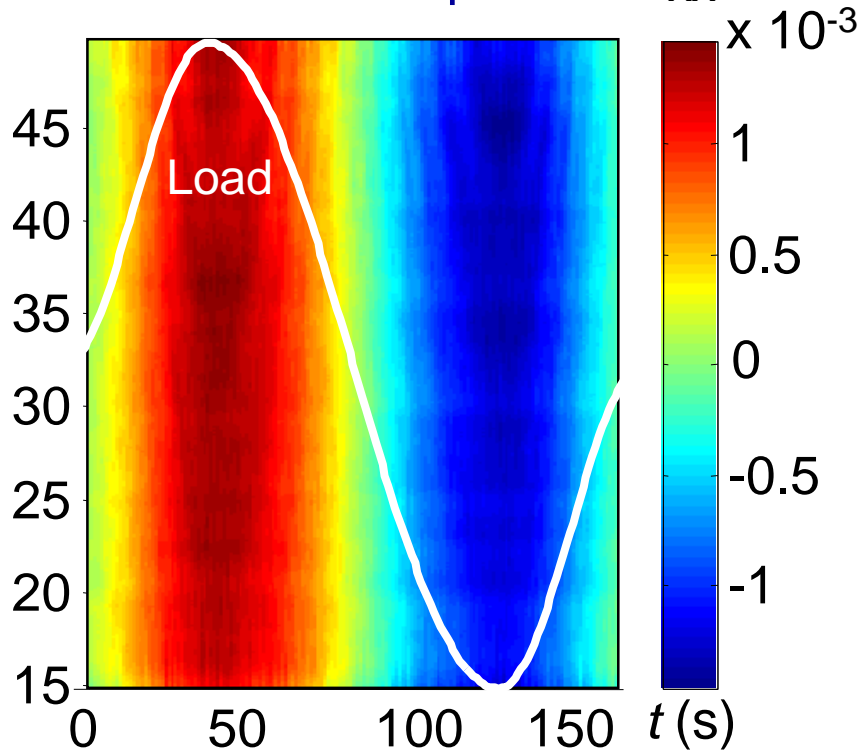


Jour 4

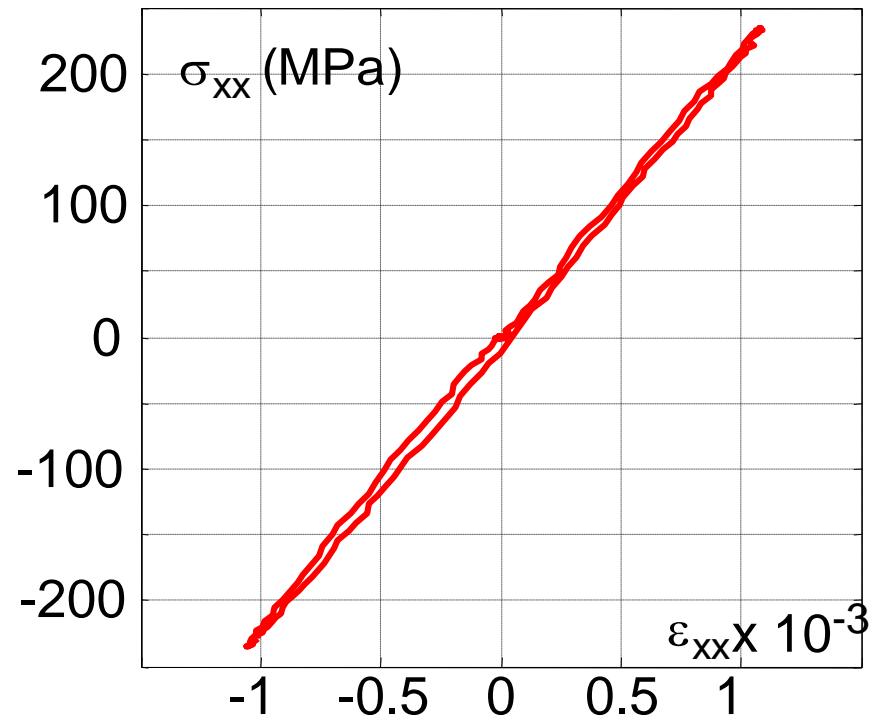
# Fatigue à grand nombre de cycles : réponse mécanique

