

# SIMULATIONS MULTIPHYSIQUES DES PROCÉDÉS DE FABRICATION ADDITIVE MÉTALLIQUE

---

ANF Fab3D métallique – Procédés de dépôts plasma et laser par fil fondu pour l'impression métallique 3D (WAAM et WLAM)

Bourges, 24-25-26 novembre 2025

Stephen Cadiou  
[stephen.cadiou@univ-ubs.fr](mailto:stephen.cadiou@univ-ubs.fr)

# Présentation de l'IRDL

Institut de Recherche Dupuy de Lôme (2016)  
Associé au Centre National de la Recherche Scientifique.

**Domaines de référence** : systèmes mécaniques dans les applications marines, le transport et la défense.

Chiffres  
clés

300

membres dont plus de 110 enseignants-chercheurs, 125 doctorants, 55 ingénieurs, techniciens et administratifs, 10 post-doctorants

170

publications (ACL) per year

30

theses defended per year

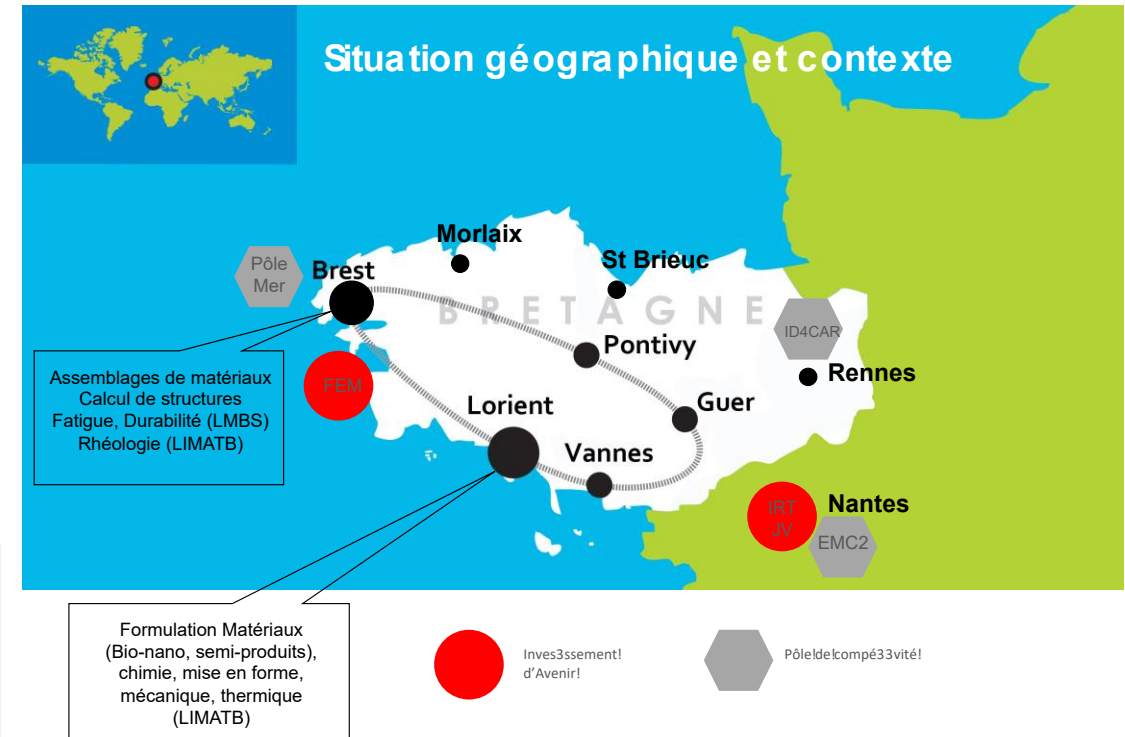


Stanislas-Charles-Henri-Laurent **Dupuy de Lôme**

Ploemeur, 1816 – Paris, 1885

Ingénieur de la marine et militaire breton (des navires en bois aux navires à vapeur, sous-marins)

Homme politique



# Présentation de l'IRDL

Créé en 2016 de la fusion du LBMS (Brest) et du LIMATB (Lorient)

5 Pôles Thématiques de Recherche (PTR)

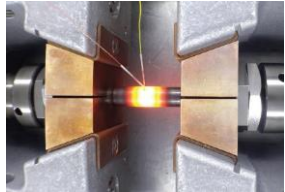
Thèmes issus des activités phares des laboratoires,  
représentées sur les sites de Lorient-Brest avec des contraintes particulières qui sont celles de l'environnement marin



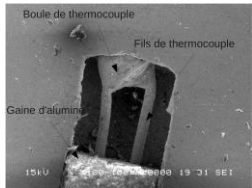
# Présentation de l'équipe **MEHTA** (MEtal Haute Temperature & Assemblages)

- **Responsable** : Muriel Carin
- **Site de Lorient** :
  - 10 enseignants-chercheurs :  
Coline Bourgès, Stephen Cadiou, Muriel Carin, Denis Carron, Elodie Courtois, Mickael Courtois, Edouard Geslain, Philippe Le Masson, Thomas Pierre, Cédric Pouvreau
  - 1 ingénieur d'étude : William Berckmans
  - 10 doctorants, 1 post-doctorant, 2 stagiaires

# Présentation de nos thématiques de recherche



Gleeble



Microthermocouple

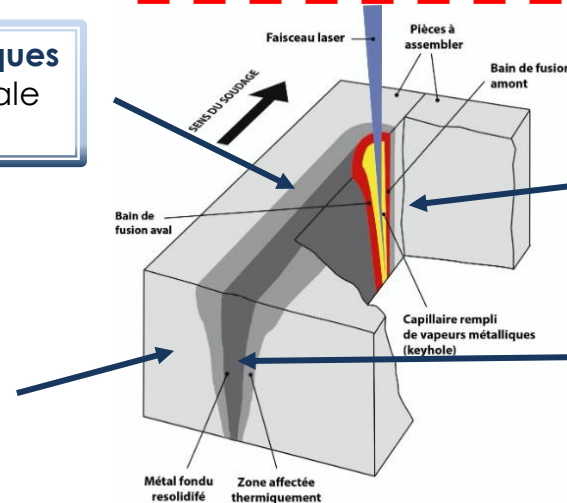
## Conséquences métallurgiques

- Evolution microstructurale
- Précipitations

## Thermomécanique

- Déformations
- Contraintes
- Fissuration

## Source de chaleur (laser, arc, courant électrique)



## Bain liquide / capillaire

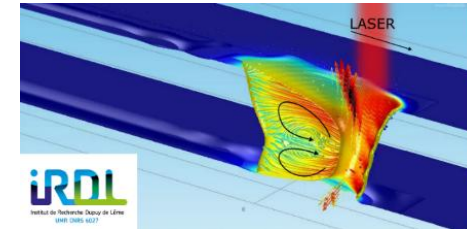
- Hydrodynamique
- Instabilités
- Porosités

## Interfaces

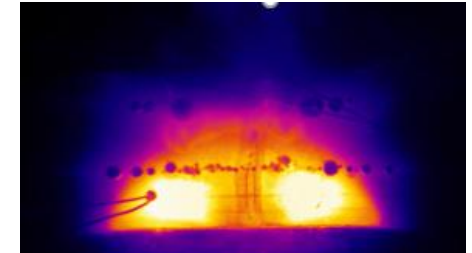
- Composés intermétalliques
- Résistances de contact

## Procédés

Soudage – Fabrication  
additive – Frittage



Soudage laser



Thermographie en soudage par point

## Caractérisation haute température

Thermophysique  
Thermométallurgique  
Thermomécanique  
=> Lois de comportement

## Instrumentation

Thermocouples  
Caméra rapide  
Caméra thermique  
Pyrométrie

## Modélisation multiphysique

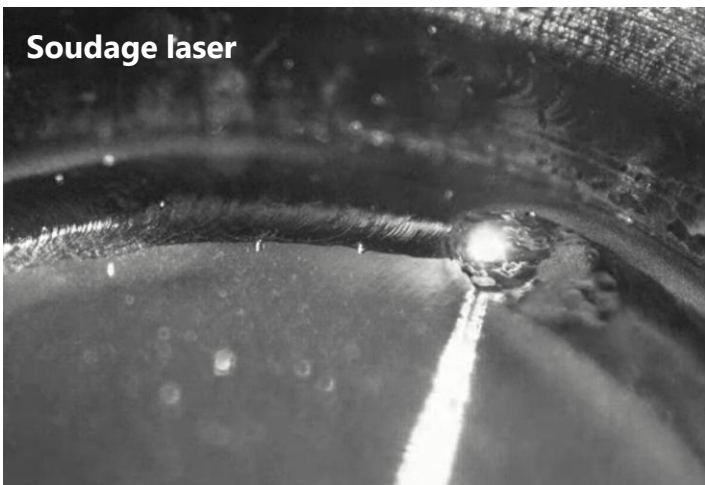
Thermique  
Mécanique des fluides  
Métallurgie  
Mécanique du solide



# Contexte industriel

## Observation par caméra rapide

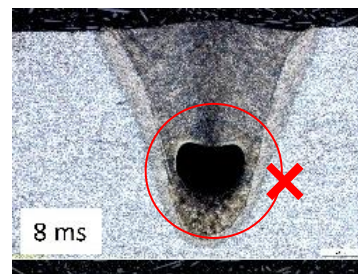
Soudage laser



WAAM

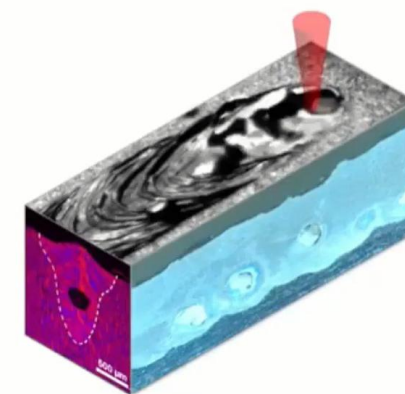


Laser poudre

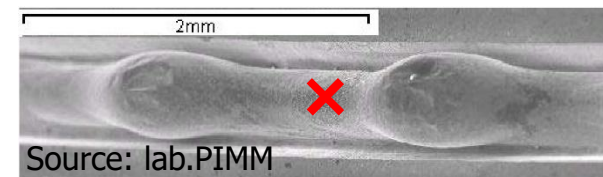


## Observation par rayons X

Defects in laser beam welding



EALA 2023, Christian Hagenlocher (IFSW)

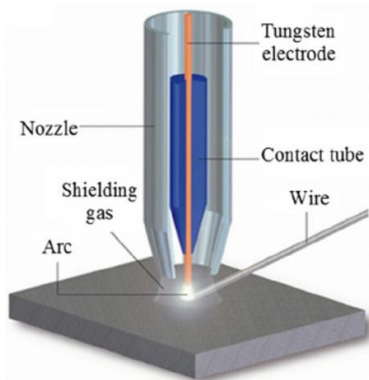


Des physiques complexes – interaction source de chaleur/matière & mécanique des fluides  
=> Nombreux défauts!

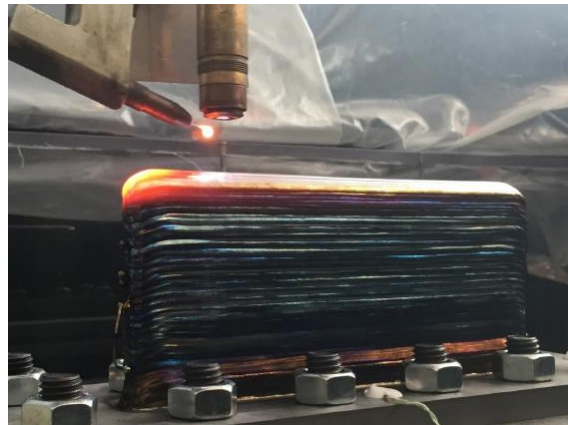
## Contexte

### **Soudage :**

- Procédé pour assembler des pièces
- Plusieurs méthodes de soudage
  - Soudage à l'arc (TIG, MIG/MAG, ...)
  - Soudage par point
  - Soudage laser
  - ...
- Nombreuses séquences de soudage
- Plusieurs position (à plat, au plafond, ...)
- Multi-matériaux



[D. Ding 2015]



### **Fabrication additive :**

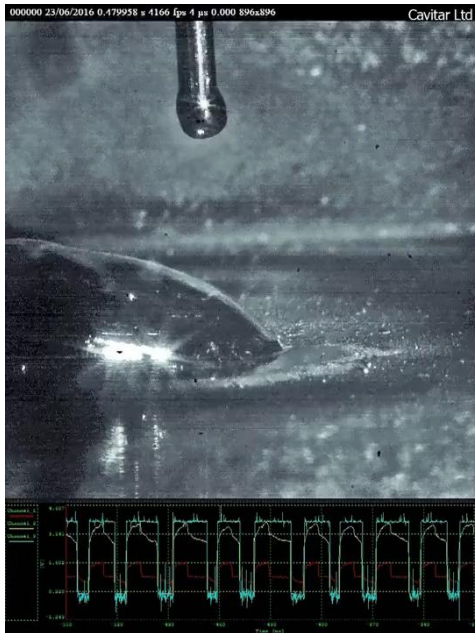
- Conception de pièces complexes couche par couche  
→ Allègement des structures
- Multi-matériaux (métallique, polymère, béton, ...)
- Réduction des coûts :
  - Prototypes
  - Pièces sur mesure



# L'intérêt de la simulation numérique

## Problématiques

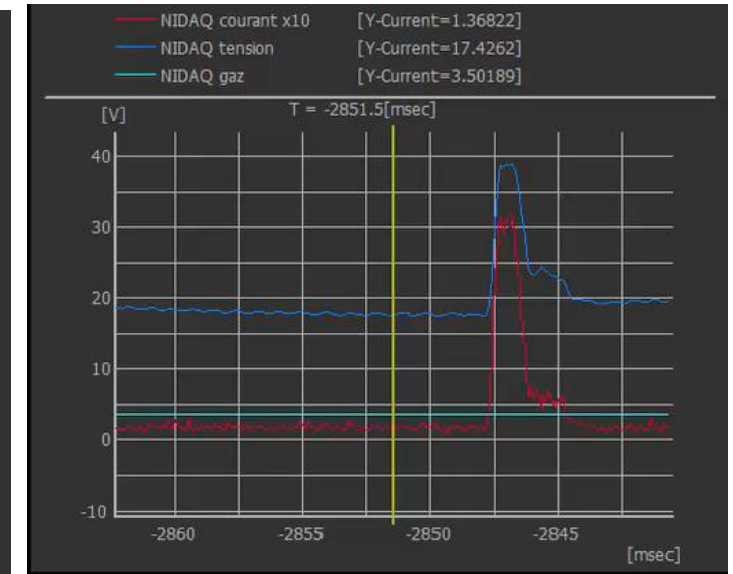
- Choix du mode de transfert (exemple : soudage à l'arc : MIG-CMT, MIG-pulsé, ...)
- Multitude de synergies possible pour fabriquer une pièce
- Couplage complexe entre les paramètres opératoires (vitesse de fil, courant électrique, ...)



MIG-CMT



MIG-pulsé



Difficultés dans la compréhension de l'influence des paramètres opératoires sur :

- L'histoire thermique
- Le comportement du bain de fusion

→ Développer des modèles numériques



# L'intérêt de la simulation numérique

## Intérêts chez les industriels

### Côté R&D : **Compréhension** des phénomènes physiques

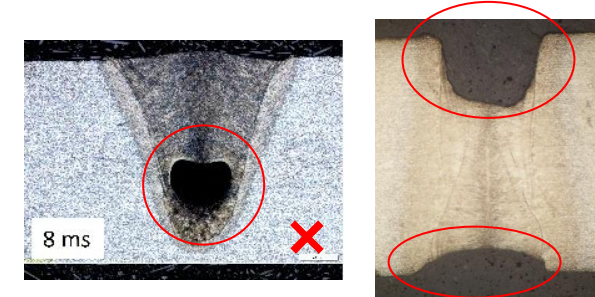
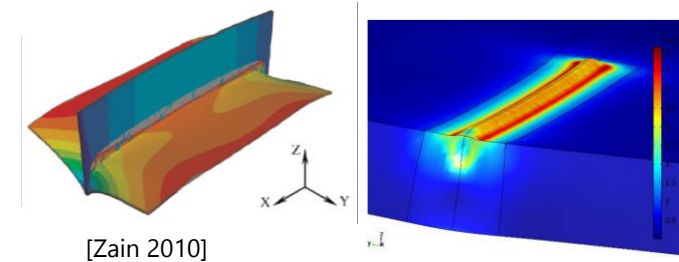
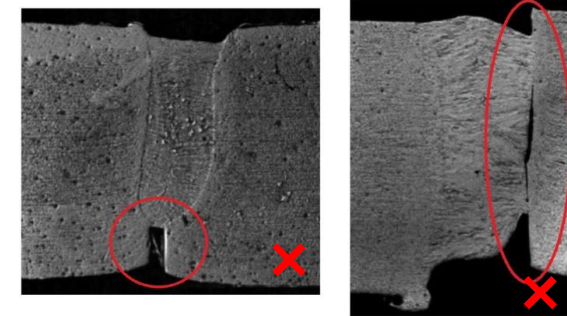
- Meilleure connaissance des phénomènes physiques
- Amélioration des modèles numériques

### Côté usine : **Optimisation/Amélioration** des process

- Diminuer les distorsions des pièces
- Optimiser les séquences de soudage
- Améliorer les procédés (nouvelles synergies, nouveaux procédés, ...)
- Réduire les temps, les coûts

### Côté ingénierie : **Justifier** et **Prédire** la qualité des composants

- Contraintes résiduelles
- Tenue en services des composants



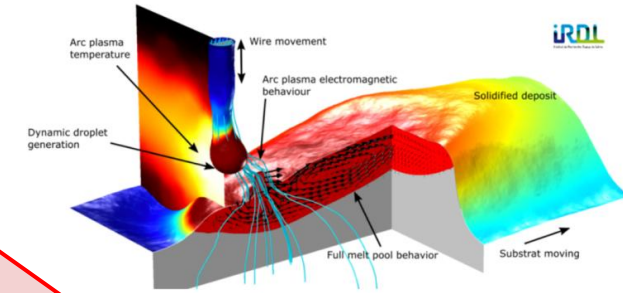
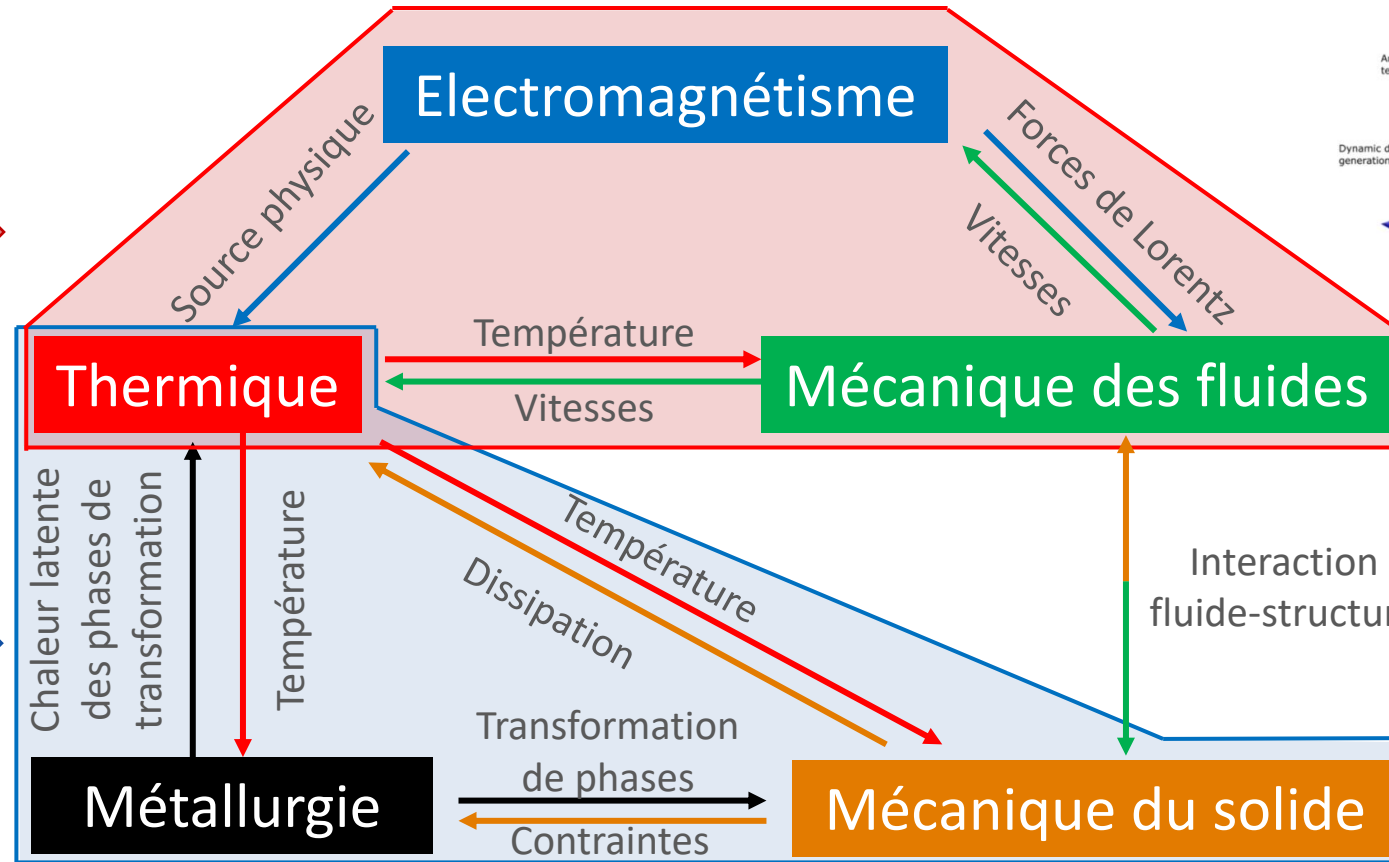
# Les principales physiques

Quel type de simulation ?

