



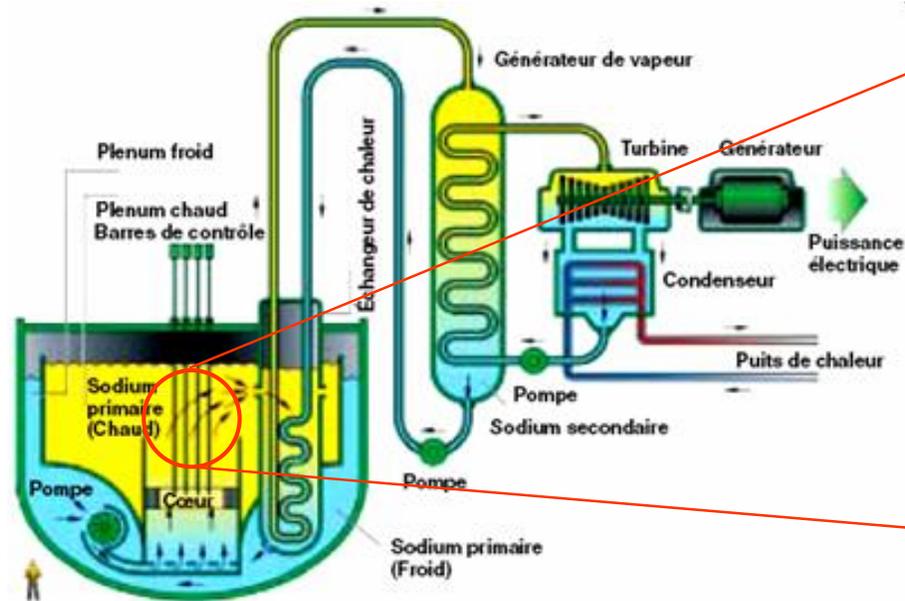
# Simulation numérique du soudage par résistance du gainage combustible en acier ODS de réacteurs nucléaires de 4ème génération (RNR-NA)

Mohamed Mabrouki, Diogo Gonçalves, Serge Pascal, Denis Bertheau,  
Gibert Henaff, Angéline Poulon-Quintin

Contact : [mohamed.mabrouki@cea.fr](mailto:mohamed.mabrouki@cea.fr)

Club Cast3M 2022

Paris, 25 Novembre



Réacteur Nucléaire à Neutron Rapides  
refroidi au sodium (RNR-Na)



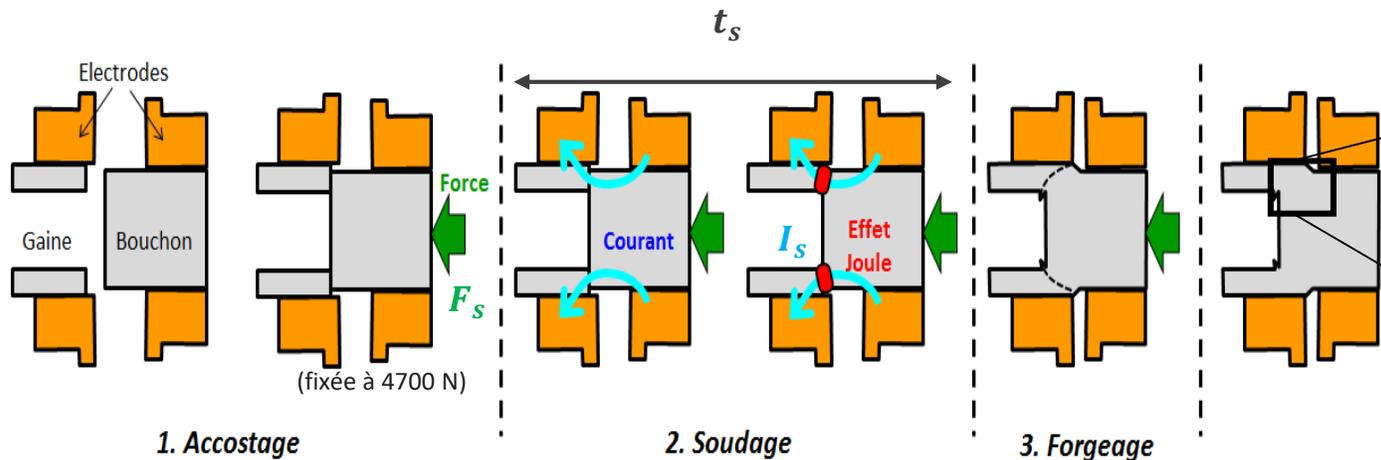
#### Sollicitations en service de la gaine de combustible (Ukai et al., 2005; Sornin et al., 2021) :

- **Pression interne : en constante augmentation atteignant 100 MPa en fin de vie (6 – 8 ans )**
- **Température : 400 – 700 °C**
- **Dose d'irradiation : 120 – 200 dpa\***

Ukai, et al. (2005) Journal of Nuclear Science and Technology, 42(1), pp. 109–122.

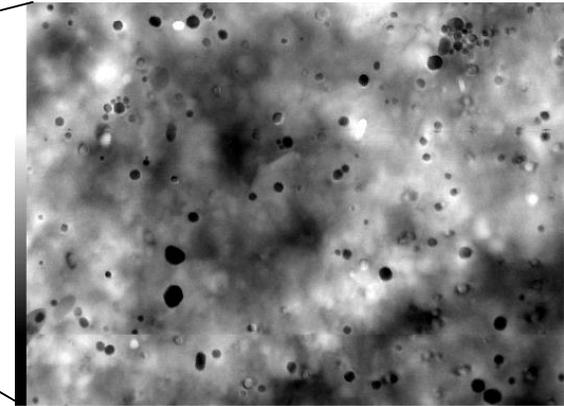
Sornin, et al. (2021) Metallurgical and Materials Transactions, A volume 52, pages 3541–3552

## ❑ Procédé de soudage à l'état solide des aciers ODS



Principe du soudage par résistance (SPR) des assemblages bouchon-gaine  
(Vue en coupe des pièces)

Dispersion homogène de nano-oxydes  
Résistant aux conditions sévères de service (MPa; °C; dpa)

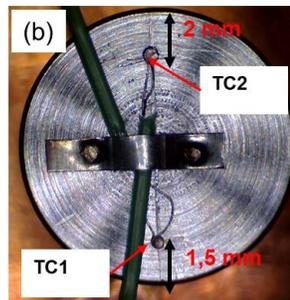
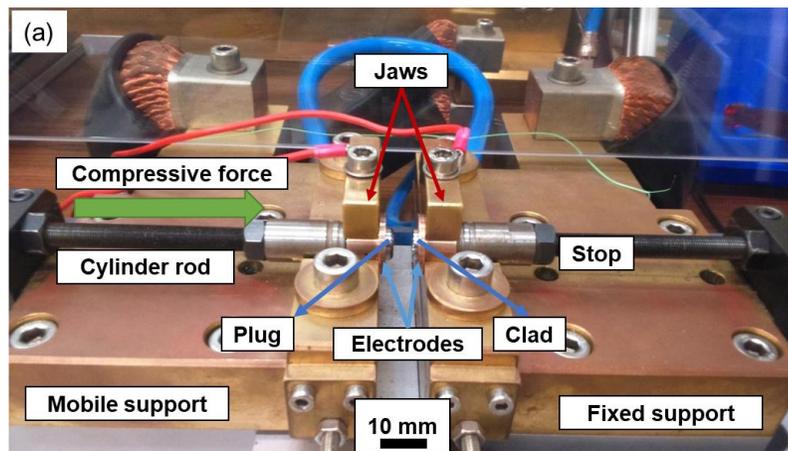


0.5  $\mu\text{m}$   
BF

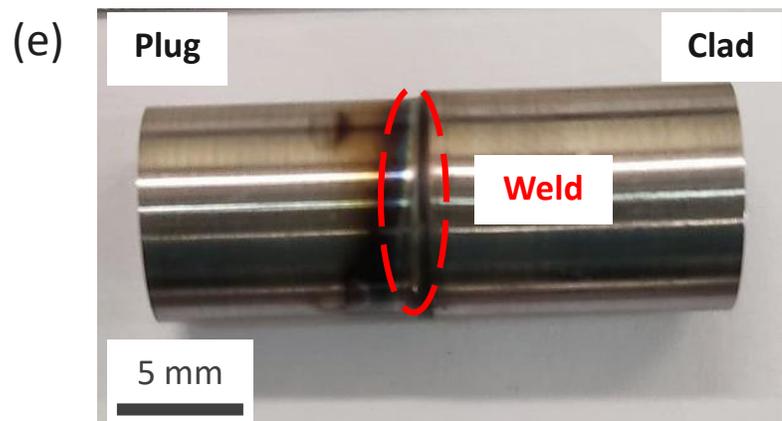
Le procédé de soudage par résistance (SPR) à **l'état solide** a été retenu par le CEA pour le soudage du gainage de combustible en acier ODS

La maîtrise du procédé limite l'impact du soudage sur la dispersion de nano-oxydes (agglomération/coalescence négligeable) (Corpace, 2011; Le Gloannec, 2016; Gan et al., 2018)

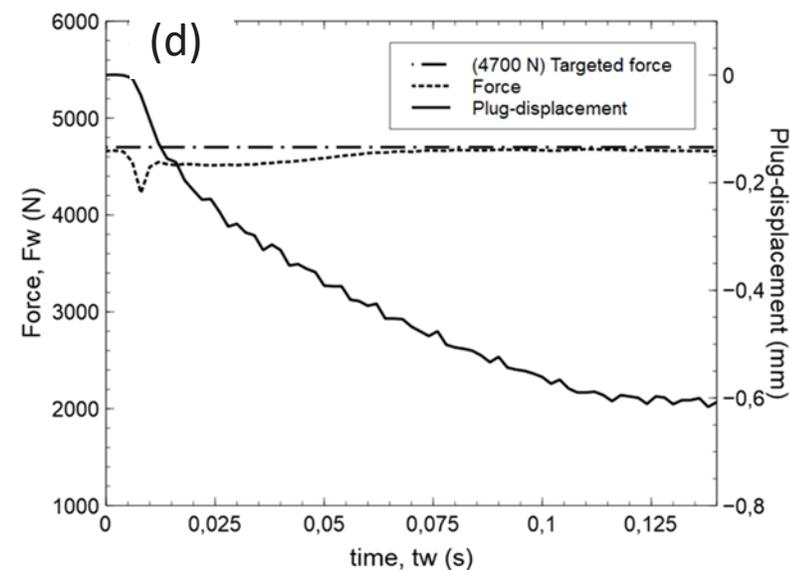
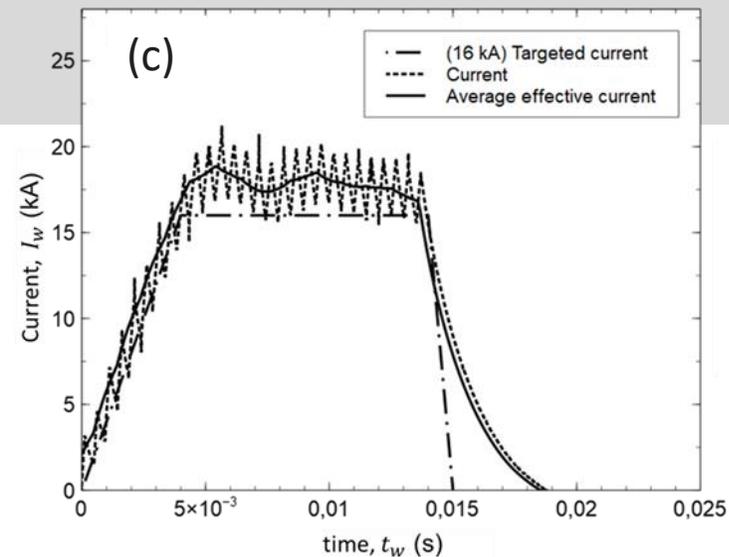
Corpace, (2011), thèse de doctorat.  
Le Gloannec, (2016), thèse de doctorat.  
Gan, J. et al. (2018), JOM, 70(2), pp. 192–197.



(a) Plug and clad installed within copper alloy electrodes in the PWR device.  
 (b) Top view of a plug instrumented with K-type thermocouples.



