

## Modèles thermomécaniques pour la FàC en soudage

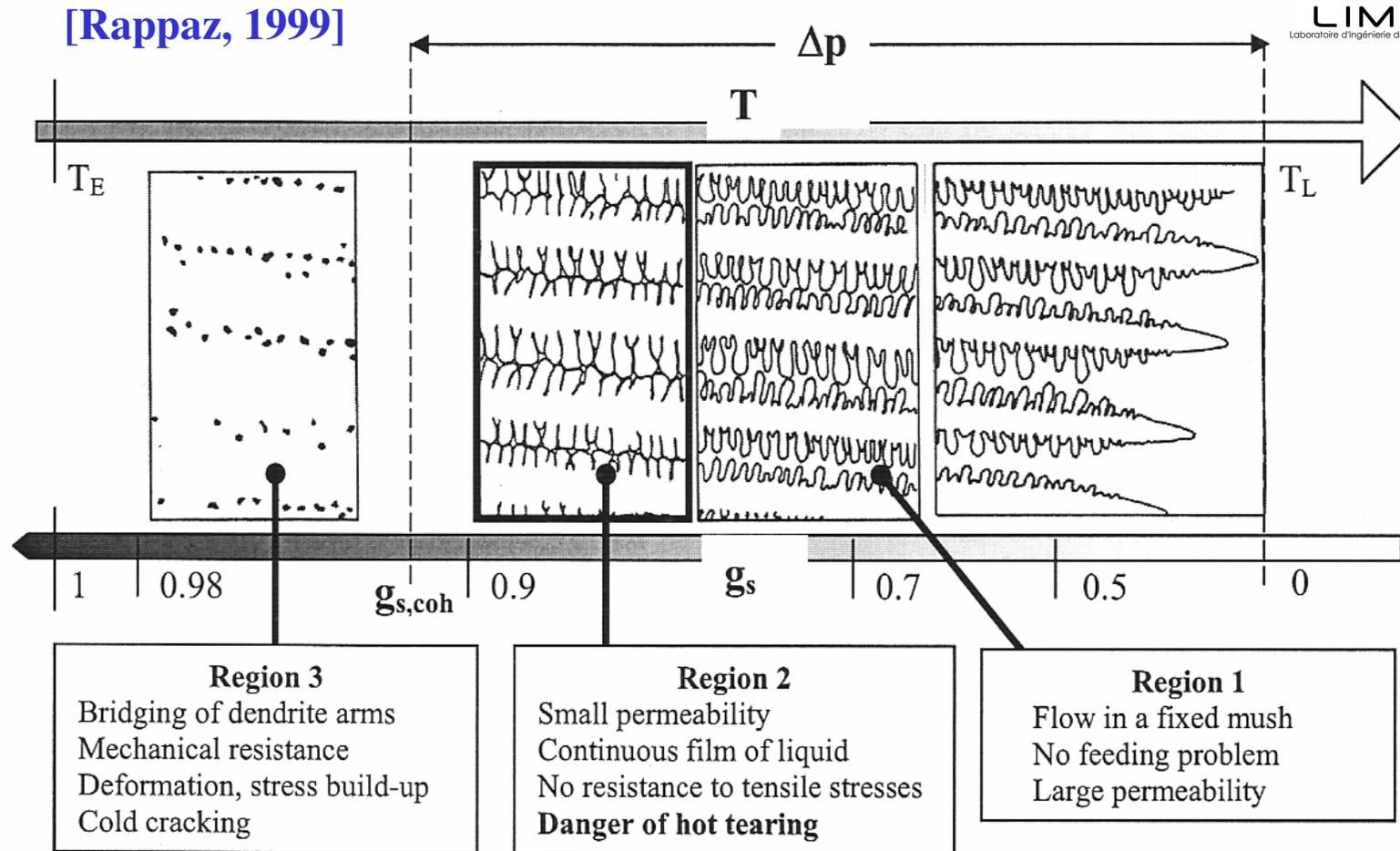
D. Carron, Ph. Pilvin (LIMatB - UBS Lorient), J.-M. Drezet (LSMX - EPFL)  
N. Kerrouault, J. Wisniewski, Minh Le, D. Ayrault, O. Asserin, A. Fontes, L. Forest