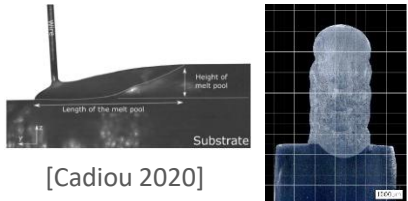
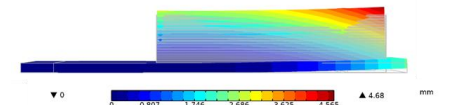
## Modélisation Magnéto-thermo-hydraulique

**Paramètres opératoires :**  
Courant électrique (I, U)  
Vitesse d'avance  
Débit de gaz  
etc

**Données expérimentales :**  
Géométrie  
Macrographie  
Thermocouples  
etc



## Modélisation Thermo-Mécanique et Métallurgie



[Cadiou 2020]

## Présentation

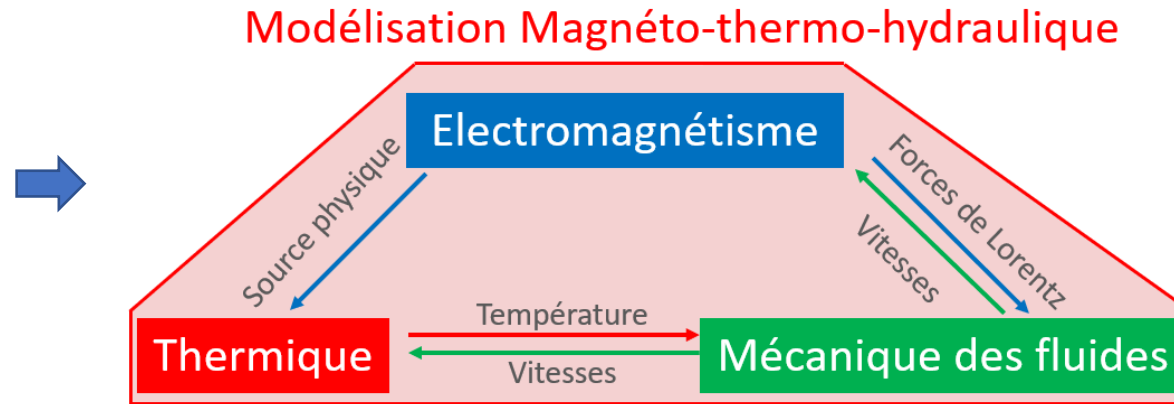
### Données requises

#### Paramètres opératoires :

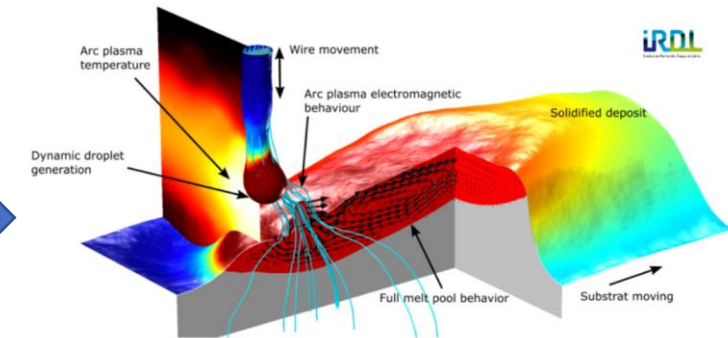
- Courant électrique ( $I$ ,  $U$ )
- Vitesse d'avance
- Débit de gaz
- etc

#### Données matériaux :

- Conductivité thermique
- Capacité thermique massique
- Masse volumique
- Viscosité dynamique
- Tension de surface
- Conductivité électrique
- etc



### Résultats

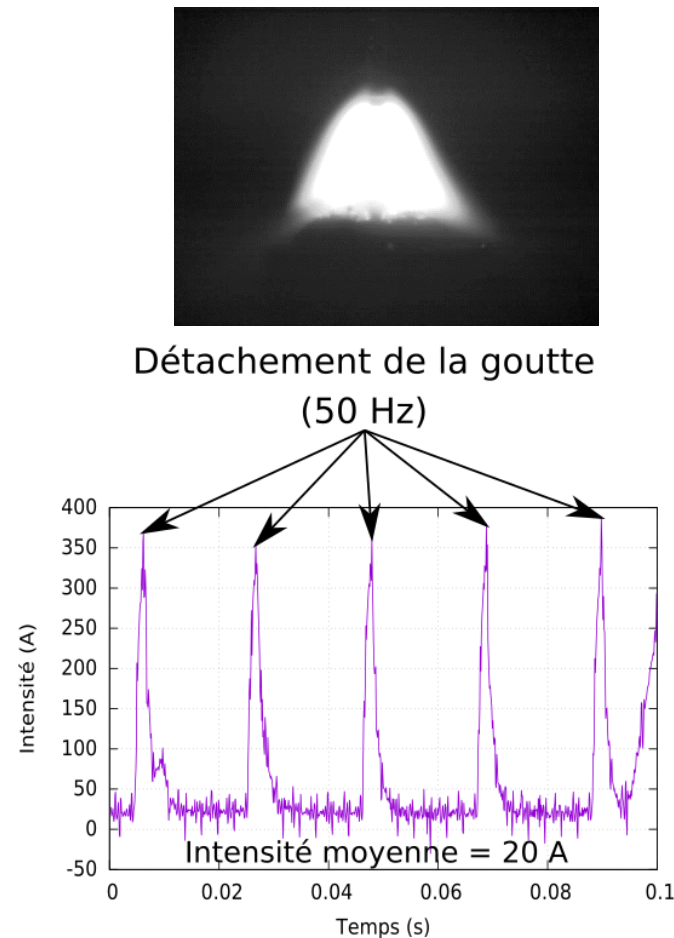
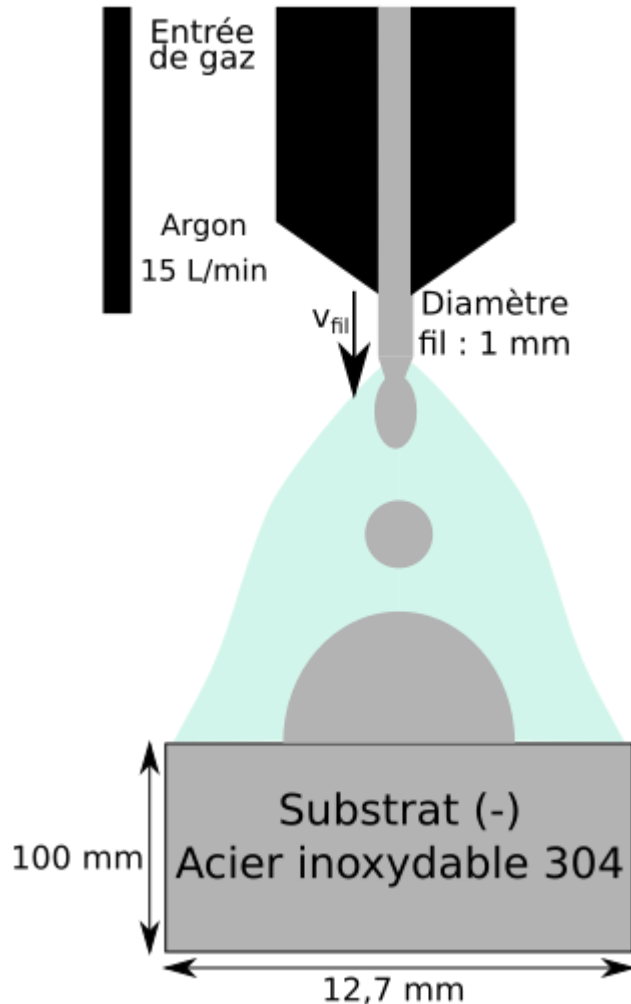


- Champs de température et de vitesses
- Géométrie du dépôt
- etc

→ Analyse de l'influence des paramètres opératoires sur les différents observables  
→ Meilleure compréhension des phénomènes impliqués  
→ Interactions arc/fil/bain

## Application au procédé WAAM-MIG pulsé

**Objectif : Simulation de la fabrication de barreaux verticaux en 2D axisymétrique**

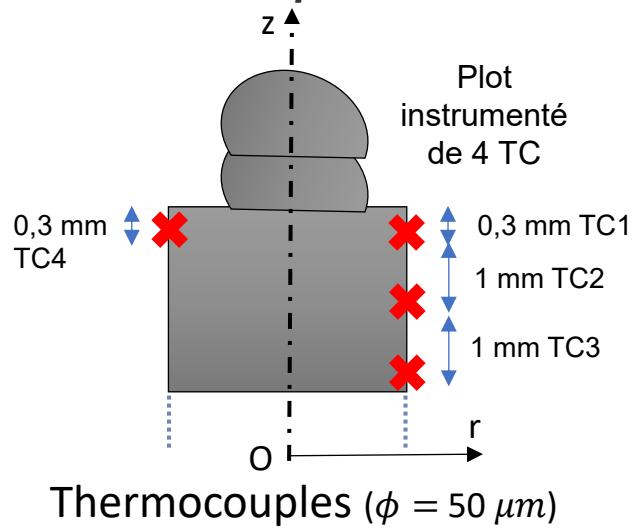


Durée d'apport de matière pour un dépôt :  
2,4 s  $\rightarrow$  60 gouttes  
Refroidissement entre chaque passe

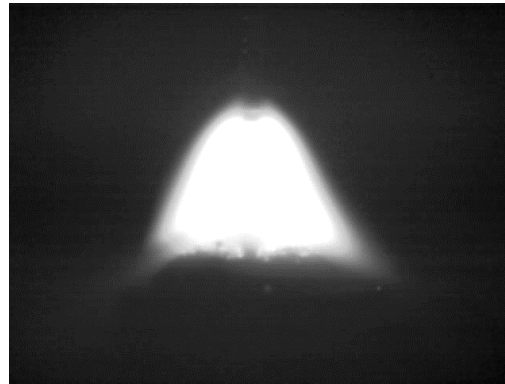


## Application au procédé WAAM-MIG pulsé

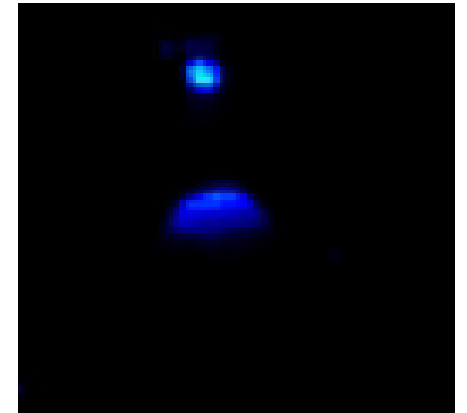
### **Données expérimentales**



### Observables in situ

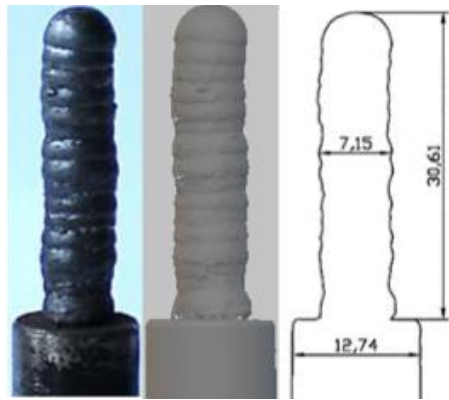


Caméra rapide

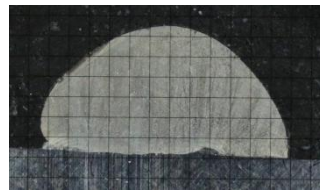


Caméra thermique

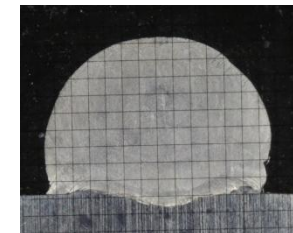
### Observables post-mortem



Dimensions en mm  
Scan laser



1 passe

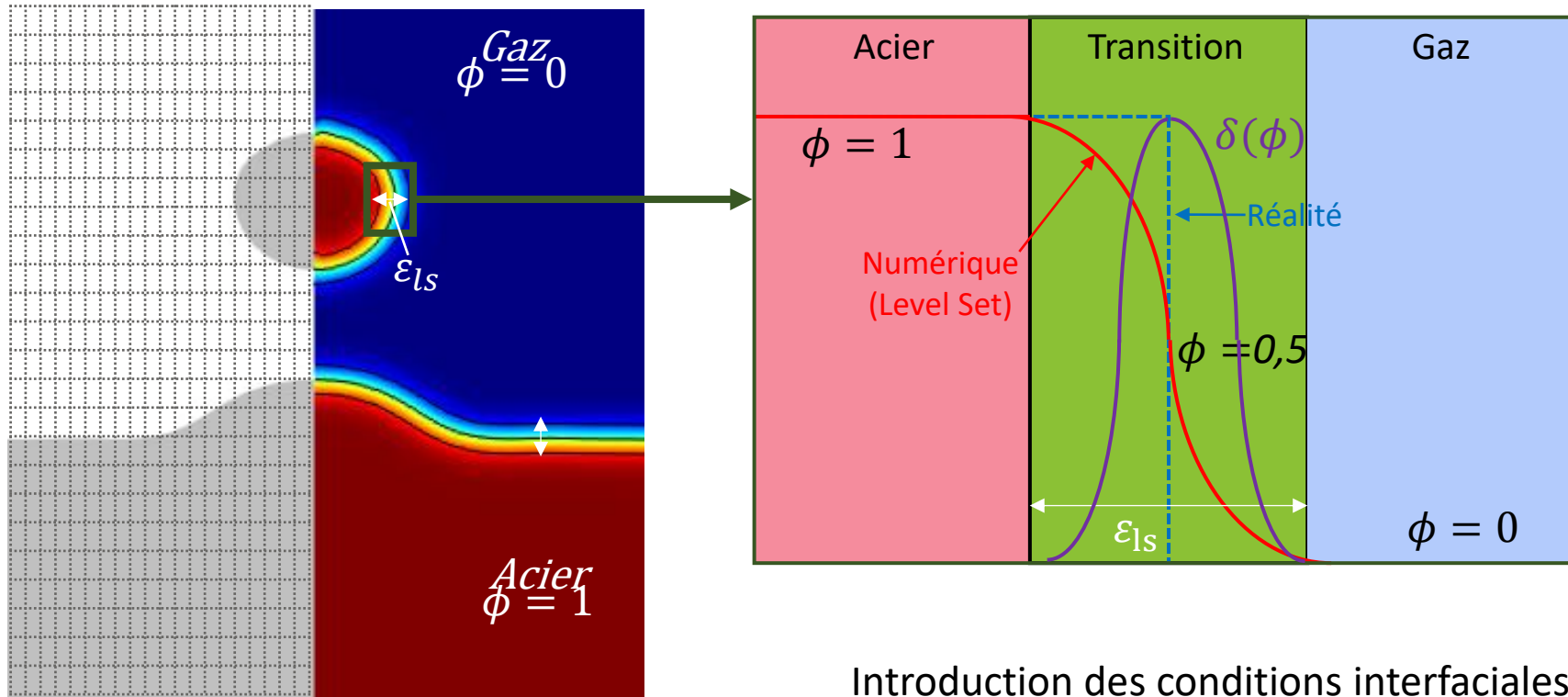


2 passes

Macrographies

# Modèle 2D axisymétrique WAAM-MIG pulsé

## Présentation de la méthode level set (maillage fixe)



Exemple avec la masse volumique :  

$$\rho = \rho_{gaz} + (\rho_{acier} - \rho_{gaz})\phi$$

Introduction des conditions interfaciales :

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \overline{\text{grad}}(\vec{v}) \cdot \vec{v} \right) = \overline{\text{div}} \left[ -P\vec{I} + \mu \left( \overline{\text{grad}}(\vec{v}) + {}^t \overline{\text{grad}}(\vec{v}) \right) - \frac{2}{3} \text{div}(\vec{v})\vec{I} \right] + \vec{F}_v + \vec{F}_{inter} \cdot \delta(\phi)$$

Équation de transport

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overline{\text{grad}}(\phi) = \gamma_{ls} \text{div} \left( \epsilon_{ls} \overline{\text{grad}}(\phi) - \phi(1 - \phi) \frac{\overline{\text{grad}}(\phi)}{|\overline{\text{grad}}(\phi)|} \right)$$

# Modèle 2D axisymétrique WAAM-MIG pulsé

## Description mathématique

### Equations résolues dans les domaines

#### Equations électromagnétiques :

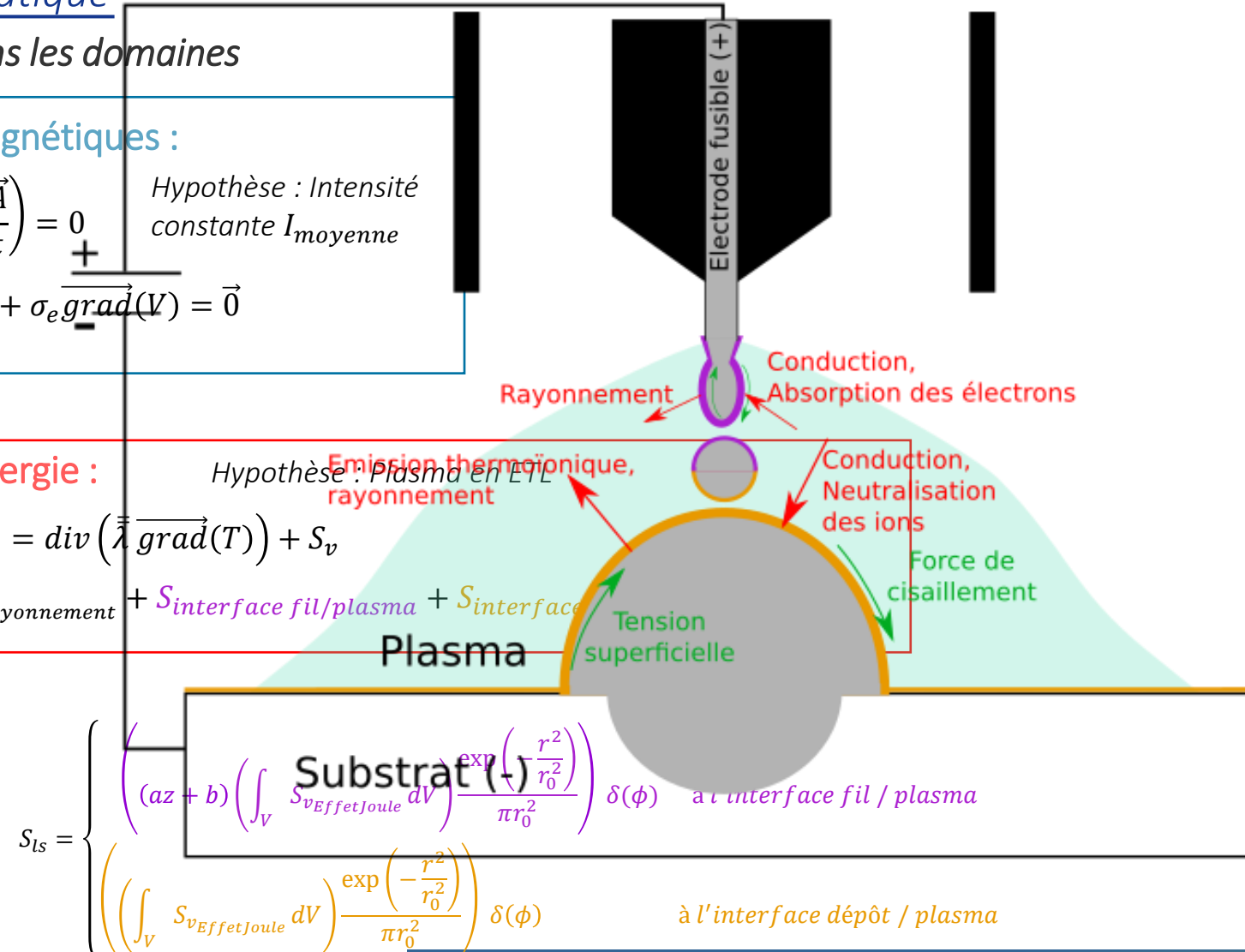
$$\begin{aligned} \text{div} \left( \sigma_e \overrightarrow{\text{grad}}(V) + \sigma_e \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) &= 0 \\ \sigma_e \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \overrightarrow{\text{rot}} \left( \overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) \right) + \sigma_e \overrightarrow{\text{grad}}(V) &= \vec{0} \end{aligned}$$