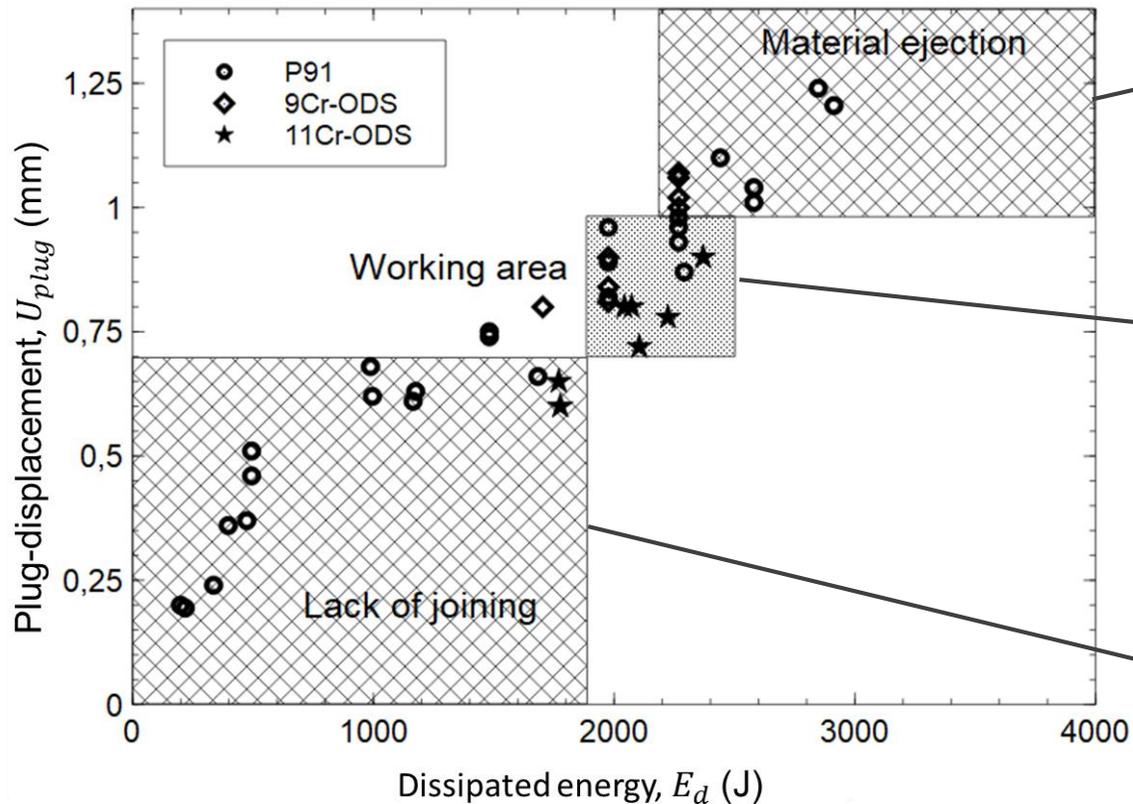
Plug-clad assembly



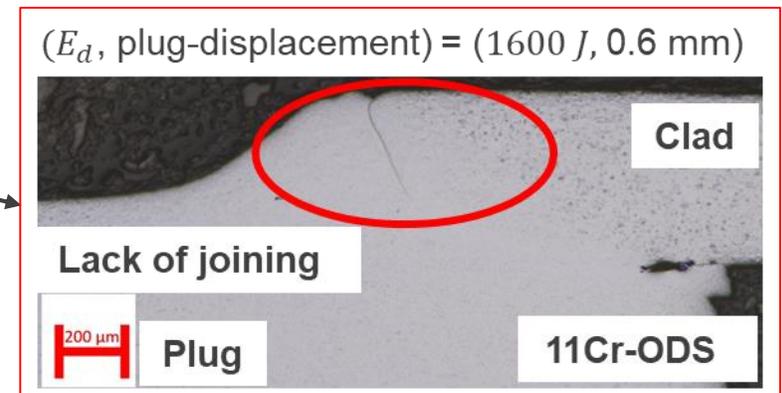
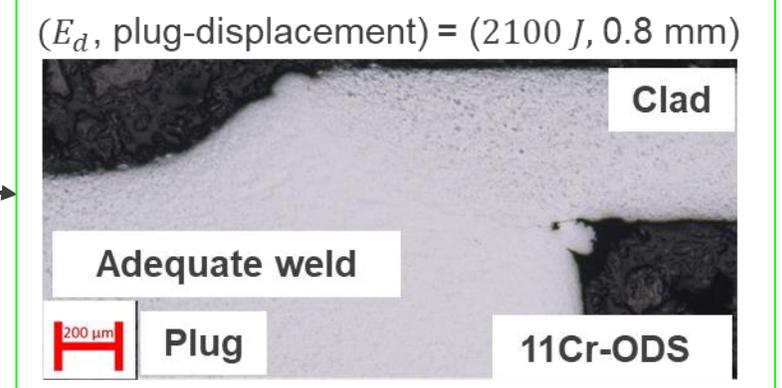
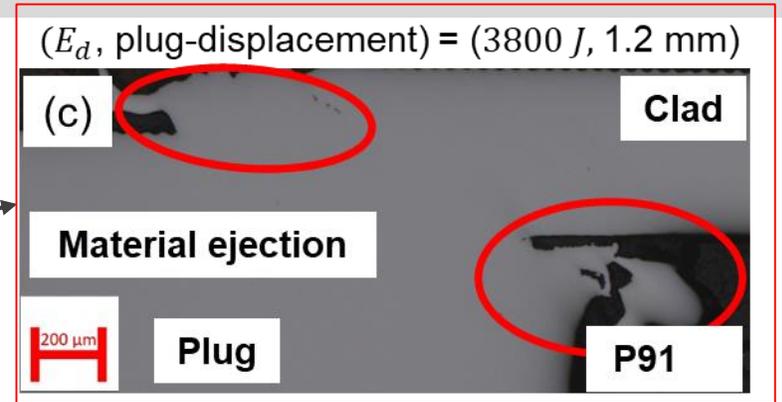
Example of experimental measurements obtained during the PRW process.  
 (c) Applied current,  $I_w$ , compared with the targeted electric current, 16 kA.  
 (d) Plug-displacement,  $U_{Plug}$ , and welding force,  $F_w$ , compared to the targeted force, 4700 N.

□ Optimisation des paramètres opératoires pour la nouvelle configuration de soudage

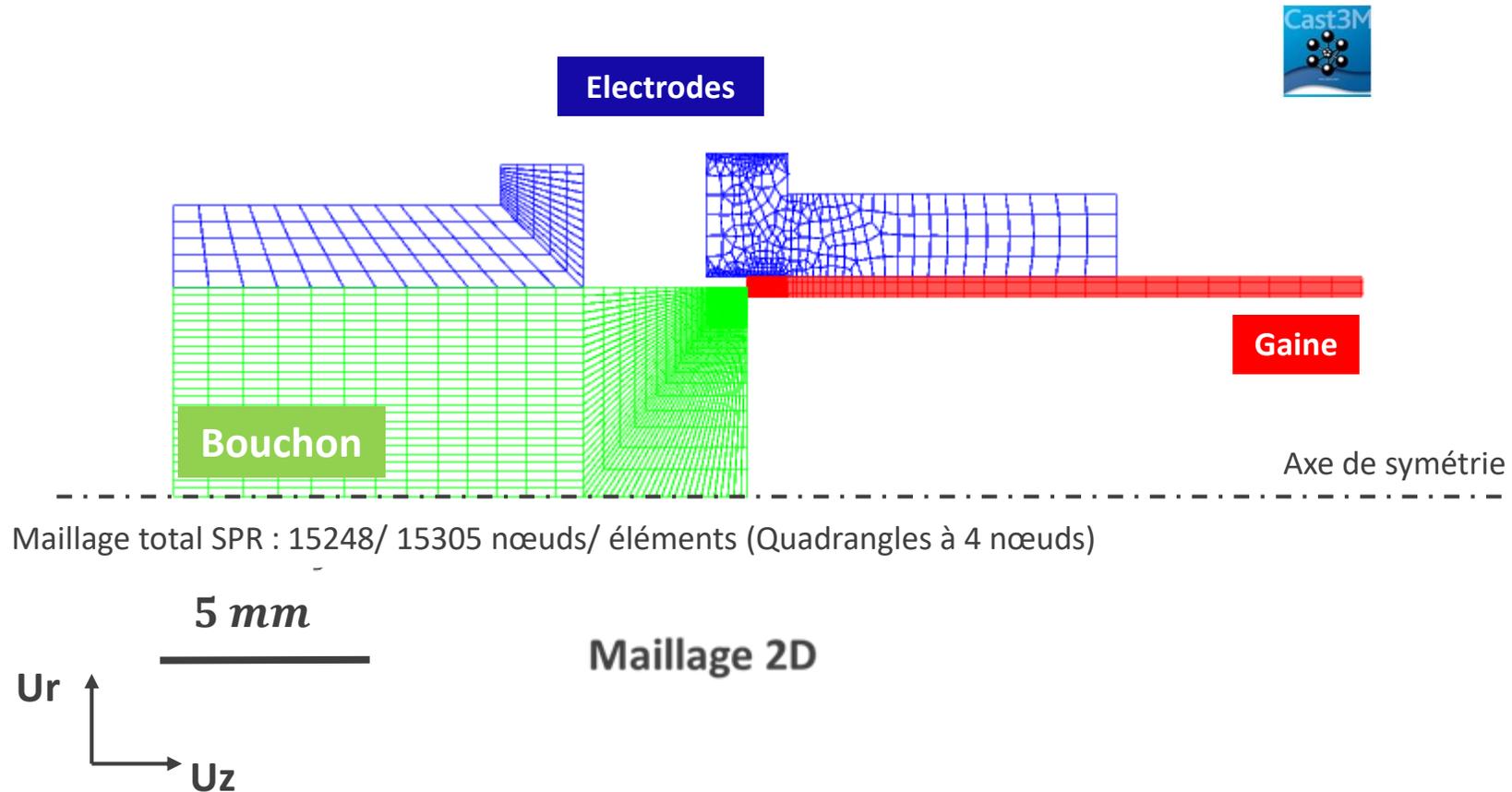
$$\text{Energie électrique dissipée } E_d = \int_0^{t_s} ddp_{mors} \times I_s(t) dt$$



Experimental measurements of plug-displacement,  $U_{plug}$ , obtained for 62 experimental welds as a function of the dissipated energy,  $E_d$ , for constant welding force,  $F_w = 4700$  N.



- ☐ Maillage et conditions aux limites
  - ☐ Modèle 2D axisymétrique



- Maillage et conditions aux limites
  - Modèle électrothermique (ET)



Résistance de Contact Electro  
Thermique (RCET)

$$J = \frac{1}{R_{ce}} (V1 - V2)$$

$$q = \frac{1}{R_{ct}} (T1 - T2)$$

RCET

$$J = \frac{Is}{S}$$

Electrodes

$$V = 0$$

RCET

Gaine

Bouchon

Axe de symétrie

Maillage total SPR : 15248/ 15305 nœuds/ éléments (Quadrangles à 4 nœuds)

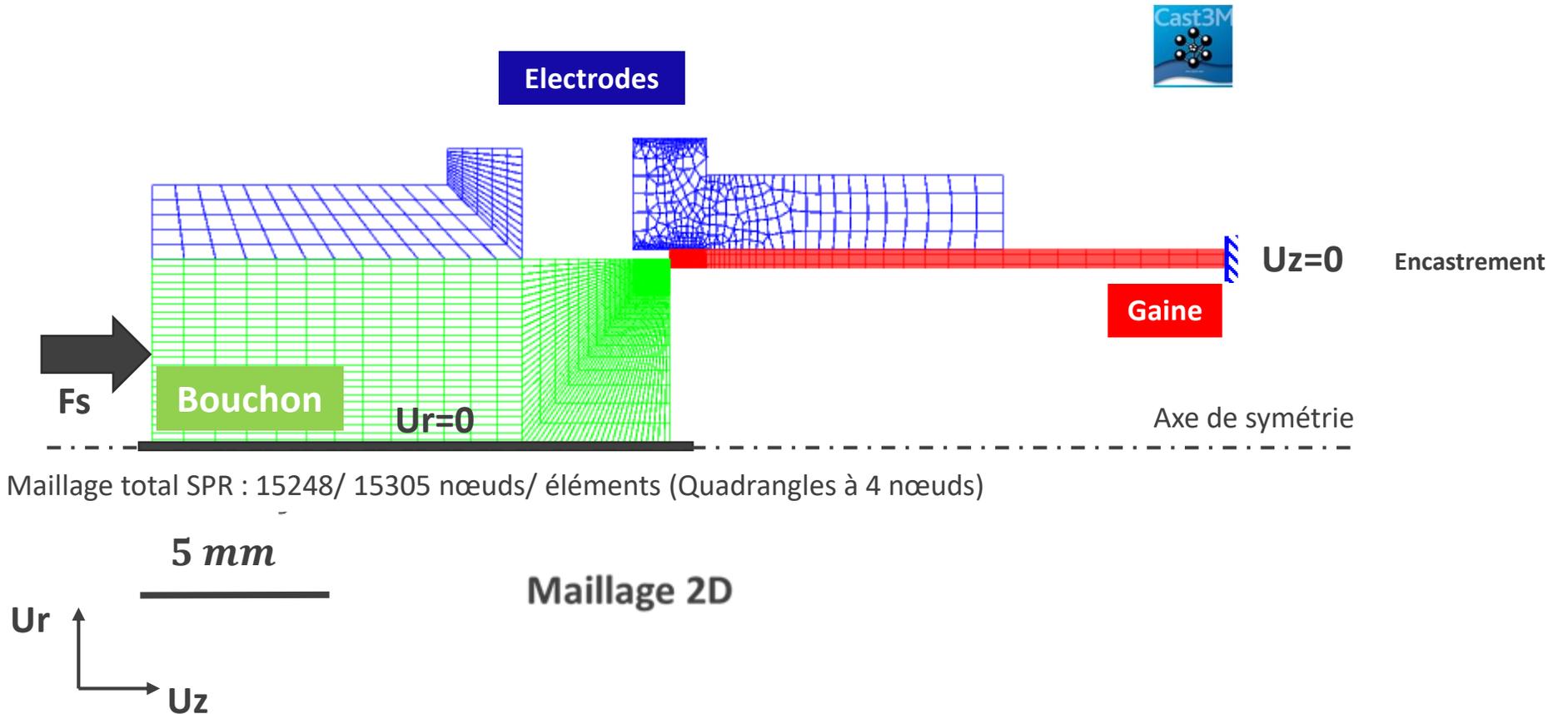
5 mm

Maillage 2D

Ur

Uz

- Maillage et conditions aux limites
  - Modèle électro-thermomécanique (ETM)



