

# Compréhension et simulation de l'interaction physique laser-matière en SLM et du jet de poudre en DMD

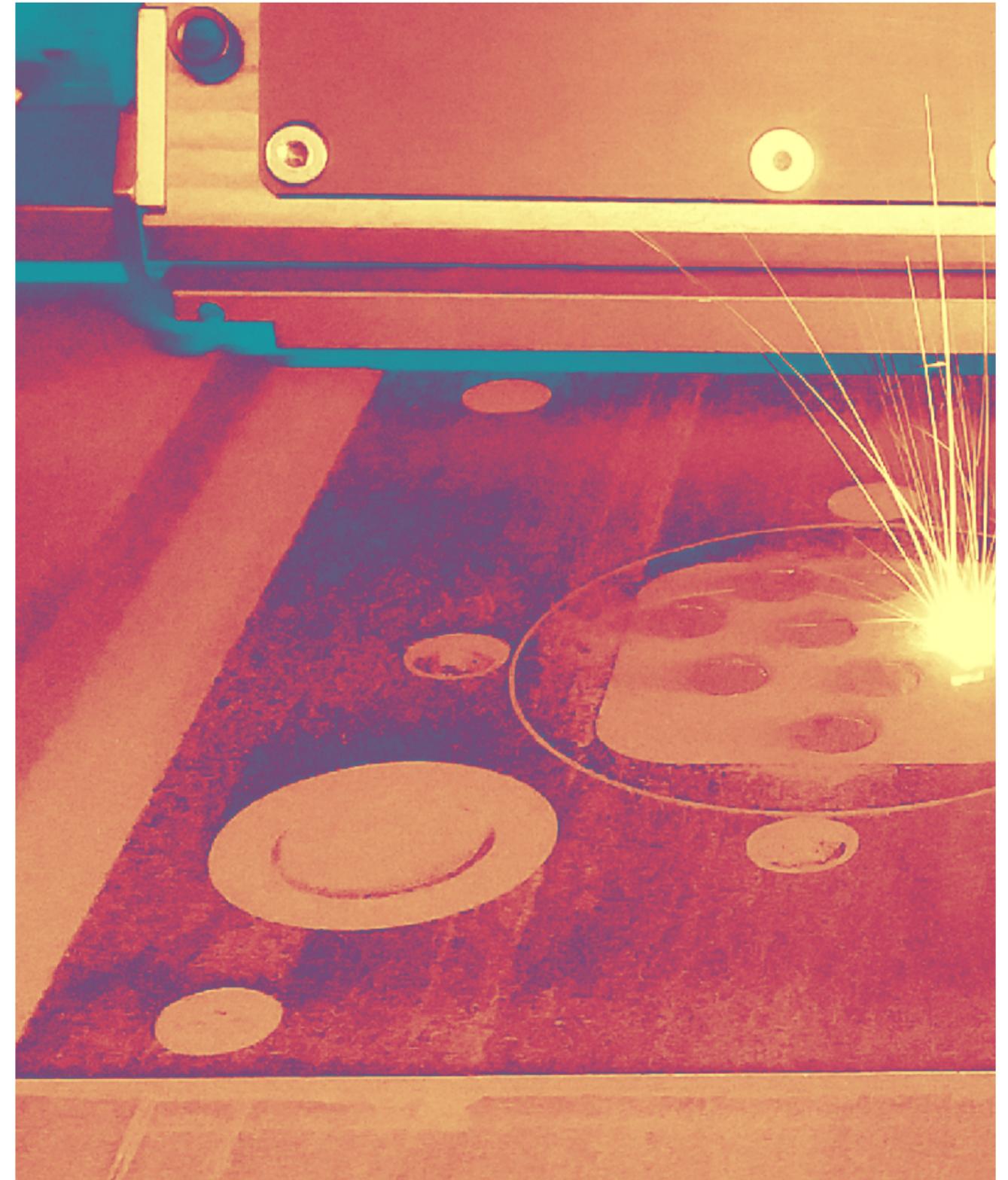
Morgan Dal

PIMM-ENSAM



# SOMMAIRE

1. Introduction
2. Historique
3. Analyse Numérique / Simulation
4. Conclusion



# 1. Introduction

Deux procédés :

1. SLM

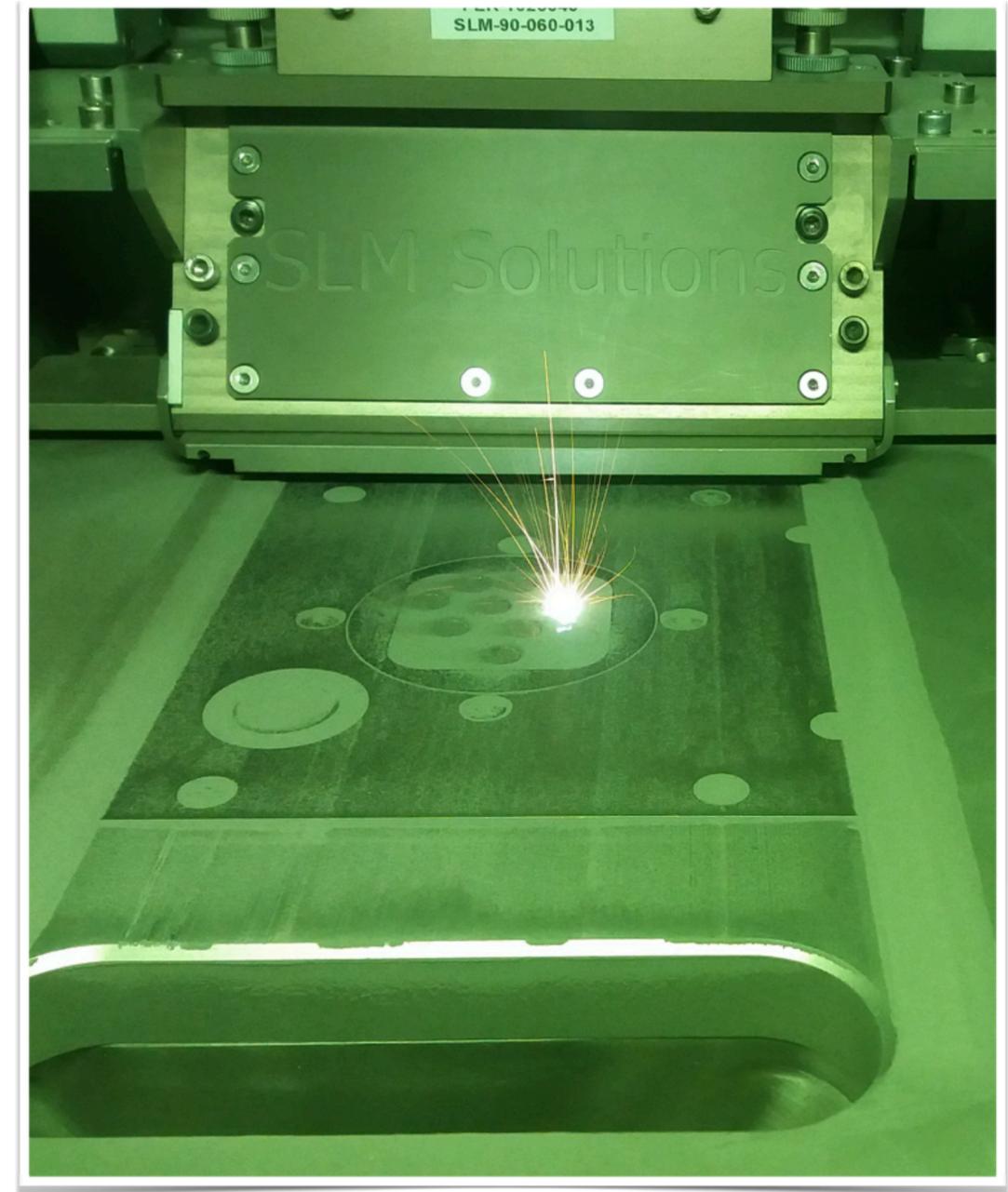
2. DMD

Petites pièces (< 20 cm)

