



Jean WISNIEWSKI

30 décembre 2007

**Identification d'un critère de fissuration à chaud lors du soudage par faisceau d'électrons de l'alliage CuCrZr**



Contact: [jean.wisniewski@gmail.com](mailto:jean.wisniewski@gmail.com)



---

## - SOMMAIRE -

**1- Objectif du projet**

**2- Présentation de l'alliage étudié**

**3- Démarche envisagée**

**4- Utilisation de Castem pour identifier un critère de fissuration à chaud**

**5- Conclusions**

## Objectif du projet

Mise au point d'un test simple de recette matériau au regard du risque de fissuration à chaud en soudage.

### Objectif du projet:

Proposer à l'élaborateur et/ou à l'utilisateur un test simple pour vérifier que l'alliage CuCrZr ne fissurera pas lors du soudage pour une configuration donnée.



---

## - SOMMAIRE -

**1- Objectif du projet**

**2- Présentation de l'alliage étudié**

**3- Démarche envisagée**

**4- Utilisation de Castem pour identifier un critère de fissuration à chaud**

**5- Conclusions**

## L'alliage CuCrZr

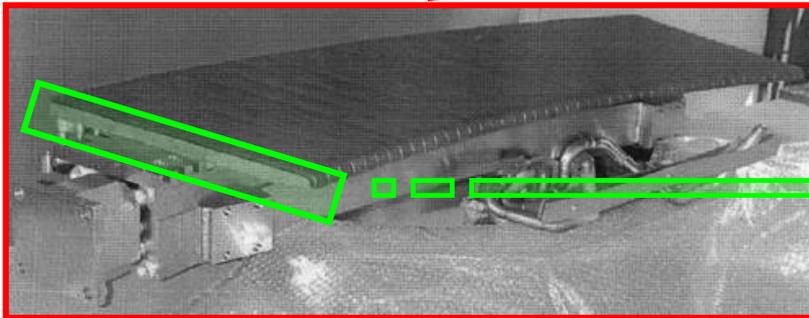
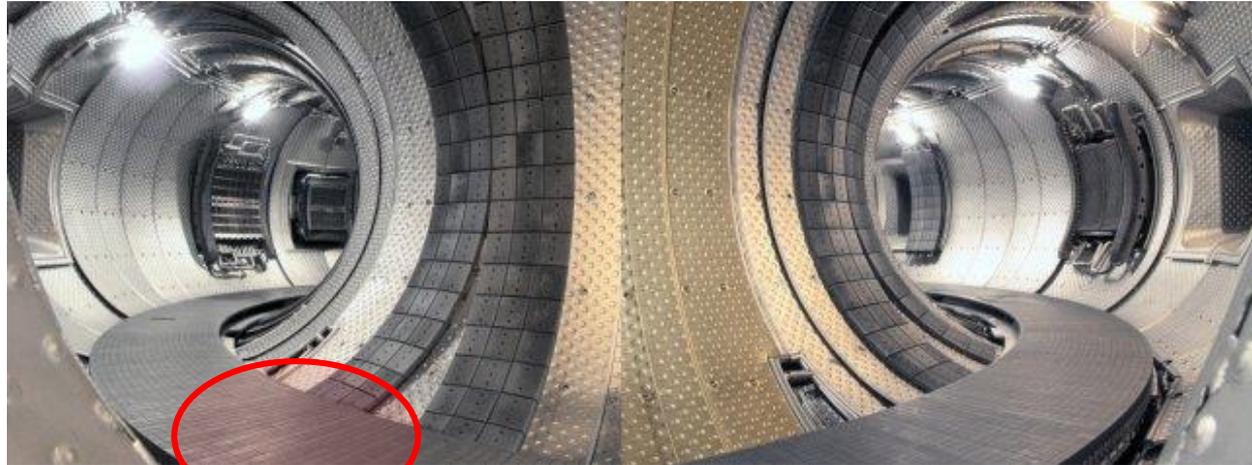
- CuCr1Zr (DIN 17672)
- Alliage à durcissement structural
- Présente de bonnes propriétés thermophysiques et thermomécaniques à chaud



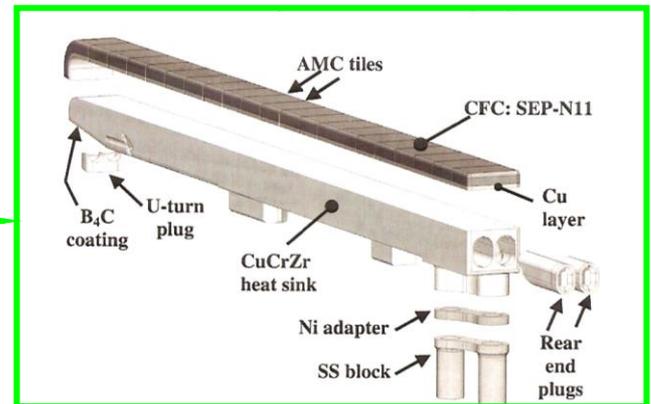
On dispose de peu d'informations sur ses propriétés d'où la nécessité de le caractériser (partenariats UBS et EPFL)

- Actuellement utilisé dans le Tokamak Tore Supra de Cadarache

## Utilisation de l'alliage CuCrZr



Aperçu d'un TPL d'après J. Schlosser et al



## Utilisation de l'alliage CuCrZr

- Doit évacuer des flux de chaleurs très importants ( $10\text{MW}/\text{m}^2$ )
- Doit présenter des propriétés mécaniques élevées à chaud

Alliage qui sera utilisé dans ITER



**Pb: Fissuration à chaud en soudage**



---

## - SOMMAIRE -

**1- Objectif du projet**

**2- Présentation de l'alliage étudié**

**3- Démarche envisagée**

**4- Utilisation de Castem pour identifier un critère de fissuration à chaud**

**5- Conclusions**

## Démarche envisagée

- **Essai laboratoire**
  - Objectif: permettre l'identification d'un critère de fissuration à chaud
- **Essai cas type (représentatif d'une configuration réelle)**
  - Objectif: appliquer le critère déterminé précédemment  
→ sévérité de la configuration?
- **Essai Démonstrateur**
  - Validation de la démarche

Utilisation de Castem dans chaque étape de la démarche



---

## - SOMMAIRE -

**1- Objectif du projet**

**2- Présentation de l'alliage étudié**

**3- Démarche envisagée**

**4- Utilisation de Castem pour identifier un critère de fissuration à chaud**

**5- Conclusions**

---

## - SOMMAIRE -

**1- Objectif du projet**

**2- Présentation de l'alliage étudié**

**3- Démarche envisagée**

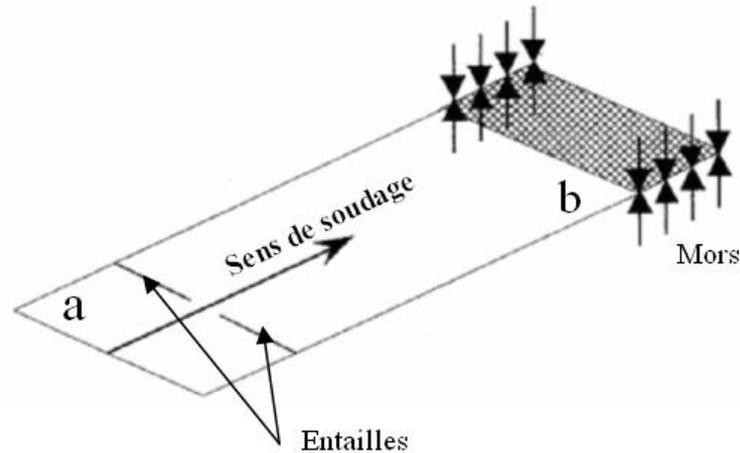
**4- Utilisation de Castem pour identifier un critère de fissuration à chaud**