# Un scénario de fissuration en solidification



LIMATB  
Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne



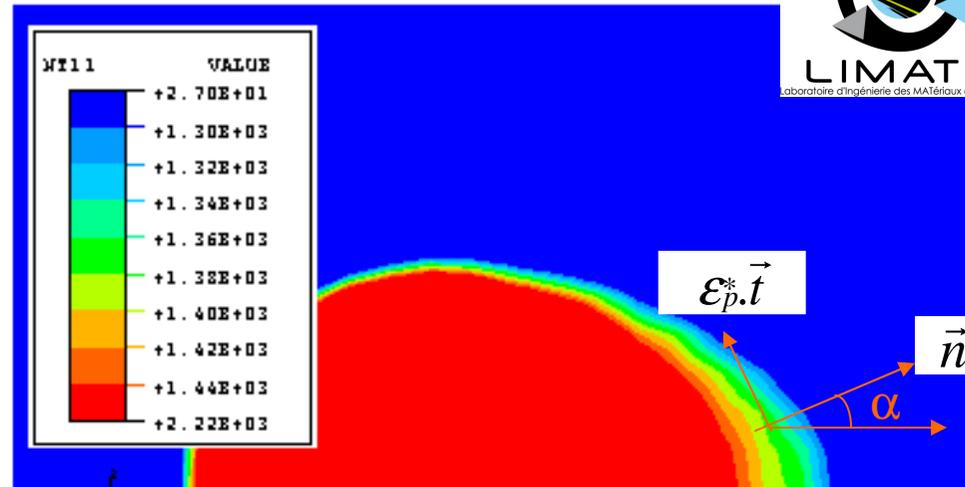
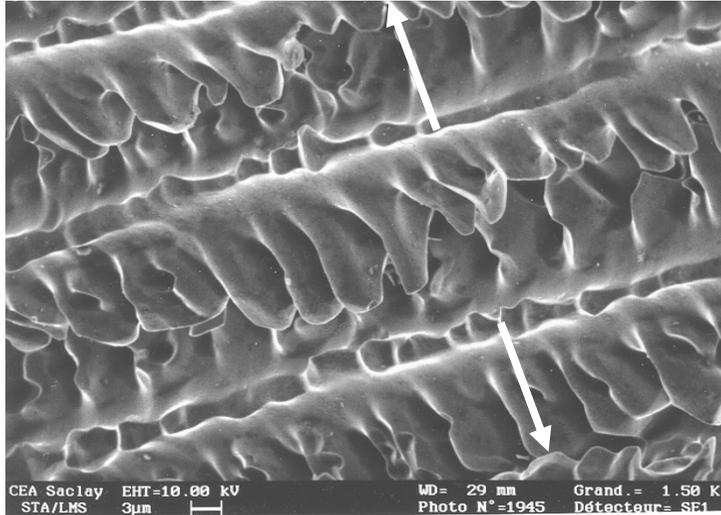
>> Fraction solide ( $f_s$ ) : un des paramètres clé de la FàC

# Un critère thermomécanique de FàC



LIMATB  
Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne

[Prokhorov, 1960 ; Kerrouault, 2000]

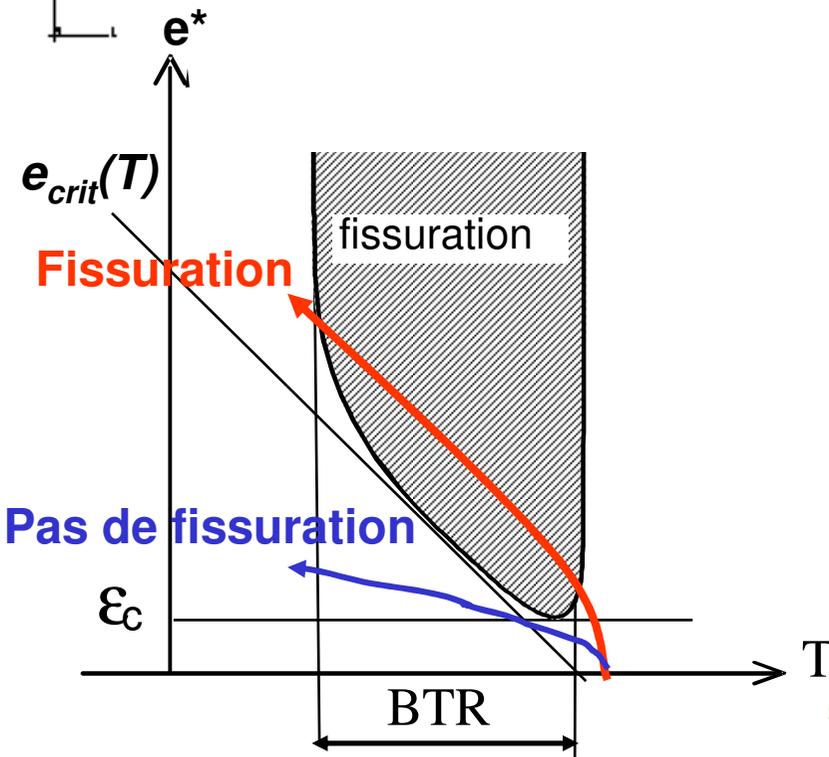


Rôle de la direction de solidification

Critère d'amorçage de FàC :

- $T \in BTR$

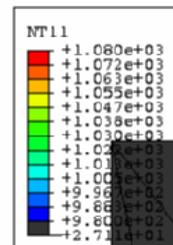
- $e^* \geq e_{crit}(T) \quad e^* = \sup_{t \in \perp} (\epsilon_p \vec{t} \cdot \vec{t})$



