



**HAL**  
open science

## **Modélisation des bains de fusion pour le procédé de fusion sur lit de poudre**

Dihya Mezi, Stephane Gounand, Guilhem Roux, Jean-Paul Garandet, Hicham Maskrot

### ► **To cite this version:**

Dihya Mezi, Stephane Gounand, Guilhem Roux, Jean-Paul Garandet, Hicham Maskrot. Modélisation des bains de fusion pour le procédé de fusion sur lit de poudre. Club Cast3M 2023, CEA, Nov 2023, Paris, France. <hal-04309164>

**HAL Id: hal-04309164**

**<https://hal.science/hal-04309164v1>**

Submitted on 27 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

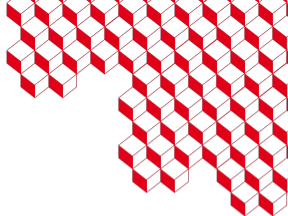
L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License



isas



## Club Cast3m 2023

# Modélisation des bains de fusion pour le procédé de fusion sur lit de poudre

novembre 2023

Dihya MEZI ([dihya.mezi@cea.fr](mailto:dihya.mezi@cea.fr))

Stéphane GOUNAND<sup>1</sup>, Guilhem ROUX<sup>2</sup>, Jean-Paul GARANDET<sup>2</sup>, Hicham MASKROT<sup>3</sup>

<sup>1</sup> DES/ISAS/DRMP/SRMA/LTA, CEA SACLAY, 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

<sup>2</sup> DRT/LITEN/STNM/SA3D/L3M, CEA GRENOBLE, 38000 GRENOBLE

<sup>3</sup> DES/ISAS/DRMP/SRMA/LISL, CEA SACLAY, 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

# Plan de la présentation



## Contexte et objectif de l'étude

## Modélisation numérique des phénomènes multiphysiques dans le bain de fusion

- Modèle Mathématique- Transfert thermiques

- Modèle Mathématique- Dynamiques des fluides

## Analyse des résultats de la simulation

- Influence de l'évaporation sur le bain

- Solidification dans le bain de fusion

- Modélisation du bain de fusion avec surface déformée

- Solidification dans le bain de fusion avec surface libre

## Conclusion et perspectives

# Outline

## Contexte et objectif de l'étude

Modélisation numérique des phénomènes multiphysiques dans le bain de fusion

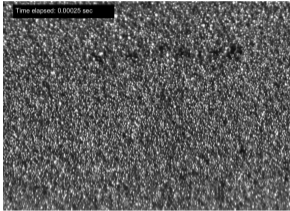
Analyse des résultats de la simulation

Conclusion et perspectives



# Contexte de l'étude

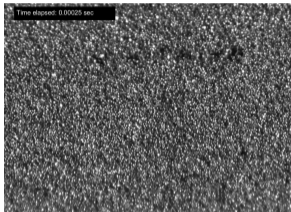
## Fabrication Additive



- Procédé fusion sur lit de poudre [1]
  - Source Laser
  - Fusion de la poudre métallique
  - Empilement des couches

# Contexte de l'étude

## Fabrication Additive



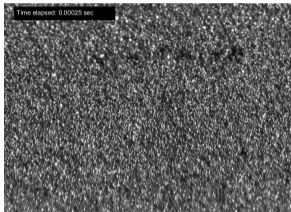
- Procédé fusion sur lit de poudre [1]

- Source Laser
- Fusion de la poudre métallique
- Empilement des couches

⇒ Réalisation de pièces avec des géométries complexes et moins de déchets de matière

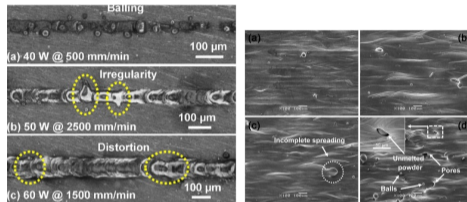
# Contexte de l'étude

## Fabrication Additive



- Procédé fusion sur lit de poudre [1]
    - Source Laser
    - Fusion de la poudre métallique
    - Empilement des couches
- ⇒ Réalisation de pièces avec des géométries complexes et moins de déchets de matière

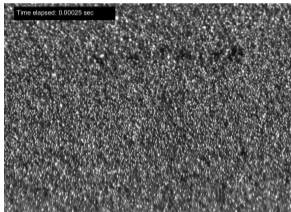
## État de la pièce finale [2]



- Forme des dépôts élémentaires (cordons)
- Formation de la microstructure (phases, microségrégation en solidification rapide)
- Apparition de défauts : irrégularités du dépôt, fissuration à chaud

# Contexte de l'étude

## Fabrication Additive

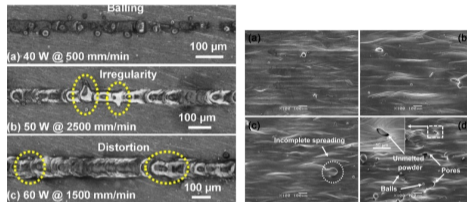


### ■ Procédé fusion sur lit de poudre [1]

- Source Laser
- Fusion de la poudre métallique
- Empilement des couches

⇒ Réalisation de pièces avec des géométries complexes et moins de déchets de matière

## État de la pièce finale [2]

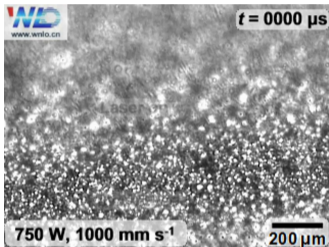


- Forme des dépôts élémentaires (cordons)
- Formation de la microstructure (phases, microségrégation en solidification rapide)
- Apparition de défauts : irrégularités du dépôt, fissuration à chaud