Hypothèse : Intensité constante  $I_{\text{moyenne}}$

#### Conservation de l'énergie :

$$\begin{aligned} \rho C_p^{eq} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) &= \text{div} \left( \vec{\lambda} \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) + S_v \\ S_v &= S_{v_{\text{EffetJoule}}} + S_{v_{\text{Rayonnement}}} + S_{\text{interface fil/plasma}} + S_{\text{interface}} \end{aligned}$$

Hypothèse : Plasma en EIL



# Modèle 2D axisymétrique WAAM-MIG pulsé

## Description mathématique

### Equations résolues dans les domaines

#### Conservation de la masse :

$$\text{div}(\vec{v}) = 0$$

Hypothèses : Fluides newtoniens, incompressibles  
Ecoulements laminaires

#### Conservation de la quantité de mouvement :

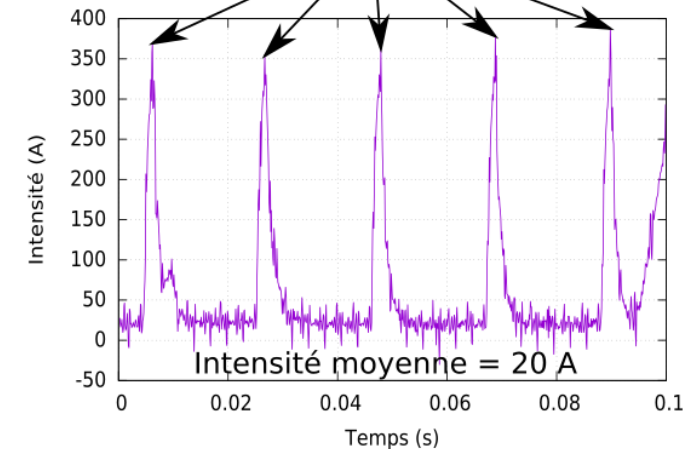
$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \overline{\text{grad}}(\vec{v}) \cdot \vec{v} \right) = \overline{\text{div}} \left[ -P\vec{i} + \mu_f \left( \overline{\text{grad}}(\vec{v}) + {}^t \overline{\text{grad}}(\vec{v}) - \frac{2}{3} \text{div}(\vec{v})\vec{i} \right) \right] + \vec{F}_v$$

$$\vec{F}_v = \vec{F}_{v_{\text{Lorentz}}} + \vec{F}_{v_{\text{Darcy}}} + \vec{F}_{\text{tension surface}} + \vec{F}_{\text{gravité}} + \vec{F}_{\text{cis LS}}$$

$$\vec{F}_{v_{\text{Lorentz}}} = \vec{j} \times \vec{B} \left( 1 + \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{moyenne}}} \text{freq}_{\text{current}} \right)$$

$$\vec{F}_{\text{cis LS}} = F_{\text{cis}} \delta(\phi) \vec{z}$$

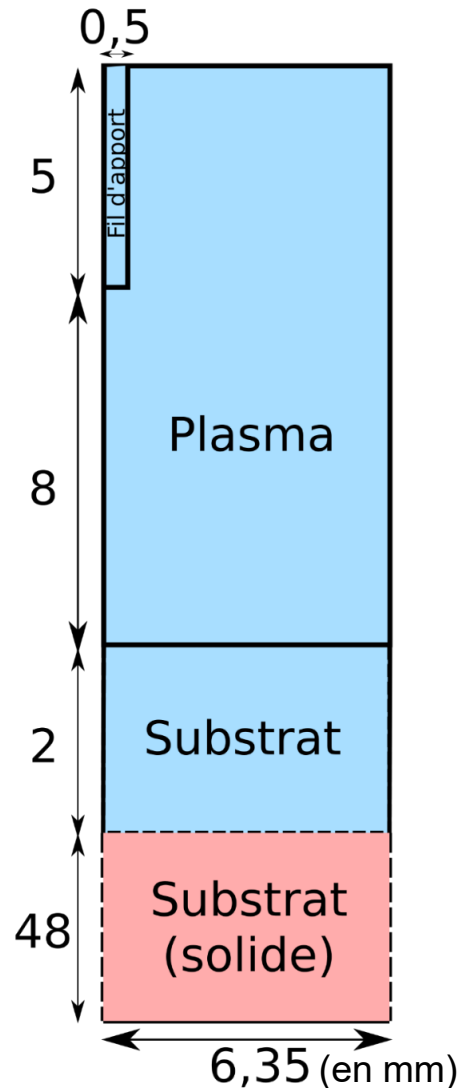
Détachement de la goutte  
(50 Hz)





# Modèle 2D axisymétrique WAAM-MIG pulsé

## Présentation du modèle



### Paramètres opératoires :

	Jeu 1	Jeu 2
Vitesse de fil	2,45 m.min <sup>-1</sup>	3,45 m.min <sup>-1</sup>
Débit argon	14 L.min <sup>-1</sup>	14 L.min <sup>-1</sup>
Fréquence de détachement	25 Hz	50 Hz

Electromagnétisme  
Thermique  
Mécanique des fluides  
Level set

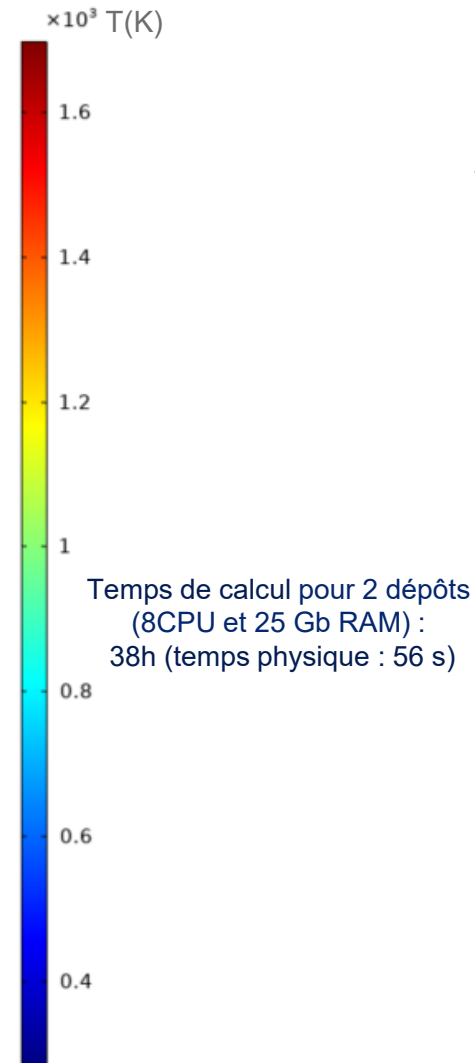
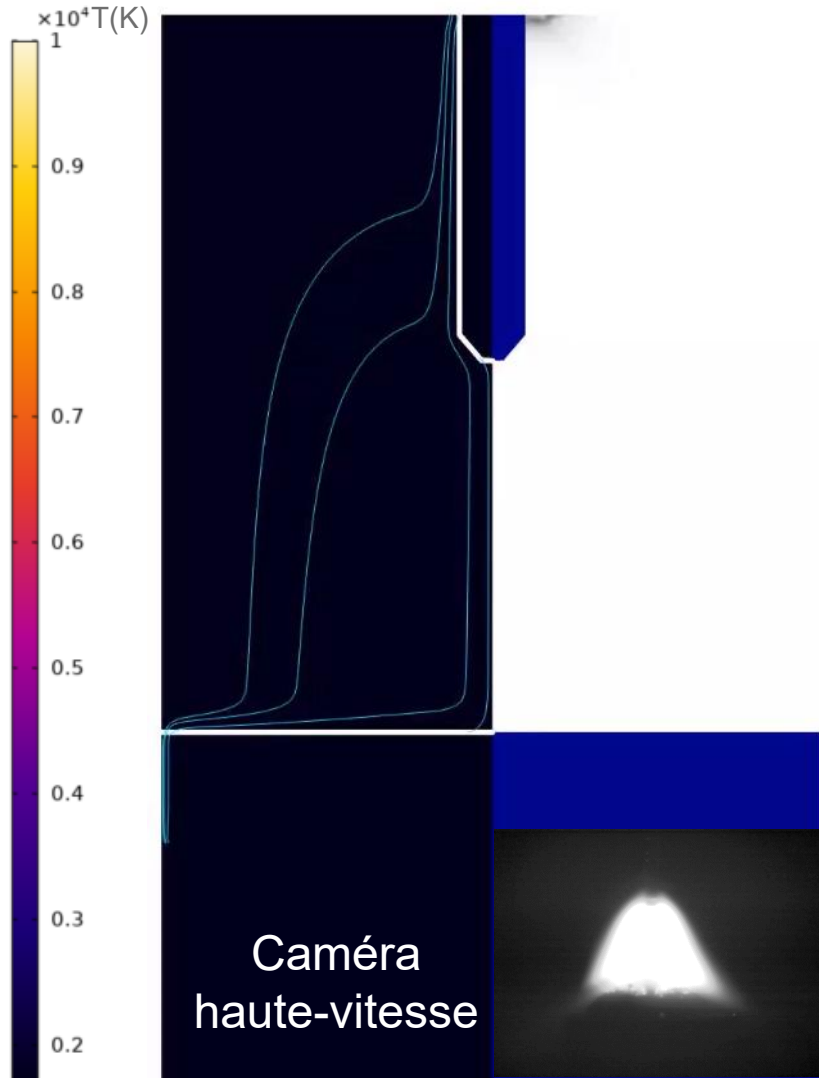
Tailles des éléments :  
100-150  $\mu\text{m}$

Thermique

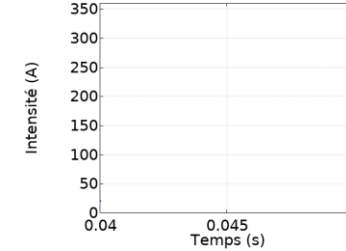
Tailles des éléments :  
450  $\mu\text{m}$  à 4 mm

# Modèle 2D axisymétrique WAAM-MIG pulsé

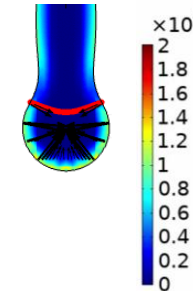
## Présentation des résultats



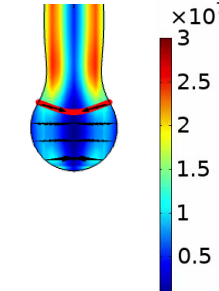
## Détachement de la goutte



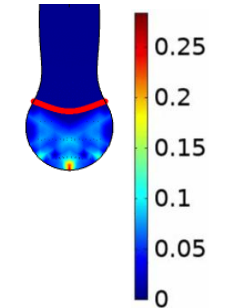
Tension de surface  
(N.m<sup>-3</sup>)



Force de Lorentz  
(N/m<sup>-3</sup>)

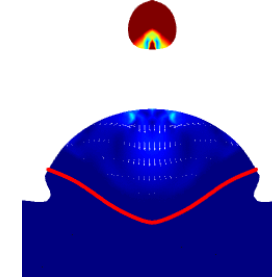


Vitesse (m.s<sup>-1</sup>)

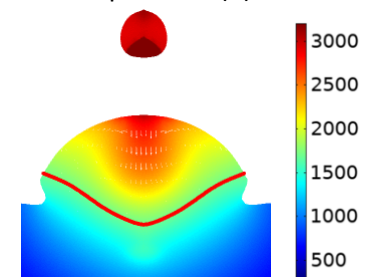


## Bain de fusion

Vitesse (m.s<sup>-1</sup>)



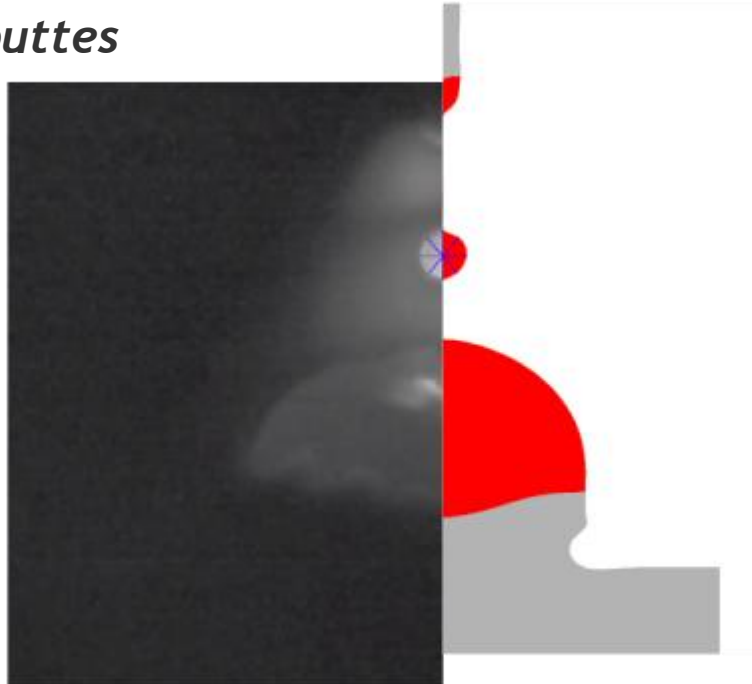
Température (K)



# Modèle 2D axisymétrique WAAM-MIG pulsé

## Validation du modèle

### Tailles des gouttes



Caméra haute vitesse

Modèle

Diamètre théorique :

$$D_{goutte} = \left( 6r_{fil}^2 \frac{\rho_{fil}}{\rho_{goutte}} \frac{v_{fil}}{freq_{détachement}} \right)$$

**Jeu 1 :  $v_{fil} = 2,45 \text{ m.min}^{-1}$ ,  $freq_{détachement} = 25 \text{ Hz}$**

	$D_{goutte}$	Ecart
Modèle	1,26 mm	-
Expériences	$1,26 \pm 0,03 \text{ mm}$	0,3 %
Théorie	1,35 mm	6,7 %

**Jeu 2 :  $v_{fil} = 3,45 \text{ m.min}^{-1}$ ,  $freq_{détachement} = 50 \text{ Hz}$**

	$D_{goutte}$	Ecart
Modèle	1,08 mm	-
Expériences	$1,11 \pm 0,03 \text{ mm}$	2,7 %
Théorie	1,20 mm	10 %

## Bilan

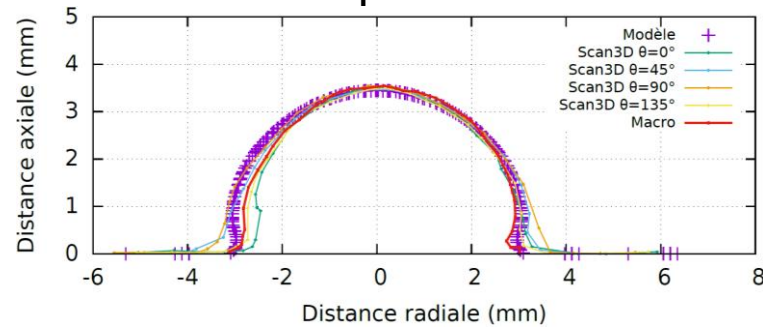
- Bonne prédiction des tailles de goutte pour les deux jeux de paramètres opératoires

# Modèle 2D axisymétrique WAAM-MIG pulsé

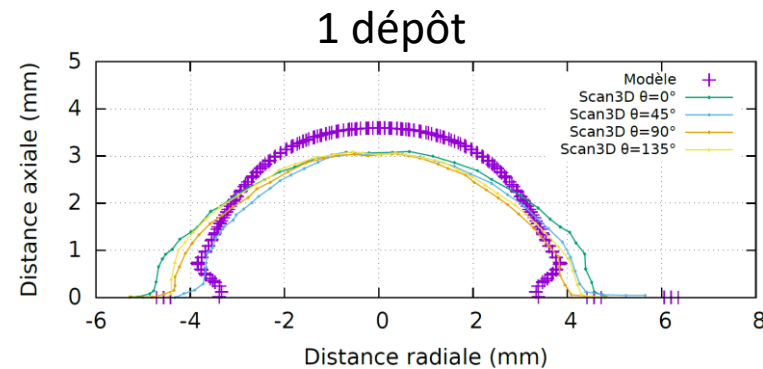
## Validation du modèle

### Macrographies

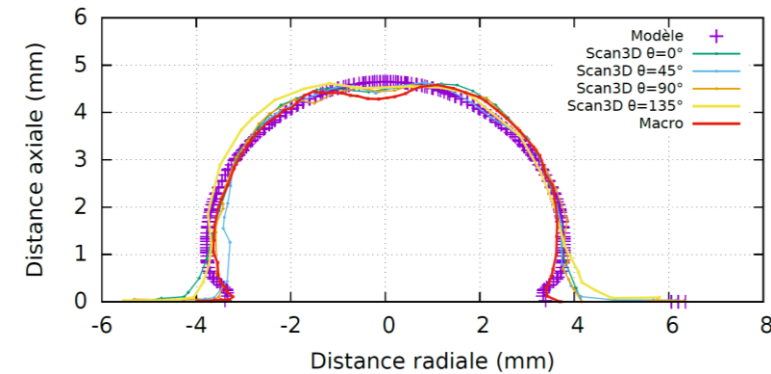
**Jeu 1 :  $V_{fil} = 2,45 \text{ m.min}^{-1}$ ,  $freq_{détachement} = 25 \text{ Hz}$**   
1 dépôt



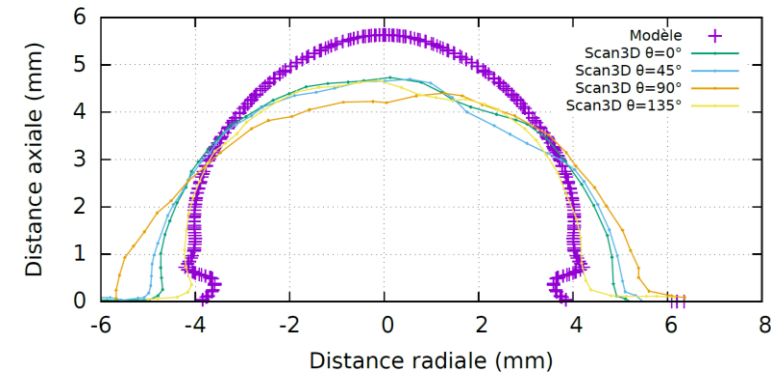
**Jeu 2 :  $V_{fil} = 3,45 \text{ m.min}^{-1}$ ,  $freq_{détachement} = 50 \text{ Hz}$**   
1 dépôt



