



Institut de Recherche Dupuy de Lôme

JOURNEE SNS-CFV

« Synergies de Simulation entre Fabrication Additive et Soudage : nouveaux défis »

le 26 juin 2018

Modélisation multiphysique d'un procédé de fabrication additive arc-fil

Muriel Carin, Stephen Cadiou, Mickael Courtois, Philippe Le Masson,

Lauriane Guilmois, Pascal Paillard



La fabrication additive arc-fil

- Basée sur le soudage à l'arc
- Fusion du substrat et fil d'apport induite par l'arc créé entre la torche et le substrat
- Matériau d'apport: sous forme de fi
- Génération de l'arc selon différents procédés (TIG, MIG, PAW, CMT)

Matériaux

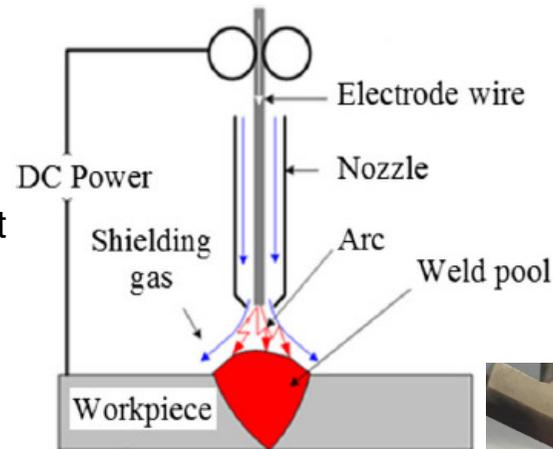
- Superalliages (Ni, Ti, ..)
- Aciers inoxydables
- Aciers de structure
- Alliage d'aluminium

Intérêts de ce procédé:

- Haut taux de dépôt => réduction des délais de fabrication
- Peu de déchets, faible impact environnemental
- Pièces de grandes dimensions, géométrie complexe => allègement des structures

Verrous scientifiques:

- Comprendre l'influence des paramètres opératoires sur la géométrie, les cycles thermiques, la microstructure, les distorsions et contraintes résiduelles
=> Développer des modèles numériques

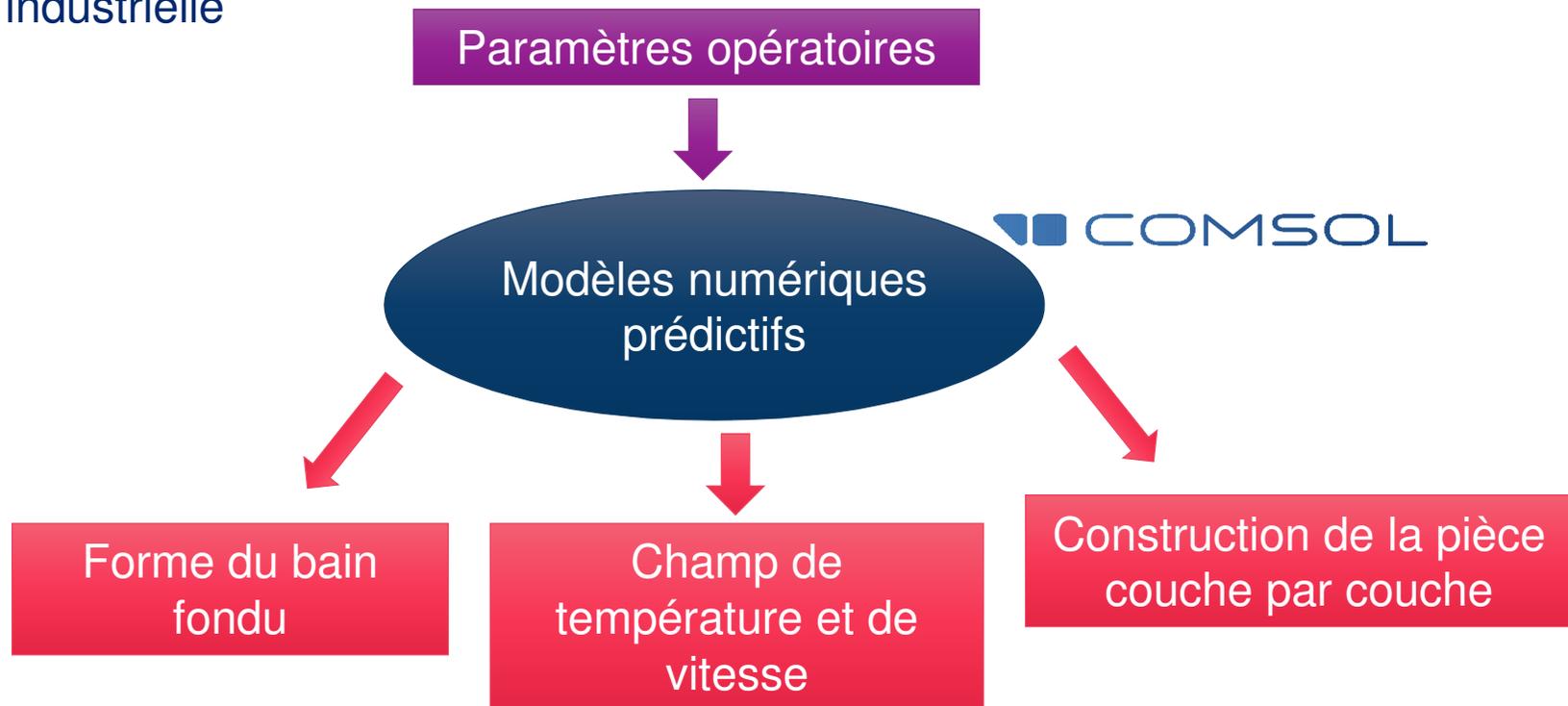


Applications:
aéronautique,
aérospatiale, navale



Objectifs de la thèse de S. Cadiou

Développer des **modèles de connaissance** prédictifs pour simuler le procédé de fabrication additive avec dépôt de fil => **étude amont** à une approche industrielle