⇒ Influence de la forme du bain sur la micro-structure de la pièce finale

# Simulation numérique du procédé LPBF

## Formation du bain de fusion [3]

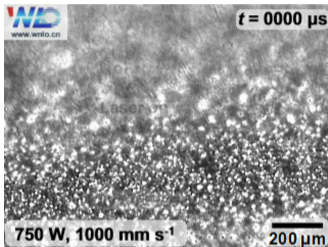


- Interaction laser – particules de poudre
- Phénomène de dénudation
- Forme de la zone fondue

## Physique du bain [3]

# Simulation numérique du procédé LPBF

## Formation du bain de fusion [3]

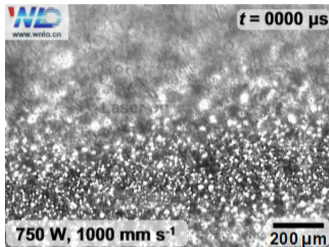


## Physique du bain [3]

- Interaction laser – particules de poudre
  - Phénomène de dénudation
  - Forme de la zone fondue
- ⇒ Écoulements thermocapillaires et changement de phase

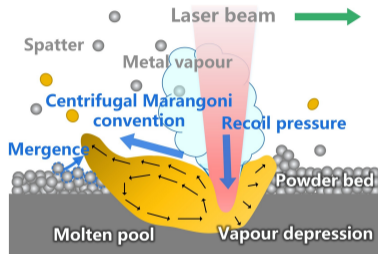
# Simulation numérique du procédé LPBF

## Formation du bain de fusion [3]



- Interaction laser – particules de poudre
  - Phénomène de dénudation
  - Forme de la zone fondue
- ⇒ Écoulements thermocapillaires et changement de phase

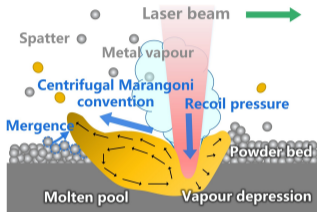
## Physique du bain [3]



- Transfert thermique; énergie laser, évaporation métallique
- Écoulement Fluide; tension de surface, effet Marangoni, pression de recul
- Changement de phase, solidification

# Objectif

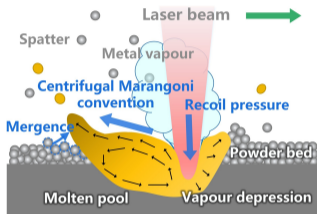
⇒ Physique du bain [3]



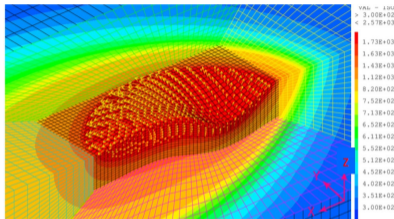
- Compréhension des phénomènes physiques

# Objectif

⇒ Physique du bain [3]



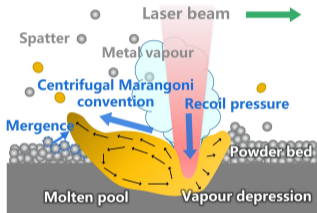
⇒ Simulation du Procédé [5]



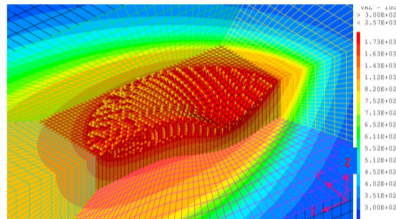
- Compréhension des phénomènes physiques
- Modélisation du bain de fusion sur Cast3m [4]

# Objectif

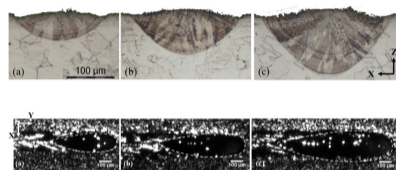
⇒ Physique du bain [3]



⇒ Simulation du Procédé [5]



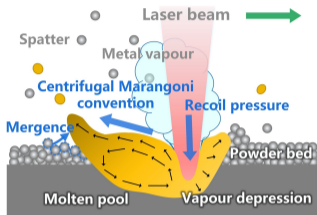
⇒ Dimensions du bain [6]



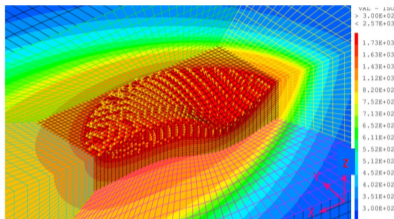
- Compréhension des phénomènes physiques
- Modélisation du bain de fusion sur Cast3m [4]
- Validation des résultats avec l'expérimental sur la FA d'acier 316L

# Objectif

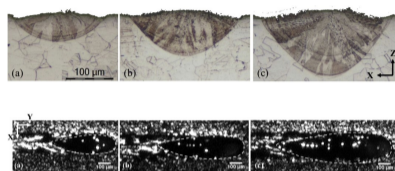
⇒ Physique du bain [3]



⇒ Simulation du Procédé [5]



⇒ Dimensions du bain [6]



- Compréhension des phénomènes physiques
- Modélisation du bain de fusion sur Cast3m [4]
- Validation des résultats avec l'expérimental sur la FA d'acier 316L
- Optimisation des paramètres du procédé : qualité, vitesse ...