2 dépôts



2 dépôts



### Bilan

- Jeu 1 : bonne prédiction des géométries des dépôts
- Jeu 2 : non axisymétrie → 30 % d'écart pour la largeur

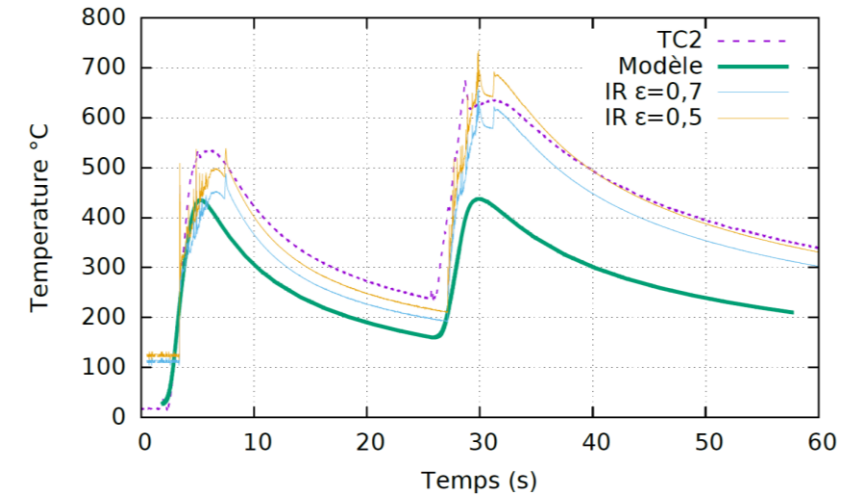
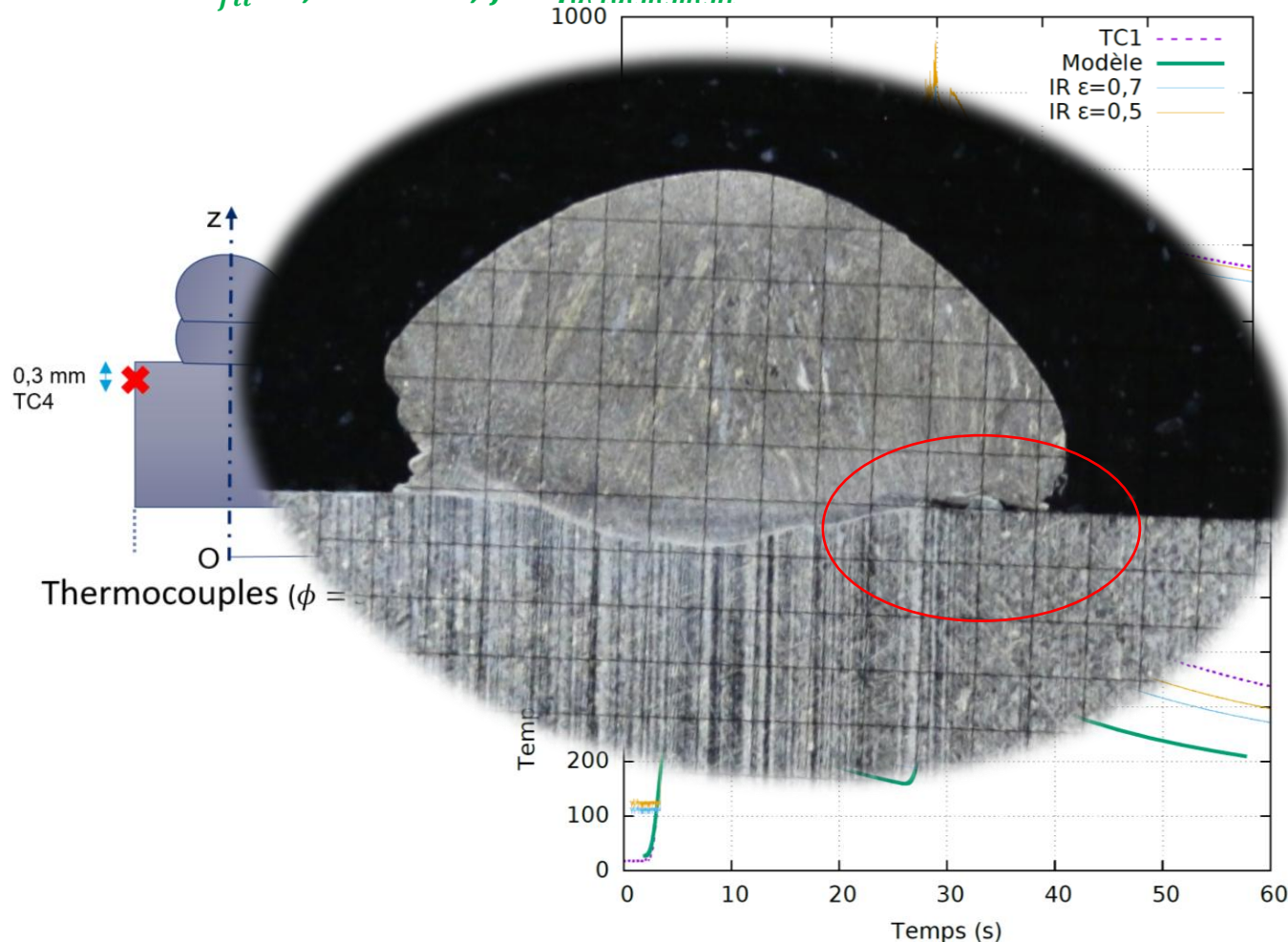


# Modèle 2D axisymétrique WAAM-MIG pulsé

## Validation du modèle

### Mesures de température lors de la réalisation de 2 dépôts

**Jeu 1 :**  $V_{fil} = 2,45 \text{ m.min}^{-1}$ ,  $freq_{détachement} = 25 \text{ Hz}$



### Bilan :

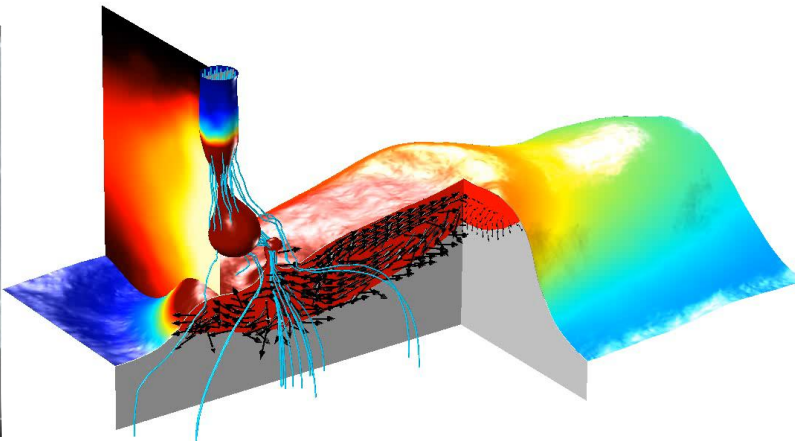
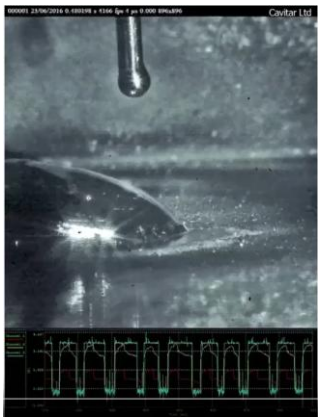
Le modèle sous-estime les températures à la surface du substrat.

- La méthode level set stoppe les écoulements et l'apport de chaleur à l'interface
- Présence de résistances de contact

# Simulation du procédé WAAM

## Simulation 3D du procédé WAAM – CMT

Détachement des gouttes sous l'effet du mouvement mécanique du fil



Analyse des interactions arc/fil/bain

### Perspectives

- Etude de l'influence des différents paramètres: gaz, fil, intensité, polarité, ...
- Etude des différents régimes de transfert (spray, globulaire, ....)
- Recherche des paramètres optimaux (limiter les essais expérimentaux coûteux)

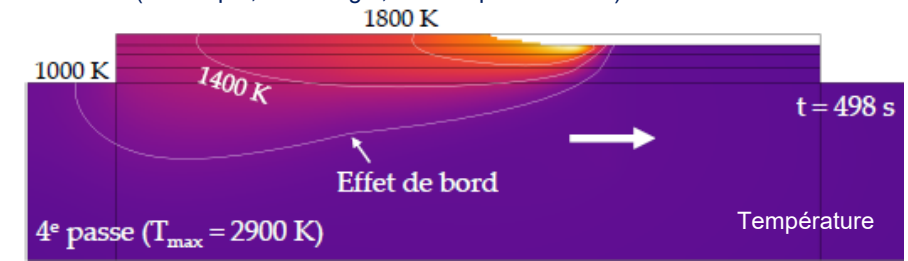
Modèle 3D totalement couplé décrivant le fil, l'arc, la goutte et le bain

### Modèle à l'échelle macroscopique

- Prédiction des champs de température,
- phases métallurgiques, déformations, contraintes

**Modèle 3D**  
(thermique, métallurgie, mécanique du solide)

Transfert du champ de température



Thèse C Le Falher (2023)

Modèle numérique dégradé (flash heating)

→ Réduction des temps de calcul

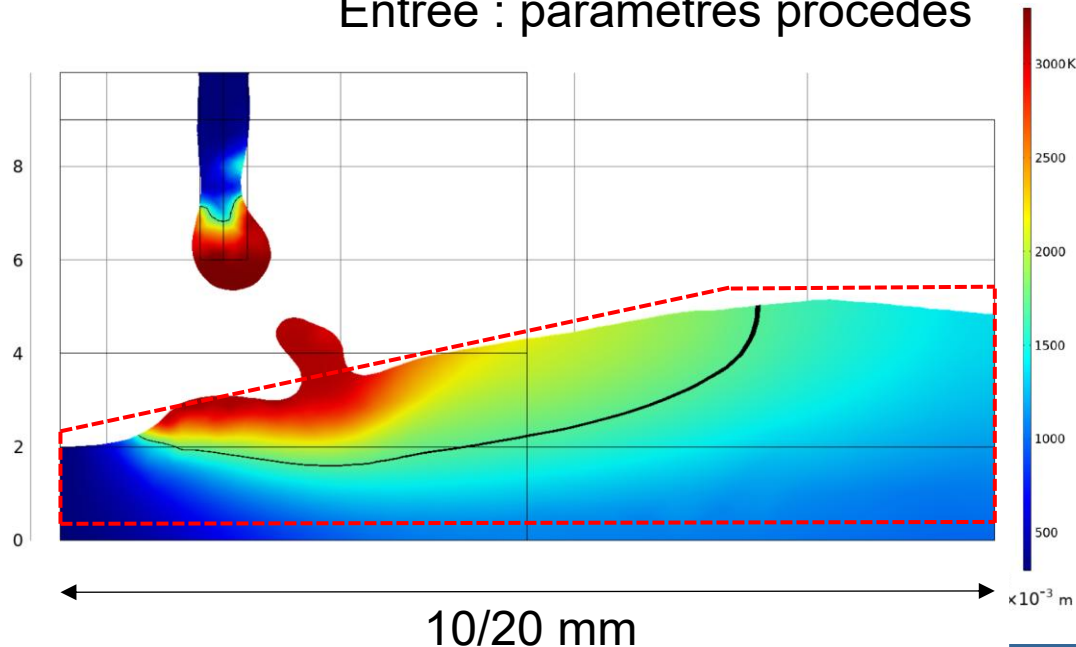
Thèse L. Silva (en cours)



Étude de la tenue en fatigue, de pièces fabriquées avec des stratégies de dépôts différentes

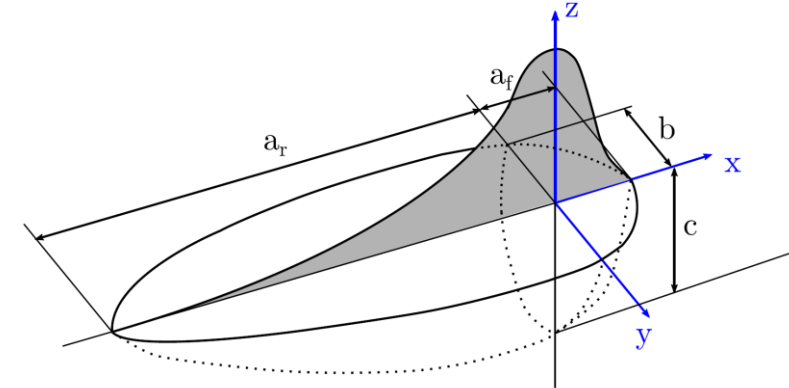
## Modélisation de la thermique

- **Méthodologie « classique » : source de chaleur équivalente**
  - Prédiction contraintes/déformations : source équivalente (Goldak)
    - Définir un jeu de paramètres procédés
    - Essais expérimentaux instrumentés (TC, caméras HV) + macrographies
    - Identification paramètres source
- **Nouvelle méthodologie**
  - ~~Source équivalente~~ : modélisation multi-échelle « physique »  
Entrée : paramètres procédés

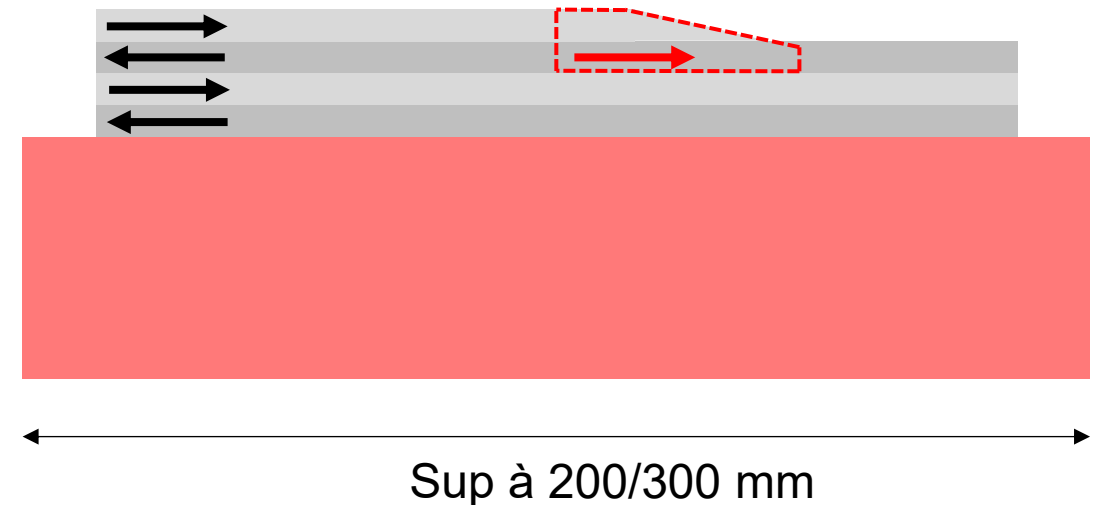


$$Q_i(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Qf_i}{\pi\sqrt{\pi}a_i b c} \exp \left[ -3 \left( \frac{x^2}{a_i^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} \right) \right]$$

avec  $i = f$  en avant de la source ( $x > 0$ )  
et  $i = r$  en arrière de la source ( $x < 0$ )



*T<sub>local</sub> imposé aux noeuds*





## Modélisation thermique

- Résolution de l'équation de conservation de l'énergie (équation de la chaleur) :

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) = \text{div} \left( \bar{\lambda} \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) + S_v$$

→  $\vec{v} = \vec{0}$  car pas simulation des écoulements du bain (solide seulement)

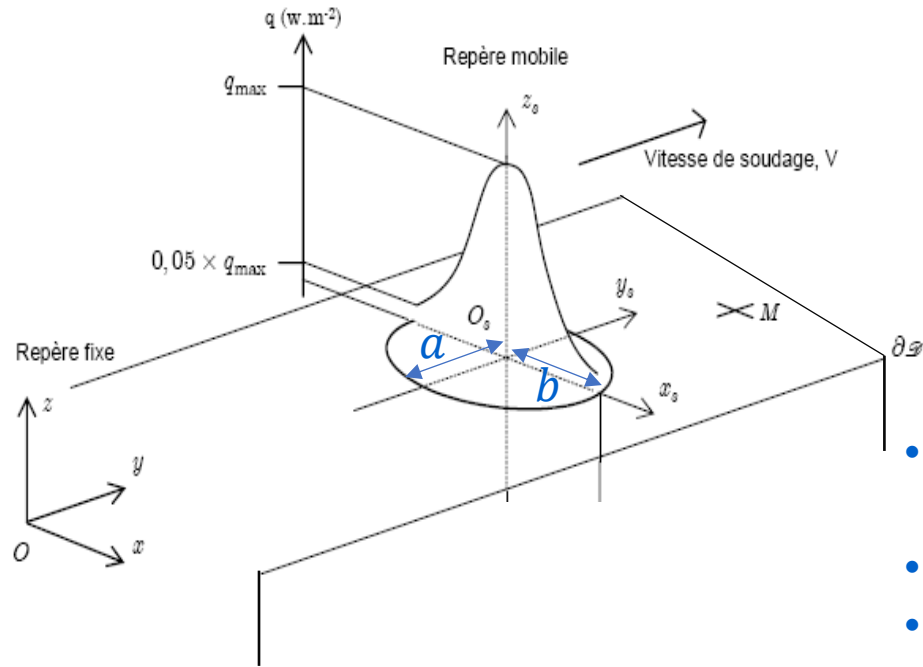
- Avec  $\rho$  la masse volumique,  $C_p$  la capacité thermique massique,  $\lambda$  la conductivité thermique,  $S_v$  la source de chaleur **volumique**,  $T$  la température et  $t$  le temps
- Prise en compte de l'apport de chaleur :
  - Approche « source équivalente »
  - Température solidus imposée dans un volume correspondant à la zone fondue
- Prise en compte des échanges thermique → Conditions aux limites aux interfaces air/pièce
  - Pertes par convection naturelle ou forcée
  - Pertes par rayonnement

→ Décrire les champs de températures dans la pièce (histoire thermique)



## Sources de chaleur équivalente

**Source surfacique : généralement utilisé avec les modèles thermo-hydrodynamique ou pour les procédés sans apport de matière et pièce à faible épaisseur**



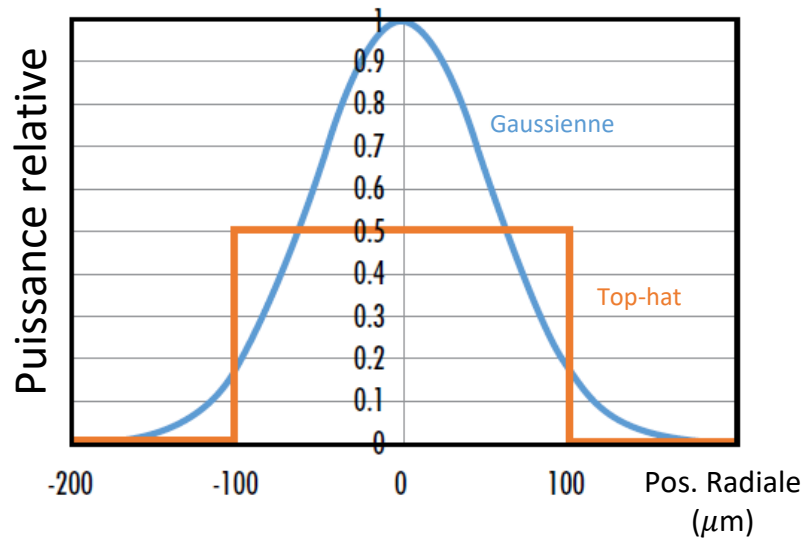
$$Q(x_s, y_s) = \frac{\eta UI}{\pi ab} \exp \left[ - \left( \frac{x_s^2}{b^2} + \frac{y_s^2}{a^2} \right) \right]$$

- $\eta, U, I$  sont respectivement le coefficient de rendement du procédé, la tension et l'intensité de soudage,
- $a, b$  sont les demi-axes des ellipsoïdes,
- $x_s, y_s$  les coordonnées du point  $M$  dans le repère de la source ( $O_s, x_s, y_s, z_s$ )