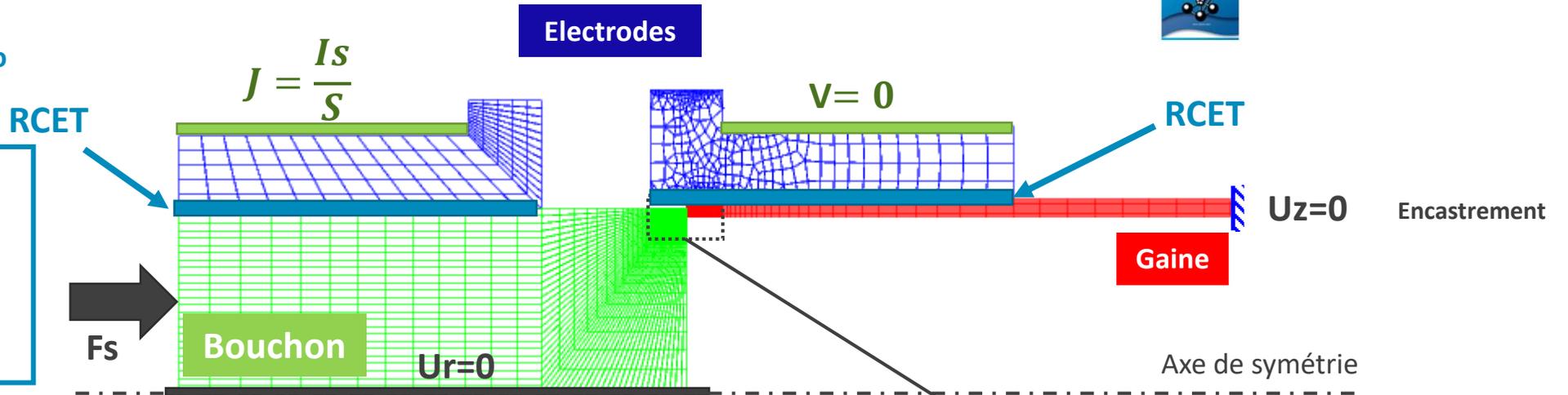
Maillage et conditions aux limites

 Remaillage

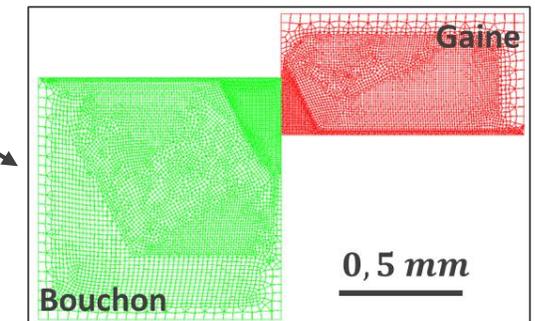
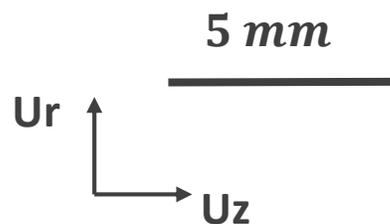

Résistance de Contact Electro  
Thermique (RCET)

$$J = \frac{1}{R_{ce}} (V1 - V2)$$

$$q = \frac{1}{R_{ct}} (T1 - T2)$$



Maillage total SPR : 15248/ 15305 nœuds/ éléments (Quadrangles à 4 nœuds)

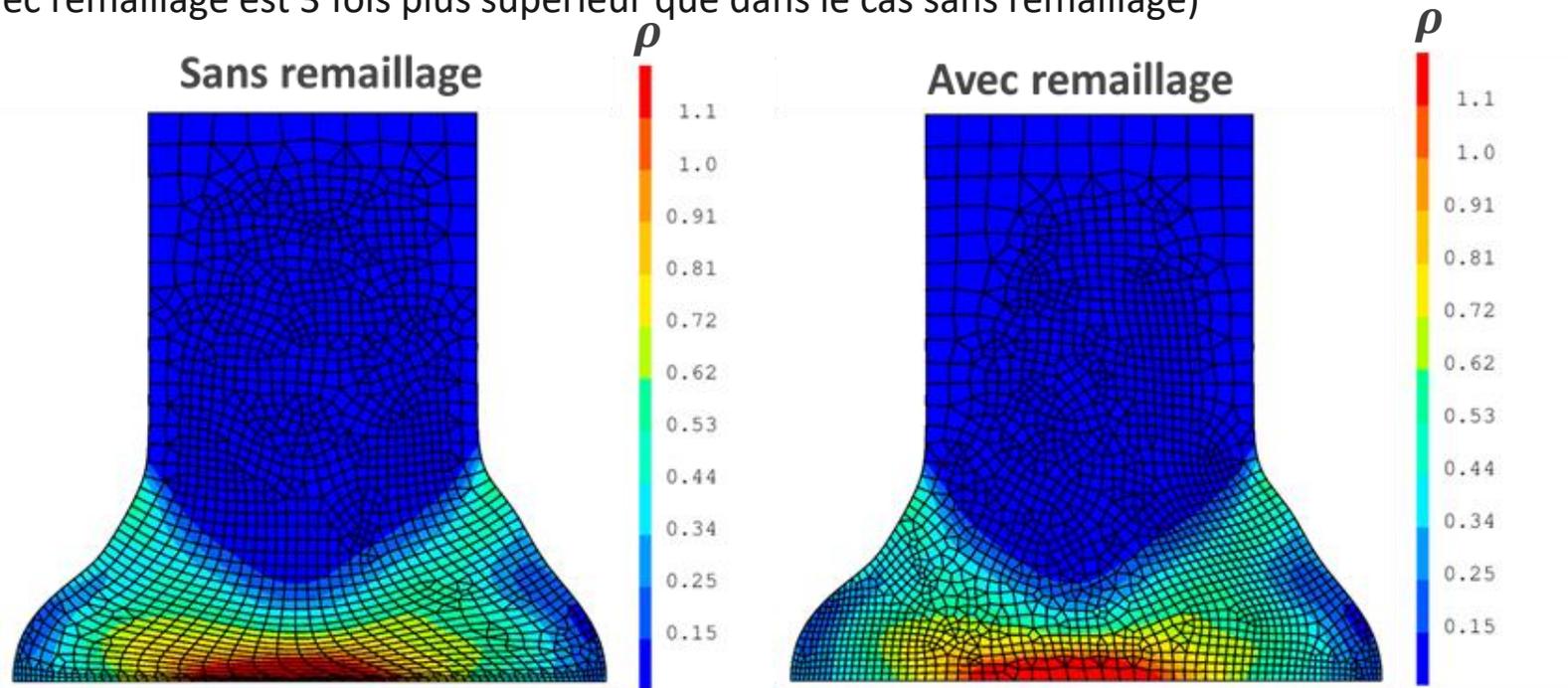


Zones raffinées et remaillées au cours du calcul

## Principales étapes de remaillage

- i. Extraire la forme extérieure du maillage déformé.
- ii. Remaillage de la zone déformée à partir de contour déformé.
- iii. Définition du modèle et des caractéristiques de la zone remaillée.
- iv. Projection sur le nouveau maillage les champs calculés (déplacement, contrainte, déformation, température...) sur l'ancien maillage.
- v. Assemblages des parties remaillées et non.
- vi. Sauvegardes du nouveau modèle et poursuite de calcul.

(temps de calcul avec remaillage est 3 fois plus supérieur que dans le cas sans remaillage)



500  $\mu m$

Déformation plastique cumulée lors du forgeage d'un tube, avec et sans remaillage

## ☐ Principaux développements réalisés dans Cast3M

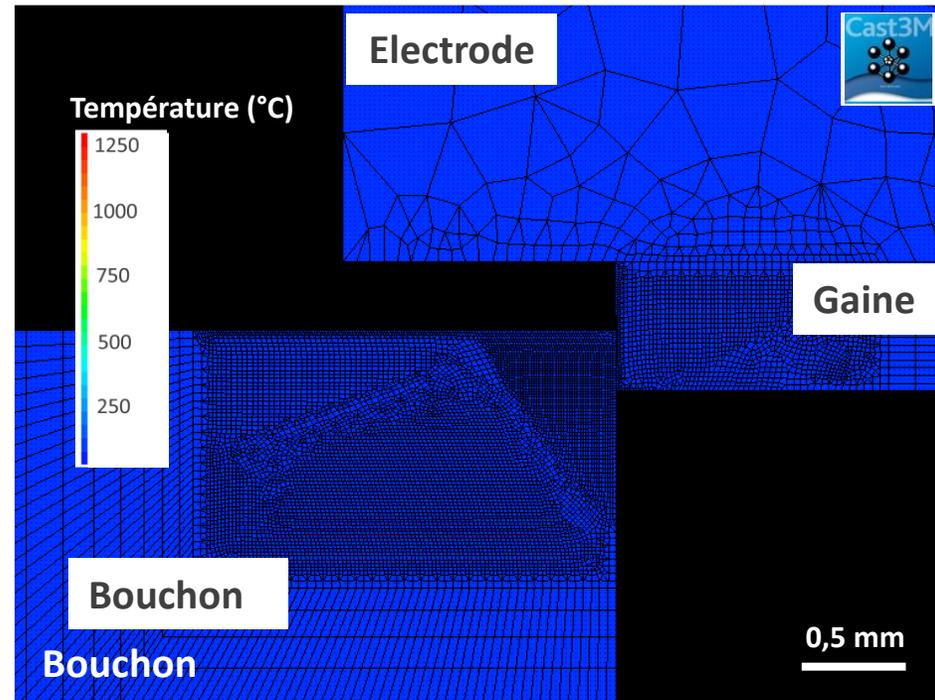
- Dans CHARTER\*:
  - i. Développement d'une procédure permettant de calculer la source de chaleur générée par effet joule à chaque pas de temps et de l'introduire pour résoudre l'équation de la chaleur.
  - ii. Développement d'une méthode pour la prise en compte des résistances électriques de contact.
  
- Dans PERSO1\*\*:
  - i. Développement d'une méthode pour la prise en compte des modifications de conditions électrothermiques de contact.
  
  - ii. Développement d'une procédure de remaillage automatique validée pour gérer les grandes déformations rencontrées lors du SPR.

\* Procédure CHARTER : procédure permet de modifier le chargement thermique au cours des itérations du schéma de résolution non linéaire de la thermique.

\*\* Procédure PERSO1 : procédure appelée en début et fin de pas mécanique hors de la boucle de convergence thermique mécanique (la procédure est donc exécutée une fois à chaque pas de temps). Elle permet, par exemple, de redéfinir le chargement mécanique après chaque pas de temps.

## ❑ Illustration du procédé

## Paramètres opératoires

Force de soudage -  $F_S$ Intensité du courant -  $I_S$ Temps de soudage -  $t_S$ 

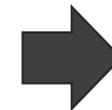
Temps de calcul d'environ 5 h

## Sorties

Géométrie finale de l'assemblage soudé

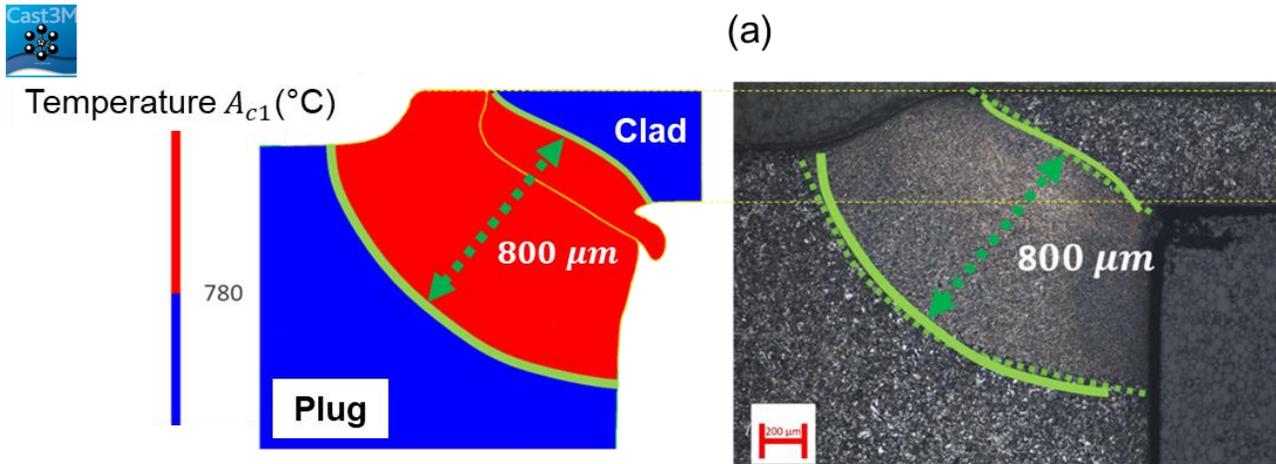
Taille des zones affectées par le soudage