Modélisation du bain sur Cast3m [4] ⇒ Mécanique des fluides, Transfert thermique et Changement de phase

# Outline

Contexte et objectif de l'étude

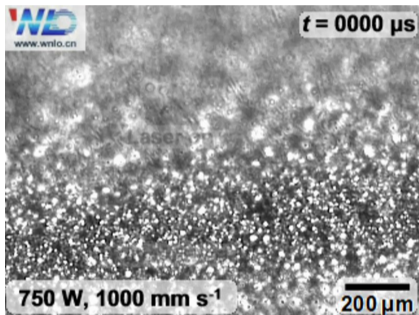
**Modélisation numérique des phénomènes multiphysiques dans le bain de fusion**

Analyse des résultats de la simulation

Conclusion et perspectives

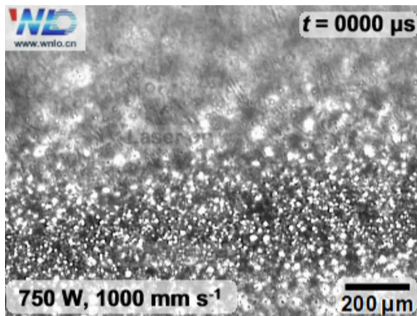


# Description de la multiphysique du bain

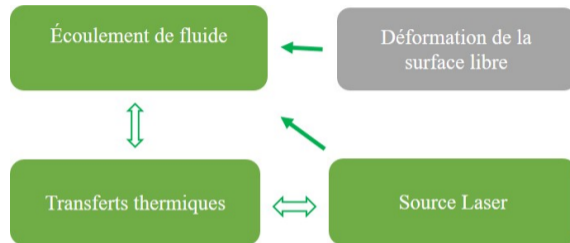


- Formation du bain [3]

# Description de la multiphysique du bain



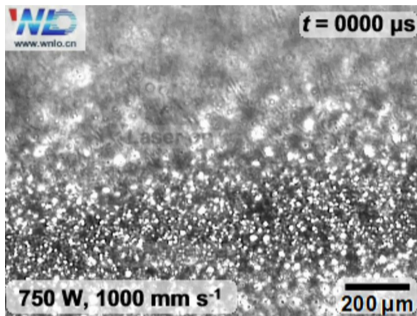
- Formation du bain [3]



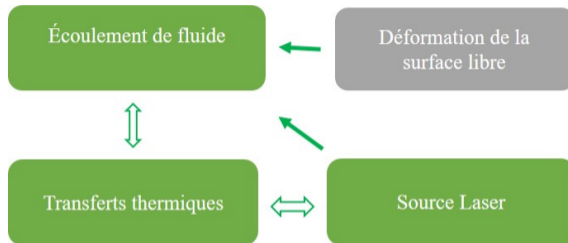
## ■ Hypothèses

- Régime Stationnaire
- Fluide Newtonien, écoulement incompressible et laminaire.
- Source laser gaussienne

# Description de la multiphysique du bain



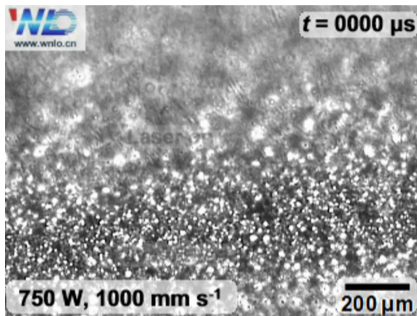
- Formation du bain [3]



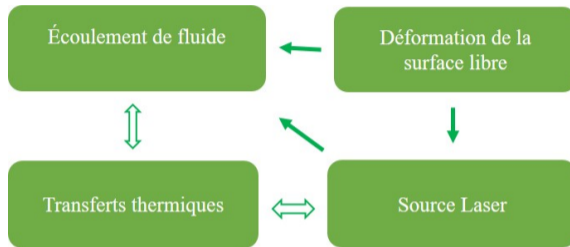
## ■ Hypothèses

- Régime Stationnaire
- Fluide Newtonien, écoulement incompressible et laminaire.
- Source laser gaussienne
- Prise en compte de la vaporisation [1]
- Modèle avec surface fixe

# Description de la multiphysique du bain



- Formation du bain [3]



## ■ Hypothèses

- Régime Stationnaire
- Fluide Newtonien, écoulement incompressible et laminaire.
- Source laser gaussienne
- Prise en compte de la vaporisation [1]
- Modèle avec surface fixe
- Modèle avec surface mobile

# Modèle Mathématique- Transfert thermique

## Équation de la chaleur

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

avec ;

- $\rho$ : masse volumique [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
- $\vec{u}$ : champ de vitesse [ $m \cdot s^{-1}$ ]
- $k$ : conductivité thermique [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
- $T$ : température [ $K$ ]

## Conditions limites à l'interface

$$k \vec{\nabla} T \cdot (-\vec{n}) = \boxed{I_{laser}} - \boxed{\dot{m} L_v}$$

- Source laser :  $I_{laser} = \frac{2\eta P}{\pi R_L^2} \exp(-2 \frac{r^2}{R_L^2})$
- avec ;  $\eta$ : coefficient d'absorption.  $P$ : puissance laser.  $R_L$ : rayon du laser.  $r$ : distance à l'axe optique.
- Flux d'évaporation :  $\dot{m} = (1 - \beta_R) \left( \frac{M}{2\pi RT} \right)^{0.5} \rho_{sat}(T)$
- avec ;
  - $\beta_R$ : Coefficient de rétro-diffusion
  - $M$ : Masse molaire [ $kg \cdot mol^{-1}$ ]
  - $L_v$ : Chaleur latente vaporisation [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

