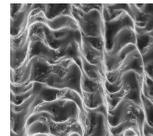




energie atomique • energies alternatives

Etude de la sensibilité à la fissuration à chaud d'un alliage CuCrZr au cours du soudage par faisceau d'électrons



J. WISNIEWSKI, Commissariat à l'Energie Atomique

J.-M. DREZET, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

P. PILVIN - D. CARRON, Université de Bretagne-Sud

D. AYRAULT - M. BARRAS, Commissariat à l'Energie Atomique

F. PRIMAUX, Le Bronze Industriel





CONTEXTE ET OBJECTIF DE L'ETUDE

- Alliages de cuivre pour composants face aux plasma dans machines fusion : évacuent flux de chaleur très importants
- CuCr1Zr DIN 17672 : bonnes propriétés physiques et thermomécaniques jusqu'à 600 °C

MAIS très forte sensibilité à la **fissuration à chaud**
lors du soudage homogène par faisceau d'électrons

↳ Objectif de l'étude

Proposer un **critère de fissuration à chaud**

Utilisable pour la définition d'un test de réception matière au regard de la fissuration à chaud pour une fabrication donnée



TRAVAUX PRESENTES

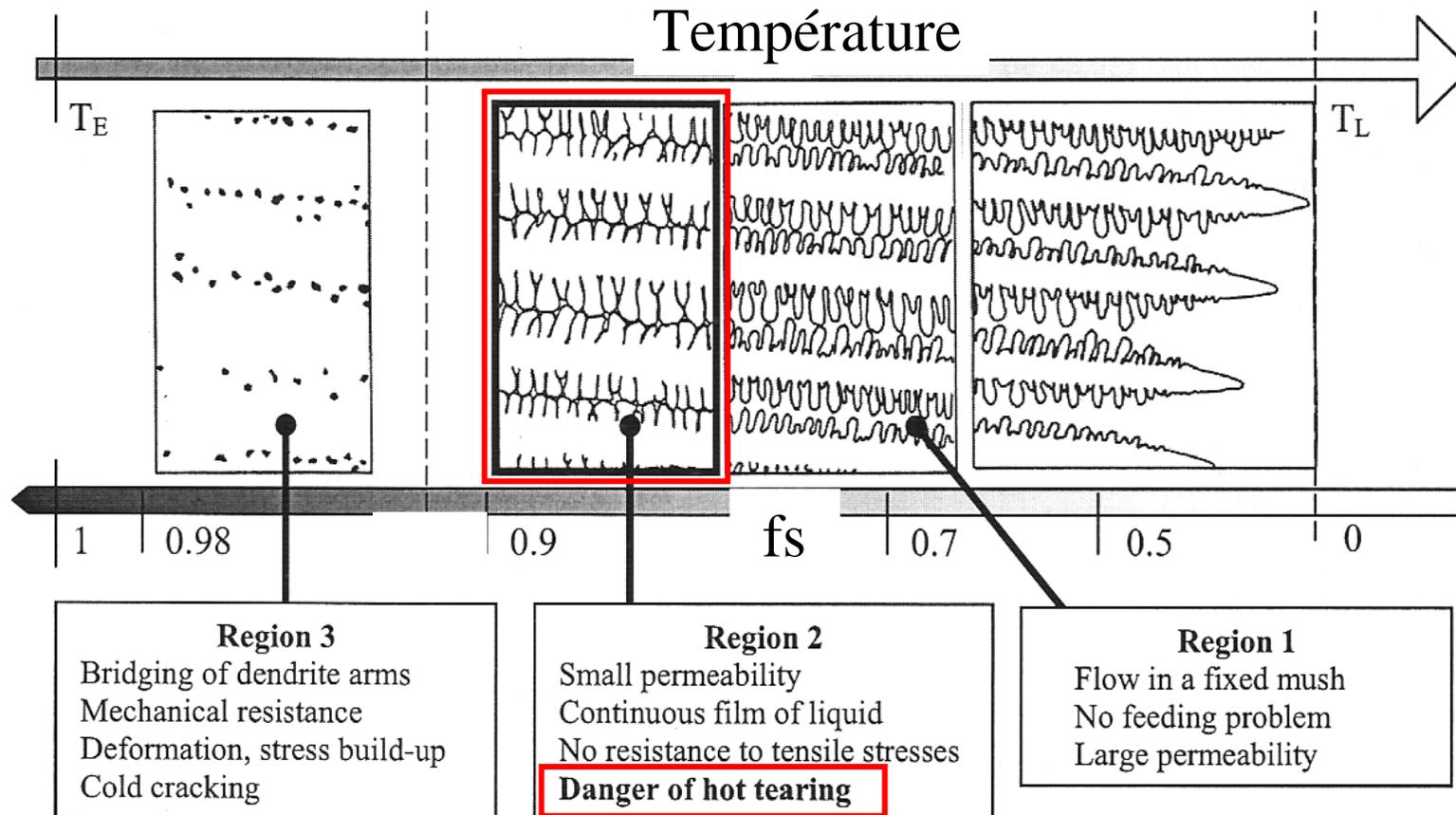
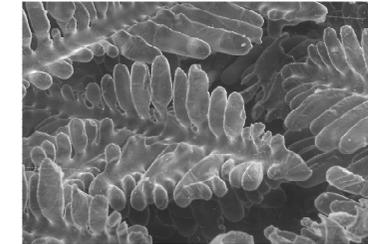
↩ Evaluation des conditions thermomécaniques
d'amorçage d'un défaut de fissuration à chaud
pour l'alliage CuCrZr