Cycles thermomécaniques induits par le procédé au matériau

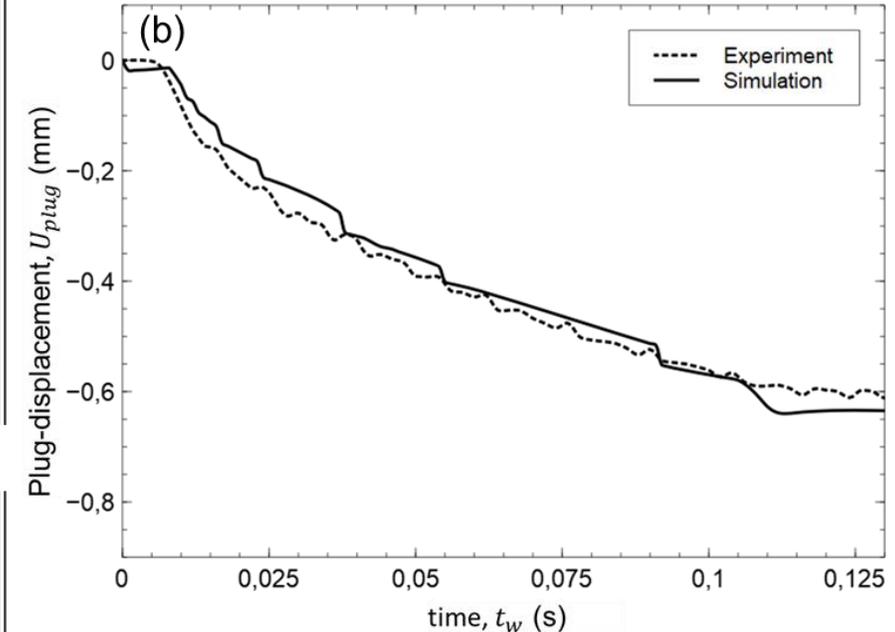


## Validation des résultats numériques : comparaison avec l'expérience

### Comparaison des zones affectées par le SPR



### Courbes de déplacement expérimental et simulé



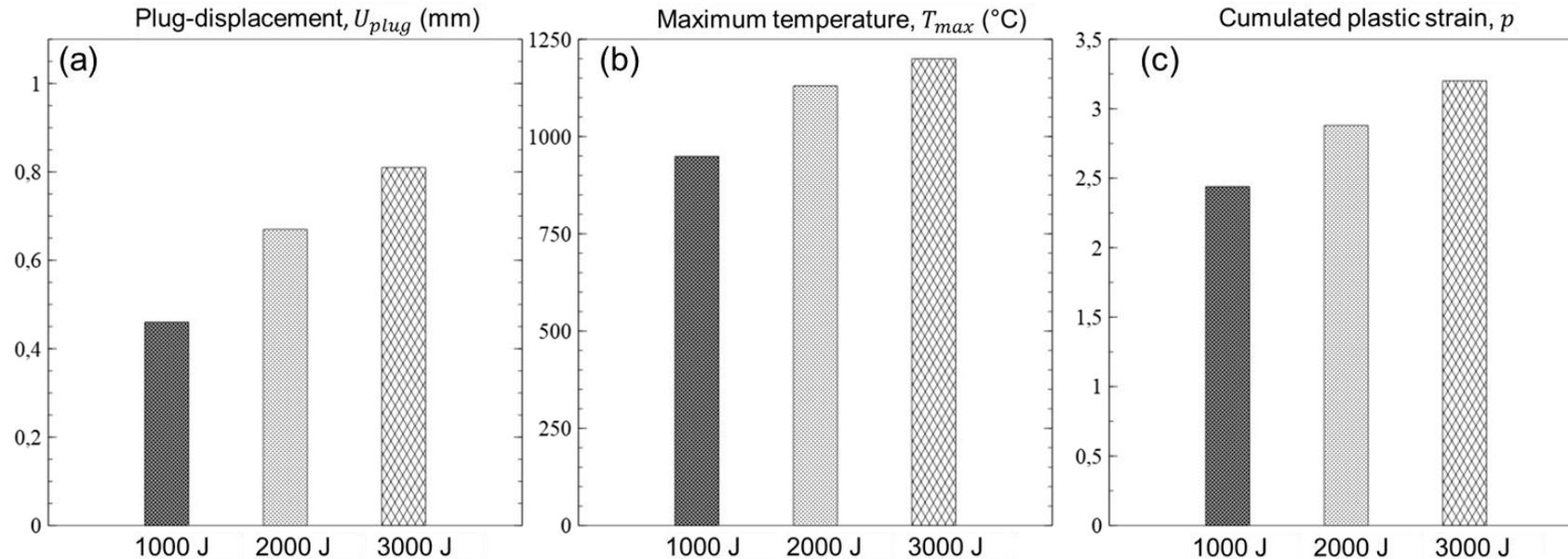
(a) Comparison of the position and dimensions of both experimental (dotted lines) and computed (solid line) HAZ of P91 weld.

Computed HAZ is defined by elements submitted to temperatures higher than the temperature  $A_{c1}$ .

(b) Comparison between experimental and computed plug-displacement curves.

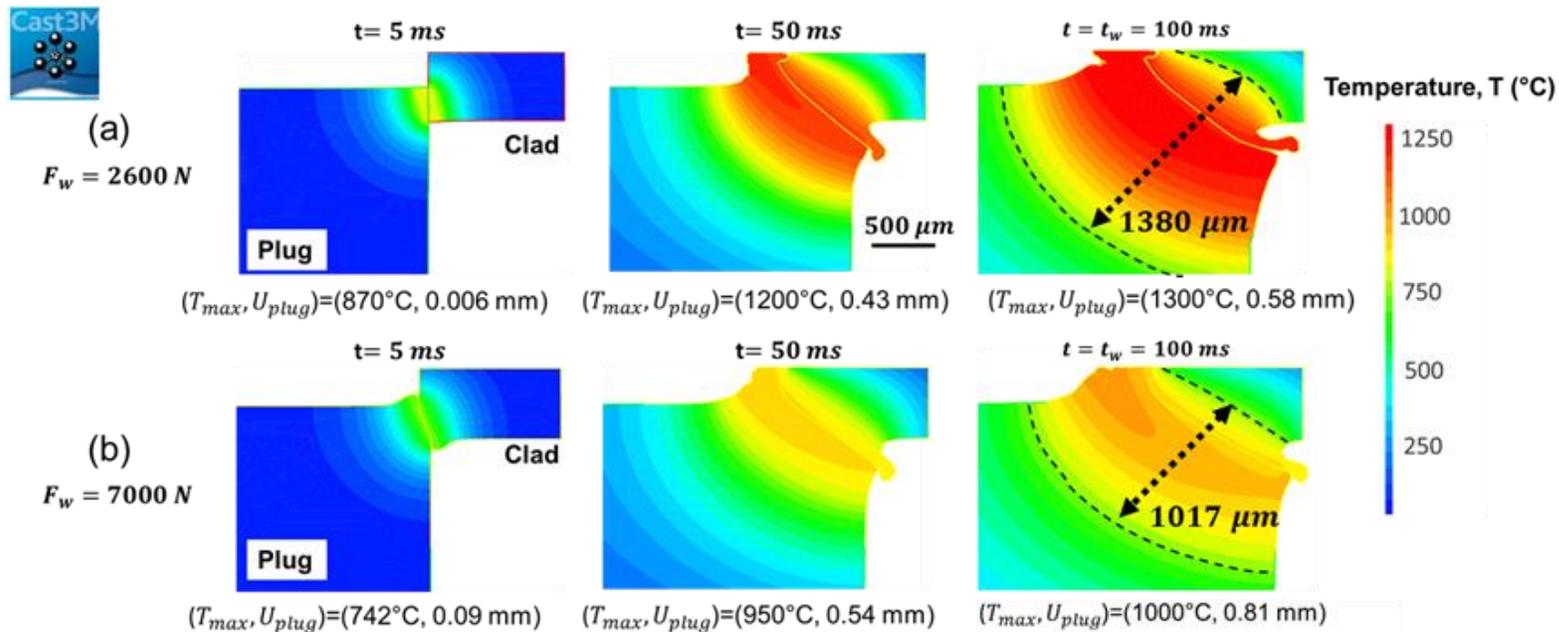
**Bon accord entre mesures expérimentales et les prédictions numériques**

## □ Effet de l'énergie dissipée



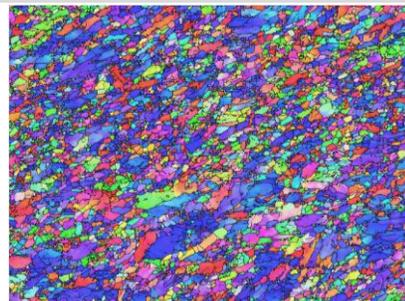
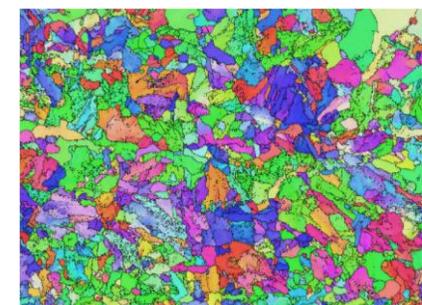
Numerical predictions of (a) plug-displacement,  $U_{plug}$ , (b) maximum temperature,  $T_{max}$ , and (c) cumulated plastic strain,  $p$ , for different dissipated energies,  $E_d$ . Values of  $T_{max}$  and  $p$  are extracted from a node located at the joint plane.

- Une augmentation de  $E_d$  conduit à une augmentation de  $T_{max}$ .
- Comme la limite d'élasticité du matériau diminue avec la température, la déformation plastique augmente lorsque  $E_d$  augmente, de même que le déplacement du bouchon.

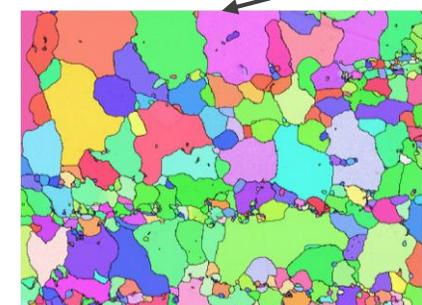
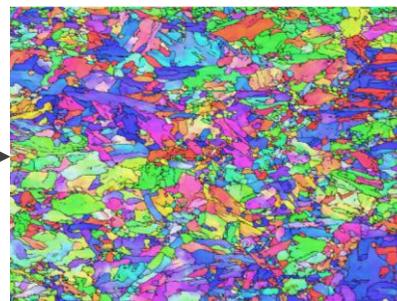
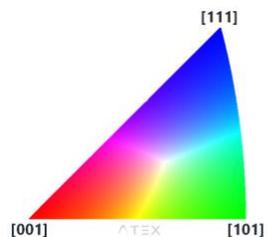
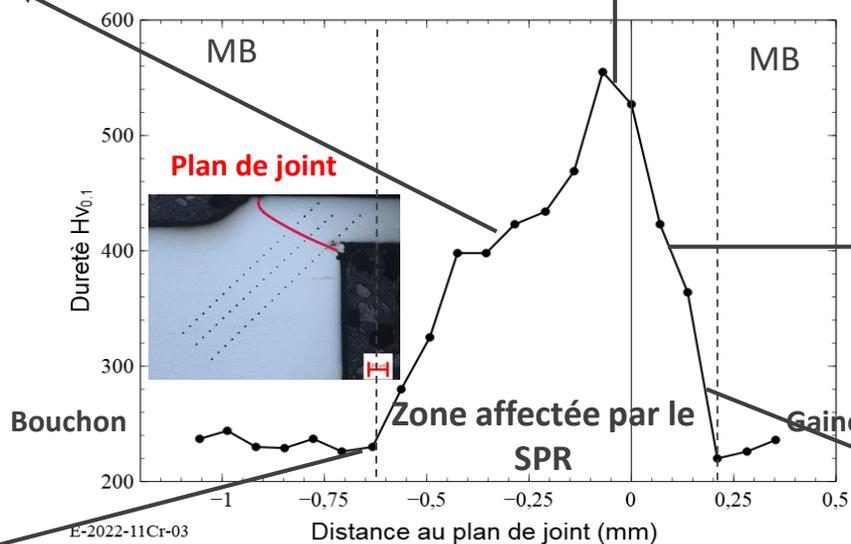
Effet de la force


Temperature field during welding obtained by imposing constant dissipated energy,  $E_d = 2500 \text{ J}$ , and different welding forces: (a)  $F_w = 2600 \text{ N}$ ; (b)  $F_w = 7000 \text{ N}$ .

- Lorsqu'on applique une force plus importante, la surface de contact se déforme plus. Comme cette surface est plus importante, l'intensité du courant produit par effet Joule est plus faible, de même que la température dans la pièce soudée.
- Une augmentation de  $F_w$  conduit à une augmentation du déplacement du bouchon.

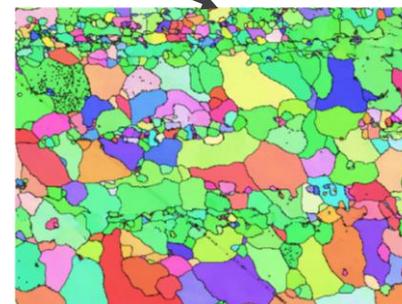


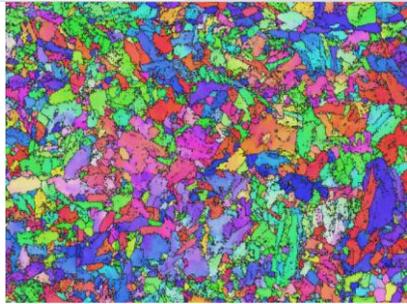
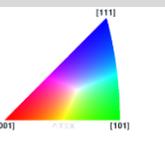
→ Fort gradient de dureté et de microstructure tout au long de la soudure.