## Équations de Navier-Stokes

$$\rho(\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u} = \vec{\nabla} \cdot \underline{\underline{\sigma}} + \rho\vec{g} + \vec{f}_v$$
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$$

avec ;

$$\underline{\underline{\sigma}} = -p\underline{\underline{I}} + \mu[\vec{\nabla}\vec{u} + (\vec{\nabla}\vec{u})^T]$$

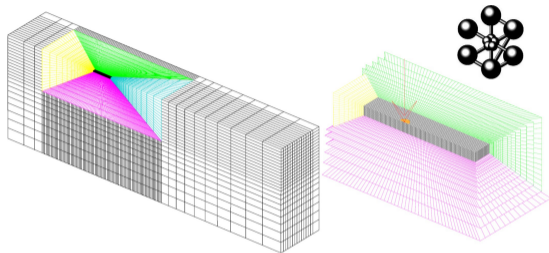
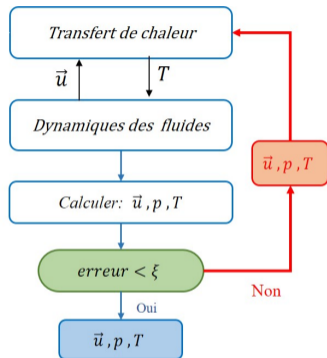
- $\rho$  : masse volumique [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
- $\mu$  : viscosité dynamique [ $Pa \cdot s^{-1}$ ]

## Conditions limites à l'interface

$$\underline{\underline{\sigma}} \cdot \vec{n} = -p_s \cdot \vec{n} + \vec{f}_{sur} + \vec{f}_{mar}$$

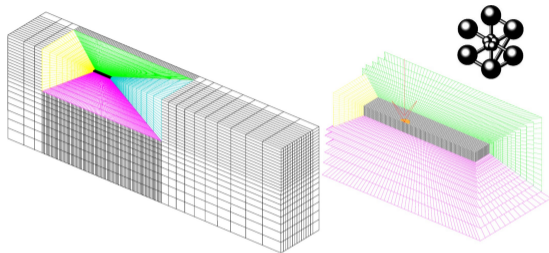
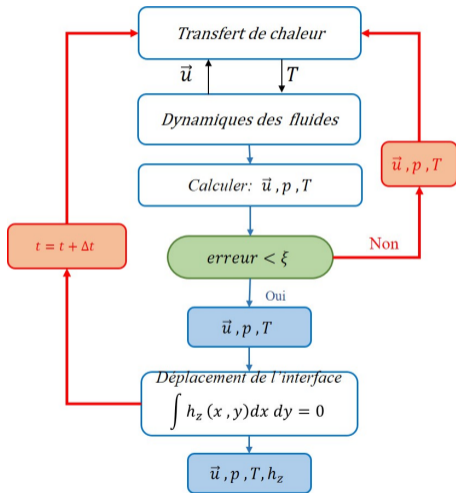
- Pression de recul :  $p_s = (\frac{1-\beta_R}{2})p_{sat}(T)$  avec  $p_{sat}(T)$  en [ $Pa$ ]
- Tension de surface :  $\vec{f}_{sur} = \gamma\kappa$
- Marangoni :  $\vec{f}_{mar} = \frac{\partial\gamma}{\partial T}\vec{\nabla}T$ 
  - Marangoni négatif :  $\frac{\partial\gamma}{\partial T} = -1 \cdot 10^{-4}$
  - Marangoni positive:  $\frac{\partial\gamma}{\partial T} = 1 \cdot 10^{-4}$
  - Loi de Sahoo :  $\gamma = \gamma(T, a_k)$  avec concentration en soufre 30 ppm

# Modélisation Numérique du bain de fusion



- Les paramètres physique du procédé
  - Paramètres Laser:  $P=320$  W,  $R_L = 75\mu\text{m}$ ,  $V= 250$  mm/s et  $\eta = 0.6$
  - Paramètres matériaux acier 316L
- Modélisation thermique-fluide EF Cast3M
- Maillage fin de la zone du bain ( 99599 éléments)
- Source laser gaussienne

# Modélisation Numérique du bain de fusion



- Les paramètres physique du procédé
  - Paramètres Laser:  $P=320$  W,  $R_L = 75\mu\text{m}$ ,  $V= 250$  mm/s et  $\eta = 0.6$
  - Paramètres matériaux acier 316L
- Modélisation thermique-fluide EF Cast3M
- Maillage fin de la zone du bain ( 99599 éléments)
- Source laser gaussienne

# Outline

Contexte et objectif de l'étude

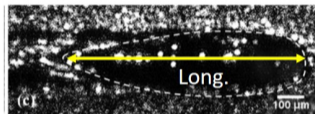
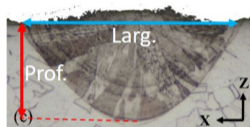
Modélisation numérique des phénomènes multiphysiques dans le bain de fusion

**Analyse des résultats de la simulation**

Conclusion et perspectives

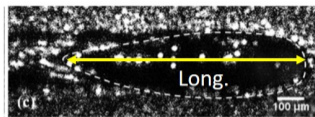
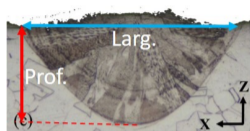


# Influence de l'évaporation sur le bain ( $k \vec{\nabla} T \cdot (-\vec{n}) = I_{laser}$ )

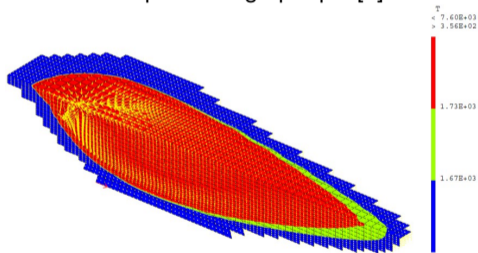


Coupe macrographique [6]