Meilleurs états de surface

Moins de problèmes d'angles limites de fabrication

Pièces plus complexes



# 1. Introduction

Deux procédés :

1. SLM
2. DMD

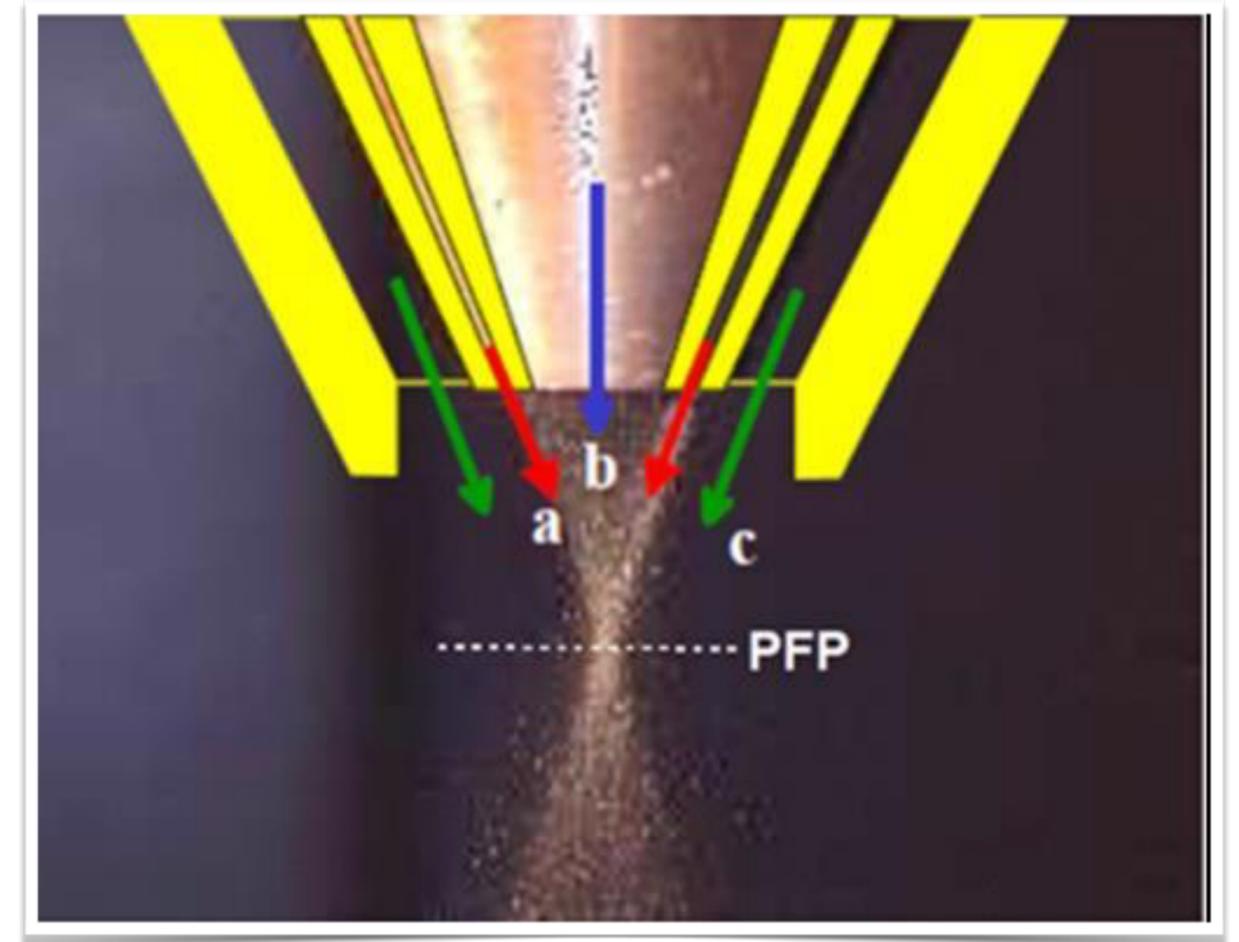
$5 \text{ mm} < L < 1 \text{ m}$

Nécessité de ré-usinage des pièces

Procédé plus rapide

Pièces massives

Possibilité de réaliser des gradients de matériaux



# 2. Historique

Les études / thèses récentes et à venir :

|                                 |                       |
|---------------------------------|-----------------------|
| 2013 : (D. Defauchy)            | Polymère              |
| 2013 : M. Gharbi / S. Morville  | Rugosité              |
| 2014 : R. Mezari                | Commande              |
| 2015 : S. Pouzet                | Composite             |
| 2017 : E. Abouda                | Matériaux durs        |
| -                               |                       |
| 2018 : V. Gunenthiram (juillet) | Porosités             |
| -                               |                       |
| 2019 : O. Andreau               | Fatigue               |
| 2019 : T. De Terris             | Microcanaux           |
| 2020 : E. Ferreira              | Maîtrise paramétrique |
| 2020 : Y. Mayi                  | Simulation            |
| 2020 : S. Traore                | Gaz                   |