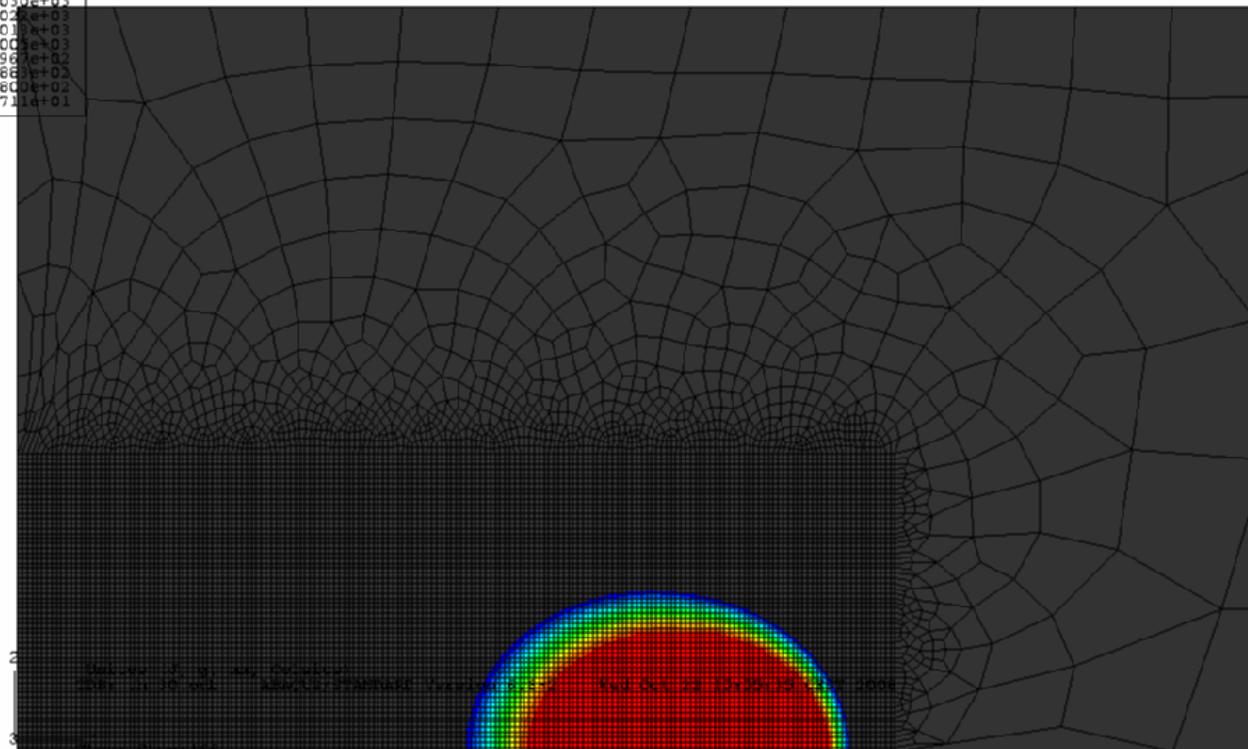
## Calcul EF sur essais de fissuration JWRI Cu-Cr-Zr



- i) Calculs bidimensionnels (couplage faible)
- ii) Calcul thermique avec ZF imposée (1080 °C)
- iii) Calcul mécanique en Contrainte Plane
- iv) Taille des éléments : 100x100  $\mu\text{m}$



Isothermes à t=2 s (largeur 30mm)



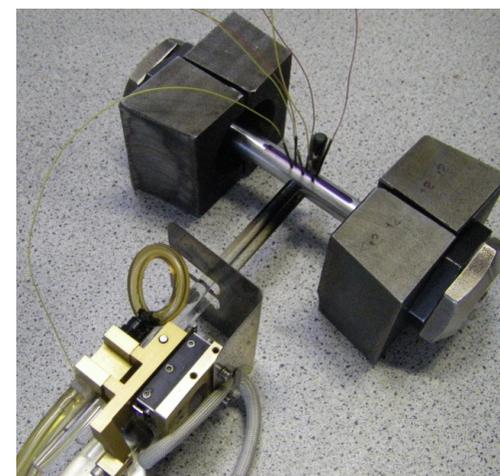
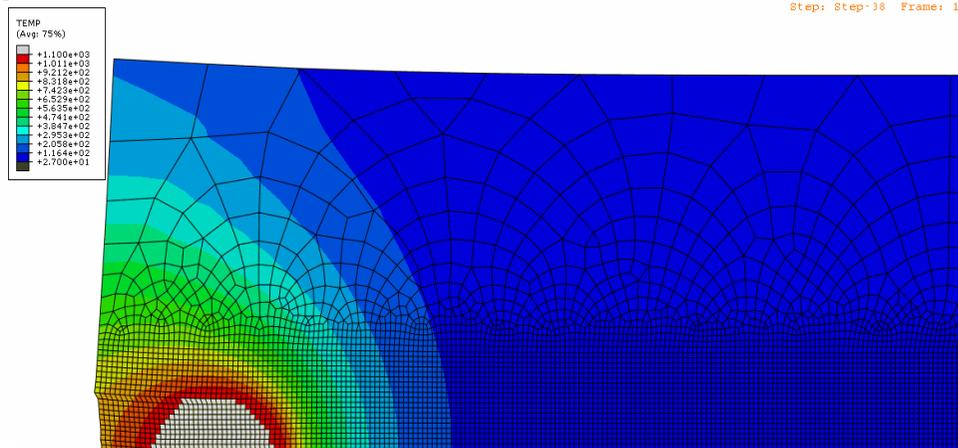
Increment: 13; Step Time = 1.2000E-02  
Primary Var: NT11  
Deformed Var: not set Deformation Scale Factor: not set

# Calcul EF sur essai de fissuration JWRI Cu-Cr-Zr

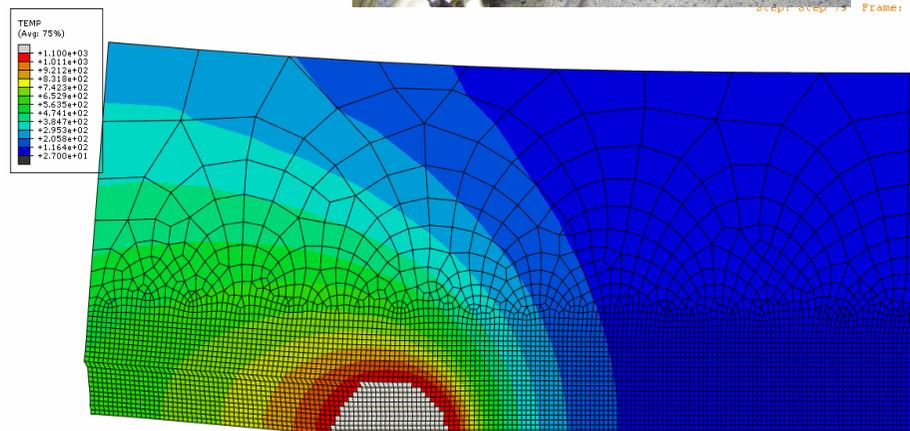
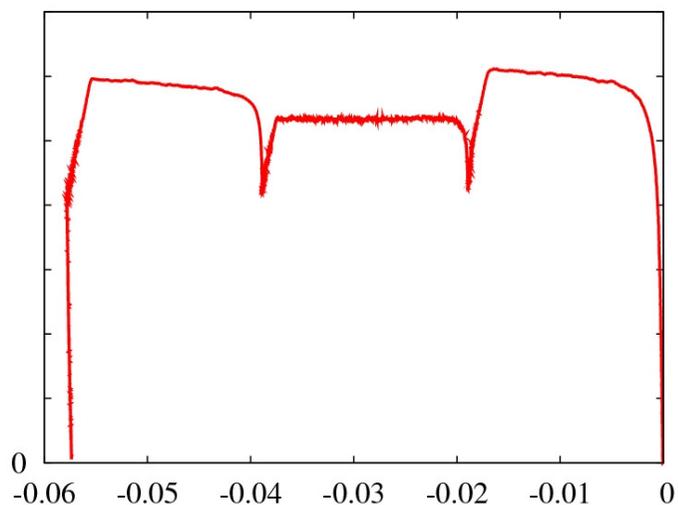