- Présentation de l'essai laboratoire
- Réalisation de calculs thermomécaniques

**5- Conclusions**

## Essai Labo

**Essai JWRI** (Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Japan)

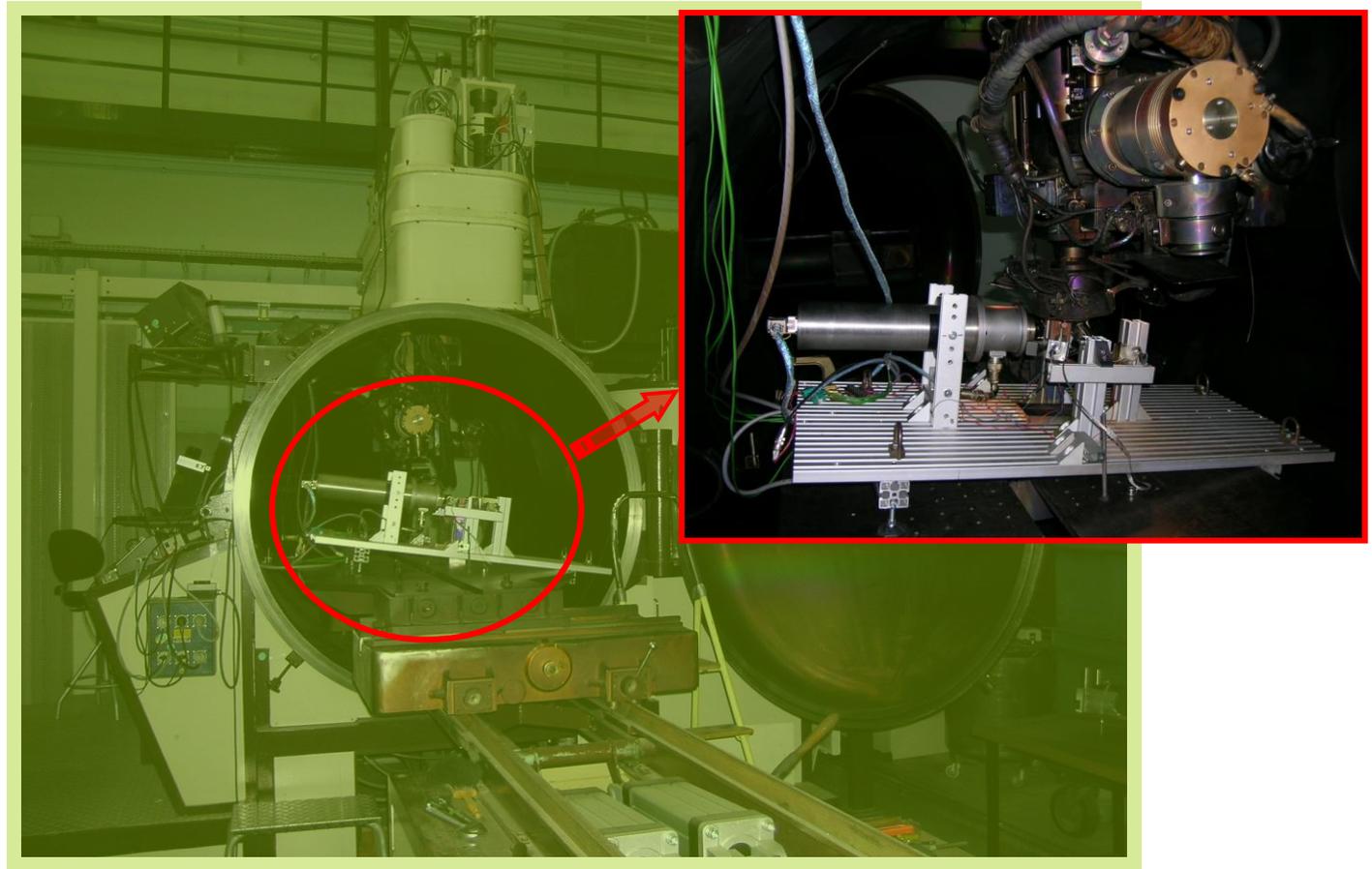


- Géométrie d'éprouvette 'simple' (simulation et essais)
- Soudage par FE
- Essais instrumentés
- Essai discriminant