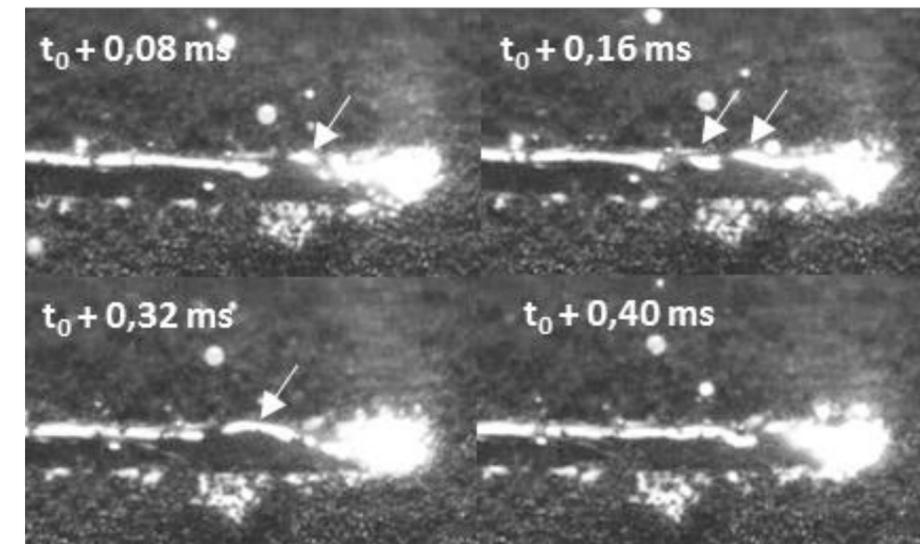
# 3.1 Analyse numérique : SLM



Compréhension et simulation des phénomènes affectant la fabrication en SLM

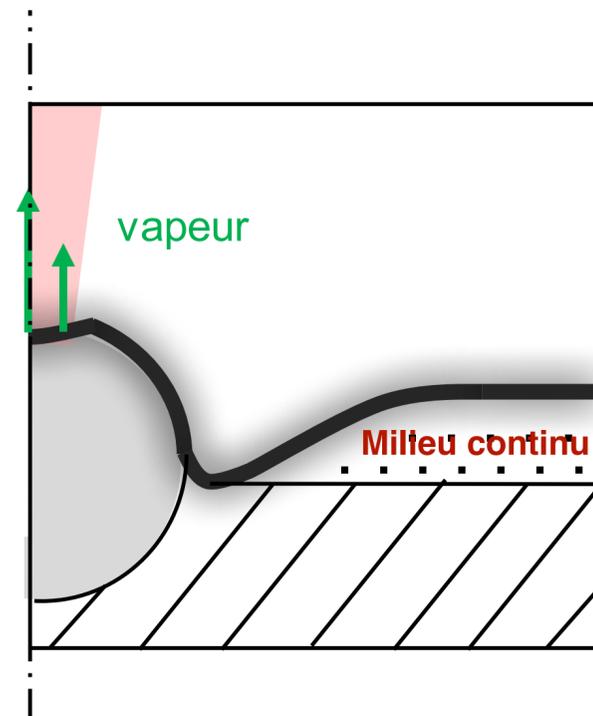
Yaasin Mayi

« Simuler finement la zone d'interaction laser matière »



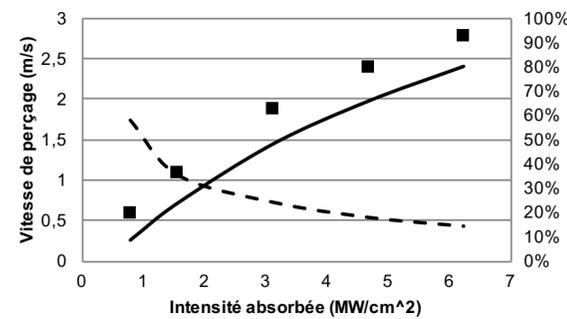
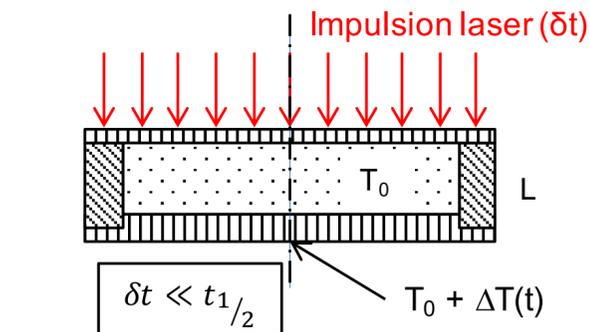
# 3.1 Analyse numérique : SLM

## 2D Axisymétrique



- Mise en donnée du problème
- Validation des hypothèses
- Choix numérique

## Modèles locaux



■ COMSOL — Piston - - Epsilon

### • Quel(s) mécanisme(s) de densification ?

- Fusion/coalescence des grains de poudre
- Evacuation du gaz interstitiel (dégazage).

### • Comment le caractériser ?

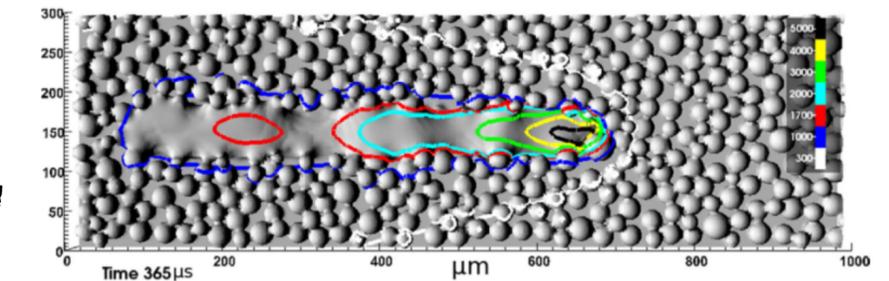
- Notion de potentiel de densification – Kolossov et al. (2004)

$$P = 1 - \exp \left[ - \int_0^t \zeta(r(x,s)) ds \right]$$

avec  $\zeta(t)$  la vitesse frittage et  $P \in [0;1]$

→ Comment déterminer  $\zeta(t)$  ??

## 3D mono-cordon



Saad A. Khairallah\*, Andrew T. Anderson, Alexander Rubenchik, Wayne E. King, Acta Materialia 108 (2016) 36-45

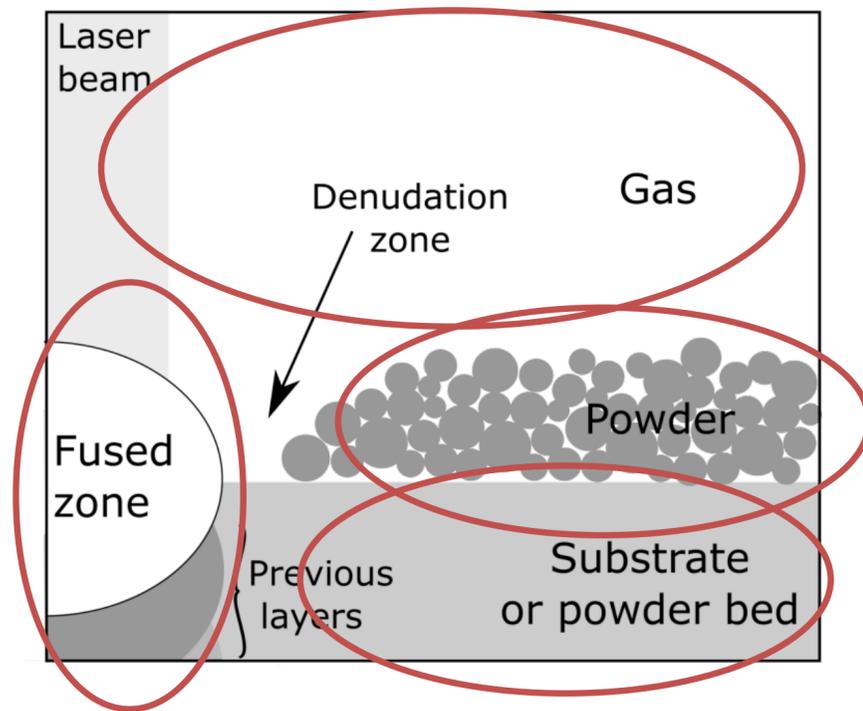
- Dimensions de ZF
- Instabilités
- Optimisation

