

The logo for CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique) consists of the lowercase letters 'cea' in a white, rounded, sans-serif font. A thin green horizontal line is positioned below the letters.

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

The logo for PSL (Paris Saclay University) includes the letters 'PSL' in a blue, sans-serif font, followed by a square icon containing a blue star.The logo for the Centre des Matériaux features the text 'Centre des Matériaux' in a blue, sans-serif font.

Club Cast3M

25 Novembre 2022

Modélisation du comportement thermomécanique de pièces en acier 316L produites par fabrication additive arc-fil (WAAM)

Damien Artières^{1,2,✉}, Diogo Gonçalves¹, Serge Pascal¹, Sylvain Dépinoy², Vladimir A. Esin²

Contributeur·rice·s : Rémi Robidet¹, Hawa Badji¹

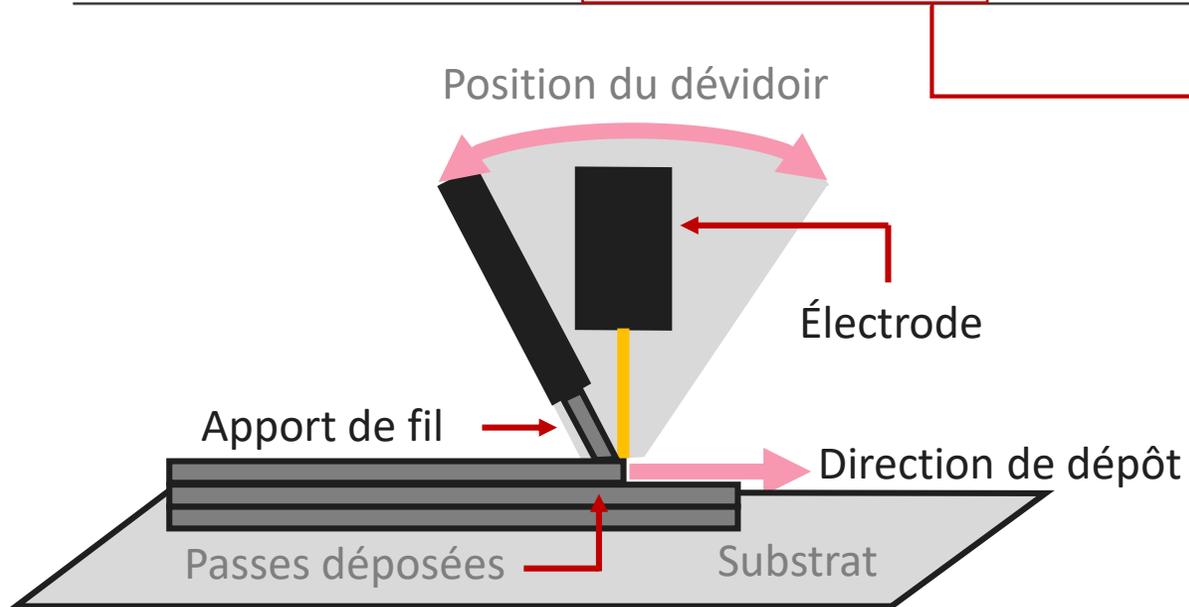
¹ Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Études Mécaniques et Thermiques, Gif-sur-Yvette, France

² Mines Paris, PSL University, Centre des Matériaux - (CNRS UMR 7633), Évry, France

✉ : damien.artieres@cea.fr

Fabrication additive métallique : réalisation de **géométries complexes**, en **minimisant les pertes** de métal d'apport.

Procédés de fabrication additive	Taux de dépôt	Précision géométrique	Efforts de recherche
Fusion sur lit de poudre (L-PBF)	+	+++++	+++++
Dépôt de matière sous énergie concentrée (DED)	LENS (poudre)	+++	++++
	WAAM (arc-fil)	+++++	+++
	WLAM (laser-fil)	+++	++



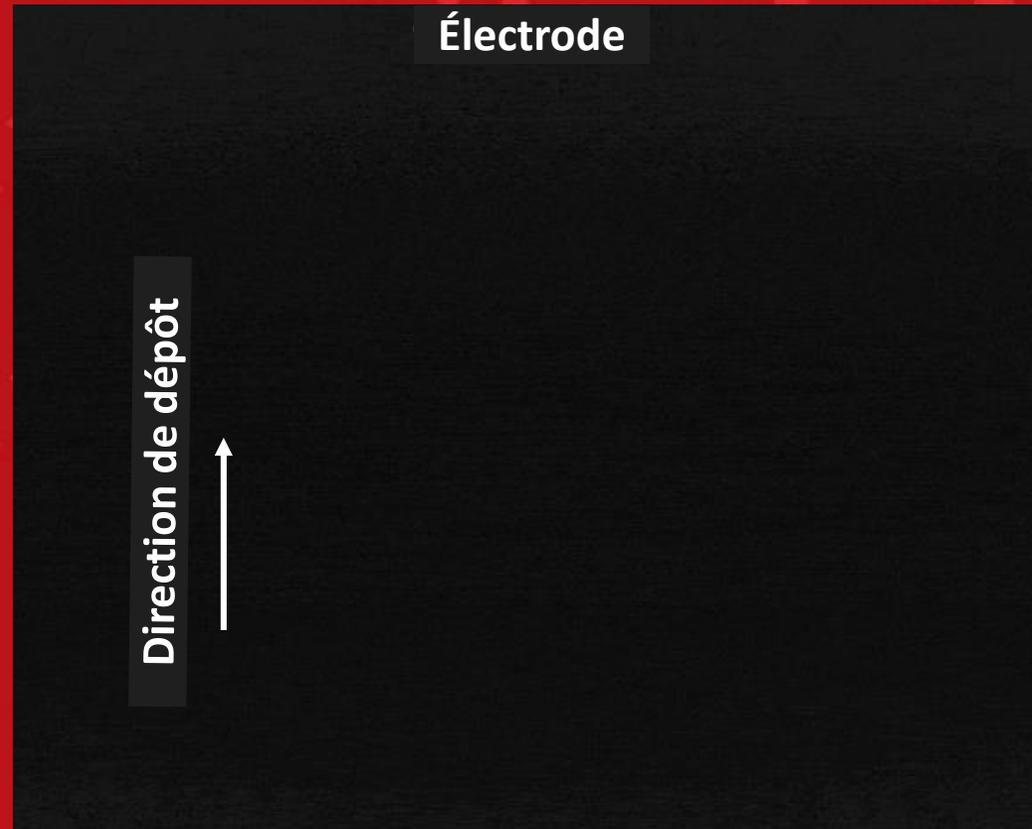
Fabrication additive par dépôt de fil. Adapté de [Frazier, 2014]

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)
Wire Laser Additive Manufacturing (WLAM)

Adaptés à la production de pièces de **grandes dimensions**, avec un **bon taux de dépôt**.

Étudier l'influence des paramètres opératoires du WAAM sur les **propriétés macroscopiques** et **microscopiques** de pièces en acier inoxydable 316L

Couplage expérimental – simulation numérique



Partie 1.

Définition d'un modèle thermomécanique du procédé WAAM (arc-fil)

Simulations par éléments finis avec **Cast3M**



→ Utilisation des procédures **SOUDAGE** et **WAAM** disponibles depuis Cast3M 2021

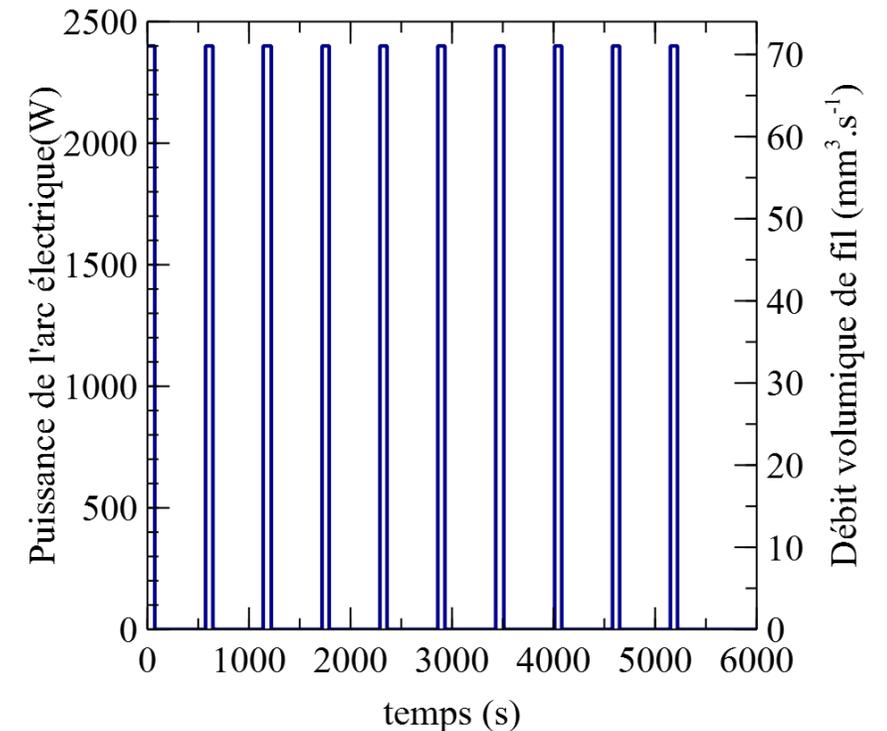
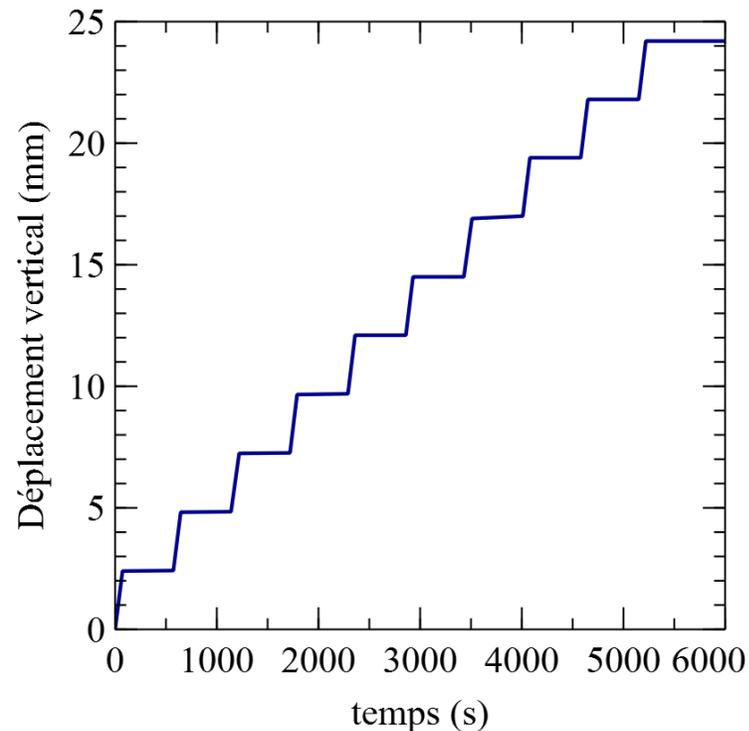
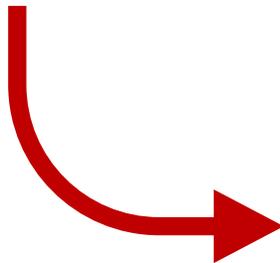
SOUDAGE Entrées

→ Table des **paramètres** procédés (vitesse de dépôt, diamètre de fil, vitesse de fil, puissance de l'arc électrique, **largeur de passe**)

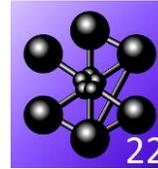
→ **Trajectoire** du dépôt en fonction du temps (déplacements de l'électrode avec ou sans apport de matière/arc électrique, temps de refroidissement)

Sorties

Table contenant les données utiles au calcul d'un dépôt de matière au cours du temps.



