

# Effet du « temper bead welding » sur les contraintes résiduelles lors de la réparation par soudage d'ESP

**Présentation lors de la journée des doctorants 2023**

CETIM – LMGC

Romain JEANPIERRE

[romain.jeanpierre@cetim.fr](mailto:romain.jeanpierre@cetim.fr)



# Environnement général

## Thèse en partenariat entre le CETIM et le LMGC

- ▶ Encadrants CETIM : Laurent Jubin et Dominique Deveaux (Experts soudage)
- ▶ Encadrants LMGC : Sébastien Rouquette, Frédéric Deschaux-Beaume et Fabien Soulié

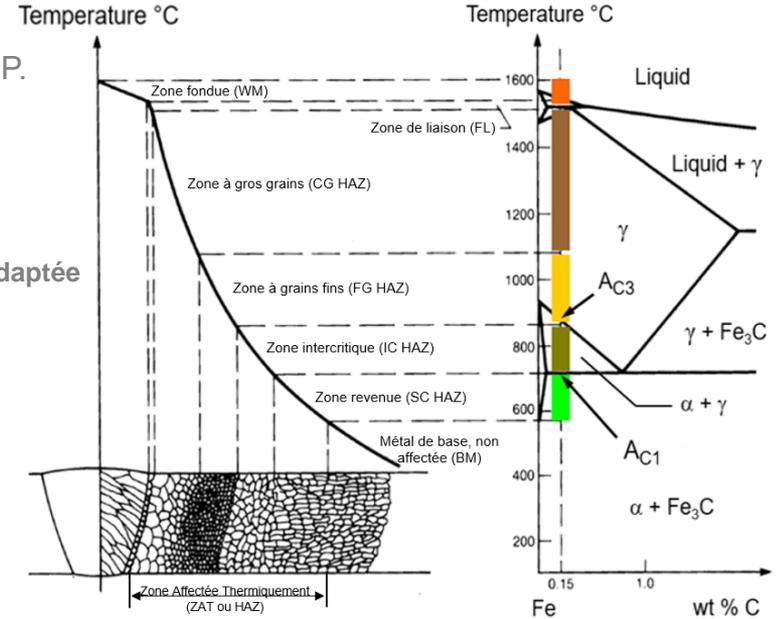
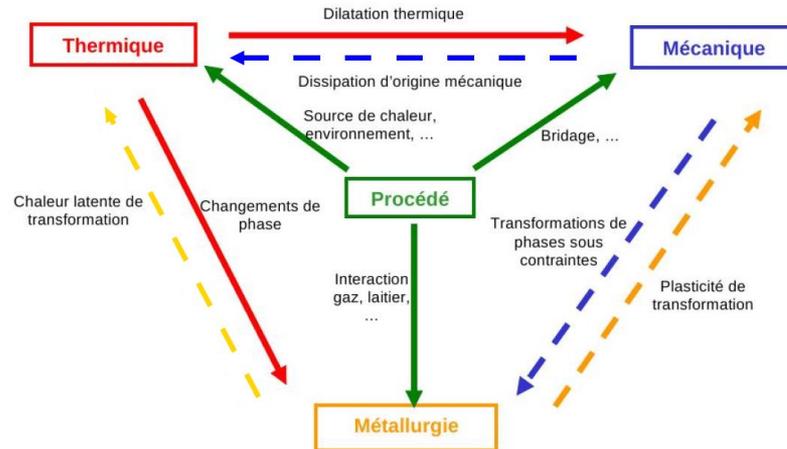
## Savoir-faire LMGC :

- Connaissances des procédés de fabrication additives arc-métal
- Instrumentation par imagerie visible et thermique
- Traitement des données spécifiques au soudage
- Maîtrise de la mesure des déformations/contraintes résiduelles par diffraction de neutrons
- Modélisation et simulation thermo-mécanique en fabrication additive métal-arc (code Aster)