## 3D multi-cordon

Cemef

# 3.1 Analyse numérique : SLM

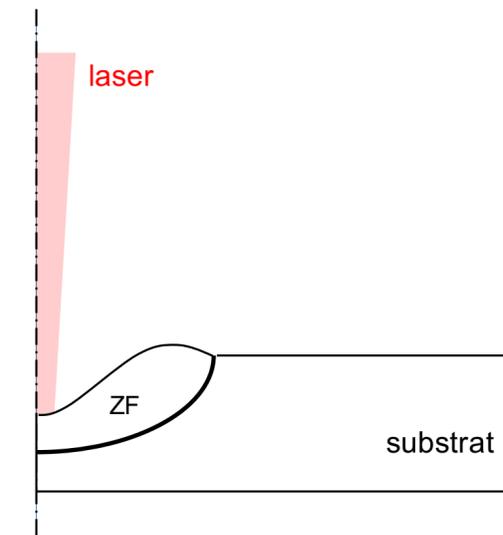
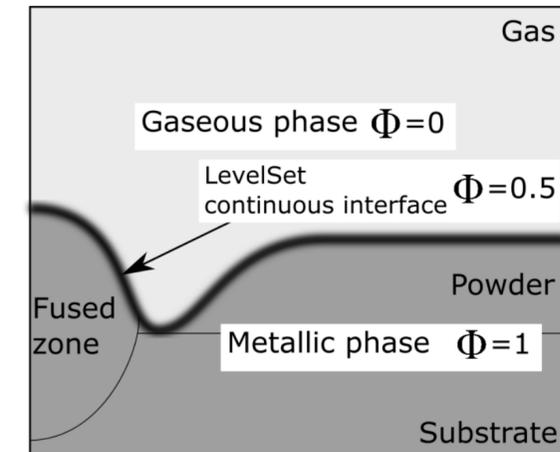
Un problème multiphysique et multiphasique :



Description Eulerienne



Description Lagrangienne



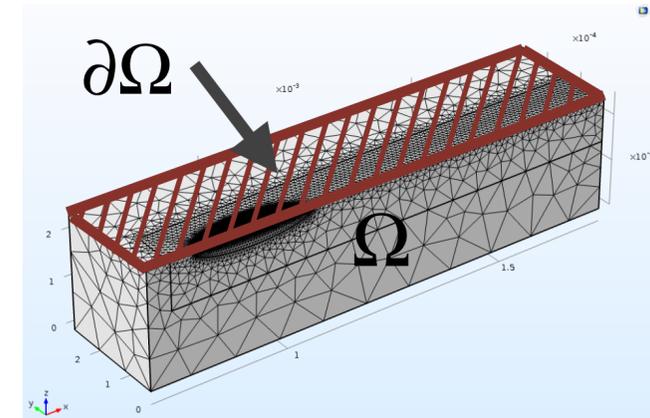
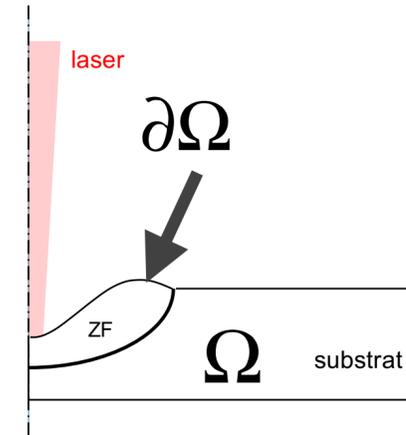
# 3.1 Analyse numérique : SLM

## Les modèles :

Thermique :

$$\text{Dans } \Omega \quad \rho c_p^{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \vec{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot \lambda \nabla T + S$$

$$\text{Sur } \partial\Omega \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \varphi_{laser} - h(T - T_{inf}) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_{inf}^4) - \dot{m} L_v$$



Mécanique des fluides

$$\text{Dans } \Omega \quad \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nabla \cdot (pI + \mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) + \vec{F}_v + K \vec{v} \quad \text{et} \quad \nabla \cdot \vec{v} = 0$$

$$\text{Sur } \partial\Omega \quad (pI + \mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) \cdot \vec{n} = \sigma \kappa + p_{rec}$$

$$\varphi_{laser} = \frac{\alpha(\theta) P_0}{2\pi R_{laser}} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2R_{laser}^2}\right)$$

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \frac{p_{sat}}{\sqrt{T}} (1 - \beta_r)$$

$$p_{sat} = p_0 \exp\left(\frac{ML_v}{R} \left(\frac{1}{T_{vap}} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

$$p_{rec} = \frac{p_{sat}}{2} (1 + \beta_r) H(T - T_{vap}, \Delta T)$$

Interface Gaz - Métal

Deux méthodes : ALE (Lagrangien) ou LEVELSET (Eulerien)