Simulations par éléments finis avec **Cast3M**



WAAM

Entrées

→ Table contenant les sorties de **SOUDAGE**

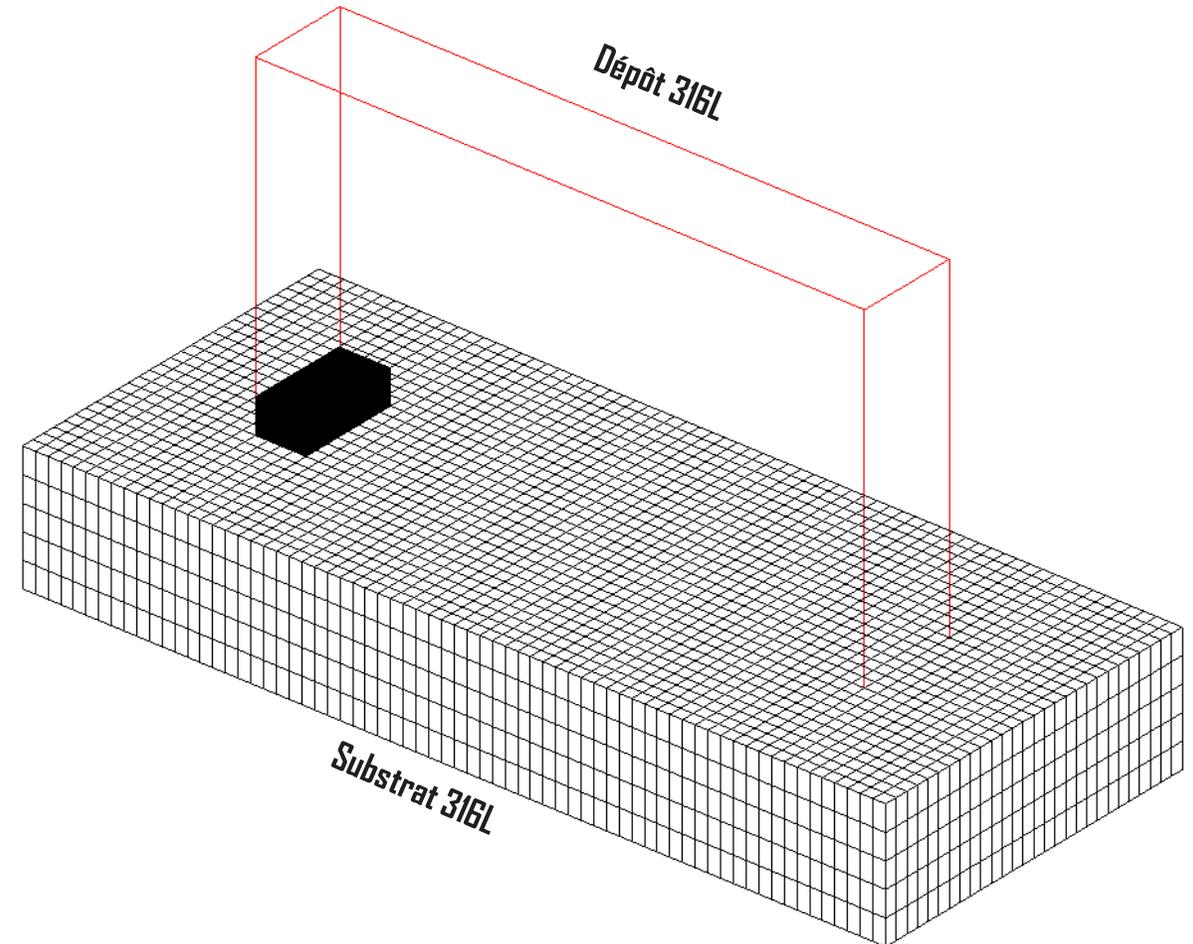
→ **Paramètres numériques** (pas d'apport de matière, taille de maille, pas de temps de calcul).

Sorties

→ **Maillage séquencé** en fonction du temps. Ajout d'éléments en cours de calcul

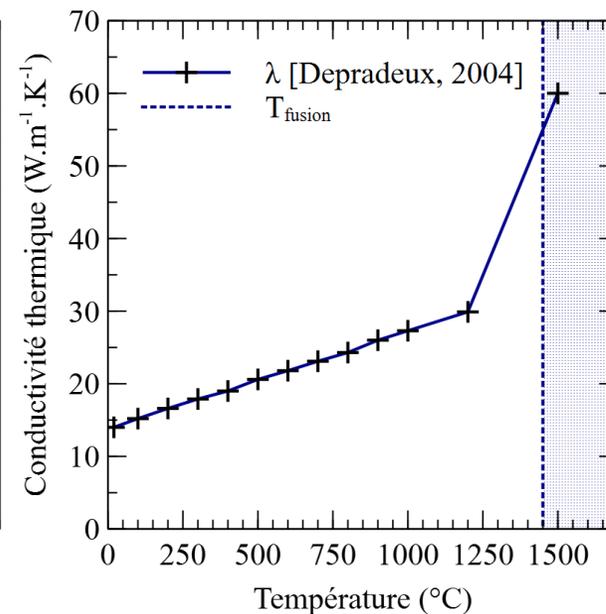
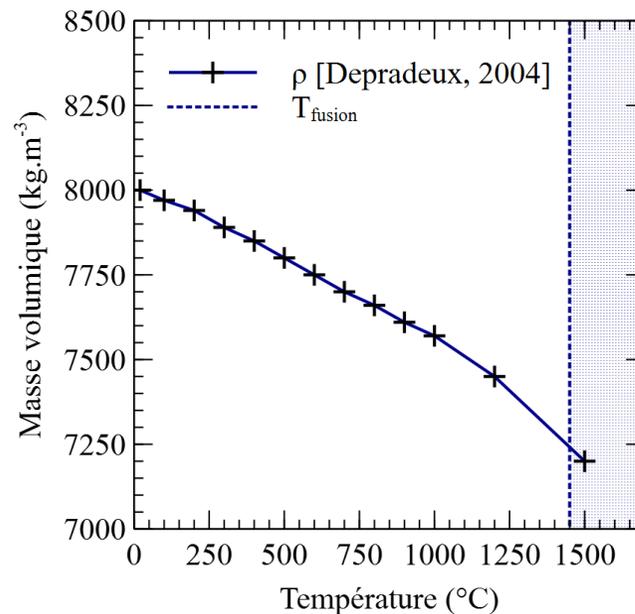
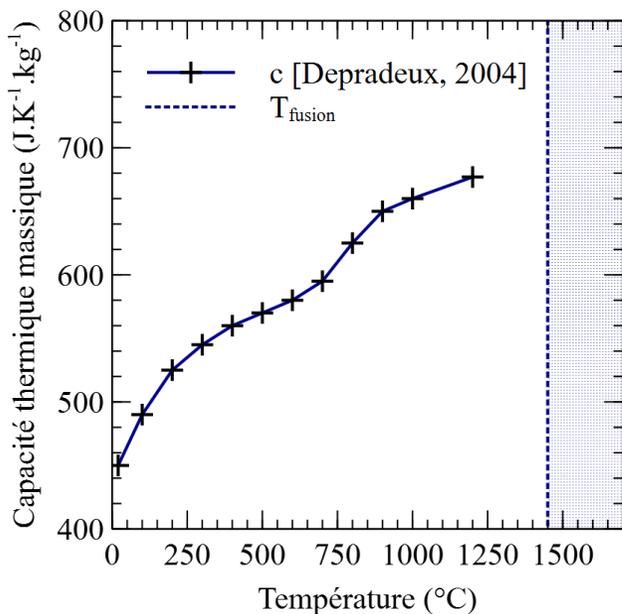
→ **Liste des temps calculés** avec déraffinement progressif lorsque $P_{arc\ électrique} = 0\ W$

→ Utilisation des procédures **SOUDAGE** et **WAAM** disponibles depuis Cast3M 2021



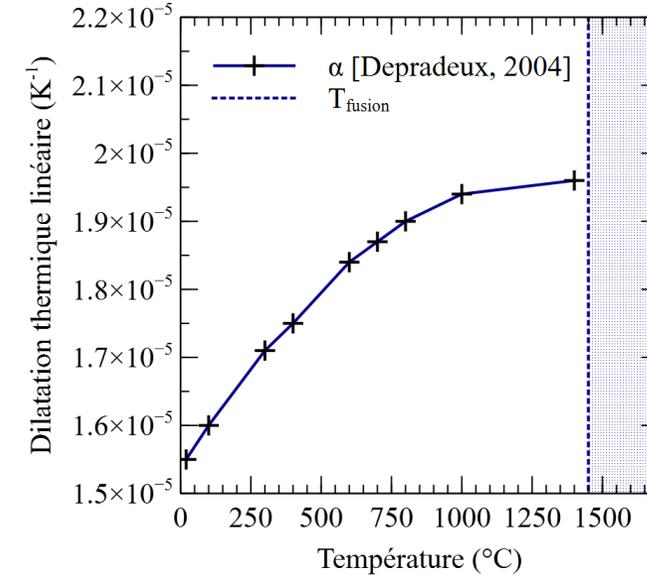
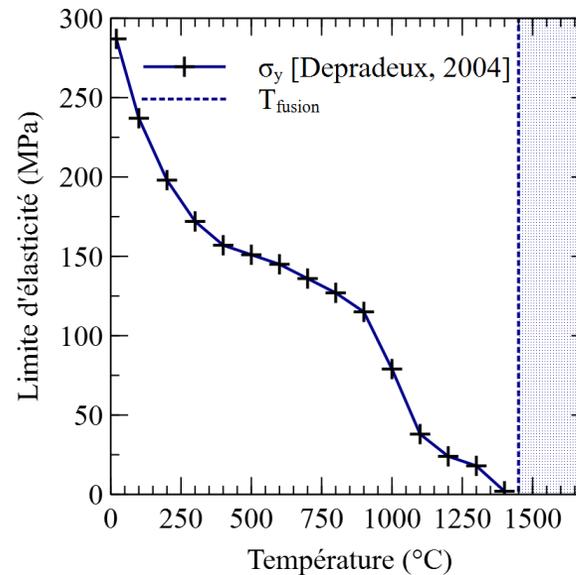
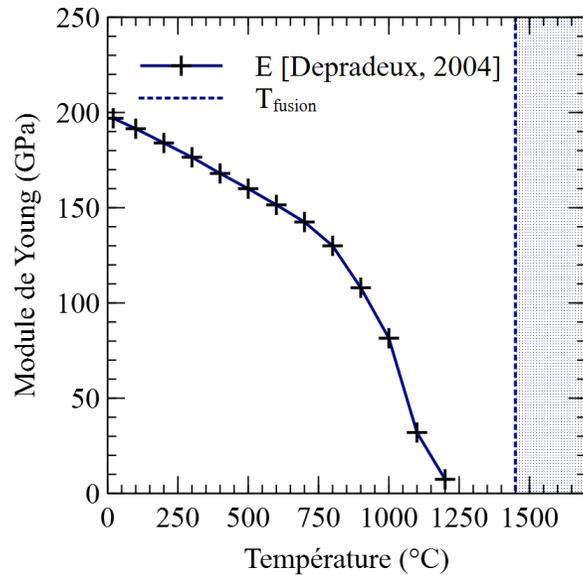
Modèle thermique transitoire non linéaire.

- Conduction dans toute la pièce
- Refroidissement à la surface de la pièce par convection et rayonnement
- Majoration de la convection sous le substrat pour approximer le pompage thermique de la table d'essai.
- Paramètres de l'acier 316L dépendants de la température.