- i) Zone fondue > milieu « solide » : ThEVP peu compressible
- ii) Zone pâteuse > milieu poreux saturé : ThEVP
- iii) ZAT et métal de base > milieu solide : ThEVP ou ThElastique

Step: Step-38 Frame: 1



Step: Step-77 Frame: 1

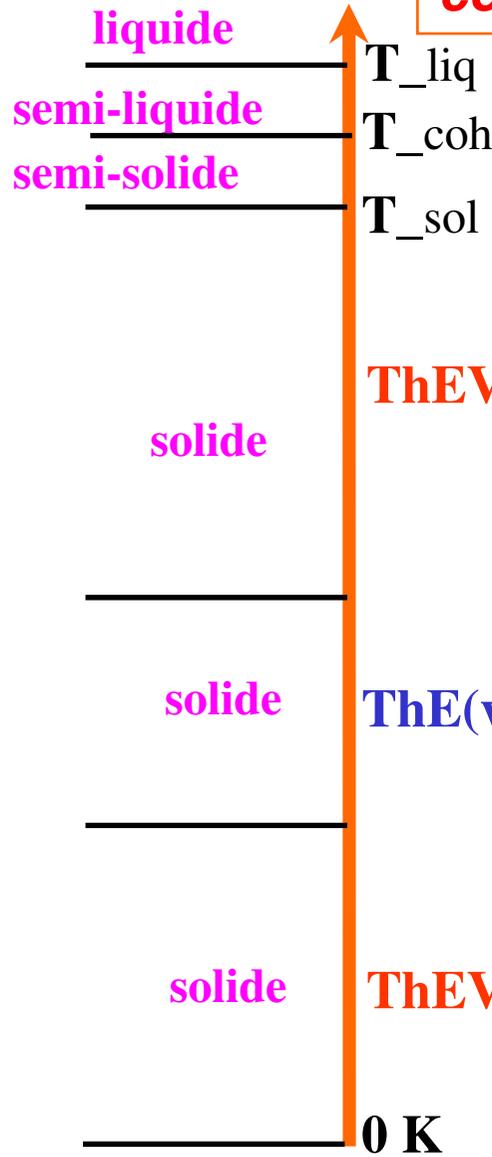


$\Sigma_{zz}$  (MPa) vs  $E_{tt}$  (-)

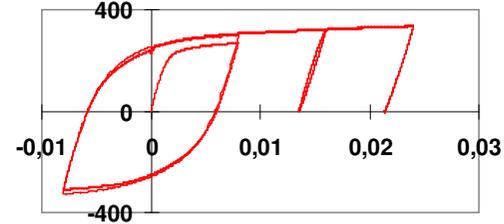
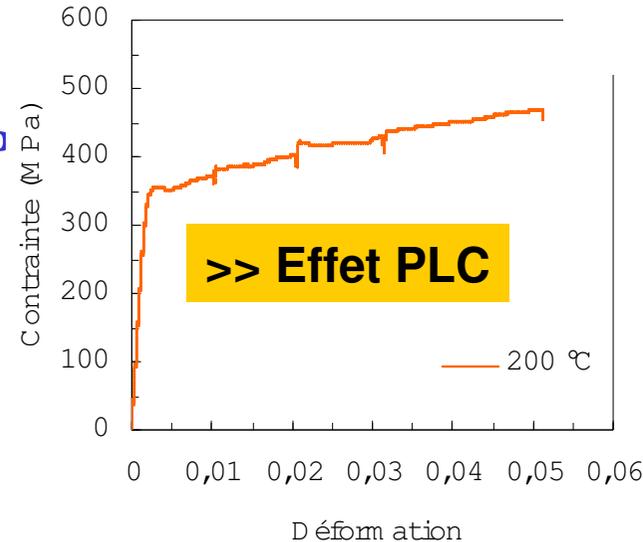
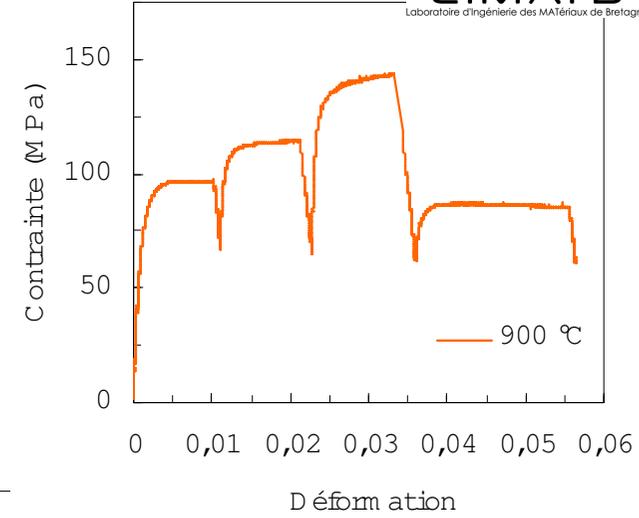
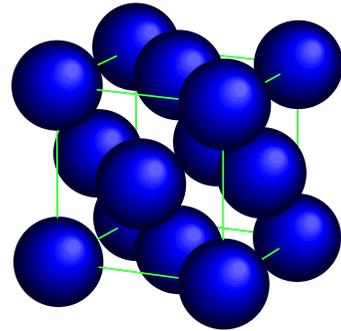
**Quelle démarche pour choisir une loi de comportement pour la FàC en soudage ?**



