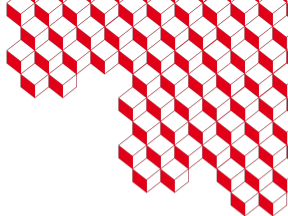




isas



## 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

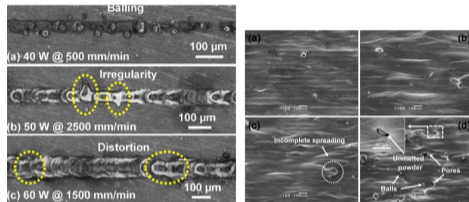
# Contexte de l'étude

## 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

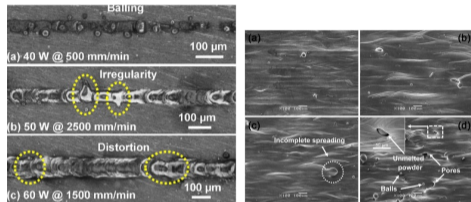
# Contexte de l'étude

## 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]

## Physique du bain [3]

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



# 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

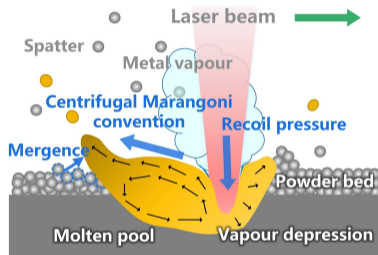
⇒ Écoulements thermocapillaires et changement de phase

# 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

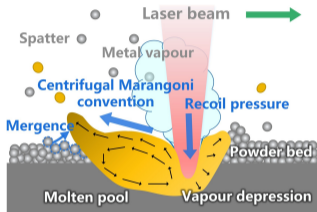
## Physique du bain [3]



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

# Objectif

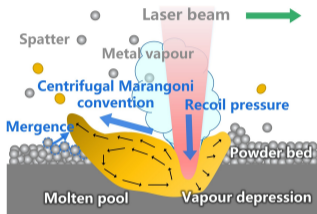
⇒ Physique du bain [3]



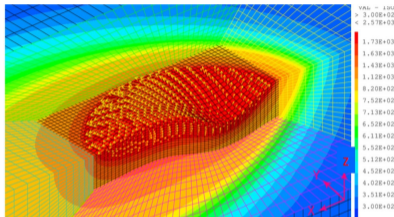
- Compréhension des phénomènes physiques

# Objectif

⇒ Physique du bain [3]



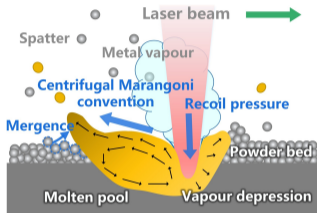
⇒ Simulation du Procédé [5]



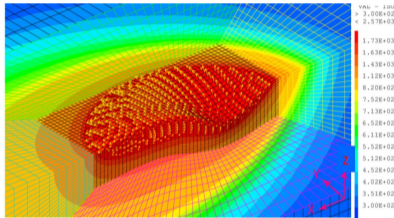
- Compréhension des phénomènes physiques
- Modélisation du bain de fusion sur Cast3m [4]

# Objectif

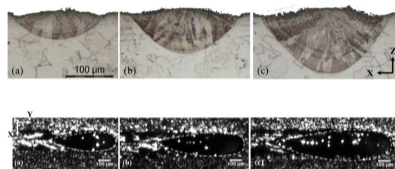
⇒ Physique du bain [3]



⇒ Simulation du Procédé [5]



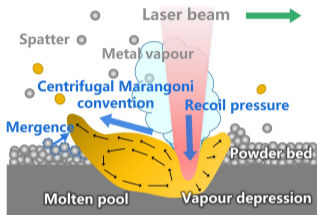
⇒ Dimensions du bain [6]



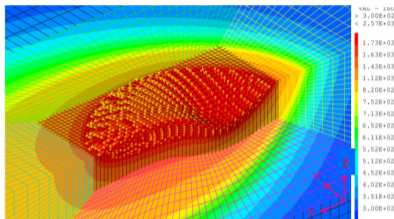
- Compréhension des phénomènes physiques
- Modélisation du bain de fusion sur Cast3m [4]
- Validation des résultats avec l'expérimental sur la FA d'acier 316L