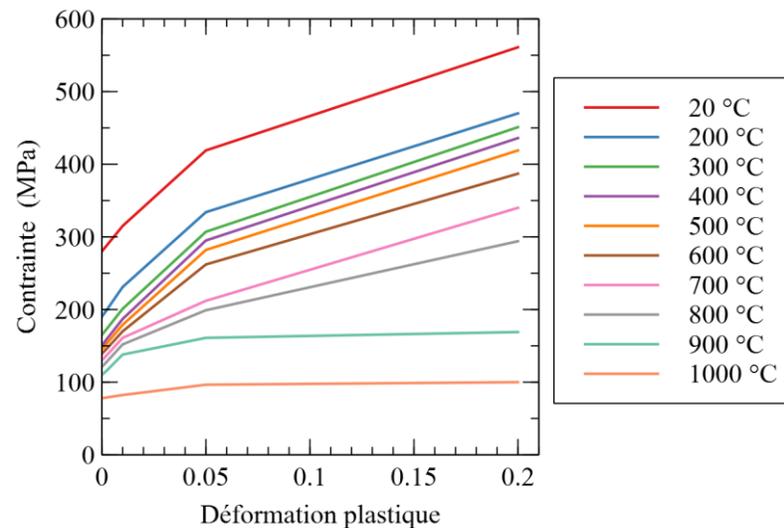


Majoration de la conductivité thermique au-delà de T_{fus} pour approximer les effets fluides (effet Marangoni), non pris en compte

Modèle mécanique élastoplastique, quasi statique non linéaire

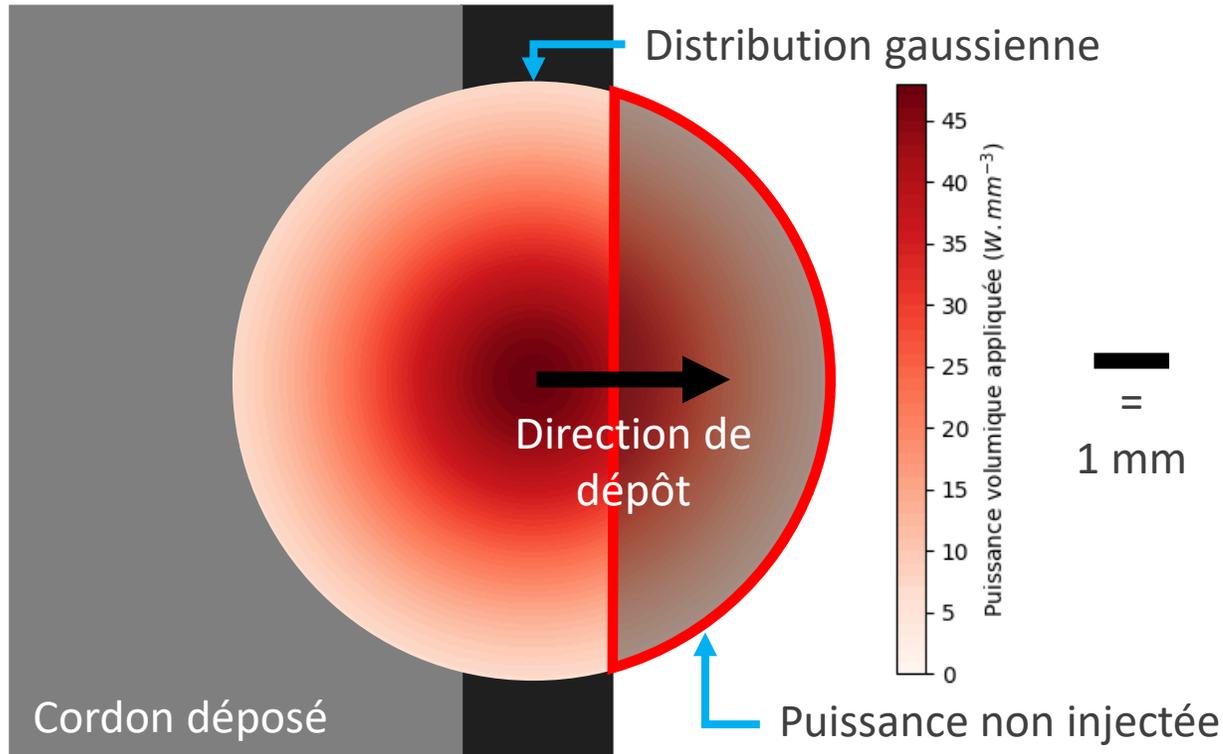


Loi de plasticité utilisée :
écrouissage isotrope



Courbes d'écrouissage obtenues à partir d'essais de tractions en température [Depradeux, 2004]

→ Remise à zéro instantanée des variables d'écrouissage lorsque $T > T_{fus} = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$



Modélisation de l'arc électrique :
source gaussienne isotrope transverse

$$Q(r', z') = \sqrt{\frac{2^5}{\pi^3}} \cdot \frac{Q_{tot}}{Z_0 \cdot R_0^2} \cdot e^{-2 \cdot \left(\left(\frac{r'}{R_0} \right)^2 + \left(\frac{z'}{Z_0} \right)^2 \right)},$$

$$\text{avec } \frac{\partial Q_{tot}}{\partial t} = \begin{cases} P_{tot} & \text{lors d'une passe} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Modèle : « apport d'éléments à T_{fus} +
puissance complémentaire sous forme de gaussienne »

$$P_{tot} = \frac{U \cdot I \cdot \eta_{source}}{A_{correction}} - \left(\rho_{1450^\circ C} \cdot H_{mass} + \int_{20}^{1450} \rho(T) \cdot c(T) dT \right) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v_f$$

$A_{correction}$: correction des pertes dues à la géométrie du maillage

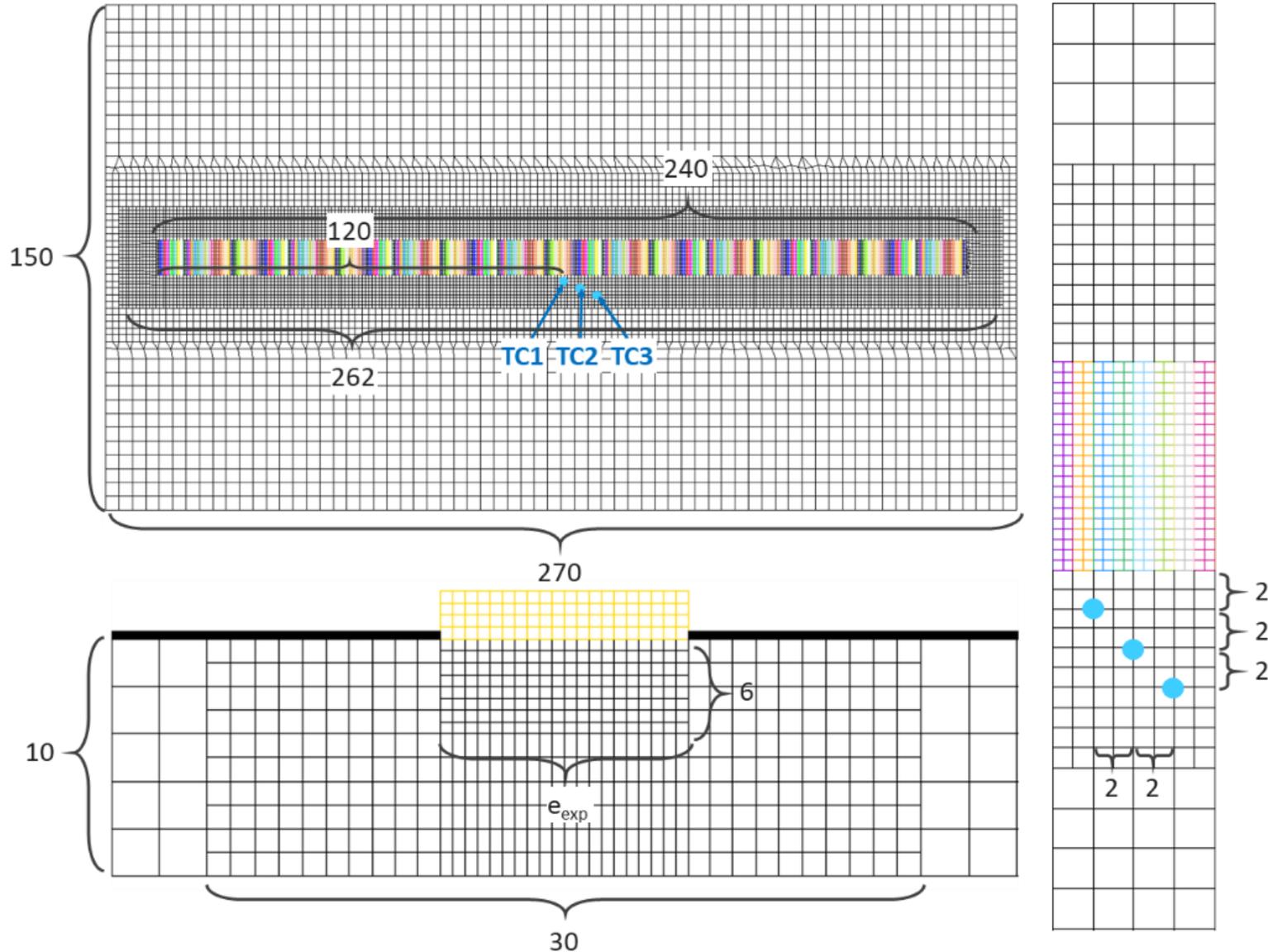
H_{mass} : enthalpie massique de changement d'état

η_{source} : rendement de l'arc électrique

v_f : vitesse de fil

Partie 2.

Calibration du modèle et réalisations expérimentales



Reproduction **des dimensions expérimentales**.

Trois zones à **différentes densités de maille** :

- cordon et substrat sous le cordon ;
- substrat à proximité du cordon ;
- reste du substrat.

3 thermocouples numériques (TC1 à 3).

→ **T(t)** local pour comparaison à l'expérimental.

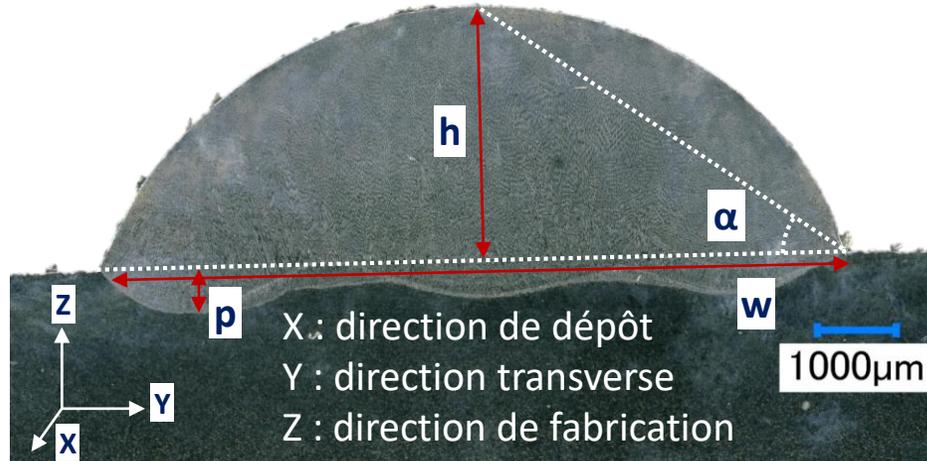
Monocordons en acier 316L

Paramètres considérés :

Puissance de la source
d'énergie, P

Vitesse de dépôt, v

Vitesse d'apport de fil, v_f



Critères de sélection [Dass et Moridi, 2019] :

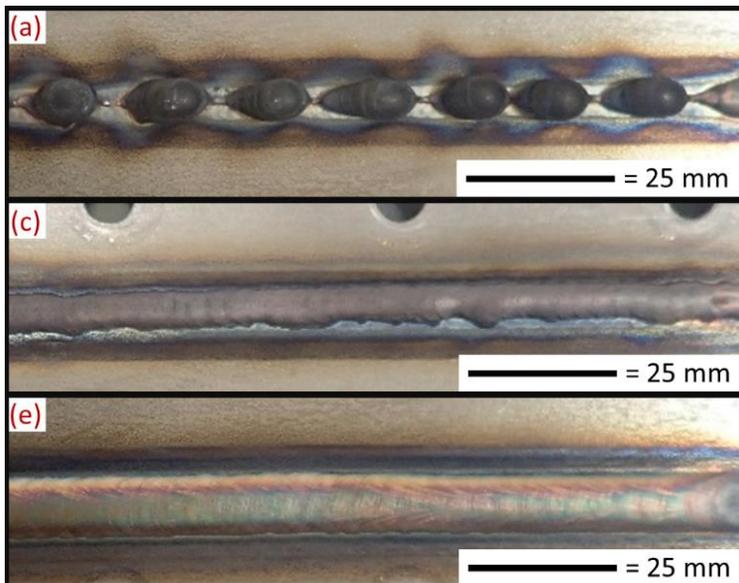
1. Sélection visuelle.