## Sources de chaleur équivalente

**Source surfacique « Top Hat » : couramment utilisé en soudage laser**

Profils de gaussienne et de top-hat

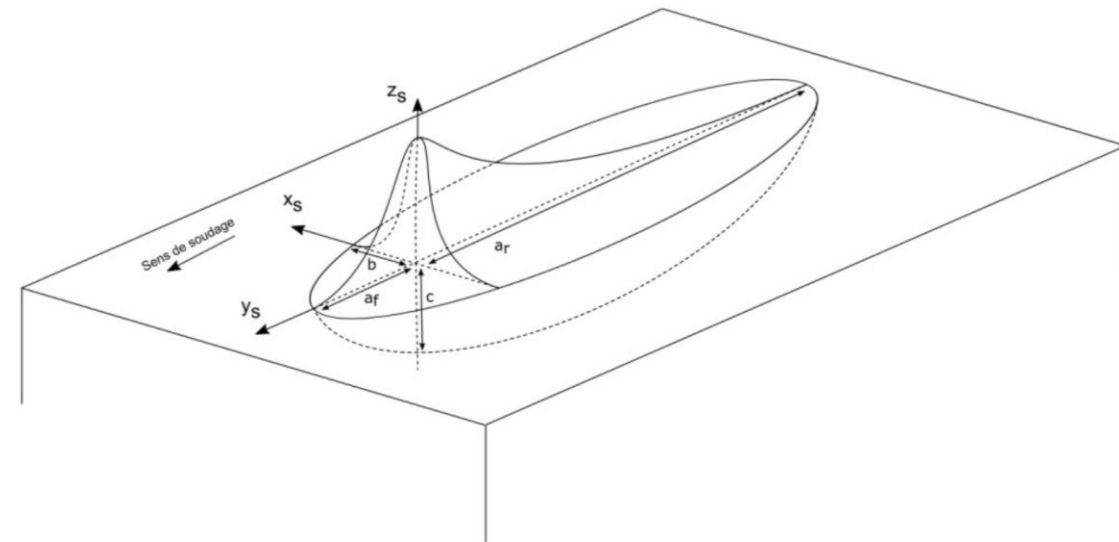


$$Q(x_s, y_s) = \begin{cases} \frac{\eta UI}{\pi R_{spot}^2} & \text{si } (x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 \leq R_{spot}^2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

- $\eta, U, I$  sont respectivement le coefficient de rendement du procédé, la tension et l'intensité de soudage,
- $R_{spot}$  le rayon du spot laser,
- $x_s, y_s$  les coordonnées du point M dans le repère de la source ( $O_s, x_s, y_s, z_s$ )

## Sources de chaleur équivalente

### Source volumique Double Ellipsoïde : Généralement utilisé dans les modèle thermo-mécanique



En avant de l'arc ( $y_s > 0$ ) :

$$Q_f(x_s, y_s, z_s) = f_f \frac{6\sqrt{3}}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \eta U I \exp \left[ -3 \left( \frac{x_s^2}{b^2} + \frac{y_s^2}{a_f^2} + \frac{z_s^2}{c^2} \right) \right]$$

En arrière de l'arc ( $y_s < 0$ ) :

$$Q_r(x_s, y_s, z_s) = f_r \frac{6\sqrt{3}}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \eta U I \exp \left[ -3 \left( \frac{x_s^2}{b^2} + \frac{y_s^2}{a_r^2} + \frac{z_s^2}{c^2} \right) \right]$$

- $Q_f$  et  $Q_r$  sont les flux de chaleur volumiques de la source,
- $\eta$ ,  $U$ ,  $I$  sont respectivement le coefficient de rendement du procédé, la tension et l'intensité de soudage,
- $f_f$  et  $f_r$  sont des coefficients de distribution d'énergie,
- $a_r$ ,  $a_f$ ,  $b$ ,  $c$  sont les demi-axes des ellipsoïdes,
- $x_s$ ,  $y_s$ ,  $z_s$  les coordonnées du point M dans le repère de la source ( $O_s$ ,  $x_s$ ,  $y_s$ ,  $z_s$ )

La conservation de l'énergie implique que :

$$f_f + f_r = 2$$

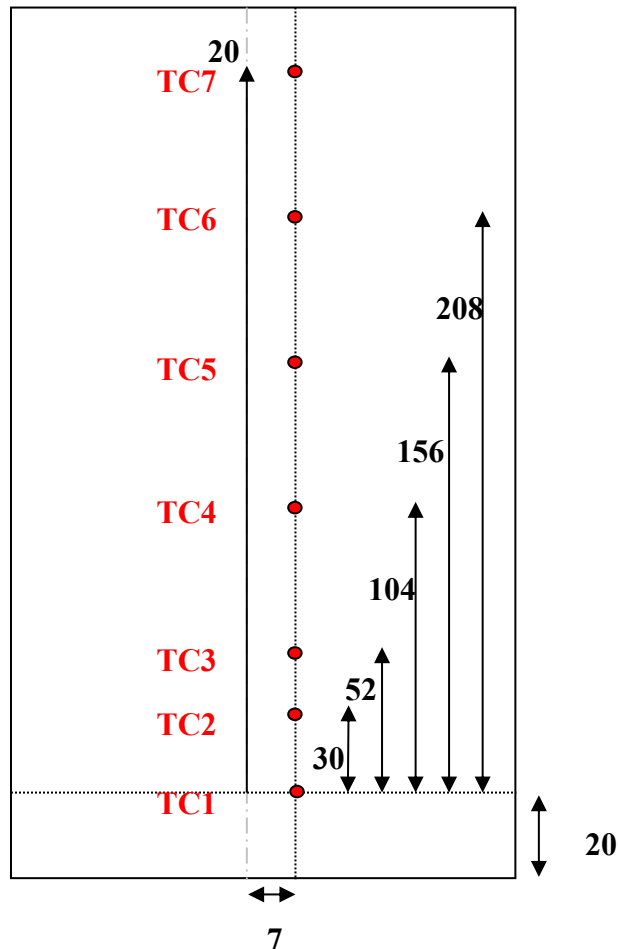
Sachant que la densité volumique de chaleur est continue dans le plan  $y_s = 0$ , on obtient :

$$f_f = \frac{2a_f}{a_r + a_f} \text{ et } f_r = \frac{2a_r}{a_r + a_f}$$

## Modélisation thermique

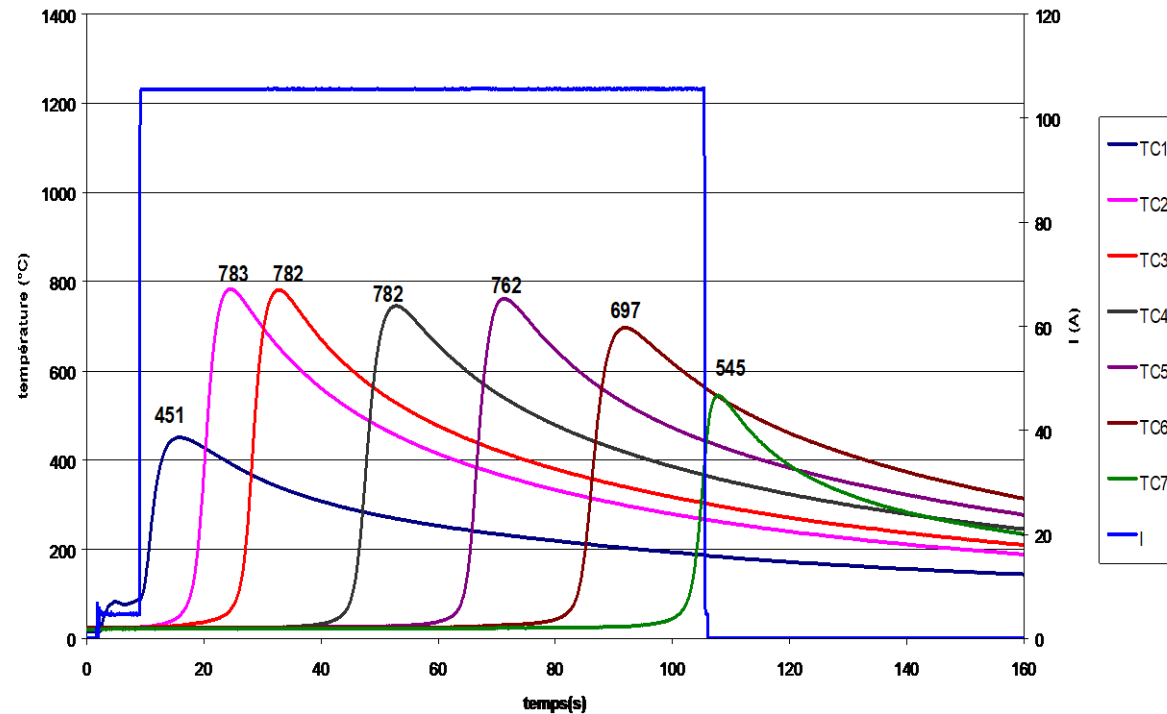
En soudage, il peut exister une zone dite en régime quasi-stationnaire

→ La thermique peut-être résolu en **stationnaire dans certain cas**



$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) = \text{div} \left( \bar{\lambda} \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) + S_v$$

→ Prise en compte de la vitesse d'avance de la torche

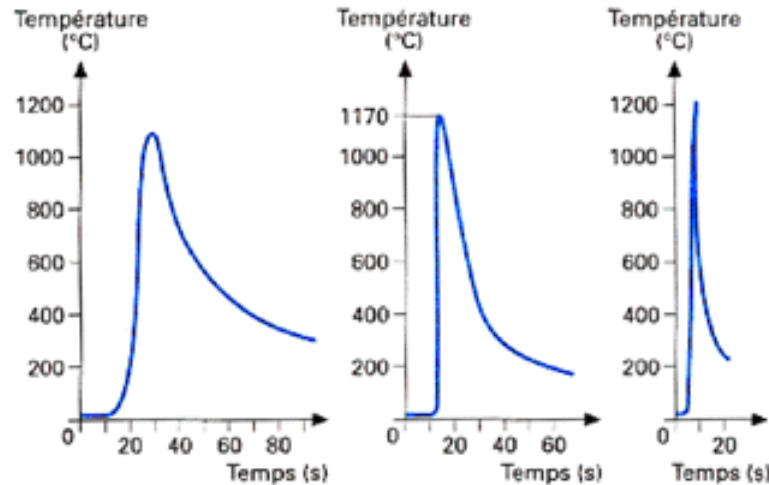
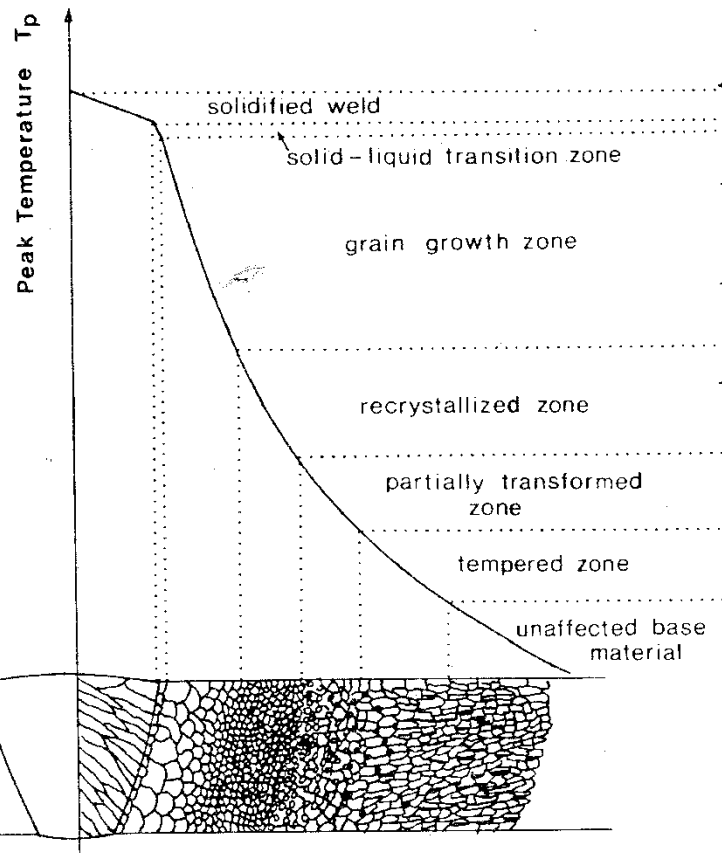


Essai CEA, André Fontes



## Modélisation métallurgique

- Transformations métallurgiques au chauffage et au refroidissement  
→ Dépendance des vitesses de chauffage (procédé) et de refroidissement



- (a) soudage à l'arc avec électrode enrobée
- (b) soudage TIG
- (c) soudage par faisceau d'électrons

Valeurs  
adimensionnées

[Thèse C. Ramard 2018]

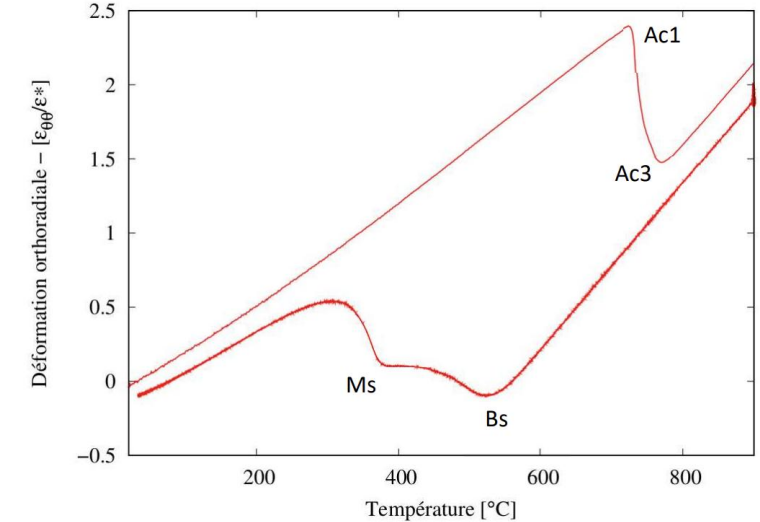


Figure 3.16 : Exemple de courbe dilatométrique de l'acier 80HLES –  $V_{\text{chauff}}=100\text{ }^{\circ}\text{C.s}^{-1}$ ,  $T_a=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_a=300\text{ s}$ ,  $V_{\text{ref}}=4\text{ }^{\circ}\text{C.s}^{-1}$

- Ac1 la température de début de transformation au chauffage du métal de base en austénite.
- Ac3 la température de fin de transformation austénitique au chauffage.
- Bs la température de début de transformation de l'austénite en bainite au refroidissement.
- Ms correspond à la température de début de transformation de l'austénite en martensite au refroidissement

## Modélisation métallurgique

La modélisation des **transformations diffusives** au chauffage ou au refroidissement plusieurs approches sont envisageables : modèles Johnson-Mehl-Avrami, d'Inoue, de l'INPL, de Li et Kirkaldy, de Leblond-Devaux ou de Waeckel

Les transformations diffusives au chauffage et refroidissement :

- Transformation austénitique
- Transformation ferritique
- Transformation bainitique
- Transformation perlitique

## Cinétique isotherme de Johnson-Mehl-Avrami (loi couramment utilisée) :

$$z = 1 - \exp(-b(T)t^{n(t)})$$

Avec :

- $z$  la fraction volumique de phase formée à l'instant  $t$ ,
- $T$  la température de maintien isotherme,
- $t$  le temps,
- $b$  et  $n$  des paramètres identifiés expérimentalement dépendant de la température

[Pour les autres modèles voir la thèse de Constant Ramard 2018](#)

## Modélisation métallurgique

La **transformation martensitique** s'effectuant de **manière displacive (relatif au déplacement)**, elle est donc **indépendante du temps**.

### Cinétique Koistinen-Marburger (loi couramment utilisée) :

$$z_m = z_0 [1 - \exp\langle -k(M_s - T) \rangle]$$

Avec  $\langle x \rangle = 0 \quad \forall x < 0$  et  $\langle x \rangle = x \quad \forall x \geq 0$

Où :

- $z_m$  la fraction volumique de martensite,
- $z_0$  la fraction volumique d'austénite restant à transformer,
- $M_s$  la température de début de transformation martensitique,
- $T$  la température de maintien isotherme,
- $k$  un paramètre matériau.

Pour les autres modèles voir la thèse de Constant Ramard 2018

## Modélisation mécanique

La modélisation mécanique du modèle doit prendre en compte :

- L'effet de la dilation thermique (les coefficients de dilatation des phases ferritique et austénitique sont différents),
- La plasticité induite par les transformations métallurgiques,
- La dépendance du comportement élasto-viscoplastique aux phases et à la température.

## Résolution de l'équation d'équilibre :

$$\text{div}(\sigma) + f = 0$$

Avec:

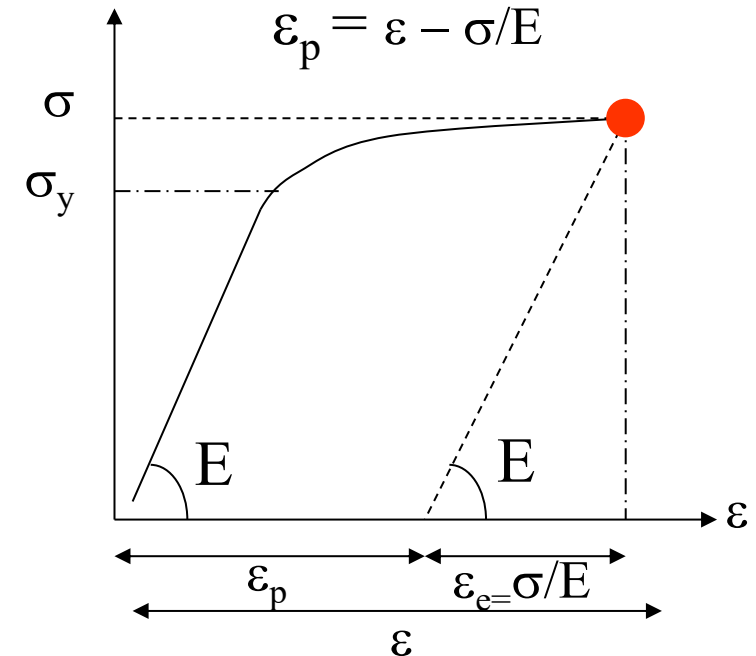
- $\sigma$  le tenseur des contraintes,
- $f$  une force volumique.

Dans le cas d'une **déformation macroscopique**  $\varepsilon$  avec petites déformations :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{th} + \varepsilon^p + \varepsilon^{pt}$$

Avec:

- $\varepsilon^e$  la partie élastique de la déformation,
- $\varepsilon^{th}$  la dilation thermométallurgique,
- $\varepsilon^p$  la partie plastique ou viscoplastique,
- $\varepsilon^{pt}$  le terme de plasticité de transformation





## Modélisation mécanique

### **Loi de comportement élasto-plastique EP :** (Attention : il existe une multitude de modèle)

Exemple de loi d'écrouissage isotrope utilisant une fonction de charge de type contrainte de von Mises avec l'écrouissage du métal selon le modèle de Voce :

$$f(\sigma, R(\varepsilon_p)) = \sigma_{VM} - R(\varepsilon_p)$$

Avec :

- $f$  (en MPa) la fonction seuil de la surface de charge,
- $\sigma_{VM}$  (en MPa) la contrainte de von Mises,

$$R(\varepsilon_p) = \sigma_y + Q \left( 1 - \exp(-b \varepsilon_p) \right)$$

- $\varepsilon_p$  la déformation plastique,
- $Q$  (en MPa) et  $b$  deux paramètres matériaux.

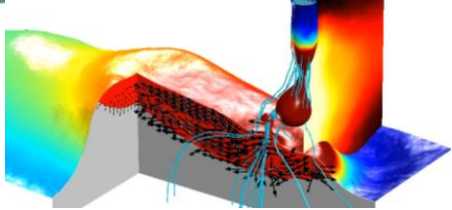
### **Loi de comportement élasto-visco-plastique EVP :**

Reprend les équations de la loi de comportement EP et ajoutant la vitesse de déformation plastique.

$$\dot{\varepsilon}_p = \left( \frac{f(\sigma, R(\varepsilon_p))}{K} \right)^n$$

- $K$  (en MPa.s<sup>-1/n</sup>) le coefficient de viscosité,
- $n$  un paramètres matériaux.

