



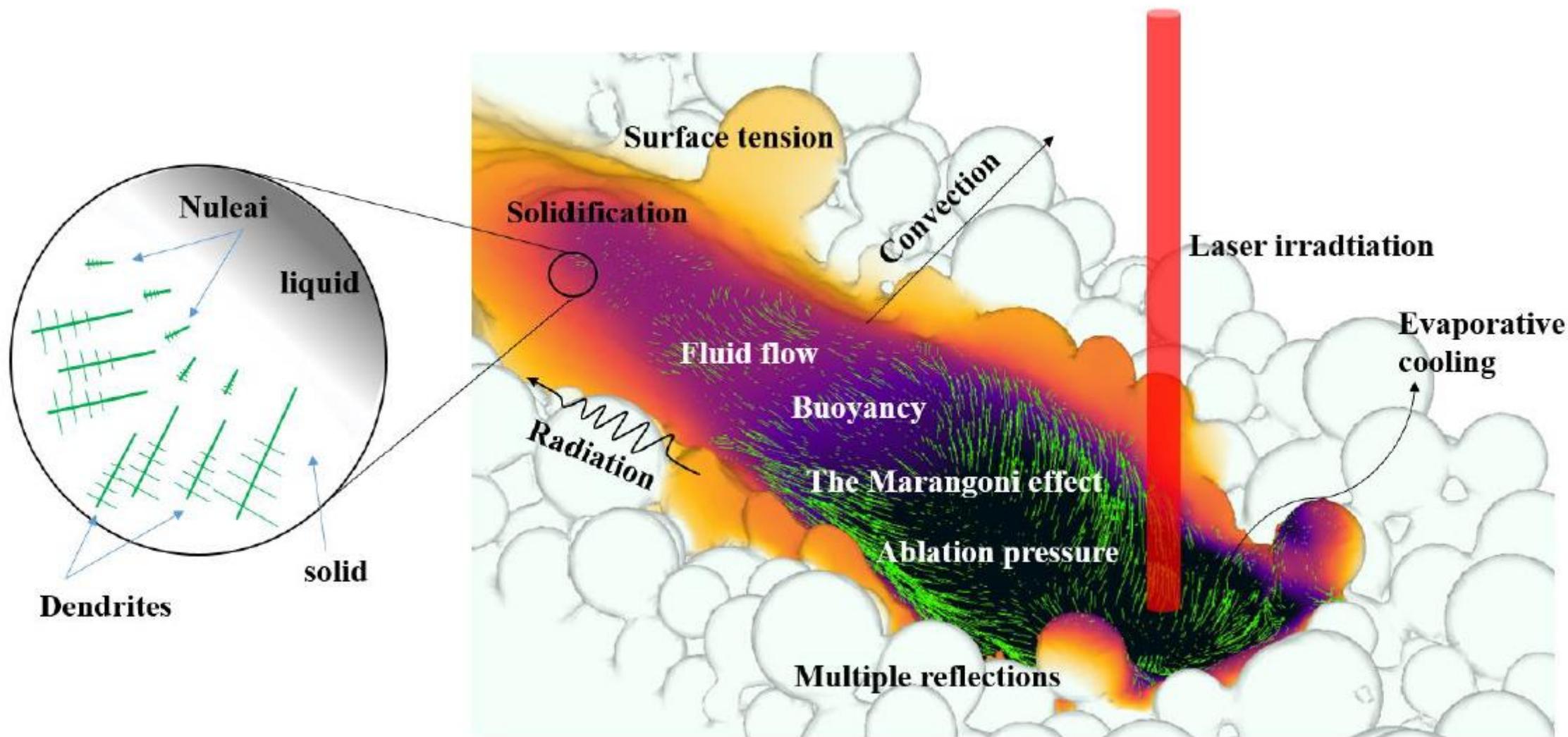
Fabrication additive L-PBF : principaux phénomènes physiques et simulation numérique

Mastère Spécialisé DMS
Mines Paris – Centre des Matériaux

Michel BELLET

26 janvier 2023

Procédé L-PBF : multiphysique !



▶ **PARTIE 1 : Phénomènes physiques**

▶ Interaction laser-matière

- ▶ Généralités. Interactions avec le lit de poudre, avec le bain fondu : vaporisation, dénudation, keyhole

▶ Echanges thermiques entre cordon/pièce et environnement

- ▶ Conduction à travers le lit de poudre, mesures thermiques

▶ Hydrodynamique du bain fondu

- ▶ Tension de surface, effet Marangoni, instabilités

▶ Solidification et changements de phase à l'état solide

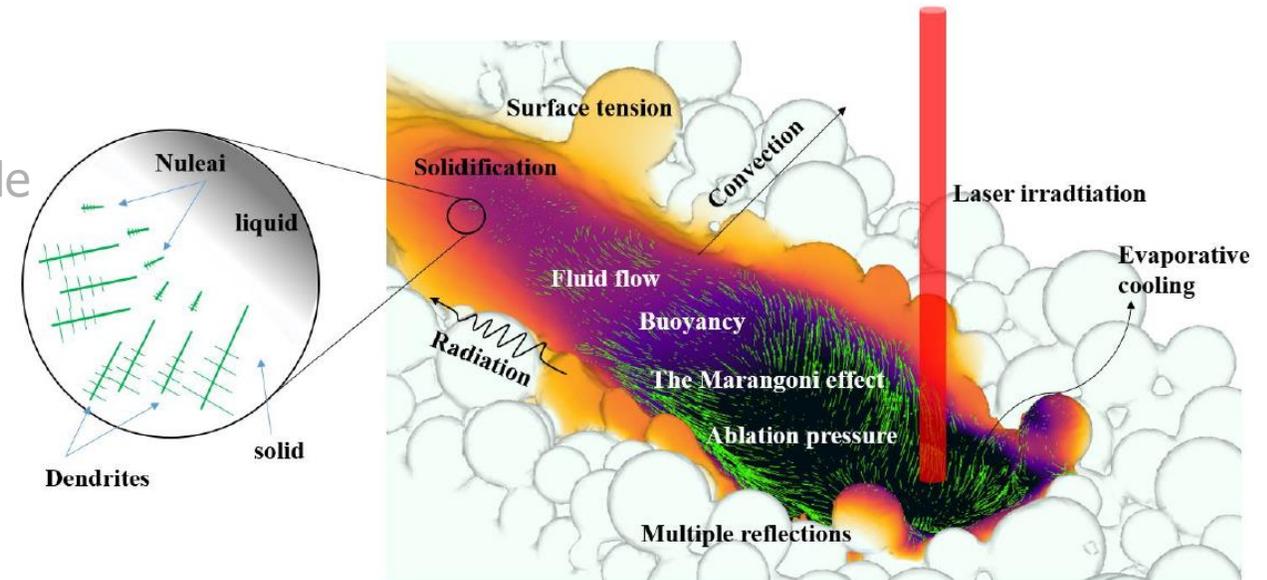
▶ Mécanique du solide

- ▶ Contraintes et distorsions

▶ **PARTIE 2 : Simulation numérique**

▶ Echelle des cordons élémentaires

▶ Echelle de la pièce



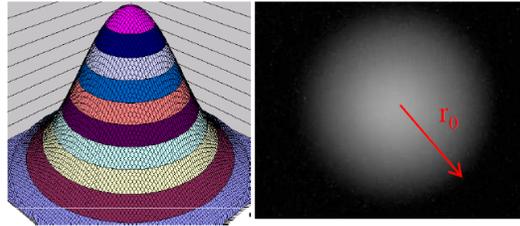
▶ Longueur d'onde

- ▶ Le plus souvent dans l'infra-rouge
Nd:YAG 1060 nm, transporté par fibre optique et relativement bien absorbé par les métaux
- CO₂ 10600 nm, transporté par miroir

▶ Distribution de puissance

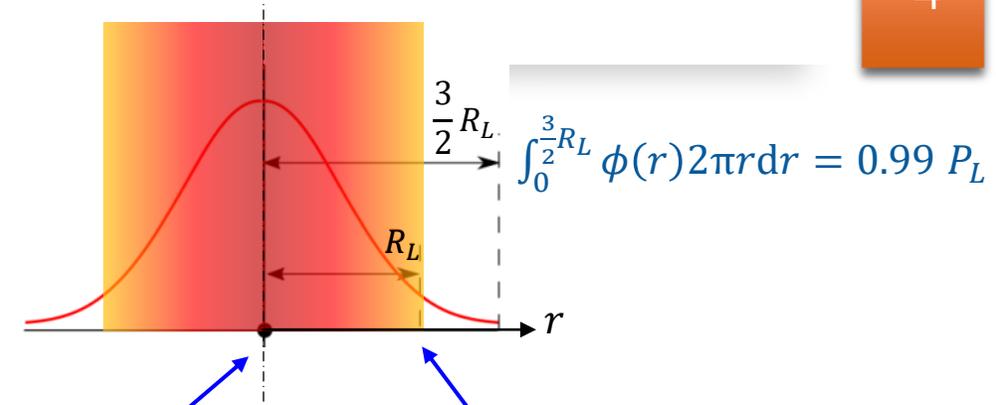
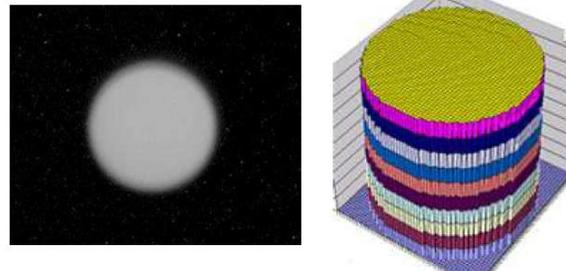
- ▶ Variable selon machines, systèmes optiques...
- ▶ Distribution gaussienne

$$\phi(r) = \frac{2P_L}{\pi R_L^2} e^{-\frac{2r^2}{R_L^2}}$$

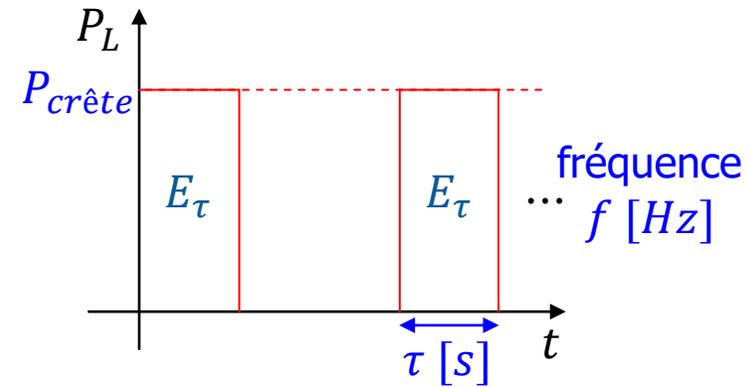


- ▶ Distribution "top-hat"

$$\phi(r) = \frac{P_L}{\pi R_L^2}$$



▶ Mode continu ou pulsé



$$E_\tau = P_{crête} \tau$$

$$P_{moy} = f E_\tau = f P_{crête} \tau$$

$$P_{crête} = 1000 \text{ W}$$

$$\tau = 10 \text{ ms}$$

$$f = 10 \text{ Hz}$$

$$\Rightarrow E_\tau = 10 \text{ J}$$

$$P_{moy} = 100 \text{ W}$$

► Interaction photons-électrons, théorie de Drude

► Loi de Beer-Lambert

$$\frac{dI}{dz} = -\frac{4\pi k_\lambda}{\lambda} I \quad \text{ou} \quad I = I_0 \exp\left(-\frac{4\pi k_\lambda}{\lambda} z\right)$$

k_λ coefficient d'extinction

► Pour les métaux, absorption dans une très faible épaisseur de peau

$$e = \frac{\lambda}{4\pi k_\lambda}$$

$\lambda = 1060 \text{ nm}$ Ni : $k_\lambda = 5,26$, $e = 16 \text{ nm}$ Ti : $k_\lambda = 4,00$, $e = 21 \text{ nm}$

$e \ll \sqrt{\alpha t}$ α diffusivité thermique

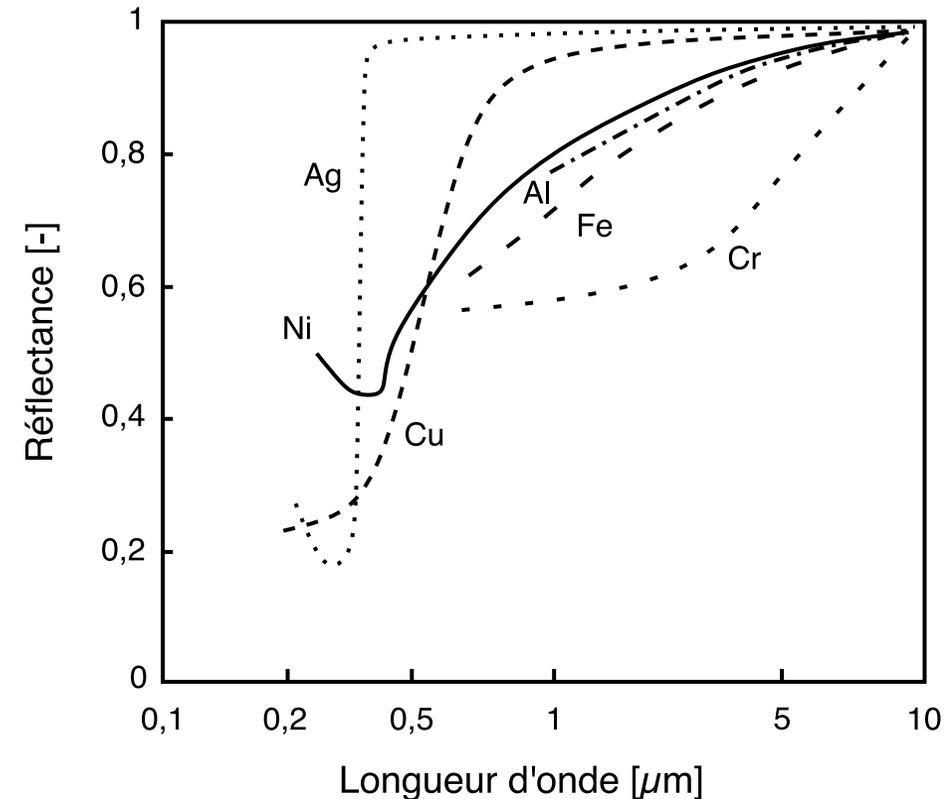
⇒ opaques au rayonnement laser

⇒ absorption en surface : $A + R = 1$

forte réflectance, 0.3 à 0.7
grande influence de l'état de surface

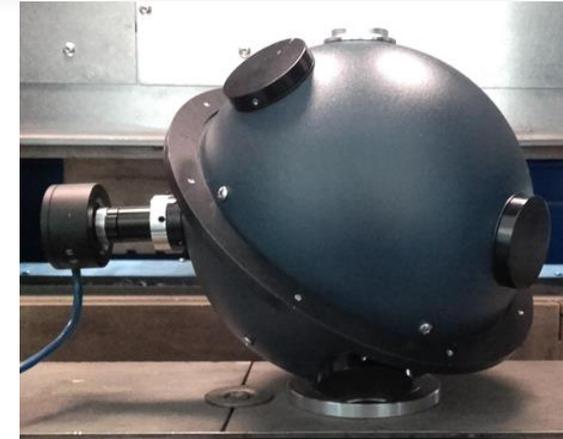
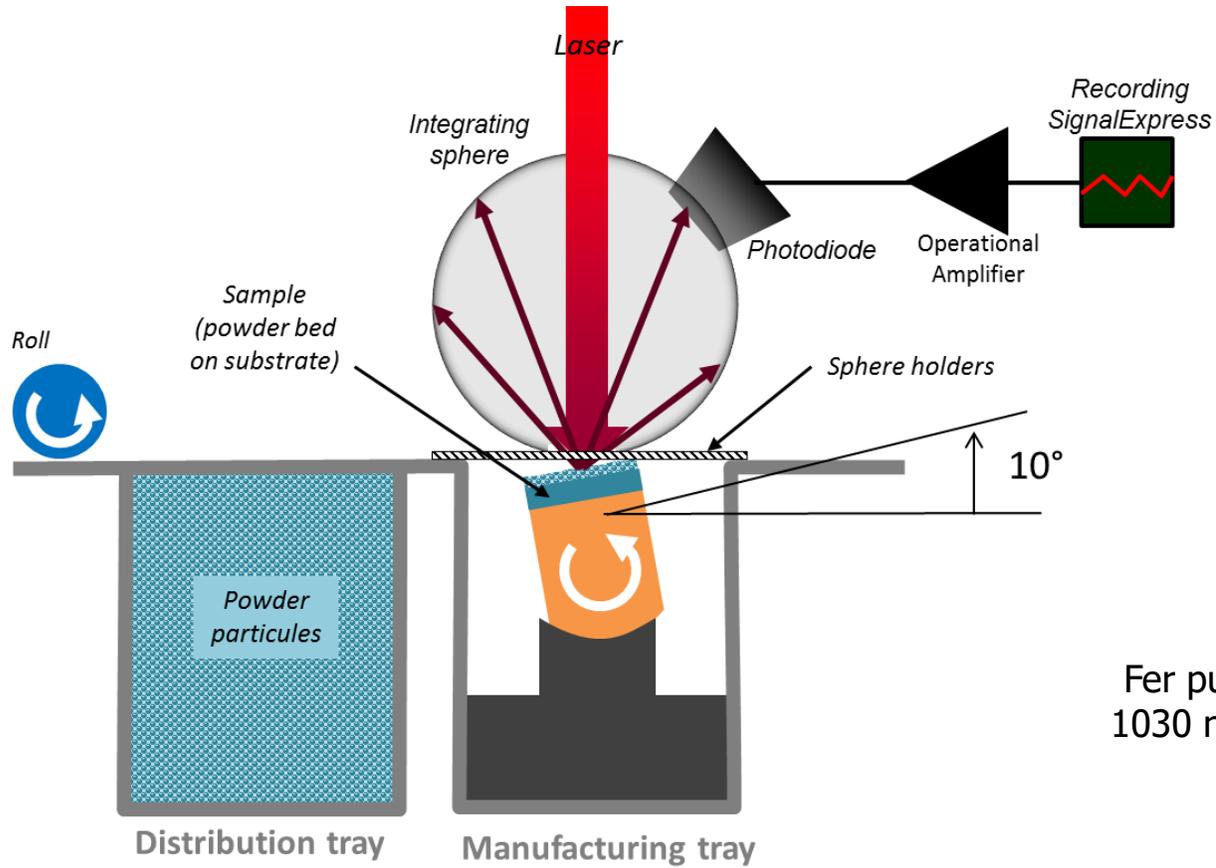
► Cas spécifique de certaines céramiques