# Quelques bases en soudage...

## Contexte:

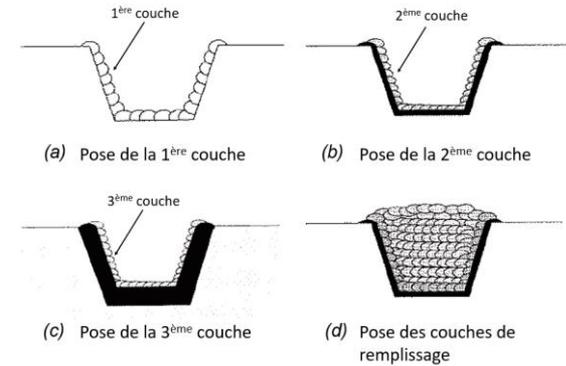
- ▶ Le soudage est largement employé dans l'assemblage des ESP.
- ▶ Cycle thermique rapide et intense conduisant à :
  - ▶ des transformations métallurgiques,
  - ▶ et à des contraintes résiduelles (dilatation et retrait).
  - ▶ But des TTAS : **relaxer les CR et obtenir une microstructure adaptée**



# Le « temper bead welding »

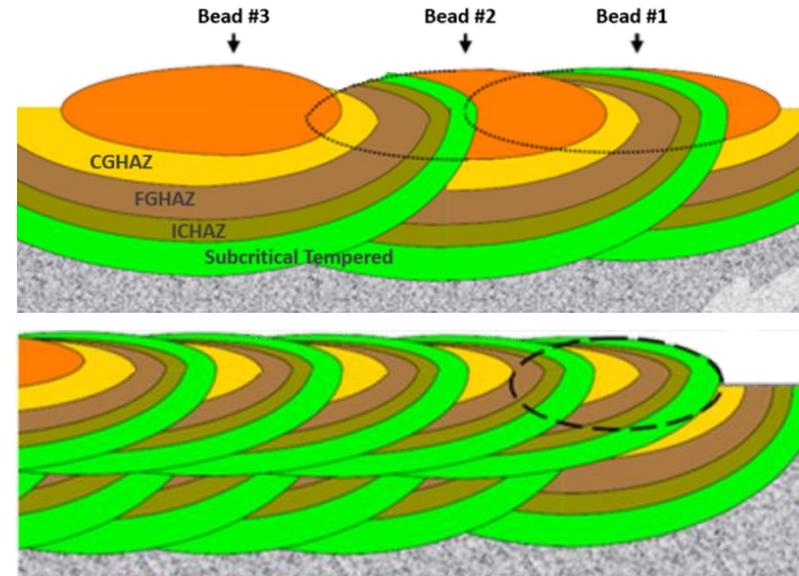
## Quid du soudage si TTAS contraignant :

- ▶ Ex: Réparation in-situ à opérer après le TTAS de fin de fabrication
- ▶ Contraintes de :
  - ▶ Coût et planning (réacteur nucl. à l'arrêt : env. 1 M€/jour)
  - ▶ Espace (montée en température risquant d'incorporer des soudures avoisinantes)



## Emploi du temper bead welding :

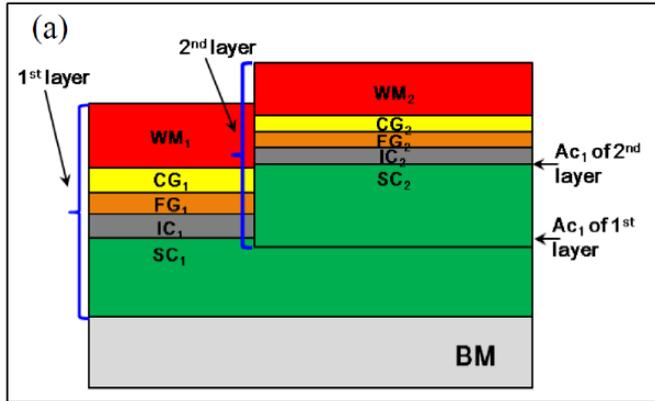
- ▶ Substitutions aux TTAS
- ▶ Intégrées dans plusieurs codes de construction/maintenance
- ▶ Modifient les structures métallurgiques en ZAT
- ▶ Une pose des cordons à des localités précises et à des niveaux d'énergie maîtrisés