LIMATB  
Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne



>> Métaux CFC stables



Projet ODAS ; acier S355 ; [Saint-Germain, 2006]

# « Un état de l'art sur la simulation des distorsions en soudage » [Pilvin, jSNS 2007]



## Attentes industrielles de la SNS :

- Contraintes résiduelles
- Distorsions induites par les procédés

Résolution du point i) **mieux maîtrisée**

⇒ Plus d'équations, moins d'effets d'histoire...

⇒ **Clé** : description du **domaine d'élasticité @RT**

⇒ bonne modélisation de l'écroutissement :  $F(\Sigma_{ij}, R, X_{ij})$

Résolution du point ii) **plus difficile**

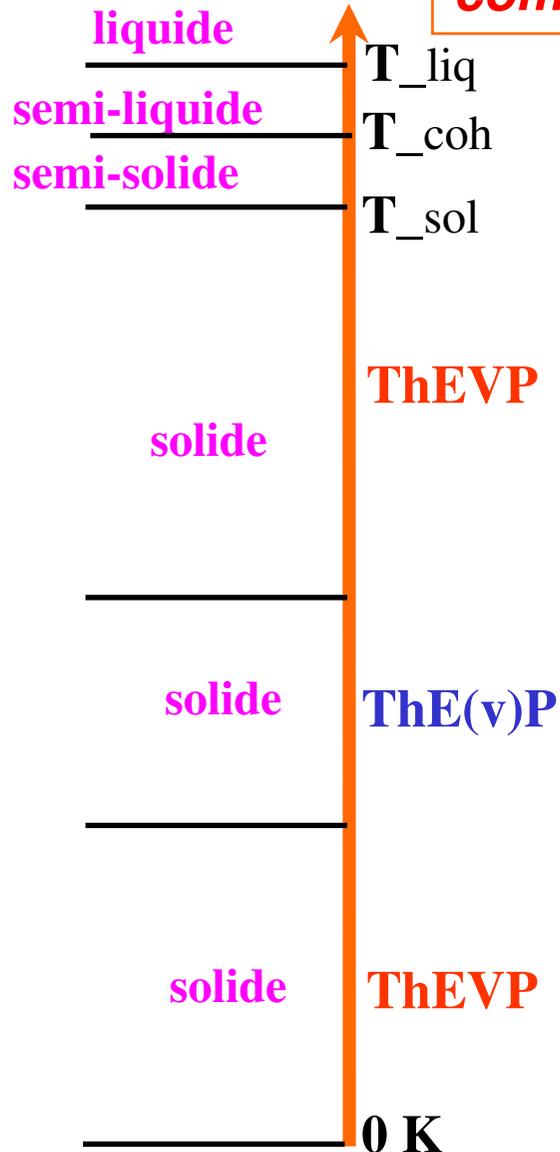
⇒ Moins d'équations, plus d'effets d'histoire...

⇒ **Clés** : CLs, description du procédé, ...

**Quelle démarche pour choisir une loi de comportement pour la FàC en soudage ?**



LIMATB  
Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne



**Aspects importants :**

- i) Base de données
- ii) Identification anisotherme
- iii) Effets d'histoire (> variables internes)
- iv) Continuité des « équations »
- v) ...

**>> Modèle EVP de Delobelle**

**Rhéologie à l'état pâteux :**

- i) Base de données ??
- ii) Milieux hétérogènes
- iii) Morphologie en évolution
- iv) Matériau hors équilibre
- v) ...

**>> cf Exposé de Bouffier, Suéry (SIMAP)**

## **Modèle de Delobelle « simplifié »** [Delobelle, 1990]



**10 ans** de développement avec EdF (SPH) sur AISI 316L (20°C à 700°C)

Modèle EVP unifié et sans seuil :  $E = E_e + E_p$

Ecrouissage cinématique (X) avec durcissement (Y) :

$$dX/dt = P [Y(p, z) dE_p/dt - (X - X') dp/dt] - \text{StaRec}(T)$$

$$dX'/dt = P' [Y(p, z) dE_p/dt - X' dp/dt]$$

Loi d'écoulement fortement non linéaire :

$$dp/dt = D(T) \left\{ \sinh \left[ (\Sigma - X) / N \right] \right\}^n$$

Pour une température : **une dizaine coefficients matériau...**

## Modèle EVP de Delobelle (suite)



> Prise en compte du **DSA** sur la variable de durcissement :  $Y(p, z)$

$$Y^* = [Y_0 + Y_\mu(p)] \{1 + \gamma_c z\}$$

$$dz/dt = - Q z dp/dt + (z_{sat} - z) / \tau_c$$

Durcissement « inverse » ( $Q > 0$ ) sur X avec  $dp/dt$ :

$$dX/dt = P [Y^* dE_p/dt - (X - X') dp/dt] - StaRec(T)$$

Tôle AISI 316 (CEA) (essais à **550°C**) :