► Relative transparence au rayonnement proche IR : e de 10 à 100 μm

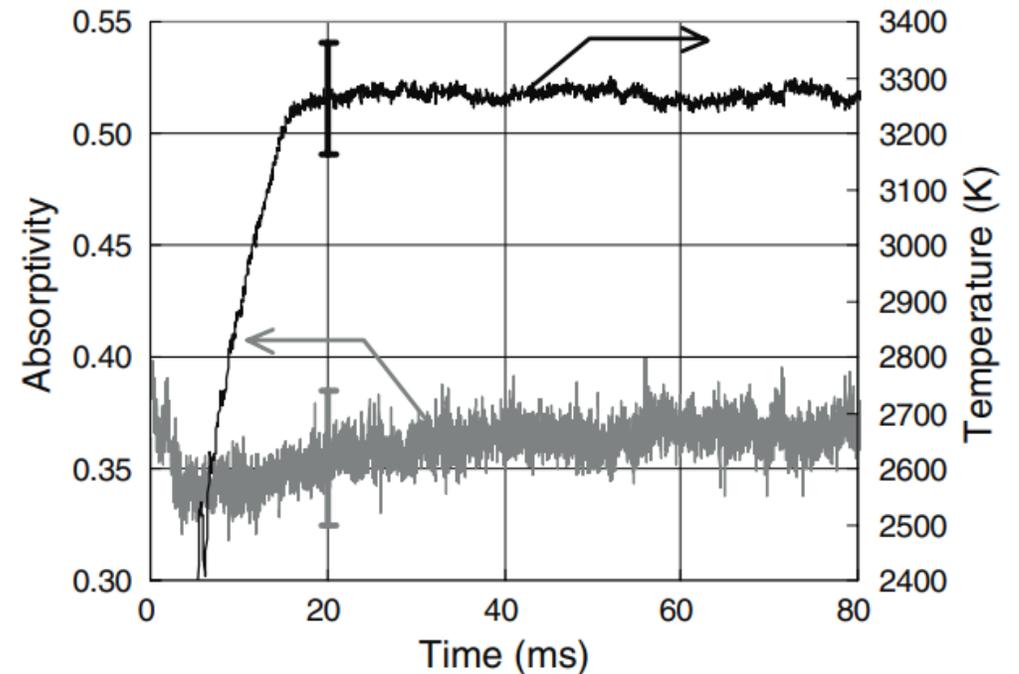


Laurens *et al.*, Techniques de l'Ingénieur, 1996

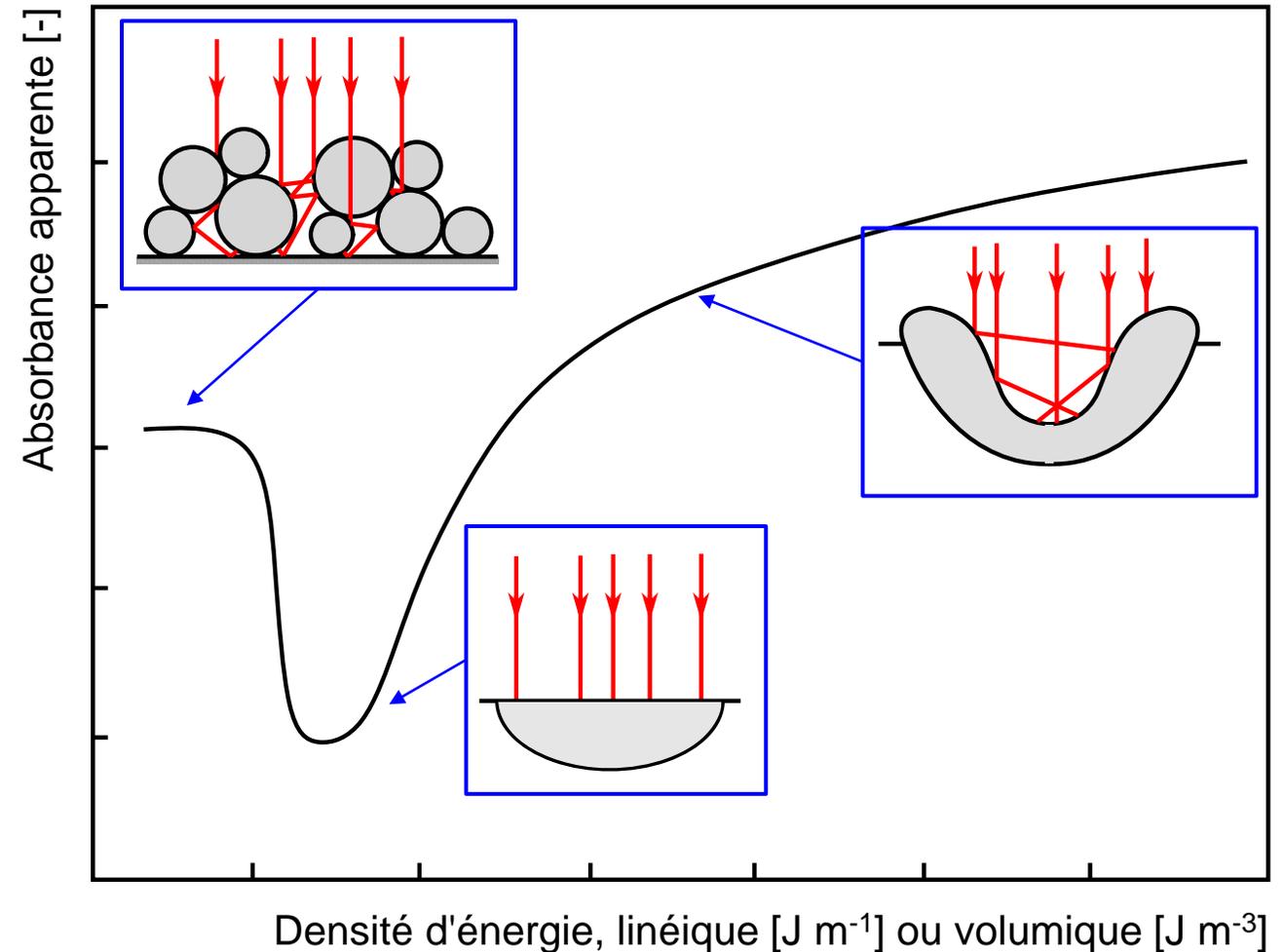
Mesure absorbance/réflectance : sphère intégrante



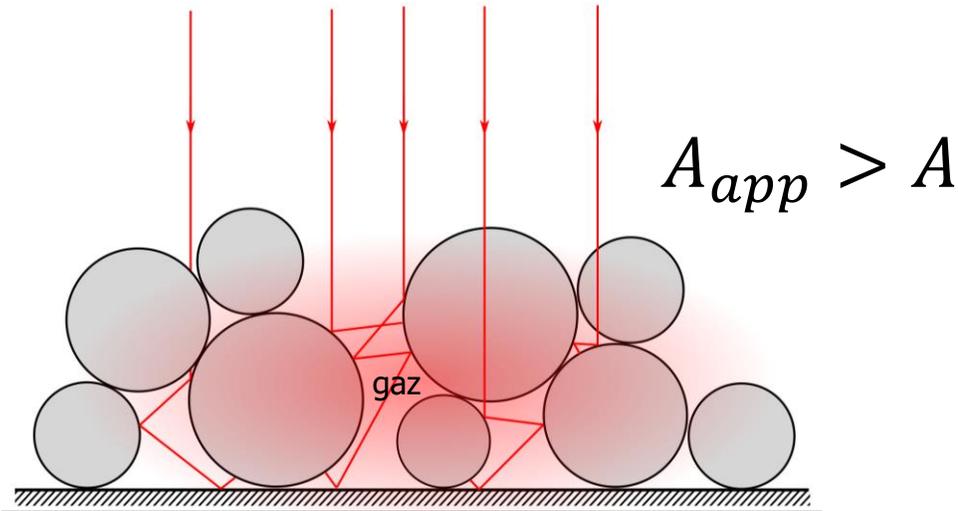
Fer pur
1030 nm



- ▶ Multi-réflexions dans le lit de poudre
- ▶ Forte réflectance en surface de bain liquide
- ▶ Multi-réflexions à l'intérieur du keyhole



- Pour les métaux, en amorçage de cordon principalement



d'après Yaasin Mayi, Thèse, 2021

Paramètres influents

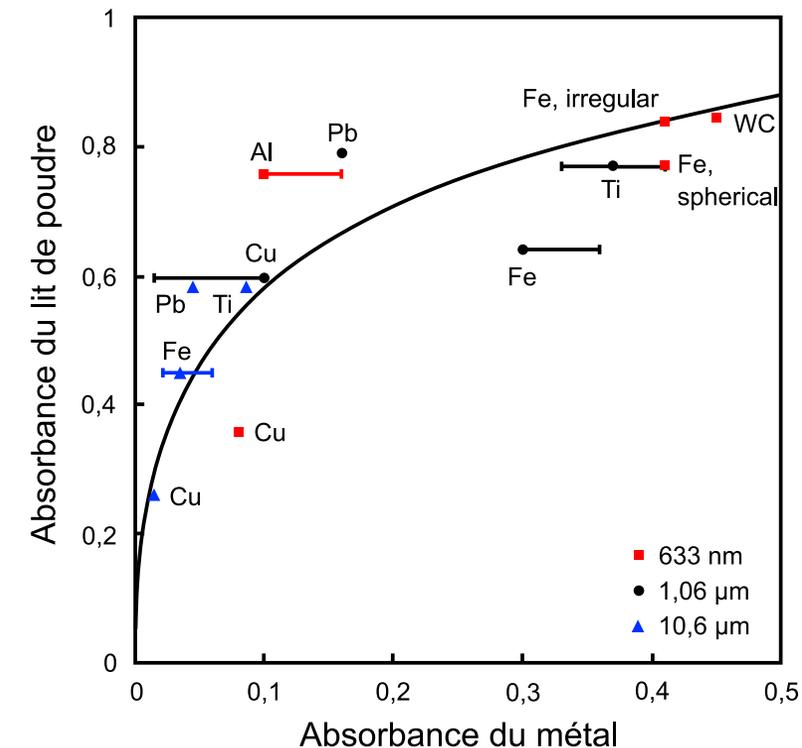
- Distribution granulométrique
- Porosité

Exemple Simonds *et al.* (2020)

- 316L, $A_{solide} \approx 0,25$
- Lit de poudre ép. 300 μm , $A_{app} \approx 0,75$

Modèle de
Gusarov et Smurov (2010)

$$A_{app} = \frac{3\sqrt{A}}{1 + 2\sqrt{A}}$$

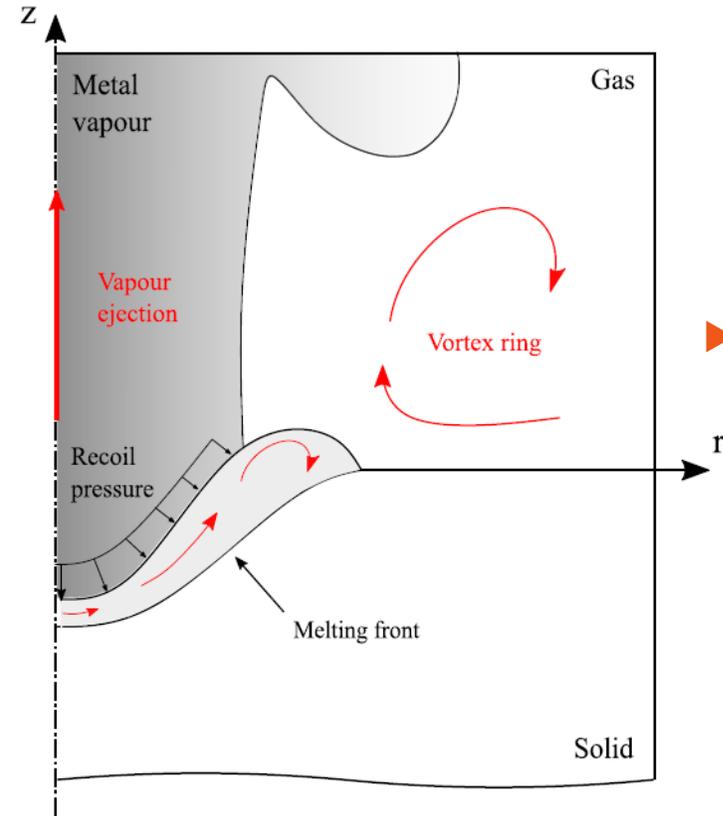


B.J. Simonds *et al.*, Phys. Rev. Applied 13 (2020)

A.V. Gusarov & I. Smurov, J. Quant. Spectr. Radiat. Transf. 111 (2010)

Interaction laser – matière. 2, avec le bain fondu

► Vaporisation



► Masse éjectée : relation de Hertz-Langmuir

$$\dot{m} = (1 - \beta_r) \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} p_{sat}(T) \quad [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}]$$

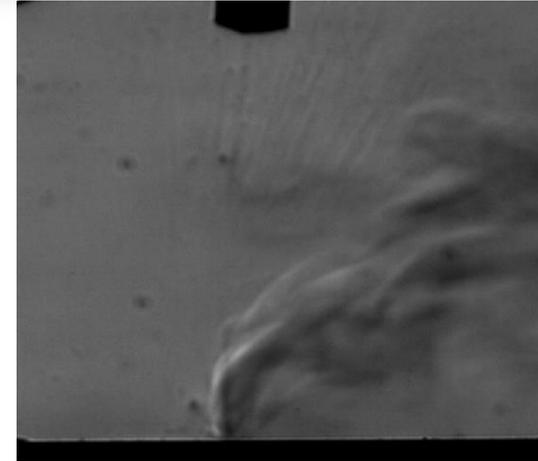
$$p_{sat}(T) = p_{atm} \exp\left(\frac{L_v M}{RT_v} \left(1 - \frac{T_v}{T}\right)\right)$$

A.A. Samokhin (1990)

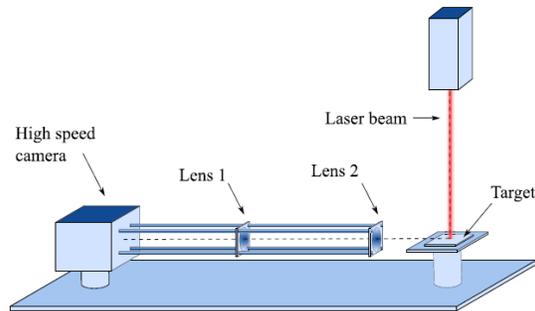
► Pression de recul :

$$p_{rec} \mathbf{n} = -\left(\frac{1 + \beta_r}{2}\right) p_{sat}(T) \mathbf{n}$$

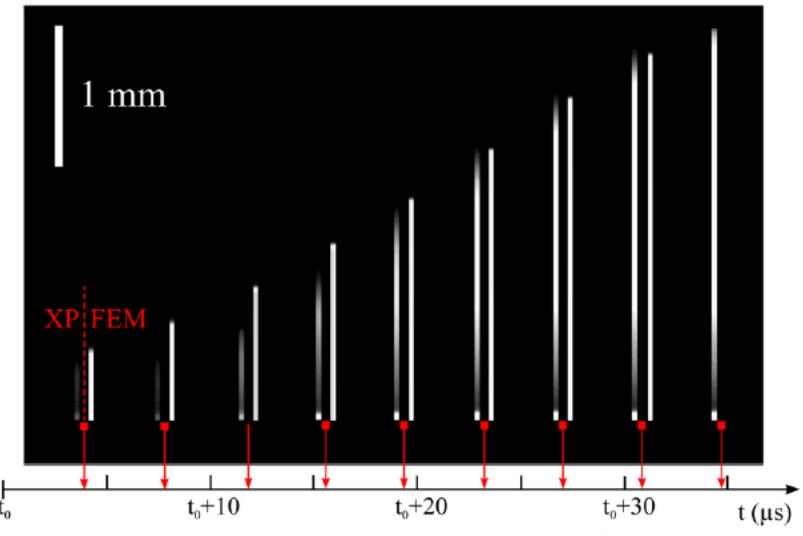
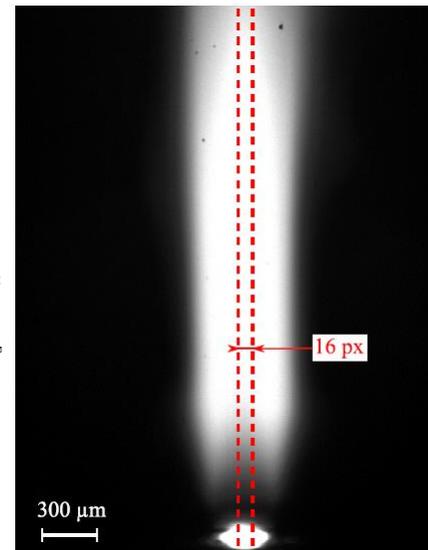
L_v chaleur latente de vaporisation [J kg^{-1}]; M masse molaire [kg mol^{-1}]; T_v température de vap. [K] à pression atm. p_{atm} ; p_{sat} pression de vapeur saturante [Pa]; β_r taux de recondensation (= 0,17)



Bidare *et al.* (2018)

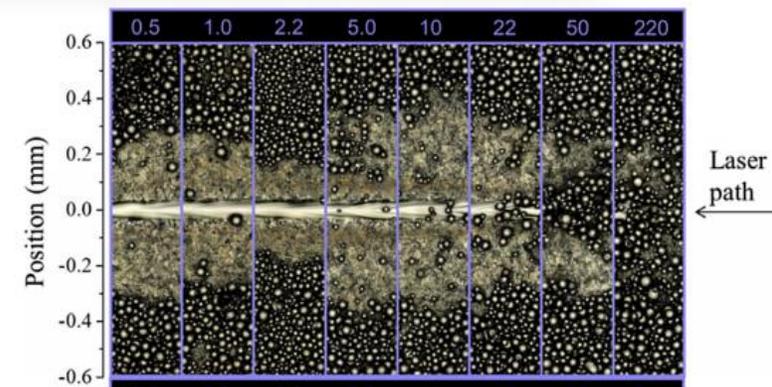


Y. Mayi *et al.*, J Phyd D Appl Phys (2020)

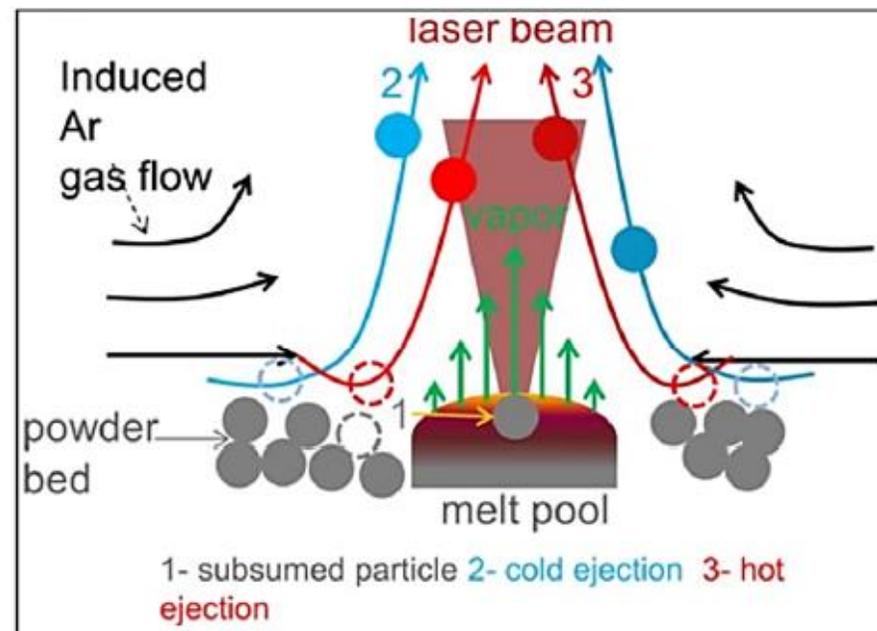
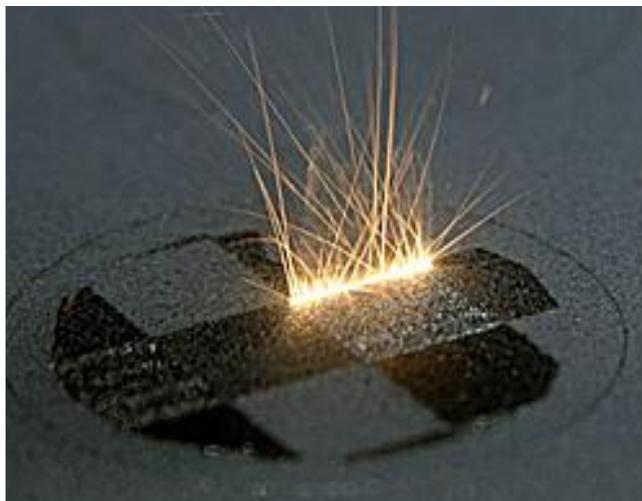


► Conséquence de la vaporisation

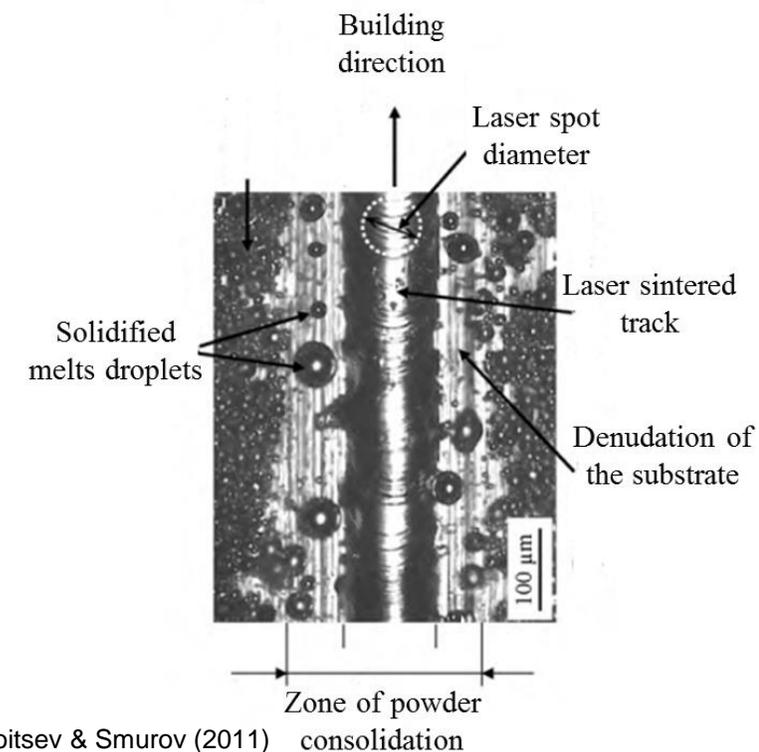
- Éjection de particules solides
 - Dénudation du lit de poudre par entraînement aérodynamique
 - Risque d'inclusion
 - Fusion partielle ou totale par le faisceau : "spatters"
- Éjection de particules liquides
 - Ejection de gouttelettes du bain fondu par entraînement aérodynamique en surface du bain
 - Mais aussi par instabilités hydrodynamiques du bain