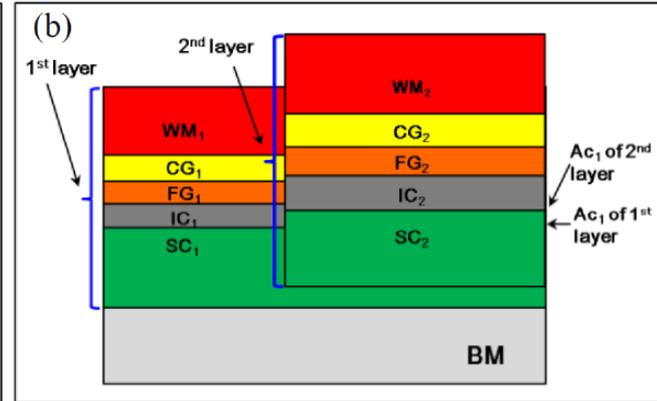
# Le « temper bead welding »

## Différentes techniques :

- Utiliser les cycles thermiques des passes successives pour « thermo-traiter » la ZAT précédemment créée



Consistent layer technique :  
Revenu de la ZAT  
Industrie nucléaire



Controlled deposition technique :  
Affinage de la CGHAZ + revenu  
de la ZAT  
Industrie fossile et pétrochimique

## Sujet :

- ▶ Le TBW est présenté comme une substitution au TTAS
- ▶ Les TTAS permettent de réduire les CR

**Quelle est l'influence du Temper bead welding sur les contraintes résiduelles ?**

**→ Modèle numérique par EF (code Aster)**

**→ Et recalage par essais expérimentaux**

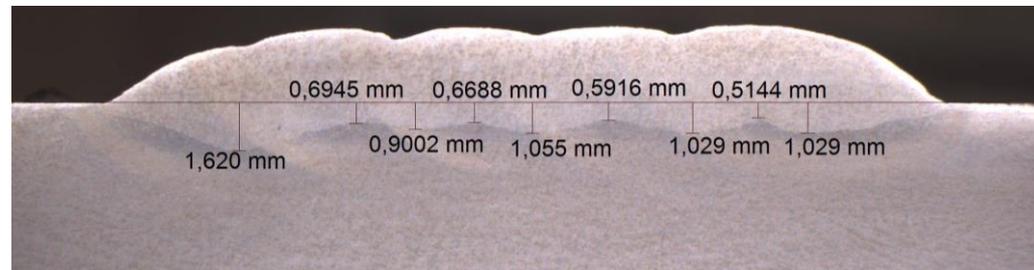
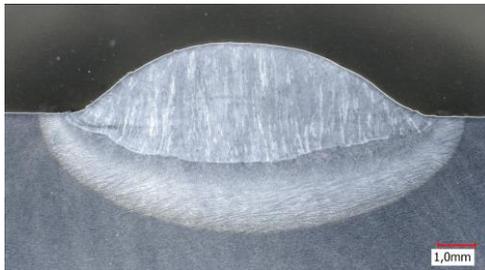
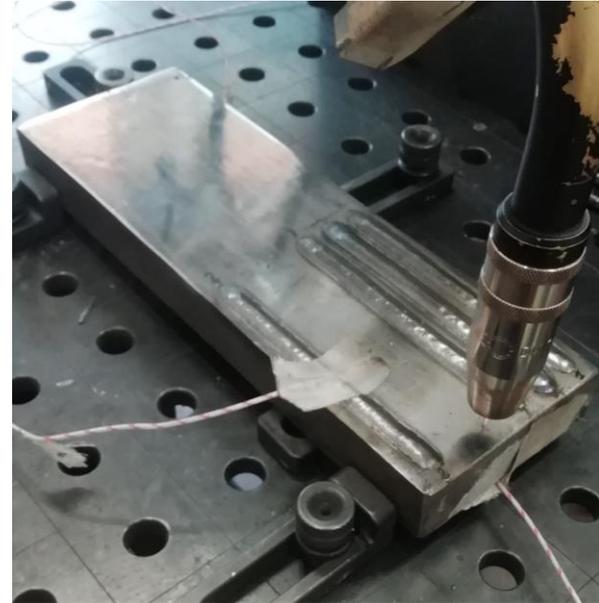
# Avancement de la thèse : Essais expérimentaux