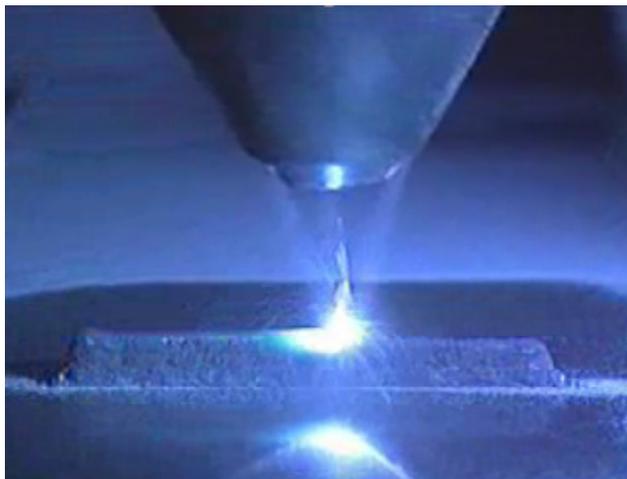


- ⇒ Analyse de l'influence des paramètres opératoires sur les différents observables
 - ⇒ Meilleure compréhension des phénomènes impliqués
 - ⇒ Optimisation des paramètres opératoires en vue de minimiser les défauts

Problématique : état de surface final dégradé

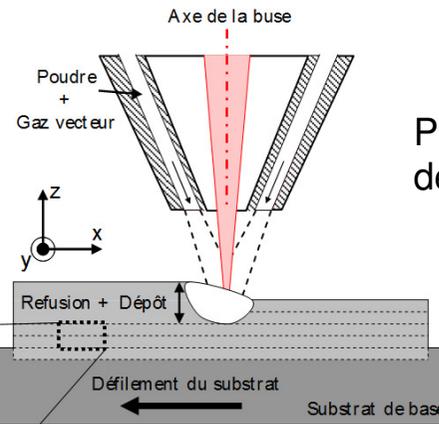
Paramètres caractéristiques : microrugosité R_t et ondulations latérales W_t

Objectifs : Mieux comprendre les mécanismes responsables de cet état dégradé et améliorer l'état de surface final à partir des paramètres opératoires

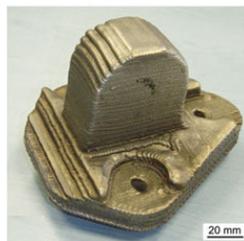
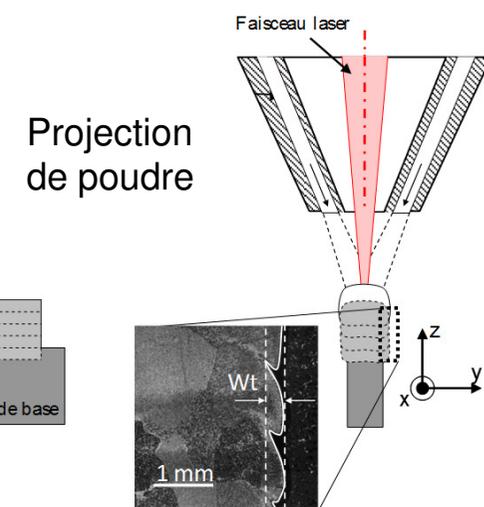


Projet ANR ASPECT /
Thèses S Morville (2012) et M Gharbi (2013)

Vue longitudinale

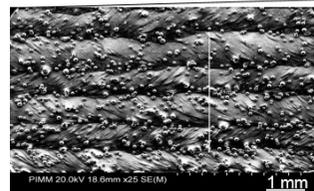


Vue de face



Forme complexe

[Kovalev *et al.*, 2010]

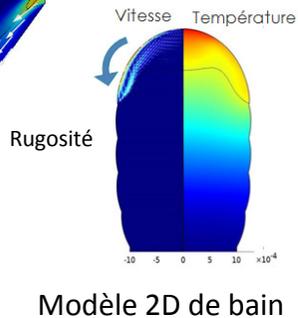
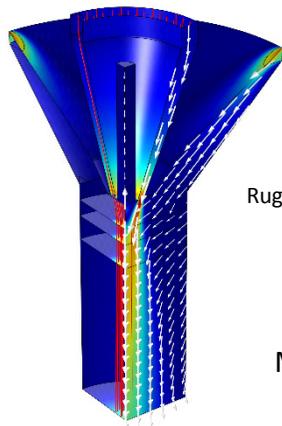


$(20 \mu\text{m} < R_t < 50 \mu\text{m})$

$(10 \mu\text{m} < W_t < 400 \mu\text{m})$

- Modélisation multiphysique (thermique, hydrodynamique)
Thermo-Hydraulique dans le bain fondu : Température, Pression, Vitesse
Interaction Laser/Poudre
- Traitement de l'apport de matière: méthode ALE

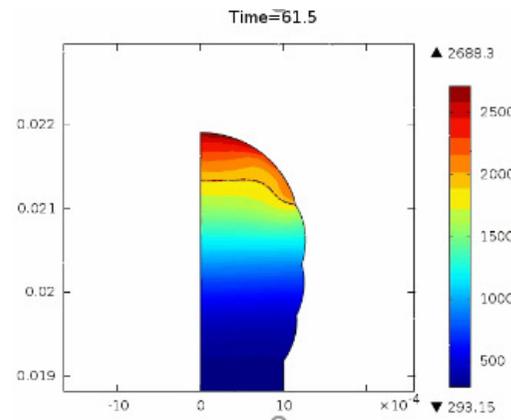
(Fabrication Directe par Projection Laser)



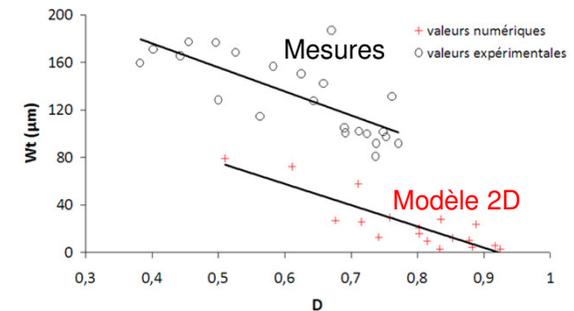
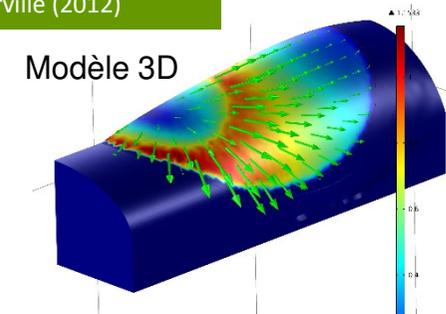
Modèle de jet de poudre
⇒ Conditions aux limites du modèle de bain