Dénudation en L-PBF Ti-6-4, Matthews *et al.* (2016)

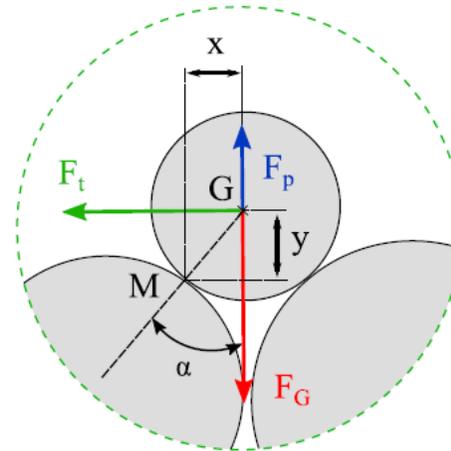


Ly *et al.*, *Sci. Rep.* (2017)



Inconel 625, dénudation et spatters, Yadroitsev & Smurov (2011)

► Critère d'entraînement de particules



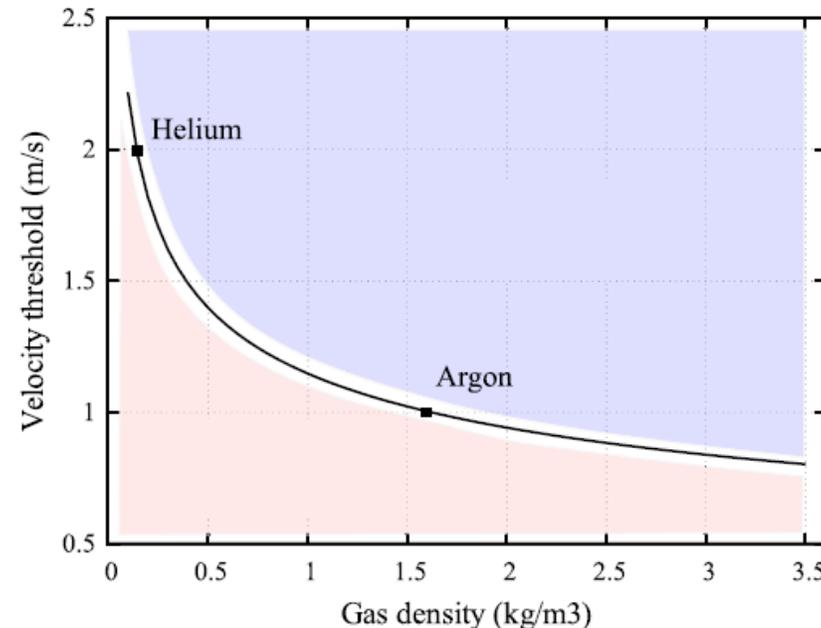
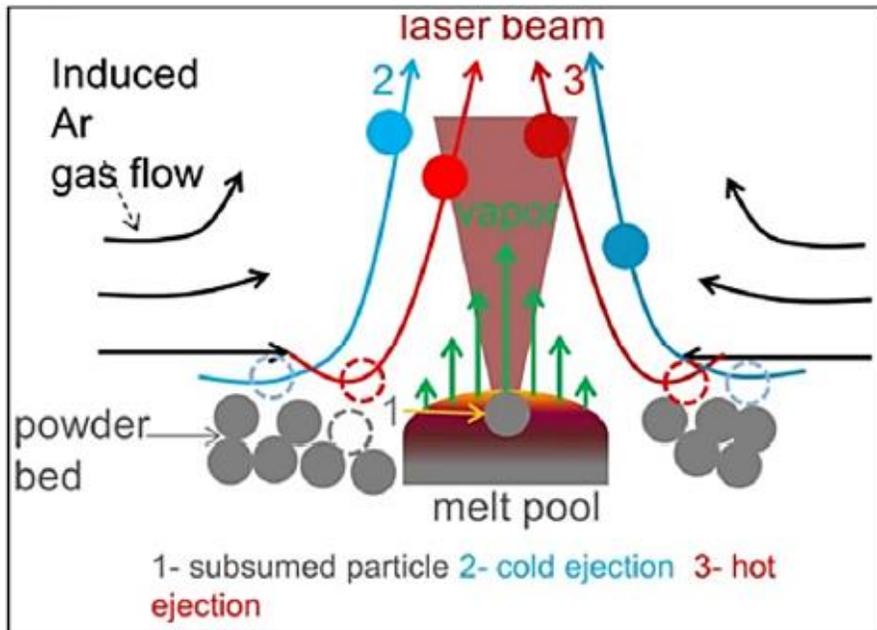
Force de traînée : $F_t = \frac{1}{2} C_x \pi R_p^2 \rho_g v_g^2$

avec $C_x = \frac{18,5}{Re^{0,6}}$ et $Re = \frac{\rho_g v_g 2R_p}{\mu_g}$

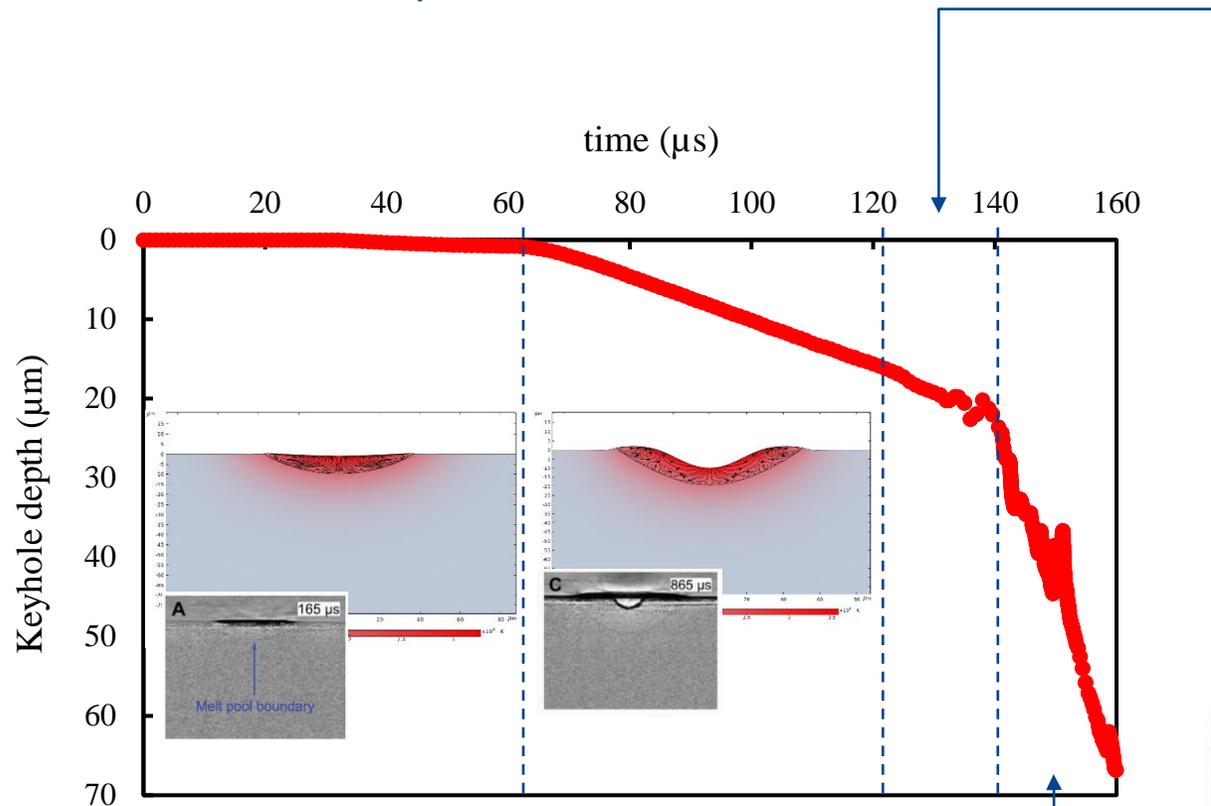
Poids : $F_G = \frac{4}{3} \pi R_p^3 \rho_p$

⇒ critère d'entraînement $F_t \cos \alpha > F_G \sin \alpha$

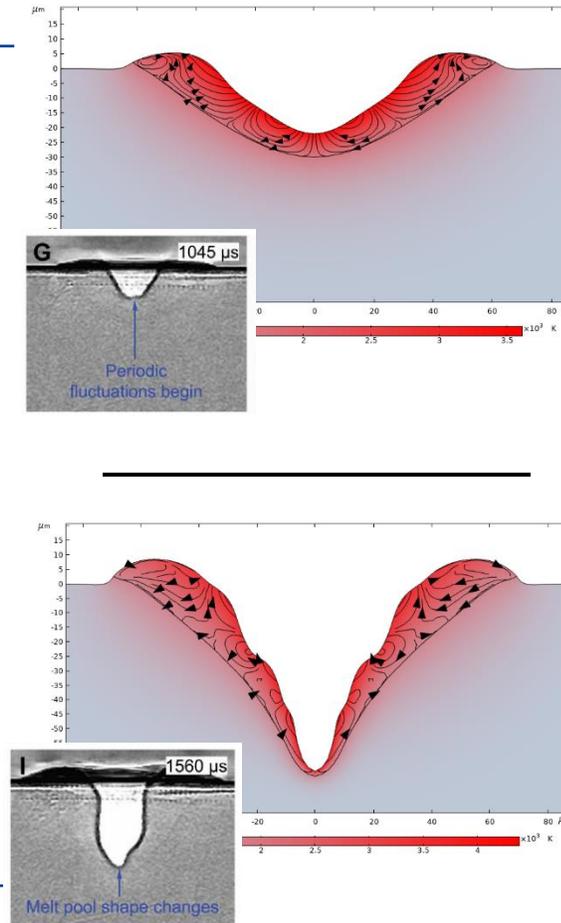
⇒ vitesse limite $v_{g|lim} \propto \mu_g^{-\frac{3}{7}} \rho_g^{-\frac{2}{7}}$



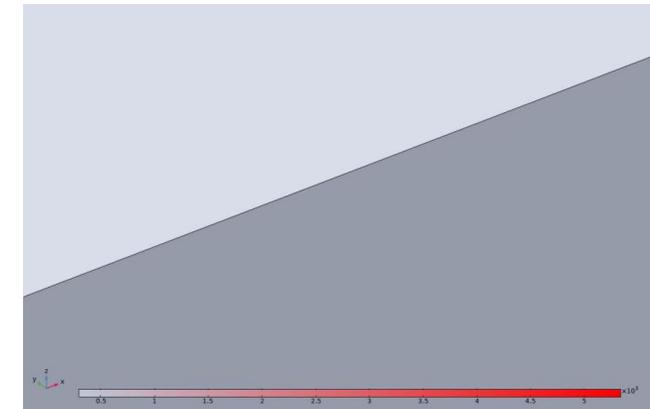
- ▶ Effet auto-entretenu de la formation du keyhole
- ▶ En mode statique :



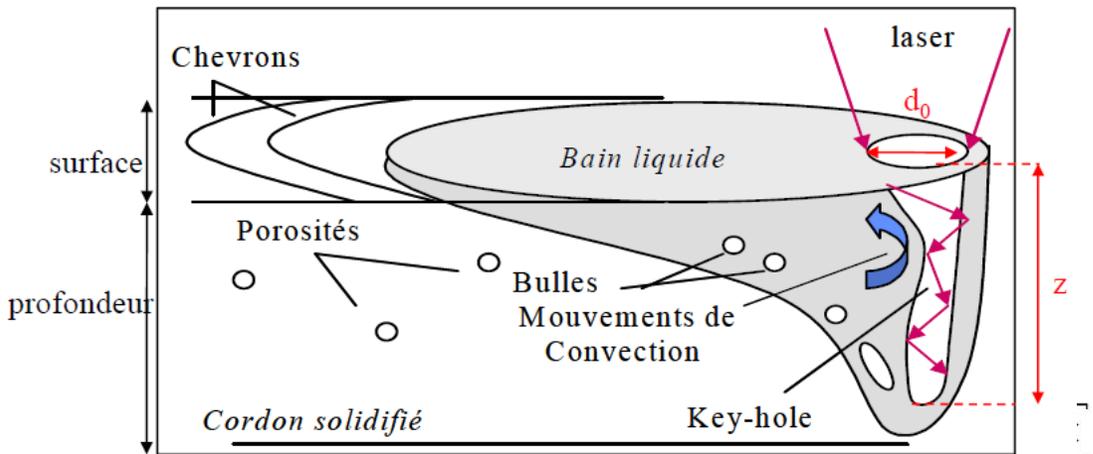
Images sous rayonnement X:
R. Cunningham, A.D. Rollett *et al.*
(Carnegie Mellon U), Science
(2019)



Modélisation numérique :
Y. Mayi, Thèse PIMM A&M (2021)



► En mode dynamique



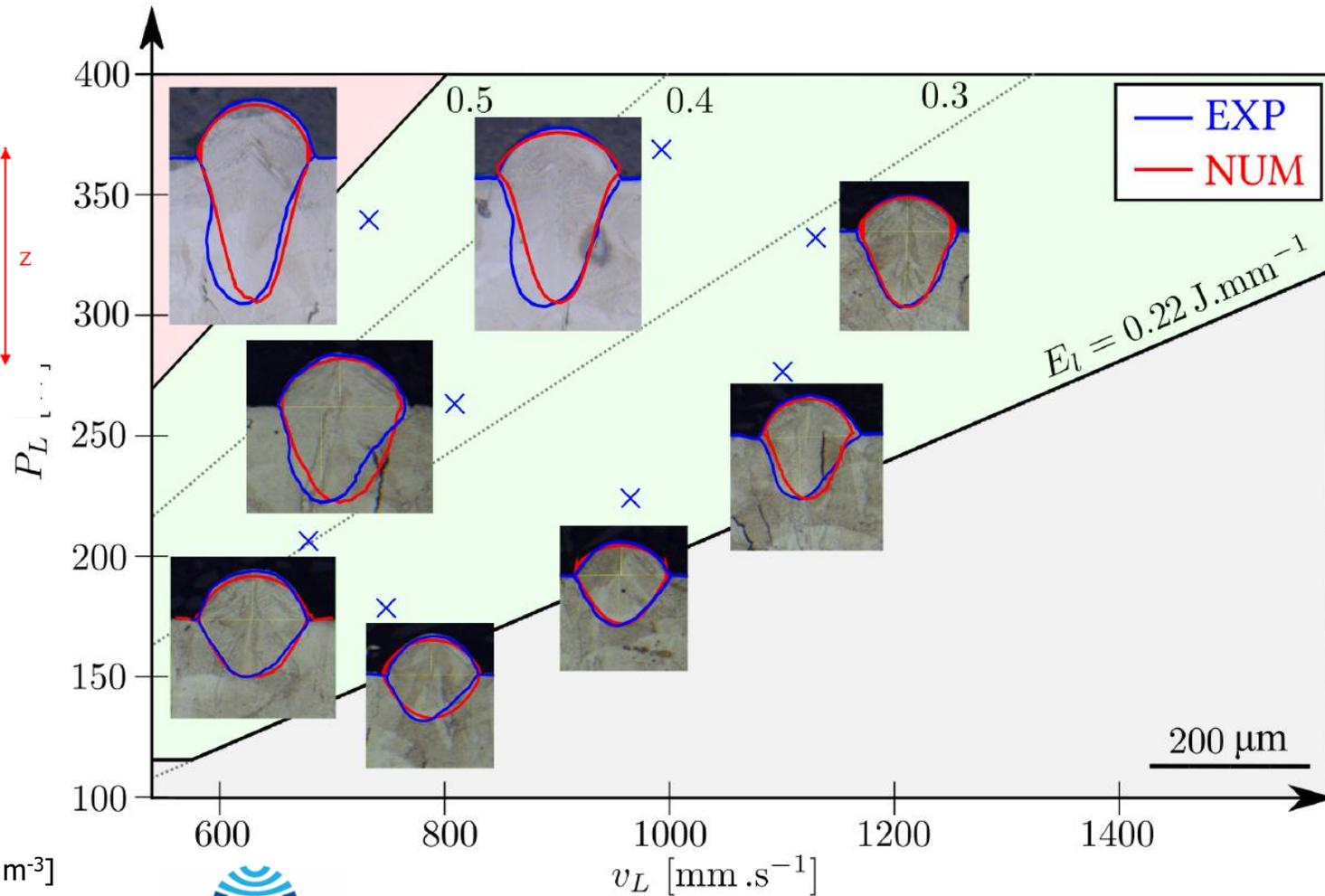
d'après P. Peyre, cours MAGIS, 2021

► Intensité énergétique : indicateurs

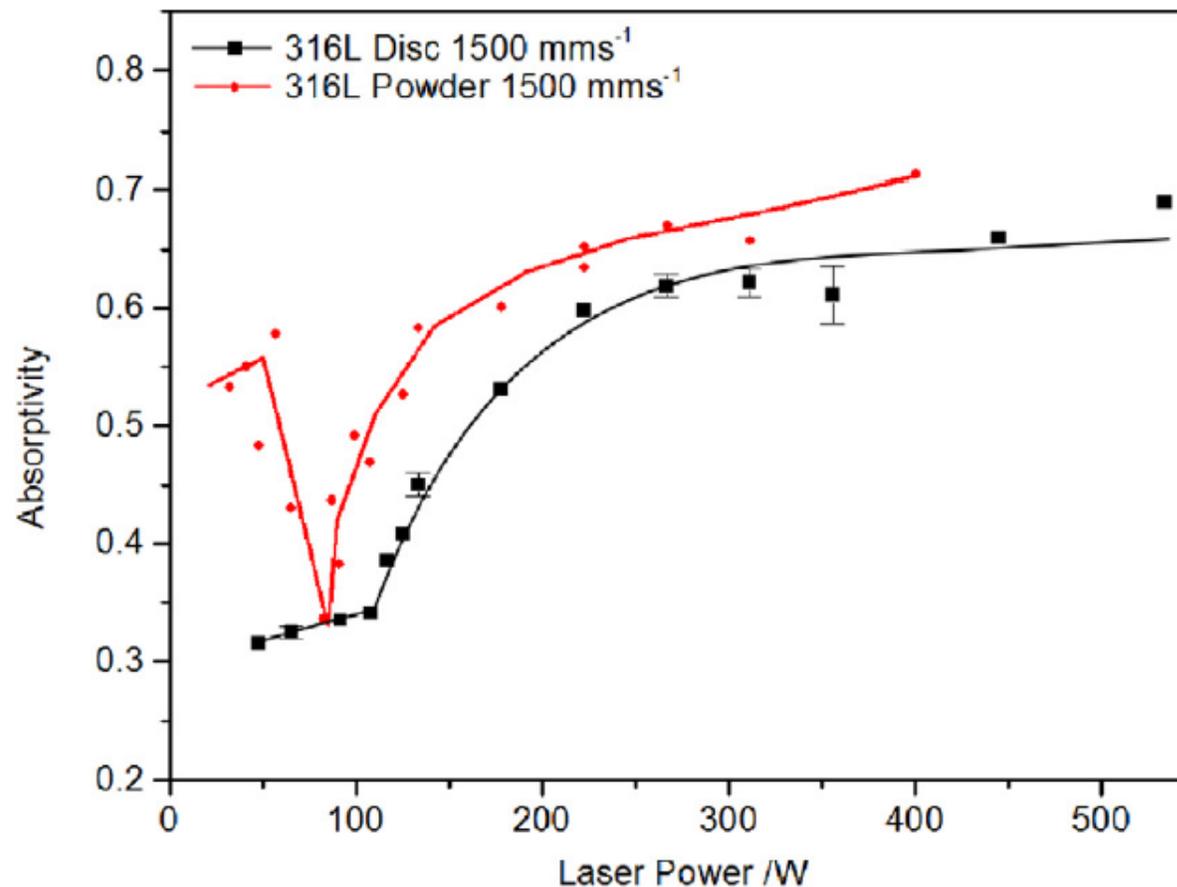
Energie linéique $E_l = \frac{P_L}{v_L}$ [J m⁻¹]

Energie surfacique $E_s = \frac{P_L}{v_L \phi_L}$ ou $E_s = \frac{P_L}{v_L H}$ [J m⁻²]

Energie volumique $E_v = \frac{P_L}{v_L \phi_L \Delta z}$ ou $E_v = \frac{P_L}{v_L H \Delta z}$ [J m⁻³]