## Objectifs :

- ▶ Trouver des paramètres de soudage utilisables en TBW
- ▶ Obtenir des données pour recaler le modèle par EF

## Cadre :

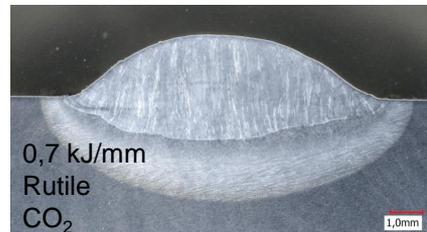
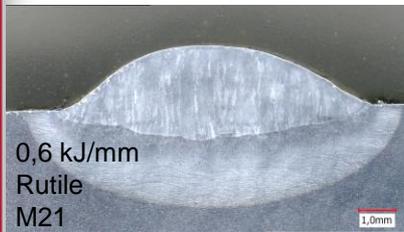
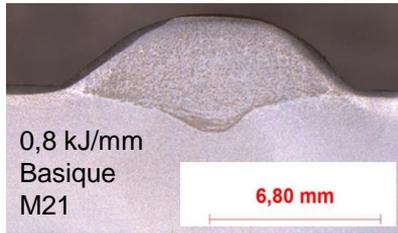
- ▶ Technique de TBW : Consistent layer technique
- ▶ Procédé de soudage : Fils fourrés 136 (FCAW)
- ▶ Acier faiblement allié, C-Mn, P355GH
- ▶ Cordon sur tôle pleine de 30 mm d'épaisseur



# Avancement de la thèse : Essais expérimentaux

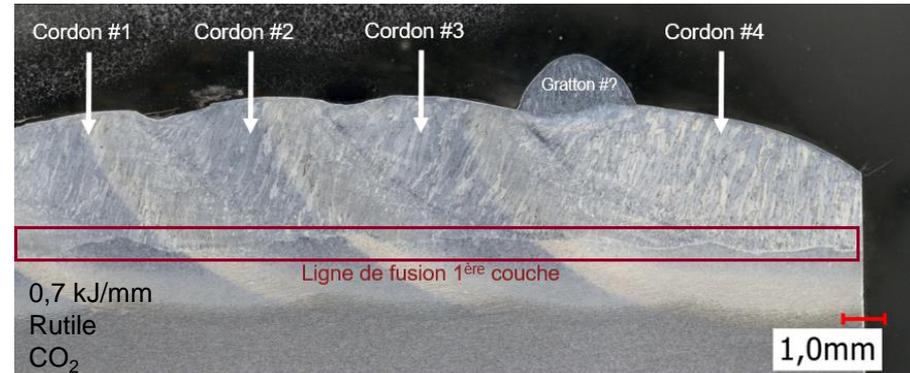
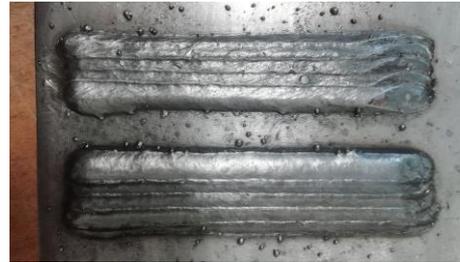
## En simple cordon :

- ▶ Energie de soudage (TBW  $\approx$  0,7 à 1,5 kJ/mm) ?
- ▶ Fil : rutile ou basique ?
- ▶ Gaz de protection : CO<sub>2</sub> ou Ar-CO<sub>2</sub> (M21) ?