Calibration critères : calcul d'indicateurs



energie atomique • energies alternatives

LA FISSURATION A CHAUD DE SOLIDIFICATION



M. Rappaz et al., TMS Annual Meeting, 14-18 march 2004



PLAN DE LA PRESENTATION

1. Méthodologie

2. Résultats expérimentaux des essais de soudage instrumentés

3. Caractérisations du matériau

4. Analyse numérique et calcul des indicateurs

5. Conclusions et perspectives



énergie atomique • énergies alternatives

1. Méthodologie

2. *Résultats expérimentaux des essais de soudage instrumentés*

3. *Caractérisations du matériau*

4. *Analyse numérique et calcul des indicateurs*

5. *Conclusions et perspectives*



energie atomique • energies alternatives

METHODOLOGIE

Approche couplée calculs/expériences

- Sélection de critères d'amorçage de la fissuration à chaud de solidification
- Données expérimentales à partir **d'essais instrumentés** de soudage par faisceau d'électrons discriminants
Fissurant/Non Fissurant
- **Calculs numériques** des configurations pour caractériser les conditions thermomécaniques de l'amorçage d'une fissure et **calibrer les critères**



Les critères

- Critères d'amorçage de la fissuration à chaud de la littérature
- Deux critères à deux échelles
 - Un critère **TM**
 - Le critère **RDG**



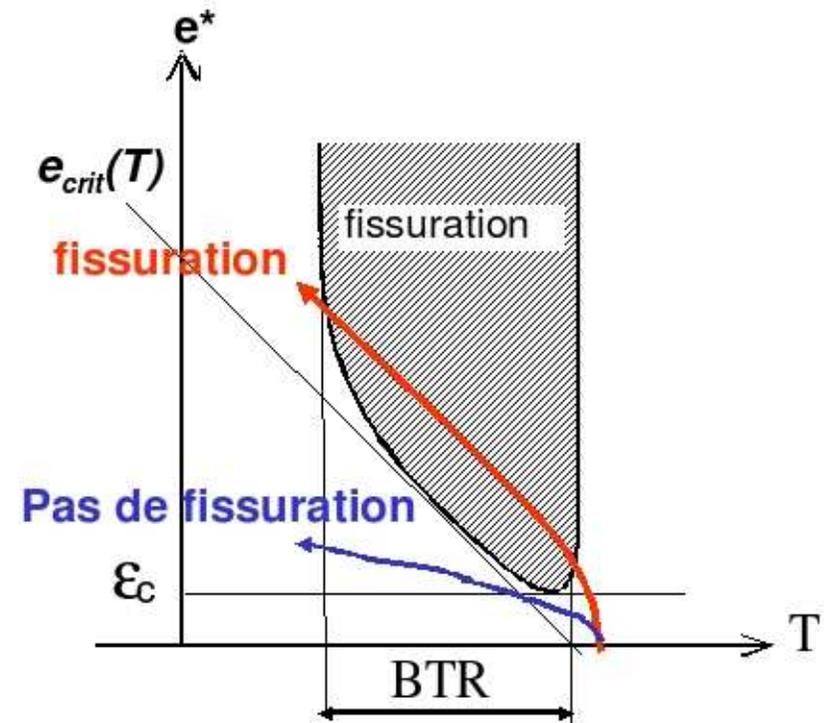
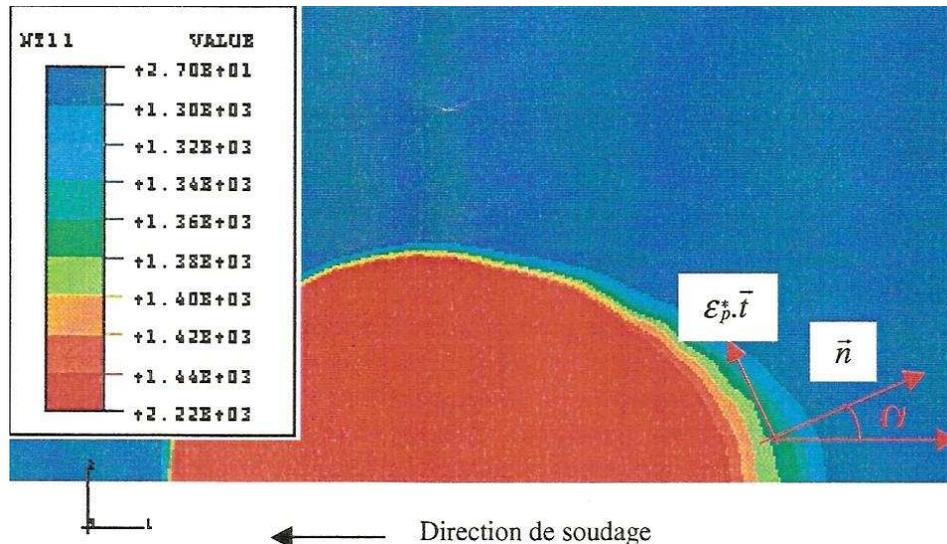
energie atomique • energies alternatives

LES CRITERES

Le critère TM

- Critère à l'échelle « macroscopique » de l'éprouvette basé sur l'analyse de la déformation viscoplastique à l'arrière du bain - Grandeurs locales calculées par SNS
- Validé pour deux types d'essais de fissuration à chaud

N. Kerrouault. Fissuration à chaud en soudage d'un acier inoxydable austénitique. Thèse Mécanique et Matériaux, Ecole centrale de Paris, Oct. 2000