# Objectif

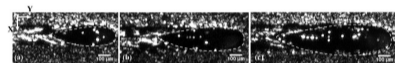
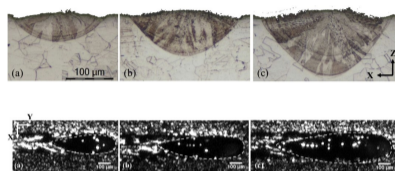
⇒ Physique du bain [3]



⇒ 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



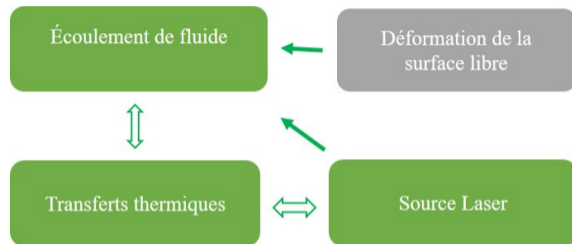
# Description de la multiphysique du bain



- Formation du bain [3]



# Description de la multiphysique du bain

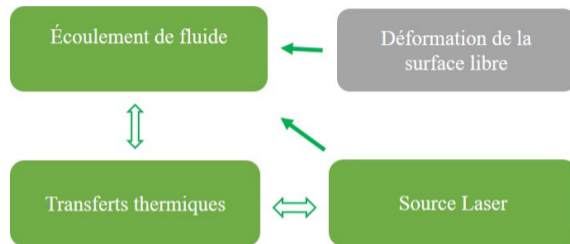


## ■ Formation du bain [3]

### ■ Hypothèses

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

# Description de la multiphysique du bain

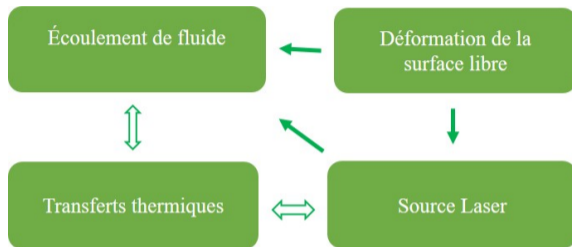


## ■ Formation du bain [3]

### ■ 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 ;

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

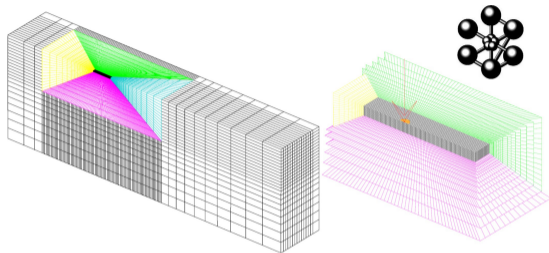
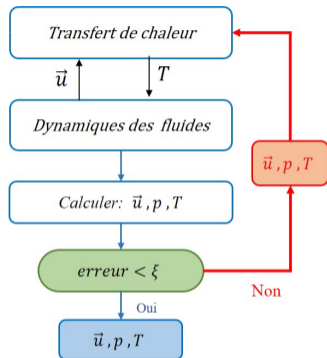
- $\rho$  : masse volumique [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
- $\mu$  : viscosité dynamique [ $Pa \cdot s^{-1}$ ]

## Conditions limites à l'interface

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

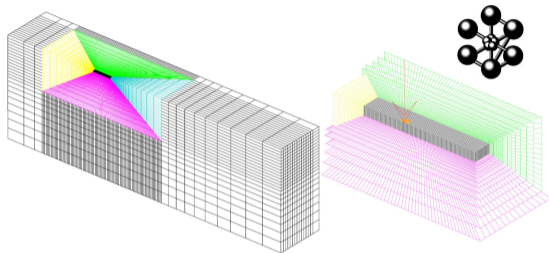
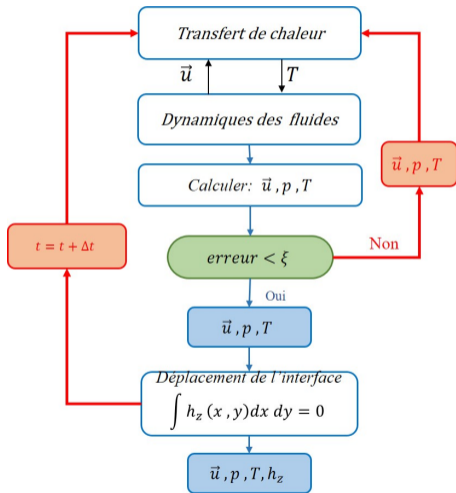
- Pression de recul :  $p_s = (\frac{1-\beta_R}{2})p_{sat}(T)$  avec  $p_{sat}(T)$  en [ $Pa$ ]
- Tension de surface :  $\vec{f}_{sur} = \gamma\kappa$
- Marangoni :  $\vec{f}_{mar} = \frac{\partial\gamma}{\partial T}\vec{\nabla}T$ 
  - Marangoni négatif :  $\frac{\partial\gamma}{\partial T} = -1 \cdot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