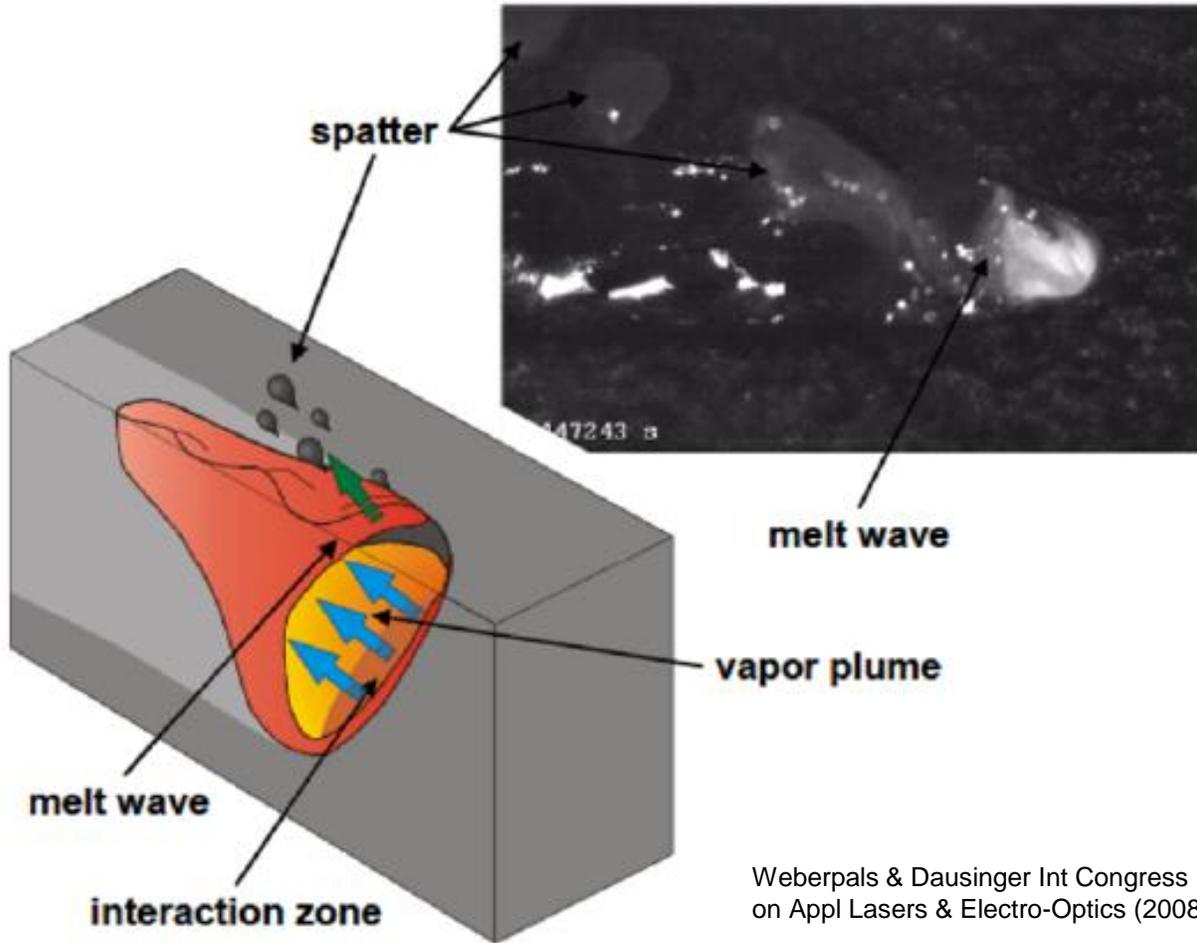
- Augmentation de l'absorbance apparente



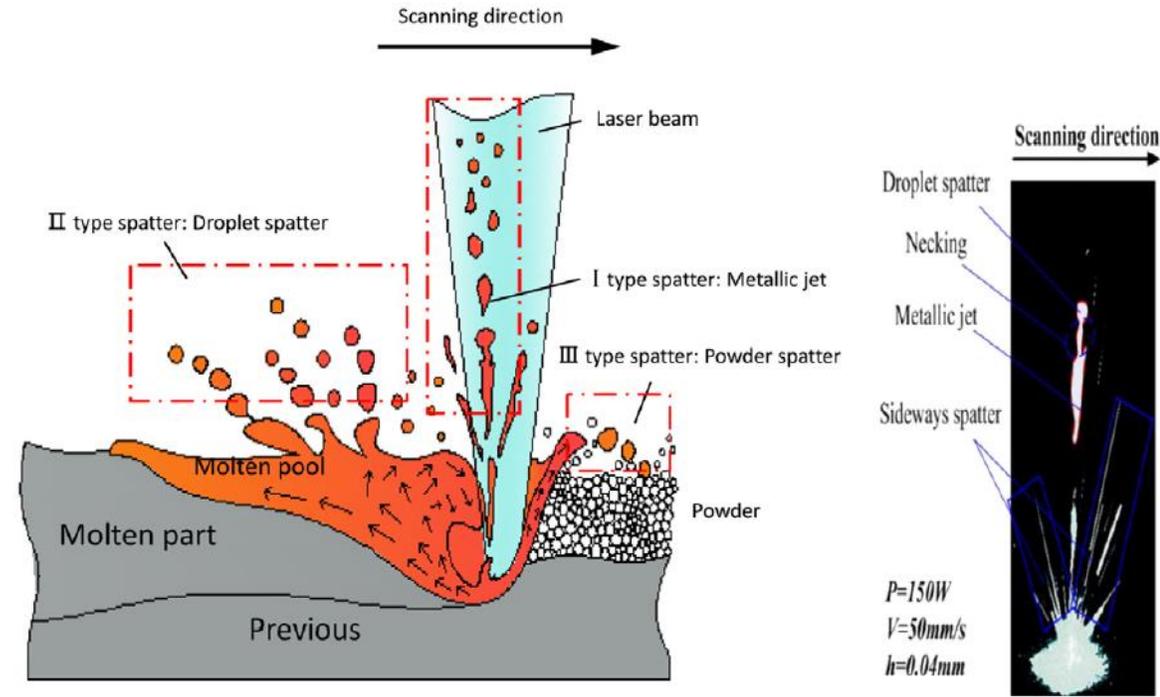
Trapp *et al.* (TU Dresden, Lawrence Livermore), Appl Mat Today (2017)

Interaction laser – matière. 2, avec le bain fondu

- Conséquence de la vaporisation et du keyhole : éjection de liquide ("spatters")



Weberpals & Dausinger Int Congress on Appl Lasers & Electro-Optics (2008)



Wang et al. Mater Design (2017)

- Conséquence de la vaporisation et du keyhole : éjection de liquide ("spatters")

Critère d'éjection (Ly, Rubenchik *et al.*, Lawrence Livermore, 2017) :

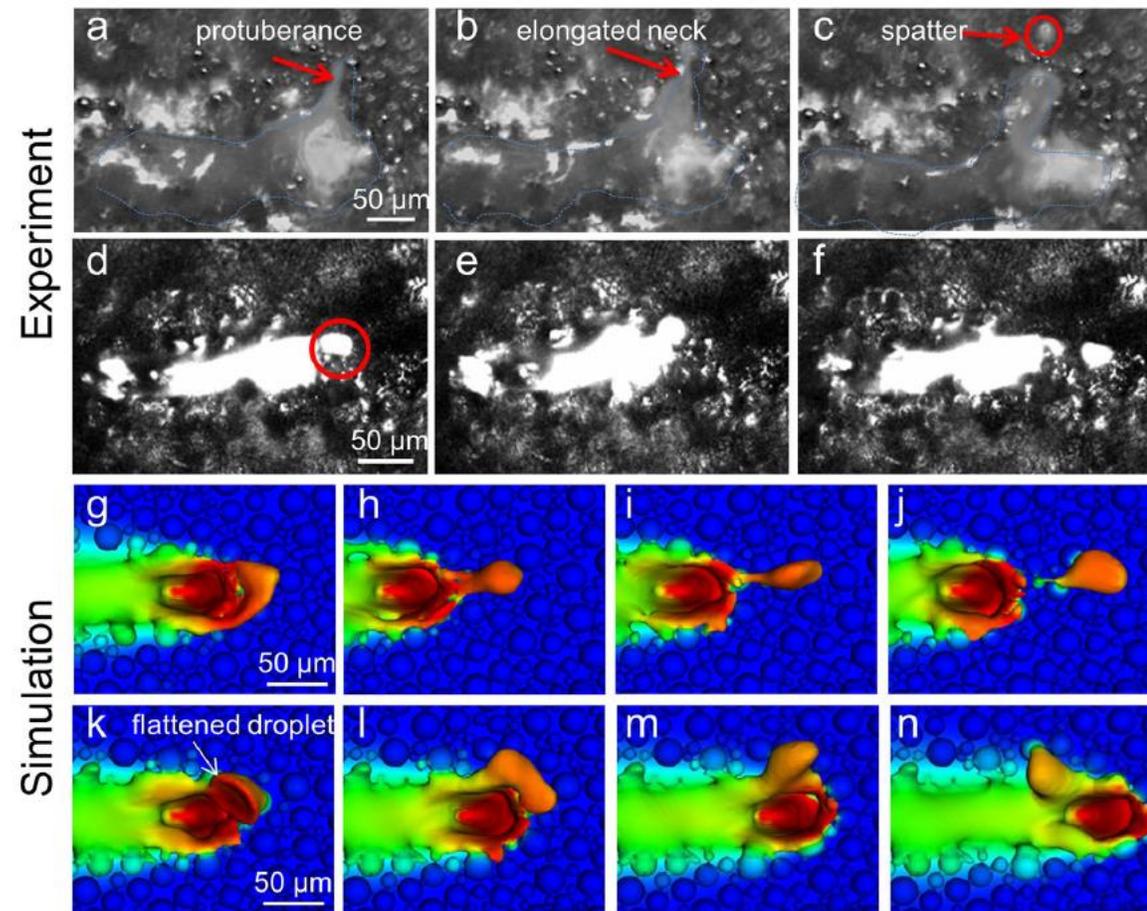
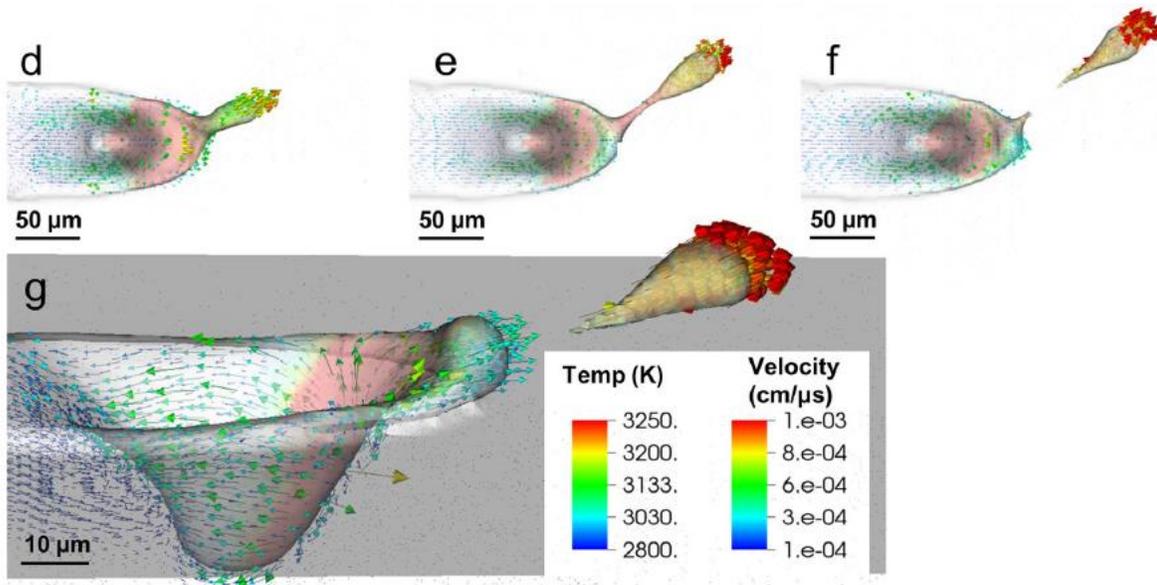
$$\rho_l v^2 > \gamma \kappa$$

$$R = 200 \mu \Rightarrow \kappa = 5000 \text{ m}^{-1}$$

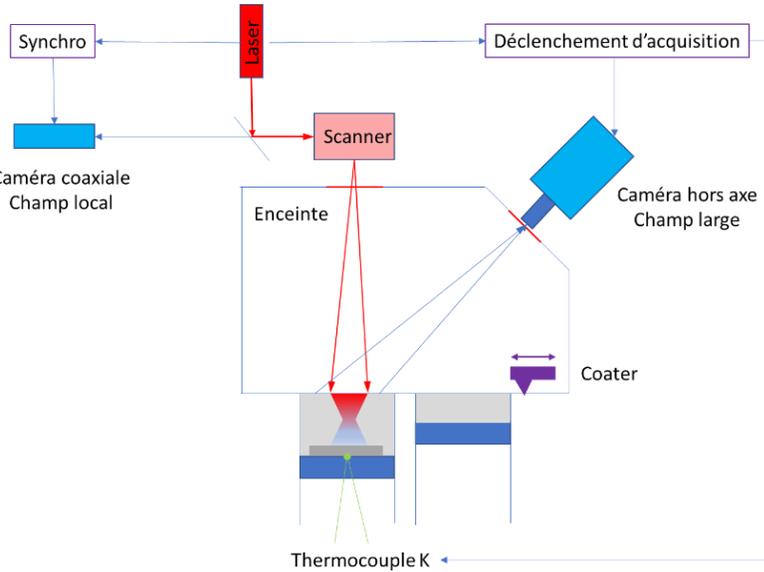
$$\gamma = 1,5 \text{ N m}^{-1}$$

$$\rho_l = 7300 \text{ kg m}^{-3}$$

Vitesse critique $\approx 1 \text{ m s}^{-1}$



Ly, Rubenchik *et al.* Sci Rep (2017)



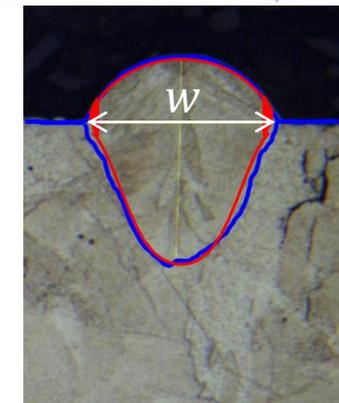
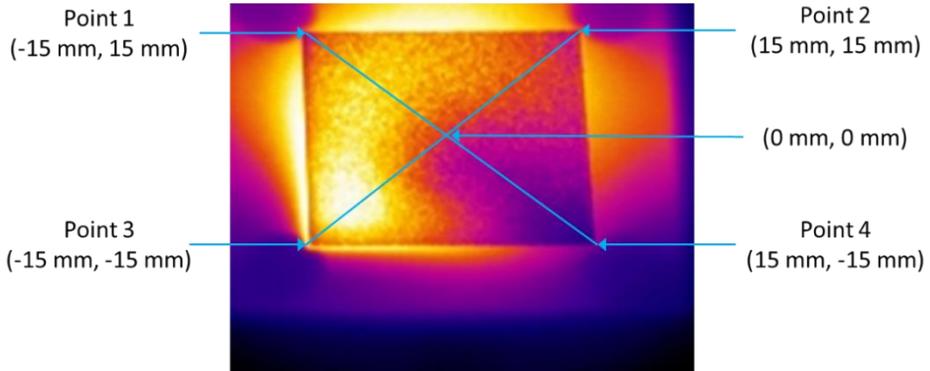
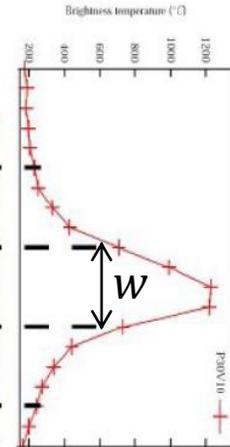
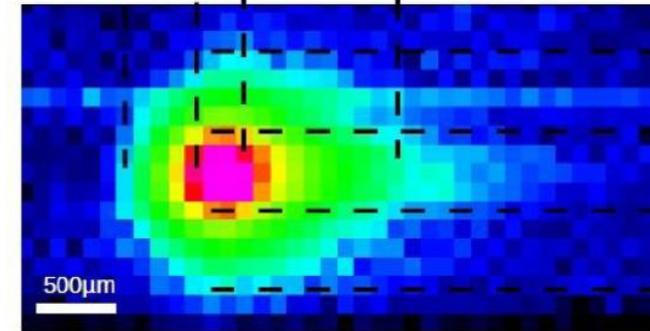
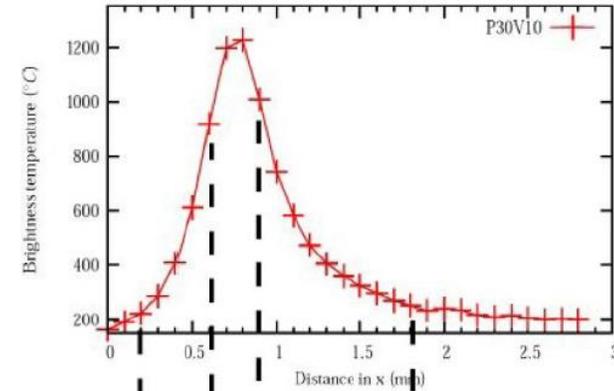
Loi de Planck :

$$M_{\lambda}(T) = \varepsilon_{\lambda} \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}$$

$$\Rightarrow T [K] = \frac{B}{\ln\left(1 + \frac{A}{DL}\right)}$$

Etalonnages :

- par rapport à des thermocouples insérés dans le lit de poudre
- par rapport à la largeur des zones fondues mesurées a posteriori



- ▶ Distribution de température
- ▶ Etendue du bain fondu

IN625

$$P_L = 195 \text{ W}$$

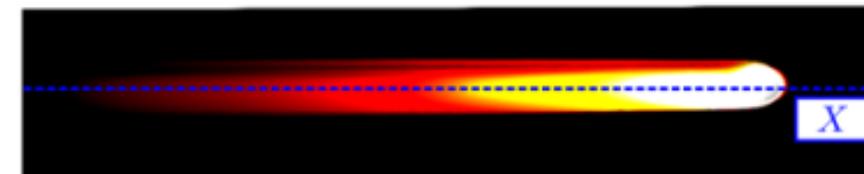
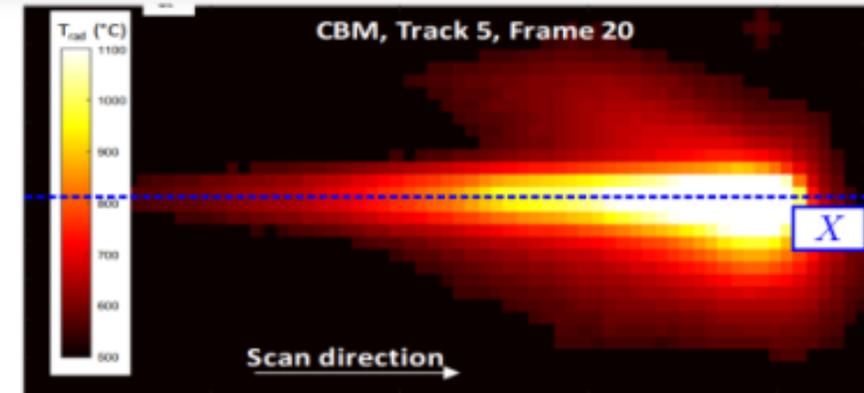
$$v_L = 800 \text{ mm s}^{-1}$$

$$\phi_L = 100 \text{ }\mu\text{m}$$

Expérimental

NIST

Lane *et al.* Integrating
Materials and Manufacturing
Innovation (2020)