Prédiction du dépôt multicouche

Etat de surface en Fabrication Additive



Thèse S Morville (2012)



Identification des conditions opératoires optimales

Bon état de surface



Taux de dilution élevé

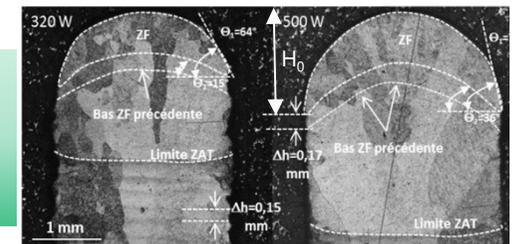
$$D = \frac{H_0 - \Delta h}{H_0}$$



Forte puissance laser P_{laser}

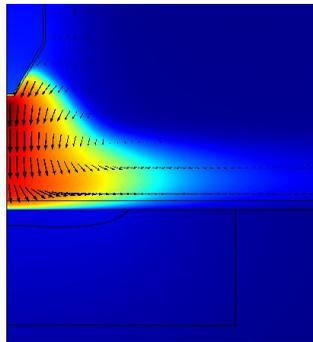
Vitesse d'avance V_s rapide

Débit massique D_m faible

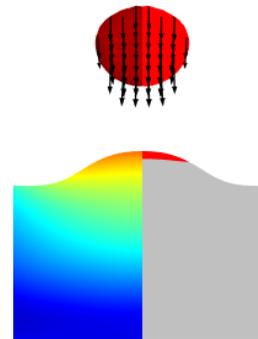


Développement de modèles pour la fabrication additive arc-fil

Modèle 2D d'arc prédictif sans apport de matière électromagnétique, thermique, mécanique des fluides

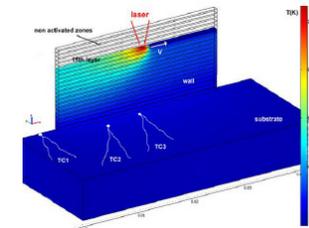


Modèle 2D d'arc prédictif avec apport de matière électromagnétique, thermique, mécanique des fluides + Level Set



Modèle 3D d'arc prédictif avec apport de matière électromagnétique, thermique, mécanique des fluides + Level Set

Modèle 3D thermique
Construction de la pièce couche par couche



Fin 2016

1^{er} semestre 2017

Présent

Fin 2018

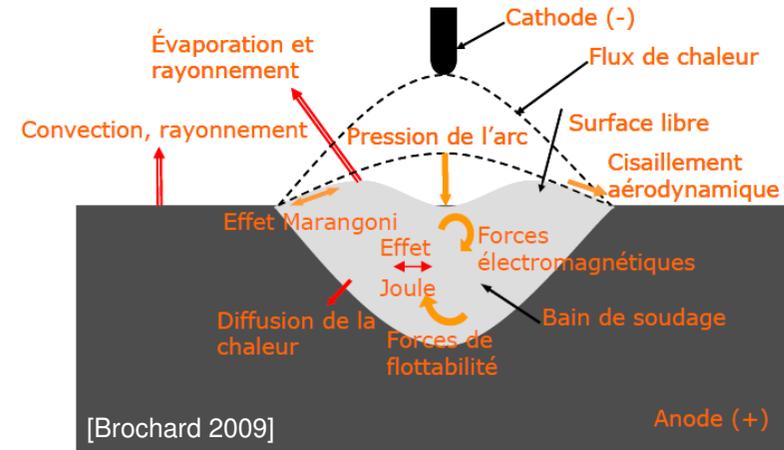
Fin 2019

Équations résolues dans les domaines

Équations électromagnétiques :

$$\vec{\nabla} \cdot (\sigma \vec{\nabla} V) = 0$$

$$\vec{\nabla} \times (\mu^{-1} \vec{\nabla} \times \vec{A}) + \sigma \vec{\nabla} V = \vec{0}$$



Conservation de l'énergie :

$$\rho c_p^{eq} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T \right) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + S_v$$

$$S_{vcathode, anode} = S_{veffetJoule}$$

$$S_{vplasma} = S_{veffetJoule} - S_{vray}$$

Procédé TIG

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

Conservation de la quantité de mouvement :

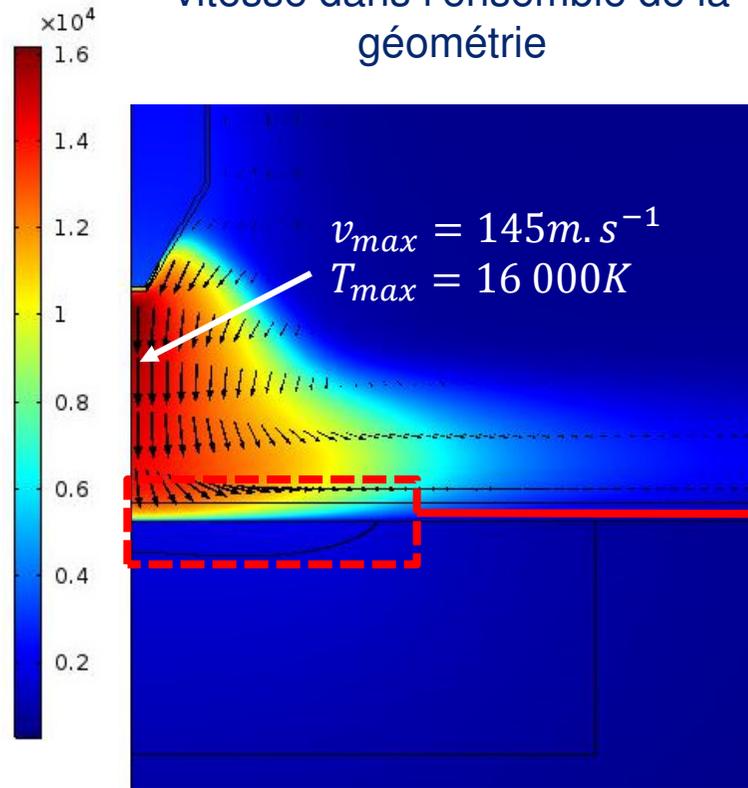
$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{\nabla} \vec{u}) \cdot \vec{u} \right) = \vec{\nabla} \cdot \left[-pI + \mu_f \left((\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + (\vec{\nabla} \cdot \vec{u})^T \right) - \frac{2}{3} \mu_f (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) I \right] + \vec{F}_v$$

$$\vec{F}_{vplasma} = \vec{F}_{vLorentz}$$

$$\vec{F}_{vanode} = \vec{F}_{vLorentz} + \vec{F}_{vFlottabilite} + \vec{F}_{vDarcy}$$