2. Rapport largeur/hauteur :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{2h}{w}\right) \sim 30^\circ \Leftrightarrow \frac{w}{h} \sim 3.5$$

3. Dilution du cordon dans le substrat :

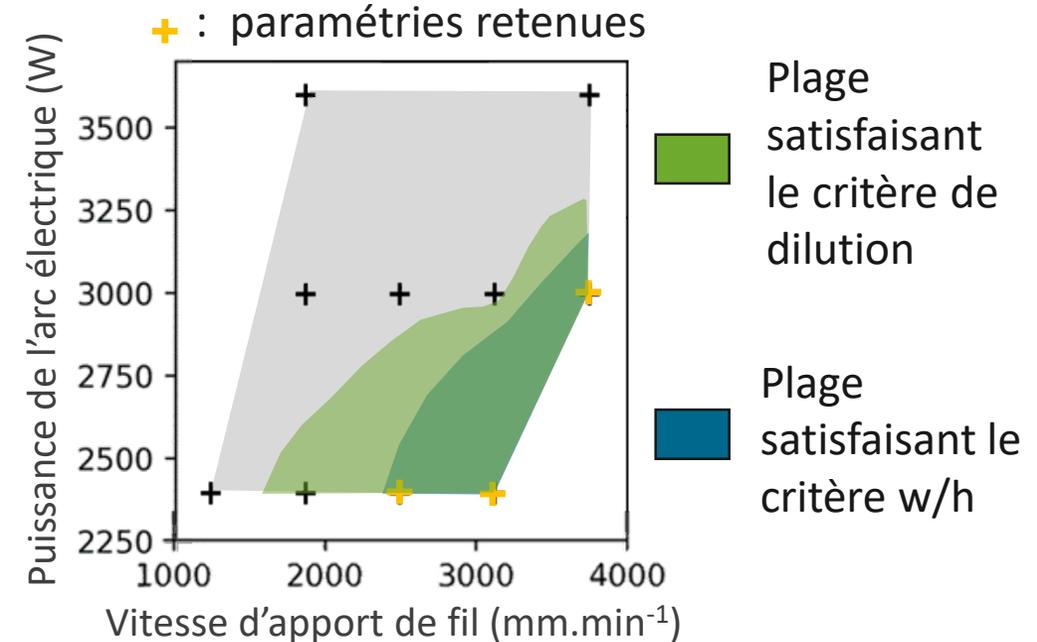
$$d = \frac{p}{p+h} \in [0.1 ; 0.3]$$



✗ Cordon non continu

✗ Cordon irrégulier

✓ Cordon correct



Trajectoire « raster » (aller – aller)



$P = 2400 \text{ W}$, $v = 200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, $v_f = 2500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, **trajectoire AA**



$P = 2400 \text{ W}$, $v = 150 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, $v_f = 3125 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, **trajectoire AA**



$P = 3000 \text{ W}$, $v = 200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, $v_f = 3750 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, **trajectoire AA**

Trajectoire « aller-retour »

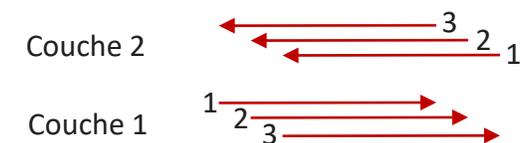


$P = 3000 \text{ W}$, $v = 200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, $v_f = 3750 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, **trajectoire AR**

Bloc multipasse



$P = 3600 \text{ W}$, $v = 200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, $v_f = 3750 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, $d_{\text{intercordons}} = 70 \%$, **trajectoire A(123)R(321)**



Trajectoire utilisée pour la réalisation du bloc multipasse : A(123)R(321).

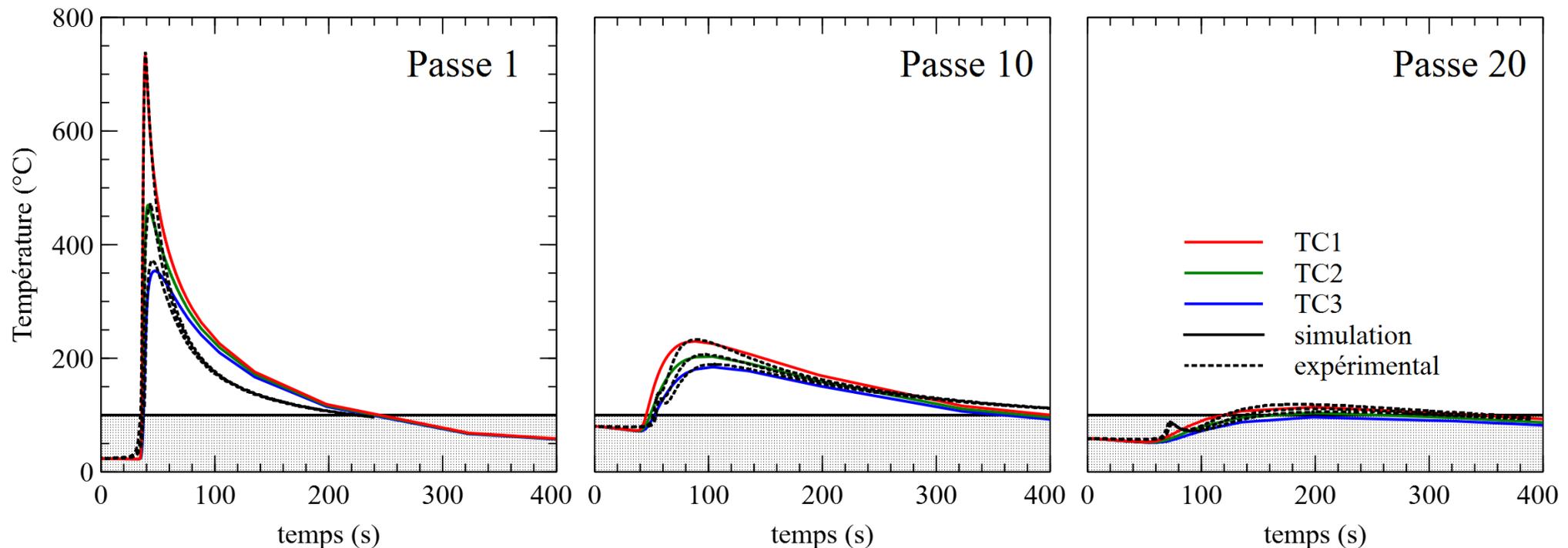
**Caractérisation géométrique et
considération du taux de dépôt.**

Critères de calibration : **rendement** de l'arc électrique, coefficients de **convection** à la surface de la pièce.

$$n = 0,9$$

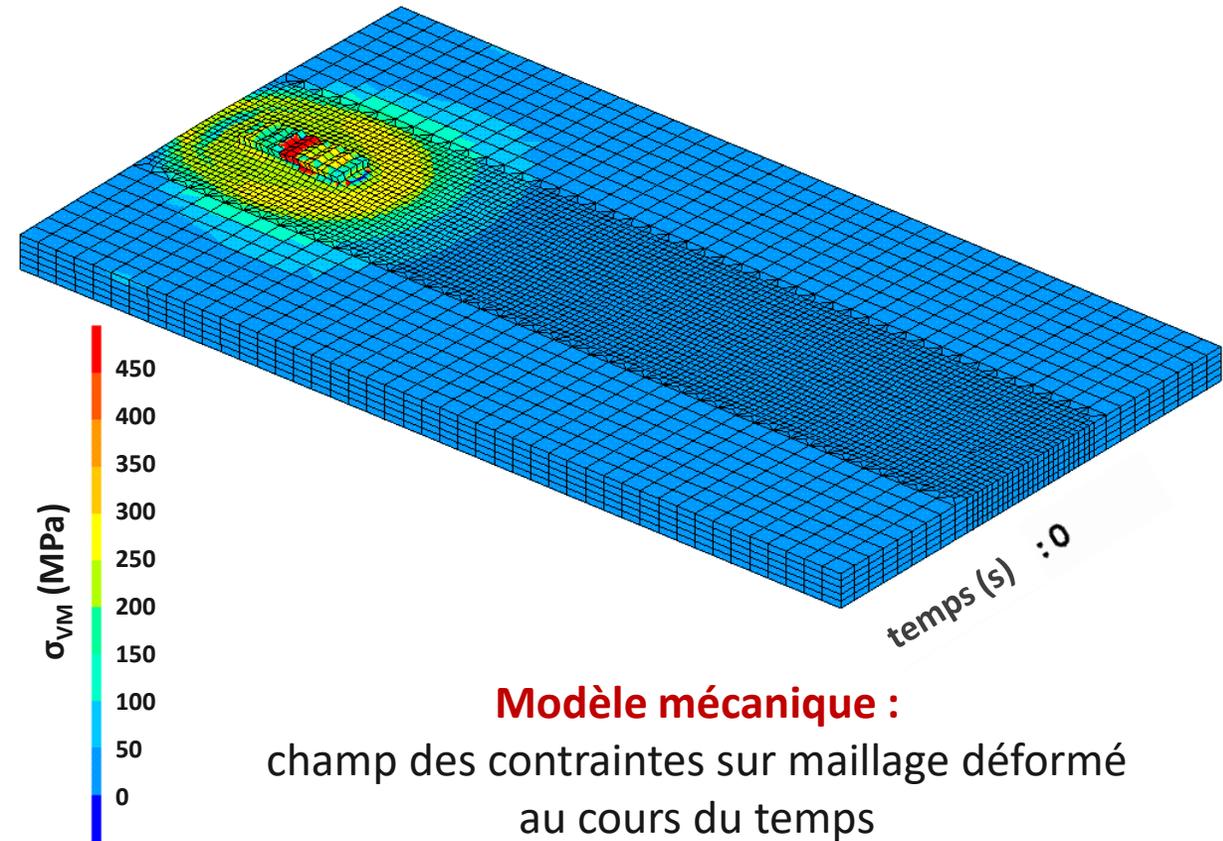
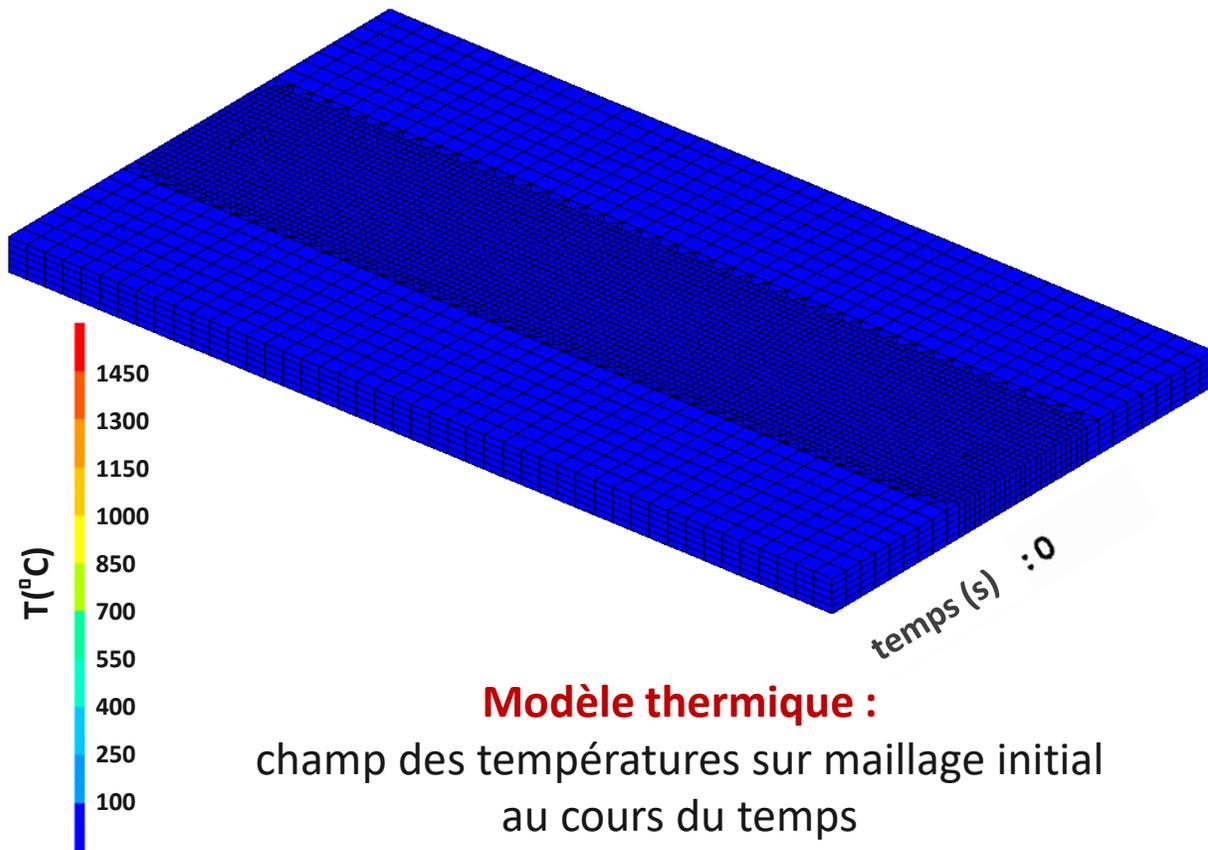
$$H = 30 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$H_{\text{pompage}} = 200 \text{ W/m}^2.\text{K}$$



"Mur 3" $P = 3000 \text{ W}$, $v = 200 \text{ mm.min}^{-1}$, $v_f = 3750 \text{ mm.min}^{-1}$, **trajectoire AA**