## En couche :

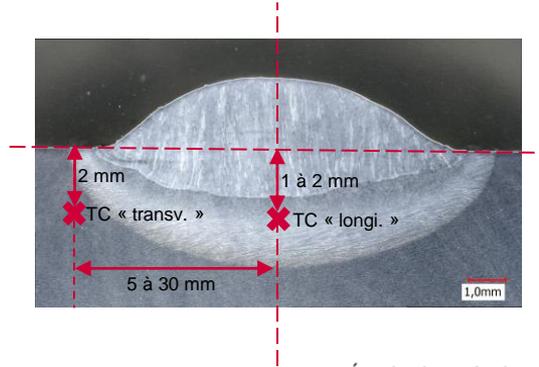
- ▶ Taux de recouvrement ?
- ▶ Angle inclinaison torche ?



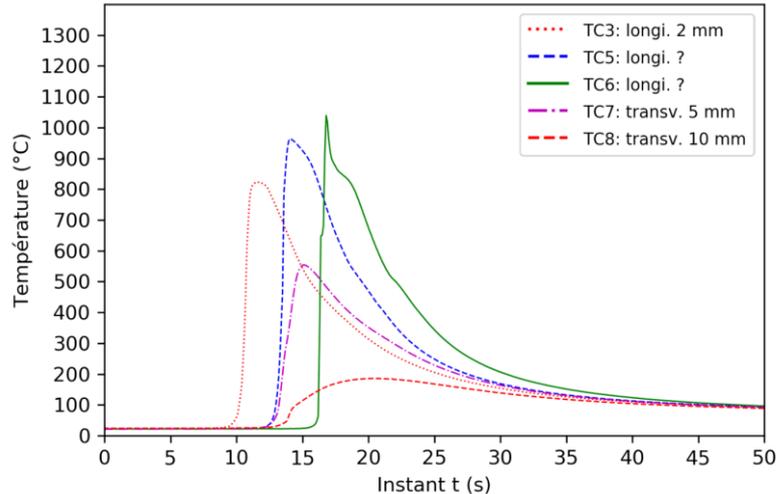
# Avancement de la thèse : Essais expérimentaux

## Caractérisation thermique

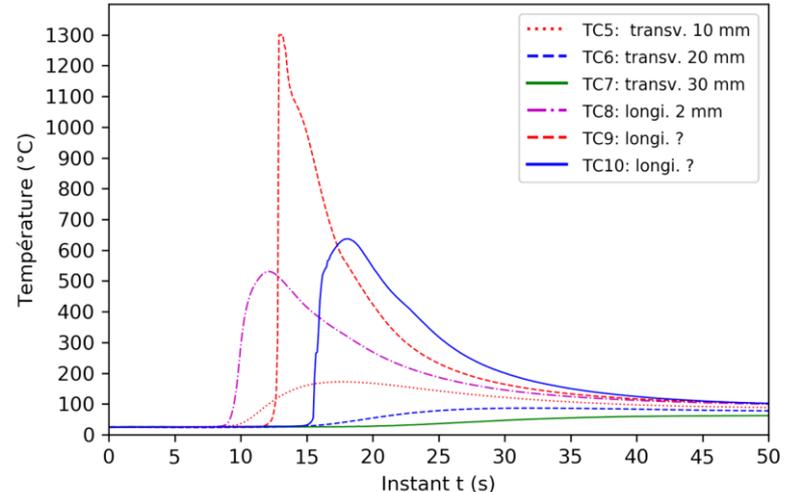
- ▶ Mesure des pics de température et des vitesses de refroidissement
- ▶ Thermocouples de type N,  $f_{\text{acquisition}} = 10 \text{ Hz}$