Hypothèses: fluides newtoniens, plasma faiblement compressible, métal liquide incompressible, écoulements laminaires, interface indéformable

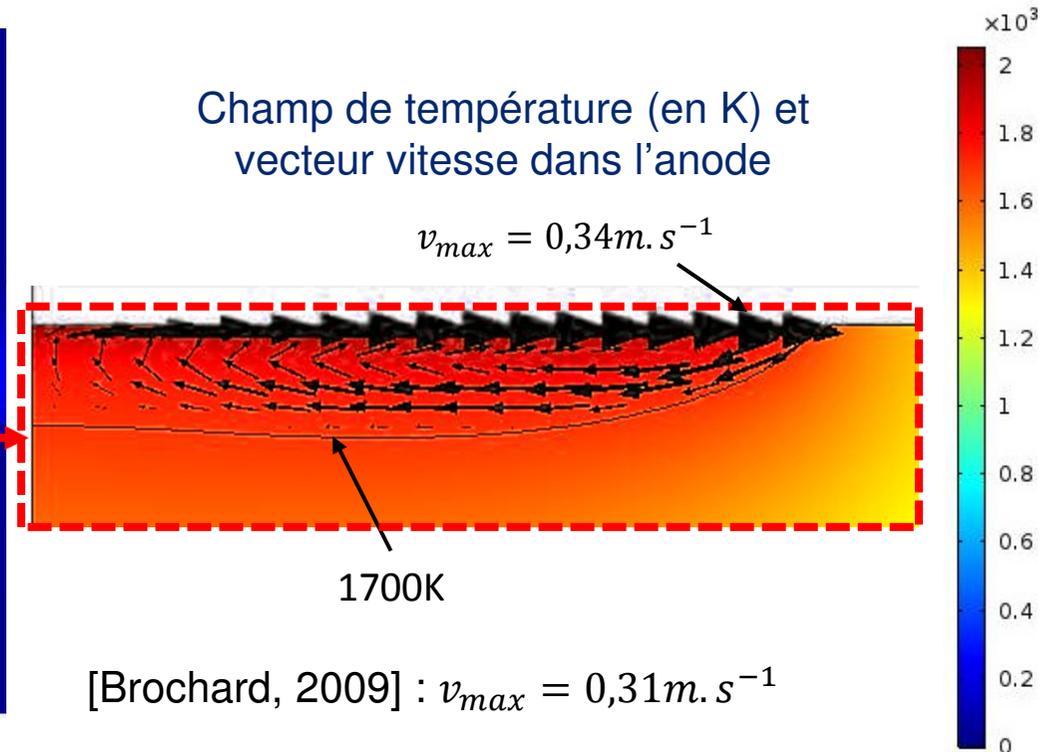
Champ de température (K) et vecteur vitesse dans l'ensemble de la géométrie



Paramètres du cas test: Tanaka 2002

- $I = 150A$, hauteur d'arc 5 mm
- Argon à 15L/min
- Anode en acier inox 304
- Cathode en tungstène thorié (angle 60°, diamètre: 1,6 mm, troncature $r = 0,3$ mm)
- Stationnaire ou transitoire

Champ de température (en K) et vecteur vitesse dans l'anode



[Brochard, 2009] : $v_{max} = 0,31m.s^{-1}$

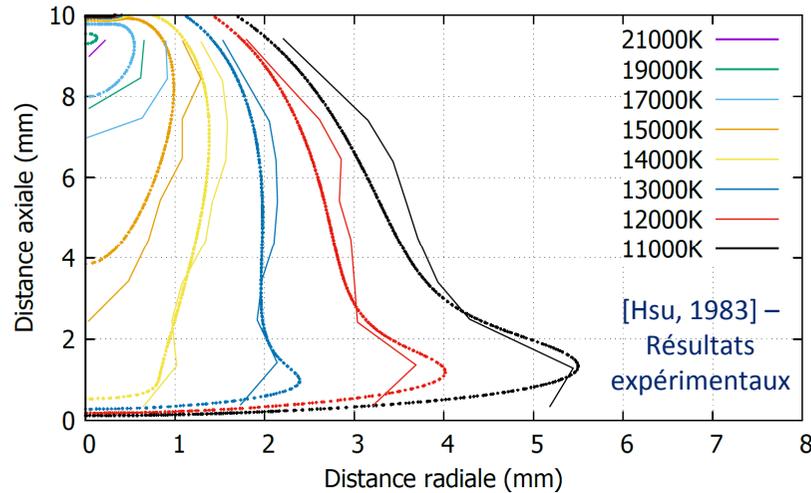
208 209 éléments (taille de maille minimale 10 μm)

Temps de calcul (24 processeurs, 96 Giga RAM): $\approx 1h$ pour le cas stationnaire

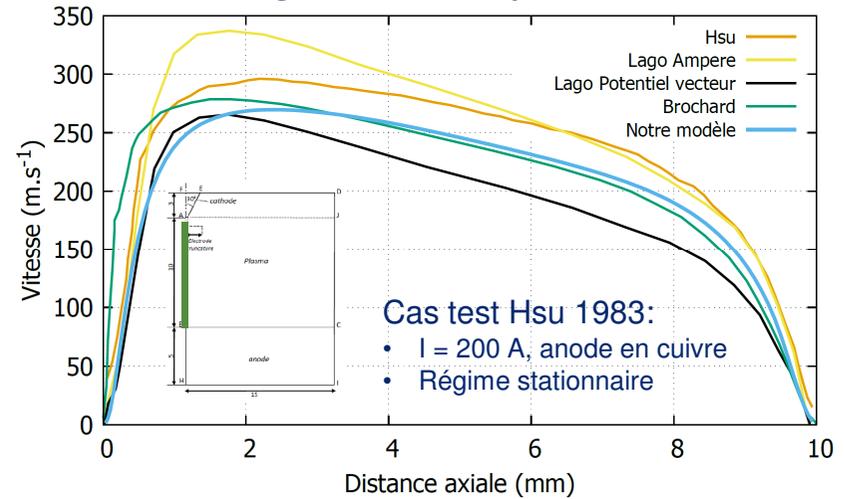
$\approx 24h$ pour le cas transitoire (temps physique : 20 s)