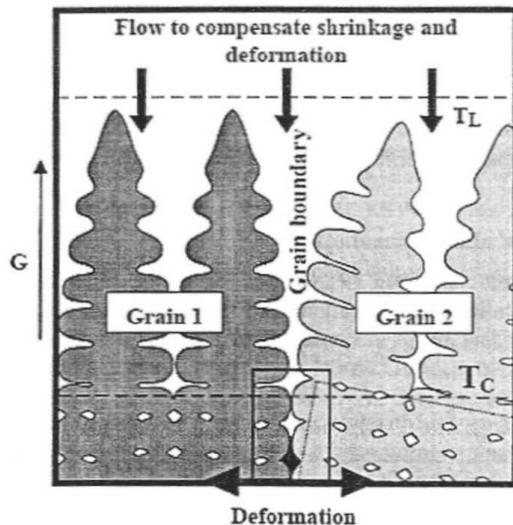


energie atomique • energies alternatives

LES CRITERES

Le critère RDG

- Critère phénoménologique d'amorçage de la fissuration à chaud à l'échelle de la dendrite
- Basé sur le calcul de la chute de pression dans le liquide interdendritique
- Système biphasique solide-liquide



$$p = p_m - \Delta p$$

$$p_c = p_m - \Delta p_{\max}$$

Si $\Delta p = \Delta p_{\max}$ alors $p = p_c \rightarrow \text{FàC}$

Calcul de Δp à partir de $\dot{\epsilon}$ $\Delta p = \phi_A + \phi_B \dot{\epsilon}$

$$\Delta p = f(\mu, \beta, f_s, T_L, T_{coa}, v_T, \lambda_2, G, \dot{\epsilon})$$

M. Rappaz, J.-M. Drezet, M. Gremaud. A new hot tearing criterion. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 30A, Feb. 1999



energie atomique • energies alternatives

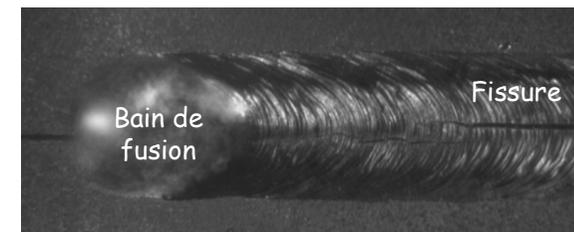
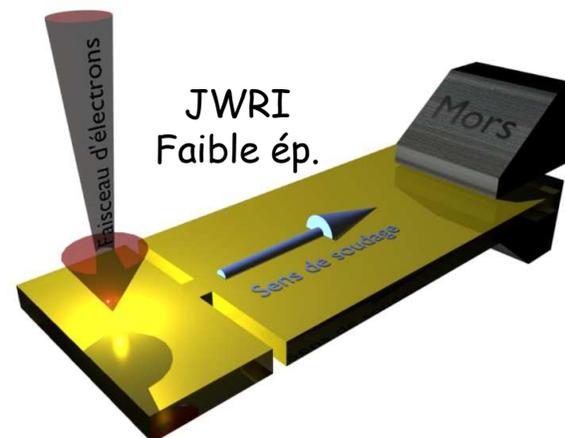
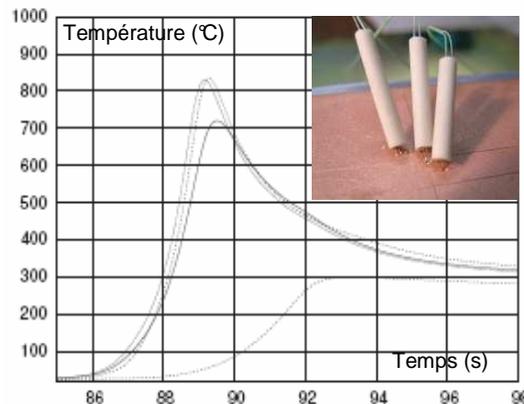
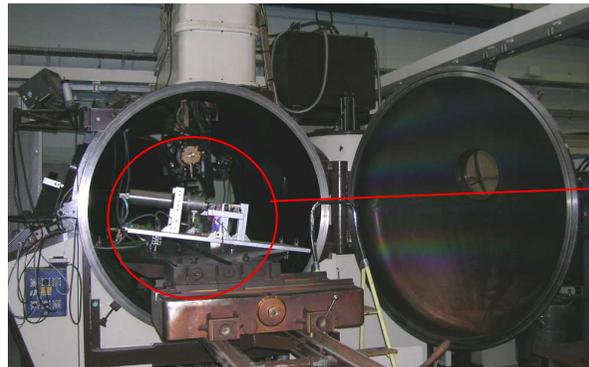
1. *Méthodologie*
2. **Résultats expérimentaux des essais de soudage instrumentés**
3. *Caractérisations du matériau*
4. *Analyse numérique et calcul des indicateurs*
5. *Conclusions et perspectives*



energie atomique • energies alternatives

Essais instrumentés

Essais instrumentés dans enceinte FE sur éprouvettes de type JWRI, de largeur variable **Fissurant/Non Fissurant**