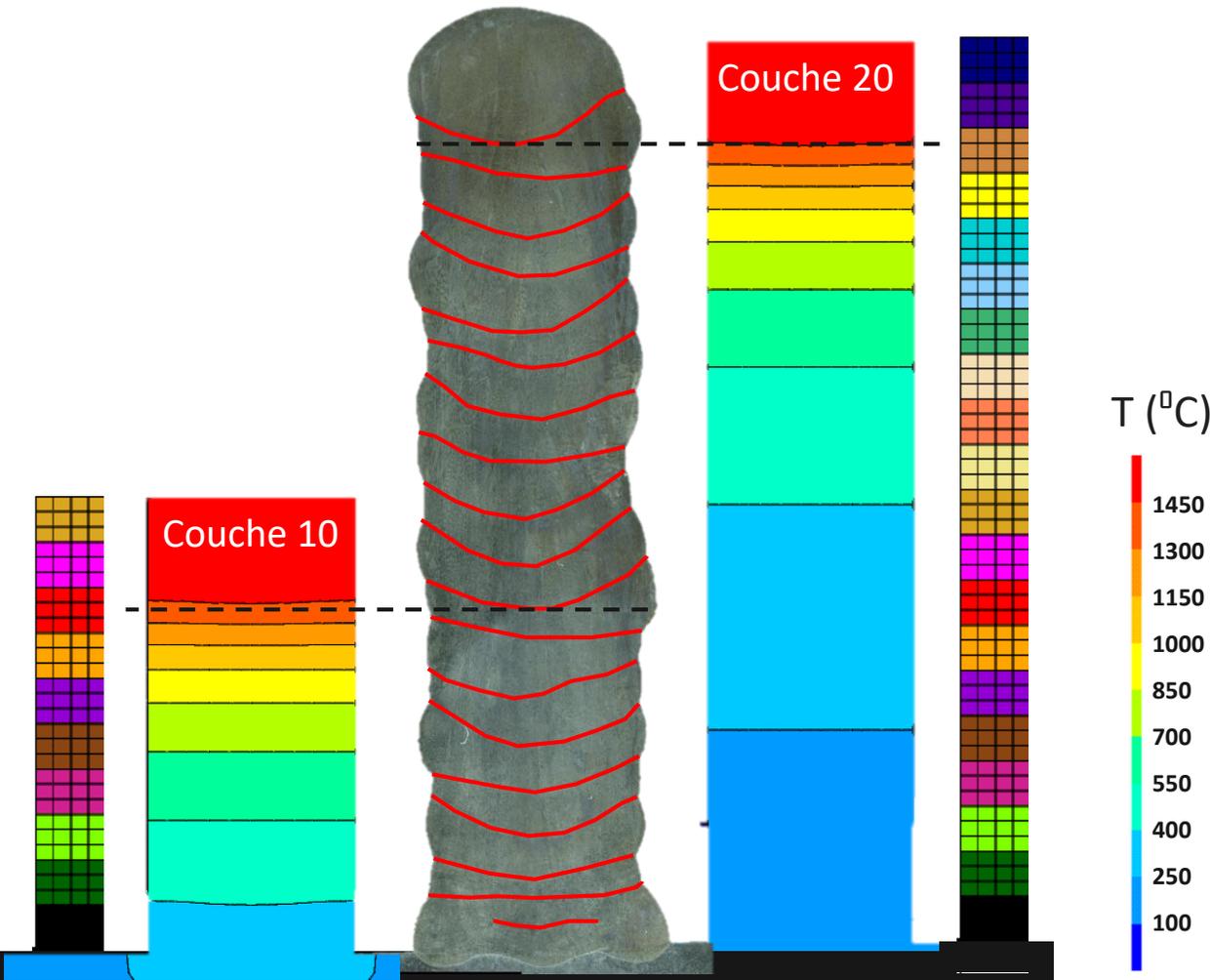
Bon suivi du champ de température durant la fabrication → Simulation satisfaisante à l'échelle macroscopique.



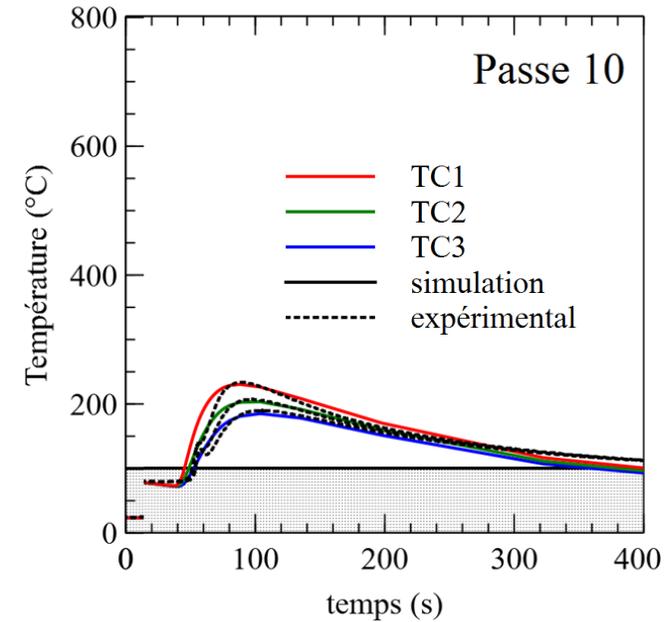
- Mur WAAM de **20 passes** simulé pour la paramétrie ($P = 3000$ W, $v = 200$ mm.min⁻¹, $v_f = 3750$ mm.min⁻¹, $t_{\text{interpasse}} = 100$ s).
 - Vitesse **x100**, déformations **x5**

Partie 3.

Applications au cas de la réalisation de murs monocordons (échelle macroscopique)



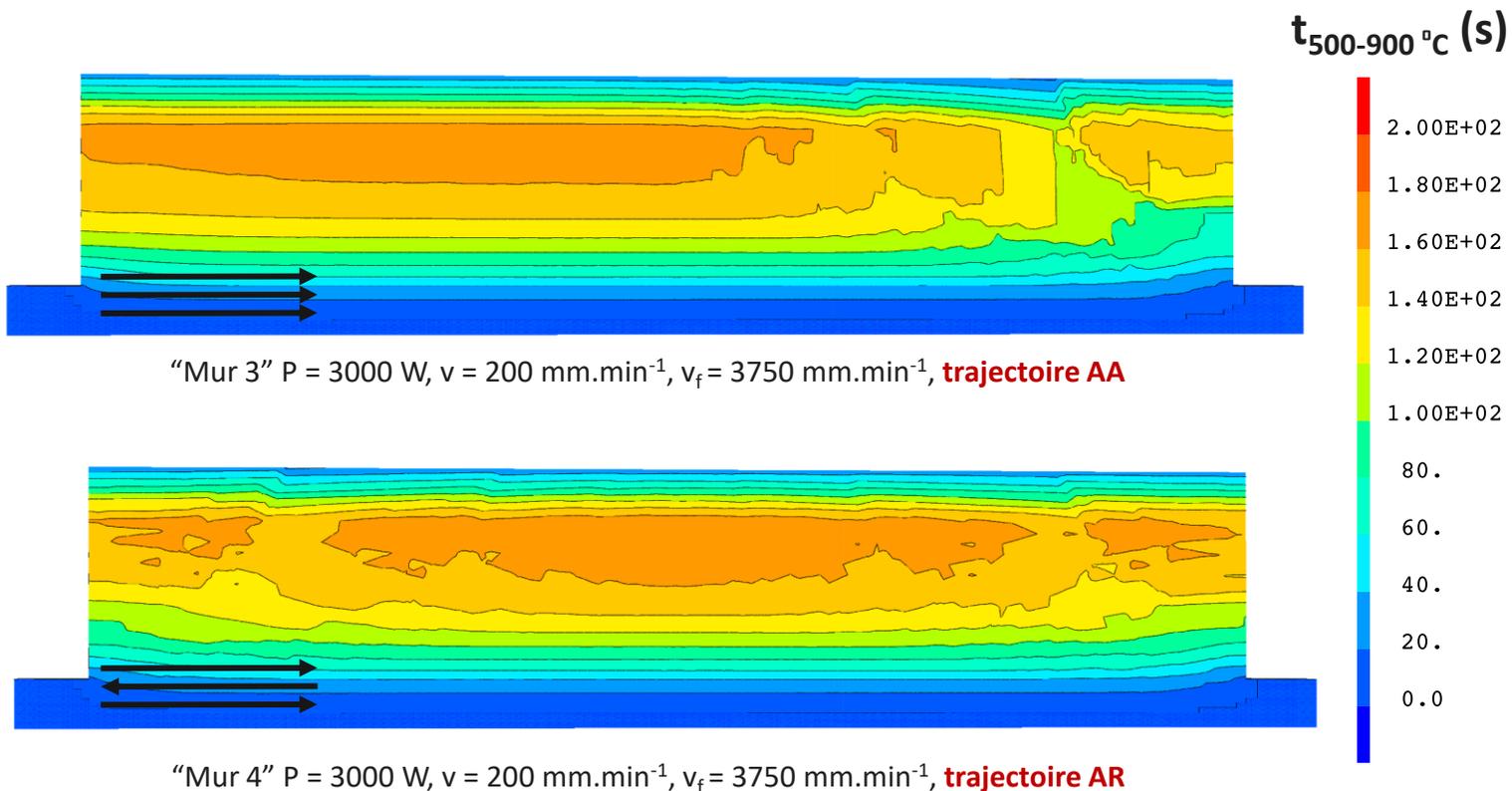
“Mur 3” P = 3000 W, $v = 200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, $v_f = 3750 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, **trajectoire AA**



Pour chaque passe : bonne reproduction des dimensions des **bains numériques** par rapport aux bains expérimentaux.

Cyclages thermiques : refusion de la passe inférieure + restauration des 3 passes précédentes

Application : suivi de l'histoire thermique. Mise en évidence des zones refondues.



Estimation du temps cumulé passé dans la plage de température 500 – 900 °C.

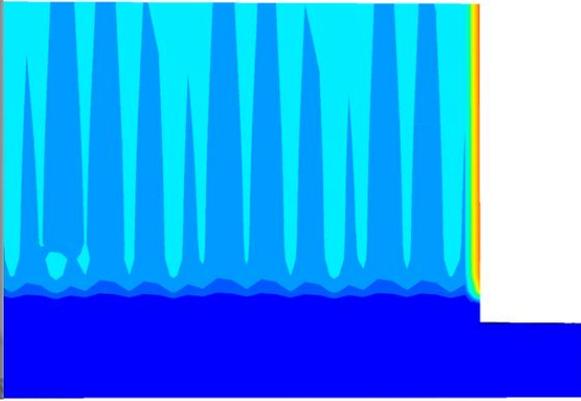
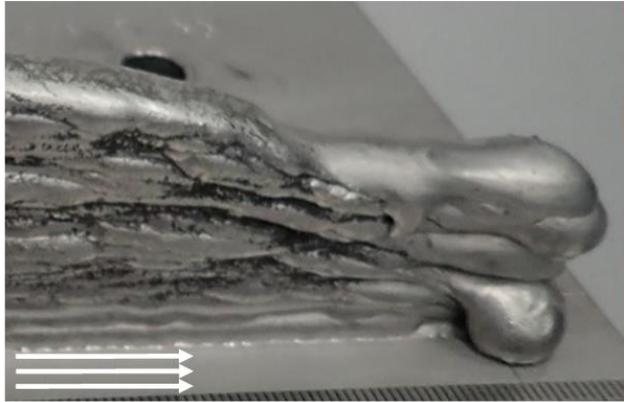
Calcul du temps passé dans la plage de température 500 °C – 900 °C.

→ Plage de température favorisant la précipitation de **carbures**, nocives aux propriétés du matériau [B. Py, 2022].

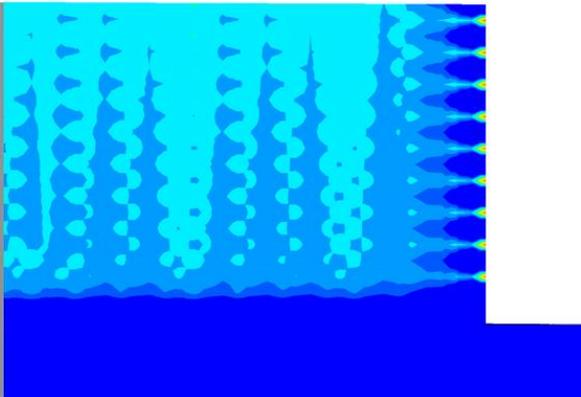
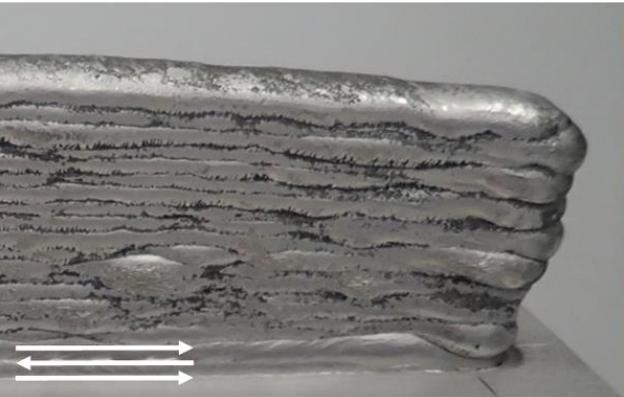
Temps modéré passé dans la plage de température 500-900 °C.