>> identification avec SiDoLo ; pas de restauration de X

Un seul essai avec une histoire de sollicitation complexe :

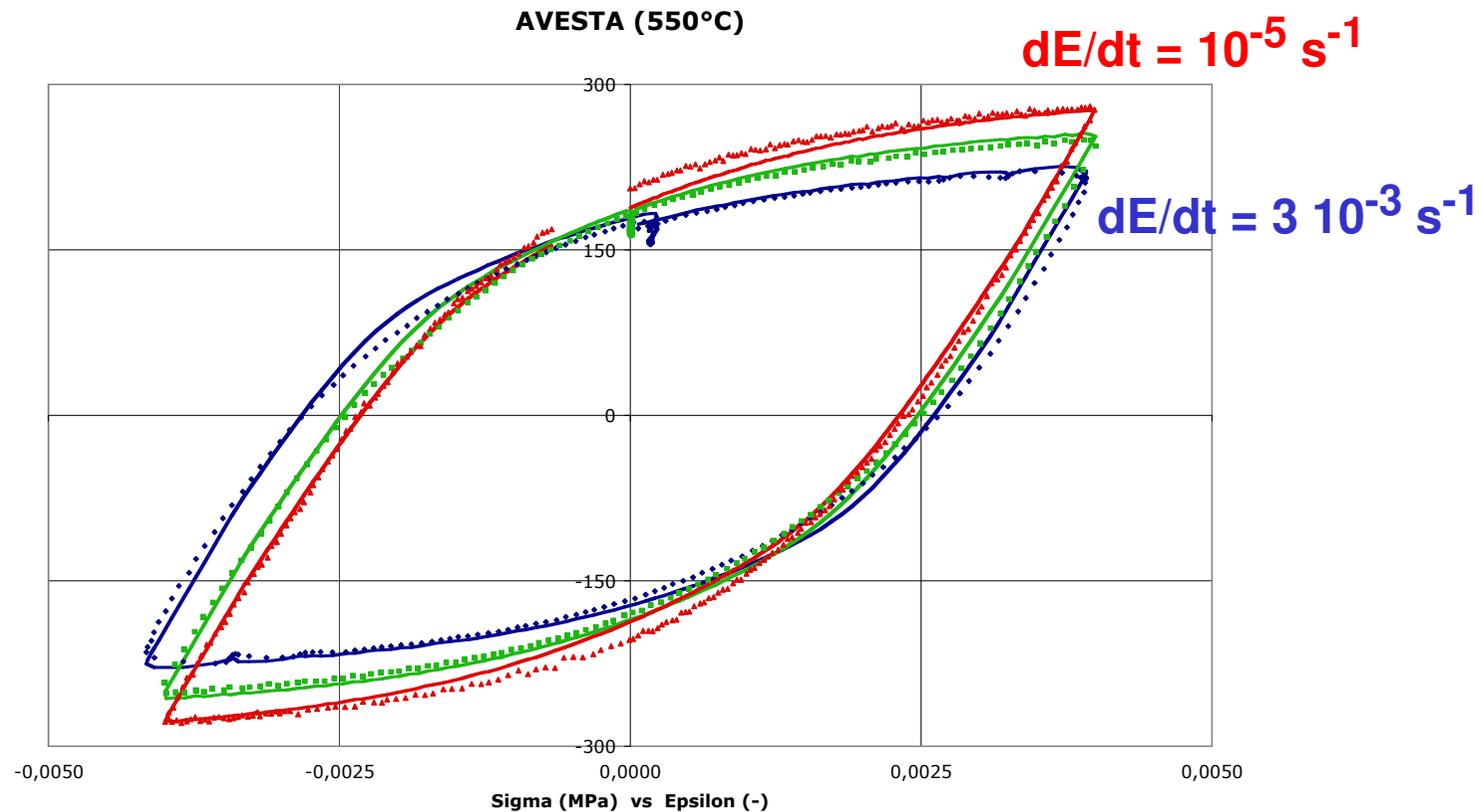
3 amplitudes en déformation : 0.002, 0.004, 0.008

3 vitesses :  $10^{-5}$ ,  $2 \cdot 10^{-4}$ ,  $3 \cdot 10^{-3}$  (s<sup>-1</sup>)