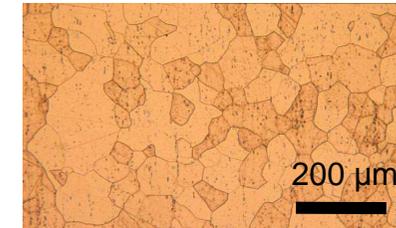


energie atomique • énergies alternatives

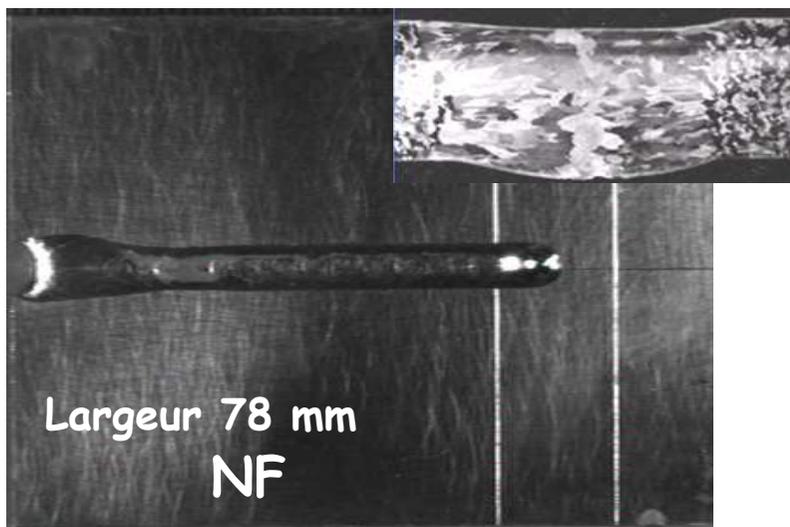
RESULTATS EXPERIMENTAUX DES ESSAIS DE SOUDAGE INSTRUMENTES

Matériau

- Alliage CuCr1Zr (DIN 17672 : Cr 0.5-1.2 - Zr 0.03-0.3 Pds%)
- Rond diamètre 100 mm, élaboré par Le Bronze Industriel
- Mise en solution → Filage → Trempe à l'eau → Revenu



Essais JWRI



Largeur (mm)	F	NF
30	3x	
40	3x	
50	2x	2x
60		1x
78		3x

↪ Largeur critique
proche de 50 mm



énergie atomique • énergies alternatives

1. *Méthodologie*
2. *Résultats expérimentaux des essais de soudage instrumentés*
3. **Caractérisations du matériau**
4. *Analyse numérique et calcul des indicateurs*
5. *Conclusions et perspectives*

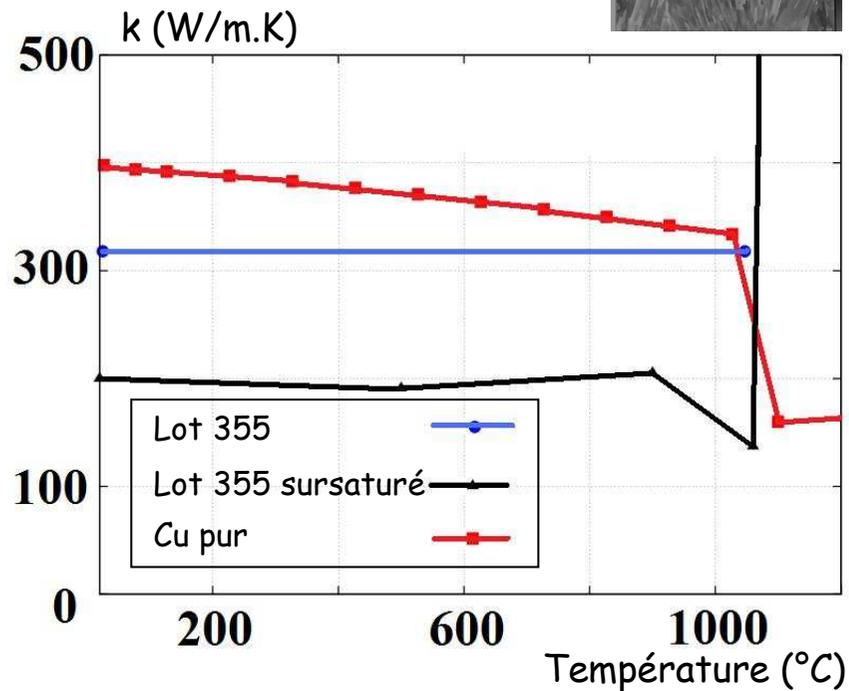
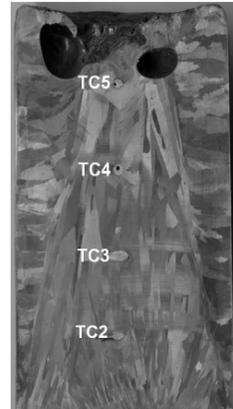


energie atomique • energies alternatives

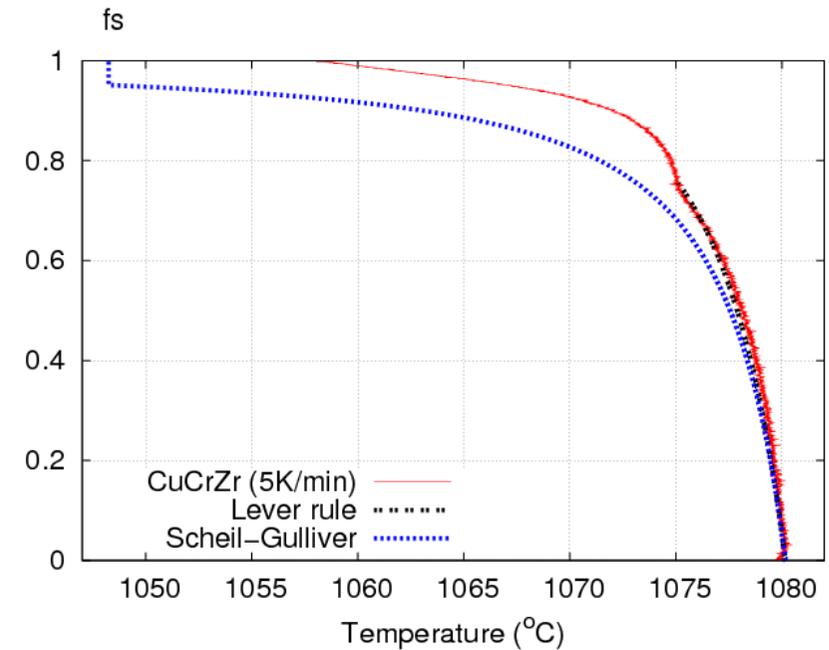
CARACTERISATIONS DU MATERIAU

Propriétés thermo-physiques (EPFL)