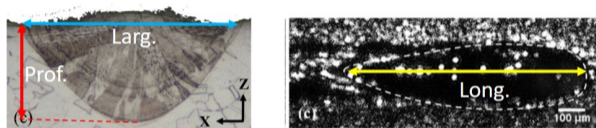
**Analyse des résultats de la simulation**

Conclusion et perspectives



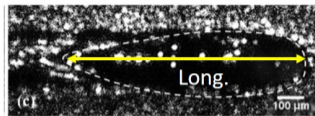
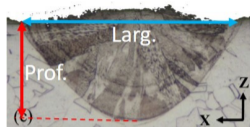


# Influence de l'évaporation sur le bain ( $k \vec{\nabla} T \cdot (-\vec{n}) = I_{laser}$ )

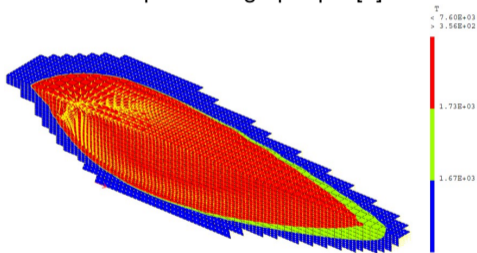


Coupe macrographique [6]

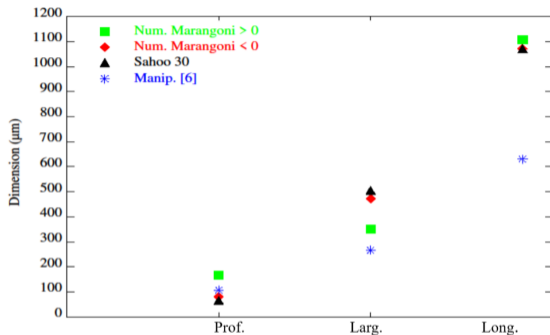
# Influence de l'évaporation sur le bain ( $k \vec{\nabla} T \cdot (-\vec{n}) = I_{laser}$ )



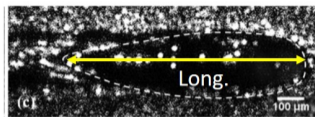
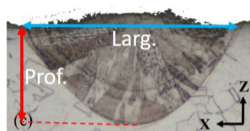
Coupe macrographique [6]



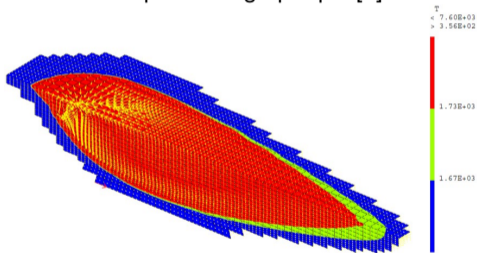
- ⊗ Marangoni > 0 ; Prof. ↗, Long. ↗, Larg. ↘
- ⊗ Marangoni < 0 ; Prof. proche de l'Exp.



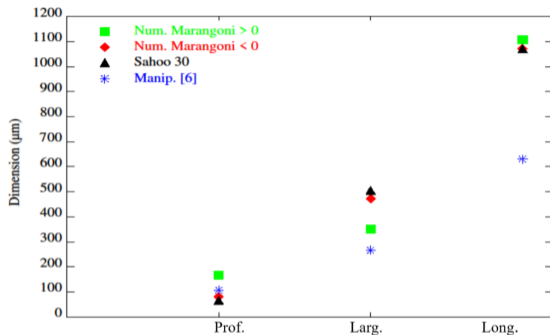
# Influence de l'évaporation sur le bain ( $k \vec{\nabla} T \cdot (-\vec{n}) = I_{laser}$ )