Évolution de la température du cordon rutile-CO2 31/10/22



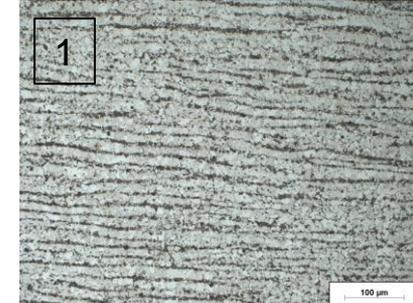
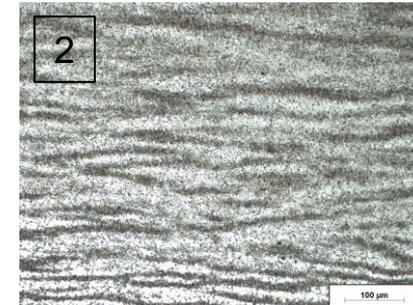
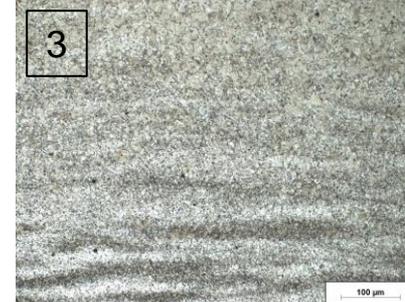
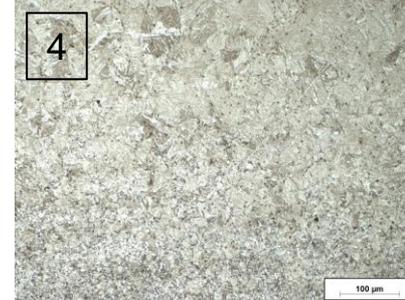
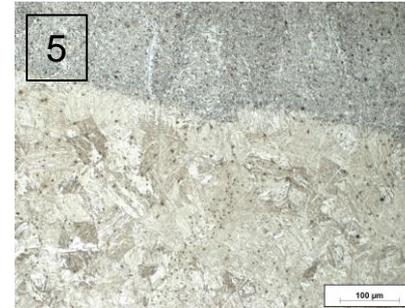
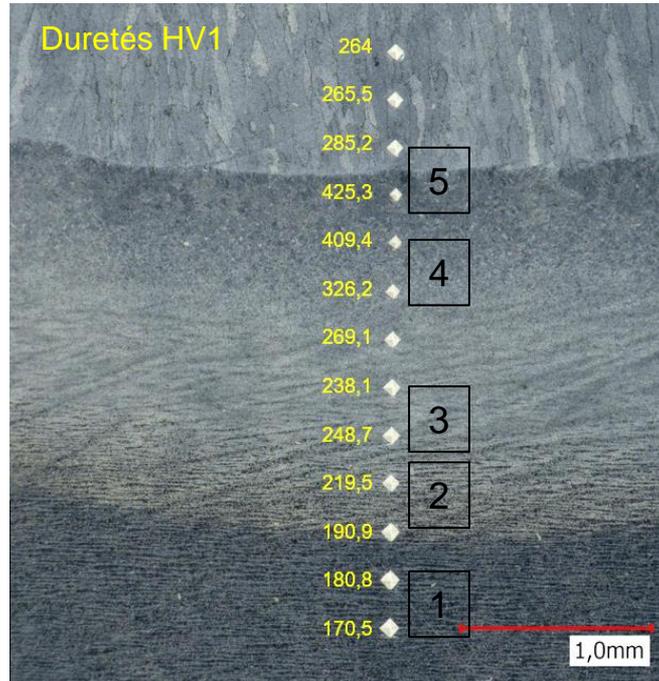
Évolution de la température du cordon rutile-CO2 28/10/22