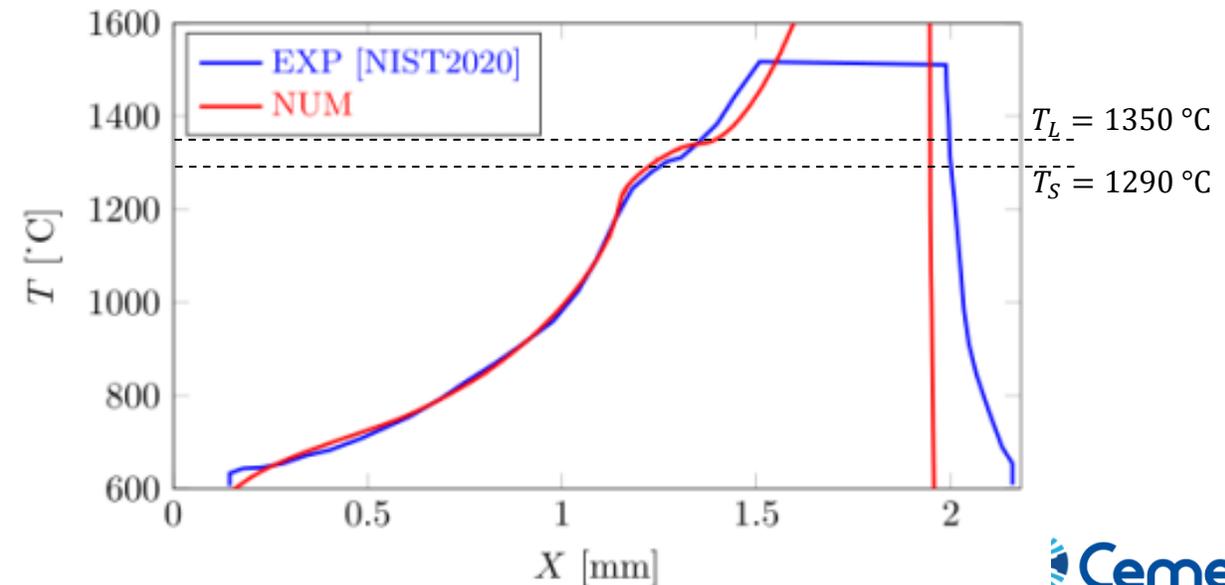


Comparaison simulation
numérique (A. Queva *et al.*,
CEMEF) vs expérimental

NB : ordre de grandeur des gradients de
température et des vitesses de refroidissement

$$\|\nabla T\| \approx 1500 \text{ à } 3000 \text{ K mm}^{-1}$$

$$\|\dot{T}\| \approx 1,2 \text{ à } 2,4 \times 10^6 \text{ K s}^{-1}$$



► Flottabilité (négligeable)

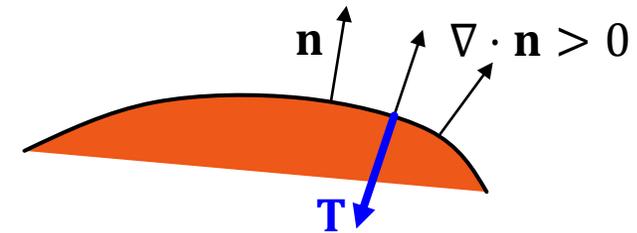
$$\mathbf{f}_{v,g} = \rho(T)\mathbf{g}$$
$$\approx \rho_{ref} [1 - \beta_{th}(T - T_{ref})]\mathbf{g}$$

$$Ra = \frac{\rho g \beta_{th} \Delta T L_c^3}{\mu a_{th}} = \frac{g \beta_{th} \Delta T L_c^3}{\nu a_{th}}$$
$$\beta_{th} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} = 3\alpha_{th} \quad a_{th} = \frac{k}{\rho c_p}$$

► Tension de surface

- Force surfacique, normale à l'interface liquide/gaz

$$\mathbf{T} = -\gamma \kappa \mathbf{n} = -\gamma (\nabla \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}$$



- Nombre capillaire

$$Ca = \frac{\text{forces visqueuses}}{\text{tension de surface}} = \frac{\mu V}{\gamma} \quad \left(= \frac{\mu V/L}{\gamma/L} \right)$$

$$\text{IN718} : \mu \approx 7,4 \times 10^{-3} \text{ Pa s}; V = 0,3 \text{ m s}^{-1}; \gamma \approx 1,9 \text{ N m}^{-1}$$

$$Ca \approx 1,1 \times 10^{-3}$$

► Tension de surface

- Force de Marangoni : force surfacique, tangente à l'interface

$$\mathbf{T} = -\gamma\kappa \mathbf{n} + \nabla_s \gamma \quad \gamma(T, \text{compo. chimique})$$

$$\mathbf{T}_{tg} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \nabla_s T \quad \nabla_s T = \nabla T - (\nabla T \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}$$

- Nombre de Marangoni

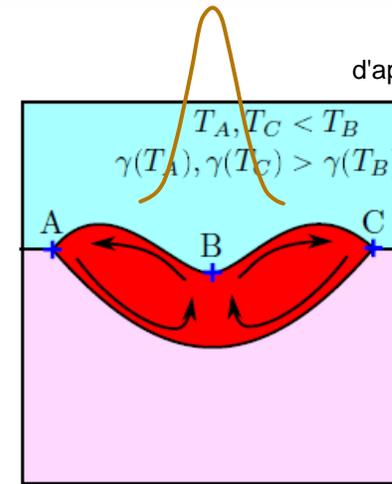
$$\text{Ma} = \frac{\text{effets thermocap.}}{\text{diffusion thermique}} = \left| \frac{\partial \gamma}{\partial T} \right| \frac{L \Delta T}{\mu a_{th}}$$

$$\text{IN718 : } \frac{\partial \gamma}{\partial T} \approx -1.1 \times 10^{-4} \text{ N m}^{-1} \text{ K}^{-1}; L = 2 \times 10^{-4} \text{ m}; \Delta T = 1000 \text{ K}; \mu \approx 7,4 \times 10^{-3} \text{ Pa s};$$

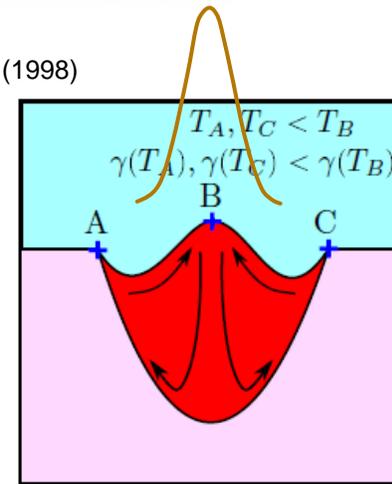
$$k \approx 27 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}; \rho \approx 7900 \text{ kg m}^{-3}; c_p \approx 680 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

$$\rightarrow \text{Ma} \approx 625$$

d'après Mills et al. (1998)



$$\frac{\partial \gamma}{\partial T} < 0$$



$$\frac{\partial \gamma}{\partial T} > 0$$

► **Quelques nombres adimensionnels utiles**

Physique		Thermique		Mécanique des fluides		
Nombre adimensionné	Péclet	Prandtl	Marangoni	Reynolds	Capillaire	Bond
Effets	$\frac{\text{Convectif}}{\text{Conductif}}$	$\frac{\text{Visqueux}}{\text{Conductif}}$	$\frac{\text{Thermocapillaire}}{\text{Diffusif}}$	$\frac{\text{Convectif}}{\text{Visqueux}}$	$\frac{\text{Visqueux}}{\text{Capillaire}}$	$\frac{\text{Gravité}}{\text{Capillaire}}$
Définition	$Pe = \frac{L_c u_l}{\alpha_T}$	$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$	$Ma = \left \frac{\partial \gamma}{\partial T} \right \frac{L_c \Delta T}{\mu \alpha_T}$	$Re = \frac{\rho_l u_l L_c}{\mu}$	$Ca = \frac{u_l \mu}{\gamma_l}$	$Bo = \frac{\rho_l g L_c^2}{\gamma_l}$
Ordre de grandeur (IN718)	$\approx 10^2$	$\approx 2 \times 10^{-1}$	$\approx 10^3$	$\approx 6 \times 10^2$	$\approx 2 \times 10^{-2}$	$\approx 10^{-4}$

► Balling

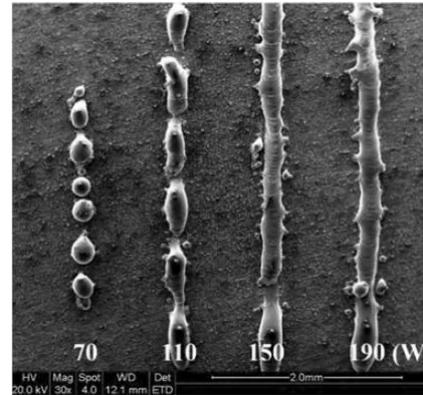
► Apport d'énergie insuffisant

→ zone fondue trop étirée
 → séparation en plusieurs zones fondues, sous l'action de la tension de surface

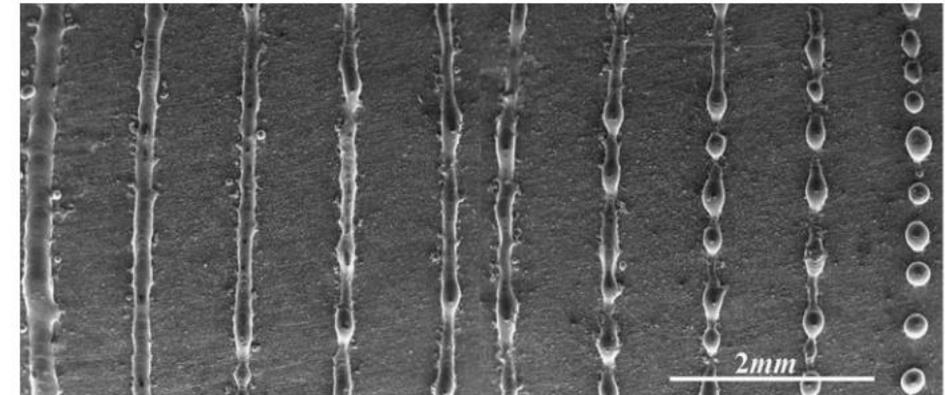
- Eviter les tensio-actifs (oxygène!)
- Augmenter la densité d'énergie : $\nearrow P_L, \searrow v_L$

Li et al. J Adv Manuf Tech (2012)

316L



$v_L = \text{cste} = 200 \text{ mm s}^{-1}$
 $P_L \searrow \Rightarrow \text{balling}$



$P_L = \text{cste} = 190 \text{ W. } v_L \nearrow \Rightarrow \text{balling}$

Simulation sur matériau céramique (alumine). Q. Chen (Thèse Mines ParisTech - Cemef, 2018)

V550



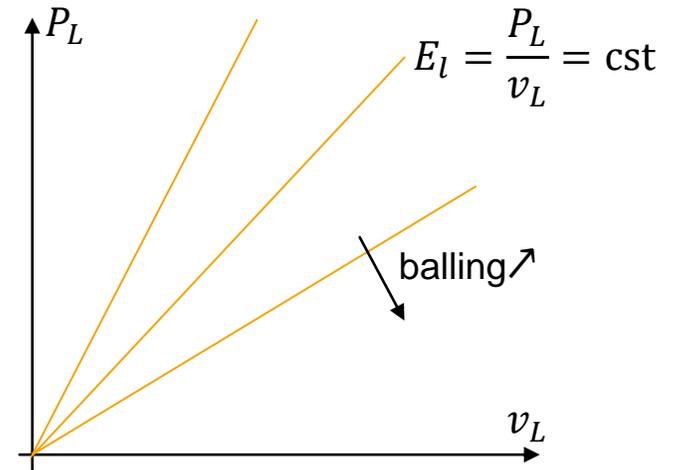
Contour noir = température de fin de solidification
 ($T = 2004 \text{ °C}$)



V600



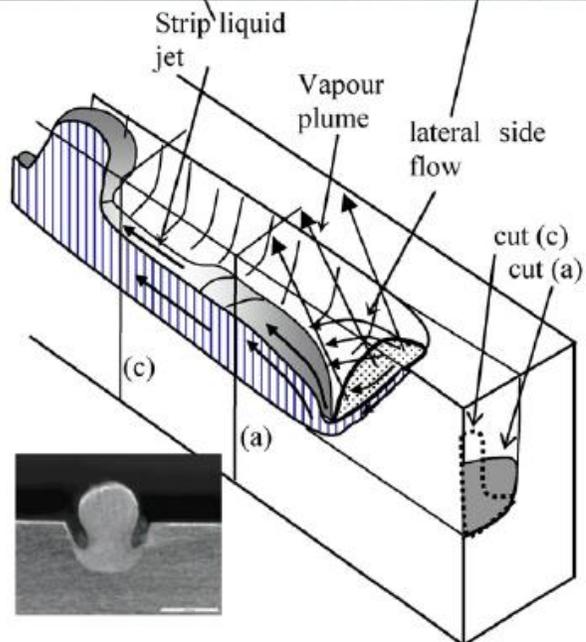
V800



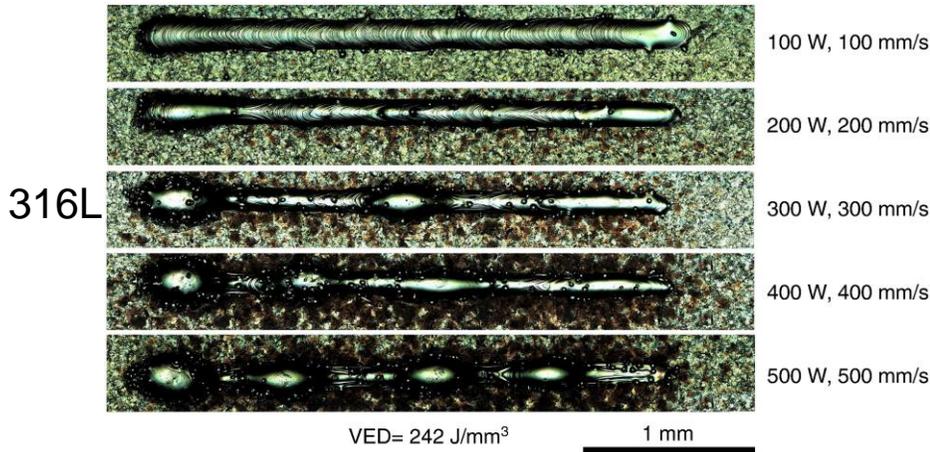
► Humping

► Associé au keyhole

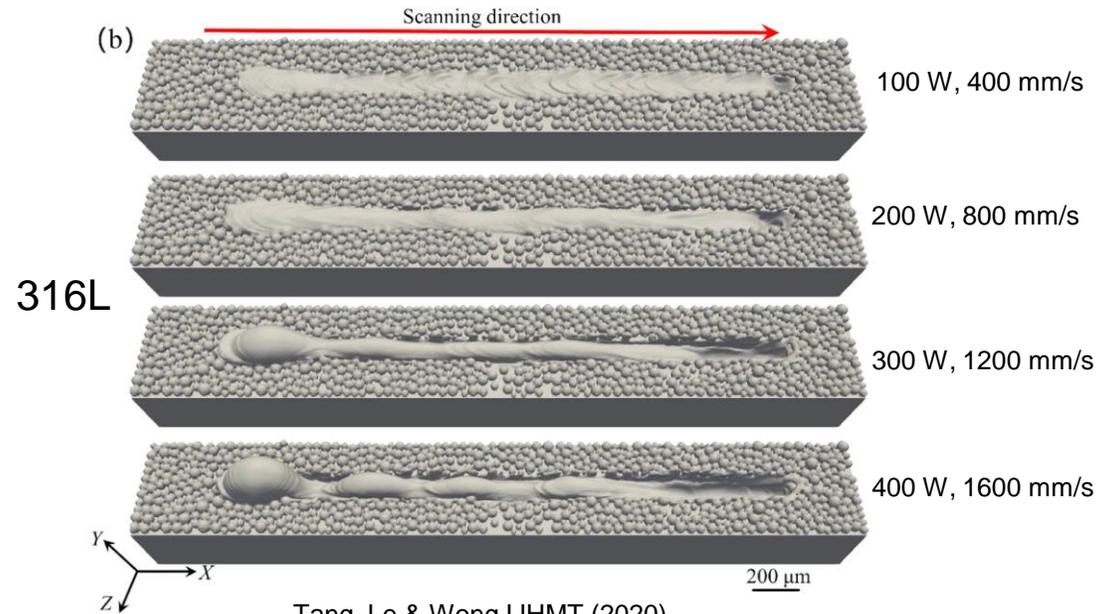
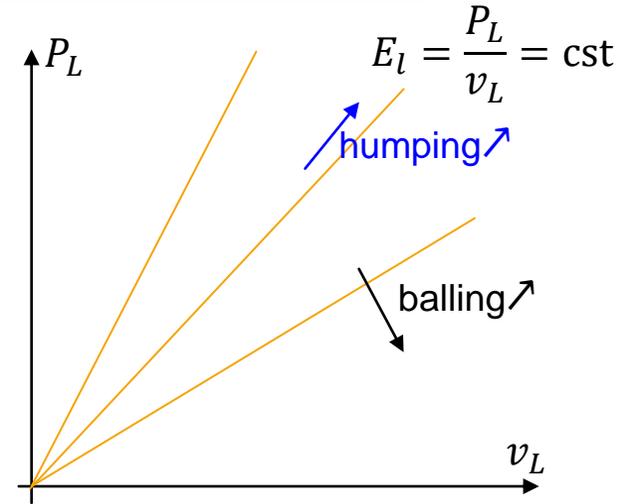
→ grande vitesse de liquide dans le contournement du capillaire gazeux
 → accumulation périodique à l'arrière de la zone fondue, et étirement de celle-ci



Fabbro, J Phys D: Appl Phys (2010), deep penetration laser welding

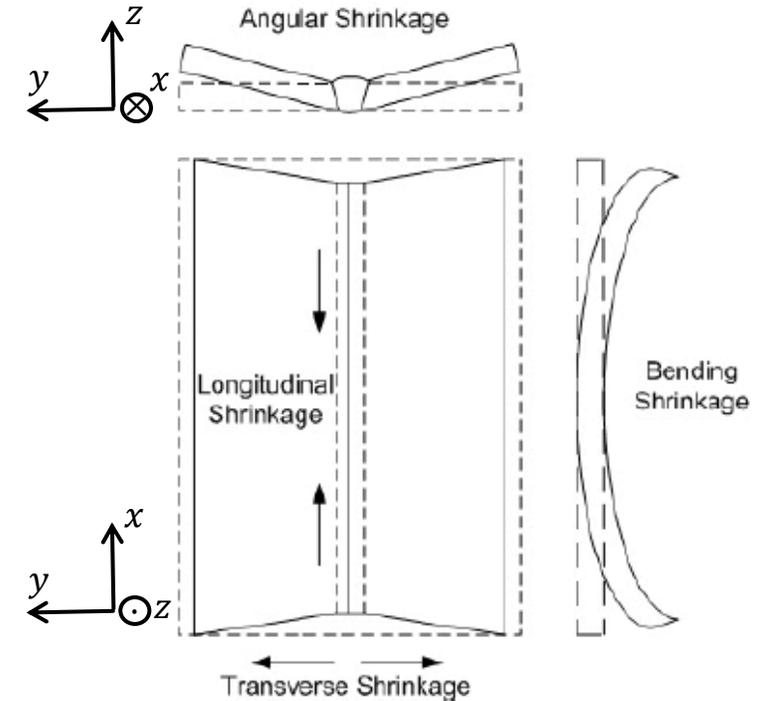
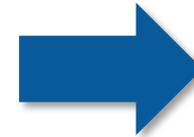
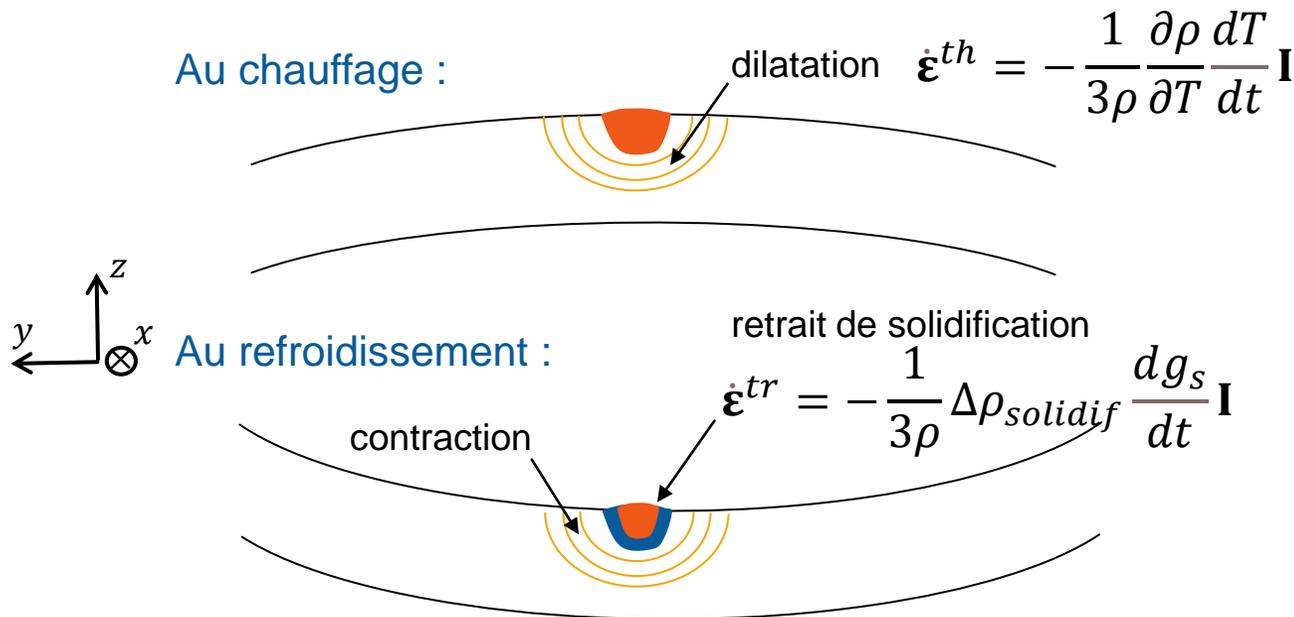