# Quelles données d'entrée?



Modèles numériques à hautes températures



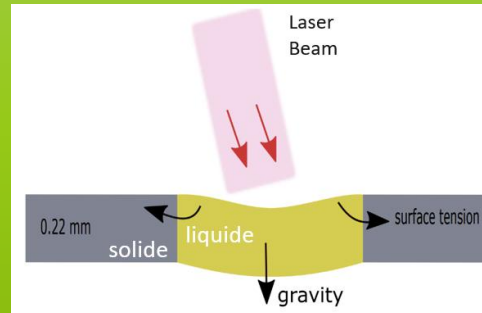
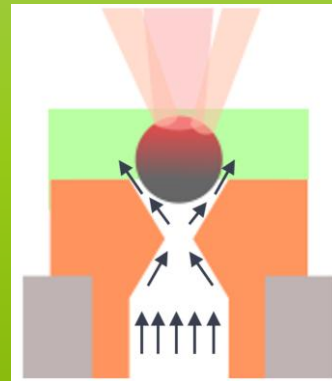
## Caractérisation des métaux à l'état liquide



Expériences à hautes températures



## Dispositifs de mesure



**Diffusivité thermique** PhD Houssein



**Capacité thermique massique** Phd Le Mener



**Émissivité** PhD Dejaeghere



**Tension superficielle**

**3 PhD : Le Maux, Klapczynski, Mouyele**

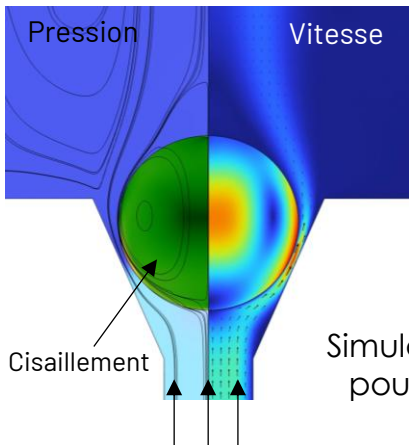
**2 PhD : Le Maux, Bounou**

**Masse volumique**



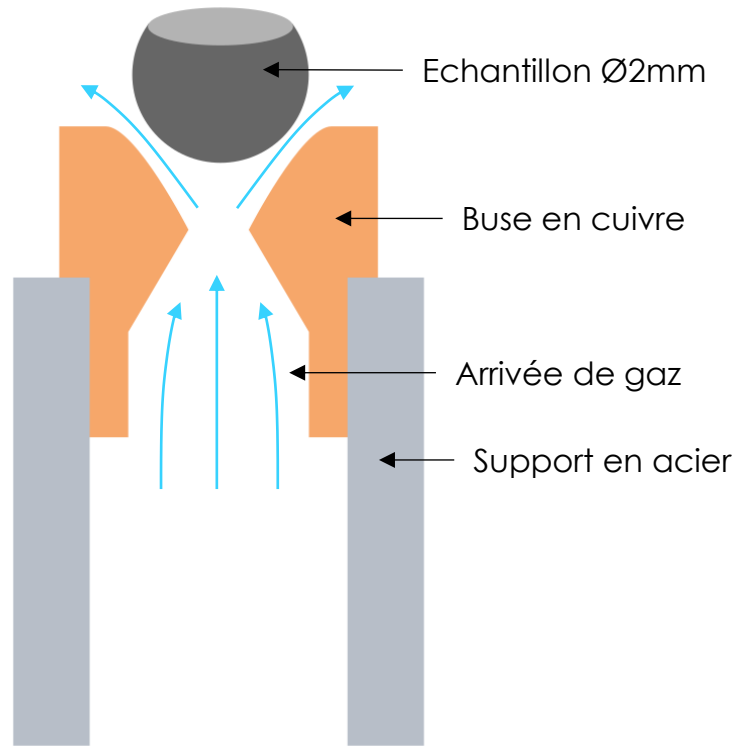
**Interne + stages**

**Viscosité**

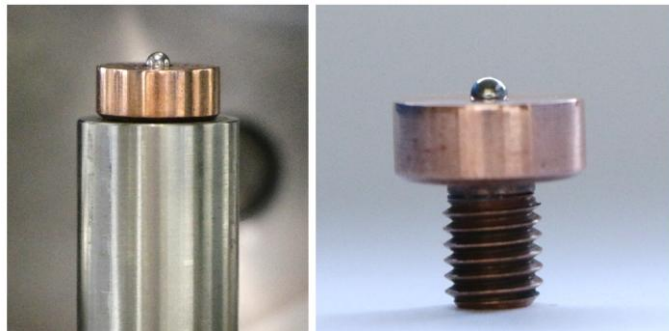


Simulation de l'expérience pour mieux comprendre

# Lévitation aérodynamique : Principe

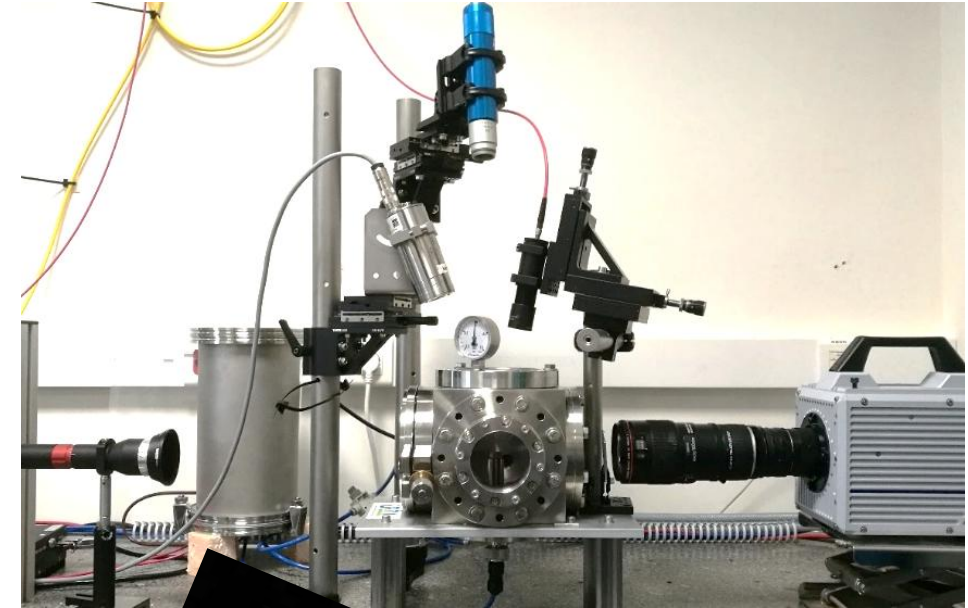
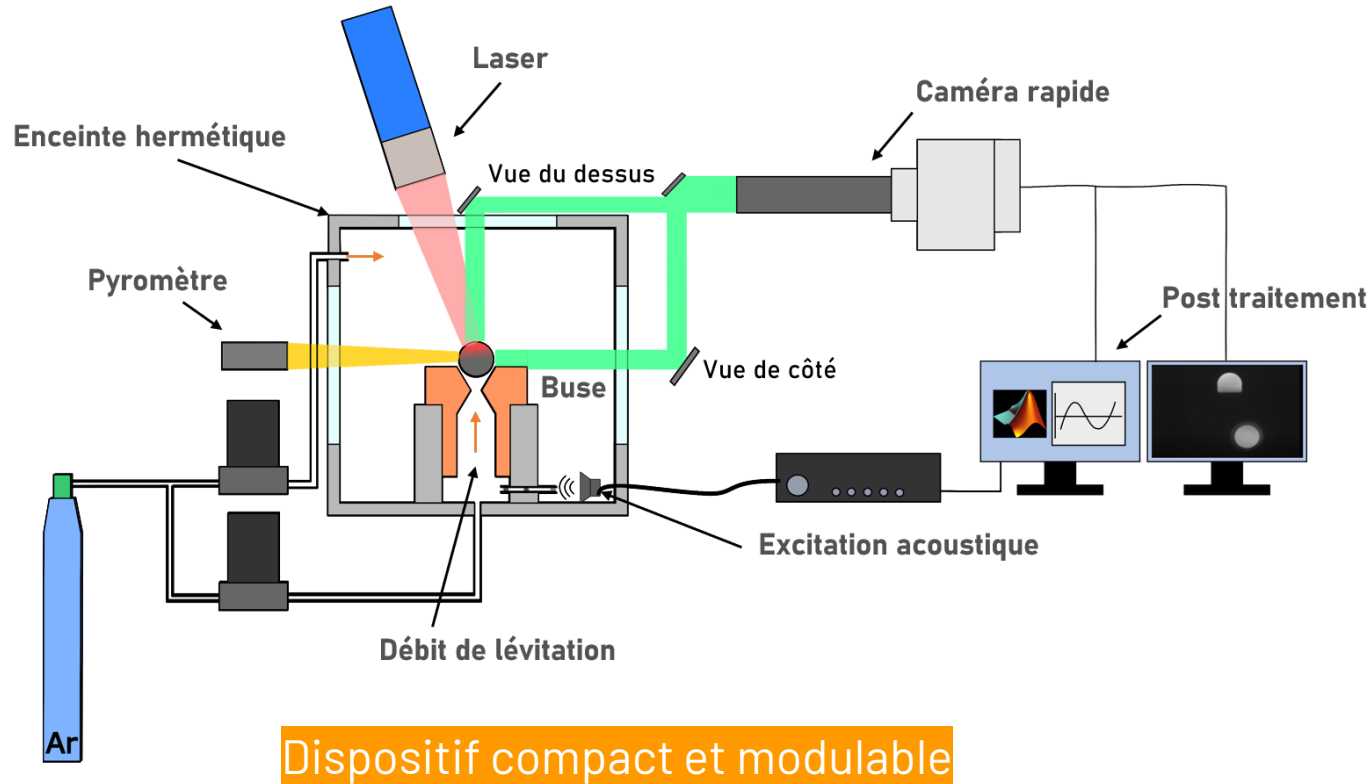


*Exemple de fusion d'un échantillon*



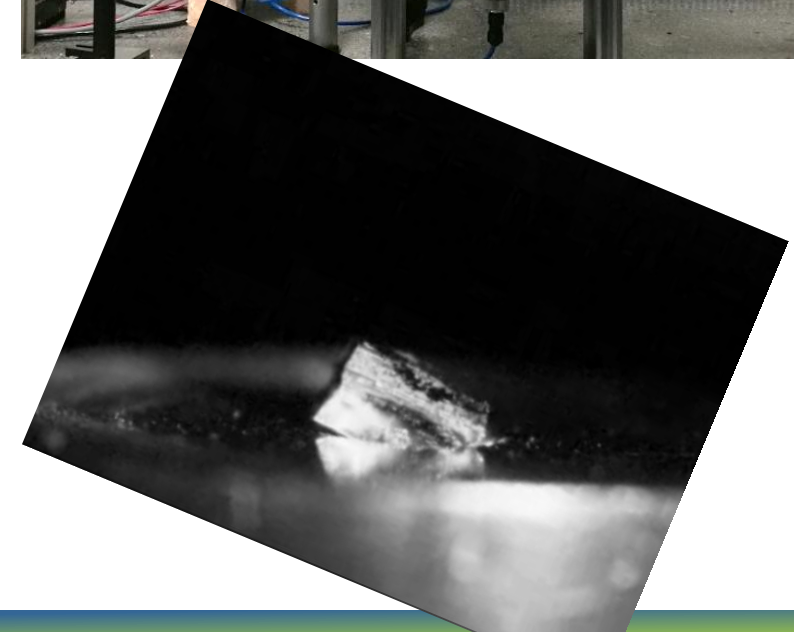
- Sans contact
- Pas de pollution
- Hautes températures (+ 3000°C)
- Expériences courtes (<10s)

# Dispositif de mesure



## Spécifications:

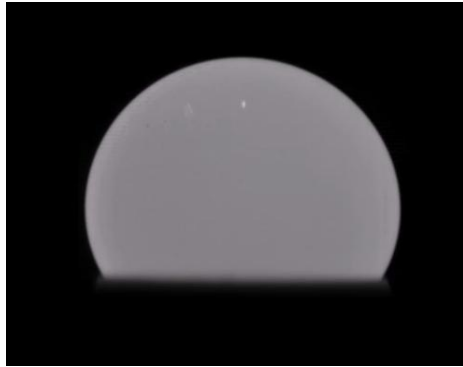
- Lévitiation aérodynamique
- Atmosphère protectrice (argon)
- Chauffage laser
- Mesures sans contact (température, forme de l'échantillon)



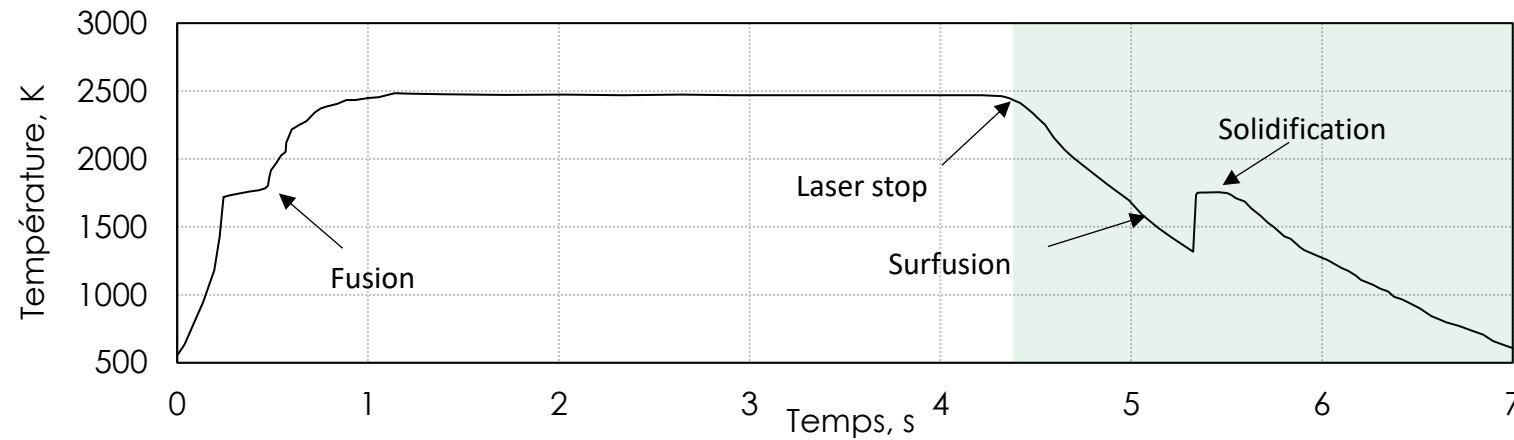


# Expérience typique en lévitation aérodynamique

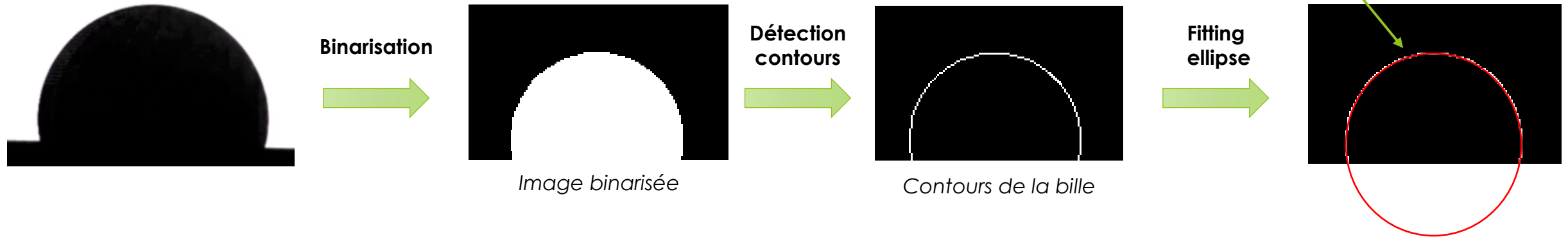
Nickel



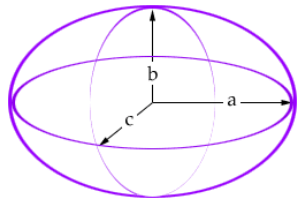
Refroidissement avec surfusion  
puis solidification



# Mesure de masse volumique



## Détermination de la masse volumique

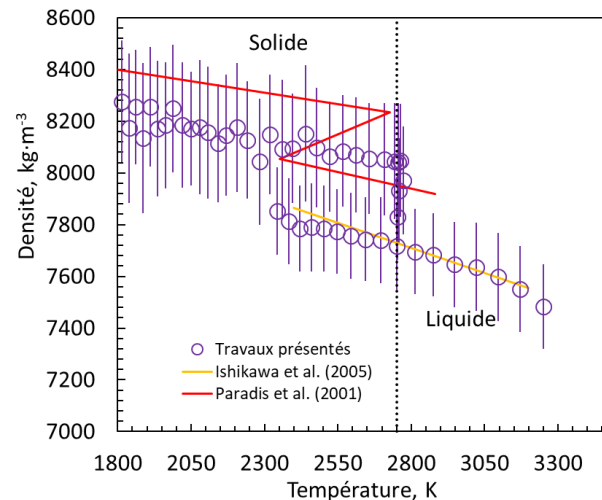


$$V_{\text{ellipsoid}} = \frac{4}{3}\pi abc$$

Masse volumique :  $\rho = \frac{m}{V_{\text{ellipsoid}}}$

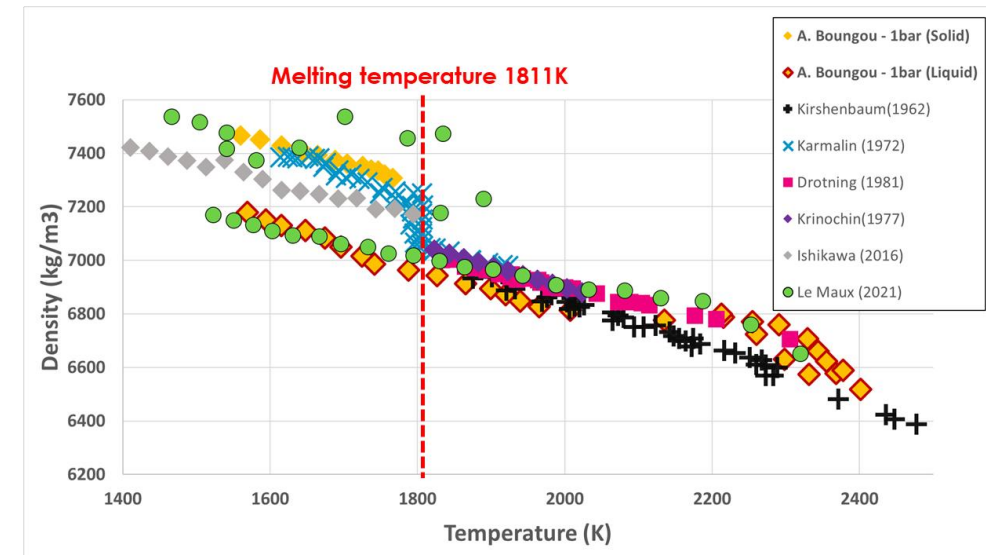
Masse mesurée avec une balance de précision ( $\pm 5 \mu\text{g}$ )

### Masse volumique Niobium



Thèse D. Le Maux (2020)

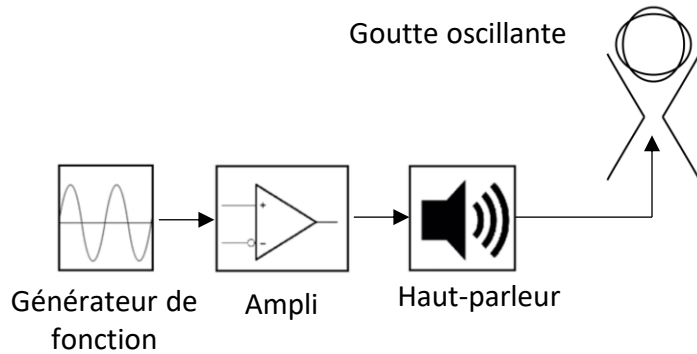
### Masse volumique Fer



Thèse A. Boungou (2024 - 2027)

## Méthode de la goutte oscillante

Balayage fréquentiel : la bille oscille à sa fréquence de résonance.