Partie plasma (cas test Hsu 1983)

Champs de température dans le plasma

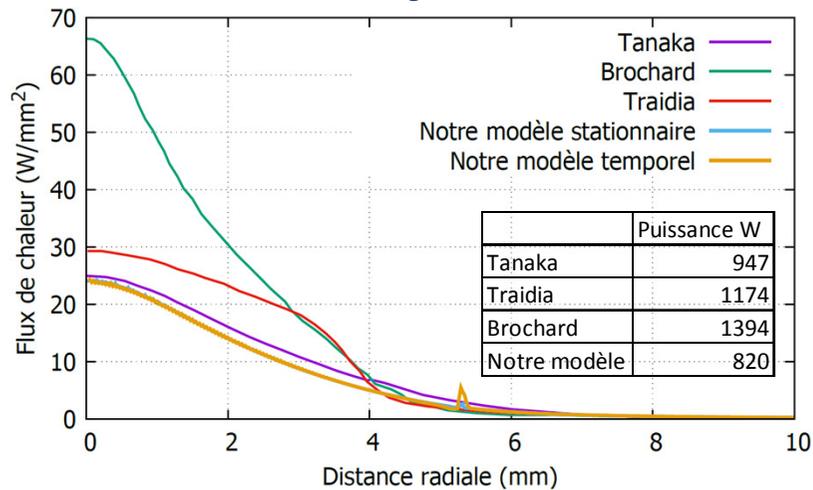


Vitesses axiales de l'écoulement du plasma le long de l'axe de symétrie

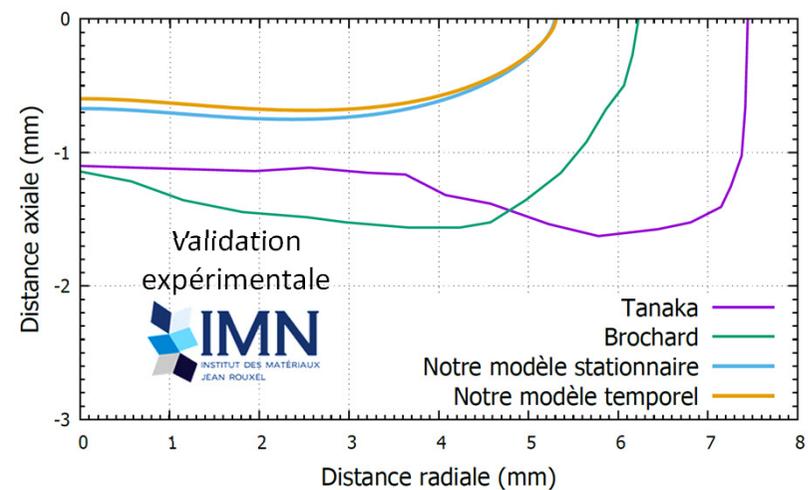


Partie bain de fusion (cas test Tanaka 2002)

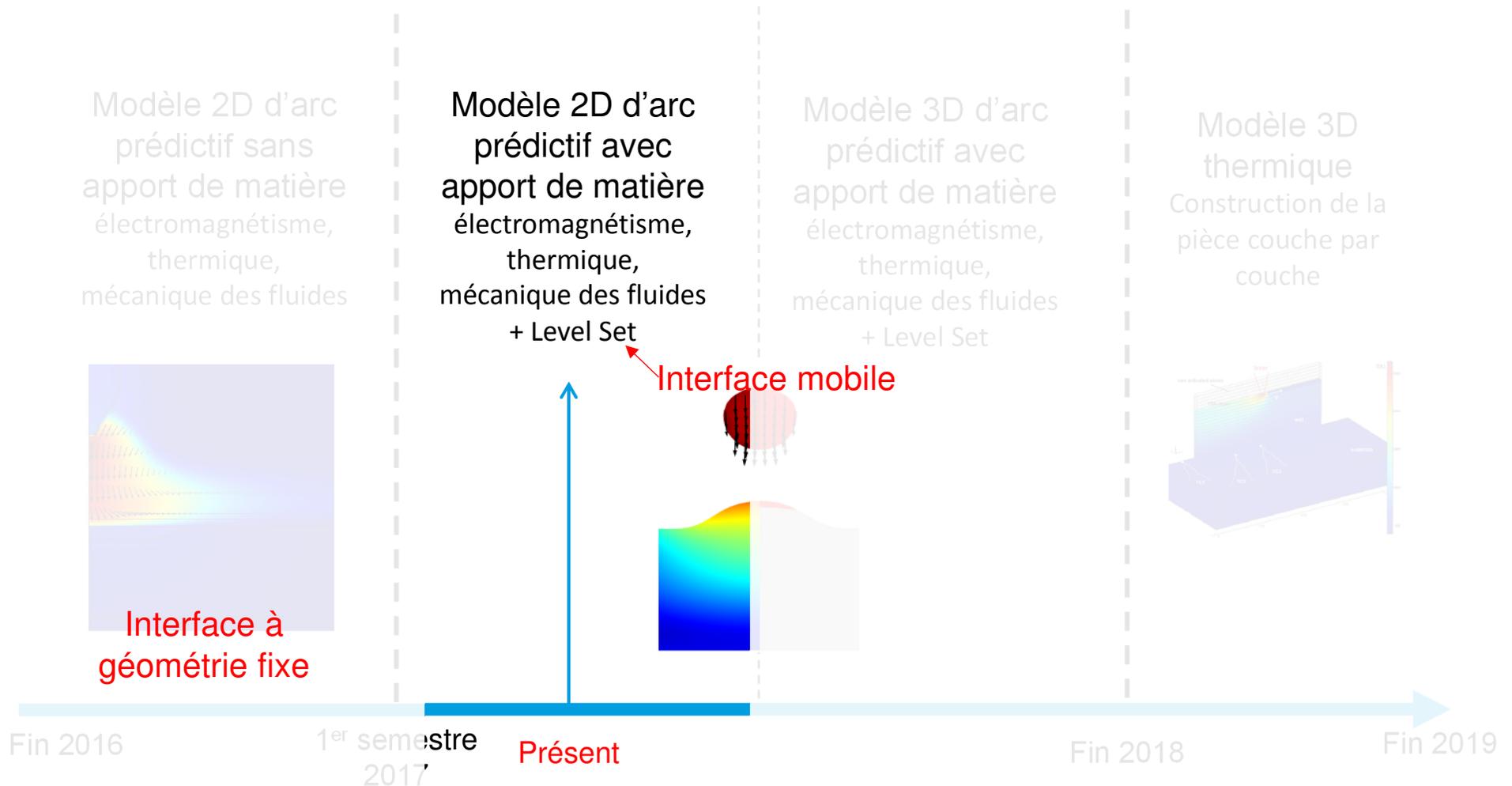
Flux de chaleur le long de la surface de l'anode