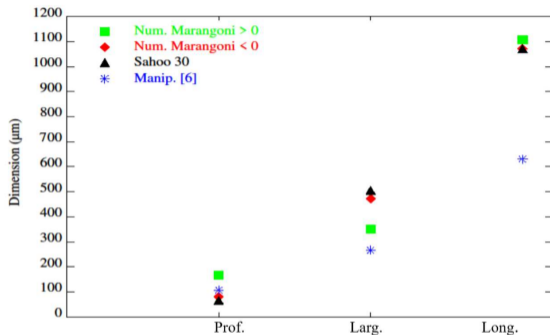
# Influence de l'évaporation sur le bain ( $k \vec{\nabla} T \cdot (-\vec{n}) = I_{laser}$ )



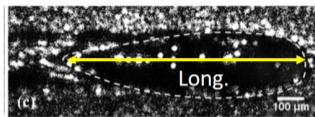
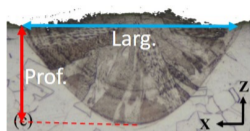
Coupe macrographique [6]



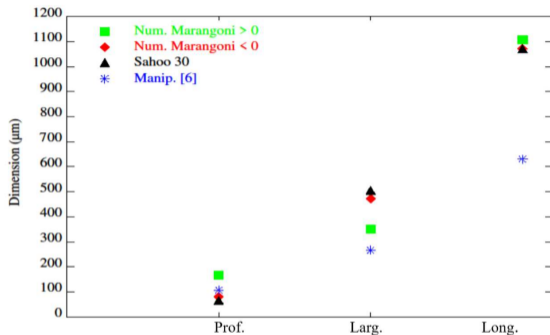
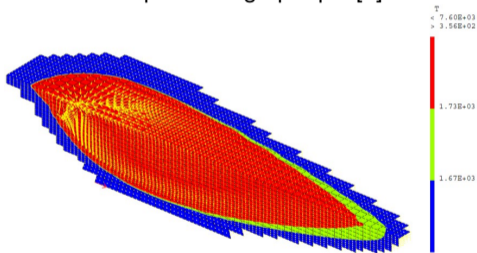
- ⊗ Marangoni > 0 ; Prof. ↗, Long. ↗, Larg. ↘
- ⊗ Marangoni < 0 ; Prof. proche de l'Exp.



# Influence de l'évaporation sur le bain ( $k \vec{\nabla} T \cdot (-\vec{n}) = I_{laser}$ )

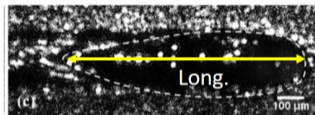
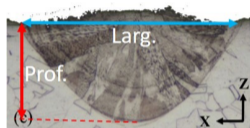


Coupe macrographique [6]



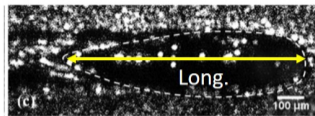
- ⊗ Marangoni > 0 ; Prof. ↗, Long. ↗, Larg. ↘
- ⊗ Marangoni < 0 ; Prof. proche de l'Exp.
- ⊗ Sans vaporisation, les résultats sont globalement médiocres

Influence de l'évaporation sur le bain ( $k \vec{\nabla} T \cdot (-\vec{n}) = I_{laser} - \dot{m} L_v$ )

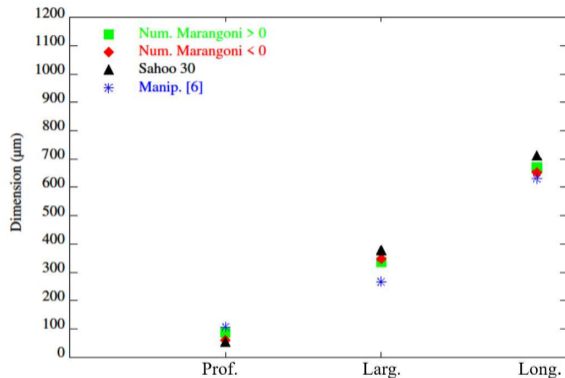
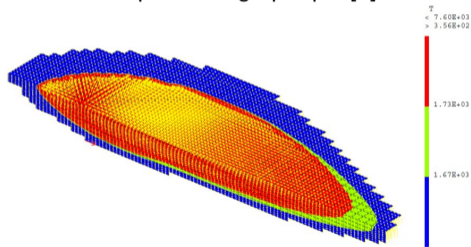


Coupe macrographique [6]

# Influence de l'évaporation sur le bain ( $k \vec{\nabla} T \cdot (-\vec{n}) = I_{laser} - \dot{m} L_v$ )

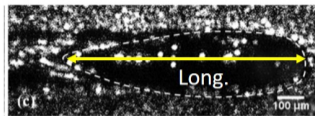
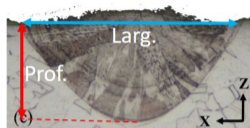


Coupe macrographique [6]