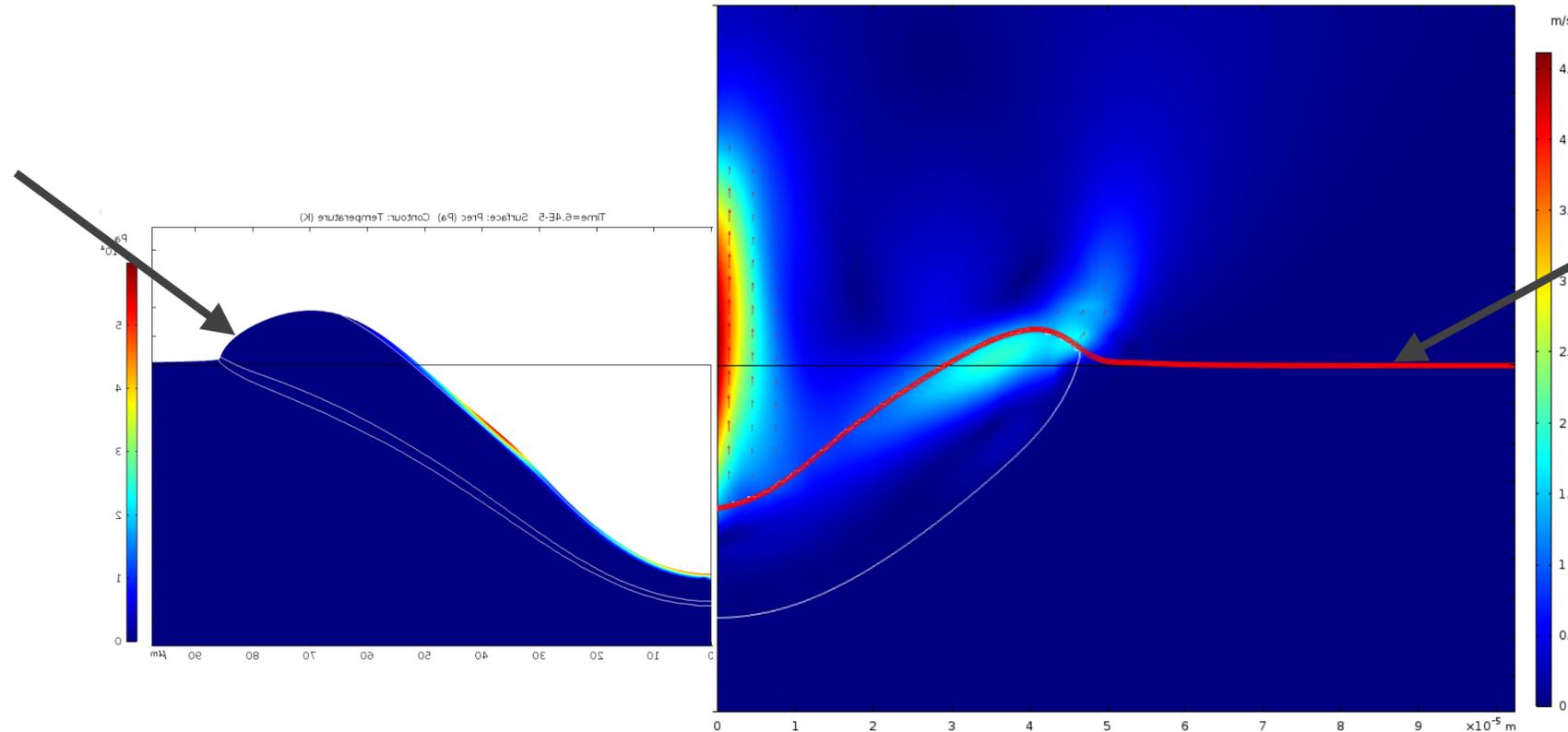
# 3.1 Analyse numérique : SLM

## Les modèles :

Deux méthodes : ALE (Lagrangien) ou LEVELSET (Eulerien)

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

$$v_n = \vec{v} \cdot \vec{n}$$



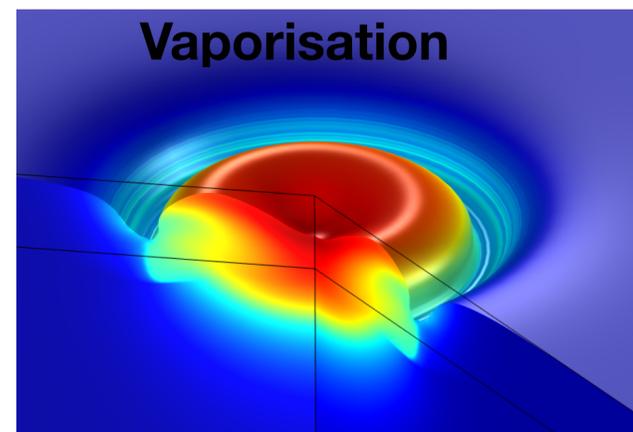
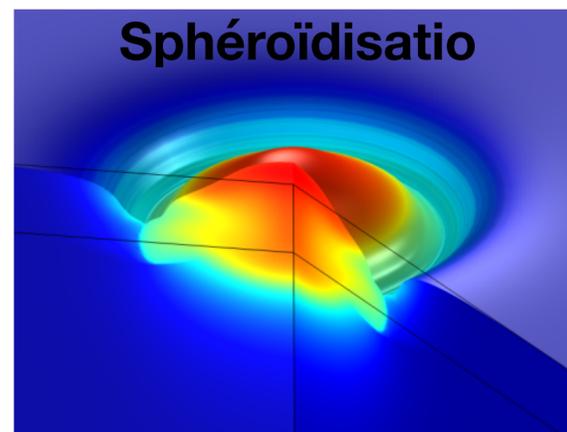
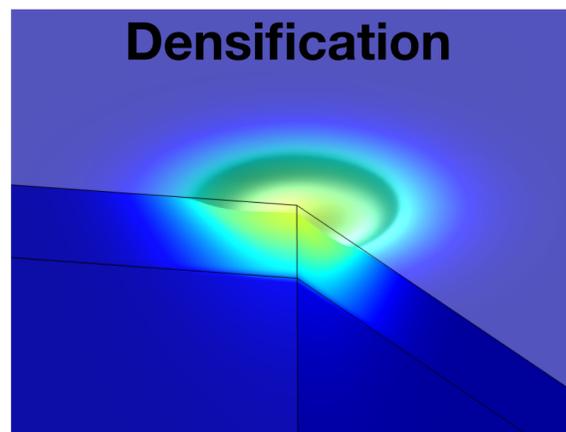
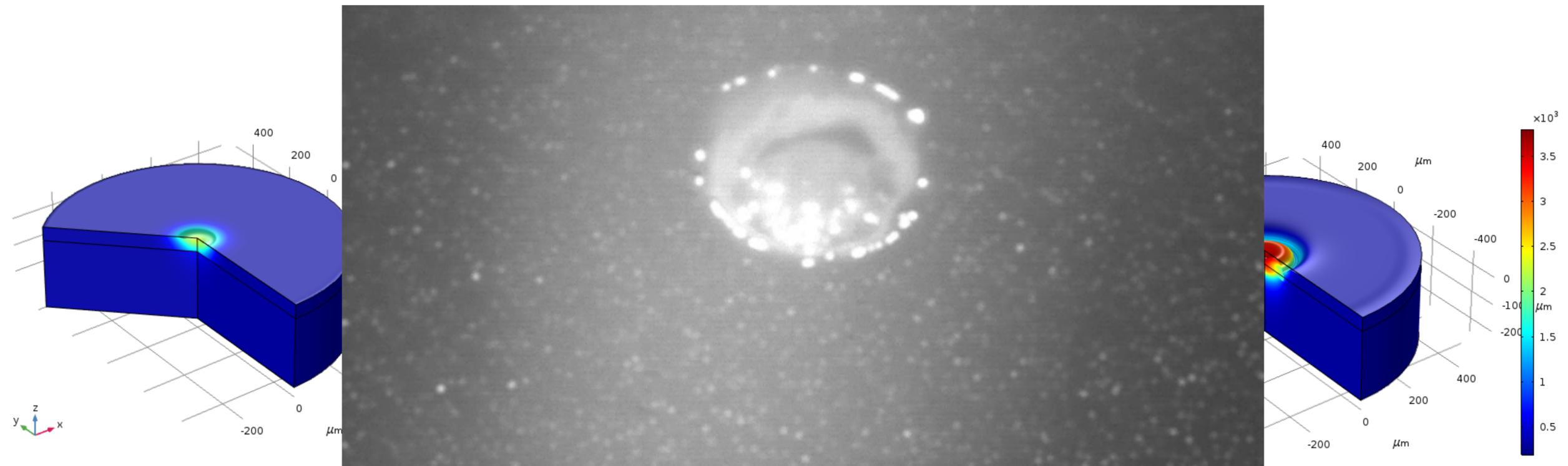
**Eq. Chaleur :**