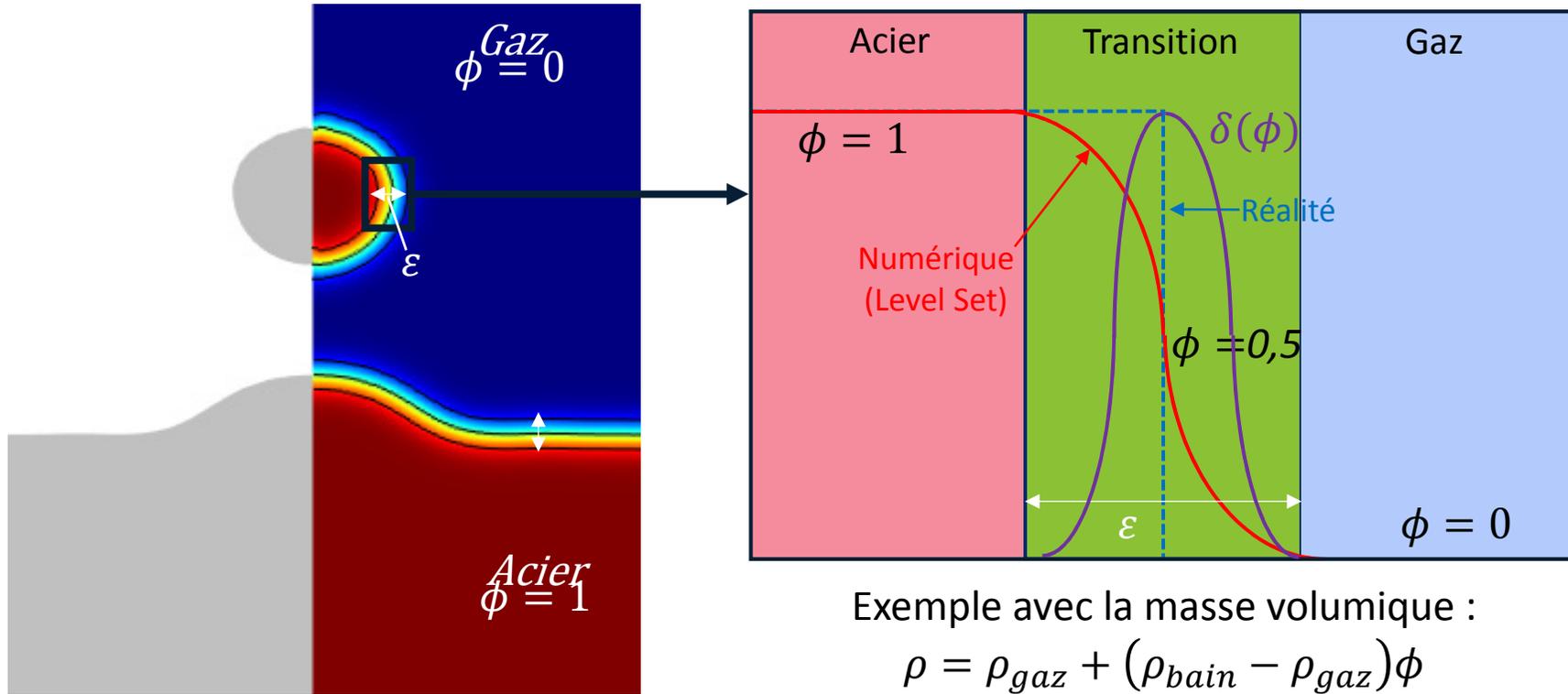
Forme des bains de fusion



Développement de modèles pour la fabrication additive arc-fil



Présentation de la méthode level set



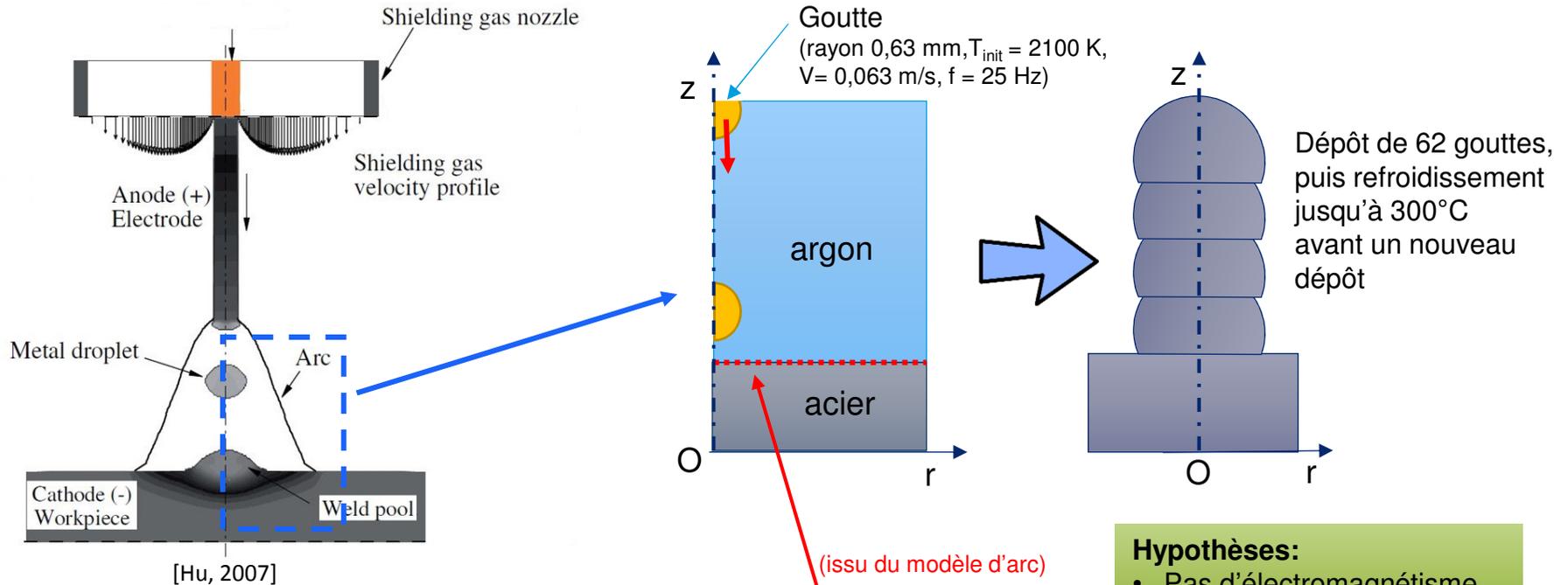
Introduction des conditions interfaciales :