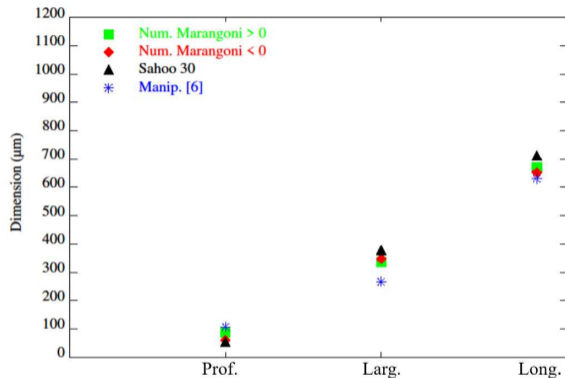
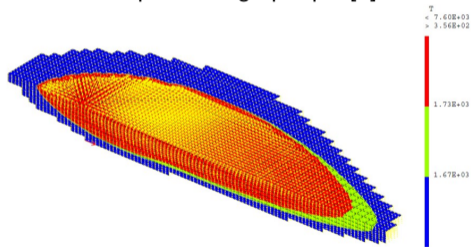


- \* Influence de la vaporisation sur la forme du bain
- \* Superposition entre les résultats numériques et expérimentaux

# Influence de l'évaporation sur le bain ( $k \vec{\nabla} T \cdot (-\vec{n}) = I_{laser} - \dot{m} L_v$ )



Coupe macrographique [6]



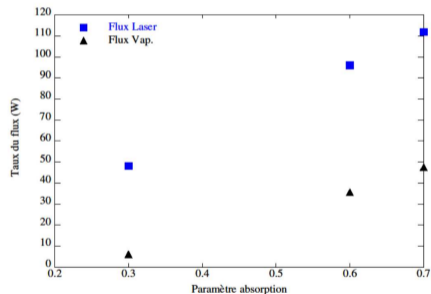
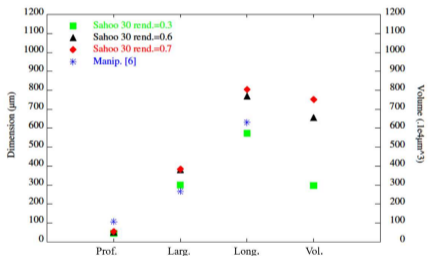
- ⊗ Influence de la vaporisation sur la forme du bain
- ⊗ Superposition entre les résultats numériques et expérimentaux
- ✓ Validation du modèle

# Influence du paramètre d'absorption $\eta$

- Source Laser ;  $I_{laser} = \frac{2\eta P}{\pi R_L^2} \exp(-2 \frac{r^2}{R_L^2})$
- paramètres; P= 320 W, D= 150 $\mu$ m, V= 250 mm/s

# Influence du paramètre d'absorption $\eta$

- Source Laser ;  $I_{laser} = \frac{2\eta P}{\pi R_L^2} \exp(-2 \frac{r^2}{R_L^2})$
- paramètres; P= 320 W, D= 150 $\mu$ m, V= 250 mm/s

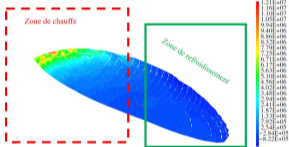
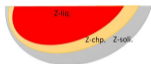


- Volume et longueur du bain sont impactés par la valeur de  $\eta$
- Peu d'influence de  $\eta$  sur l'énergie absorbée

# Évaluation de la vitesse de refroidissement dans le bain de fusion

- La vitesse de refroidissement dans le bain [K/s]:

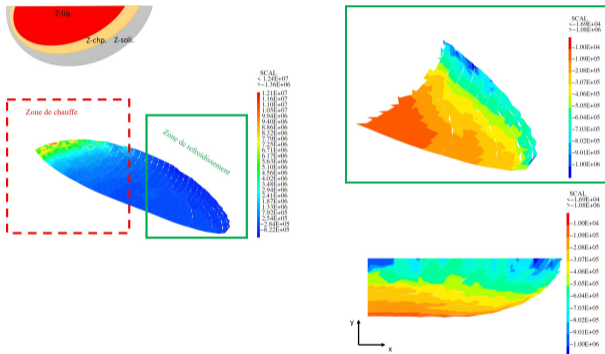
$$\dot{T} = \vec{\nabla} T \cdot \vec{v}$$



# Évaluation de la vitesse de refroidissement dans le bain de fusion

- La vitesse de refroidissement dans le bain [K/s]:

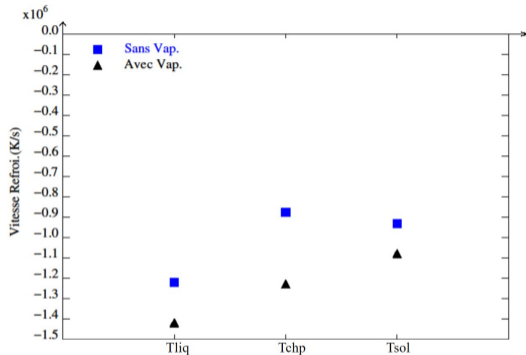
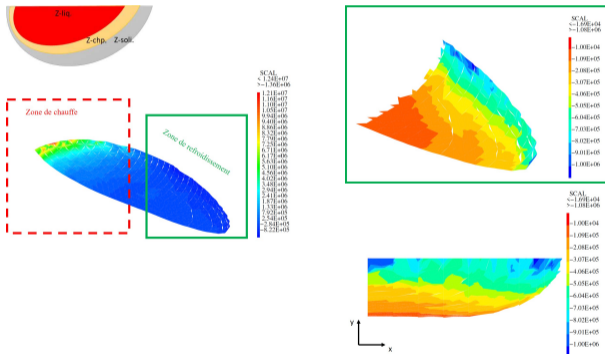
$$\dot{T} = \vec{\nabla} T \cdot \vec{v}$$



# Évaluation de la vitesse de refroidissement dans le bain de fusion

- La vitesse de refroidissement dans le bain [K/s]:

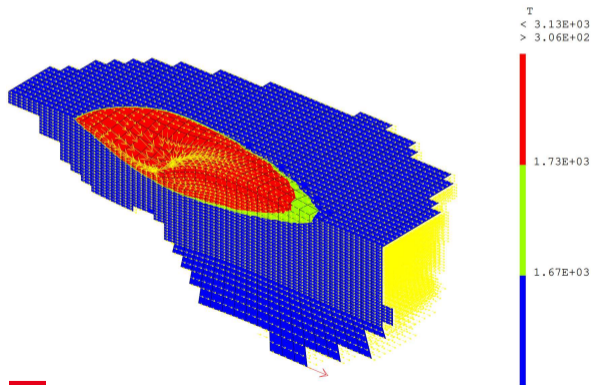
$$\dot{T} = \vec{\nabla} T \cdot \vec{v}$$



- Estimation des vitesses de refroidissements dans le bain
- Vitesse de refroidissement rapide dans le cas sans vap.