Conductivité thermique Coulée 1D



Chemin de solidification - SPTA

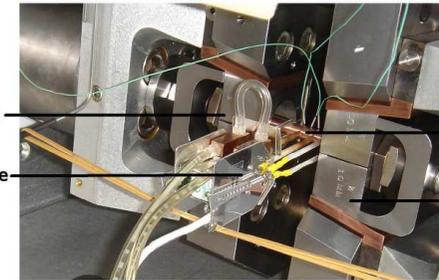




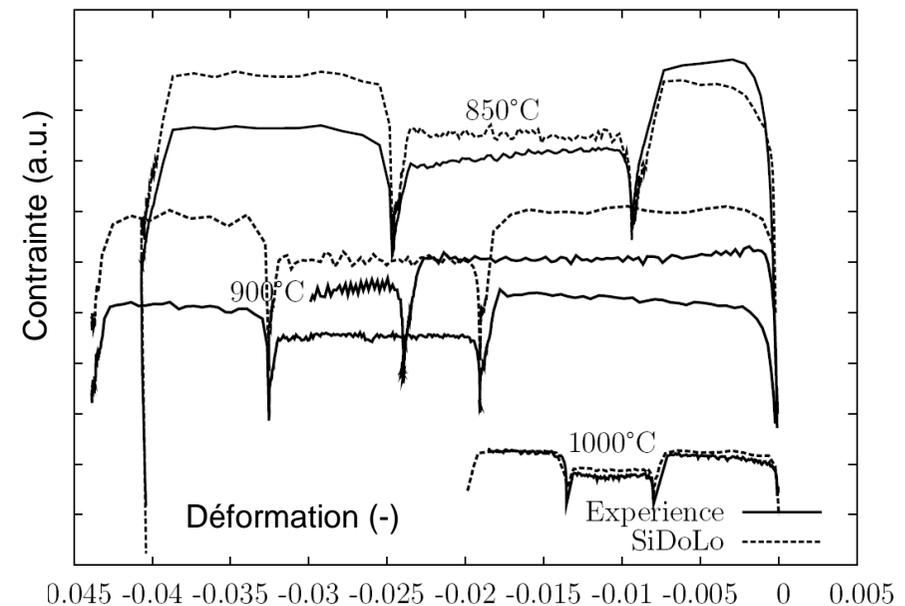
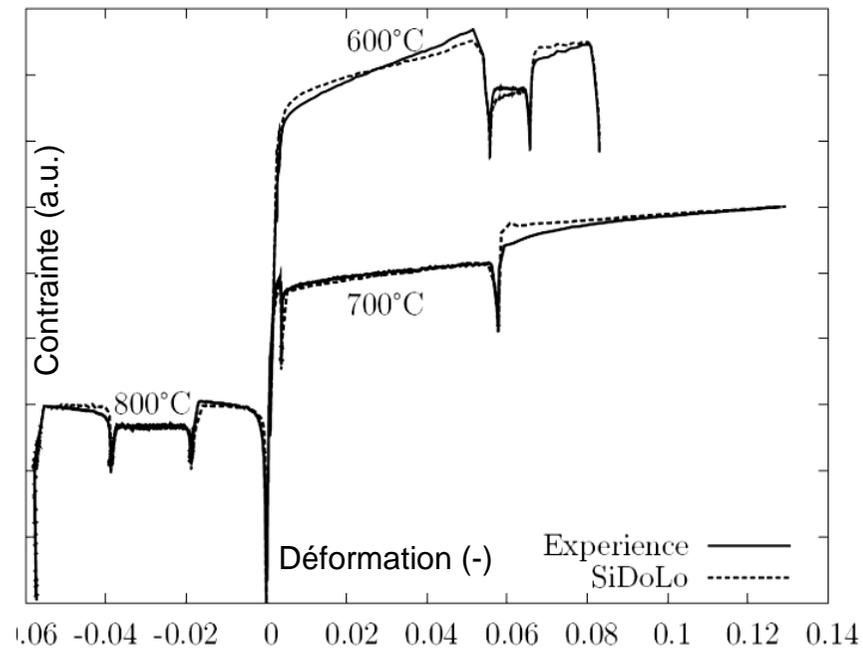
energie atomique • energies alternatives