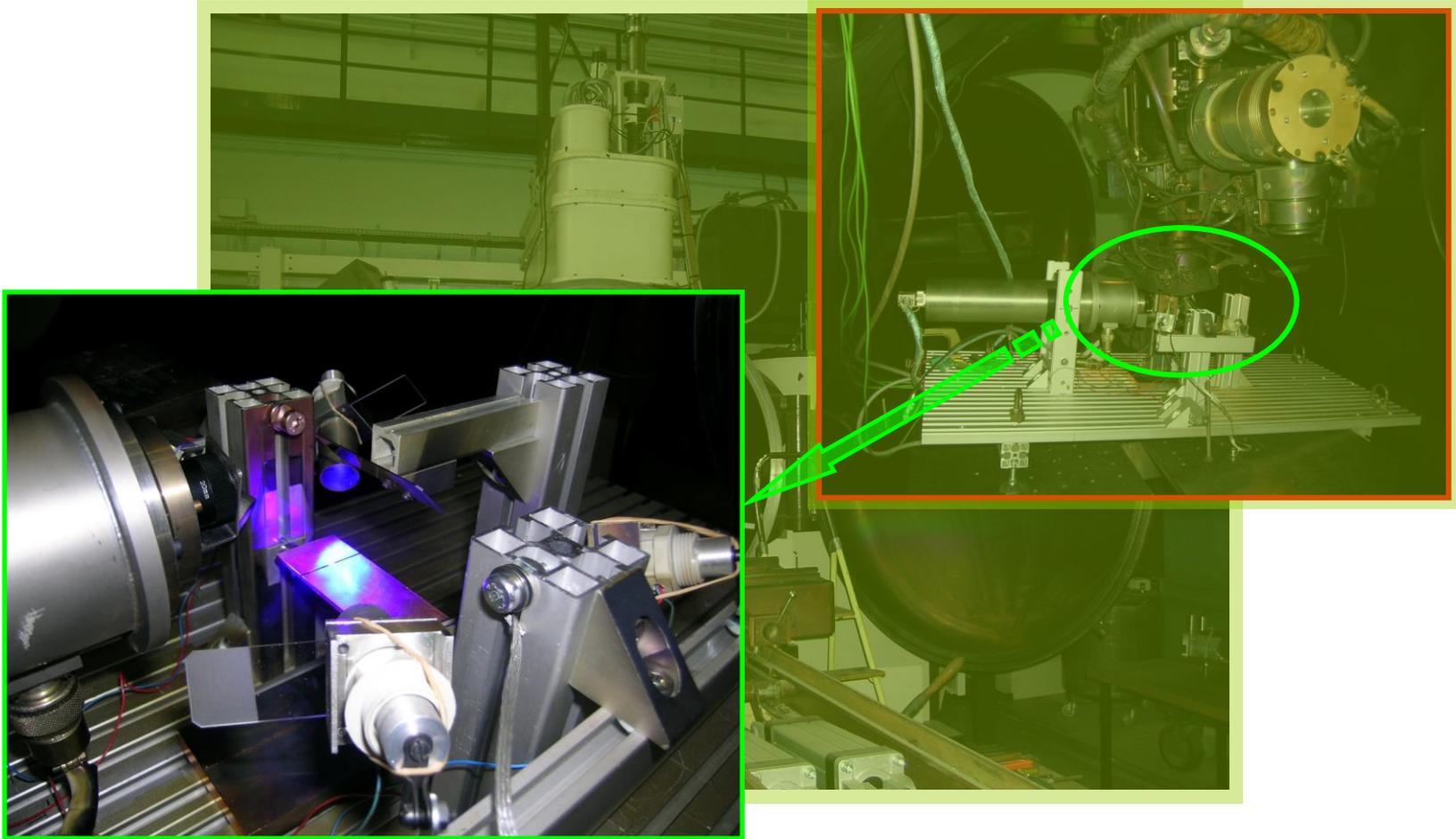
## Essai Labo



## Essai Labo

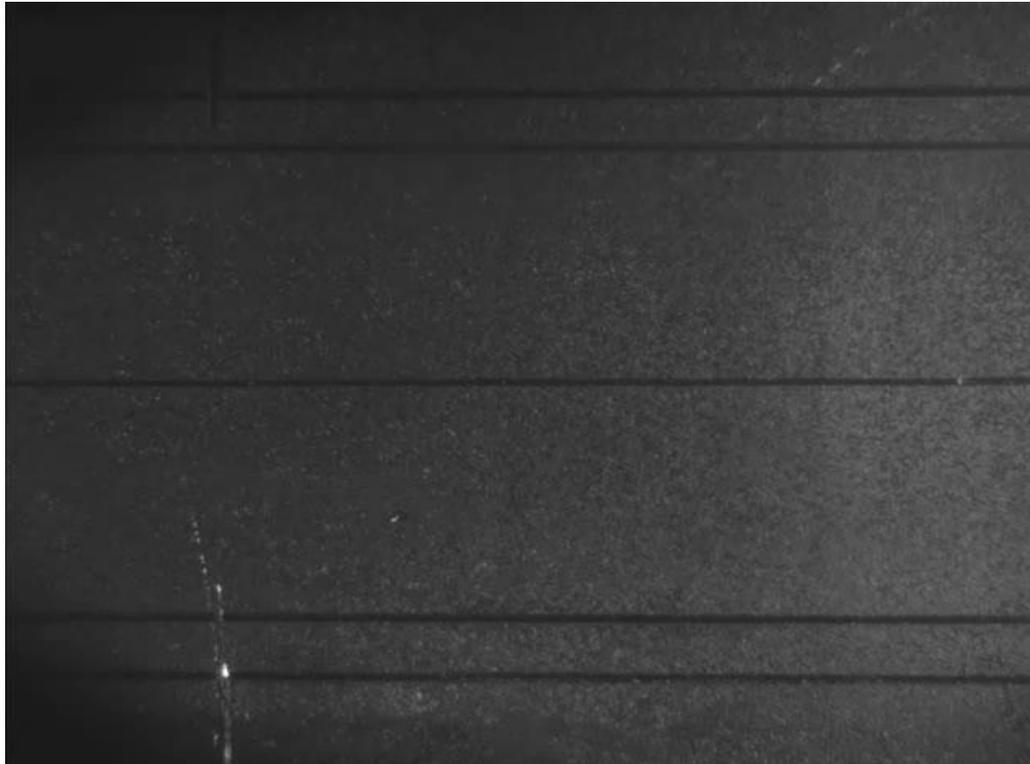


# Essai Labo



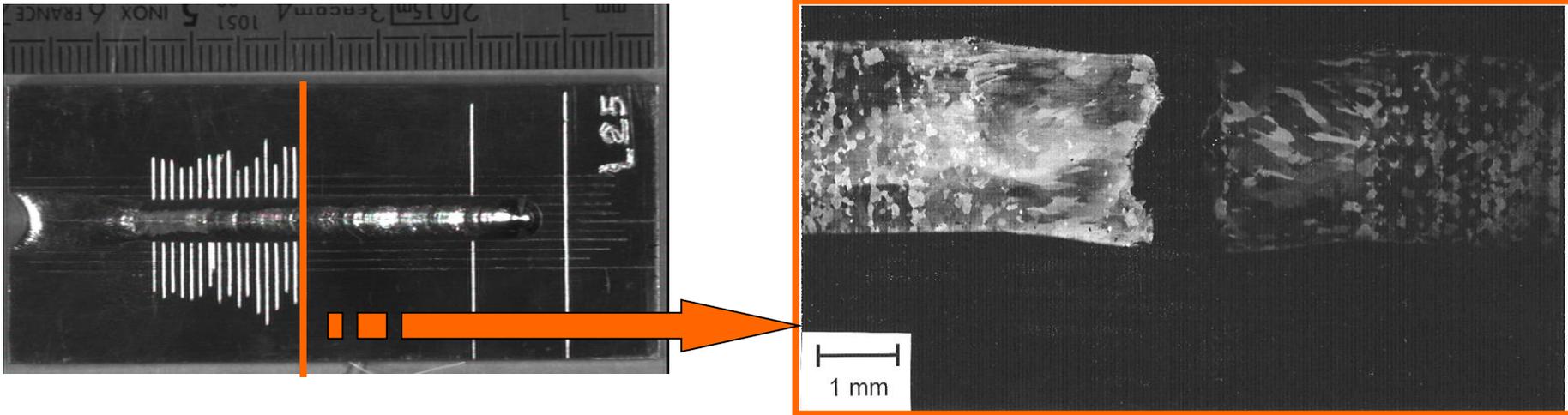
## Essai Labo

- Exemple d'observation:



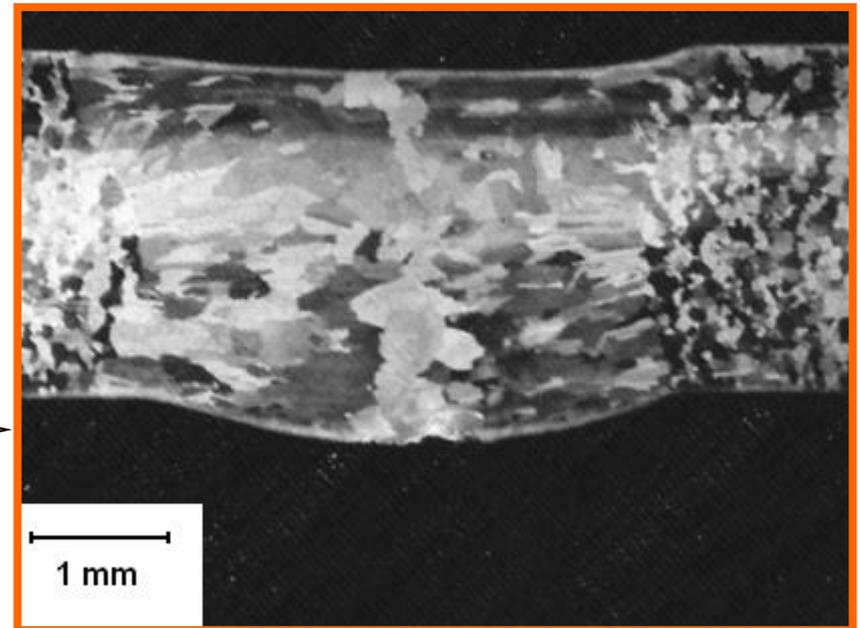
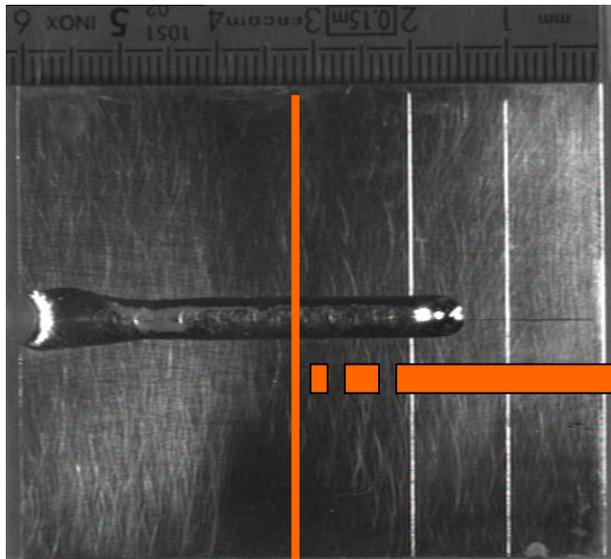
## Introduction

- **Présentation des résultats (sens transverse): (largeur 30 mm)**



## Introduction

- **Présentation des résultats: (largeur 50)**



---

## - SOMMAIRE -

**1- Objectif du projet**

**2- Présentation de l'alliage étudié**

**3- Démarche envisagée**

**4- Utilisation de Castem pour identifier un critère de fissuration à chaud**

- Présentation de l'essai laboratoire
- Réalisation de calculs thermomécaniques

**5- Conclusions**



## Réalisation d'un calcul thermomécanique

Couplage Castem-Matlab



Réalisation d'essais JWRI instrumentés  
(mesure de  $T^\circ$ ...)

## Réalisation d'un calcul thermomécanique

↑

Identification d'un jeu de paramètres  
pour la source de chaleur

Couplage Castem-Matlab

↑

Réalisation d'essais JWRI instrumentés  
(mesure de  $T^\circ$ ...)

## Réalisation d'un calcul thermomécanique

Réalisation d'un calcul thermique



Identification d'un jeu de paramètres pour la source de chaleur



Couplage Castem-Matlab

Réalisation d'essais JWRI instrumentés (mesure de  $T^\circ$ ...)

## Réalisation d'un calcul thermomécanique

Réalisation d'un calcul thermique



Identification d'un jeu de paramètres pour la source de chaleur



Couplage Castem-Matlab

Réalisation d'essais JWRI instrumentés (mesure de  $T^\circ$ ...)

Réalisation d'essais mécaniques (UBS/ECP)

## Réalisation d'un calcul thermomécanique

Réalisation d'un calcul thermique

Identification d'un jeu de paramètres pour la source de chaleur

Identification des paramètres de la loi de comportement en fonction de la température

Couplage Castem-Matlab

Réalisation d'essais JWRI instrumentés (mesure de  $T^\circ$ ...)

SiDoLo

Réalisation d'essais mécaniques (UBS/ECP)

## Réalisation d'un calcul thermomécanique

Réalisation d'un calcul thermique

Intégration et validation de la loi de comportement dans Castem

Identification d'un jeu de paramètres pour la source de chaleur

Identification des paramètres de la loi de comportement en fonction de la température

Couplage Castem-Matlab

Réalisation d'essais JWRI instrumentés (mesure de  $T^\circ$ ...)