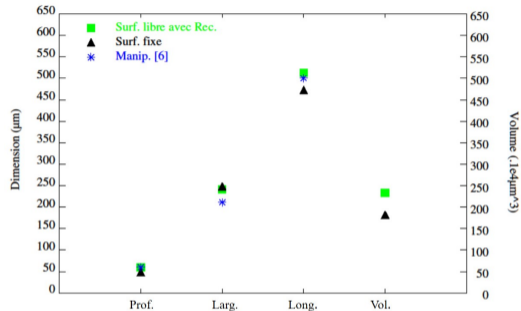
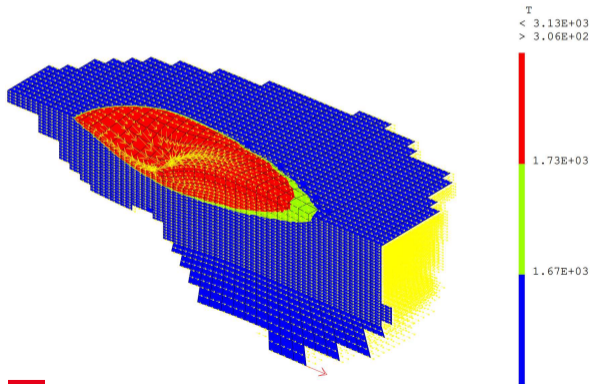
# Modélisation du bain de fusion avec surface déformée

- Paramètres Laser:  $P=320$  W,  $D= 150\mu m$ ,  $V= 400$  mm/s et  $\eta = 0.3$
- Condition à l'interface:  $\underline{\underline{\sigma}} \cdot \vec{n} = -p_s \cdot \vec{n} + \vec{f}_{sur} + \vec{f}_{mar}$
- Surface mobile



# Modélisation du bain de fusion avec surface déformée

- Paramètres Laser:  $P=320$  W,  $D= 150\mu m$ ,  $V= 400$  mm/s et  $\eta = 0.3$
- Condition à l'interface:  $\underline{\underline{\sigma}} \cdot \vec{n} = -p_s \cdot \vec{n} + \vec{f}_{sur} + \vec{f}_{mar}$
- Surface mobile

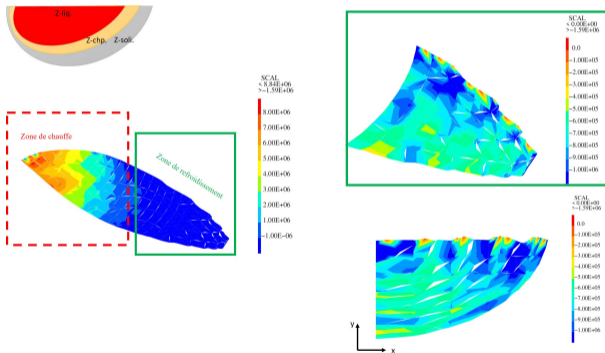


- Validation des calculs de la surface déformée avec une vitesse laser de  $v = 400$  mm/s.
- Vitesse moins rapide , modèle non convergent

# Solidification dans le bain de fusion avec surface libre

- La vitesse de refroidissement dans le bain [K/s]:

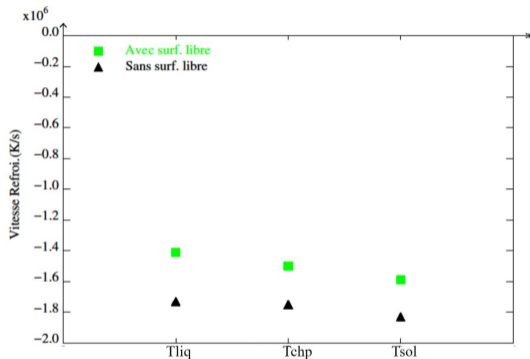
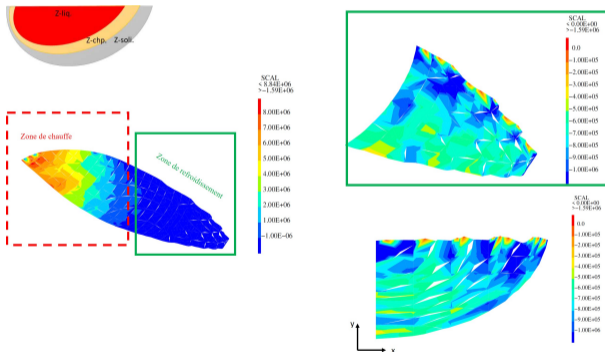
$$\dot{T} = \vec{\nabla} T \cdot \vec{v}$$



# Solidification dans le bain de fusion avec surface libre

- La vitesse de refroidissement dans le bain [K/s]:

$$\dot{T} = \vec{\nabla} T \cdot \vec{\nu}$$



- Influence de la surface déformée sur la valeur de la vitesse de refroidissement dans le bain