Faible influence des paramètres opératoires étudiés

Application : prédiction des changements microstructuraux dans la pièce.



"Mur 3" $P = 3000 \text{ W}$, $v = 200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, $v_f = 3750 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, **trajectoire AA**



"Mur 4" $P = 3000 \text{ W}$, $v = 200 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, $v_f = 3750 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, **trajectoire AR**

$T_{\max} (^{\circ}\text{C})$



Accumulation de chaleur en fin de dépôt dans le cas d'une trajectoire aller-aller.

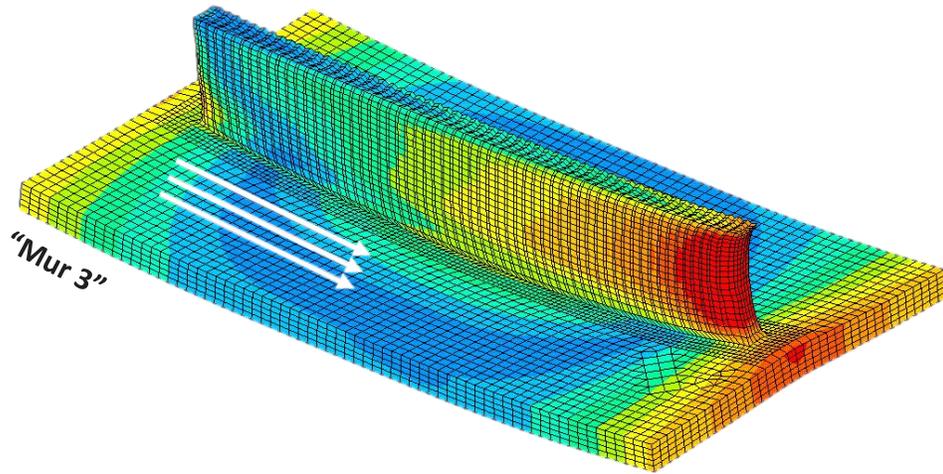
→ Lié à l'**effondrement** observé expérimentalement.

Trajectoire aller-retour :

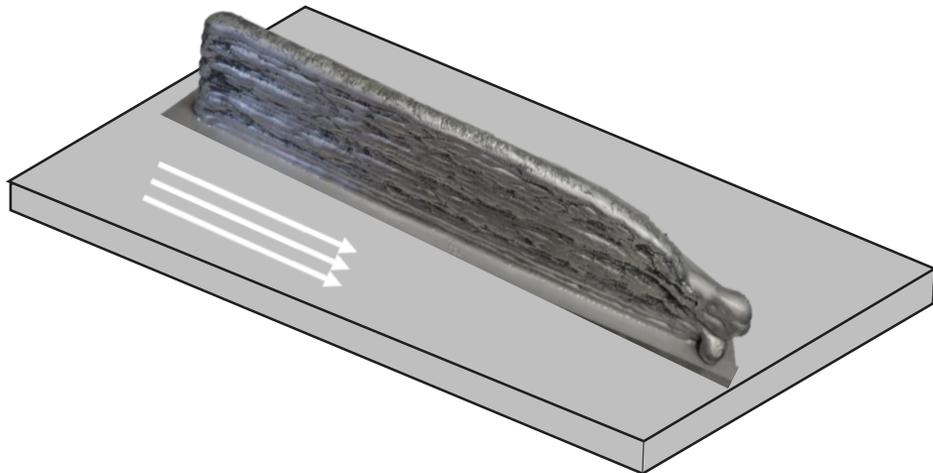
pas d'accumulation de chaleur mise en évidence, pas d'effondrement expérimental

Application : prédiction des déformations macroscopiques par estimation de l'accumulation de chaleur dans la pièce.

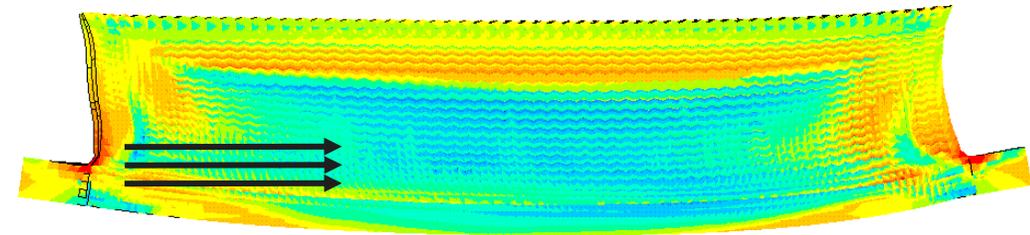
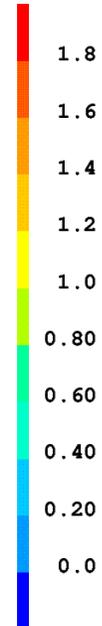
Température maximale ($^{\circ}\text{C}$) atteinte au centre des murs et comparaison expérimentale.



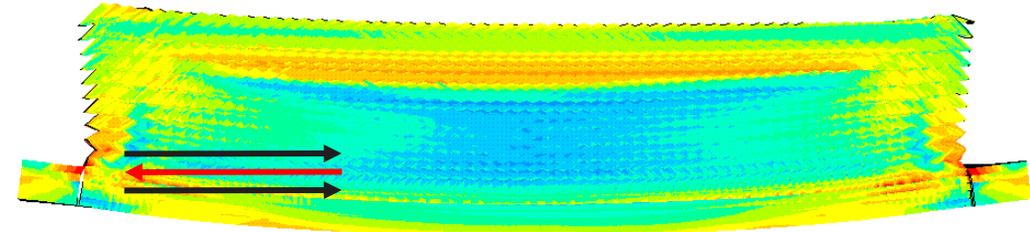
Déplacement total (x1) sur maillage déformé (x5)



U_{tot} (mm)



"Mur 3" : $P = 3000$ W, $v = 200$ mm.min⁻¹, $v_f = 3750$ mm.min⁻¹, **trajectoire AA**



"Mur 4" : $P = 3000$ W, $v = 200$ mm.min⁻¹, $v_f = 3750$ mm.min⁻¹, **trajectoire AR**

σ_{VM} (MPa)



Contrainte résiduelle de Von Mises (x1) sur maillage déformé (x5)

Mise en évidence de la présence de contraintes résiduelles.

→ **Intérêt d'un traitement thermique post-fabrication.**

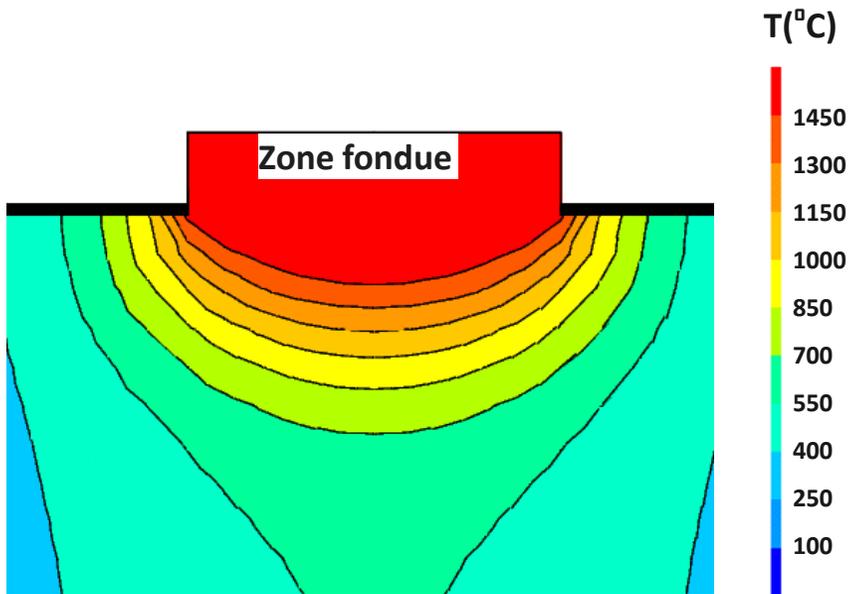
Application : prédiction des déformations, contrôle des valeurs de contraintes résiduelles atteintes.

Partie 4.

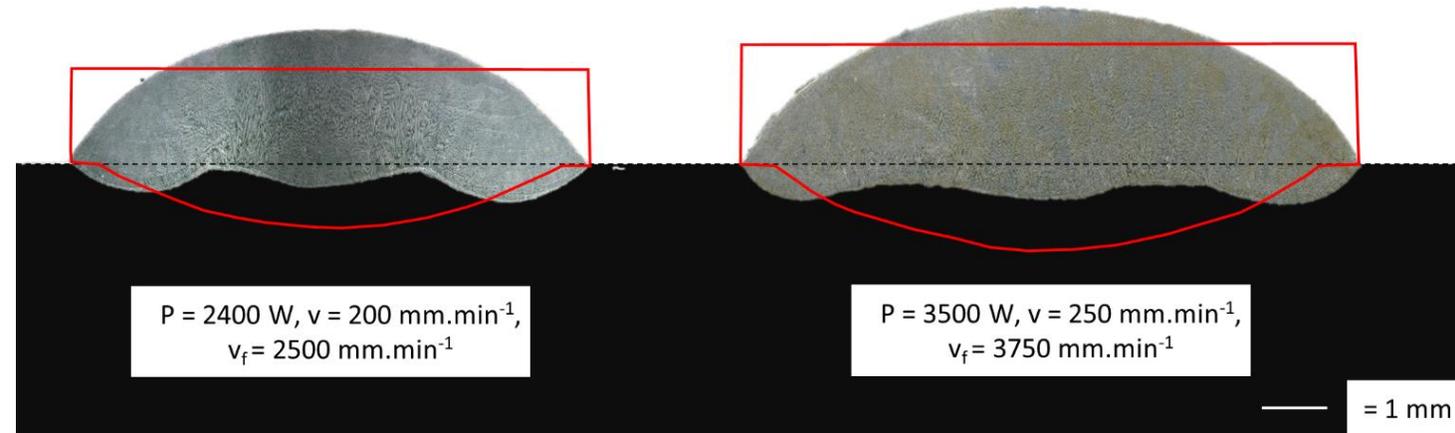
Applications dans le cas de la réalisation de monocordons (échelle mésoscopique)

Simulations thermomécaniques pour le cas du procédé WAAM.

Bonne reproduction du champ thermique →
prédiction de la fusion complète du cordon et de
la pénétration dans le substrat