SiDoLo

Réalisation d'essais mécaniques (UBS/ECP)

## Réalisation d'un calcul thermomécanique

Réalisation d'un calcul thermique

Intégration et validation de la loi de comportement dans Castem

Identification d'un jeu de paramètres pour la source de chaleur

Identification des paramètres de la loi de comportement en fonction de la température

Couplage Castem-Matlab

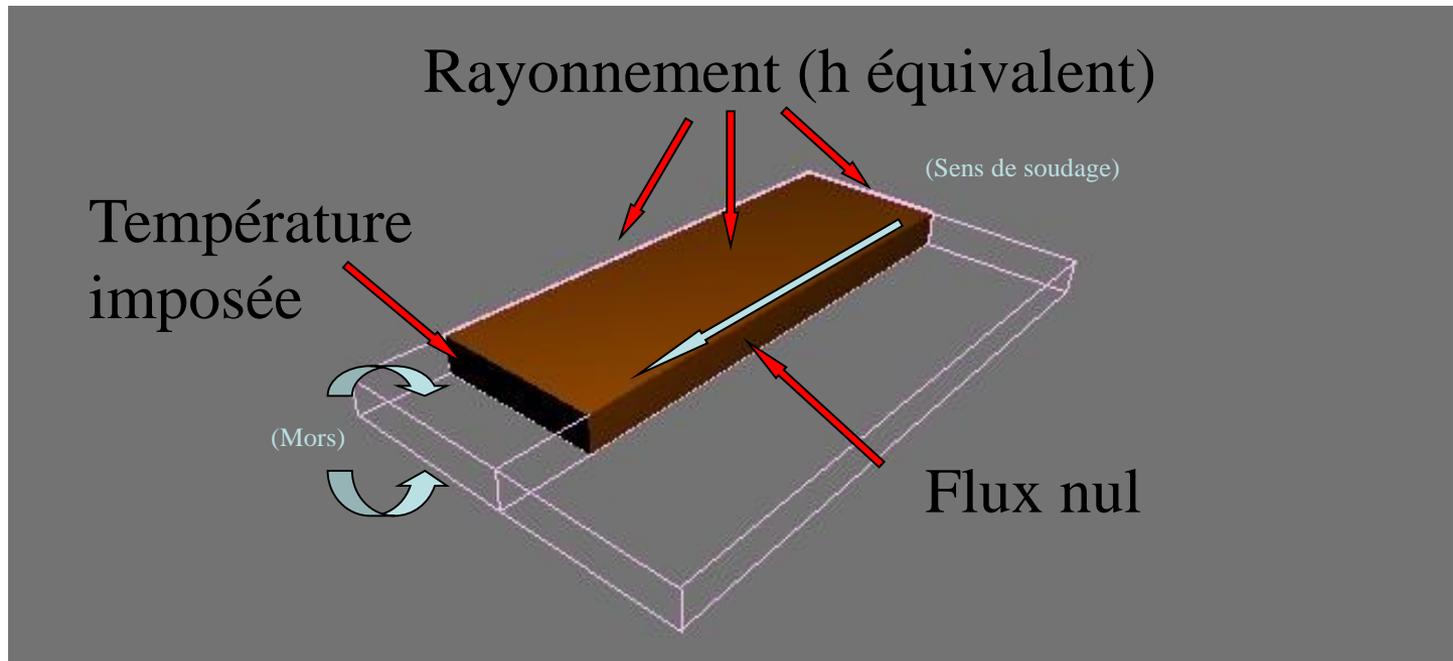
Réalisation d'essais JWRI instrumentés (mesure de  $T^\circ$ ...)

SiDoLo

Réalisation d'essais mécaniques (UBS/ECP)

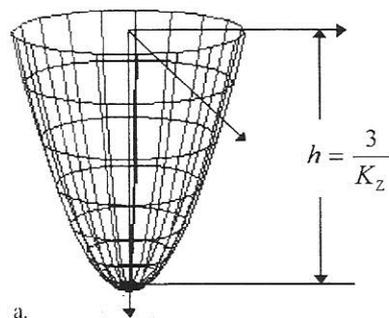
## Modèle thermique lagrangien

- Utilisation de PASAPAS dans Cast3m.
- Conditions aux limites (soudage sous vide):



## Modèle thermique lagrangien

- Source CIN (Cylindrical Involution Normal):



$$q_v = \frac{kK_z Q}{\pi(1 - e^{-K_z s})} e^{-k(x^2+y^2) - K_z z} (1 - u(z - s))$$

E. Ranatowski et al

### Paramètres:

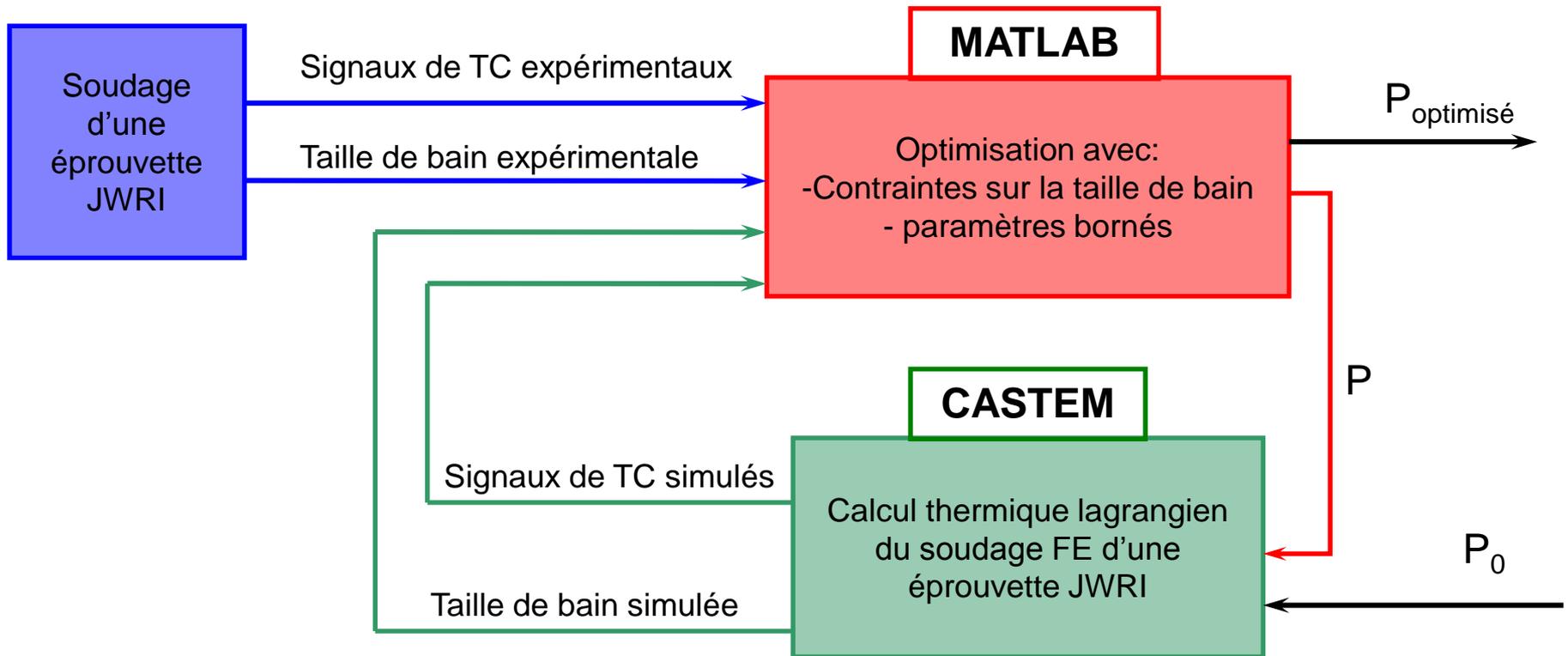
Q énergie transmise du procédé [J]

k en [m<sup>-2</sup>]

K<sub>z</sub> facteur d'involution [m<sup>-1</sup>]

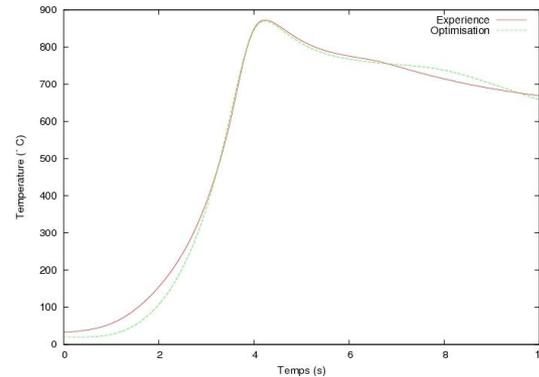
s troncature [m]

## Modèle thermique lagrangien

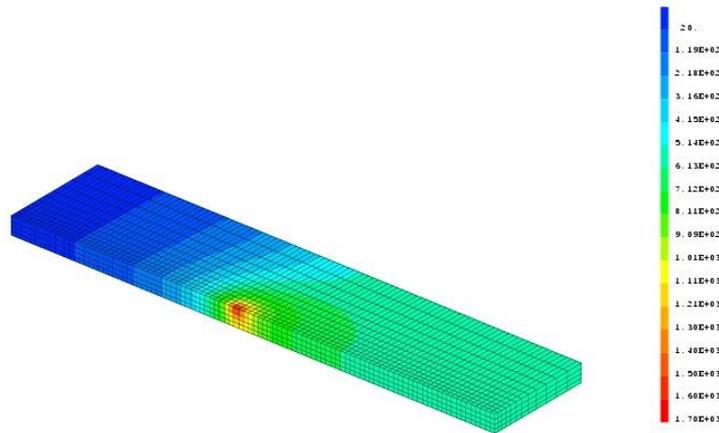


## Modèle thermique lagrangien

– Exemple de résultat:



- Calcul thermique intégrant les paramètres de la source



## Réalisation d'un calcul thermomécanique

Réalisation d'un calcul thermique

Intégration et validation de la loi de comportement dans Castem

Identification d'un jeu de paramètres pour la source de chaleur

Identification des paramètres de la loi de comportement en fonction de la température

Couplage Castem-Matlab

Réalisation d'essais JWRI instrumentés (mesure de  $T^\circ$ ...)