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{\nabla} \vec{u}) \cdot \vec{u} \right) = \vec{\nabla} \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mu_f \left((\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + (\vec{\nabla} \cdot \vec{u})^T \right) - \frac{2}{3} \mu_f (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \mathbf{I} \right] + \vec{F}_v + \vec{F}_{inter} \cdot \delta(\phi)$$

Équation de transport

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(\phi) = \gamma_{ls} \vec{\nabla} \cdot \left(\epsilon \vec{\nabla} \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\vec{\nabla}(\phi)}{|\vec{\nabla}(\phi)|} \right)$$

Simulation de la construction d'un barreau cylindrique



Équations de conservation:

$$\rho c_p^{eq} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} T \right) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + \varphi_{arc}^{surf} \cdot \delta(\phi)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{\nabla} \vec{u}) \cdot \vec{u} \right) = \vec{\nabla} \cdot \left[-pI + \mu_f \left((\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) + (\vec{\nabla} \cdot \vec{u})^T \right) - \frac{2}{3} \mu_f (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) I \right] + \rho \vec{g} + \vec{F}_{darcy} + \vec{F}_{surf} \cdot \delta(\phi)$$

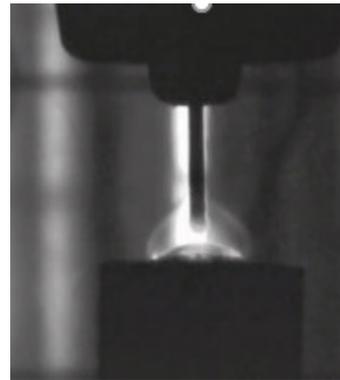
Hypothèses:

- Pas d'électromagnétisme
- Pas de cisaillement
- Pas de flottabilité
- Pas d'effet Marangoni

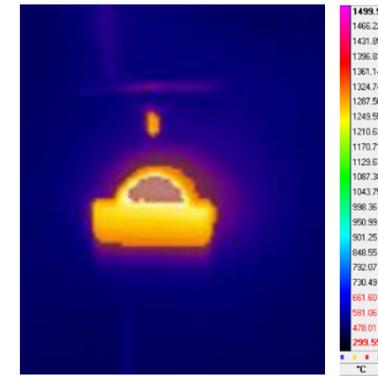
Données expérimentales

- MIG pulsé (Fronius)
- Acier inoxydable 308LSi
- Diamètre 1 mm
- Vitesse de fil: 2 m/min
- Argon pur (14 L/min)
- Distance buse/tôle: 12 mm

Observables in situ



Caméra rapide



Caméra thermique

Observables post-mortem

Fil en acier inoxydable 308LSi



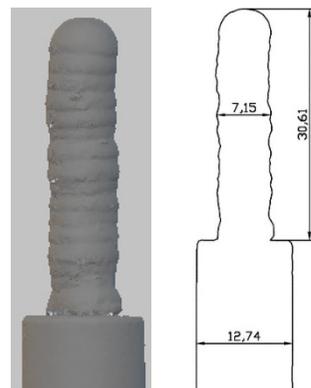
1 passe



2 passes

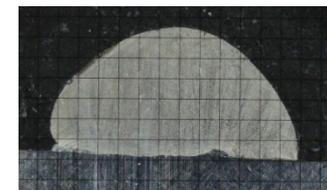


17 passes

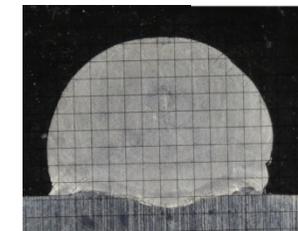


Dimensions en mm

Scan laser



1 passe

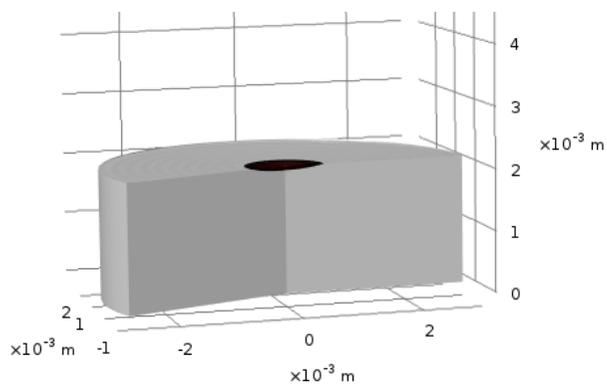


2 passes

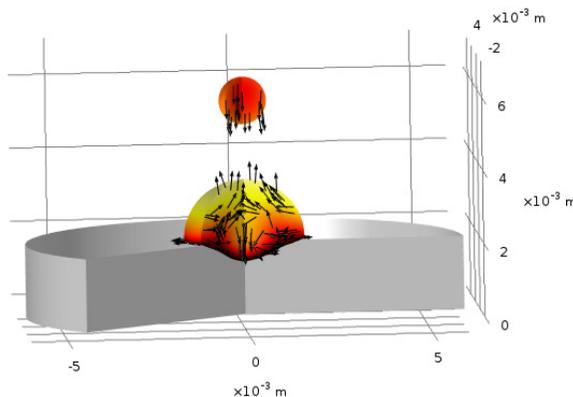
Macrographies

(thèse de Lauriane Guilmois)