# Outline

Contexte et objectif de l'étude

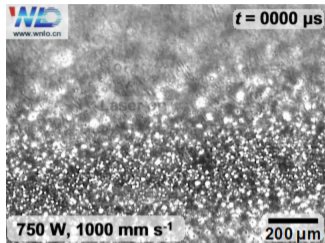
Modélisation numérique des phénomènes multiphysiques dans le bain de fusion

Analyse des résultats de la simulation

**Conclusion et perspectives**

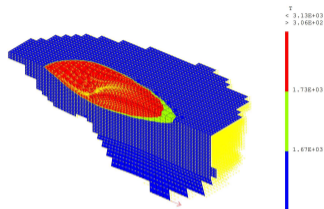
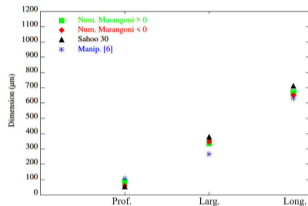
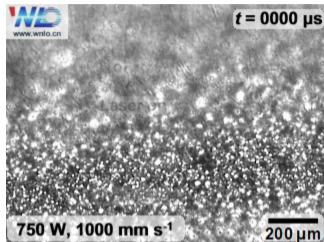


# Conclusion et perspectives



✓ Modélisation numérique du bain de fusion sur Cast3m

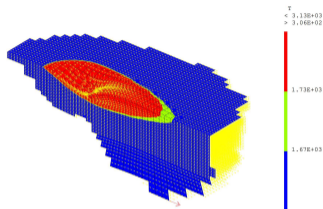
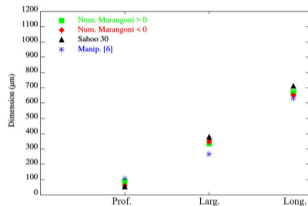
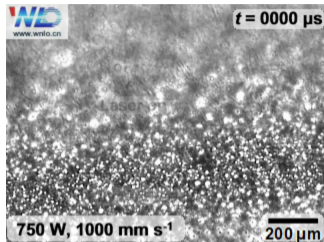
# Conclusion et perspectives



## ✓ Modélisation numérique du bain de fusion sur Cast3m

- ✓ Prise en compte du couplage entre l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur
- ✓ Validation du modèle avec prise en compte de vaporisation
- ✓ Influence du paramètre d'absorption  $\eta$  sur les dimensions du bain et sur le taux d'énergie absorbée
- ✓ Estimation de la vitesse de refroidissement dans le bain
- ✓ Prise en compte de la pression de recul dans le calcul de la surface libre

# Conclusion et perspectives



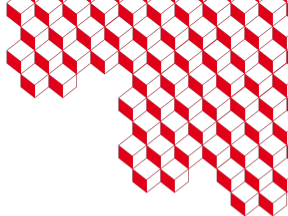
- ✓ Modélisation numérique du bain de fusion sur Cast3m
  - ✓ Prise en compte du couplage entre l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur
  - ✓ Validation du modèle avec prise en compte de vaporisation
  - ✓ Influence du paramètre d'absorption  $\eta$  sur les dimensions du bain et sur le taux d'énergie absorbée
  - ✓ Estimation de la vitesse de refroidissement dans le bain
  - ✓ Prise en compte de la pression de recul dans le calcul de la surface libre
- ✓ Amélioration du modèle de la surface libre et calculer avec de vitesse moins rapide
- ✓ Application du modèle pour modéliser d'autre matériaux



- [1] P. Bidare, I. Bitharas, R. Ward, M. Attallah, and A. Moore, “Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion,” *Acta Materialia*, vol. 142, pp. 107–120, 2018.
- [2] J. Wang, R. Zhu, Y. Liu, and L. Zhang, “Understanding melt pool characteristics in laser powder bed fusion: An overview of single- and multi-track melt pools for process optimization,” vol. 2, no. 4, p. 100137.
- [3] J. Yin, D. Wang, L. Yang, H. Wei, P. Dong, L. Ke, G. Wang, H. Zhu, and X. Zeng, “Correlation between forming quality and spatter dynamics in laser powder bed fusion,” *Additive Manufacturing*, vol. 31, p. 100958, 2020.
- [4] Cast3m, “Cast3m web site, <http://www-cast3m.cea.fr>.”
- [5] M. C. Nguyen, *Modélisation et simulation multiphysique du bain de fusion en soudage à l’arc TIG*. PhD thesis, CEA, Université d’Aix Marseille I, 2015.
- [6] A. Baumard, *Prédiction des structures de grain d’un composant en acier 316L élaboré par fabrication additive fusion laser sur lit de poudre*. PhD thesis, CEA, Université Montpellier, 2020.



isas



## Club Cast3m 2023

# Modélisation des bains de fusion pour le procédé de fusion sur lit de poudre

novembre 2023

Dihya MEZI ([dihya.mezi@cea.fr](mailto:dihya.mezi@cea.fr))

Stéphane GOUNAND<sup>1</sup>, Guilhem ROUX<sup>2</sup>, Jean-Paul GARANDET<sup>2</sup>, Hicham MASKROT<sup>3</sup>

<sup>1</sup> DES/ISAS/DRMP/SRMA/LTA, CEA SACLAY, 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX

<sup>2</sup> DRT/LITEN/STNM/SA3D/L3M, CEA GRENOBLE, 38000 GRENOBLE

<sup>3</sup> DES/ISAS/DRMP/SRMA/LISL, CEA SACLAY, 91191 GIF SUR YVETTE CEDEX