SiDoLo

Réalisation d'essais mécaniques (UBS/ECP)

## Réalisation d'un calcul thermomécanique

- Loi de comportement
  - Première version de la loi
  - Intégration de la loi dans Castem
  - Validation de la loi

## Loi de comportement

- Loi élastoviscoplastique à écrouissage isotrope
  - **Fonction de charge**
    - Domaine d'élasticité si  $f < 0$
    - Ecoulement inélastique si  $f \geq 0$

## Loi de comportement

- **Loi d'écrouissage:** règle(s) qui va permettre de définir la vitesse de déformation viscoplastique. On utilise le modèle de Norton.

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \left(\frac{f}{K}\right)^n \cdot \text{signe}(\sigma) \quad \text{K et n à déterminer}$$

- **Loi d'écrouissage:** caractérise l'évolution des variables d'écrouissage au cours de la déformation inélastique. Dans notre cas on ne considère, pour l'instant, que de l'écrouissage isotrope. On utilise le modèle de Voce.

$$R(p) = Q(1 - e^{-bp}) \quad \text{Q et b à déterminer}$$

(p: déformation inélastique)

## Loi de comportement

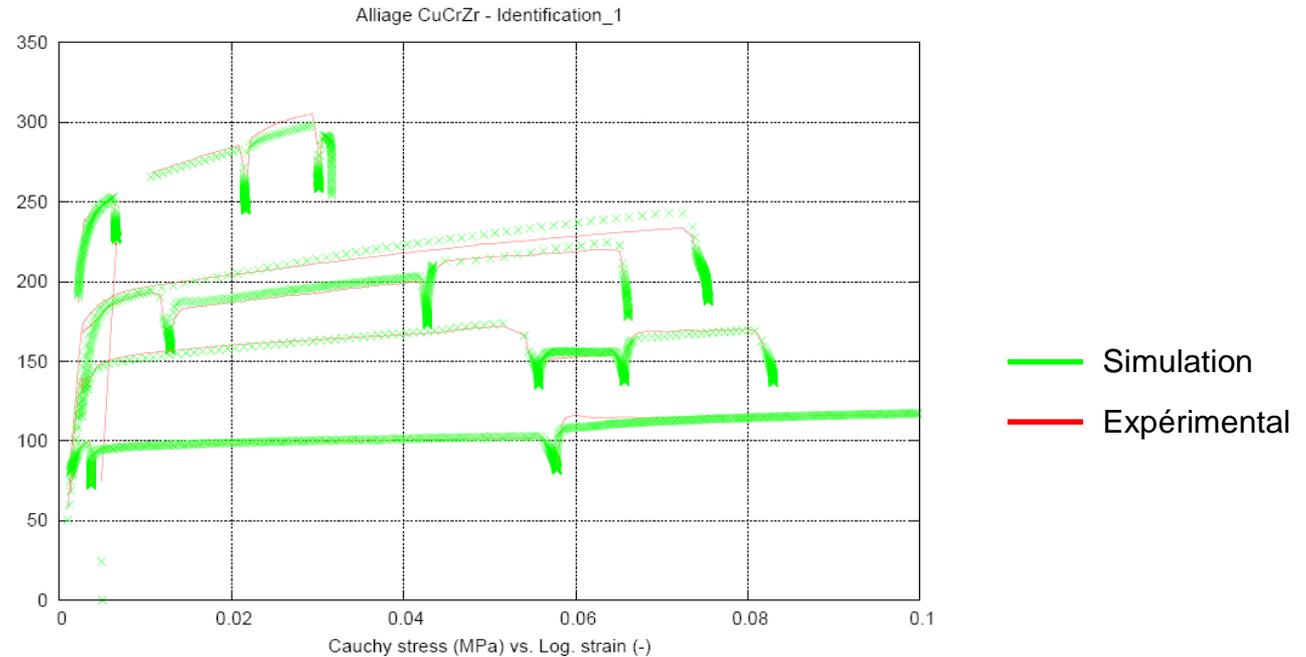
- Expression de la fonction de charge:

$$f(\sigma, R) = |\sigma| - \sigma_Y - R$$

- Contrainte d'écoulement  $\sigma_Y$ , variable à déterminer
- 7 paramètres à identifier  $E, \nu, K, n, Q, b, \sigma_Y$

## Loi de comportement

- Identification des paramètres de la loi de comportement (SiDoLo)





## Réalisation d'un calcul thermomécanique

- Loi de comportement
  - Première version de la loi
  - Intégration de la loi dans Castem
  - Validation de la loi

## Intégration de la loi dans Castem

- **Utilisation du module UMAT**
  - Création/adaptation de deux sous-routines en langage esope (très proche du fortran)
    - Vocnor.eso (calcul des déformations élastiques et des contraintes mécaniques)
    - Mefmod.eso (calcul de la variation des variables internes de la loi de comportement)
  - Surcharge du module umat.eso
  - Compilation de l'exécutable Castem
  - Utilisation dans le programme en dgibi de la nouvelle loi de comportement:
    - Déclaration dans MODE de l'utilisation de VOCNOR
    - Définition de l'évolution en fonction de la température des paramètres de la loi de comportement dans MATE



## Simulation numérique

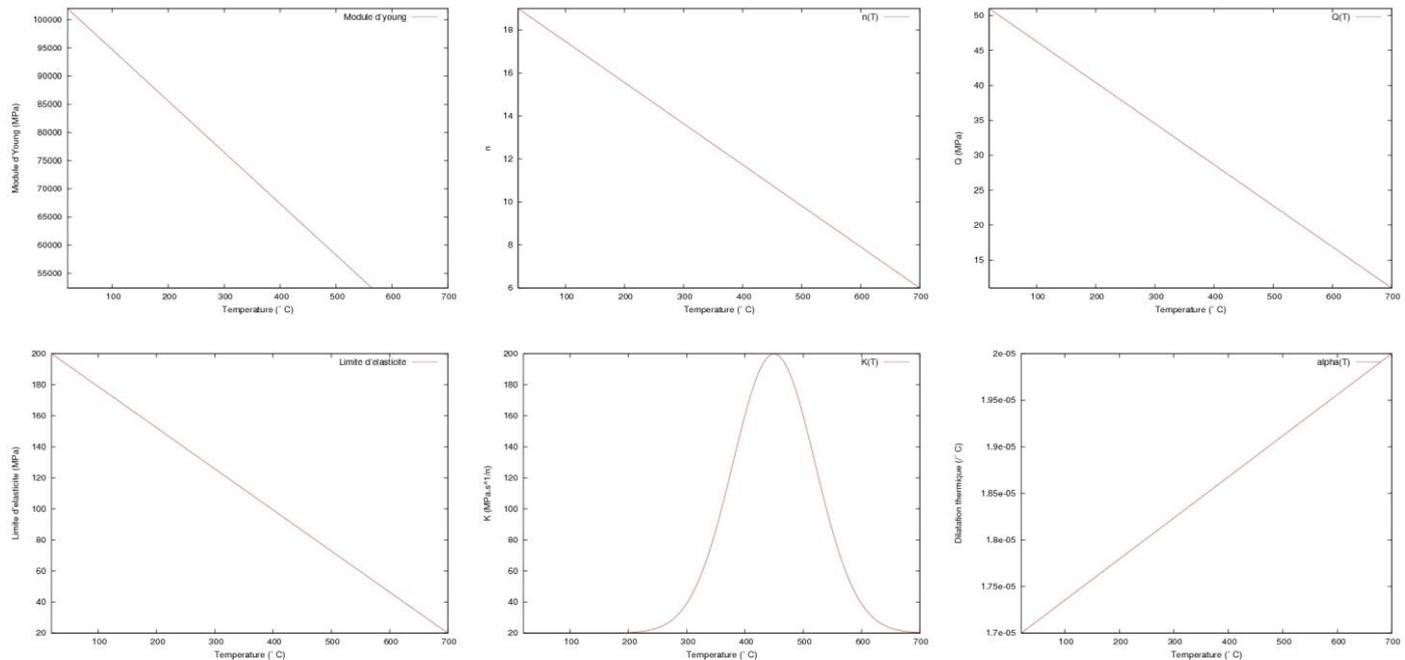
- Loi de comportement
  - Première version de la loi
  - Intégration de la loi dans Castem
  - Validation de la loi