# Résultats identification du modèle avec DSA

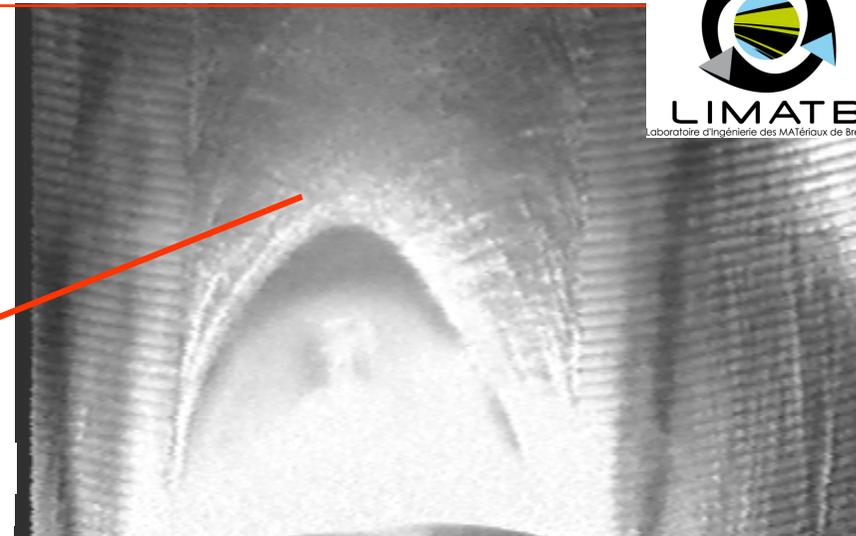
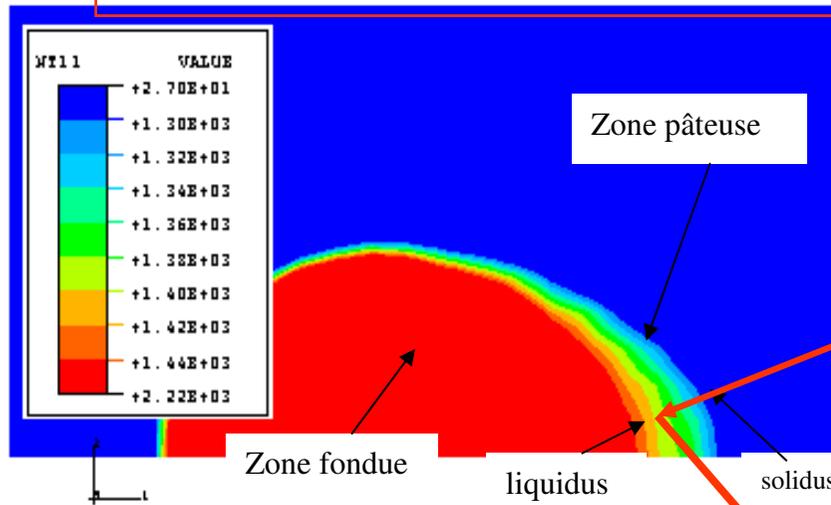


Sensibilité inverse à la vitesse de déformation bien décrite



[Catalao, 2005 ; Gentet, 2010]

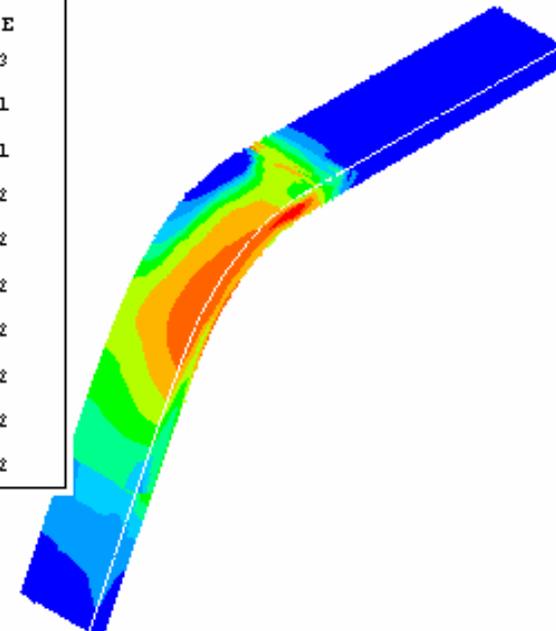
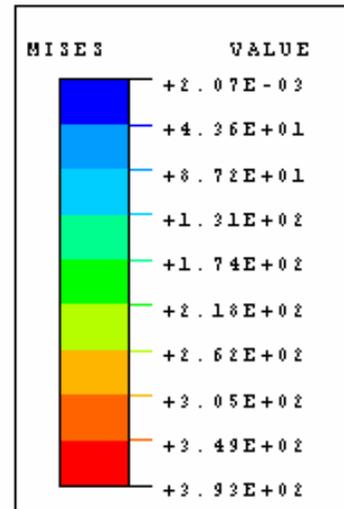
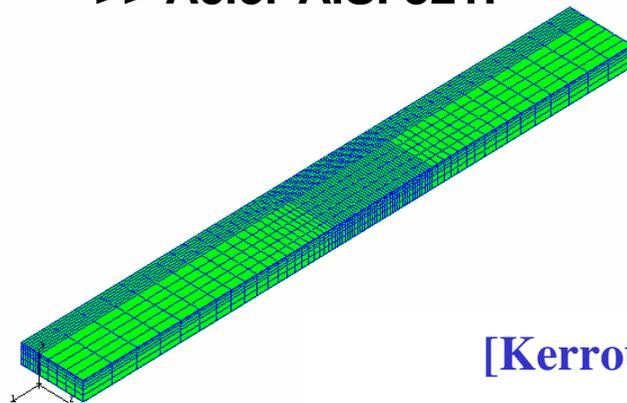
# Essai Varestraint - amorçage des fissures (BTR)