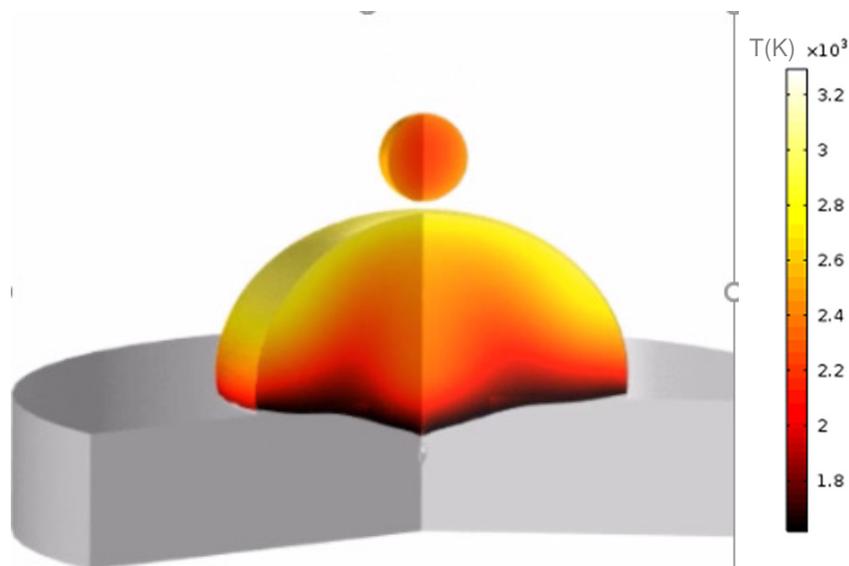
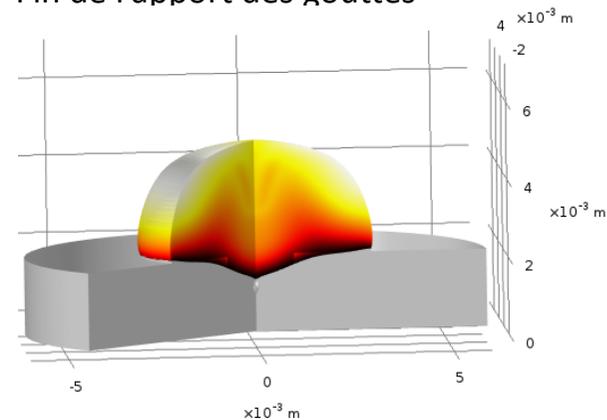
$t = 0 \text{ à } 0,7s$
Mise en fusion du plot



$t = 0,7 \text{ à } 3,2s$
Apport de 62 gouttes à
une fréquence de 25 Hz

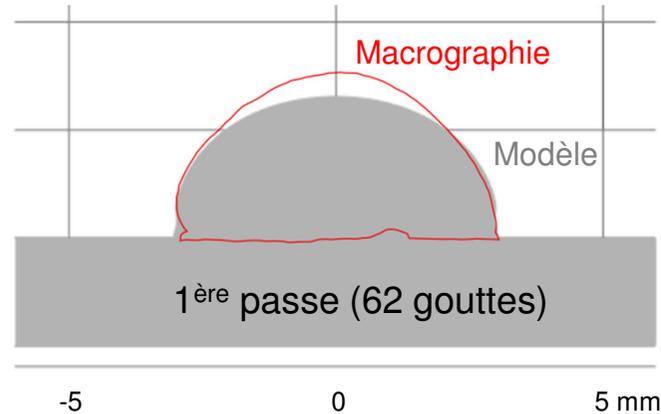


$t = 3,2s$
Fin de l'apport des gouttes



(Goutte: rayon 0,63 mm, $T_{init} = 2100 \text{ K}$, $V = 0,063 \text{ m/s}$, $f = 25 \text{ Hz}$) Taille de maille 50 μm , temps de calcul 24h

Premières comparaisons



=> Bon accord entre les géométries (8% d'erreur)

Comparaisons entre modèle et expérience à poursuivre

- > exploiter les films par caméra rapide et caméra thermique
- > simuler plusieurs passes et comparer aux expériences



Modèle à améliorer

- > hypothèses simplificatrices à discuter
(forces de Lorentz, Marangoni, cisaillement plasma)
- > définition de la source de chaleur à adapter en fonction des paramètres opératoires

Conclusions

Modèle 2D axisymétrique d'arc sans apport de matière :

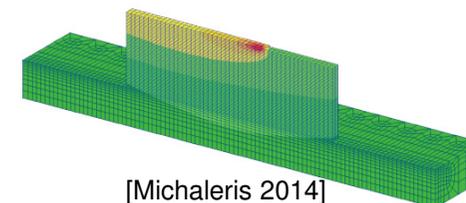
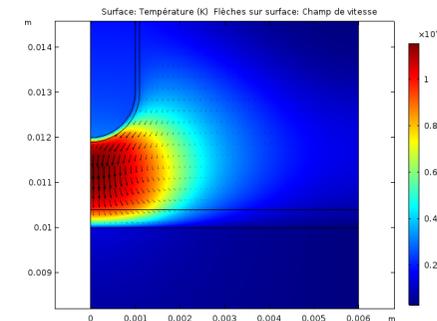
- Mise au point d'un premier modèle prédictif d'arc TIG
 - > Calcul des champs de température, de vitesse, électromagnétique
 - > Calcul de la forme du bain à partir des paramètres opératoires
 - > Modèle confronté à des résultats numériques et expérimentaux

Modèle 2D axisymétrique avec apport de matière :

- Simulation de la construction d'un barreau
 - > Premiers résultats encourageants

Perspectives

- Comparaison expérience/modèle pour le barreau
- Développement du modèle d'arc pour une électrode fusible
- Développement d'un modèle 3D prédictif (complet) et validation
- Développement d'un modèle simplifié 3D thermique





Institut de Recherche Dupuy de Lôme

Merci de votre attention!