Cartographies EBSD IPFX (associées à la direction de filage) montrant l'évolution de la microstructure le long du joint de soudure en acier 11Cr-ODS. **Corrélation entre la microstructure et les mesures de dureté.**

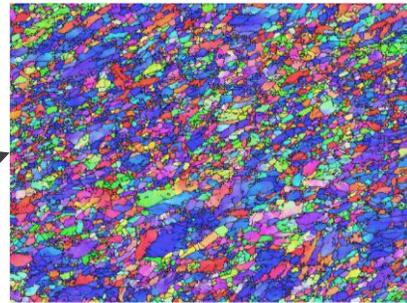
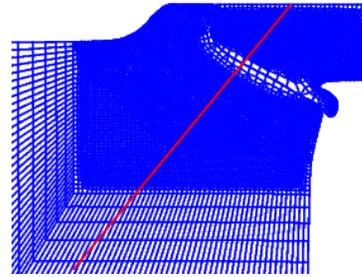
10  $\mu m$





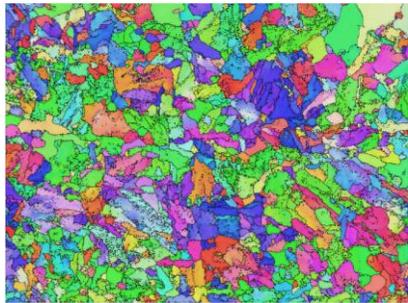
$T_{++}$   
 $0,1 < \epsilon_p < 1$

$Hv_{0,1,ZATM^{\circ}2}$



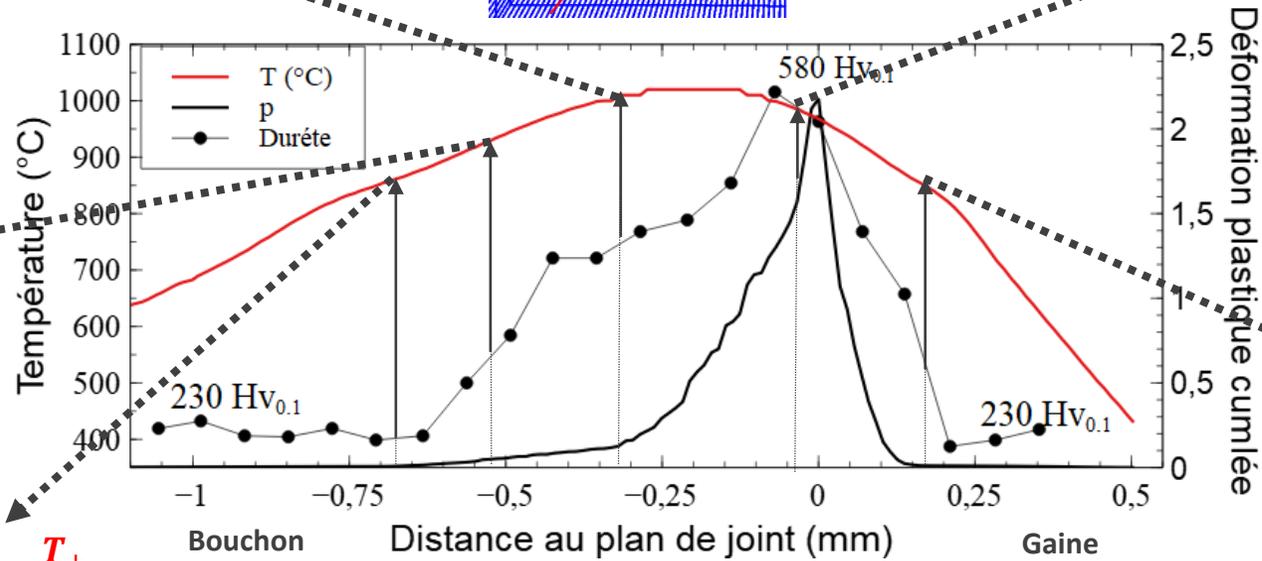
$T_{++}$   
 $\epsilon_p > 1$

$Hv_{0,1} > Hv_{0,1,ZATM^{\circ}2}$

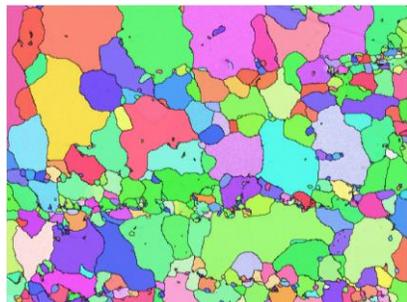


$T_{++}$   
 $\epsilon_p \approx 0,1$

$Hv_{0,1_{MB}} \leq Hv_{0,1} \leq Hv_{0,1,ZATM^{\circ}2}$

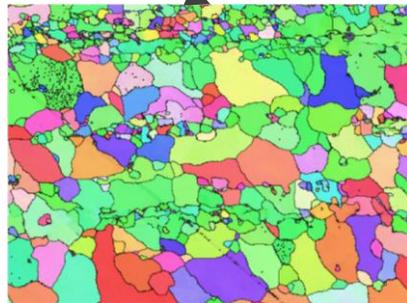


Déformation plastique cumulée



$T_{+}$   
 $\epsilon_p = 0$

$Hv_{0,1} = Hv_{0,1_{MB}}$



$T_{+}$   
 $\epsilon_p = 0$

$Hv_{0,1_{MB}} \leq Hv_{0,1} \leq Hv_{0,1,ZATM^{\circ}2}$

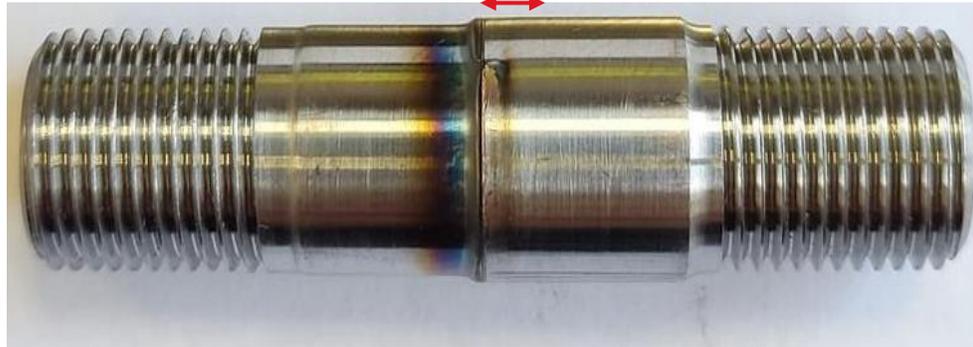
10µm

Cartographies EBSD IPFX (associé à la direction de filage) montrant l'évolution de la microstructure le long du joint de soudure en acier 11Cr-ODS obtenue avec les paramètres (Fs, Is, ts) = (4700 N, 12 kA, 120 ms). **Corrélation entre la microstructure et les cycles thermomécaniques simulés.**