Equation de Rayleigh (1879)

$$\gamma = \frac{3}{8} \pi f_r^2 m$$

Tension de surface (N/m)

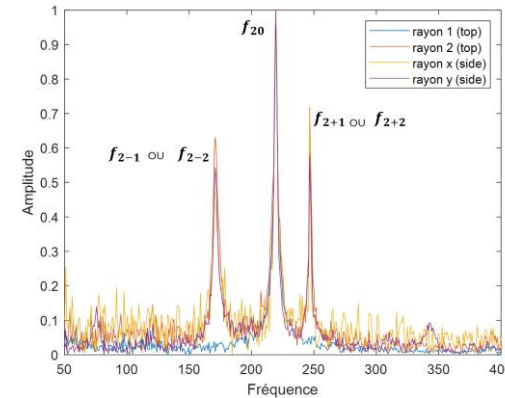
Fréquence de résonance (Hz)

Masse (kg)

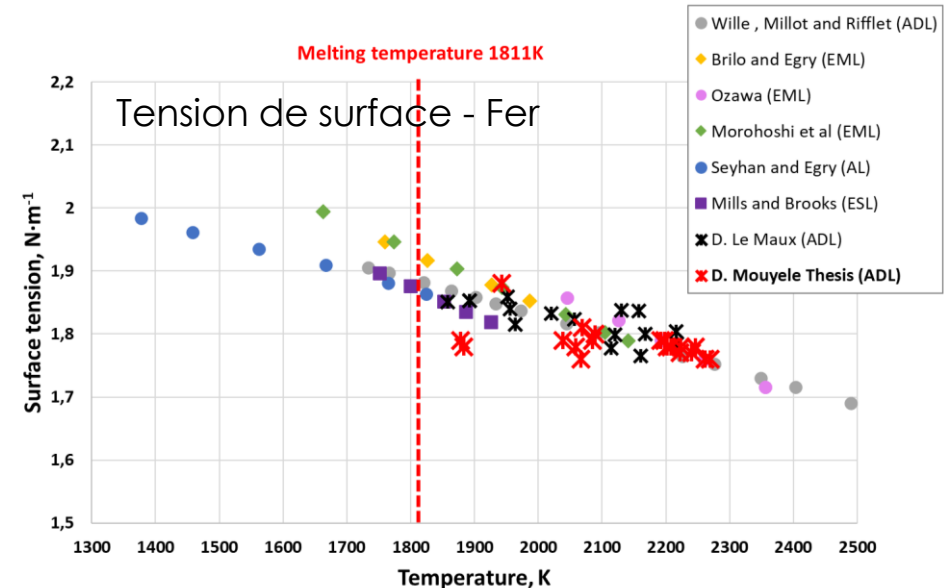
Goutte oscillante



Analyse fréquentielle de la déformation de la goutte

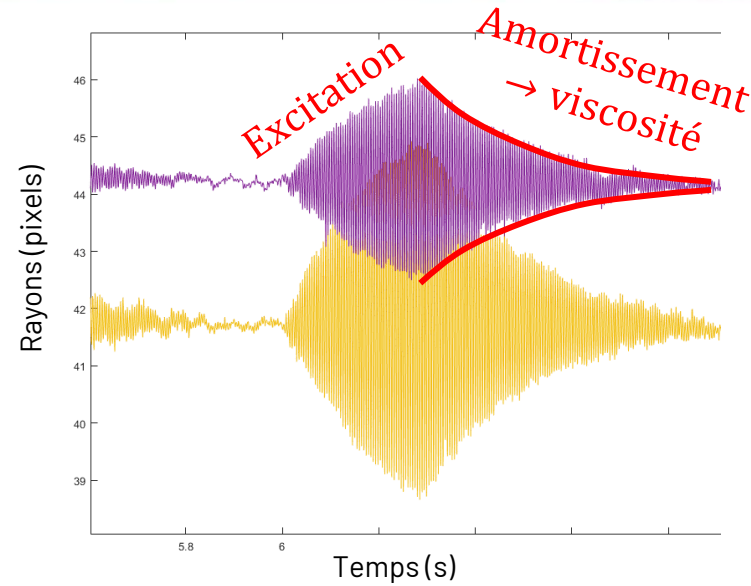
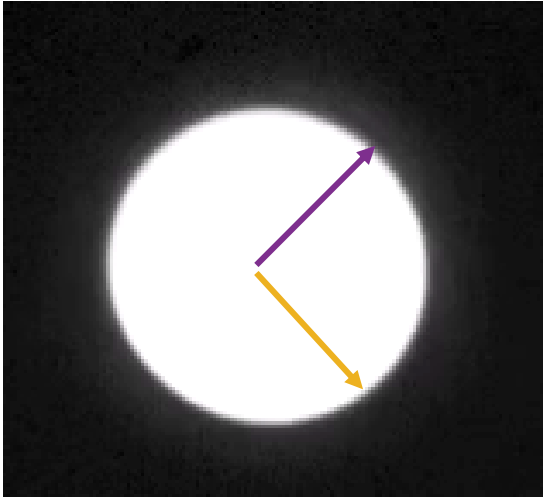


Fréquence de résonance  $f_R$



# Mesure de viscosité

Vue de dessus



Méthodologie non valide sur Terre :  
La théorie de Lamb ne prend pas  
en compte la gravité ...

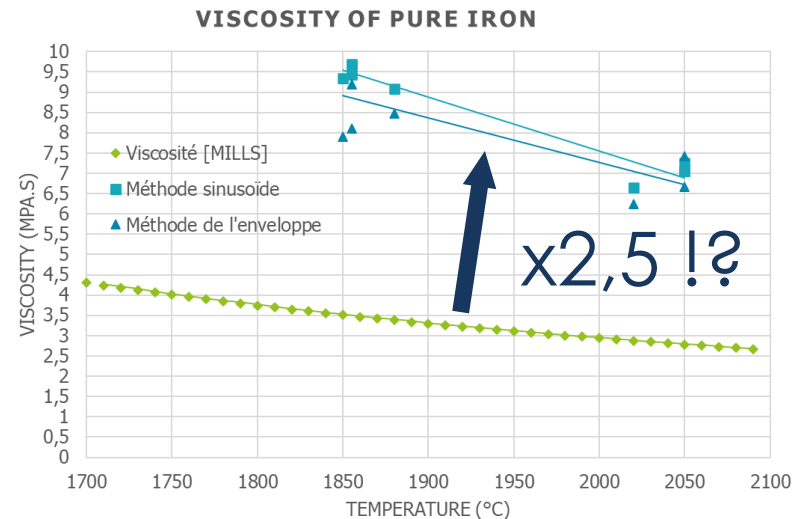


Mesures en micro-gravité  
Projet Carmélide

- Evolution temporelle des rayons
- Estimation du facteur d'amortissement  $\tau_0$  par méthodes inverses

Calcul de la viscosité (Lamb)

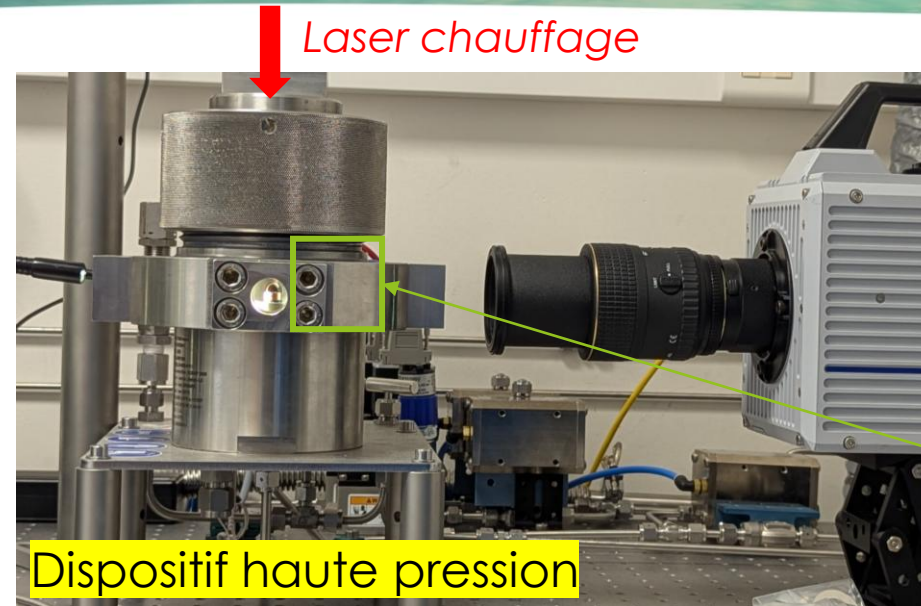
$$\eta = \frac{\rho R_0^2}{5 \tau_0} \quad [Pa.s]$$





# Evaporation ... Dispositif haute pression

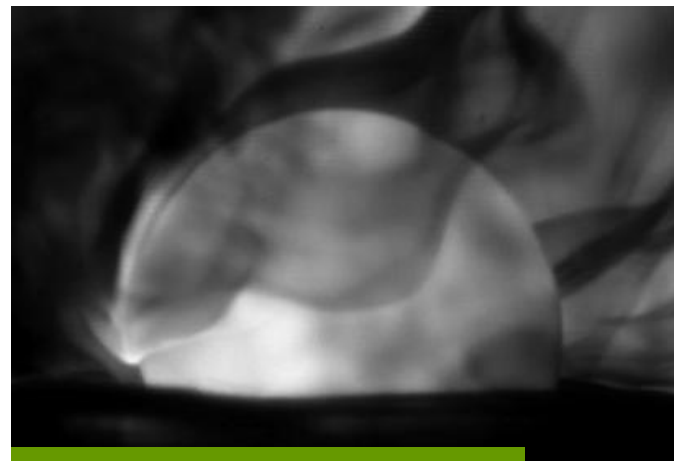
Evaporation



- De 1 bar à 100 bar
- Atmosphère argon ou hélium
- Lévitaiton aérodynamique

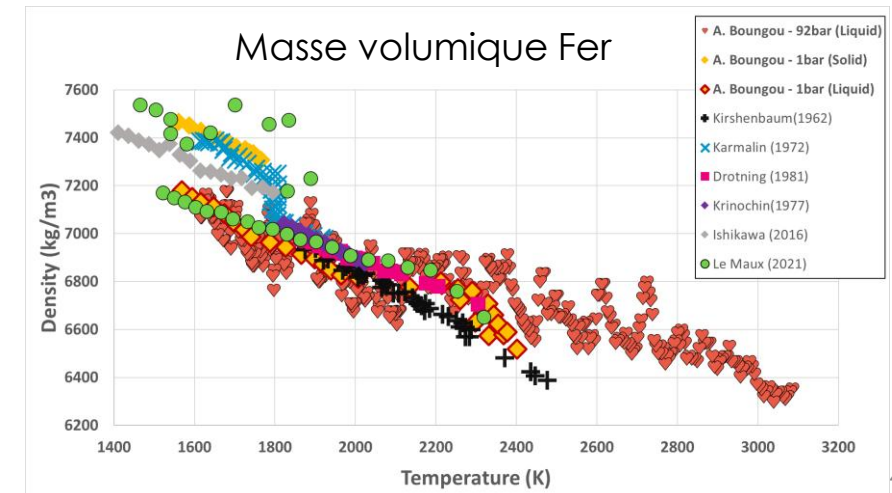


Fer, 92 bar,  $T_{max} = 3150$  K



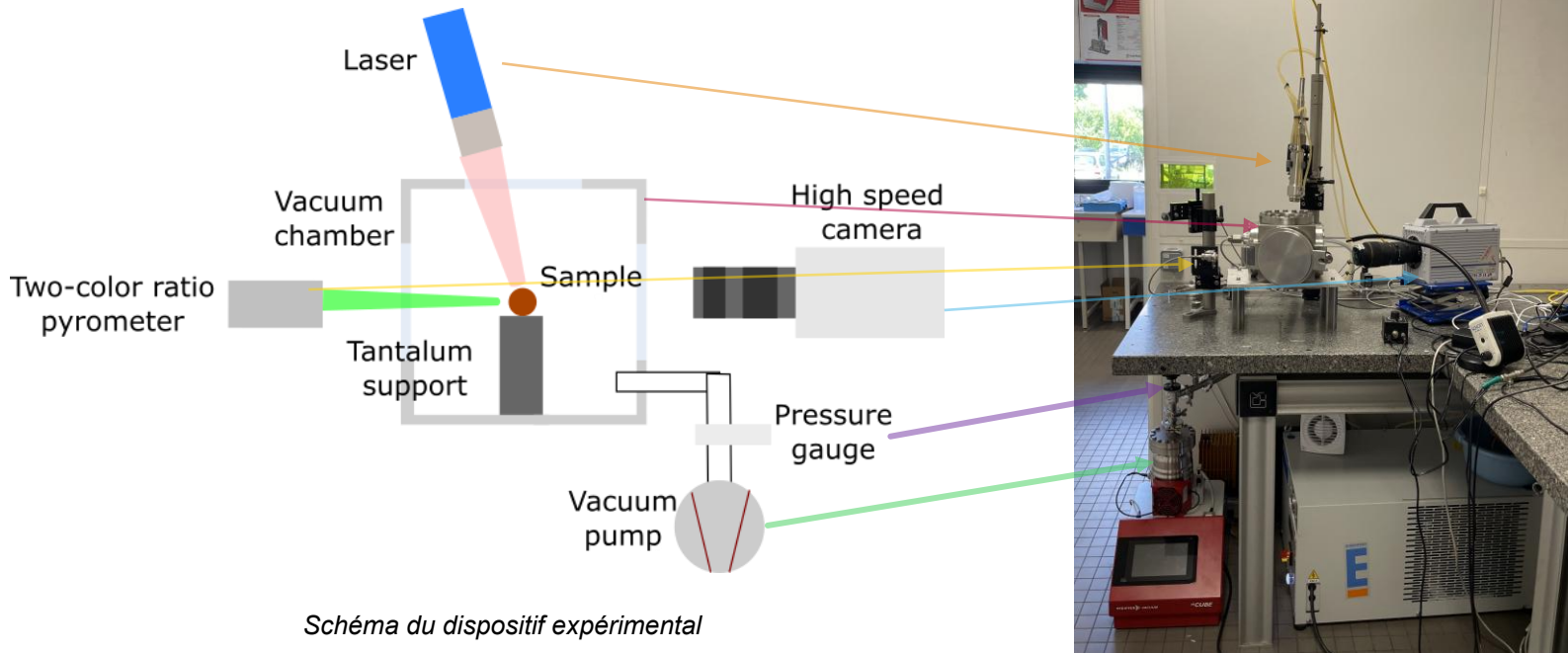
Thèse A. Boungou (2024 - 2027)

- Limite la température maximale de mesure
- Caractérisation des alliages difficile



# Etude de l'évaporation sous vide

## Développement du banc d'essai

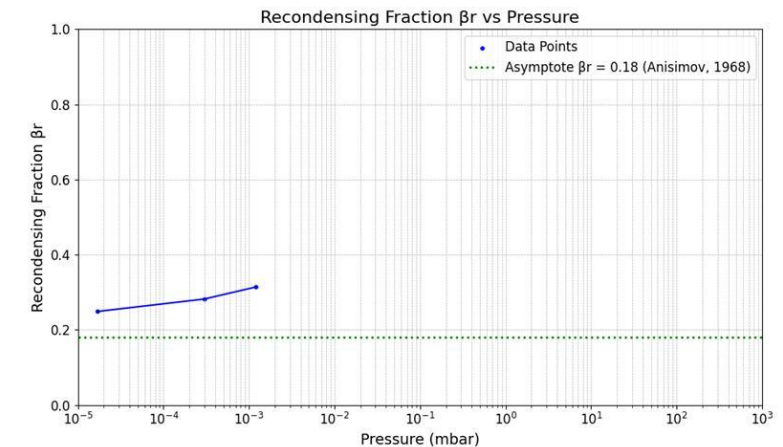
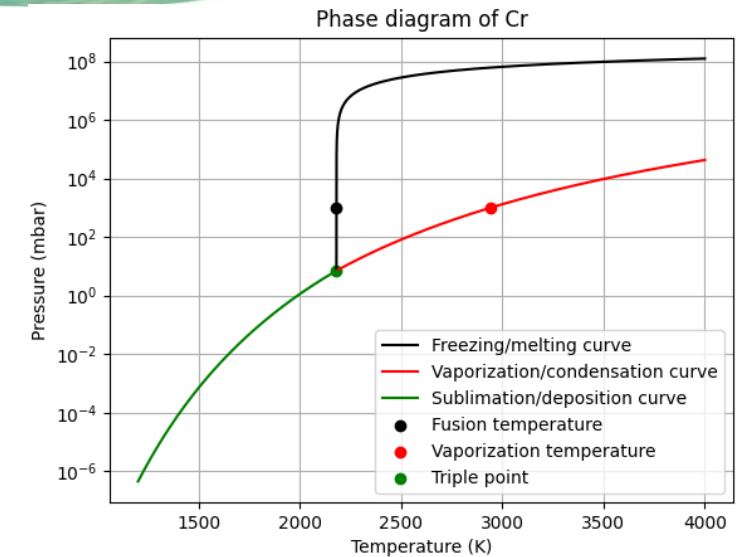


## Apports du banc d'essai

- loi d'évaporation des métaux purs (Cu et Cr) ainsi que de l'alliage CuCr
- Enceinte sous vide secondaire (10-5 mbar)
- **Caractérisation du coefficient de rétrodiffusion  $\beta_R$  (inconnue dans la littérature)**  
→ Prédiction de la perte de masse

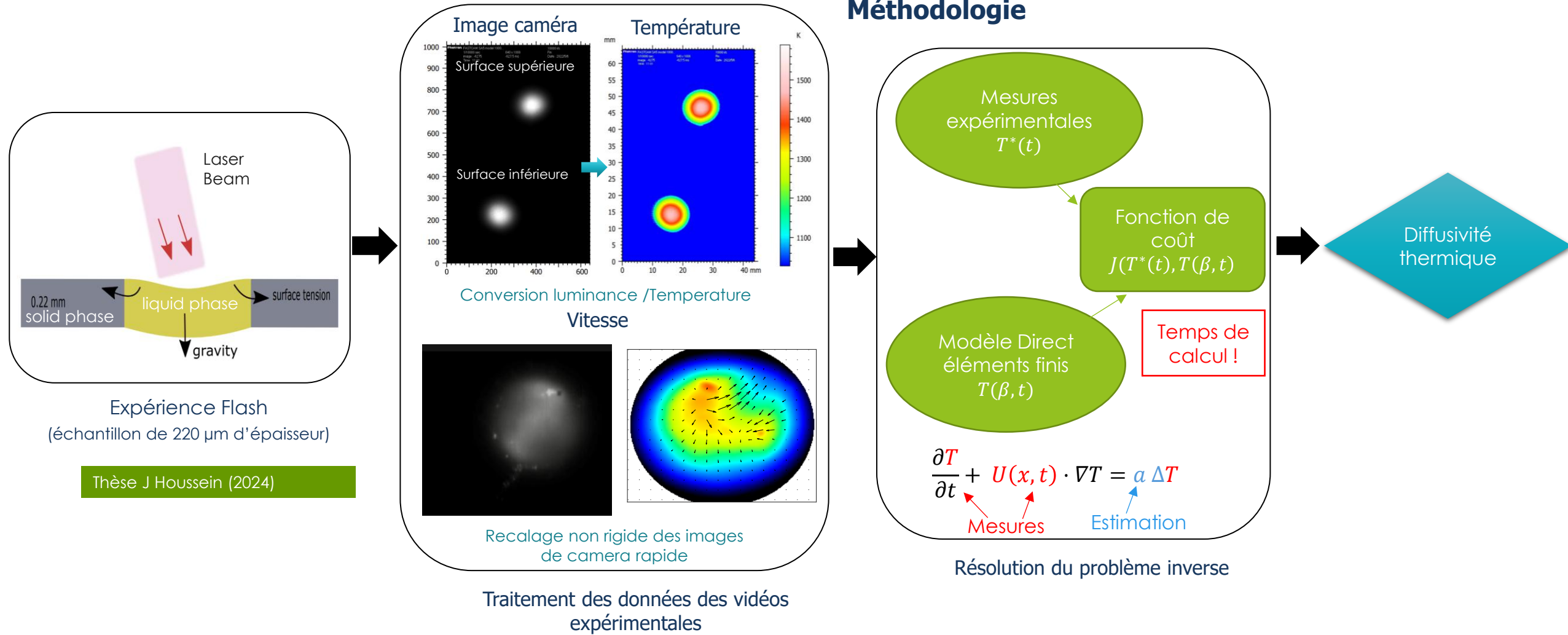
Modèle d'évaporation de Langmuir

$$\dot{m} = (1 - \beta_R) \sqrt{\frac{m}{2\pi k_B T_s}} p^{\text{sat}}(T_s) [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$$