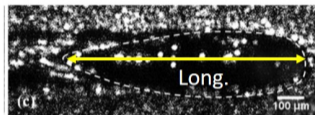
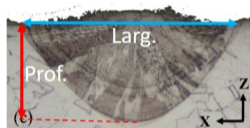
Coupe macrographique [6]



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

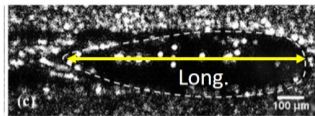


Influence de l'évaporation sur le bain ( $k \vec{\nabla} T \cdot (-\vec{n}) = I_{laser} - \dot{m} L_v$ )

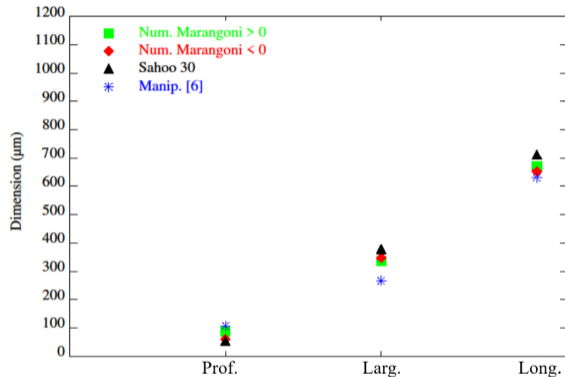
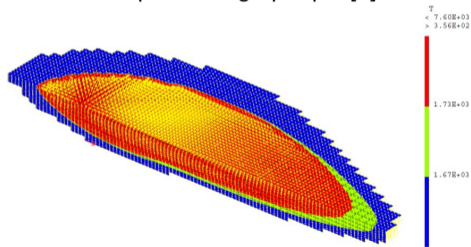


Coupe macrographique [6]

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

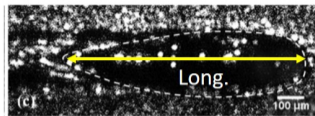


Coupe macrographique [6]

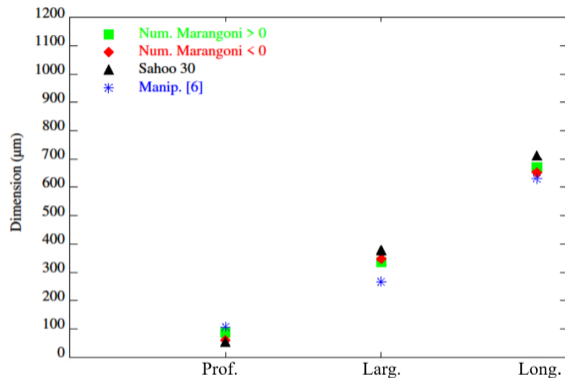
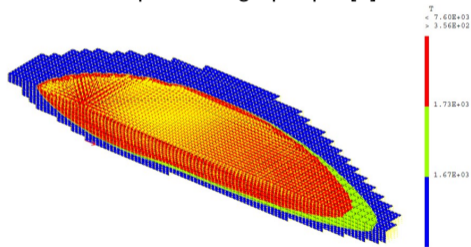


- ⊗ Influence de la vaporisation sur la forme du bain
- ⊗ Superposition entre les résultats numériques et expérimentaux

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



Coupe macrographique [6]



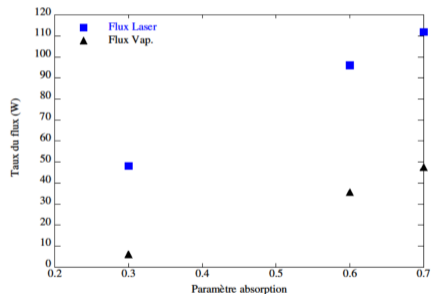
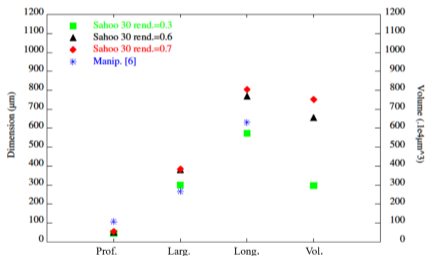
- ⊗ Influence de la vaporisation sur la forme du bain
- ⊗ Superposition entre les résultats numériques et expérimentaux
- ✓ Validation du modèle

# 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



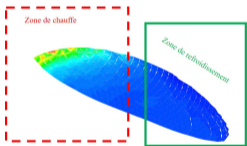
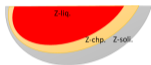
- Volume et longueur du bain sont impactés par la valeur de  $\eta$
- Peu d'influence de  $\eta$  sur l'énergie absorbée