## Simulation numérique

- Loi de comportement
  - Première version de la loi
  - Intégration de la loi dans Castem
  - Validation de la loi
    - Comparaison des résultats issus de simulation des mêmes 'cas tests' SiDoLo/Castem
      - Essai de traction isotherme
      - Essai de cisaillement isotherme
      - Essai de traction anisotherme

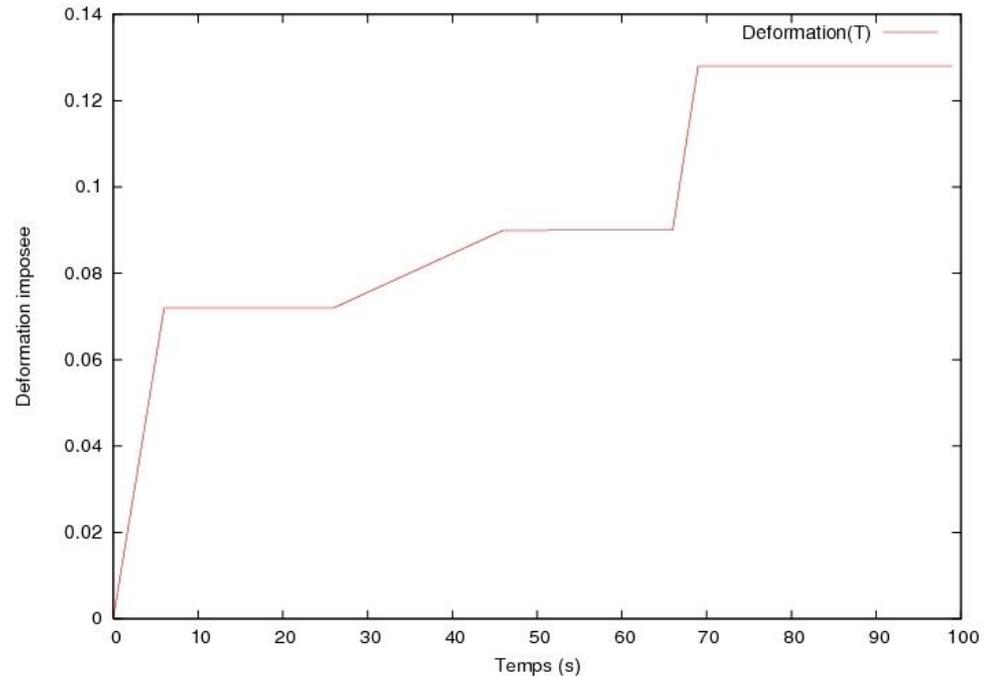
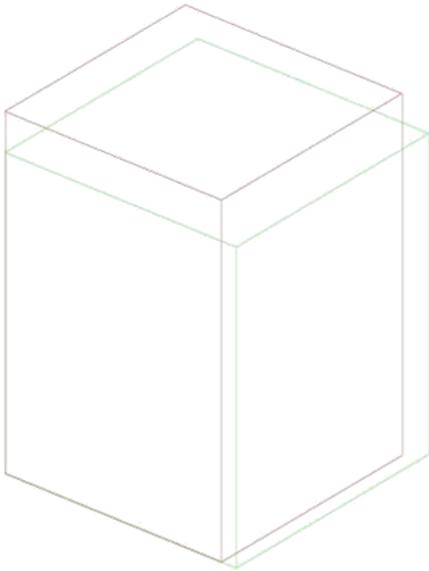
## Loi de comportement

- Variation des propriétés matériaux en fonction de la température pour les essais de validation (20°C-700°C).



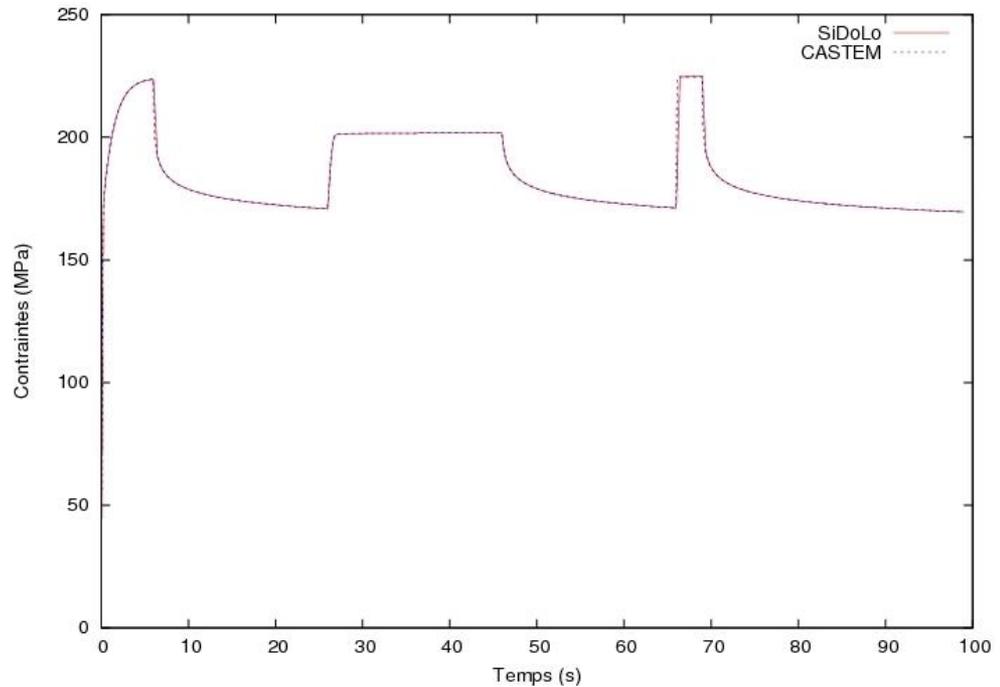
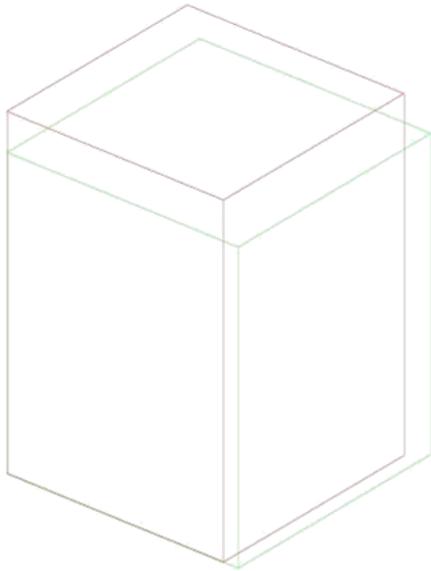
## Validation de la loi de comportement

- Essai de traction isotherme



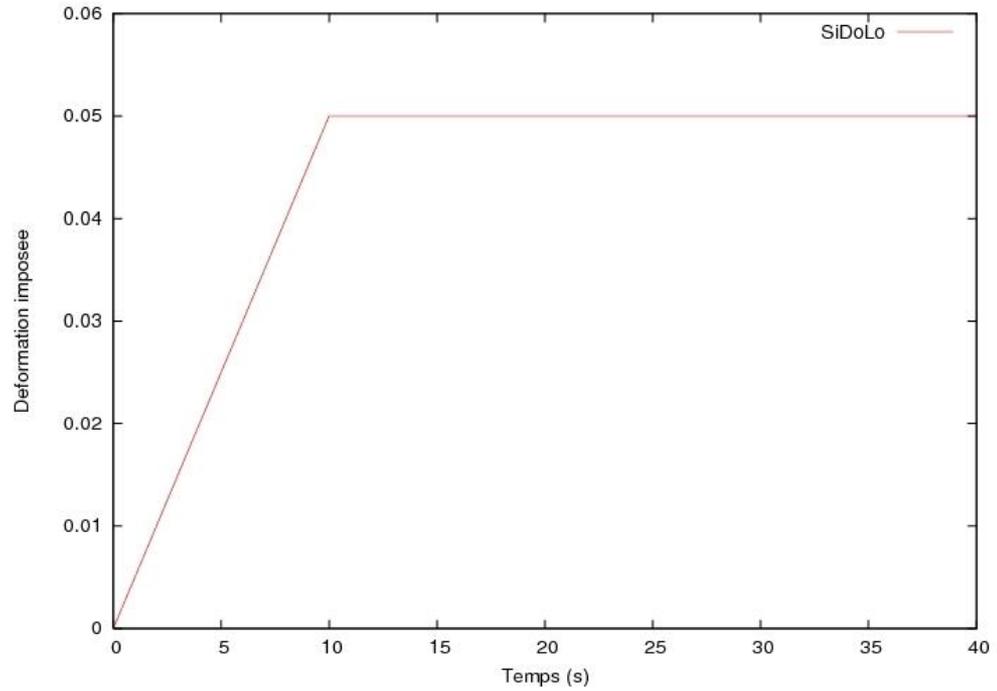
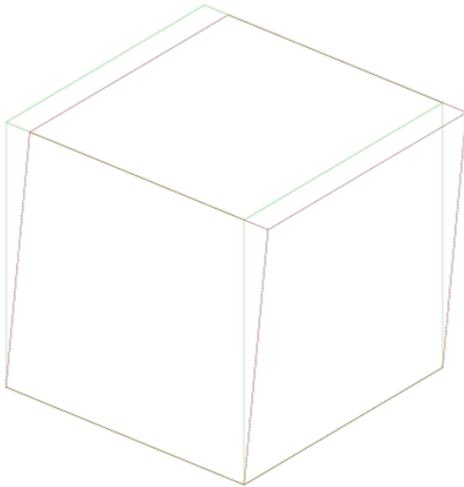
## Validation de la loi de comportement