DP 600 steel  $\otimes \hat{\sigma} = 471 \text{ MPa}$ ,  $R_f = -1$ ,  $f_L = 5.5 \cdot 10^{-3} \text{ Hz}$

Tensile Strain profile  $\varepsilon_{xx}(t, x)$



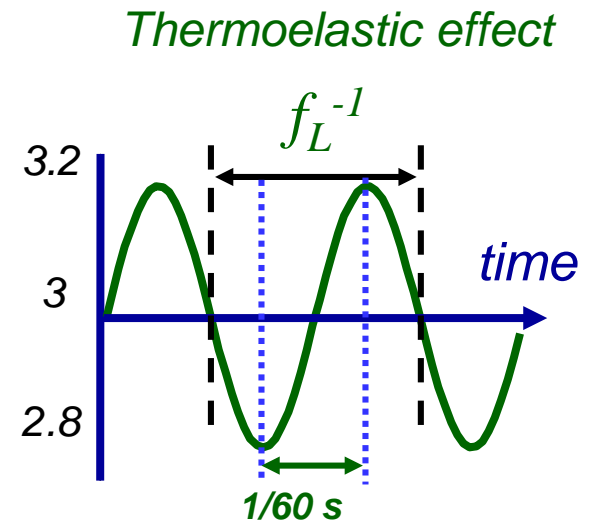
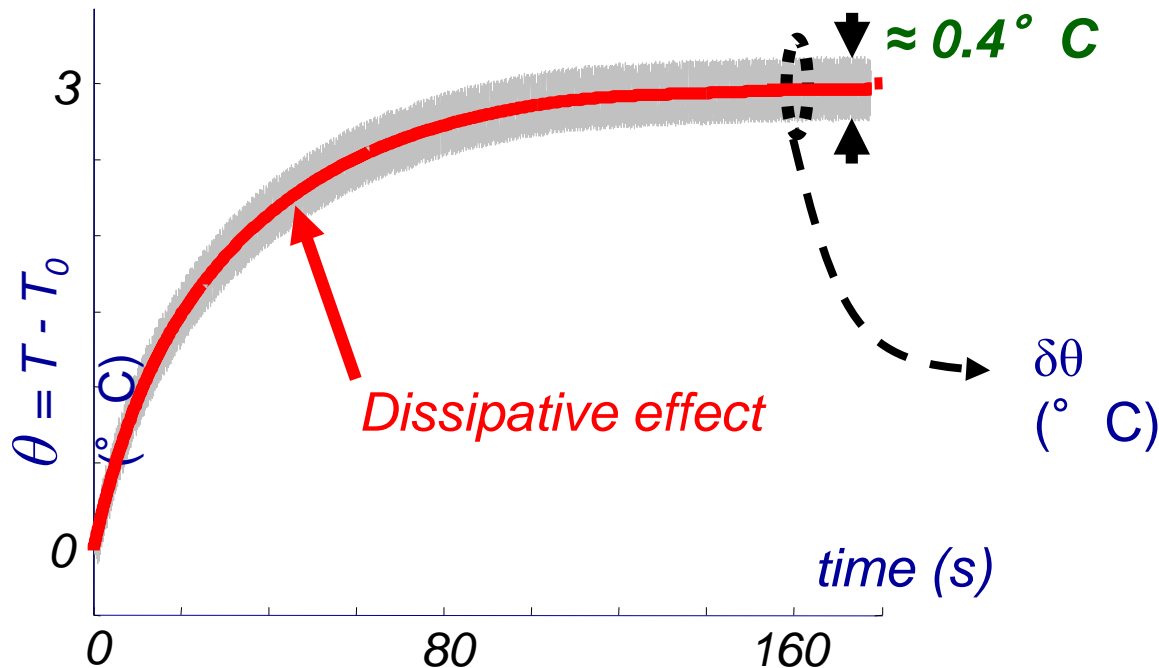
Hysteresis loop