**Tsup : 1415°C**

**BTR=[1300°C ; 1415°C]**

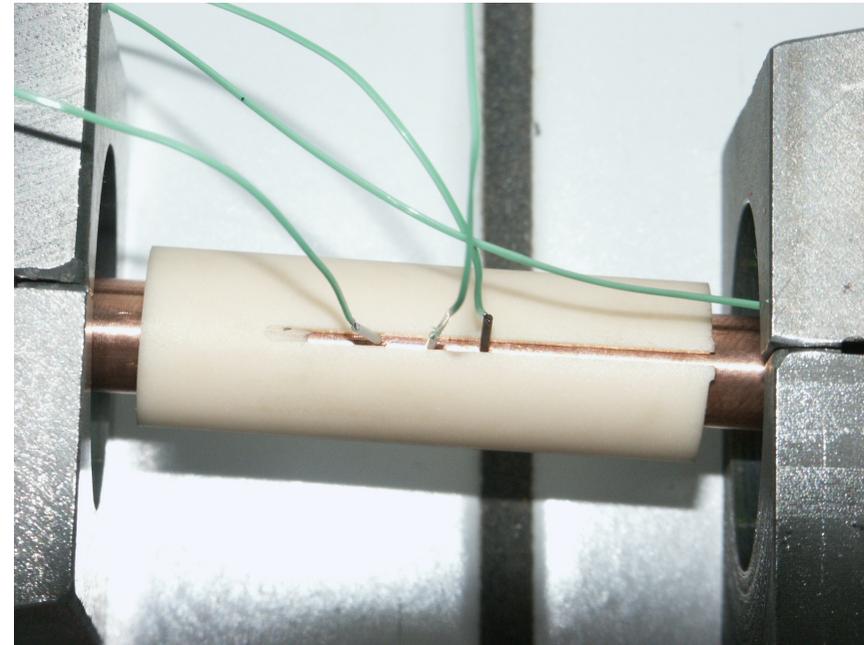
**>> Acier AISI 321F**



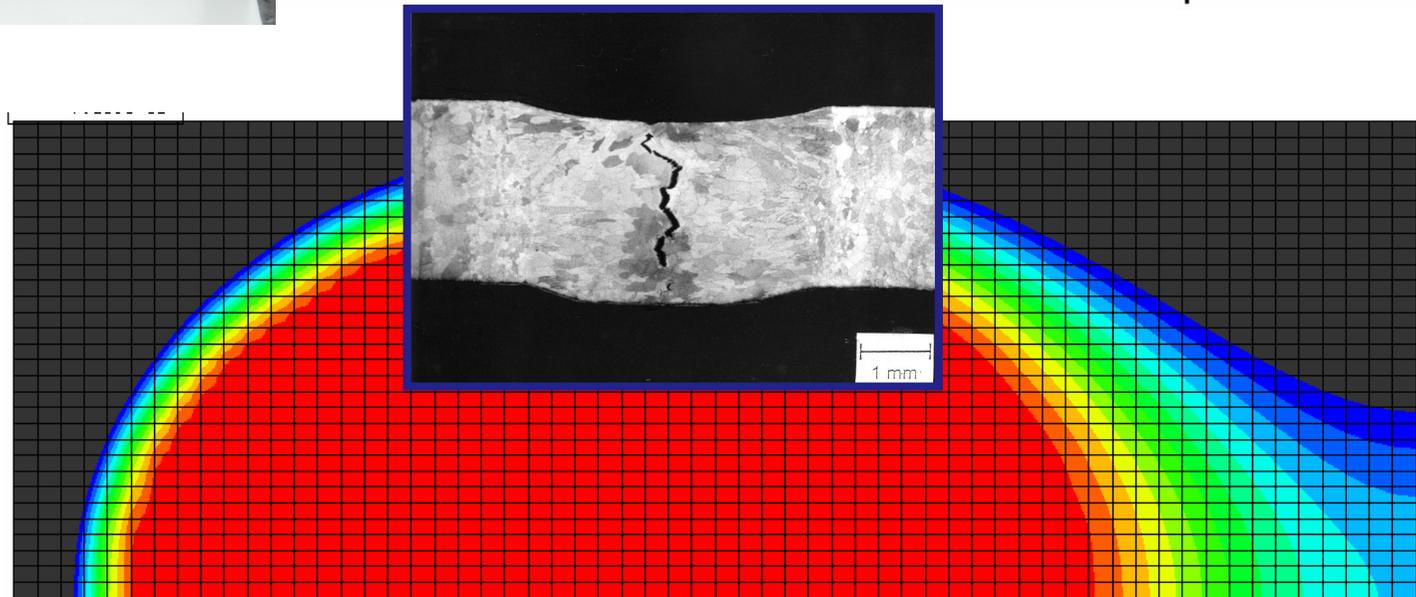
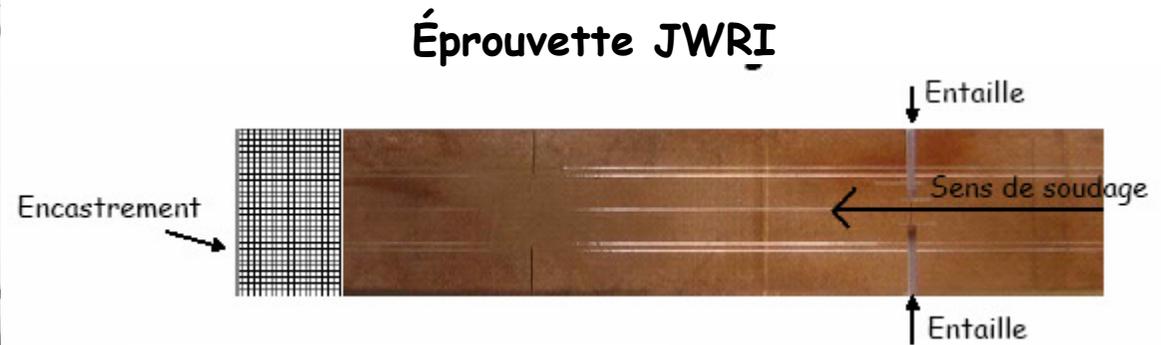
[Kerrouault, 2000]

- **Essais en zone pâteuse (Gleeble 3500)**

>> **Alliage CuCrZr :  $T_{sol} = 1038^{\circ}\text{C}$  ;  $T_{liq} = 1080^{\circ}\text{C}$**



>> **Mise au point délicate selon les alliages**



## Modèles thermomécaniques pour la FàC en soudage

D. Carron, Ph. Pilvin (LIMatB - UBS Lorient), J.-M. Drezet (LSMX - EPFL)  
N. Kerrouault, J. Wisniewski, Minh Le, D. Ayrault, O. Asserin, A. Fontes, L. Forest