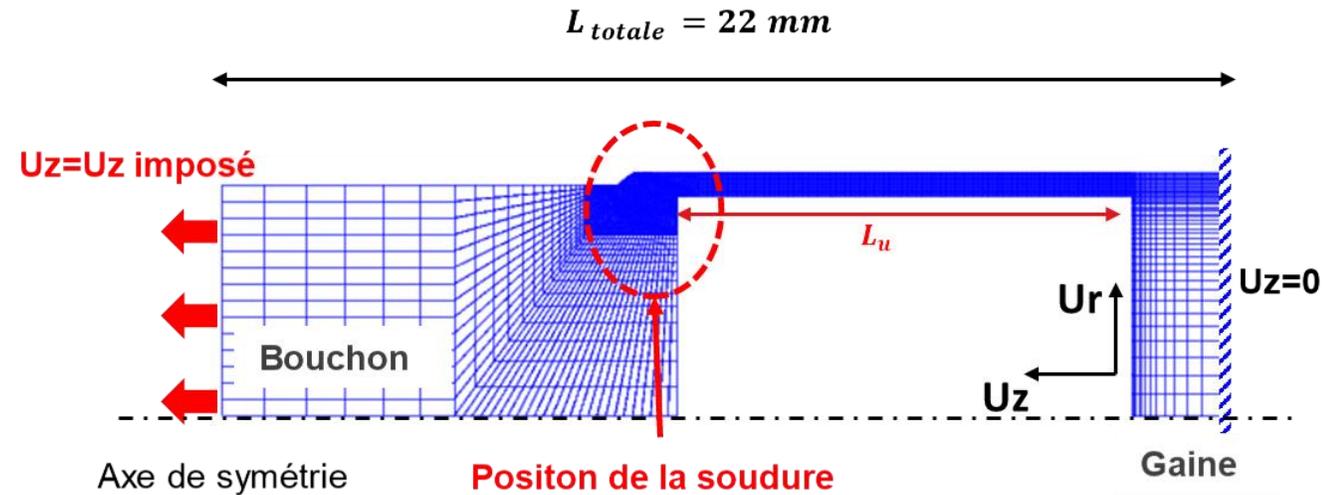
## Essais de traction bouchon-gaine

Bouchon

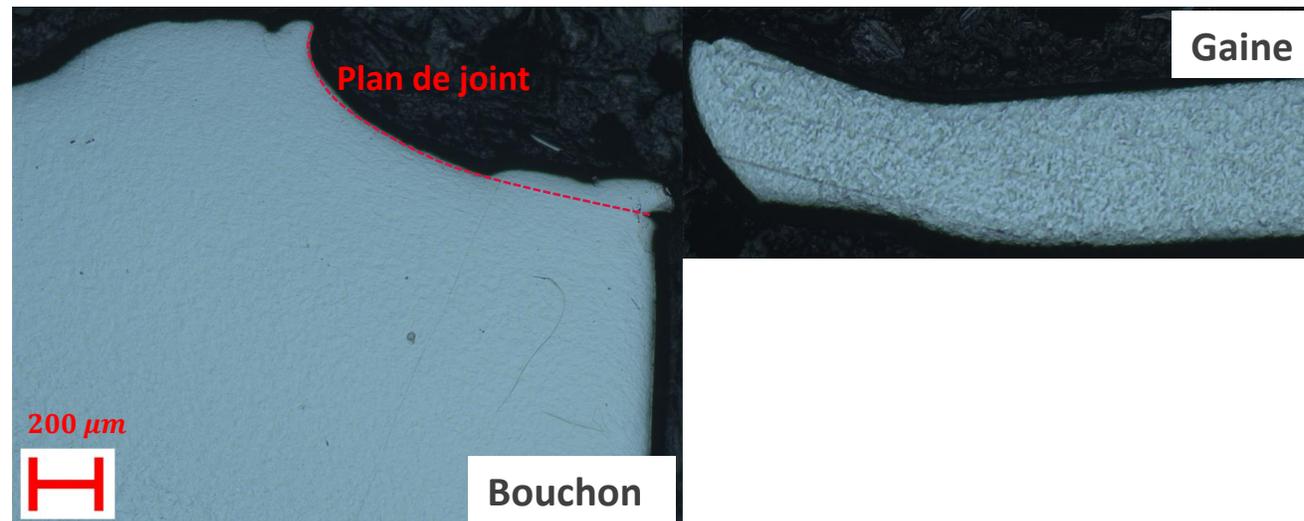
Gaine



Eprouvette de traction bouchon-gaine

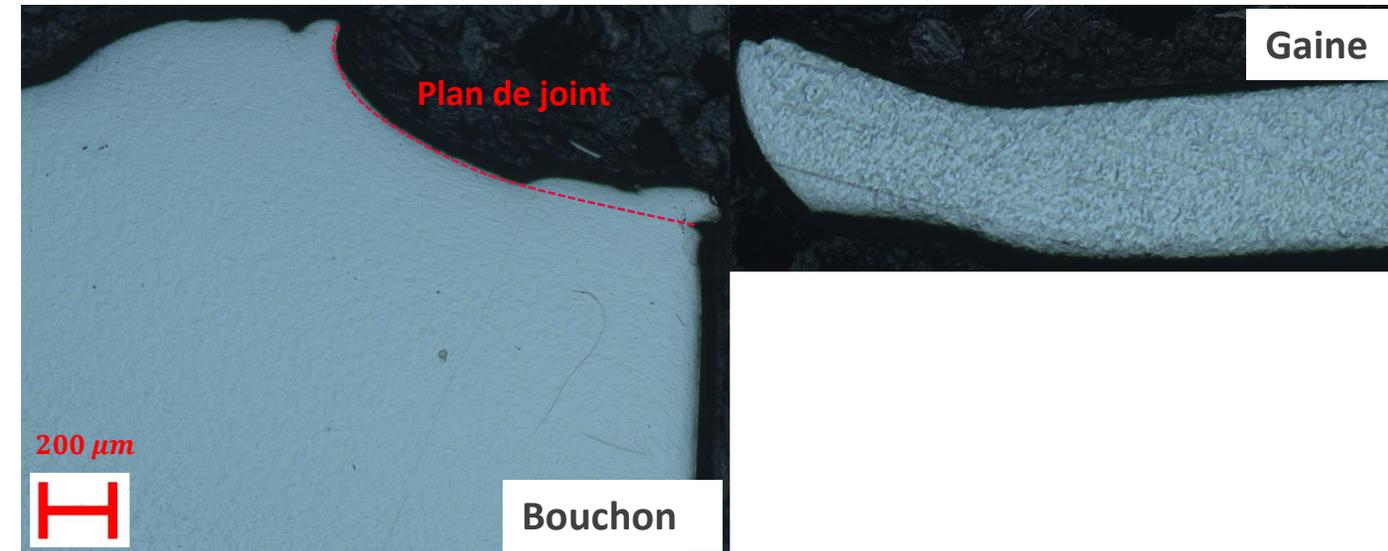


Dimensionnement des éprouvettes bouchon-gaine

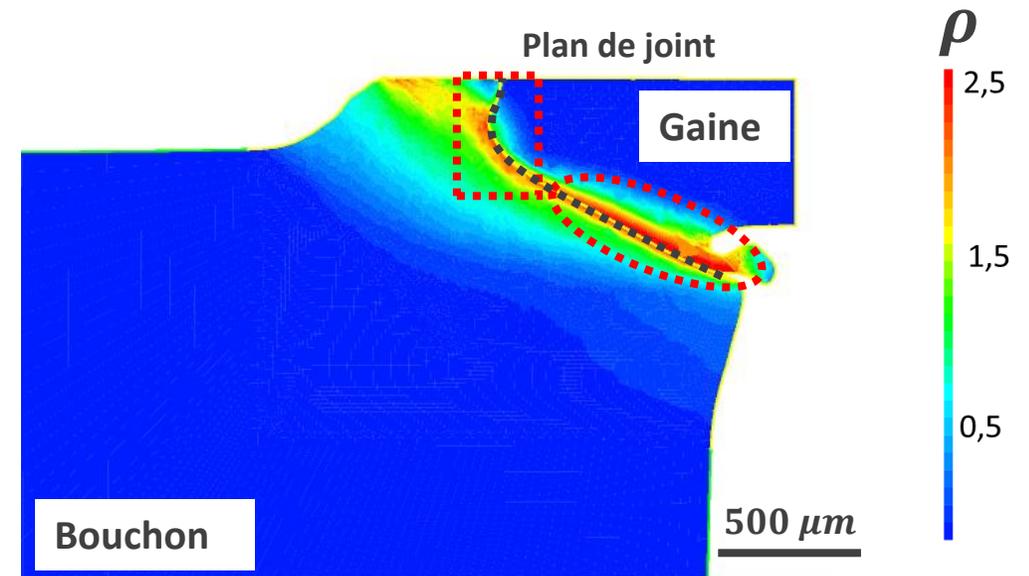


Vue en coupe de l'éprouvette après essai de traction à 20°C rupture au niveau du plan de joint et de la zone affectée par le soudage coté gaine.

## ☐ Simulation des essais de traction bouchon-gaine et comparaison à l'expérience



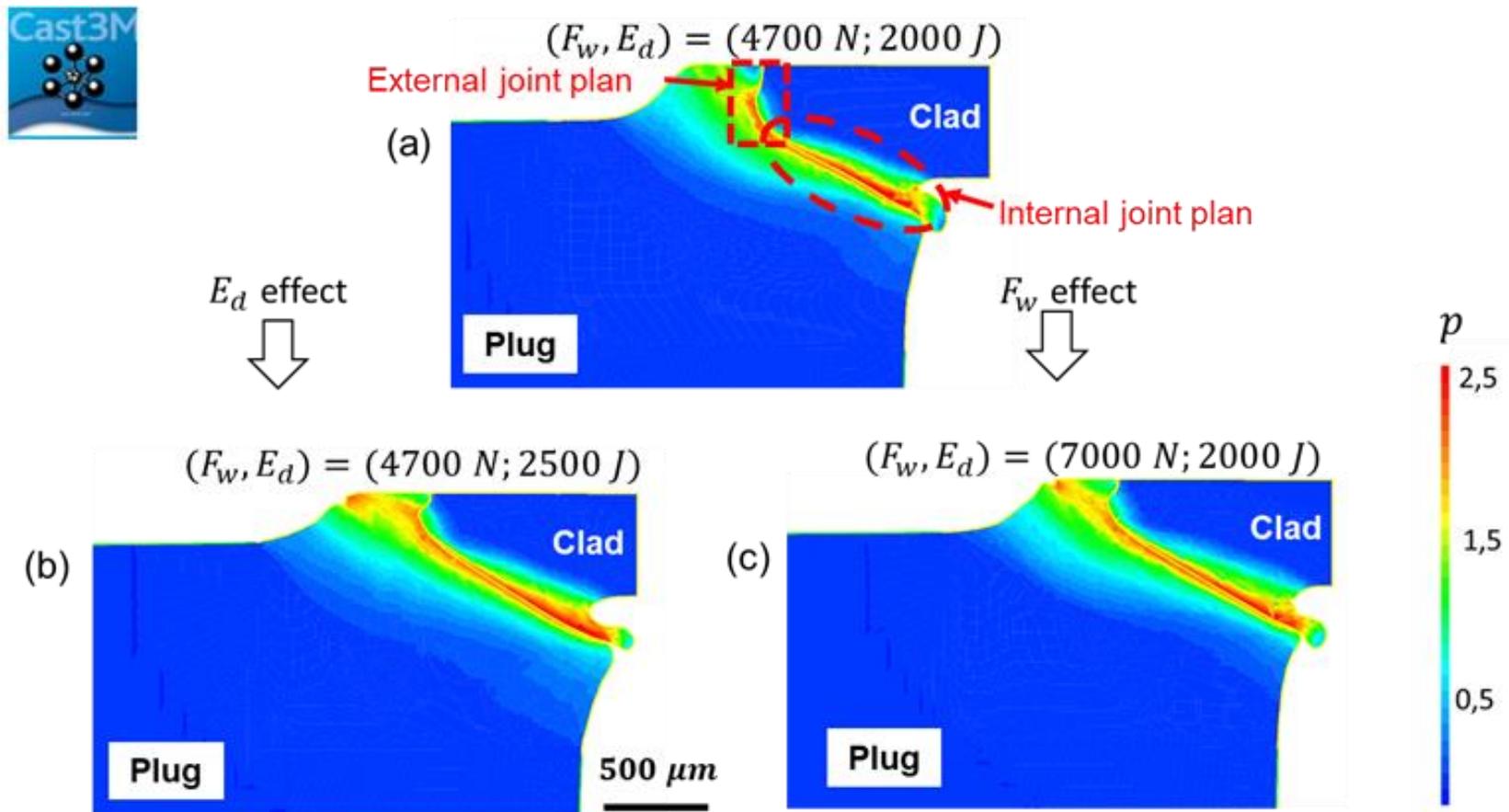
Vue en coupe de l'éprouvette après essai de traction à 20°C rupture au niveau du plan de joint et de la zone affectée par le soudage coté gaine.



Champs de déformation plastique cumulée après soudage

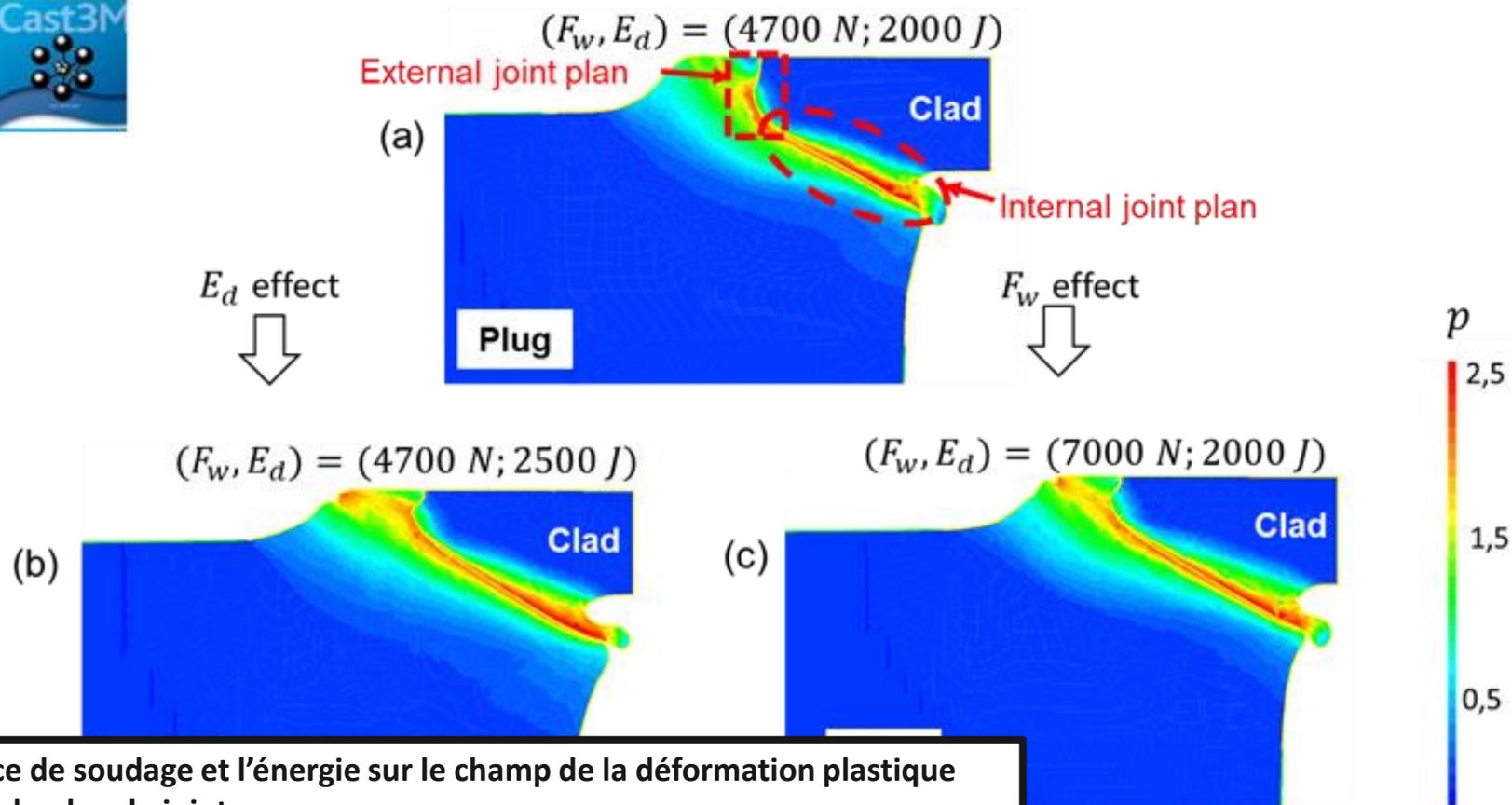
- La résistance mécanique de l'assemblage soudé peut être associée à la zone subissant une grande déformation plastique et présentant des valeurs de dureté les plus élevées.
- Corrélation entre les microstructures et la zone de rupture (en cours).
- Effet de la manque de liaison extérieure sur l'amorçage de la fissure et la zone de la rupture (en cours).

□ Effet de la force de soudage et l'énergie dissipée sur la forme du plan de joint



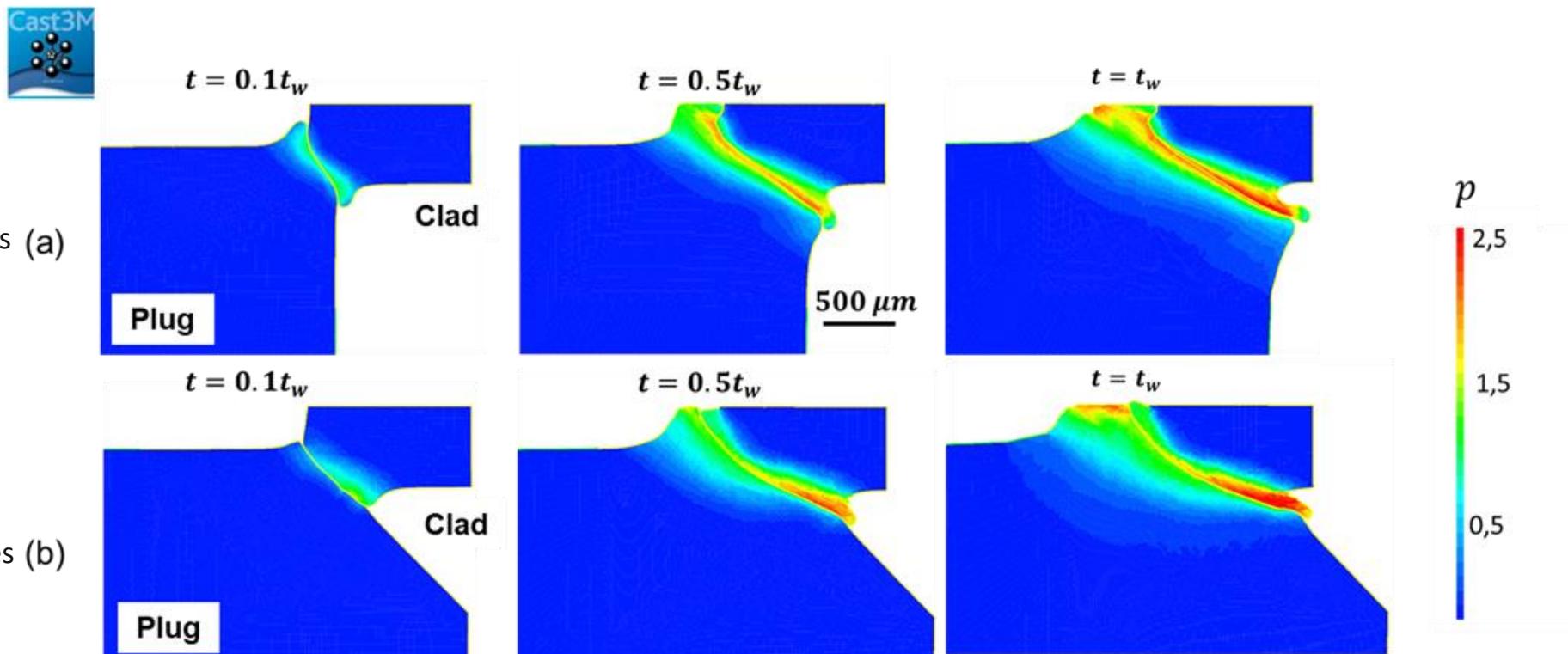
Comparison of the influence of the welding force,  $F_w$ , and of the dissipated energy,  $E_d$ , on the computed cumulated plastic strain,  $p$ , field: (a)  $(F_w, E_d) = (4700 \text{ N}, 2000 \text{ J})$ ; (b)  $(F_w, E_d) = (4700 \text{ N}, 2500 \text{ J})$ ; (c)  $(F_w, E_d) = (7000 \text{ N}, 2000 \text{ J})$ .