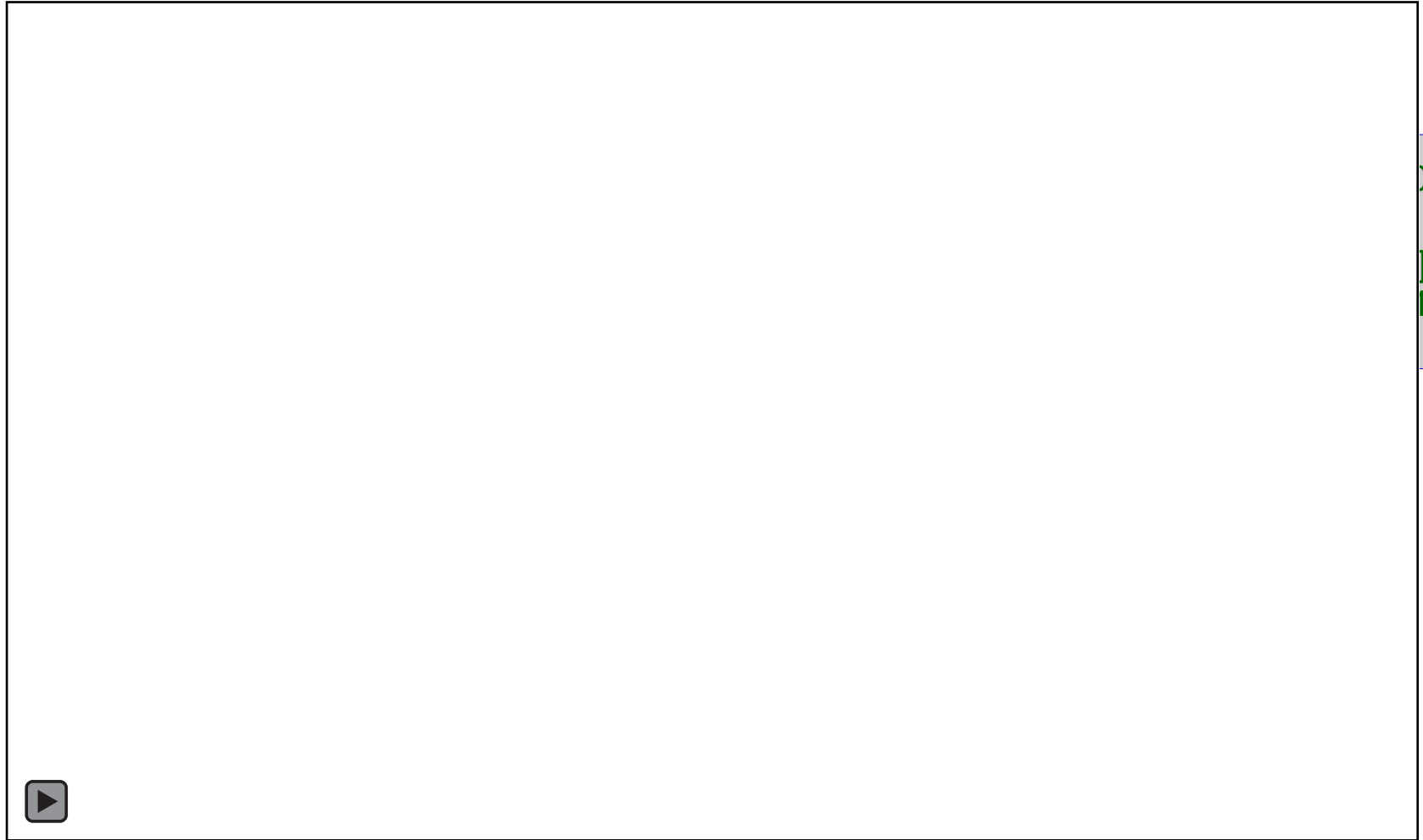
# Fatigue à grand nombre de cycles : réponse thermique