CARACTERISATIONS DU MATERIAU

Essais de caractérisation mécanique
Gleeble (UBS) de 20°C à 1000°C



↳ Identification loi de comportement
élastoviscoplastique





énergie atomique • énergies alternatives



1. Méthodologie



2. Résultats expérimentaux des essais de soudage instrumentés



3. Caractérisations du matériau



4. Analyse numérique et calcul des indicateurs



5. Conclusions et perspectives



énergie atomique • énergies alternatives

ANALYSE NUMERIQUE ET CALCUL DES INDICATEURS

Calculs numériques - Abaqus 6.8

Analyse 2D, contraintes planes

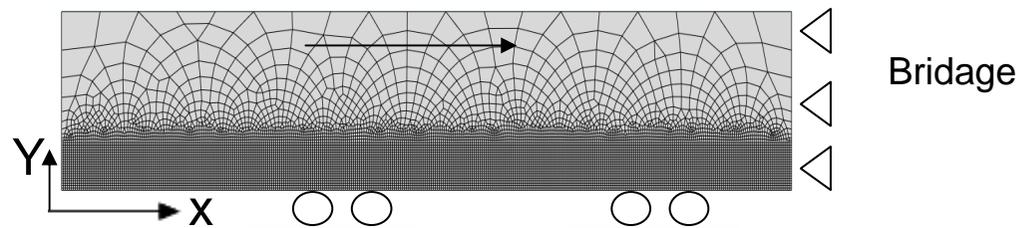


energie atomique • énergies alternatives

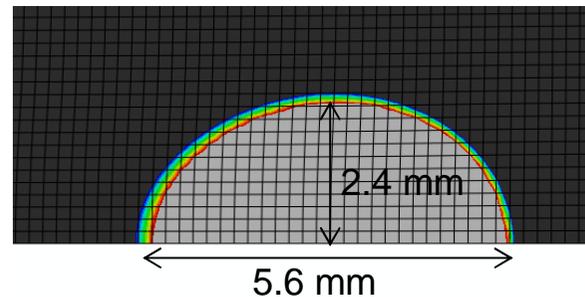
ANALYSE NUMERIQUE ET CALCUL DES INDICATEURS

- **Maillage**

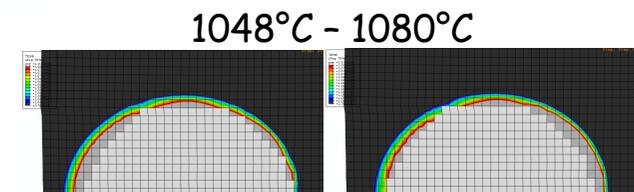
Très fin dans la zone d'intérêt : $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$



- **Modèle thermique - Rosenthal 2D**



Méthode activation/désactivation : élément fini
« liquide » supprimé et réactivé avec remise à 0
de la déformation quand $T^{\circ} < 1080^{\circ}\text{C}$