- Effet de la force de soudage et l'énergie dissipée sur la forme du plan de joint



- Effet limité de la force de soudage et l'énergie sur le champ de la déformation plastique cumulée et la forme du plan de joint.
- Modification de la géométrie de contact entre les pièces?

plastic strain,  $p$ , field: (a)  $(F_w, E_d) = (4700 \text{ N}, 2000 \text{ J})$ ; (b)  $(F_w, E_d) = (4700 \text{ N}, 2500 \text{ J})$ ; (c)  $(F_w, E_d) = (7000 \text{ N}, 2000 \text{ J})$ .

Optimisation de la forme du plan de joint vis-à-vis la tenue mécanique de l'assemblage soudé

Effect of the geometry of welding pieces on the cumulated plastic strain field and the shape of the joint plane during welding obtained with the:  
(a) studied welding pieces; (b) proposed chamfered welding pieces.

## ☐ Conclusions

- ✓ Développement dans Cast3M d'un modèle électro-thermo-mécanique du soudage SPR de l'assemblage bouchon-gaine d'aiguilles RNR-Na en géométrie 2D axisymétrique.
- ✓ Validation du modèle par comparaison à l'expérience de :
  - l'étendue de la zone affectée thermiquement ;
  - le déplacement du bouchon au cours du soudage.
- ✓ Etude numérique de l'influence des paramètres opératoires (l'énergie de soudage et force appliquée) sur les caractéristiques de la soudure :
  - la température maximale et l'affaissement du bouchon augmentent quand l'énergie de soudage augmente ;
  - la température maximale diminue lorsque la force appliquée augmente.
- ✓ Etude microstructurale de la soudure :
  - évaluation et maîtrise des effets du SPR sur les microstructures des soudures en acier ODS étudiés.
  - corrélation entre les paramètres opératoires, cycles thermomécaniques et nature de microstructure observée et propriétés
- ✓ Etude de la tenue mécanique de la soudure :
  - à 20°C, rupture dans le plan de joint, sans doute par amorçage en périphérie extérieure.
  - objectif : améliorer le soudage (forgeage) dans cette zone.

Perspectives

- ✓ Optimisation de la géométrie de soudage afin d'améliorer la tenue mécanique de la soudure.
- ✓ Modélisation des phénomènes métallurgiques et validation avec l'expérience.
- ✓ Développement numérique complémentaire :  
Amélioration du maillage avec ajout de nœuds sur les surfaces de contact de la zone remaillée afin de mieux simuler des soudures présentant un déplacement très élevé (> 1 mm).

# Merci pour votre attention

Mohamed Mabrouki, Diogo Gonçalves, Serge Pascal, Denis BERTHEAU, Gibert Henaff, Angéline Poulon-Quintin

Contact : [mohamed.mabrouki@cea.fr](mailto:mohamed.mabrouki@cea.fr)

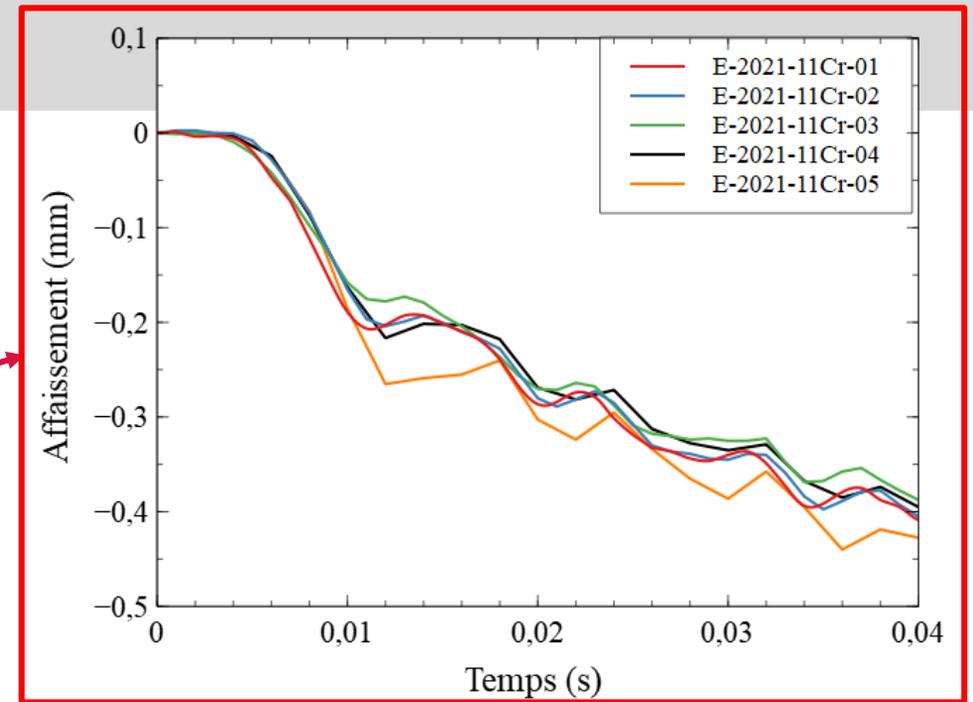
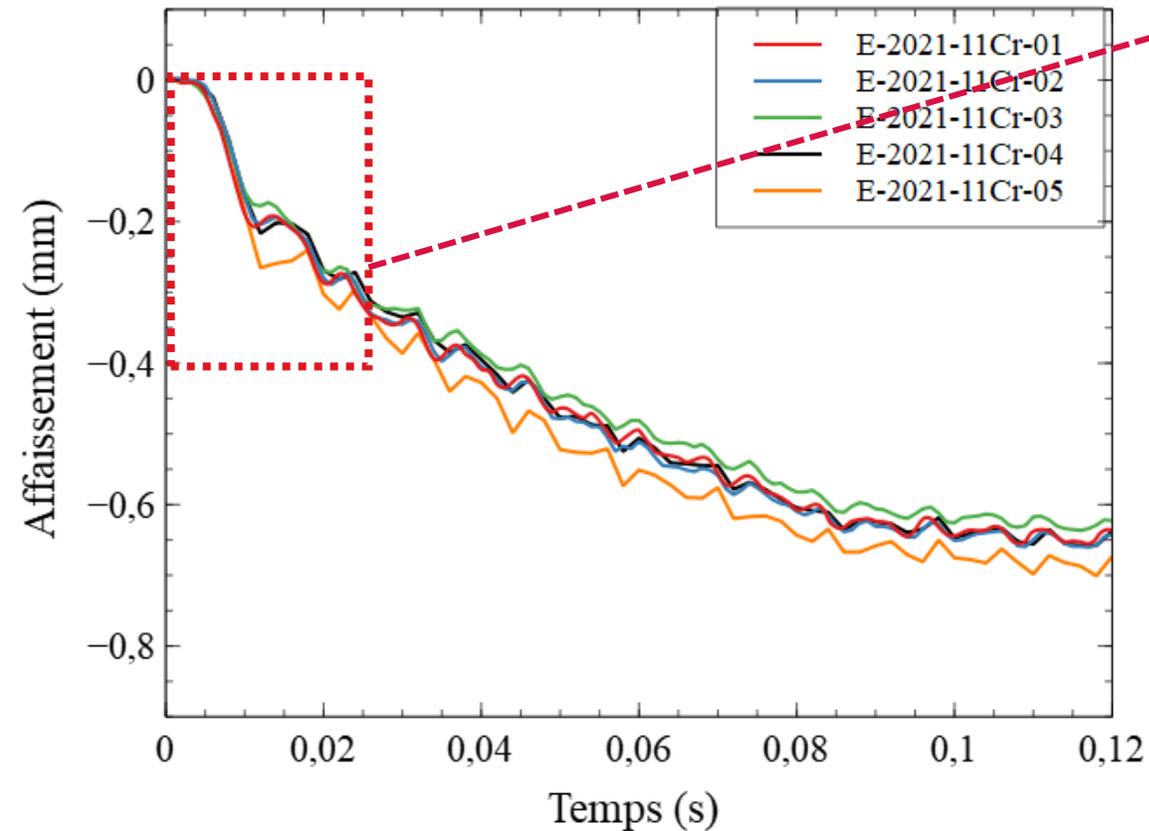


Contributeurs: Elodie PONS, Jean Luc FLAMENT, Cristiano OLIVEIRA RODRIGUES (SRMA/LC2M, CEA) et Hawa BADJI (SEMT/LTA, CEA).

## ► Annexes

## Mesure de l'affaissement

Affaissement mesuré pour les essais réalisés  
avec l'acier 11Cr-ODS  
( $F_s, I_s, t_s$ ) = (4700 N, 13 kA, 80 ms)



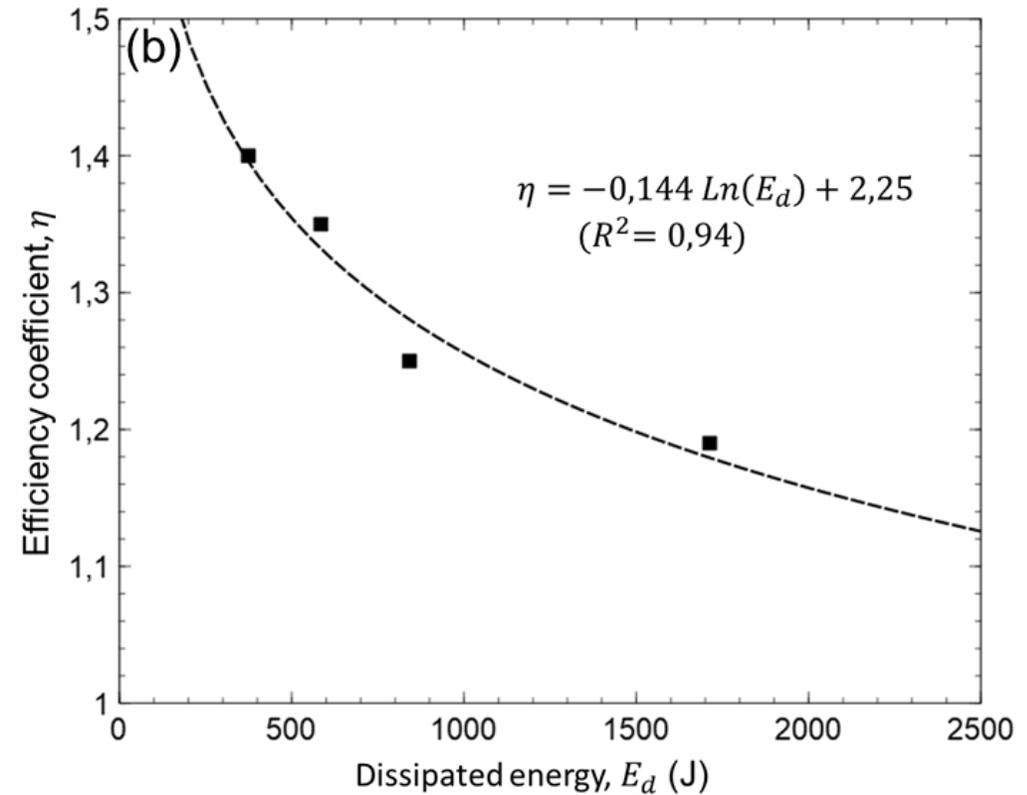
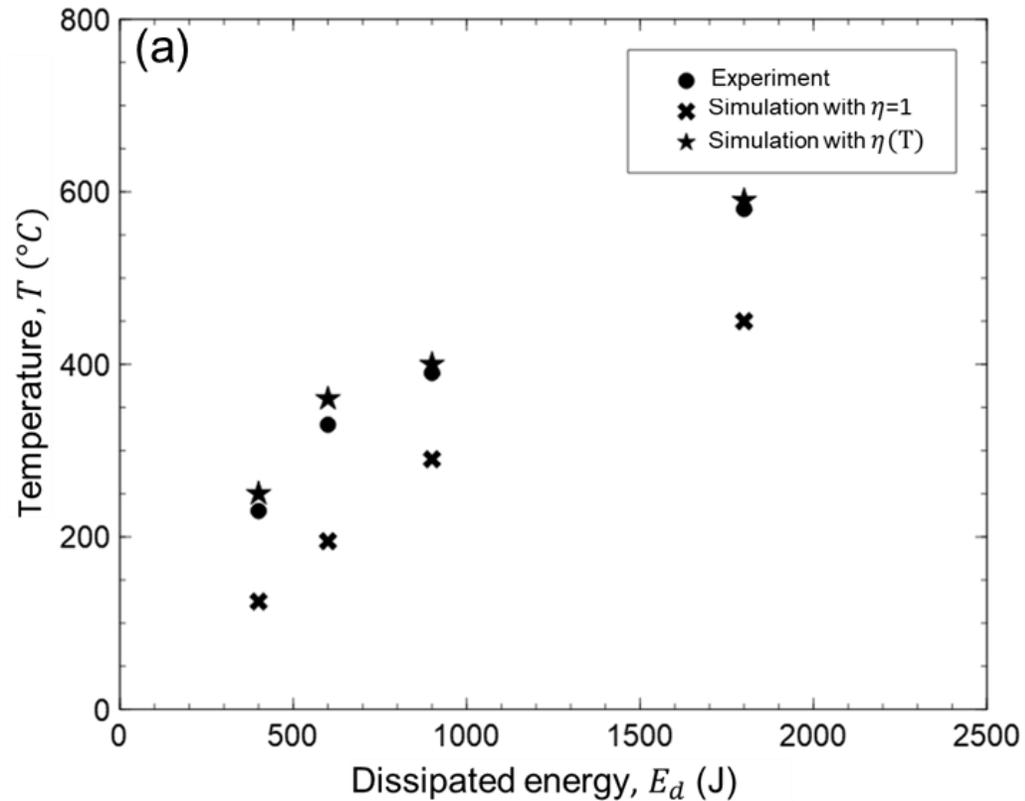
## Observation expérimentale