- Essai de traction isotherme (500°C)



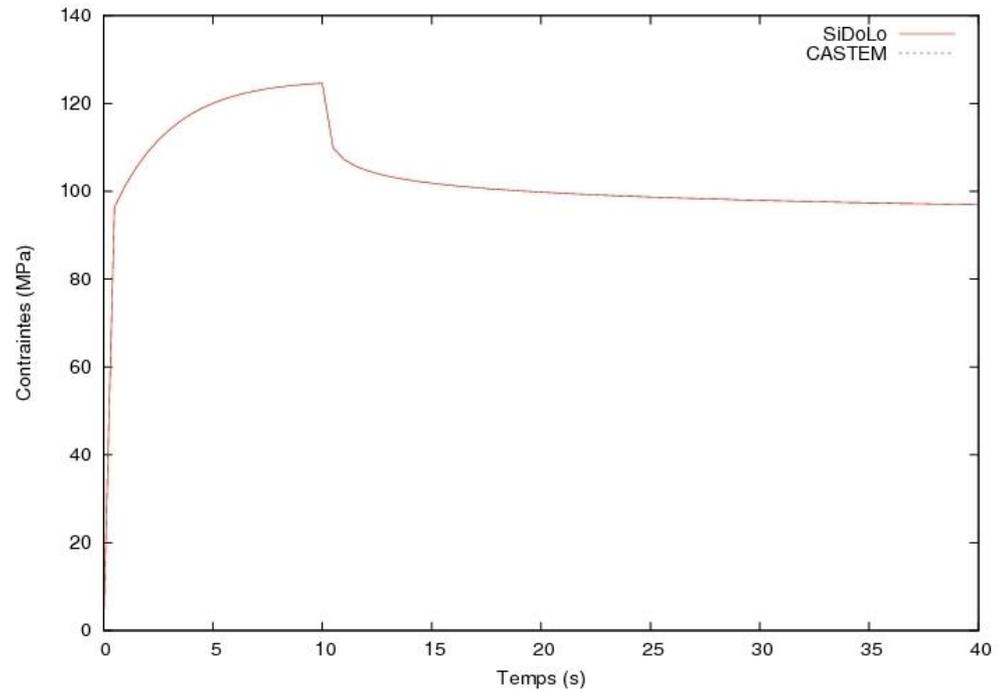
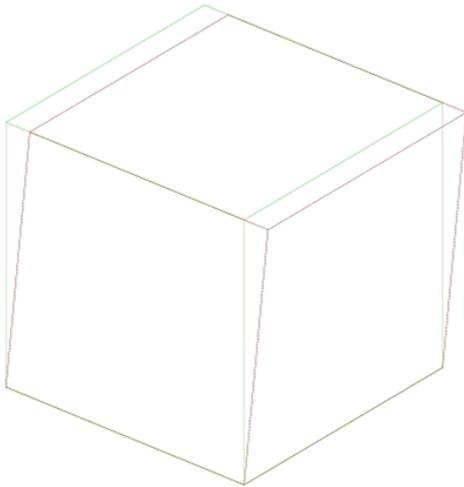
## Validation de la loi de comportement

- Essai de cisaillement isotherme (500°C)



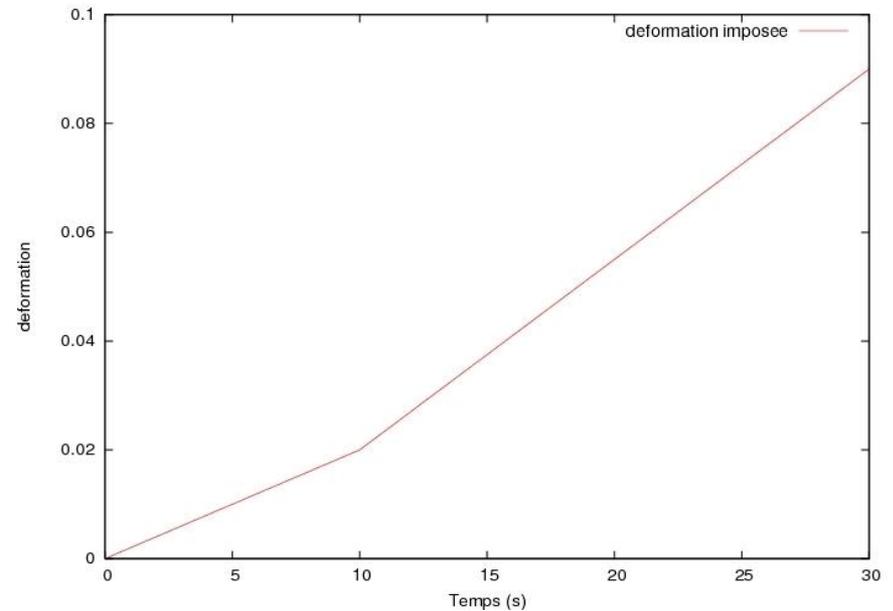
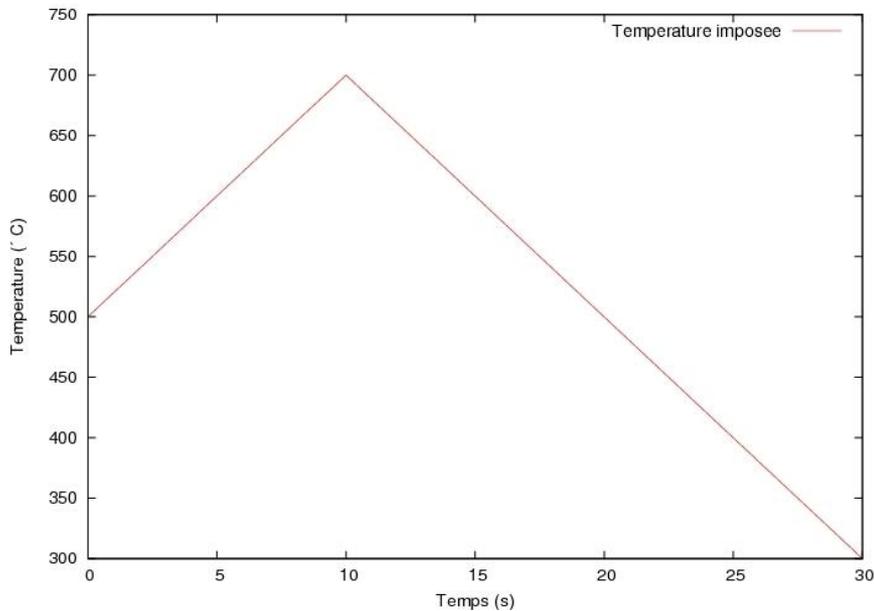
## Validation de la loi de comportement

- Essai de cisaillement isotherme (500°C)