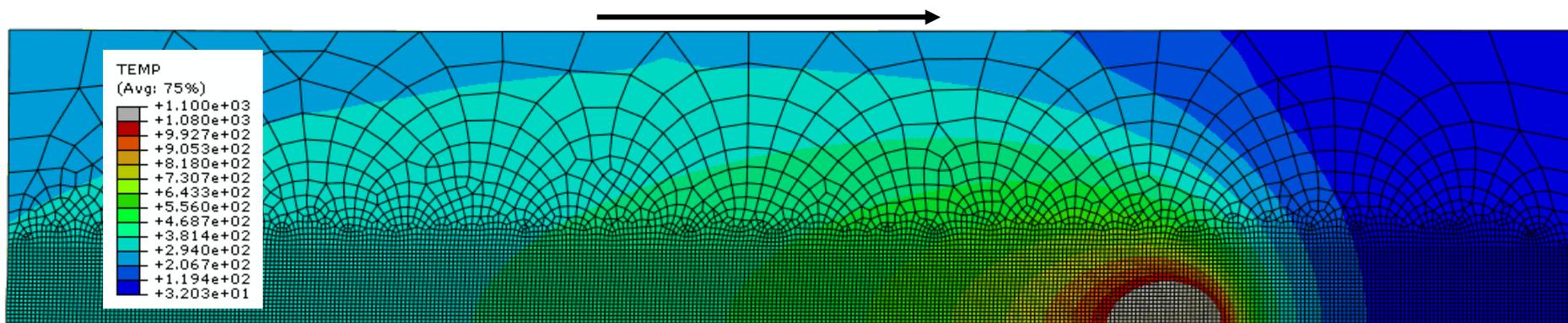




energie atomique • energies alternatives

ANALYSE NUMERIQUE ET CALCUL DES INDICATEURS

Champ de température

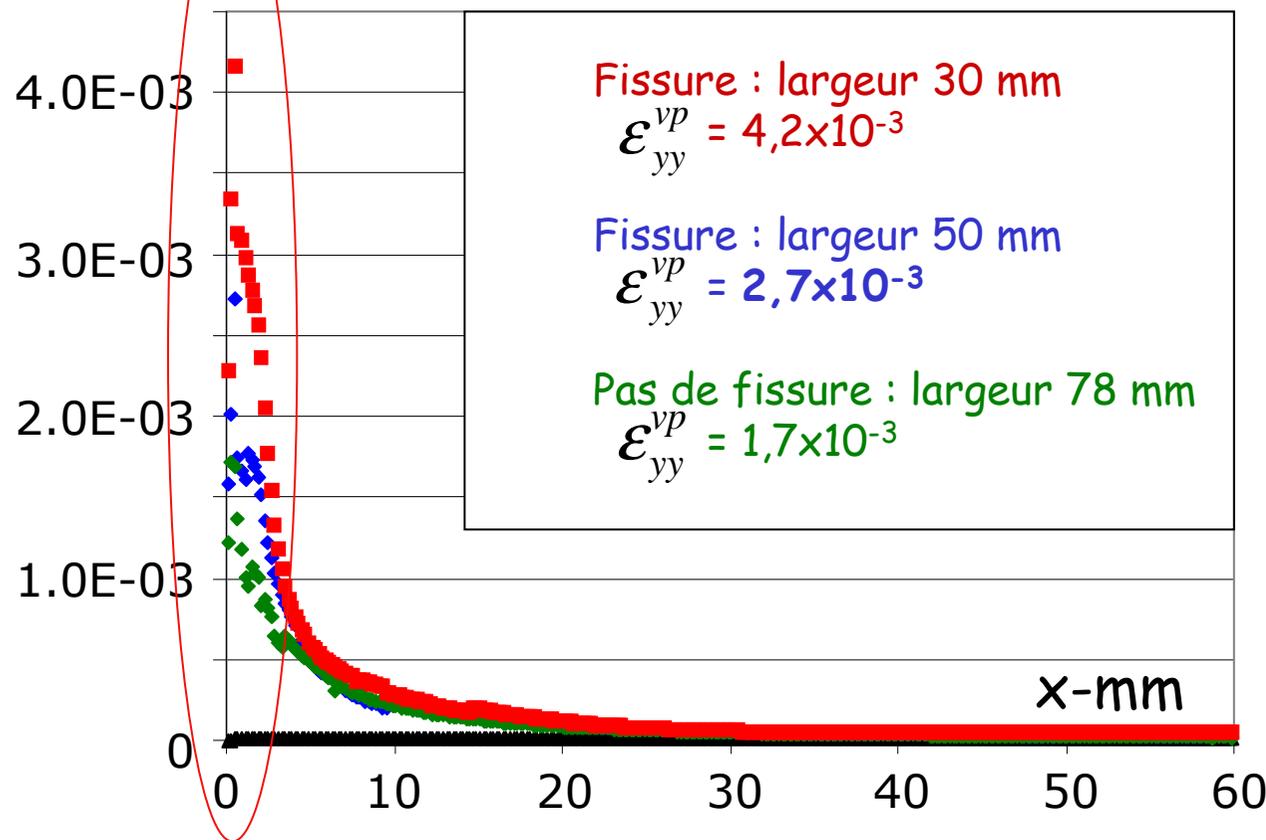




energie atomique • energies alternatives

ANALYSE NUMERIQUE ET CALCUL DES INDICATEURS

Composante transverse ϵ_{yy}^{vp} (-) de la déformation viscoplastique à 1048°C



• Valeurs des seuils beaucoup plus importantes au début de l'éprouvette

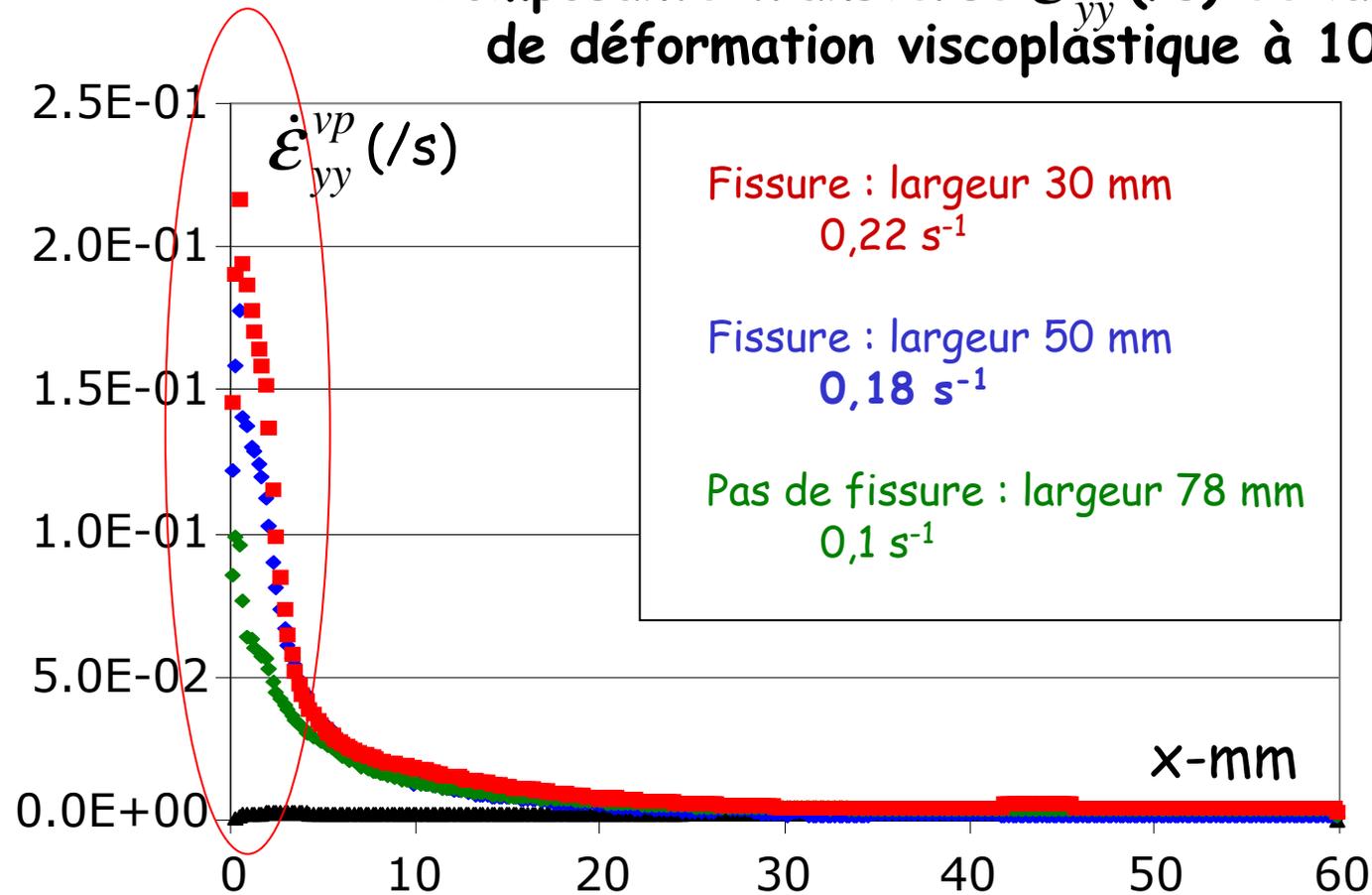
• Très faibles en partie courante



energie atomique • energies alternatives

ANALYSE NUMERIQUE ET CALCUL DES INDICATEURS

Composante transverse $\dot{\epsilon}_{yy}^{vp}$ (/s) de la vitesse
de déformation viscoplastique à 1048°C