$$S = (\varphi_{laser} - \varphi_{pertes}) \delta(\phi)$$

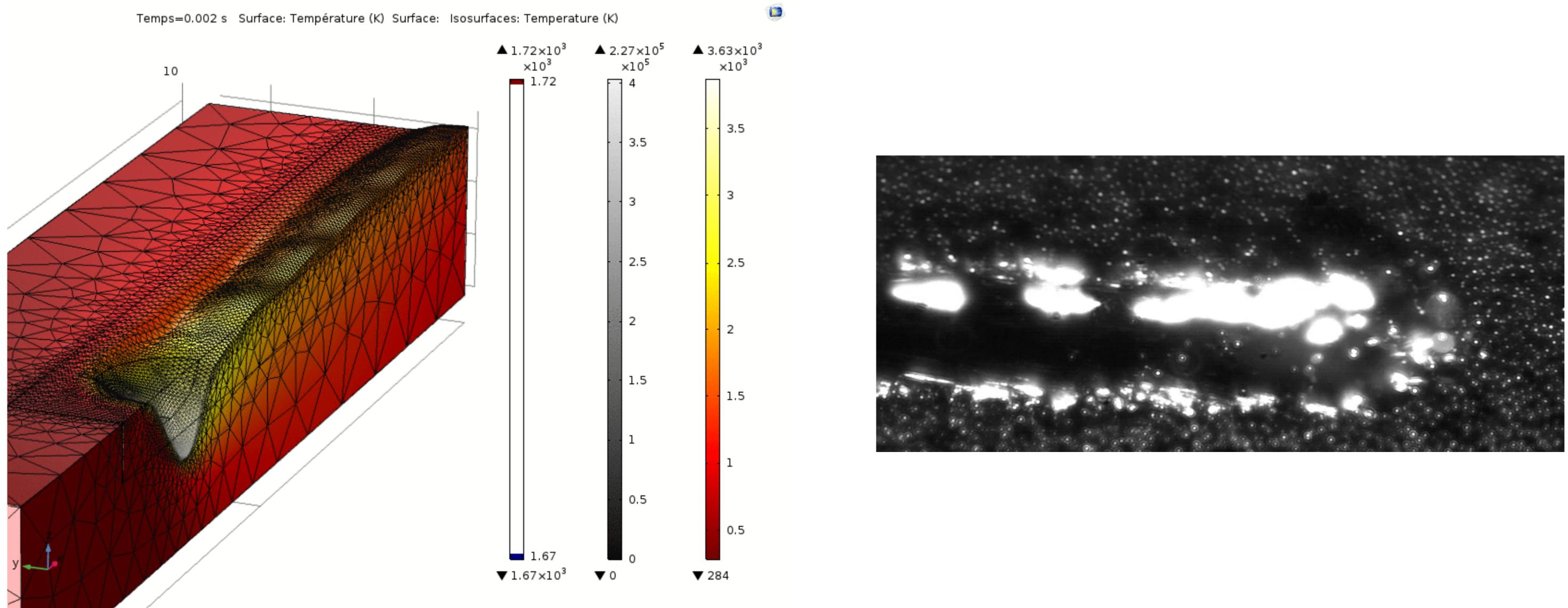
**Eq. NS :**

$$\vec{F}_v = (P_{rec} + \gamma \kappa) \delta(\phi)$$

# 3.1 Analyse numérique : SLM



# 3.1 Analyse numérique : SLM



# 3.2 Analyse numérique et expérimentale : DMD

**Influence des régimes d'interaction laser/matière sur la stabilité et le rendement du procédé de fabrication additive par dépôt de poudre en Inconel 718.**

Elise Ferreira

## 3.2 Analyse numérique et expérimentale

« **Effet des paramètres secondaires procédés sur les pièces fabriquées** »

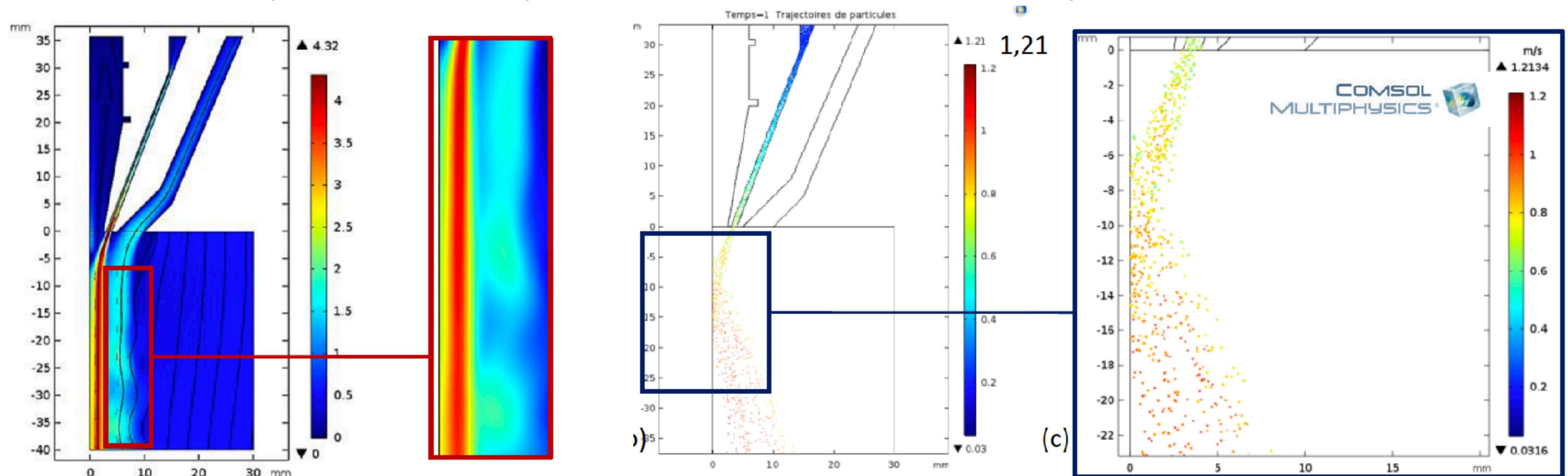
- Forme de la buse
- Paramétrie poudre (taille distribution)
- Paramétrie jets de gaz
- Paramétrie laser

Simulation suffisamment prédictive pour comprendre et anticiper le changement de buse

# 3.2 Analyse numérique et expérimentale

Simulation de jets de gaz et de poudre (3 géométries de buses)