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

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

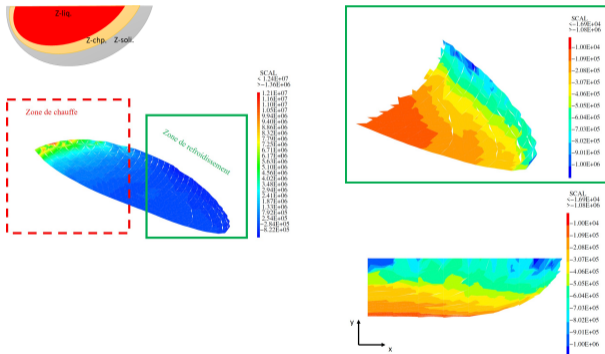
$$\dot{T} = \vec{\nabla} T \cdot \vec{v}$$



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

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

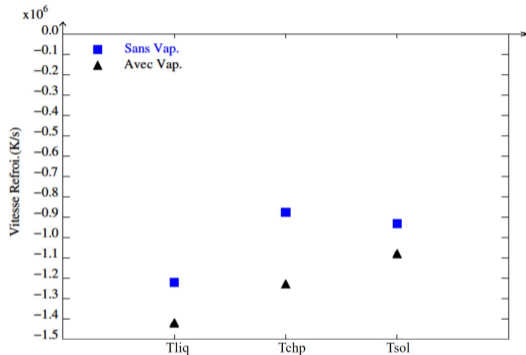
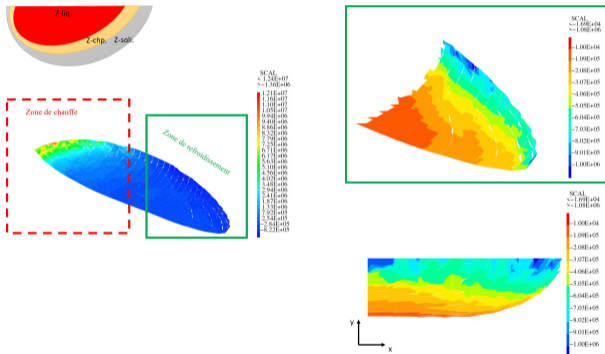
$$\dot{T} = \vec{\nabla} T \cdot \vec{v}$$



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

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

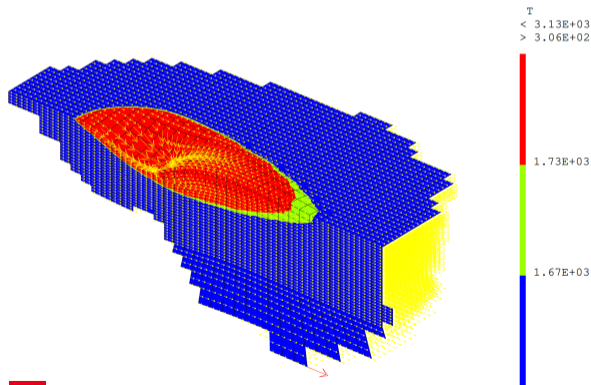
$$\dot{T} = \vec{\nabla} T \cdot \vec{v}$$



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

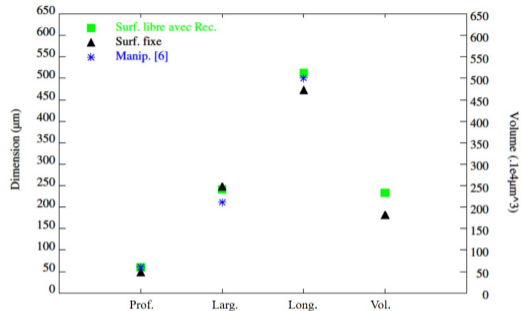
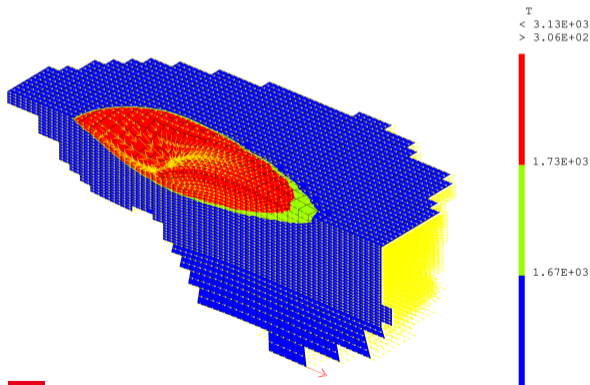
# Modélisation du bain de fusion avec surface déformée