Champ thermique simulé : rouge → zone fondue

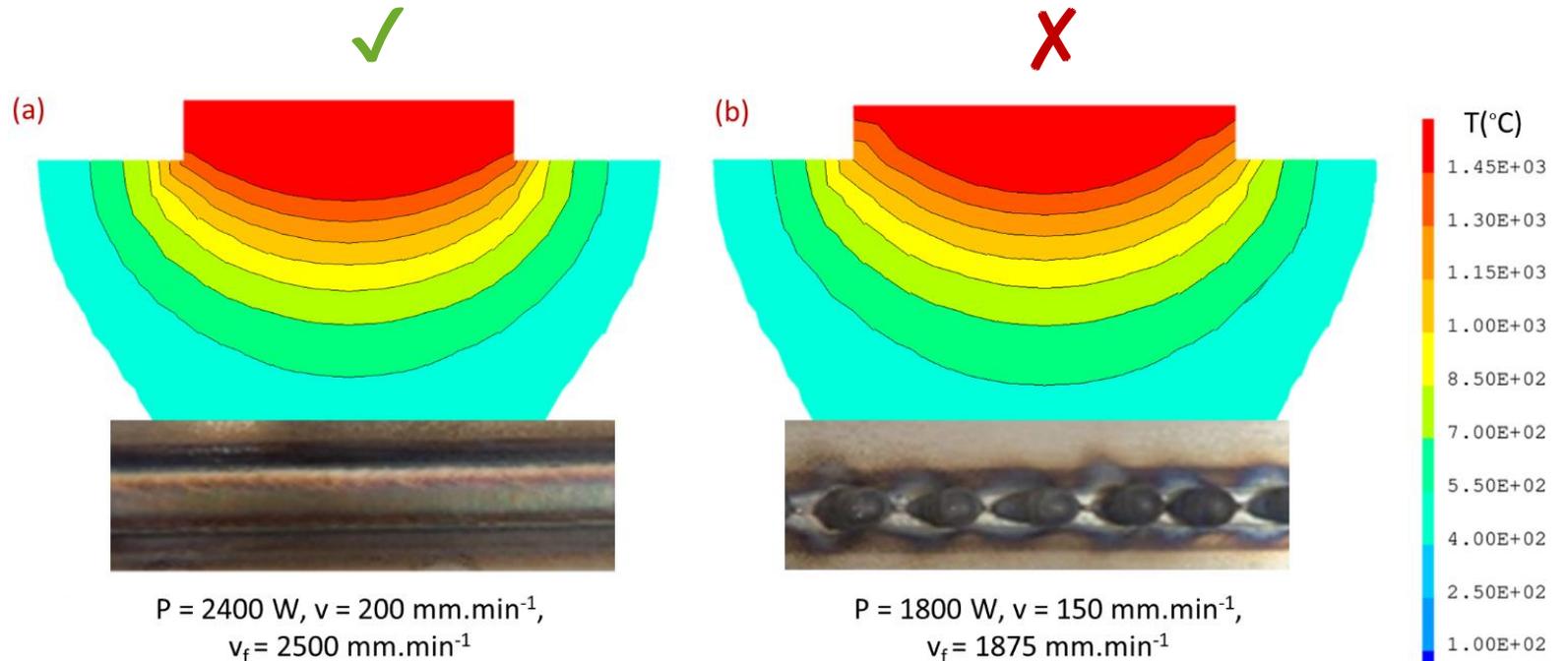
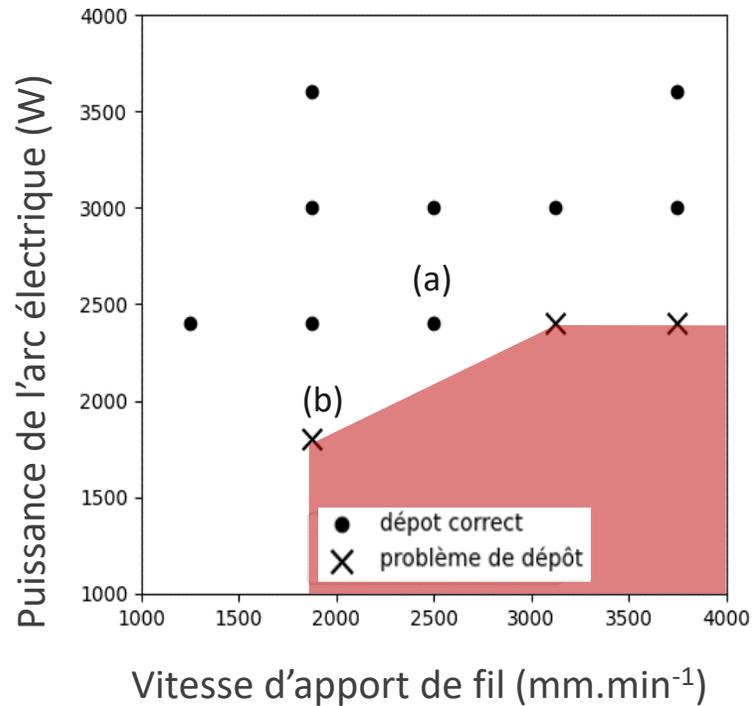


Comparaison des zones fondues expérimentales et numériques
(rouge) pour deux jeux de paramètres.

Non prédiction de la **forme du bain de fusion** →
Prédominance des **effets fluides** dans le cordon
(effet Marangoni etc.), non pris en compte dans le calcul.

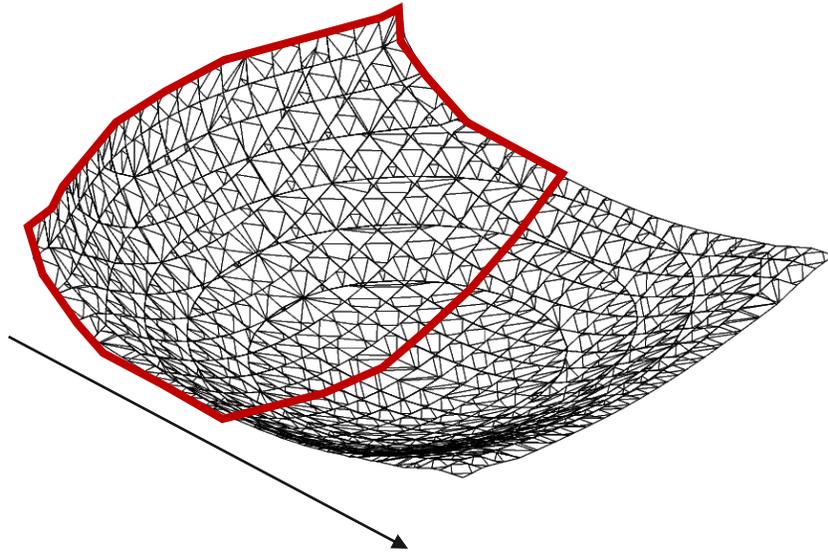
Possibilités de post-traitements numériques :

- Suivi du champ de température au cours de la fabrication.
- Faisabilité opératoire de la fabrication d'un cordon en fonction des paramètres procédés.



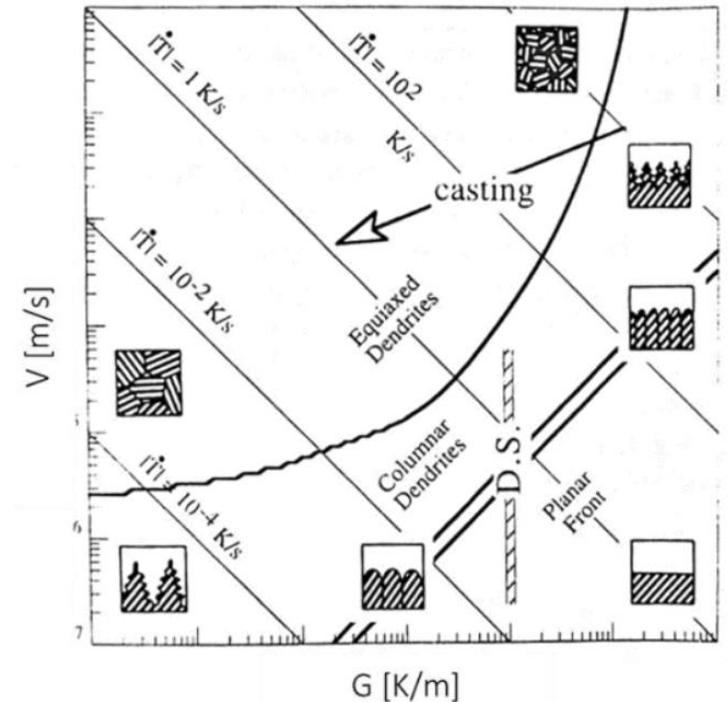
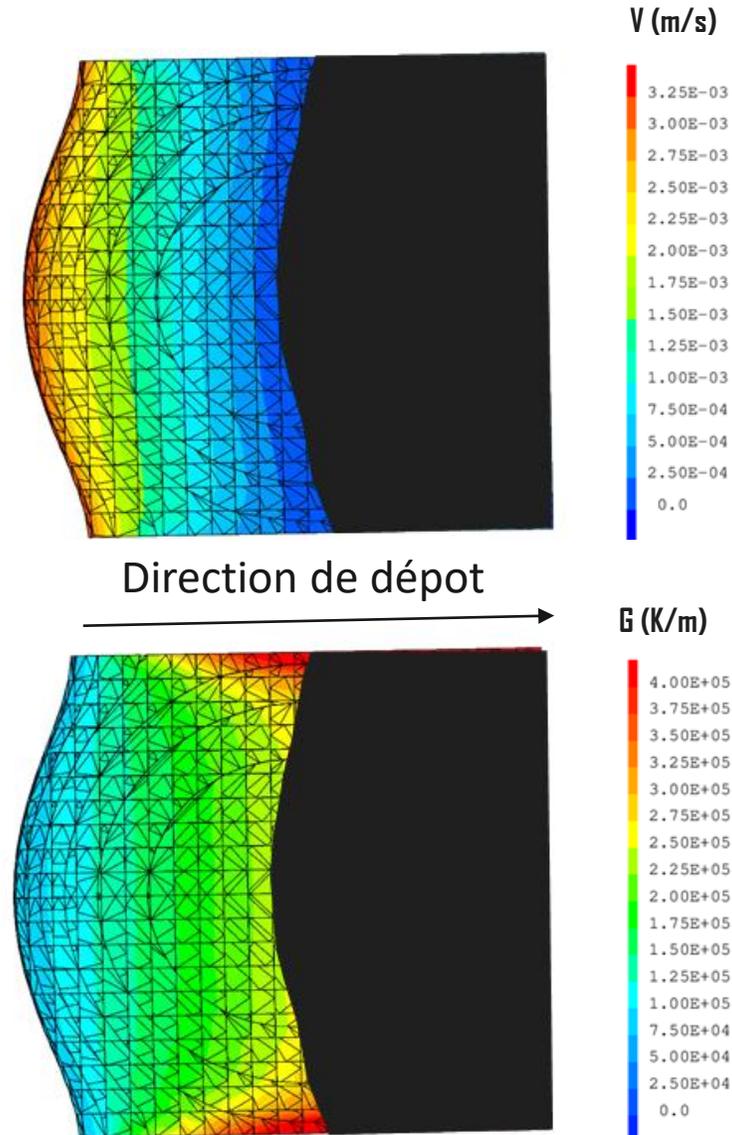
Application : prédiction de la faisabilité opératoire du dépôt

Extraction de l'isotherme $T = T_{\text{fus}}$



Estimations à l'arrière du bain :

Gradient thermique G
Vitesse de solidification V



[Kurz, 1984]

Application : mise en évidence du mécanisme de solidification

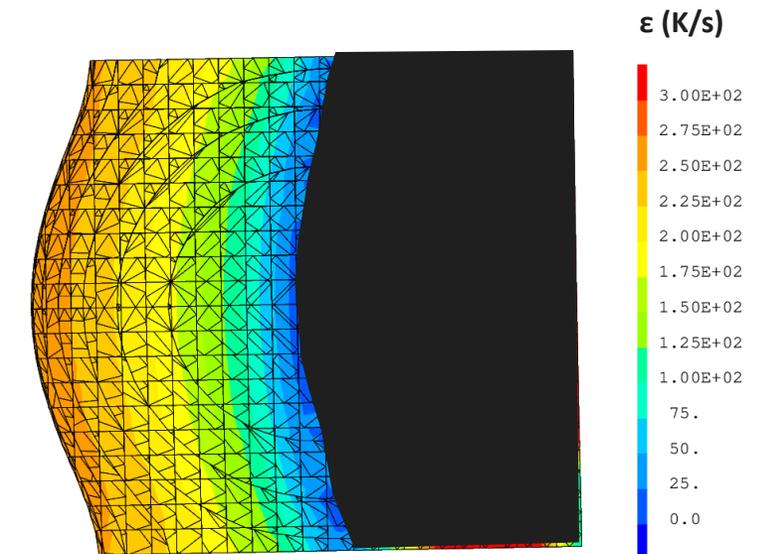
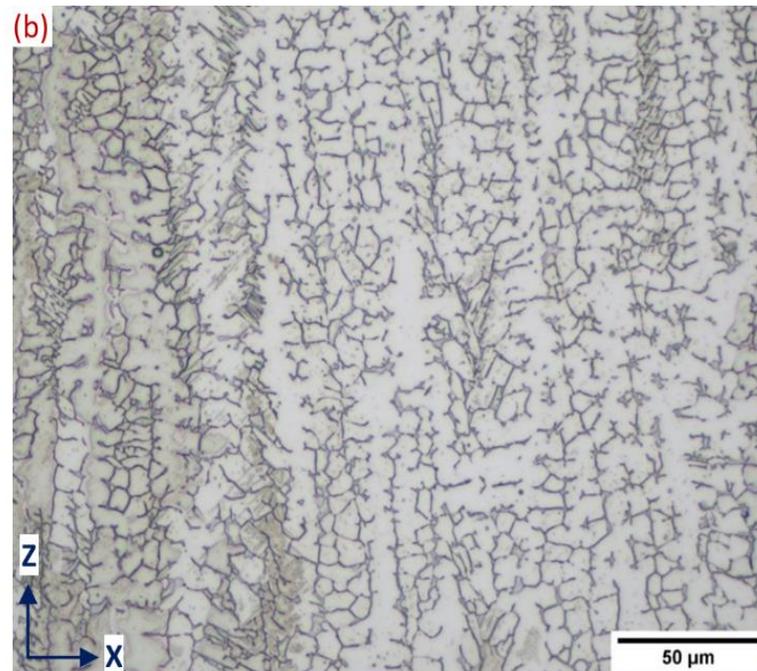
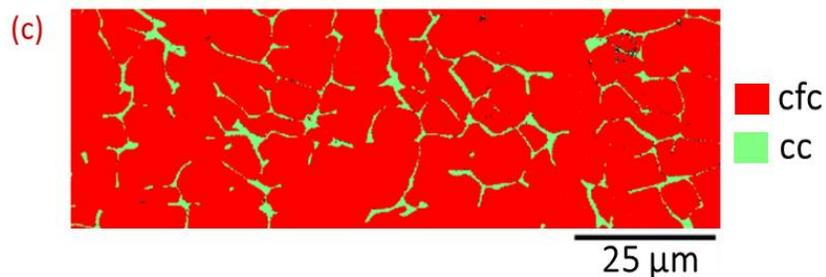
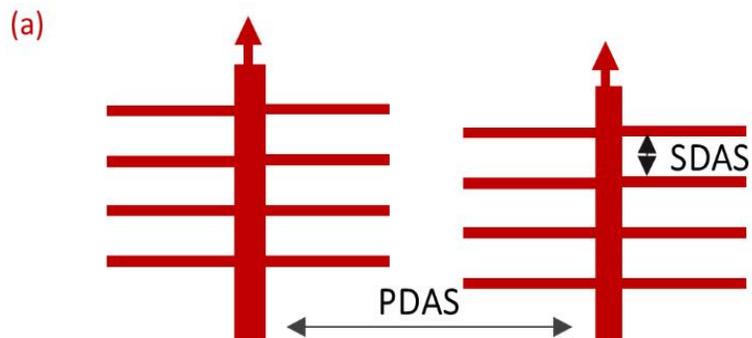
$$PDAS = 80. \varepsilon^{-0.33}$$