ANALYSE NUMERIQUE ET CALCUL DES INDICATEURS

Amorçage du défaut

- Déformation d'ouverture viscoplastique critique
 $2,7 \times 10^{-3}$
- Vitesse de déformation d'ouverture viscoplastique critique
 $0,18 \text{ s}^{-1}$
- Pression de cavitation critique (critère RDG)
 84 kPa

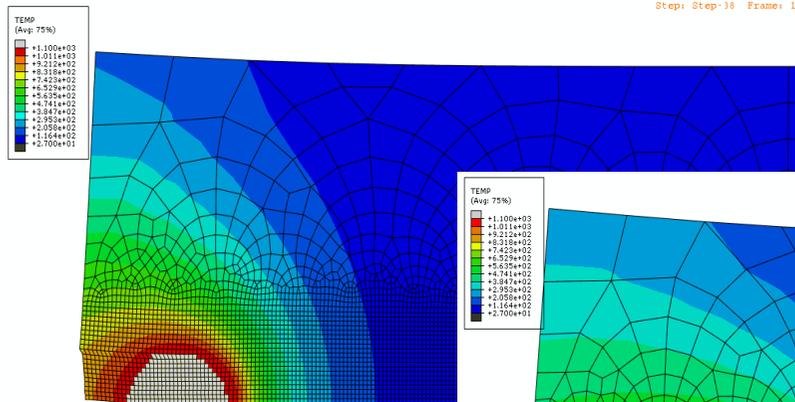
Calculée à partir de la vitesse de déformation d'ouverture critique $0,18 \text{ /s}$
(largeur 50 mm)



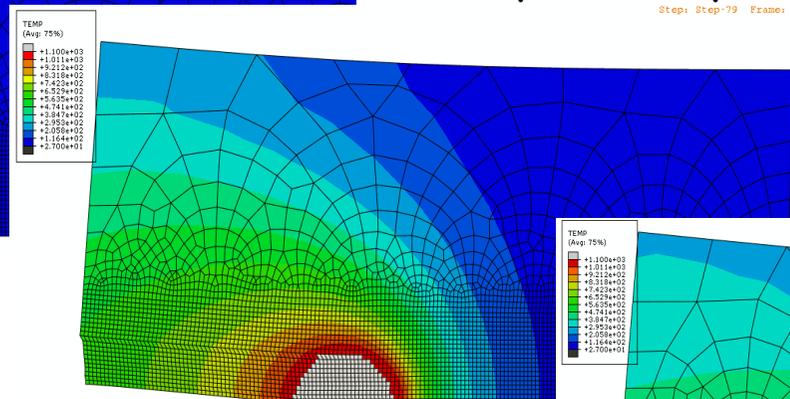
energie atomique • energies alternatives

ANALYSE NUMERIQUE ET CALCUL DES INDICATEURS

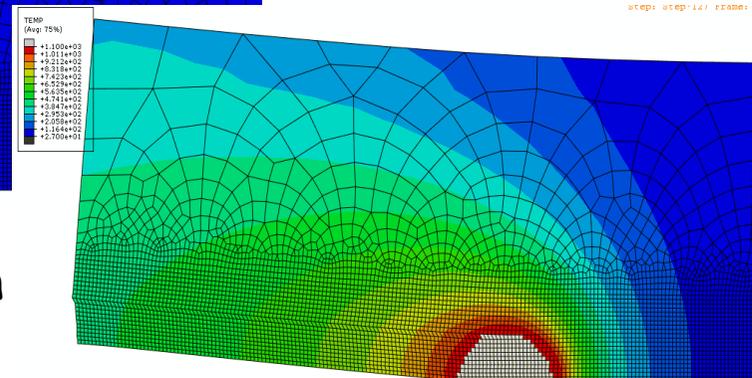
Simulation de la propagation de la fissure par relâchement des nœuds à l'arrière du bain



Largeur éprouvette 30 mm (F).
Champ de température à 3 instants du soudage



Amplification X 5



la fissure « s'ouvre » de plus en plus
composante thermique de la déformation

$$\leftarrow \varepsilon_{yy}^{vp} \text{ et } \dot{\varepsilon}_{yy}^{vp} \text{ très faibles}$$



énergie atomique • énergies alternatives

-  **1. Méthodologie**
-  **2. Résultats expérimentaux des essais de soudage instrumentés**
-  **3. Caractérisations du matériau**
-  **4. Analyse numérique et calcul des indicateurs**
-  **5. Conclusions et perspectives**



énergie atomique • énergies alternatives

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En résumé

- Analyse des conditions TM d'amorçage de la fissuration à chaud lors du soudage FE de l'alliage CuCrZr
- Déformation et vitesse de déformation viscoplastiques critiques (et P critique) au moyen de résultats expérimentaux et calculs numériques sur tests JWRI discriminants F et NF
- Conditions thermomécaniques pour l'amorçage beaucoup plus sévères que pour la propagation

La suite

- Transfert critère ?
- Meilleure description du comportement mécanique de la zone pâteuse
- Amélioration de la loi EVP dans le solide