# Avancement de la thèse : Essais expérimentaux

## Caractérisation métallurgique

- ▶ Profil de duretés nécessaire au recalage avec Aster
- ▶ Identification des phases en ZAT



# Avancement de la thèse : Modèle numérique

## Modèle thermique sous Aster :

- ▶ Résolution de l'équation de la chaleur
- ▶ Source chaleur mobile : Distribution double ellipsoïdale (Goldak)
- ▶ Propriétés thermiques matériaux = fct(T)

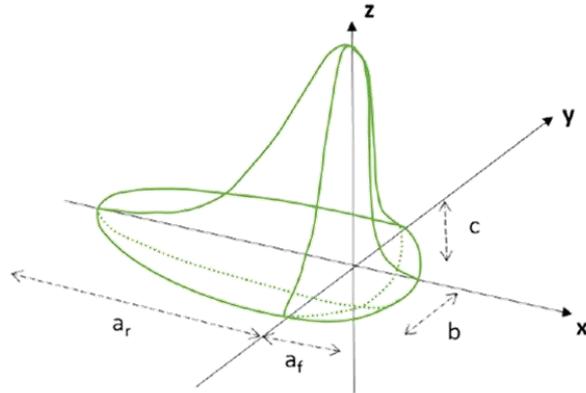


FIGURE I-16. REPRÉSENTATION DE LA SOURCE DE GOLDAK (GOLDAK ET AL., 1984)

L'équation de la source de Goldak est la suivante :

$$q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f r Q}{\pi\sqrt{\pi a_f r b c}} e^{-3x^2/a_f r^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3z^2/c^2}$$