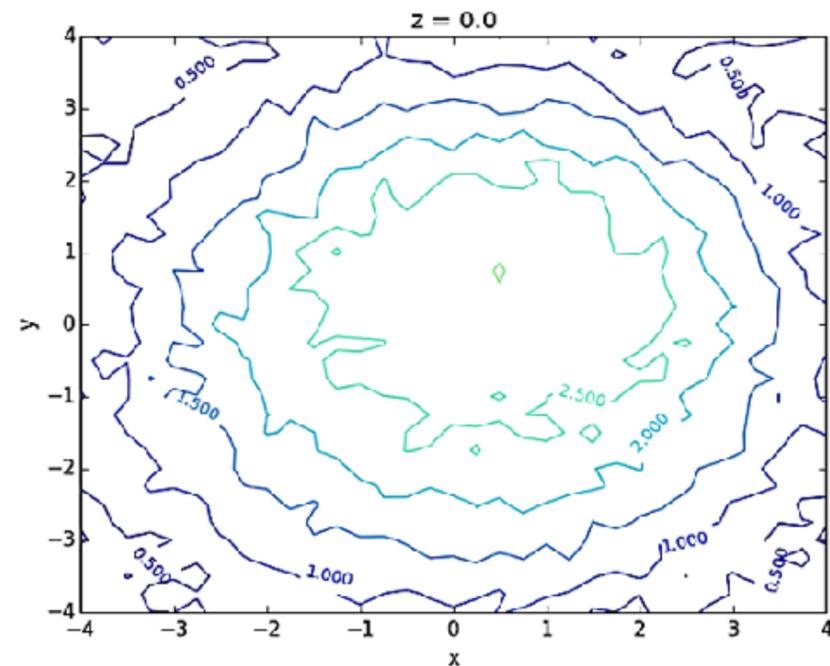
Navier - Stokes (laminaire / turbulent), conservation de la masse et calcul de trajectoire.



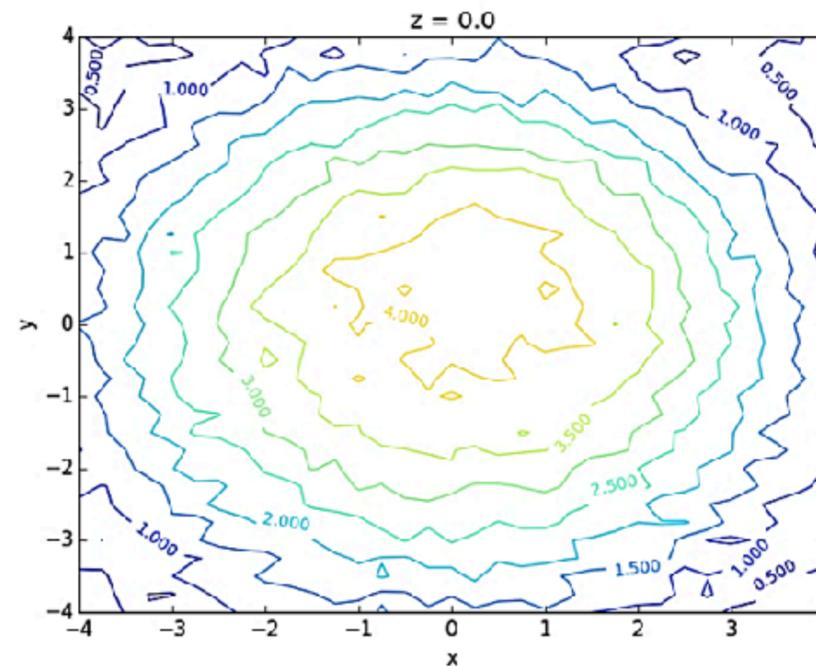
# 3.2 Analyse numérique et expérimentale

Mesure de vitesse de jet de gaz (3 géométries de buses)