Thèse CIFRE de Deniz LIBERT  
(en cours)

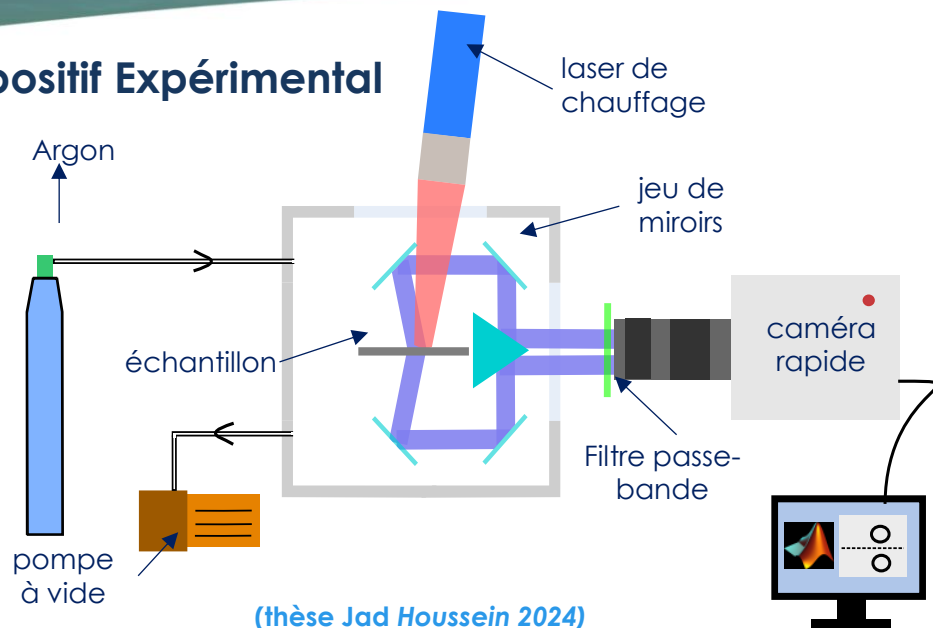
# Diffusivité thermique : diffusivimètre laser flash



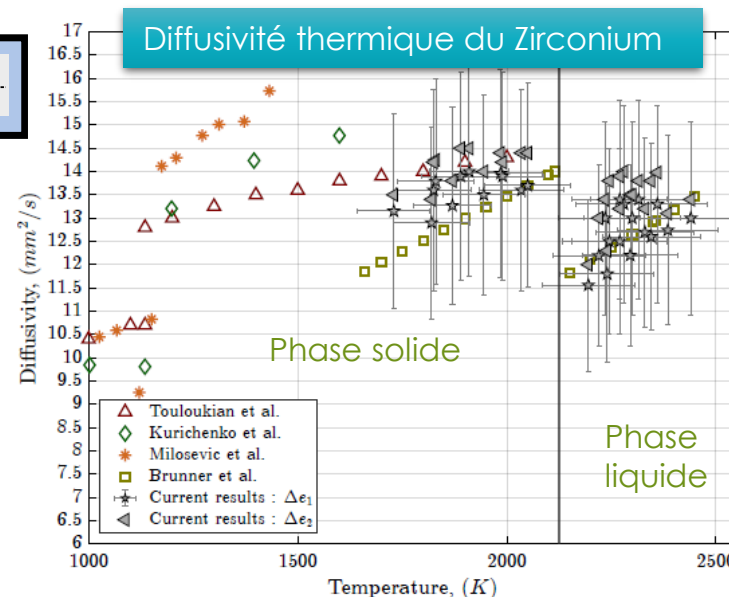
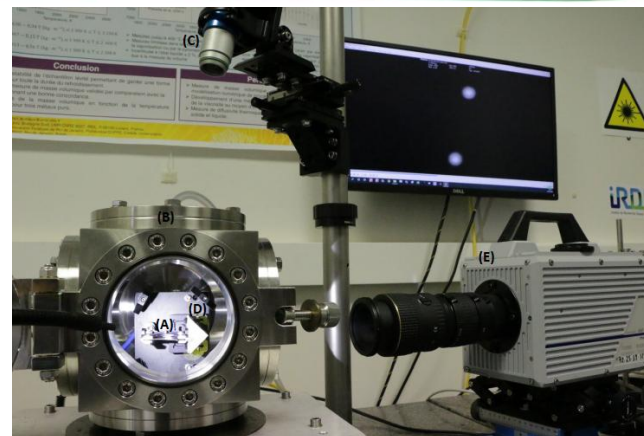


# Diffusivité thermique : diffusivimètre laser flash

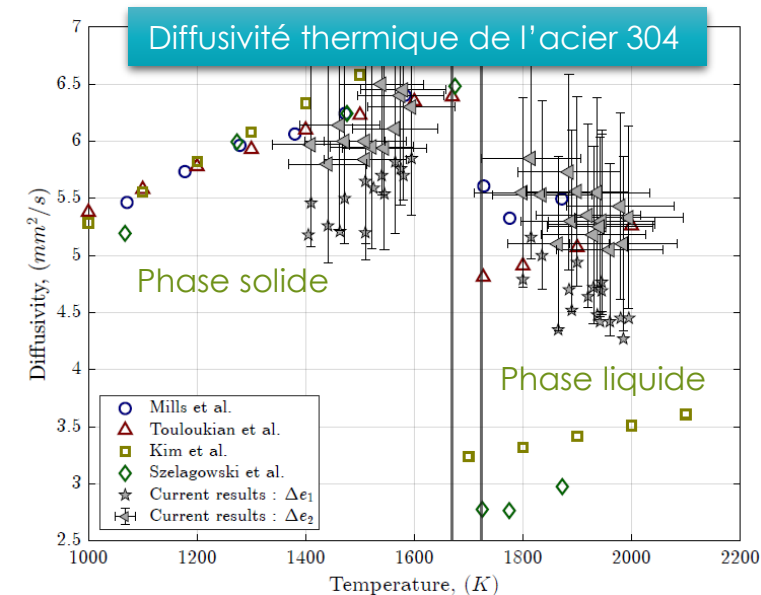
## Dispositif Expérimental



- Epaisseur échantillon :  $200 \mu\text{m}$
- Laser de chauffage :  $\lambda = 1070 \text{ nm}$
- Visualisation synchrone des deux faces supérieure et inférieure
- Caméra rapide :  $10\,000 \text{ i/s}$
- Filtre passe-bande  $880 \pm 70 \text{ nm}$
- Atmosphère protectrice : limiter la pollution



(Houssein J. et al, Int J Thermophys 2024)



(Houssein J. et al, Int J Thermophys 2024)

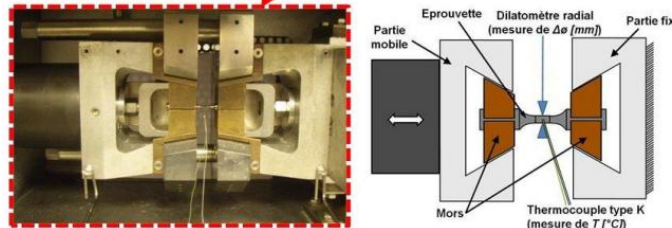
Source d'incertitude liée à l'épaisseur de l'échantillon



## Machine Gleeble

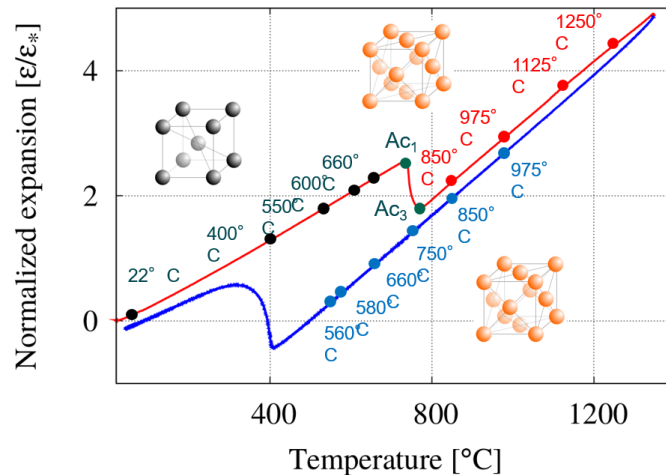
### Caractéristiques :

- Chauffage max:  
400-10000 °C/s
- Refroidissement max:  
150-1000 °C/s
- Force maximale : 100 kN
- Vitesse maximale du mors : 1 m/s



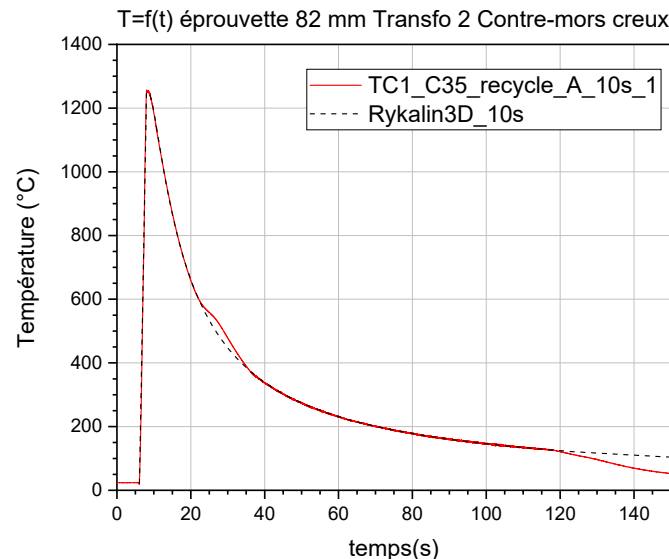
## Caractérisation thermométallurgique

### Essais de dilatométrie

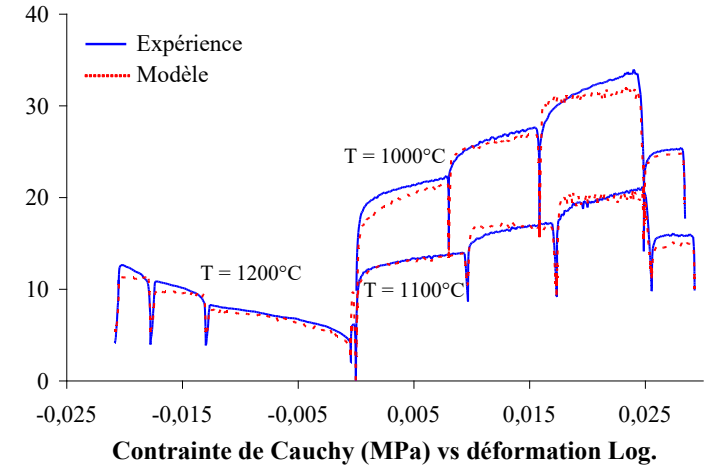


Coefficient de dilatation, cinétiques de transformation de phase  
(dilatométrie ou résistivité électrique)

### Simulation de cycle de soudage



## Caractérisation thermo-mécanique



### Autres types d'essais:

- ✓ Essais de plasticité de transformation
- ✓ Essais de rupture
- ✓ Essais de fusion
- ✓ Mesures de résistivité électrique

# EQUIPE MEHTA

## MEtal Haute Temperature & Assemblages

# Merci pour votre attention !



**PHILIPPE LE MASSON**  
Professeur des Universités  
Directeur Laboratoire IRDL



**DENIS CARRON**  
Maître de Conférences



**MURIEL CARIN**  
Professeur des Universités  
Responsable équipe



**CEDRIC POUVREAU**  
Maître de Conférences



**THOMAS PIERRE**  
Professeur des Universités



**MICKAEL COURTOIS**  
Maître de Conférences HDR



**STEPHEN CADIOU**  
Maître de Conférences



**EDOUARD GESLAIN**  
Maître de Conférences



**ELODIE COURTOIS**  
Maître de Conférences



**COLINE BOURGES**  
Maître de Conférences



**WILLIAM BERCKMANS**  
Ingénieur d'étude



**MARVIN NURIT**  
Post-doc - RTI



**RONAN MEILLOUR**  
CEA - Découpe Laser  
[2022-2025]



**MARC LE GALL LA SALLE**  
Framatome - Soudage TIG  
[2022-2025]



**FERRODY CHETAN**  
IREPA LASER - Soudage laser  
[2023-2026]



**MAELENN LE MENER**  
UBS - Cp métaux liquides  
[2023-2026]



**ILIAS BEN BAHAFFA**  
ArcelorMittal - Soudage par point  
[2023-2026]



**LEO SILVA**  
UBS - ENSTA - WLAM Titane  
[2024-2027]



**DENIZ LIBERT**  
Schneider Electric - Arc sous vide  
[2024-2027]



**DARCY MOUYELE**  
ANR CaramelL - Tension de  
surface métaux liquides  
[2024-2027]



**ANTHER BOUNGOU**  
ANR CaramelL - Masse  
volumique métaux liquides  
[2024-2027]



**GAUDENS TOWANOU**  
Carnot Thermosurf - Emissivité  
des surfaces  
[2024-2027]



**JOAO MARCOS SOUZA DIAS**  
Stage Framatome - VAR



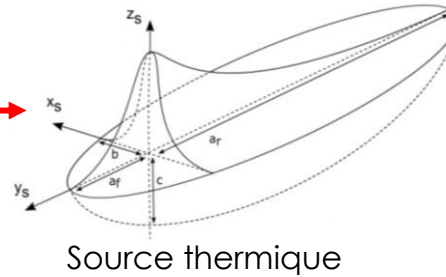
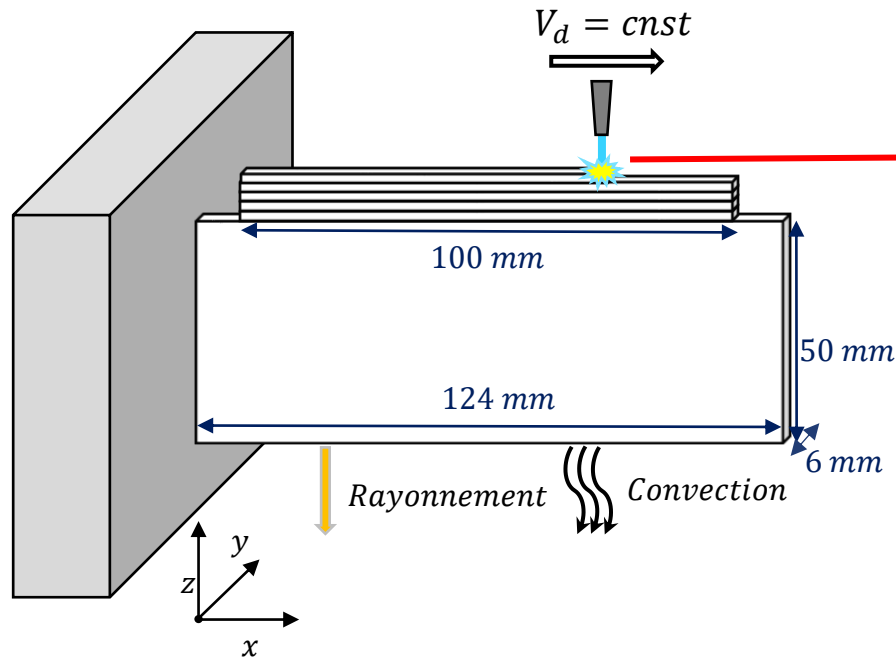
Centre de Recherche C. HUYGENS  
Rue de Saint-Maudé – BP 92116  
F-56321 LORIENT Cedex



www.irdl.fr

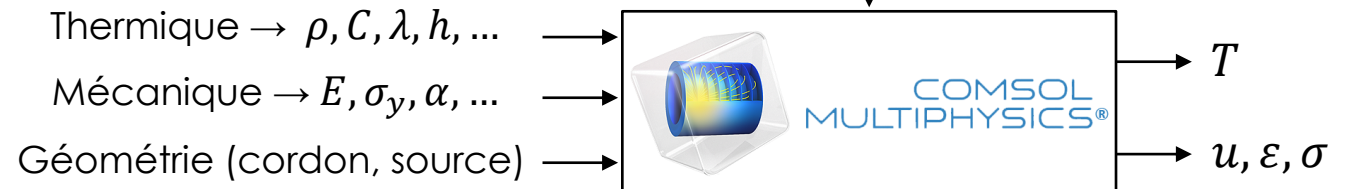
# Atelier – Simulation thermo-mécanique d'un mur

Modèle numérique transitoire 2D – dépôt de 5 cordons (thèse C. Cambon 2021 à partir page 69)



Matériau **Acier 316L**  
Dimensions substrat → 124x50x6 mm  
Dimensions cordon → 100x2x6 mm

Loi de comportement



Équation de la chaleur

$$\rho C_p^{eq} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right) = -\text{div}(\vec{q}) + Q$$

Advection négligée

$\vec{q} = -\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T)$ ;  $\rho$  masse volumique  $[\frac{kg}{m^3}]$ ;  
 $C_p^{eq}$  capacité th. eq.  $[\frac{J}{kg.K}]$ ;  $\lambda$  conductivité th.  $[\frac{W}{m.K}]$

Équation d'équilibre

$$\text{div}(\sigma) + \cancel{f} = \rho \cancel{\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}} = 0 \rightarrow \text{étude quasi-statique}$$

$\sigma$  tenseur des contraintes;  $f$  forces volumiques (négligées)

Déformation totale

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{th} + \epsilon^p + \cancel{\epsilon^{pt}}$$

$\epsilon^e$  partie élastique  
 $\epsilon^{th}$  partie thermique  
 $\epsilon^p$  partie plastique  
 $\epsilon^{pt}$  plasticité de transfo.

**Source de chaleur volumique :**

$$Q_f = \eta UI \frac{6\sqrt{3}}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \eta UI \exp \left[ -3 \left( \frac{(x - x_{torche})^2}{c^2} + \frac{(y - y_{torche})^2}{a^2} \right) \right]$$

**Conditions aux limites → pertes thermiques**

Échanges th. par convection ( $W/m^2$ )  $q_c = h(T - Tamb)$

$h$  coefficient d'échange convectif [ $\frac{W}{m^2.K}$ ] ;  $Tamb$  température de référence [K]

Échanges th. par rayonnement ( $W/m^2$ )  $q_r = \sigma_{SB} \varepsilon (T^4 - T_{ext}^4)$

$\sigma_{SB}$  constante de Stefan-Boltzmann :  $\sigma_{SB} = 5,67.10^{-8} [\frac{W}{m^2.K^4}]$  ;  $\varepsilon$  émissivité du matériau

Échanges th. avec le bridage par conduction ( $W/m^2$ ) → représentés par un flux de chaleur

**Cas particulier d'un calcul 2D – Conditions aux limites volumiques des pertes par convection et rayonnement :**

Échanges th. par convection ( $W/m^3$ )  $q_{cvol} = \frac{2h}{e_p} (T - Tamb)$

Échanges th. par rayonnement ( $W/m^2$ )  $q_{rvol} = \frac{2\sigma_{SB}\varepsilon}{e_p} (T^4 - T_{ext}^4)$

**Paramètres opératoires :**

- Intensité = 107 A, Tension = 13 V,  $\eta = 0,94$  (paramètre calé par comparaison avec les thermocouples)
- Vitesse d'avance de la torche = 7 [mm/s]
- temps complet = temps de dépose + temps de refroidissement = 50s
- Coefficient de convection  $h_{conv} = 10 W/(m^2.K)$
- Emissivité  $\varepsilon = 0,4$
- Dépose en zig-zag

Matériau **Acier 316L**

Dimensions substrat → 124x50x6 mm

Dimensions cordon → 100x2x6 mm