Scipioni Bertoli *et al.* Mater Design (2017)

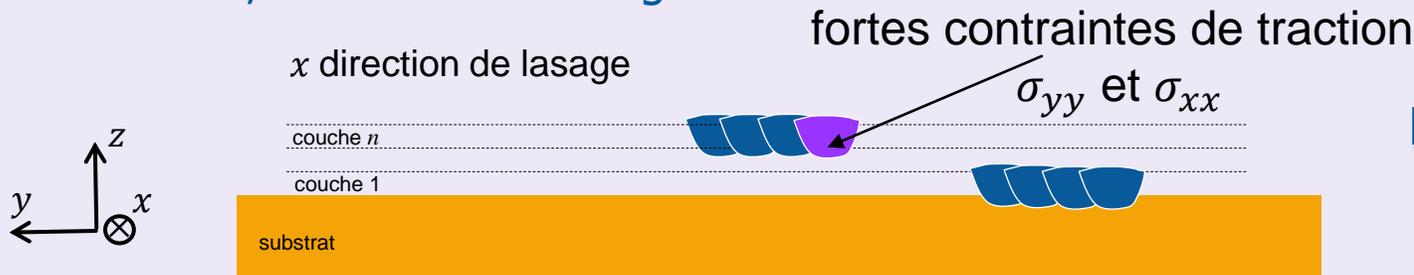


Tang, Le & Wong IJHMT (2020)

- ▶ Refroidissement non uniforme : ∇T et \dot{T} variables \rightarrow contraintes thermiques, et déformations associées
- ▶ Analogie avec le soudage



- ▶ En L-PBF, effet d'auto-bridage



Cyclage thermique

Dépose des cordons les uns à côté des autres, et les uns sur les autres
 Changements de phase à l'état solide, précipitations

▶ **PARTIE 1 : Phénomènes physiques**

▶ Interaction laser-matière

- ▶ Généralités. Interactions avec le lit de poudre, avec le bain fondu : vaporisation, dénudation, keyhole

▶ Echanges thermiques entre cordon/pièce et environnement

- ▶ Conduction à travers le lit de poudre, mesures thermiques

▶ Hydrodynamique du bain fondu

- ▶ Tension de surface, effet Marangoni, instabilités

▶ Solidification et changements de phase à l'état solide

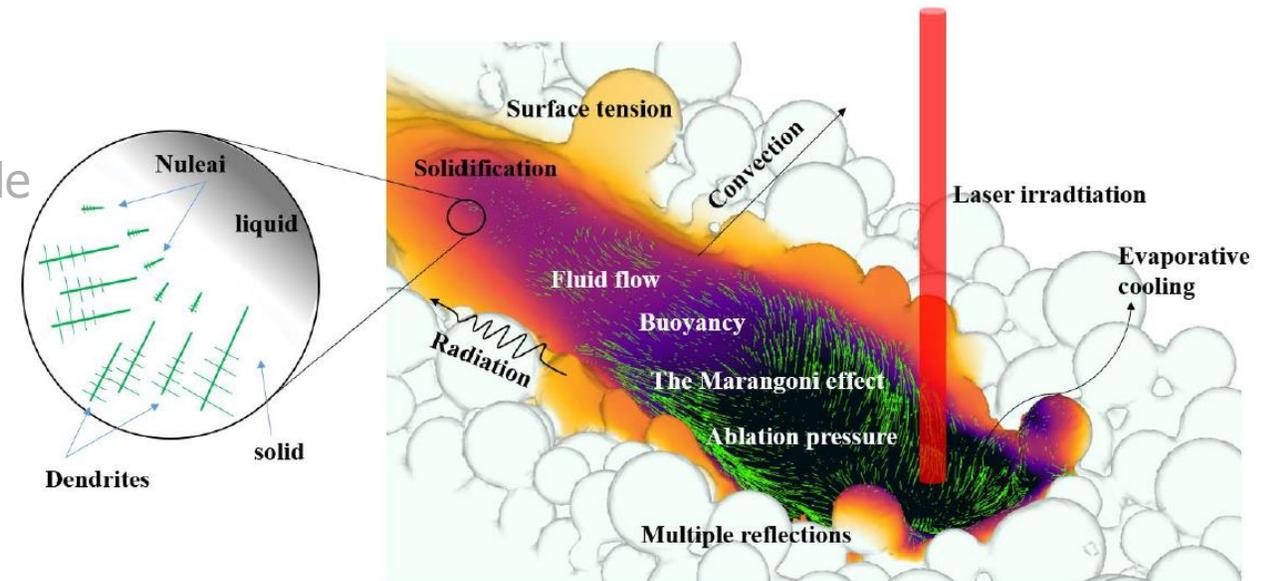
▶ Mécanique du solide

- ▶ Contraintes et distorsions

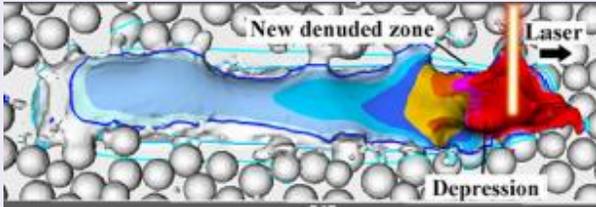
▶ **PARTIE 2 : Simulation numérique**

▶ Echelle des cordons élémentaires

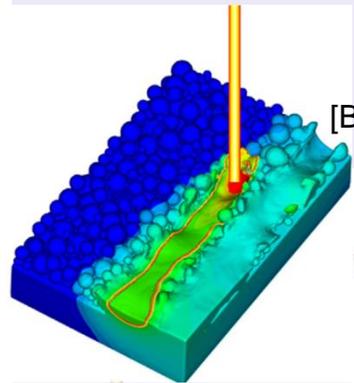
▶ Echelle de la pièce



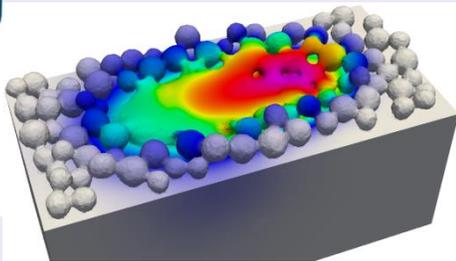
Echelle particules - « microscopique »



[Khairallah et al. 16]



[Bayat & Hattel 19]



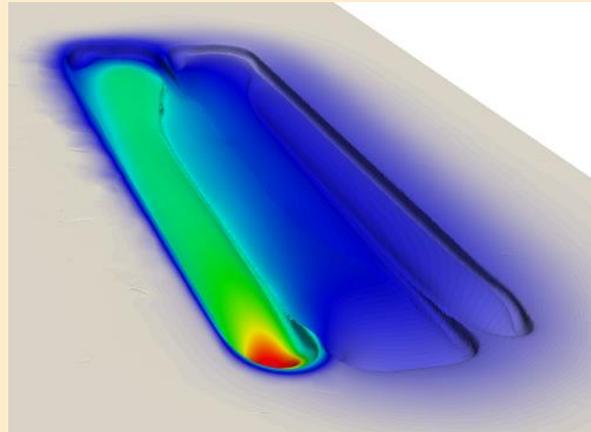
[Zhang et al., CEMEF 19]

- Interaction laser – particules de poudre
- Formation de la zone fondue, porosités
- Influence de la granulométrie
- Formation de la microstructure
- ...
- Temps calcul très élevé, semaines/mm

Khairallah, Anderson, Rubenchik, King, *Acta Materialia* 2016

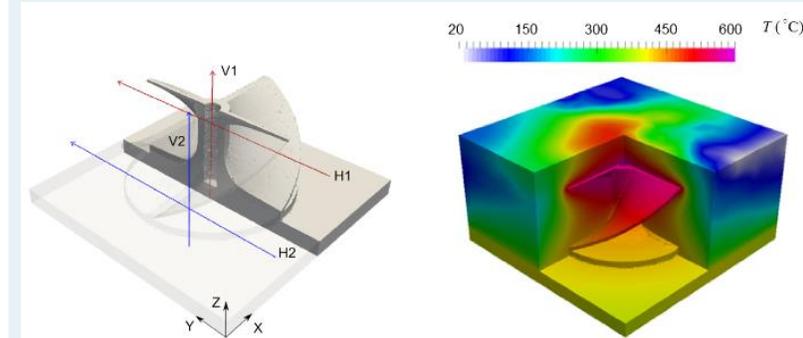
Bayat, Mohanty, Hattel, *Heat and Mass Transfer* 2019

Echelle cordon – Lit de poudre continu « mesoscopique »



- Interaction laser – lit de poudre
- Dynamique du bain fondu, “balling”
- Forme des cordons élémentaires
- Formation des contraintes, à l’arrière du bain fondu, fissuration à chaud
- Formation de la microstructure
- ...
- Temps de calcul élevé, jour/mm

Echelle pièce « macroscopique »



[Zhang et al., CEMEF 19]

- Distribution de température
- Distorsions et contraintes, pendant et post-process
- Fissuration à froid (à l’état solide)
- Formation de la microstructure
- ...
- Temps de calcul : jours/km (typiquement heures ou jours / pièce)

Zhang, Guillemot, Bernacki, Bellet, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 2018

Zhang, Guillemot, Gandin, Bellet, *C. R. Mecanique* 2018

- Equation de la chaleur (conservation de l'énergie)

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{v}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q}$$

ρ masse volumique

h enthalpie massique

\mathbf{v} champ de vitesse

k conductivité thermique

T température

\dot{Q} terme de source volumique (source laser, cf plus loin)

► En approche "milieu continu", modèles utilisés :

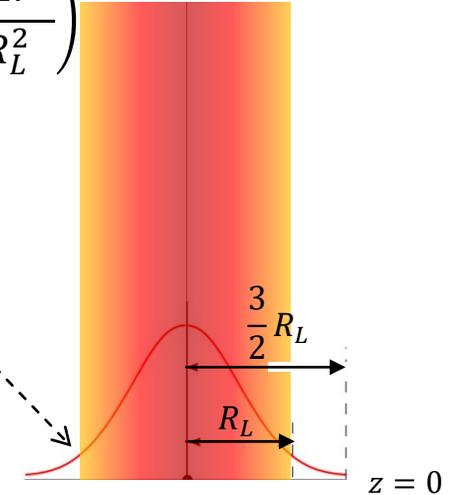
► **Modèle de flux surfacique**

- en surface du bain liquide, lorsque le liquide est opaque
- R coefficient de réflexion en surface

► **Modèle de source volumique**

- dans l'épaisseur du lit de poudre
- en profondeur dans l'épaisseur du bain liquide, lorsque le liquide est transparent au rayonnement laser
- **Loi de Beer-Lambert**
- α coefficient d'absorption dans l'épaisseur [m^{-1}]

$$\phi(r, z = 0) = (1 - R) \frac{2P_L}{\pi R_L^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{R_L^2}\right)$$



$$\frac{d\phi}{dz} = -\alpha\phi$$

$$\phi(r, z) = \phi(r, z = 0) \exp\left(-\int_0^z \alpha dz\right)$$

- Terme de source volumique

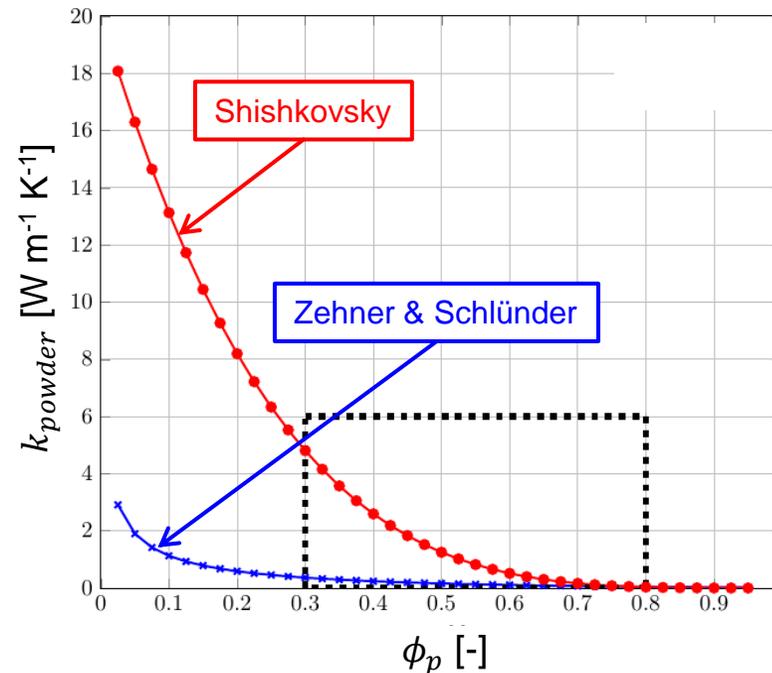
$$\dot{Q}(r, z) = -\frac{d\phi}{dz} = \alpha\phi(r, z) = (1 - R) \frac{2P_L}{\pi R_L^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{R_L^2}\right) \alpha \exp\left(-\int_0^z \alpha dz\right)$$

z	$\frac{\phi(r, z)}{\phi(r, z = 0)}$
$1/\alpha$	0.37
$2/\alpha$	0.14
$3/\alpha$	0.05

▶ Conductivité : différents modèles

- ▶ Shishkovsky, fréquent dans la littérature : $k_{powder} = k_m (1 - \phi_p)^n$ avec n généralement pris égal à 4; ϕ_p : porosité
- ▶ Zehner & Schlünder (actualisé par Sih & Barlow) $k_{powder} = A + B(C \ln(C^*) - D - E)$
- ▶ Hadley

Conductivité thermique d'un lit de poudre de Ti-6-4 (gaz argon), en fonction de la porosité



- ▶ **Chaleur spécifique** : inchangée
- ▶ **Masse volumique** : $\rho = \rho_{dense}(1 - \phi_p)$

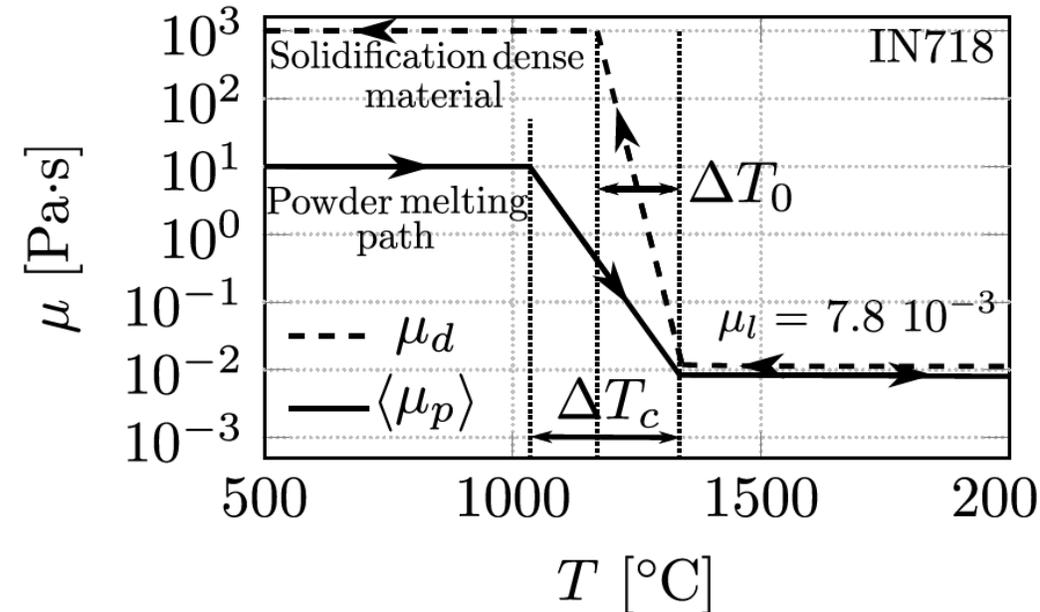
NB : ϕ_p pas très facile à mesurer, en pratique

- ▶ Etat liquide fondu : comportement newtonien incompressible : $\mathbf{s} = 2\mu\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{v} + (\nabla\mathbf{v})^T)$

- ▶ Transition : granulaire solide \rightarrow liquide fondu. Comportement visqueux, compressible

$$\mathbf{s} = 2\mu \left(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \frac{1}{3} \text{tr}(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) \mathbf{I} \right) \quad \text{tr}(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) = \nabla \cdot \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}$$

- ▶ Changement de volume associé à la fusion



Lit de poudre,
porosité $\phi_p \approx 0.5$

$$\rho = \rho_{dense}(1 - \phi_p)$$

Transformation dans un
intervalle de température
 ΔT , avec $\rho(T)$

$$\rho = \rho_{dense}$$

Matériau liquide,
état dense

- ▶ **Etat liquide : comportement newtonien, quasi incompressible**

$$\mathbf{s} = 2\mu\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{v} + (\nabla\mathbf{v})^T)$$

- ▶ Bain fondu L-PBF, alliage IN718 : $Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{7300 \times 0.3 \times 0.2 \times 10^{-3}}{7.4 \times 10^{-3}} = 60$

→ **Ecoulement laminaire**

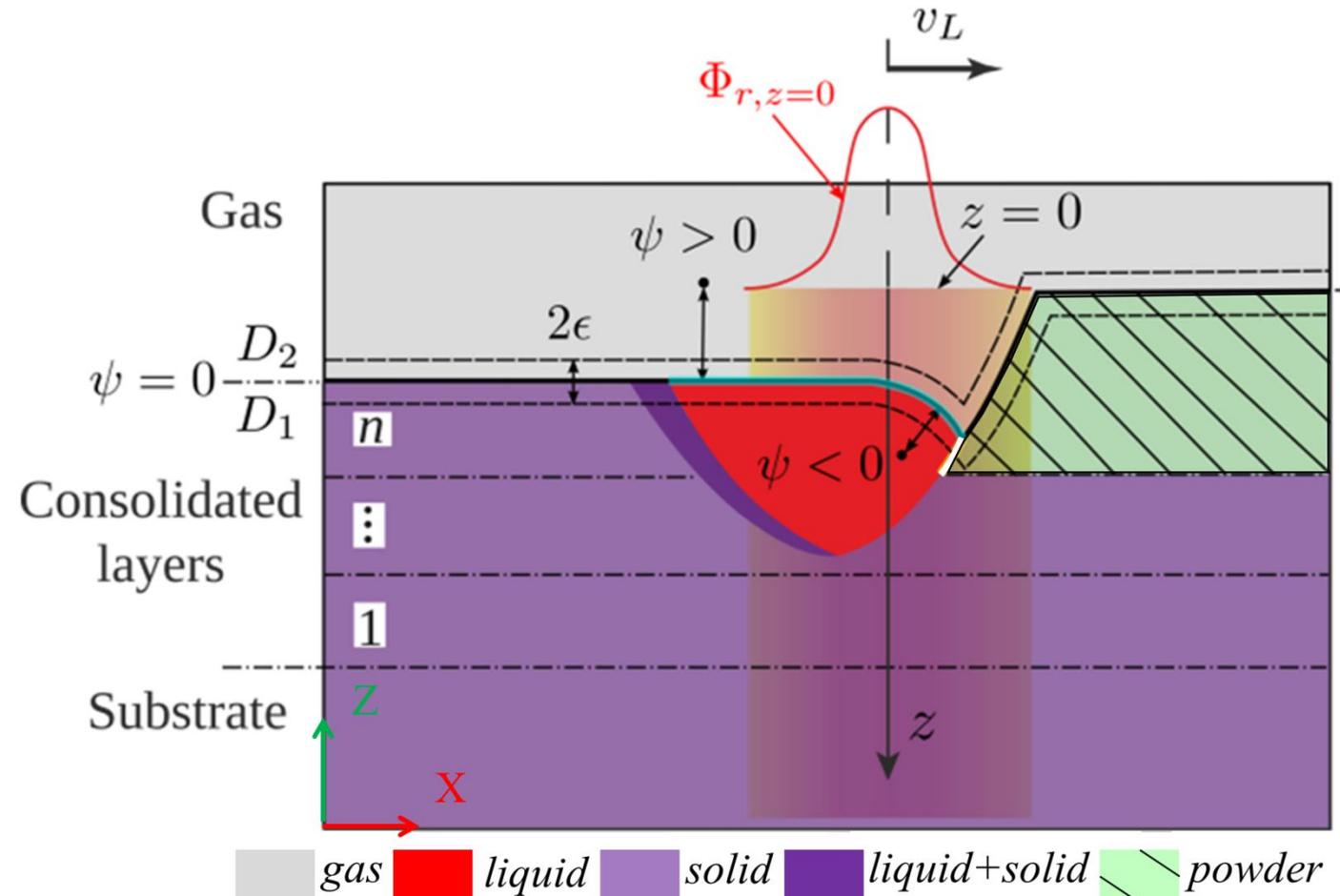
- ▶ **Conservation de la quantité de mouvement**