$$SDAS = 25. \varepsilon^{-0.28}$$

[Katayama & Matsunawa, 1984]

Mesure des espacements interdendritiques primaires (PDAS) et secondaires (SDAS).

Estimation de la vitesse de refroidissement (ε) : ~ 100 K/s pour un monocordon WAAM.



Vitesse de refroidissement numérique : entre 150 et 300 K/s

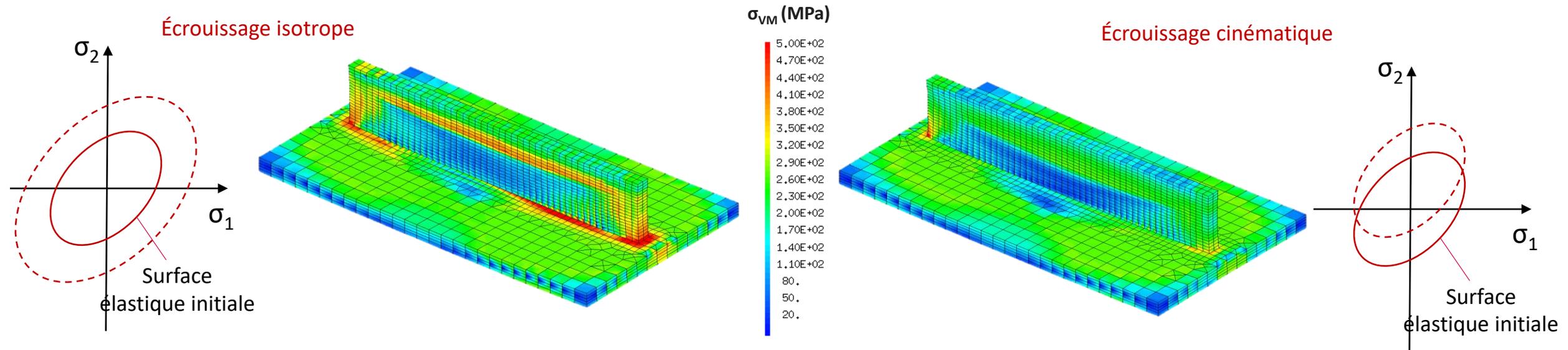
(a) Définition des espacements interdendritiques. (b) Microstructure de solidification – attaque électrolytique. (c) Cartographie de phases en EBSD (austénite : rouge, ferrite : vert).

Partie 5. **Discussion et conclusions**

[Muránsky *et al.*, 2012] Estimation des contraintes dans le cadre du soudage TIG et comparaison expérimentale.

Écrouissage isotrope : légère surestimation des contraintes.

Écrouissage cinématique : sous estimation des contraintes. → Encadrement du champ de contraintes réel.



Champs des contraintes résiduelles estimés pour la réalisation du mur 3 avec deux lois de plasticité différentes.

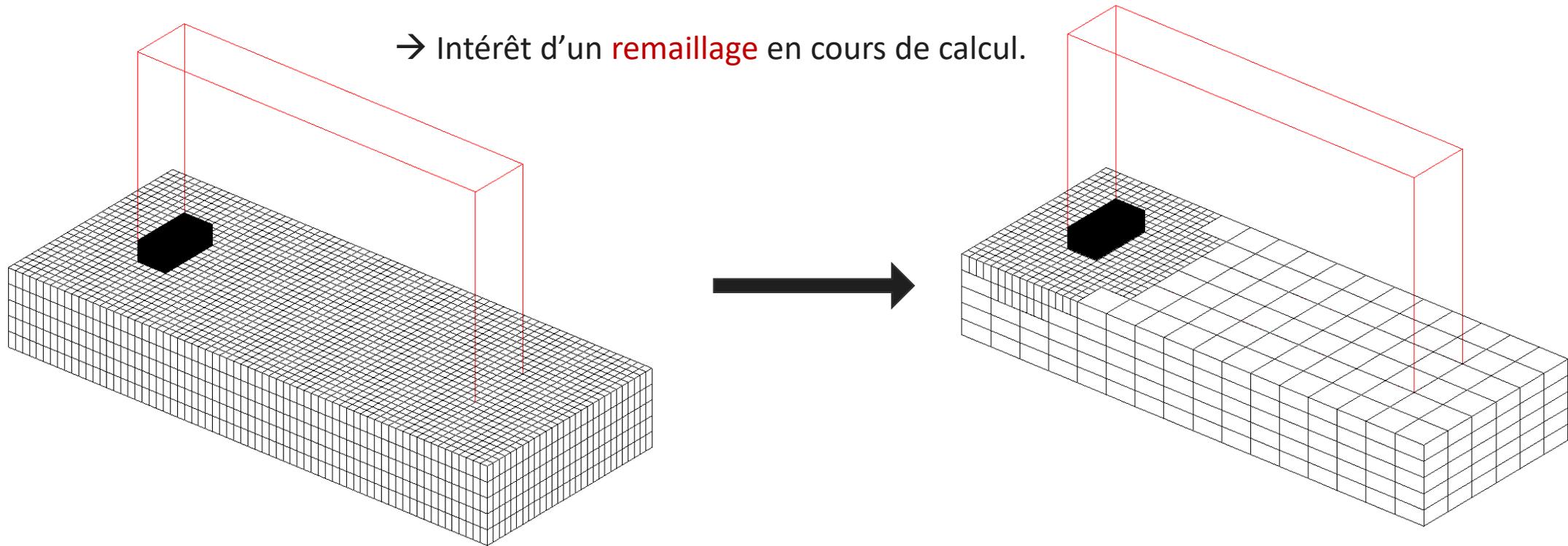
Ordinateur de calcul : 56 cœurs et mémoire RAM de 62 Go.

Temps de calcul : limite de l'approche proposée.

Augmentation exponentielle avec le nombre de couches.

Mur maillage fin : ~4 jours de calcul. ~32000 éléments

→ Intérêt d'un remaillage en cours de calcul.



Remaillage en cours de calcul pour la simulation d'un mur avec la procédure ADAPTE de Cast3M.

Réalisation d'un **modèle thermomécanique** avec Cast3M pour simuler le procédé WAAM et le confronter aux **résultats expérimentaux**.

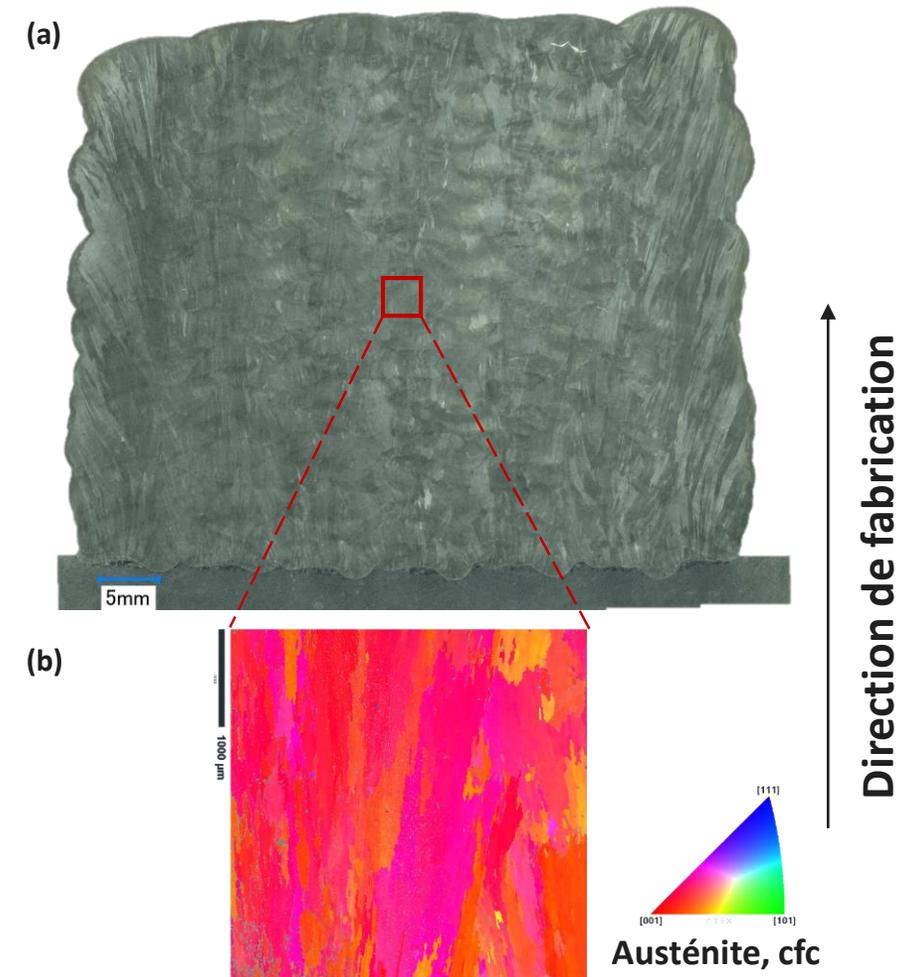
Champ de température simulé :

- estimation de la zone fondue,
- estimation de l'accumulation de chaleur en lien avec les déformations expérimentales,
- contrôle du temps passé dans les plages thermiques favorisant le changement de phase (T entre 500 °C et 900 °C).

A l'échelle mésoscopique :

- prédiction de la faisabilité opératoire,
- corrélation avec la microstructure de solidification.

Simulations mécaniques : champ de déformations et champ de contraintes résiduelles. → Mise en évidence du fort intérêt d'un traitement thermique post-procédé.

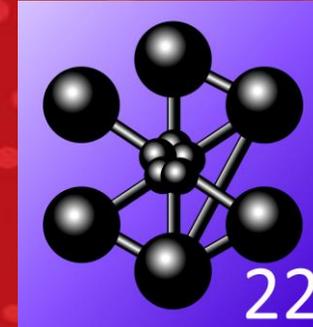


(a) Coupe transverse du bloc réalisé, attaquée à l'eau régale.

(b) Exemple de cartographie EBSD, projetée dans la direction de fabrication.

The logo for CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) features the lowercase letters 'cea' in a white, sans-serif font, with a thin green horizontal line underneath.

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



Merci de votre attention

Damien Artières^{1,2,✉}, Diogo Gonçalves¹, Serge Pascal¹, Sylvain Dépinoy², Vladimir A. Esin²

Remerciements : Stéphane Gounand¹, Charlotte Metton¹, Rémi Robidet¹, Hawa Badji¹

¹ Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Etudes Mécaniques et Thermiques, Gif-sur-Yvette, France

² Mines Paris, PSL University, Centre des Matériaux - (CNRS UMR 7633), Evry, France

✉ : damien.artieres@cea.fr