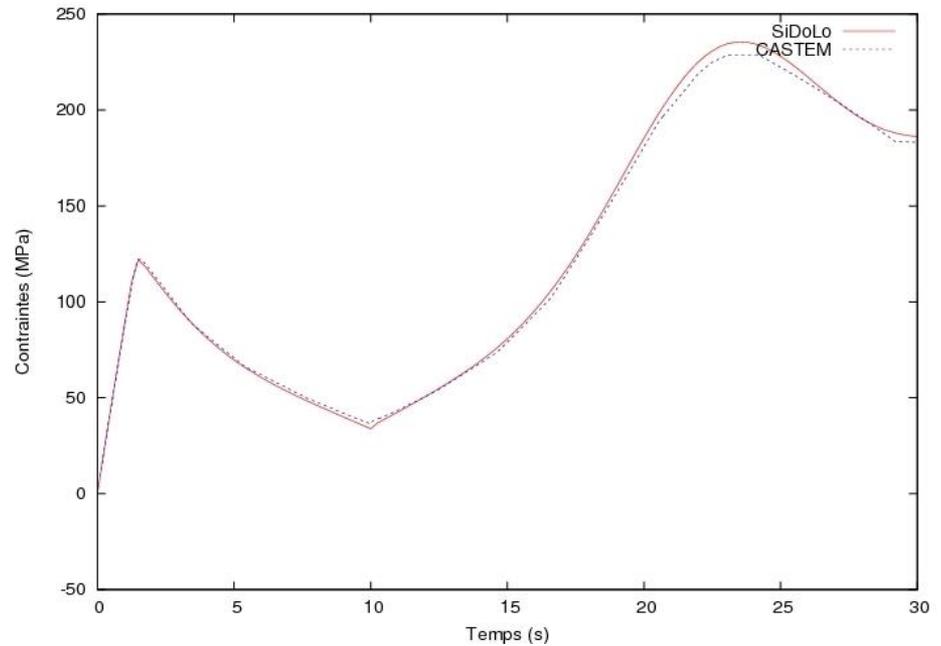
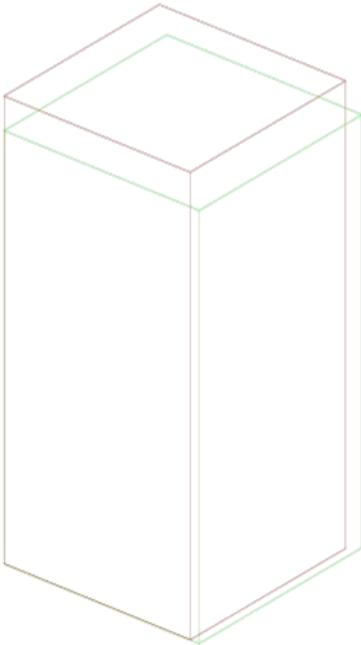
## Validation de la loi de comportement

- Essai de traction anisotherme



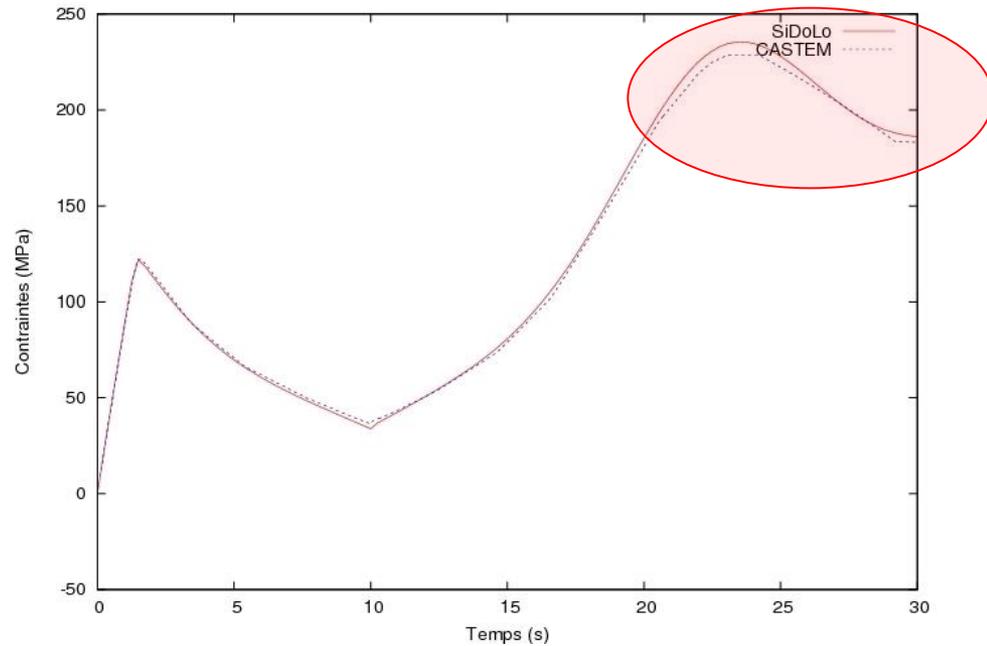
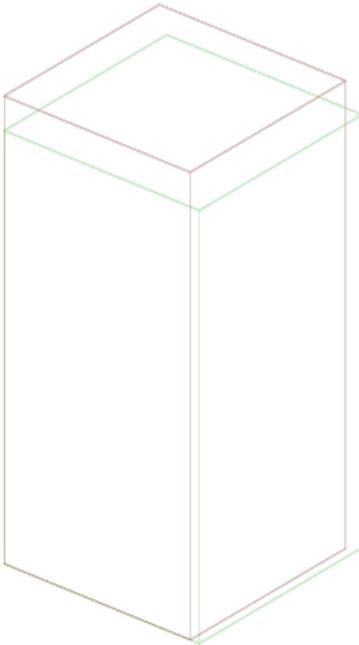
## Validation de la loi de comportement

- Essai de traction anisotherme



## Validation de la loi de comportement

- Essai de traction anisotherme



## Réalisation d'un calcul thermomécanique

Réalisation d'un calcul thermique

Intégration et validation de la loi de comportement dans Castem

Identification d'un jeu de paramètres pour la source de chaleur

Identification des paramètres de la loi de comportement en fonction de la température

Couplage Castem-Matlab

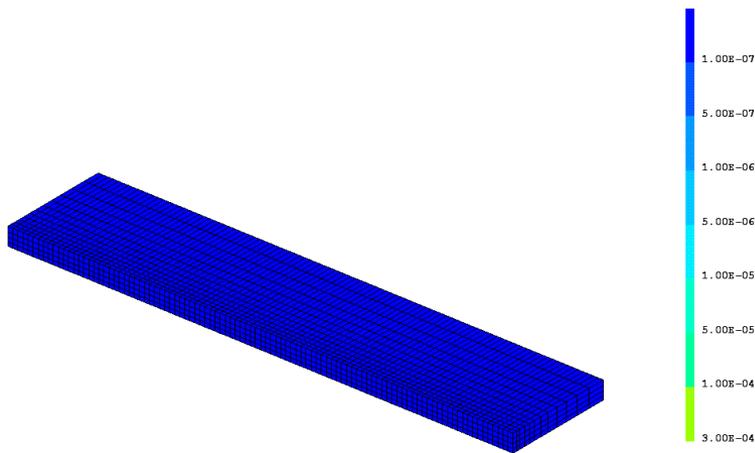
Réalisation d'essais JWRI instrumentés (mesure de  $T^\circ$ ...)

SiDoLo

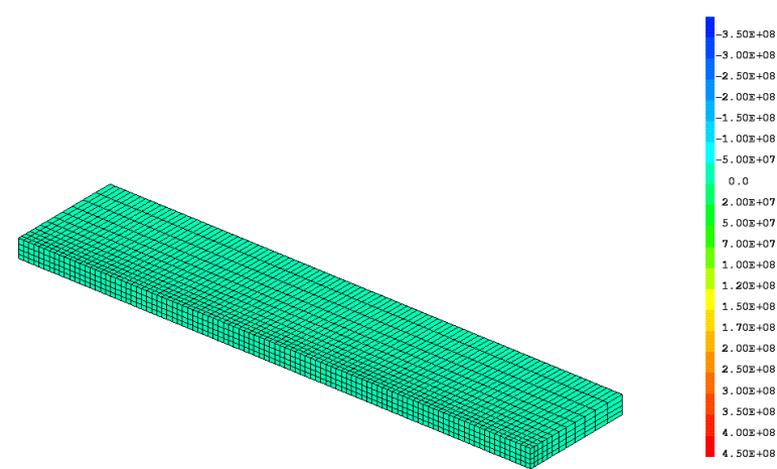
Réalisation d'essais mécaniques (UBS/ECP)

## Réalisation d'un calcul thermomécanique

- Exemples de résultats



Champ de déplacement suivant UY t= 0.00000E+00



Champ de contrainte syy t= 0.00000E+00

## **- SOMMAIRE -**

**1- Objectif du projet**

**2- Présentation de l'alliage étudié**

**3- Démarche envisagée**

**4- Utilisation de Castem pour identifier un critère de fissuration à chaud**  
**- Présentation de l'essai laboratoire**  
**- Réalisation de calculs thermomécaniques**

**5- Conclusions**

## CONCLUSIONS

- **Utilisation de Castem pour réaliser des calculs thermomécaniques du soudage par FE d'une éprouvette JWRI.**
  - Optimisation: Utilisation d'un couplage Castem-Matlab pour identifier les paramètres d'une source d'apport de chaleur.
  - Utilisation de UMAT pour 'ajouter' à Castem une loi de comportement.
  - Validation de la loi de comportement (comparaison Castem-SiDoLo)
  - Réalisation de simulation thermomécanique du soudage par FE d'éprouvettes JWRI (utilisation de PASAPAS)
- **Perspective:** Identifier un critère de fissuration à chaud.
- **Remerciements:** Olivier Fandeur (CEA LM2S)