- 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

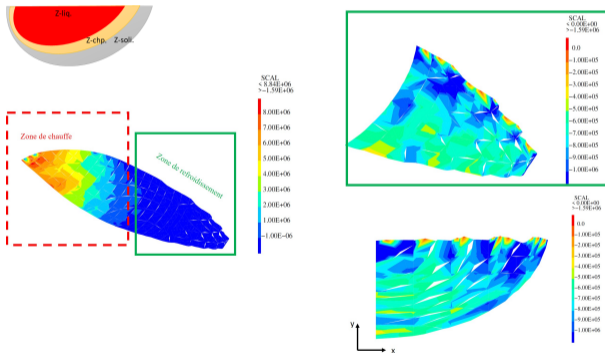


- Validation des calculs de la surface déformée avec une vitesse laser de  $v = 400$  mm/s.
- Vitesse moins rapide , modèle non convergent

# Solidification dans le bain de fusion avec surface libre

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

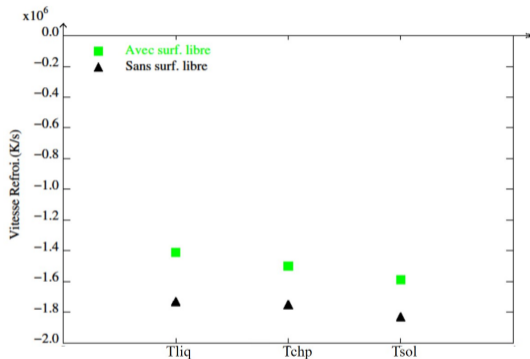
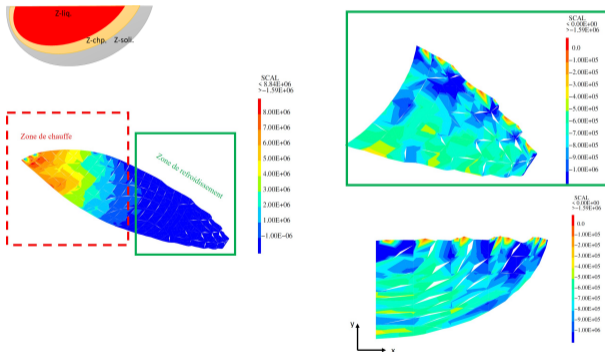
$$\dot{T} = \vec{\nabla} T \cdot \vec{v}$$



# 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**

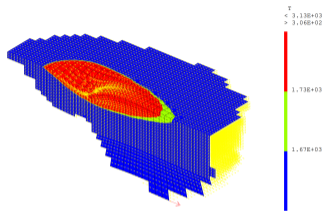
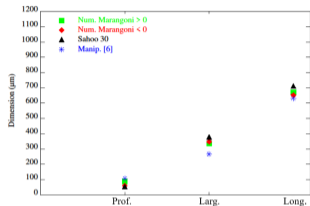




# Conclusion et perspectives

✓ Modélisation numérique du bain de fusion sur Cast3m

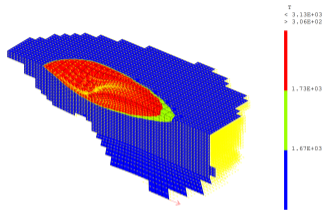
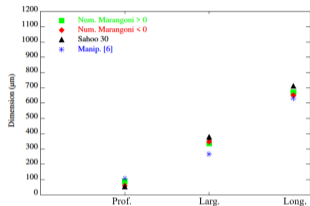
# Conclusion et perspectives



## ✓ 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



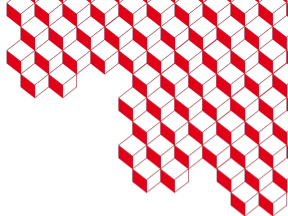
- ✓ Modélisation numérique du bain de fusion sur Cast3m
  - ✓ Prise en compte du couplage entre l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur
  - ✓ Validation du modèle avec prise en compte de vaporisation
  - ✓ Influence du paramètre d'absorption  $\eta$  sur les dimensions du bain et sur le taux 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