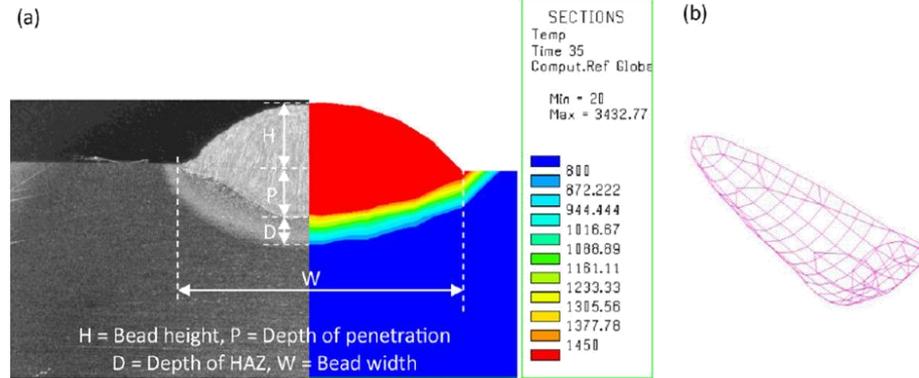
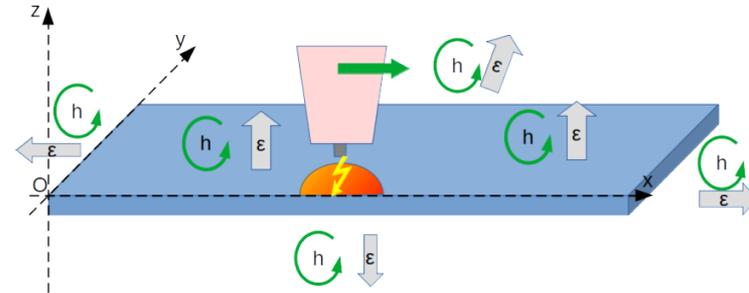
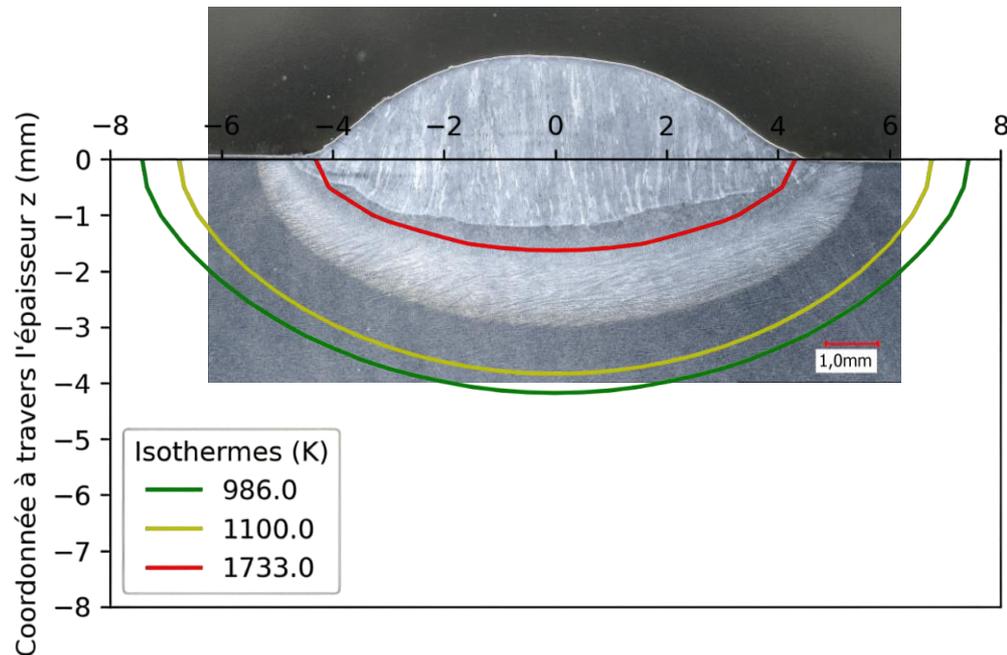
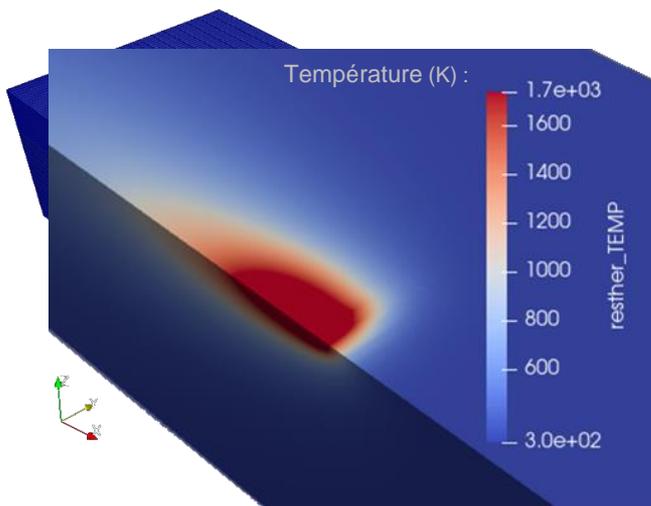


Fig. 3. (a) Cross section of the macrograph compared with the molten pool in Sysweld. (b) 3D wire-frame of the molten pool.

# Avancement de la thèse : Modèle numérique

## Modèle thermique sous Aster :

- Variation des paramètres de la source de chaleur (rendement + do
  - Recalage isothermes/macro et relevés de températures calculés/mesurés



## Suite immédiate des travaux :

- ▶ Recalage en profondeur du modèle thermique avec cordon
- ▶ Intégration du modèle métallurgique avec des données biblio.
- ▶ Approfondissement de la caractérisation métallurgique (EBSD, nanoindentation)
- ▶ Acquisition de connaissances sur les moyens de détermination des CR



---

*Osez le futur*