HCF test on DP 600 steel

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



# Fatigue à grand nombre de cycles : champs de température



04]

[4]

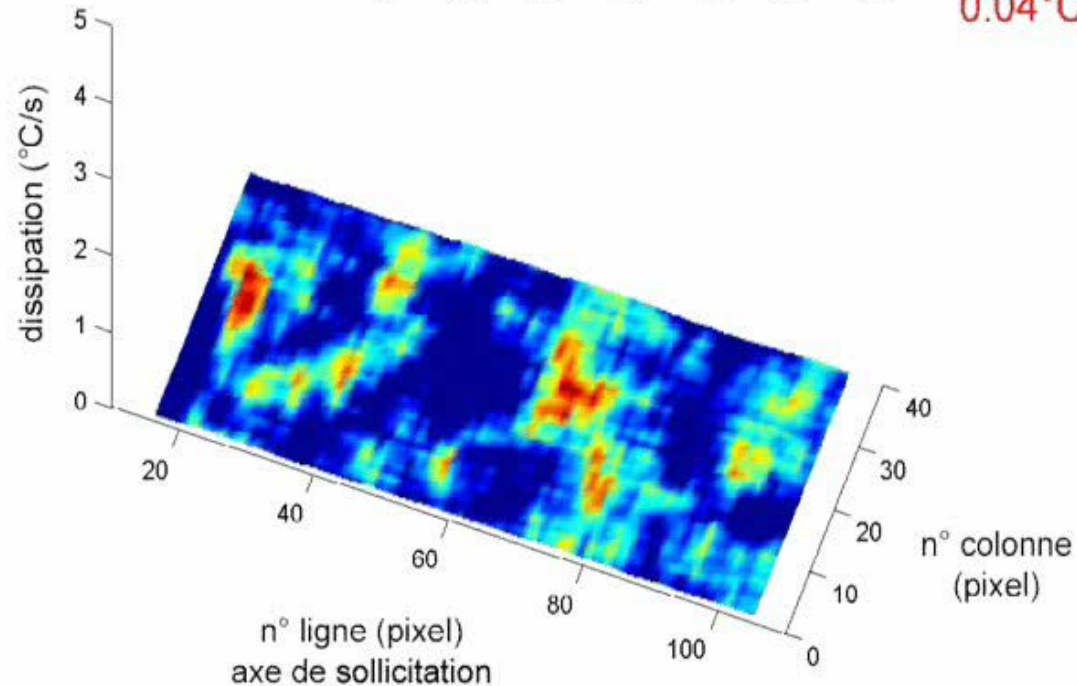
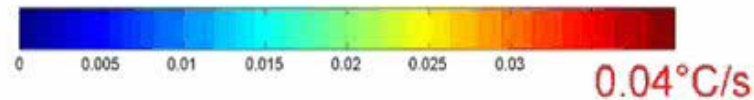