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\nabla \mathbf{v}) \mathbf{v} \right] = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{s}] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_v$$

- ▶ **Conservation de la masse**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

- ▶ **Formulation level-set**
- ▶ Système multidomaine : D_i , $i = \{1, 2\}$
 - ▶ Domaine D_2 : le gaz
 - ▶ Domaine D_1 : le matériau, multiphasé. phases α_j
- ▶ Interface entre les domaines D_1/D_2
 - ▶ Fonction "level set" ψ : fonction distance signée par rapport à l'interface défini par $\psi = 0$



► **Formulation level-set**

► **Mélange des propriétés**

- Fonction Heaviside, lissée sur un voisinage de part et d'autre de l'interface : épaisseur 2ϵ

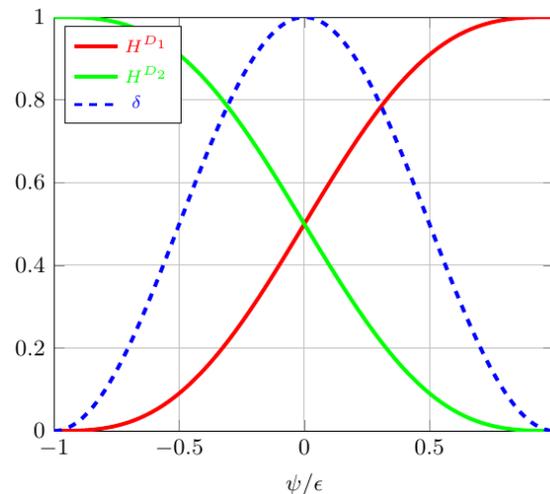
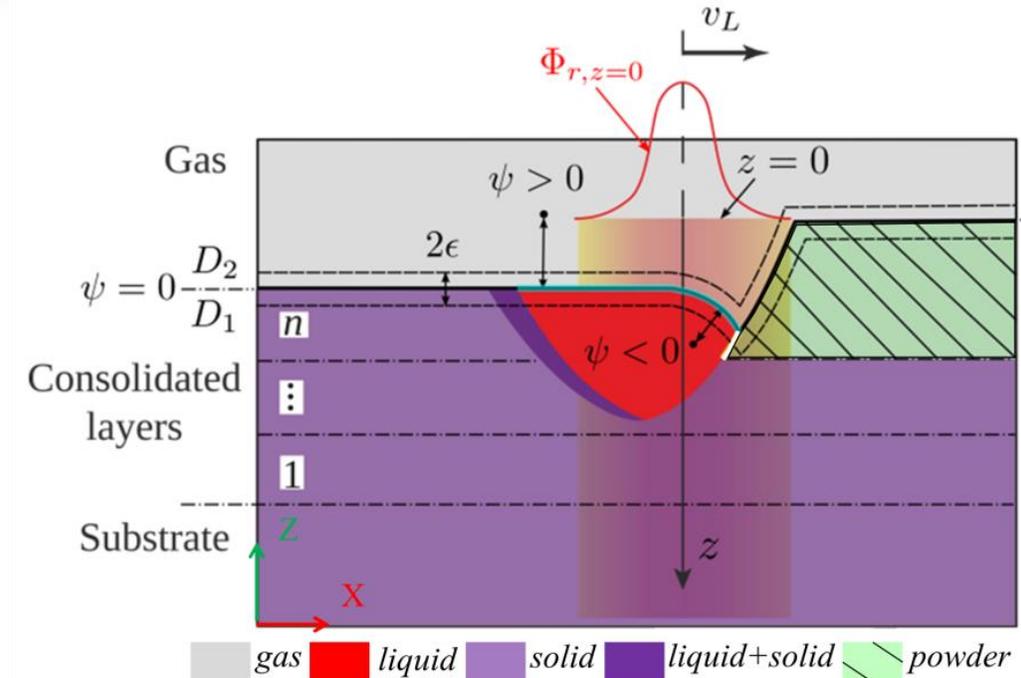
$$\mathcal{H}(\psi) = \begin{cases} 0 & \psi < -\epsilon \\ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\psi}{\epsilon} + \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\psi}{\epsilon}\right) \right] & |\psi| \leq \epsilon \\ 1 & \psi > \epsilon \end{cases}$$

- Autour de l'interface : $\{\chi\} = \mathcal{H}(\psi)\chi^{D_2} + (1 - \mathcal{H}(\psi))\chi^{D_1}$

- Dans le domaine 1 : $\chi^{D_1} = \langle \chi \rangle = \sum_j g_j \chi^{\alpha_j}$

- Fonction Dirac lissée :

$$\delta(\psi) = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial \psi} = \frac{1}{2\epsilon} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi\psi}{\epsilon}\right) \right]$$



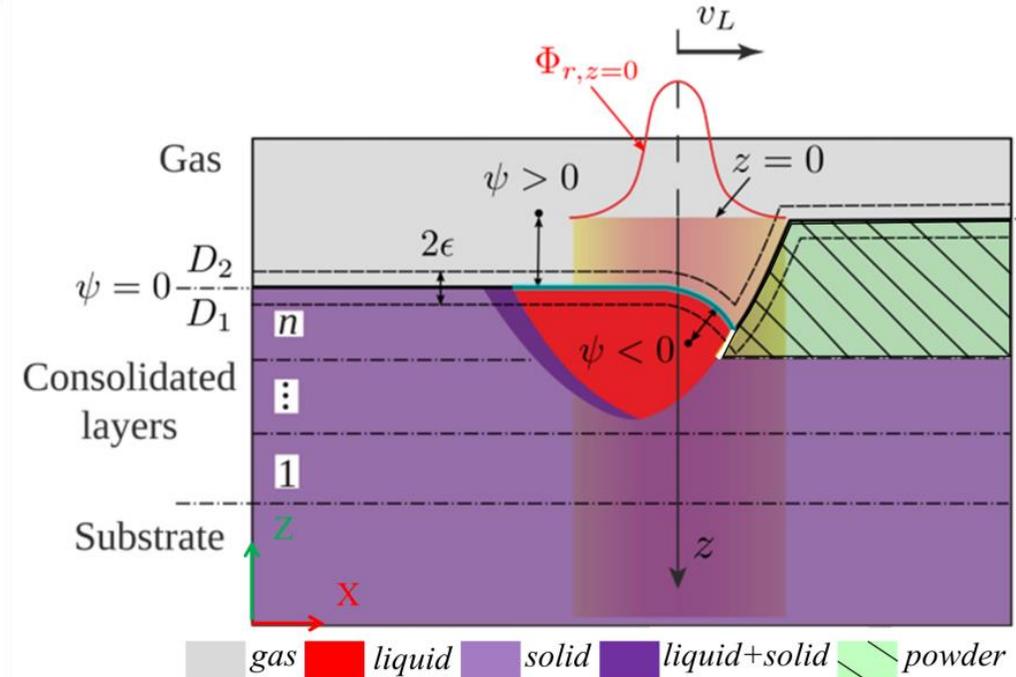
► **Impact de la formulation level-set dans les équations de conservation**

- Un champ unique de vitesse, et de pression sur tout le domaine
- Des propriétés moyennées à l'interface : {·}

$$\frac{\partial \{\rho h\}}{\partial t} + \nabla \cdot (\{\rho h\} \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\{k\} \nabla T) + \dot{Q}$$

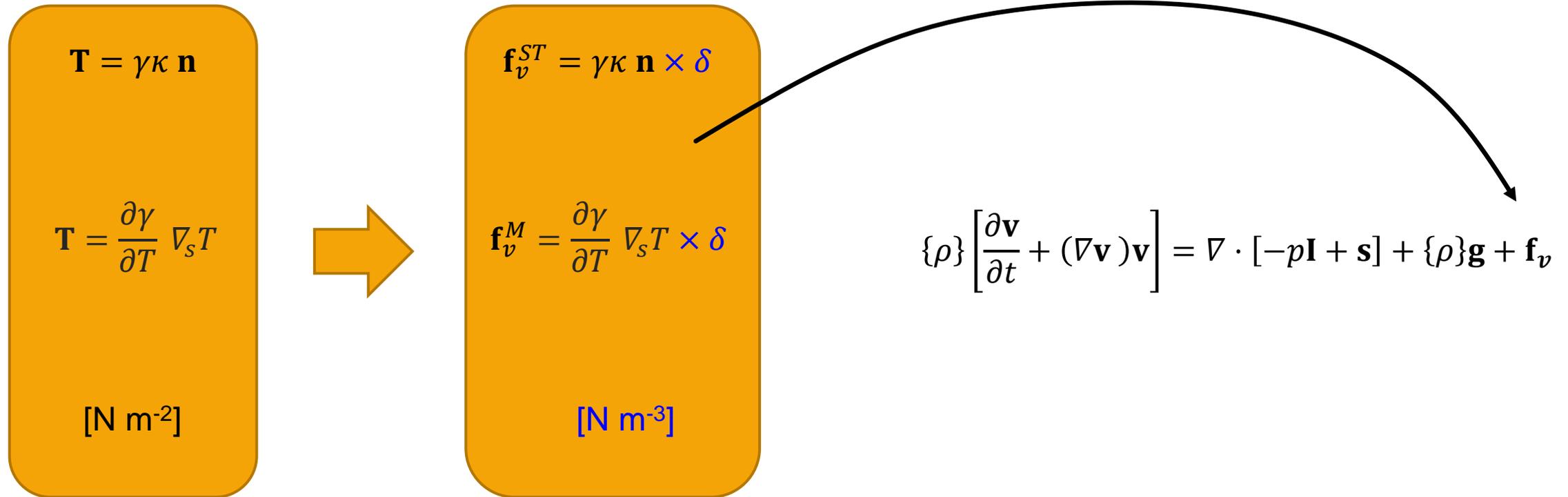
$$\{\rho\} \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\nabla \mathbf{v}) \mathbf{v} \right] = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mathbf{s}] + \{\rho\} \mathbf{g} + \mathbf{f}_v$$

$$\frac{\partial \{\rho\}}{\partial t} + \nabla \cdot (\{\rho\} \mathbf{v}) = 0$$



► *Traitement des chargements mécaniques interfaciaux*

- Tension de surface et Marangoni
- Transformation des vecteurs contraintes (forces par unité de surface) en densités volumiques de force



► *Même stratégie pour les chargements thermiques (rayonnement)*

► **Configuration étudiée : lit de poudre d'alumine sur substrat d'alumine dense**

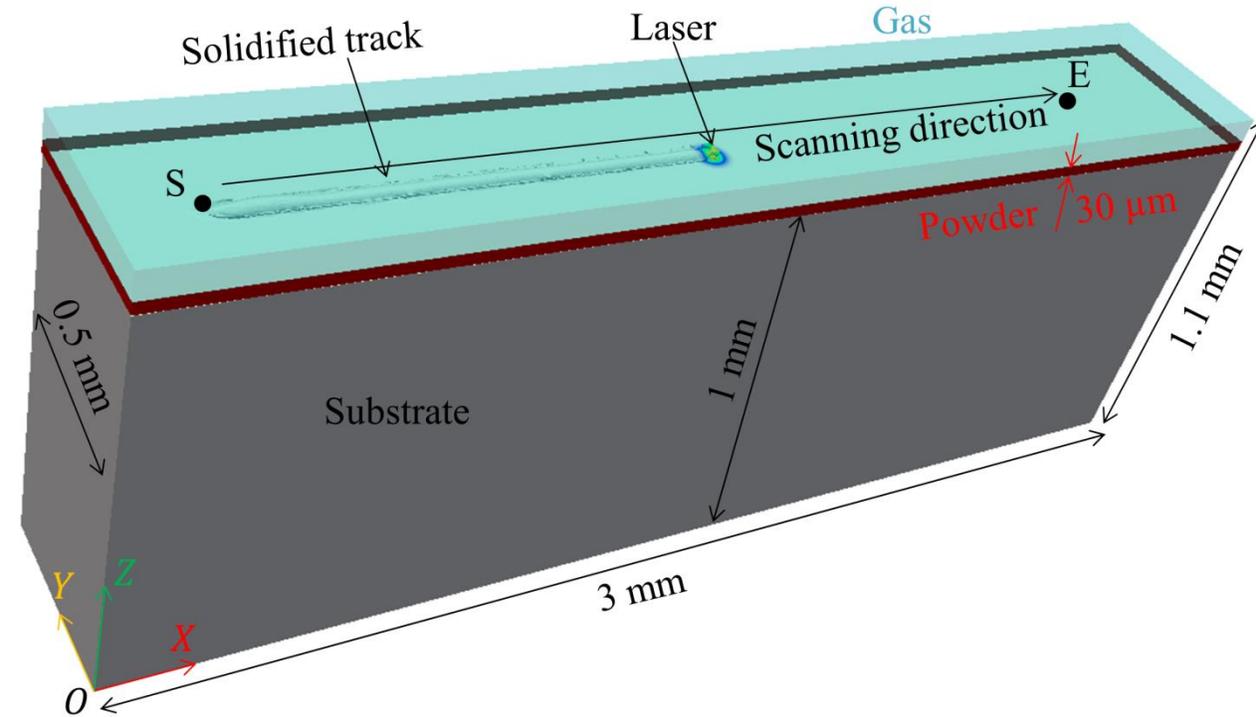
- Lit de poudre d'épaisseur $50\ \mu\text{m}$, porosité : 50%
- $v_L = 200\ \text{mm s}^{-1}$, $P_L = 84\ \text{W}$, $R_{int} = 50\ \mu\text{m}$
- Coefficient de réflexion $R = 0.05$
- Coefficients d'absorption
 - Poudre : $\alpha = 5\ \text{mm}^{-1}$
 - Matériau dense : $\alpha = 5\ \text{mm}^{-1}$
- Rayonnement en surface. Emissivité $\varepsilon_r = 0.4$
- Température initiale $T_0 = 20^\circ\text{C}$
- Viscosité de l'alumine liquide

$$\mu_l(T) = 2.15 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{57685}{R_g T}\right) \quad [\text{Pa s}]$$

$$\mu_l(T_m = 2054\ ^\circ\text{C}) = 0.042\ \text{Pa s}$$

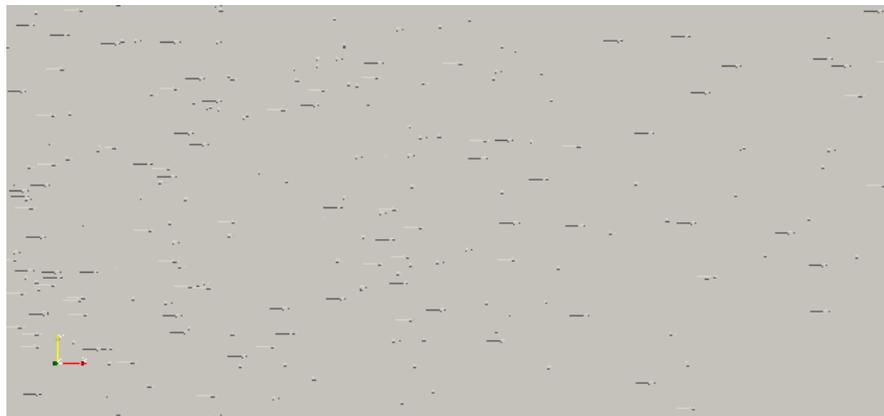
- Tension de surface à T_m : $\gamma_m = 0.64\ \text{N m}^{-1}$
- Coeff. de Marangoni $\partial\gamma/\partial T = -8.2 \times 10^{-5}\ \text{N m}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Pas de temps $\Delta t = 2\ \mu\text{s}$
- Conditions aux frontières du domaine :

	Thermique	Fluide	Solide
Face inférieure	$h_T = 40\ \text{W m}^{-2}\ \text{K}^{-1}$	$\mathbf{v} = 0$	$\mathbf{v} = 0$
4 faces latérales		$\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0$	libre
Face supérieure	adiabatique	libre	

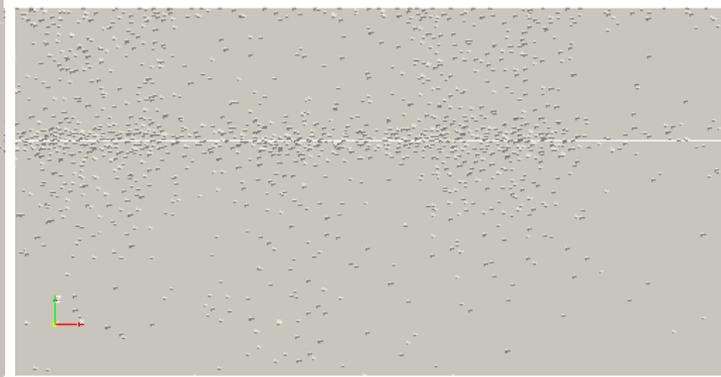
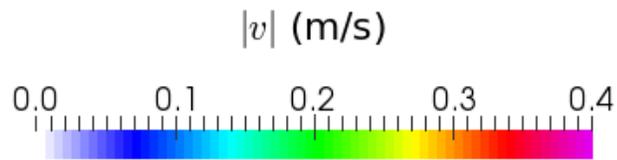


- ▶ **Résolution thermique** : fusion, solidification, non-linéaire (chaleur latente)...
- ▶ **Résolution mécanique** : Navier-Stokes, stabilisé, tension de surface, Marangoni...
- ▶ **Couplage** : effets de convection

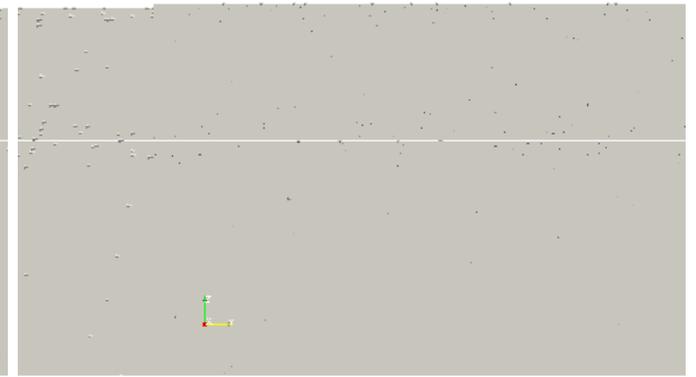
$$\frac{\partial \gamma}{\partial T} = -10^{-4} \text{ N m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$



Vue de dessus



Plan axial de symétrie

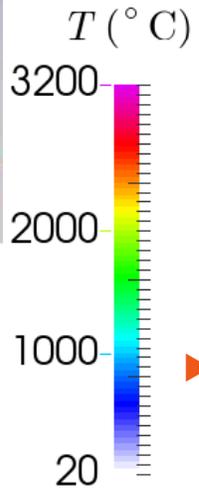
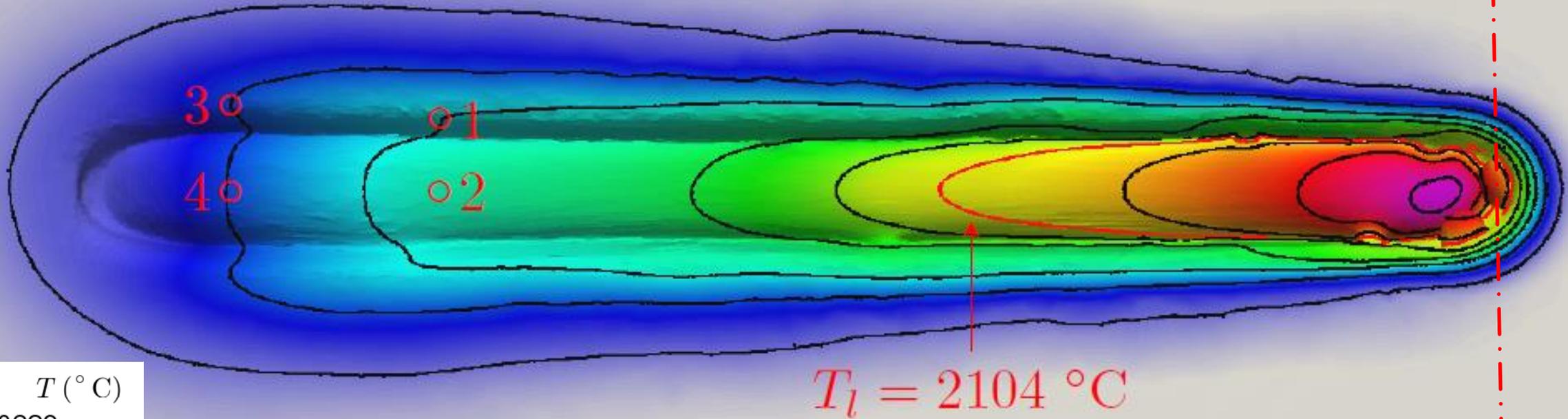