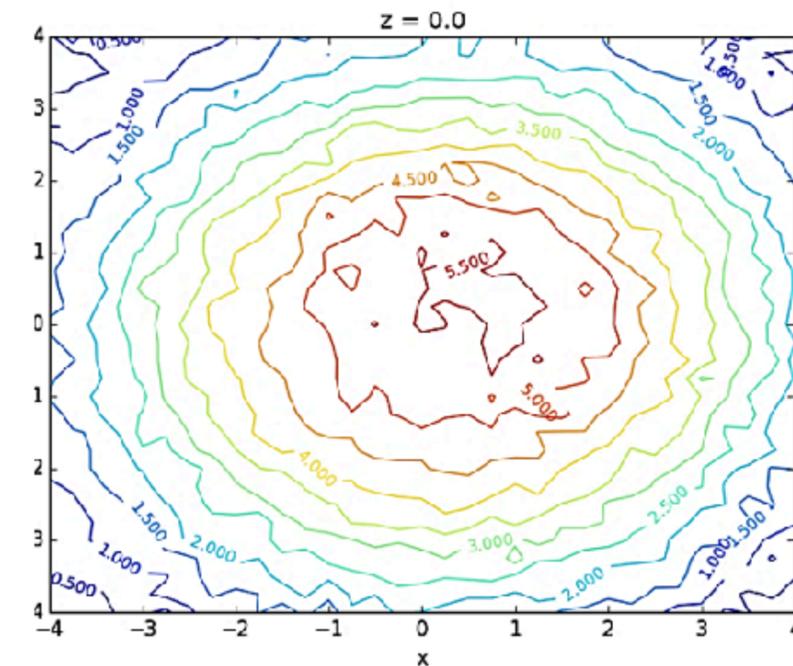
**D = 4 L/min**



**D = 6 L/min**

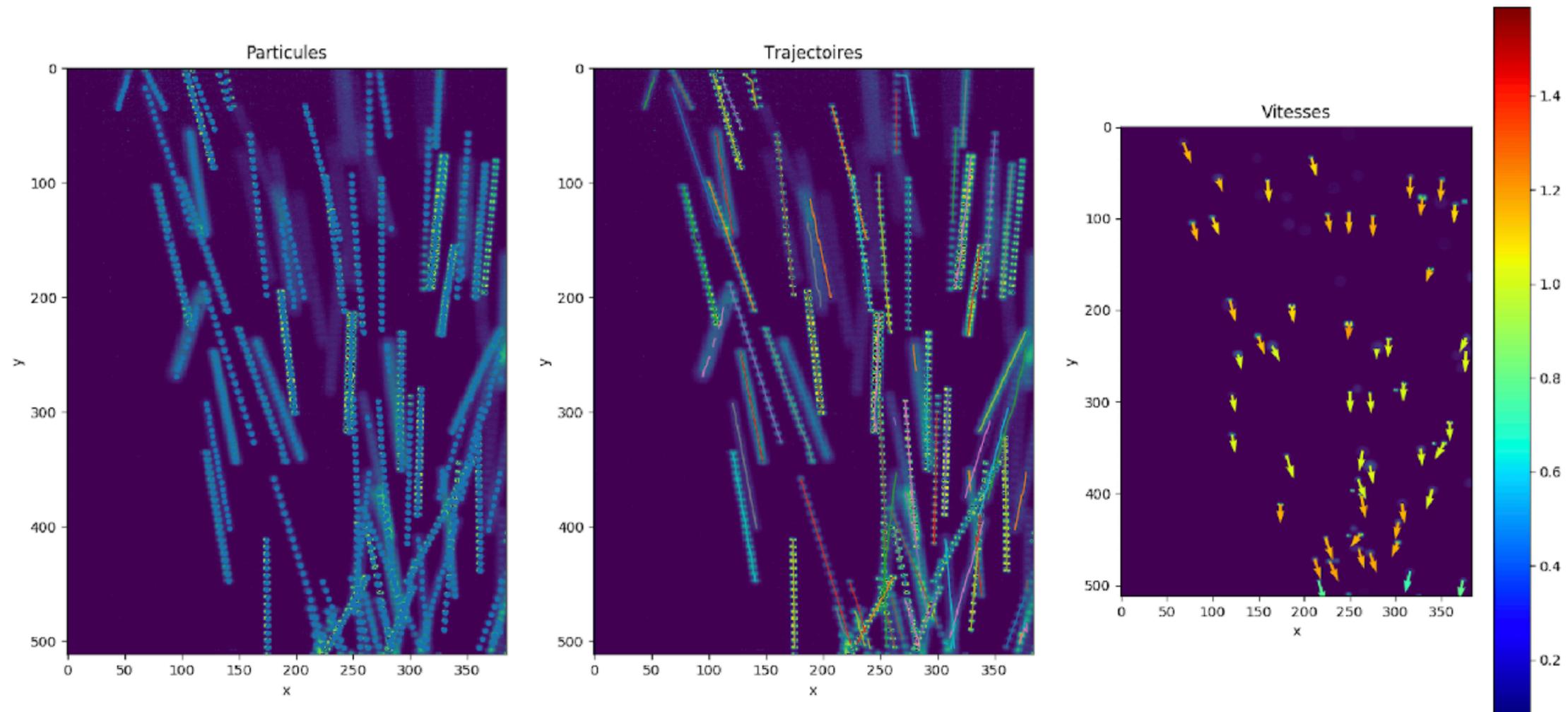


**D = 8 L/min**



# 3.2 Analyse numérique et expérimentale

Mesure de vitesse de jet de poudre (3 géométries de buses)



## 3.2 Analyse numérique et expérimentale

Suite :

Validation du numérique (configuration statique sans laser)

Essais expérimentaux (pour visualisation de la métallurgie) avec laser :

- Mono-cordons
- Murs

Pas de simulation de pièce :

Passage par des informations intermédiaires (modèles analytiques, empiriques) pour relier ces résultats à la taille de **zone fondue**.



# 4. Conclusion

Développements numériques/expérimentaux :

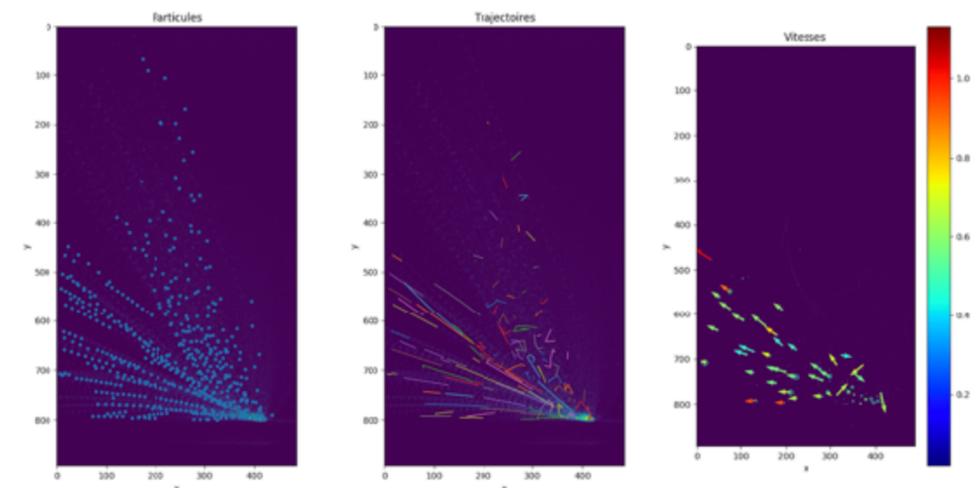
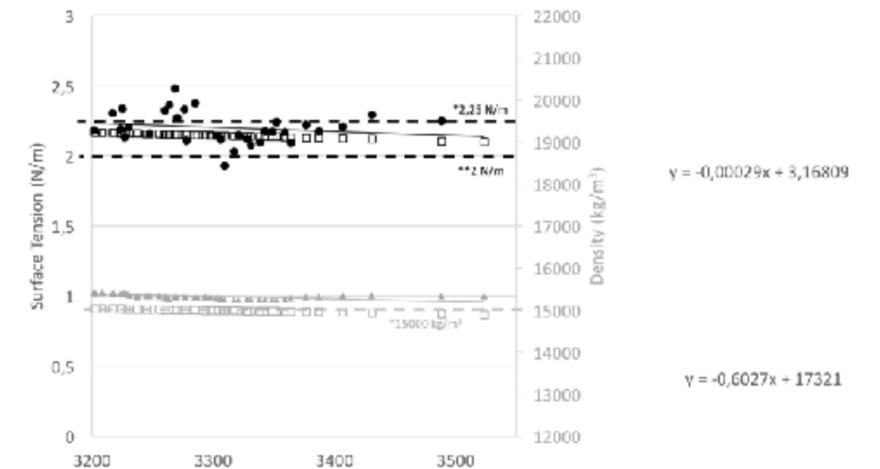
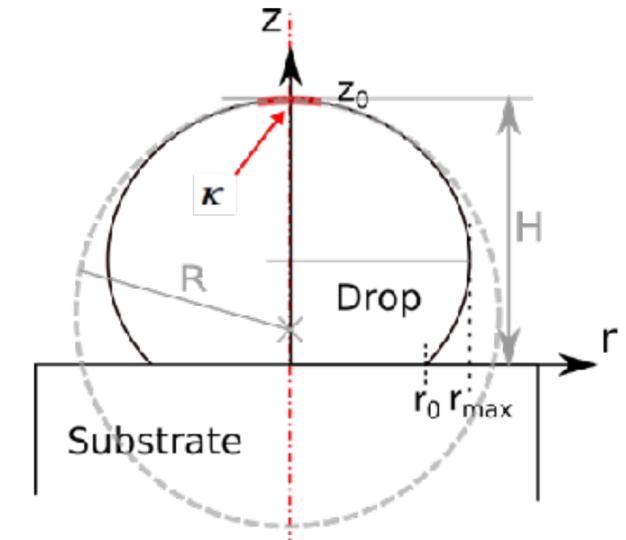
Perspectives Numériques :

- Validations analytiques et expérimentales
- 3D ALE/LevelSet
- Instabilités

Perspectives Expérimentales :

- Mesures de vitesse (gaz et liquide)
- Etude quantitative des éjections
- Mesures de propriétés thermophysiques (de la poudre et du liquide)

Développements parallèles



# Questions ?

Compréhension et simulation de l'interaction physique laser-matière en SLM et du jet de poudre en DMD

[morgan.dal@ensam.eu](mailto:morgan.dal@ensam.eu)  
[elise.ferreira@safrangroup.com](mailto:elise.ferreira@safrangroup.com)  
[yaasin.mayi@ensam.eu](mailto:yaasin.mayi@ensam.eu)