- ✓ Répétabilité des essais l'affaissement final est similaire pour les essais réalisés avec les mêmes paramètres opératoires
- Variation dans la cinétique de l'affaissement observée au début du soudage. Cela peut-être lié :
  - La géométrie du contact initial
  - Décalage expérimental observé lors de l'essai

## □ Calibration de la puissance simulée

$$P_{exp} = R(T) \times I_w^2$$

$$P_{sim} = \eta(T) \times P_{exp}$$

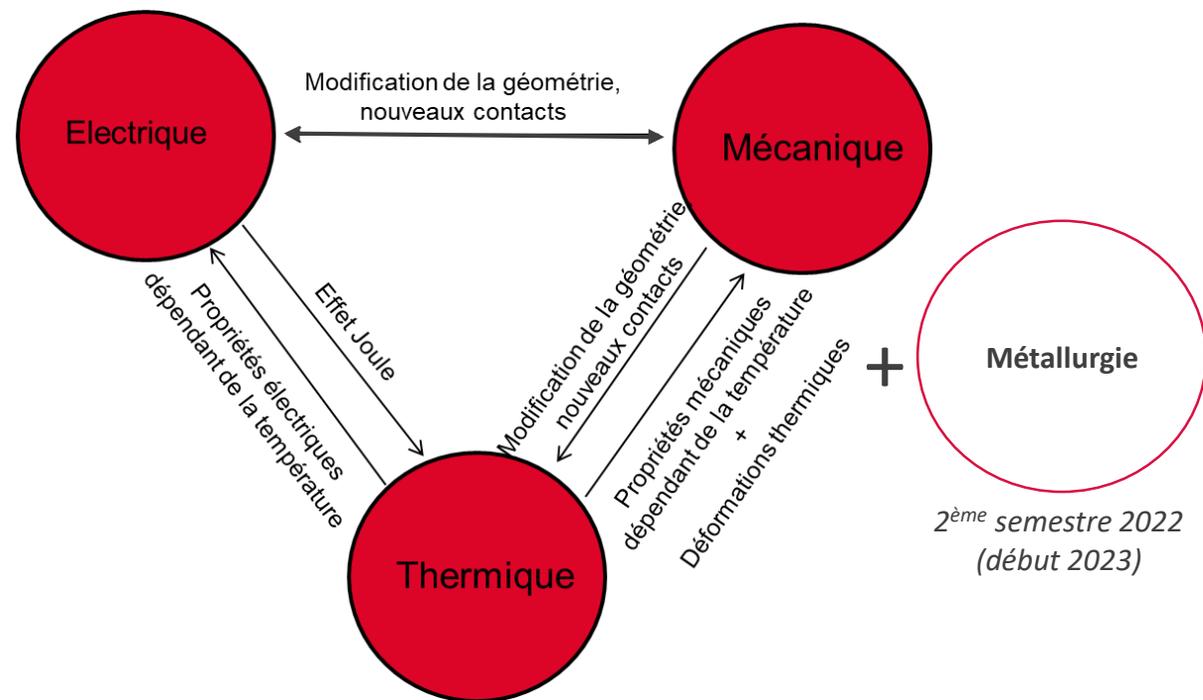


## □ Approche mise en place de modélisation

### Simulation numérique réalisée avec Cast3M

Modélisation progressive avec la validation de chaque étape

- Modèle électrothermique  
→ **validé**
- Modèle Electro-Thermo-Mécanique (ETM)  
→ **validé**
- Modèle Electro-Thermo-Métallo-Mécanique (ETMM)  
→ Objectif : estimer la proportion des phases présentes dans chaque zones de la soudure  
→ deuxième semestre 2022 (premier semestre 2023)  
(et sous condition d'avoir les bonnes propriétés métallurgiques)



**Synthèse des phénomènes pris en compte dans le modèle développé et le couplage entre eux**

## ☐ Principaux développements numériques réalisés

- i. Développement d'une procédure permettant de calculer la source de chaleur générée par effet joule à chaque pas de temps et de l'introduire pour résoudre l'équation de la chaleur.
- ii. Développement d'une méthode pour la prise en compte des résistances électriques de contact dans la procédure CHARTER\*\* de Cast3M.
- iii. Développement d'une méthode pour la prise en compte des modifications de conditions électrothermiques de contact dans la procédure PERSO1\* de Cast3M.
- iv. Développement d'une procédure de remaillage automatique validée pour gérer les grandes déformations rencontrées lors du SPR. La mise en place de cette procédure a été faite dans la procédure utilisateur de Cast3M, PERSO1\*.

\* Procédure CHARTER : procédure permet de modifier le chargement thermique au cours des itérations du schéma de résolution non linéaire de la thermique.

\*\* Procédure PERSO1 : procédure appelée en début et fin de pas mécanique hors de la boucle de convergence thermique mécanique (la procédure est donc exécutée une fois à chaque pas de temps). Elle permet, par exemple, de redéfinir le chargement mécanique après chaque pas de temps.

## □ Principales hypothèses de la simulation numérique du soudage par résistance

### Modélisation 2D axisymétrique

#### Modèle électrique

- Analyse stationnaire avec des propriétés du matériau dépendantes de la température
- Source de chaleur calculée en fonction du champ de potentiel électrique
- Résistances de contact électrique entre les électrodes et les pièces à souder dépendantes de la température

#### Modèle thermique

- Analyse transitoire non linéaire avec des propriétés du matériau dépendantes de la température
- Pas d'échange thermique avec l'environnement
- Résistances de contact thermique entre les électrodes et les pièces à souder dépendantes de la température
- Changement de phase initialement négligé

#### Modèle mécanique

- Analyse stationnaire non linéaire avec des propriétés du matériau dépendantes de la température
- Loi de comportement élasto-plastique
- Analyse en grands déplacements
- Contact frottant ( $\mu = 0,35$ ) entre les pièces à souder (évalué par méthode inverse)
- Contact frottant ( $\mu = 0,005$ ) entre le bouchon et l'électrode de la gaine (formé au cours de déformation)

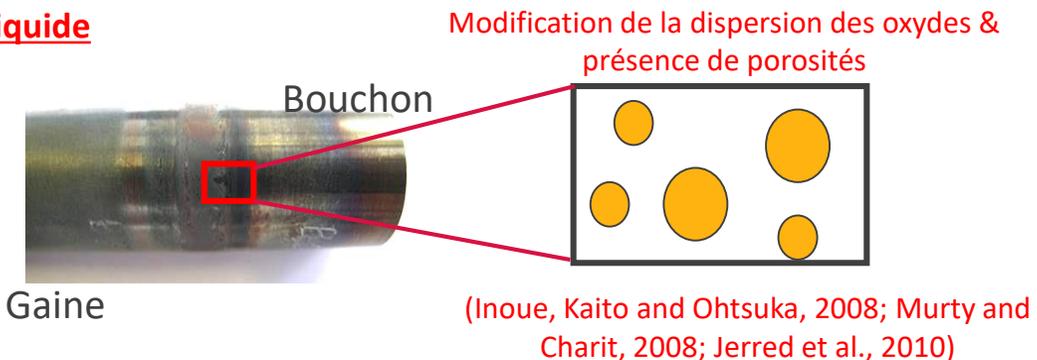
#### Remaillage au cours du calcul

Material parameters of the 9%Cr-ODS steel used in simulation.

$T$ [ $^{\circ}C$ ]	$C_p$ [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	$\sigma^e$ [ $\Omega^{-1} \cdot mm^{-1}$ ]	$\lambda$ [ $W \cdot mm^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	$\sigma_y$ [MPa]	$E$ [MPa]	$\alpha$ [ $K^{-1}$ ]
<b>25</b>	440	2000	0.023	800	216000	1.01 E-5
<b>100</b>	440	1900	0.0223	760	211000	1.1 E-5
<b>200</b>	510	1700	0.0249	720	205000	1.17E-5
<b>300</b>	560	1510	0.0263	680	190000	1.24 E-5
<b>400</b>	600	1350	0.0265	650	180000	1.31 E-5
<b>500</b>	680	1200	0.0274	600	160000	1.39 E-5
<b>700</b>	950	1000	0.0257	280	150000	1.53 E-5
<b>800</b>	780	900	0.0253	200	115000	1.6 E-5
<b>900</b>	680	850	0.029	180	115000	2.4 E-5
<b>1000</b>	620	800	0.0265	50	114000	2.4 E-5
<b>1100</b>	640	760	0.0273	10	90000	1.01 E-5
<b>1450</b>	795	606	0.0328	5	30000	1.1 E-5

## ❑ Modification de la dispersion de nano-oxydes

### Soudage à l'état liquide



→ Dégradation des propriétés mécaniques à haute température

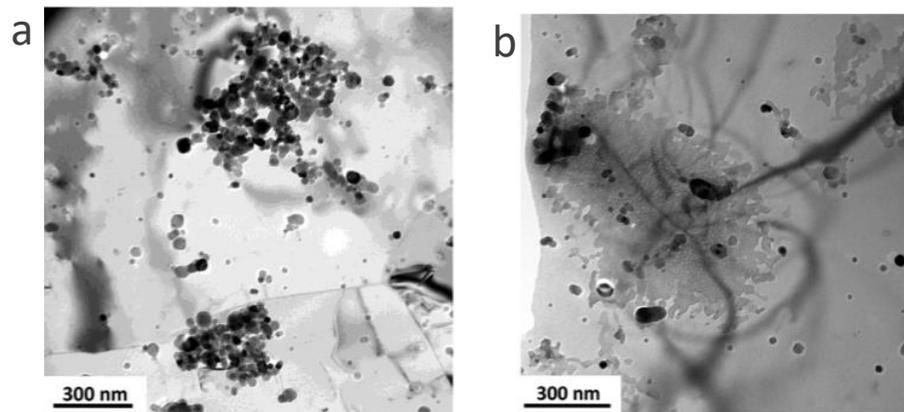
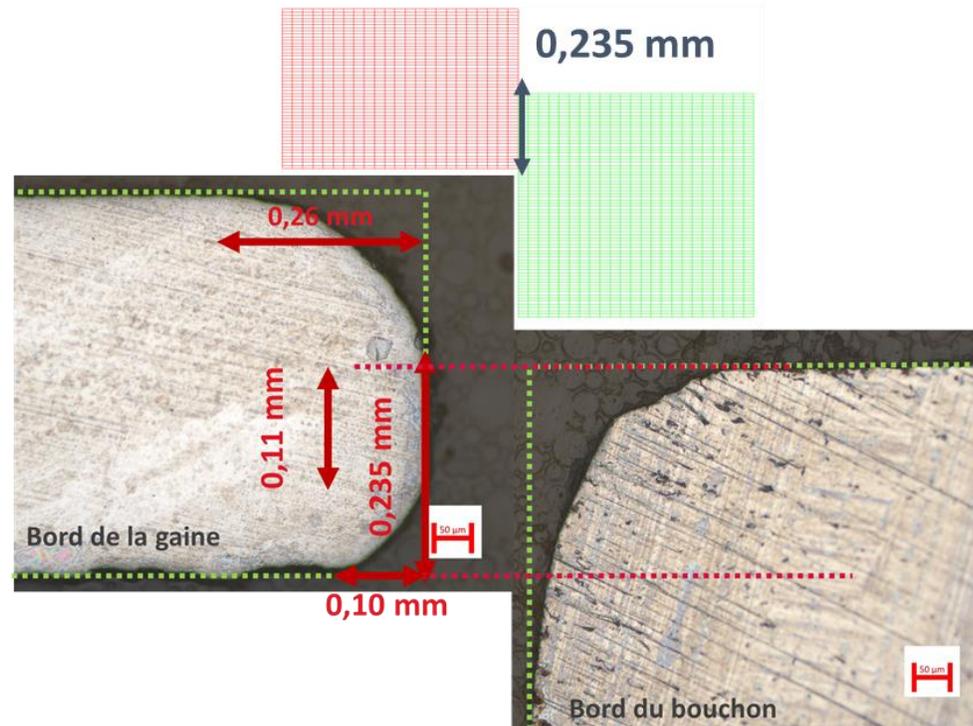


Image MET de la dispersion de nano-oxydes pour une nuance 12Cr-ODS d'une soudure obtenue par friction malaxage. a) agglomération de particules et b) fusion particules (Dawson et al., 2017)

## Géométries simulées



## Géométries réelles

*Macrographies des bords de la gaine et du bouchon avant soudage.*