# Fatigue à grand nombre de cycles : champs de dissipation

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

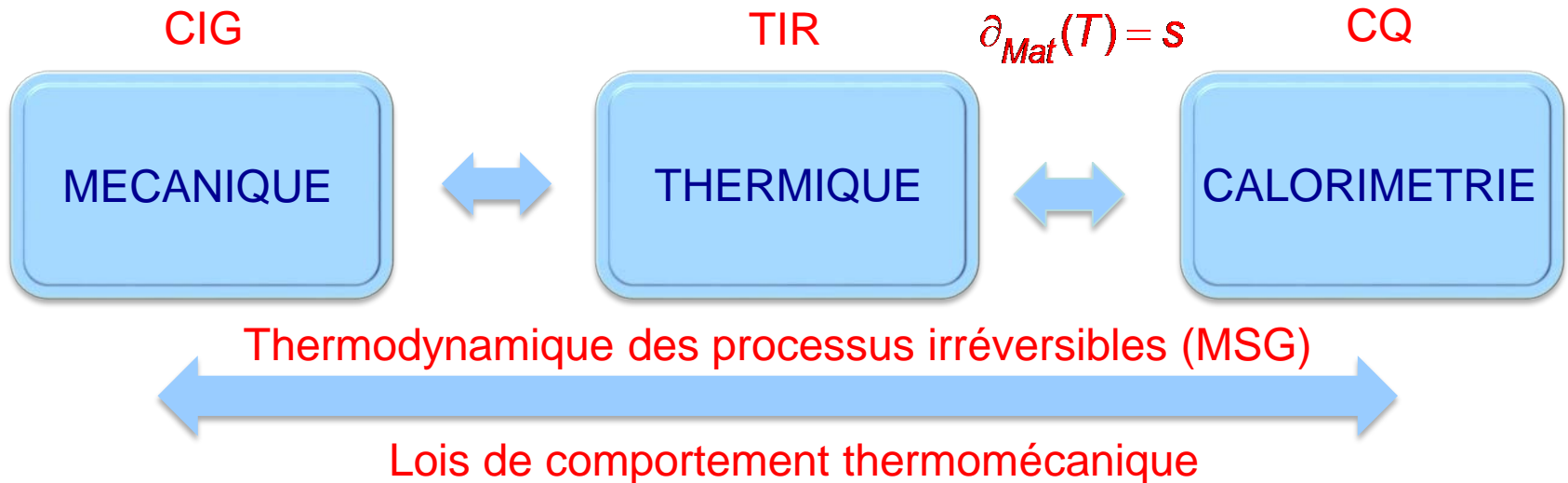
Dimension de la partie utile (h* $\Gamma$ e)	10x9x2.5mm <sup>3</sup>	Nombre de cycles par blocs	20000
Fréquence de sollicitation F <sub>s</sub>	50 Hz	Fréquence d'acquisition F <sub>a</sub>	19 Hz
Temps du bloc	400s	Résolution spatiale	0.196 mm/pixel
Lieu de fissuration	Pixel 98x6	ligne limite de la zone utile	35 à 86

0 cycles 20000



# Que retenir de tout cela ?

- Thermographie IR quantitative et comportement des matériaux



- Température, 1<sup>ère</sup> variable d'état, mais « non totalement intrinsèque »

Diffusion, conditions aux limites thermiques, effets de structures induits par les effets de couplage.

Equation de diffusion dépend de paramètres thermophysiques

# Que retenir de tout cela ?

## ❑ Sources de différentes natures

thermo-sensibilité, irréversibilités microstructurales

## ❑ Bilan d'énergie et loi de comportement

énergie stockée/loi d'état, énergie dissipée / lois d'évolution

## ❑ Comportement dépendant du temps

viscosité vs. couplage thermomécanique

## ❑ Effet « matériau » vs. effet « structure »

(couplage thermomécanique + diffusion) vs. localisation.

# Bon, ben alors on fait quoi c't'aprèm ?

## ❑ Thermoélasticité standard

TSA : avantages et limitations

Thermoélasticité : « un modèle qui ne manque pas d'aire ! »

## ❑ Viscoélasticité

Equivalence PT-Z (version mécanique)

Equivalence PT-Z (version thermomécanique)

Généralisation aux modèles «série-parallèle»

## ❑ Thermo. vs. Viscoélasticité

Effet mécanique et conséquences en viscoanalyse (DMA)

PT et Z en version thermoélastique