Plan transverse

Contour noir : source laser

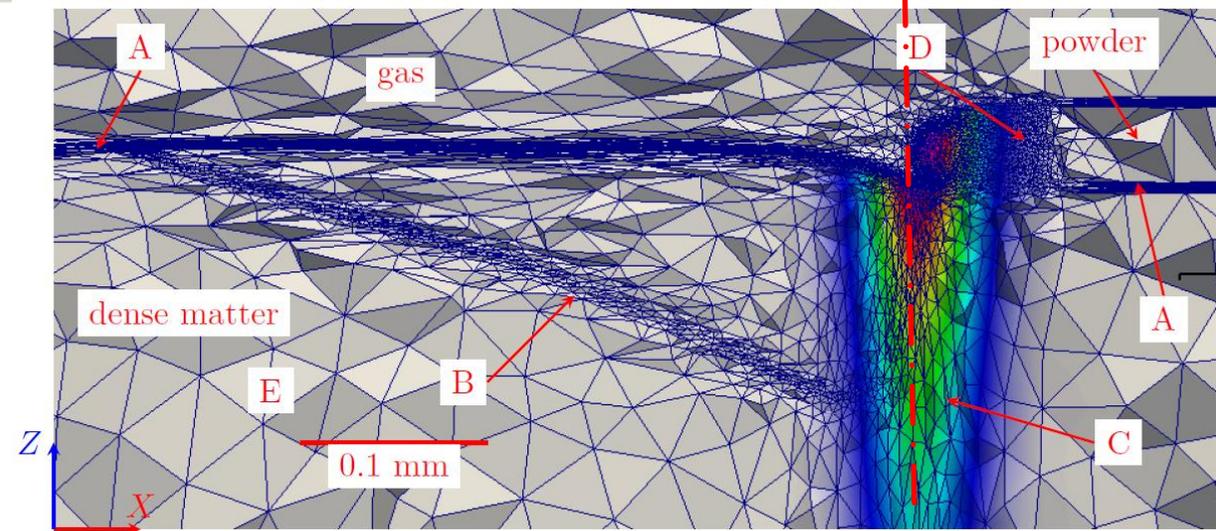
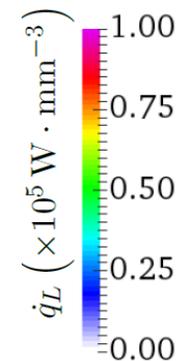
Contour rouge : limite du bain fondu (liquidus)

Contour blanc : interface lit de poudre / substrat



► **Adaptation de maillage pilotée par :**

- La masse volumique (→ régions A)
- La fraction de liquide (→ régions B)
- La source de chaleur (→ région C)
- Taille de maille de fond : $50 \text{ } \mu\text{m}$



Thermique et maillage

Thermo-hydraulique – mise en évidence du « balling »

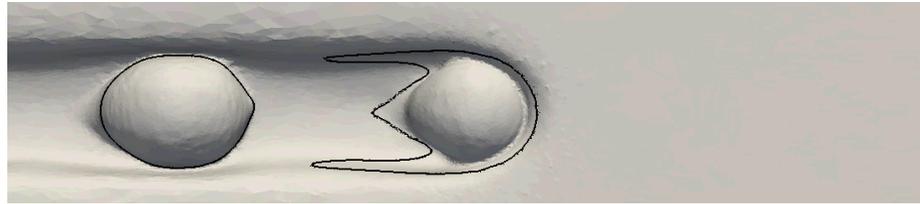
► Déstabilisation du cordon liquide par augmentation de la vitesse de lasage

$$P_L = 84 \text{ W}$$

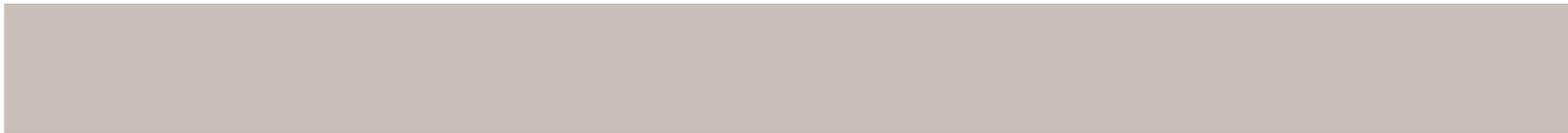
V550



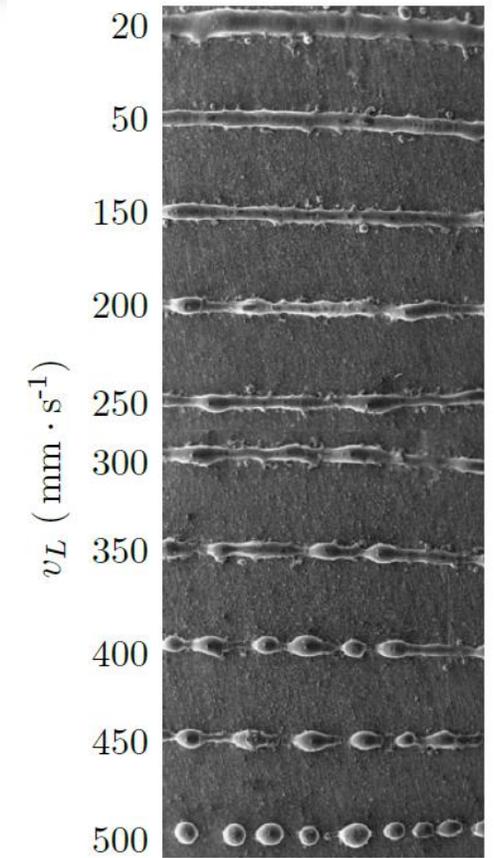
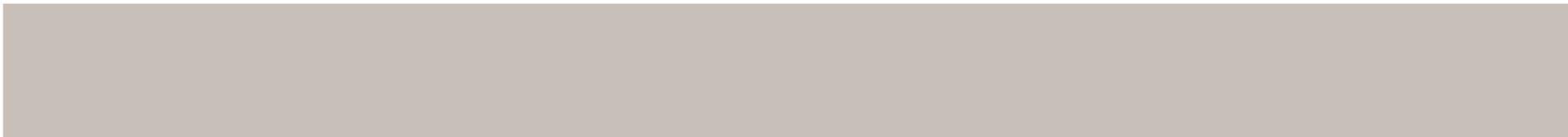
Contour noir =
température de fin de
solidification
($T = 2004 \text{ °C}$)



V600



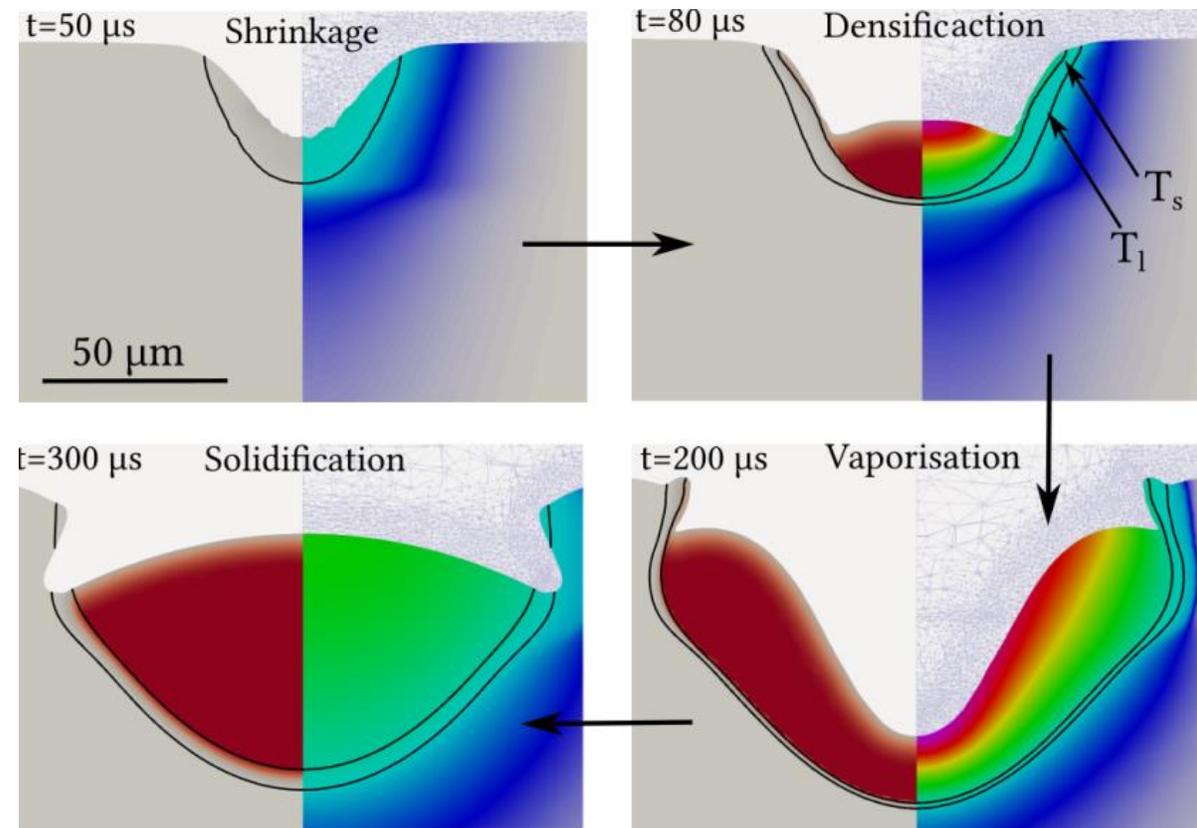
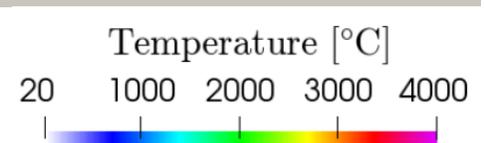
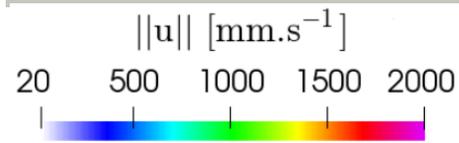
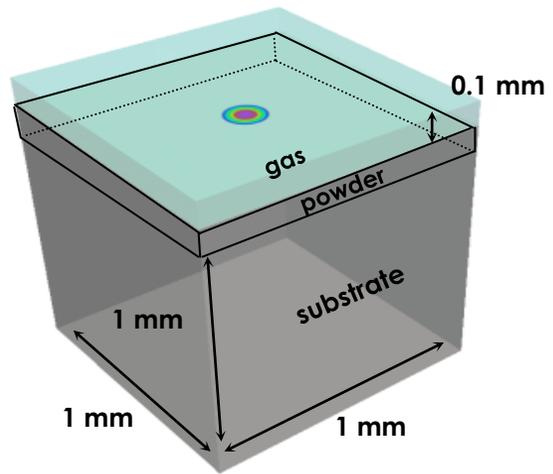
V800



Effet de « balling » (acier inox 316L)

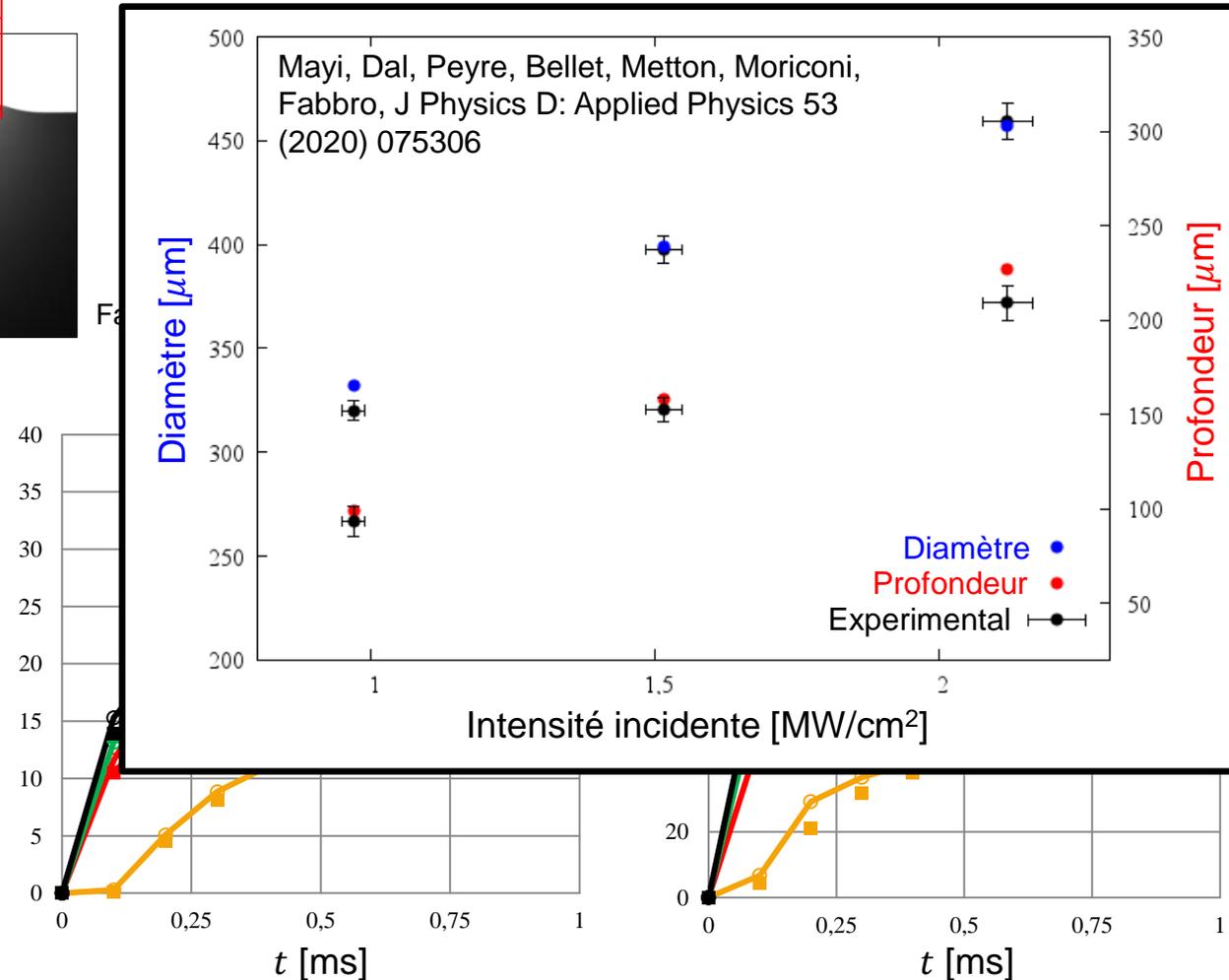
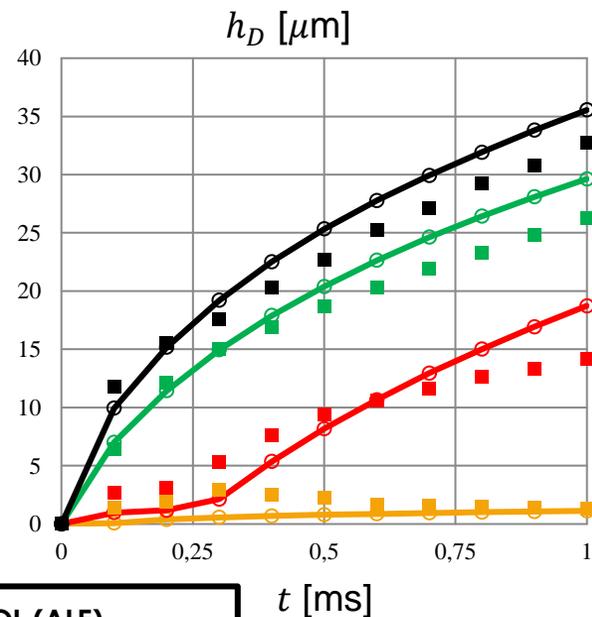
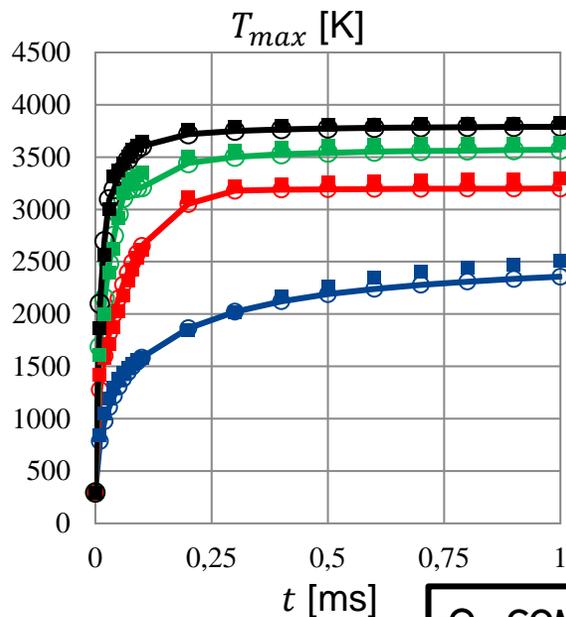
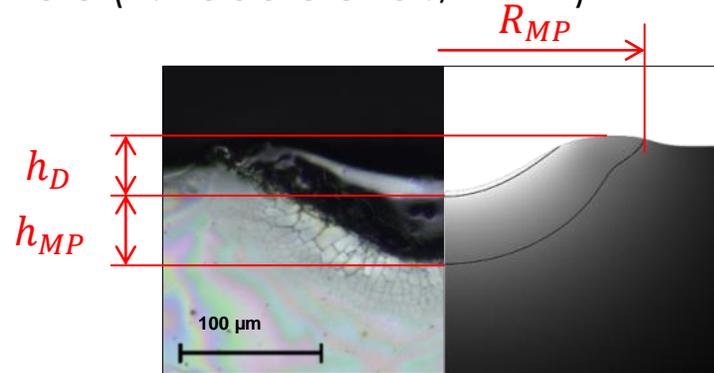
Li et al., Balling behavior of stainless steel and nickel powder during SLM, Int J Adv Manuf Tech 59 (2012)

Effet de la vaporisation : tir statique sur substrat recouvert de lit de poudre

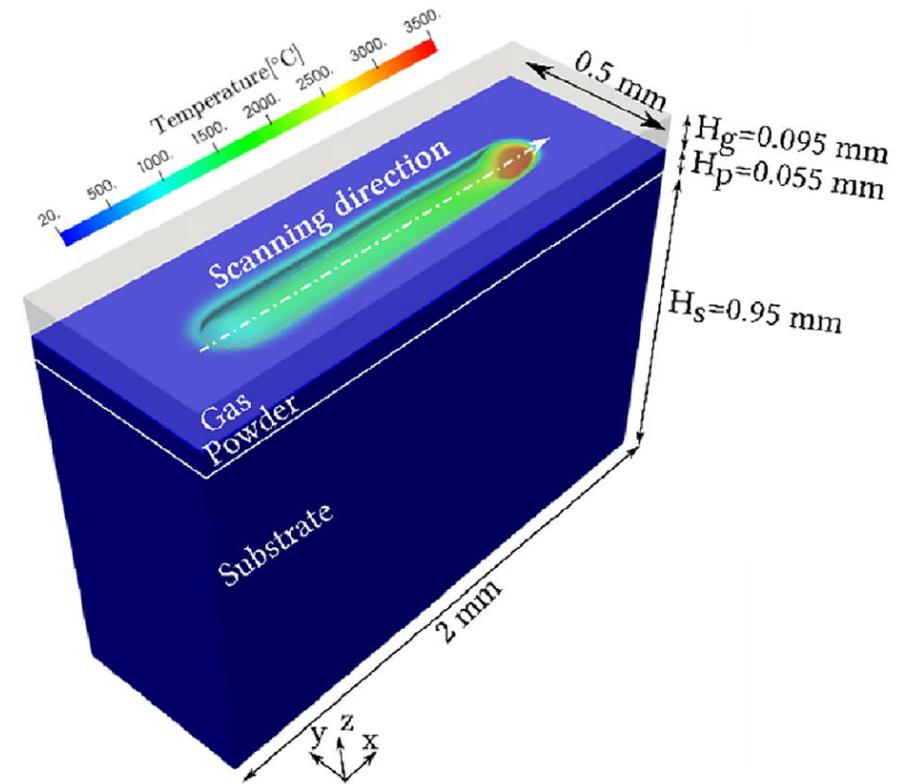
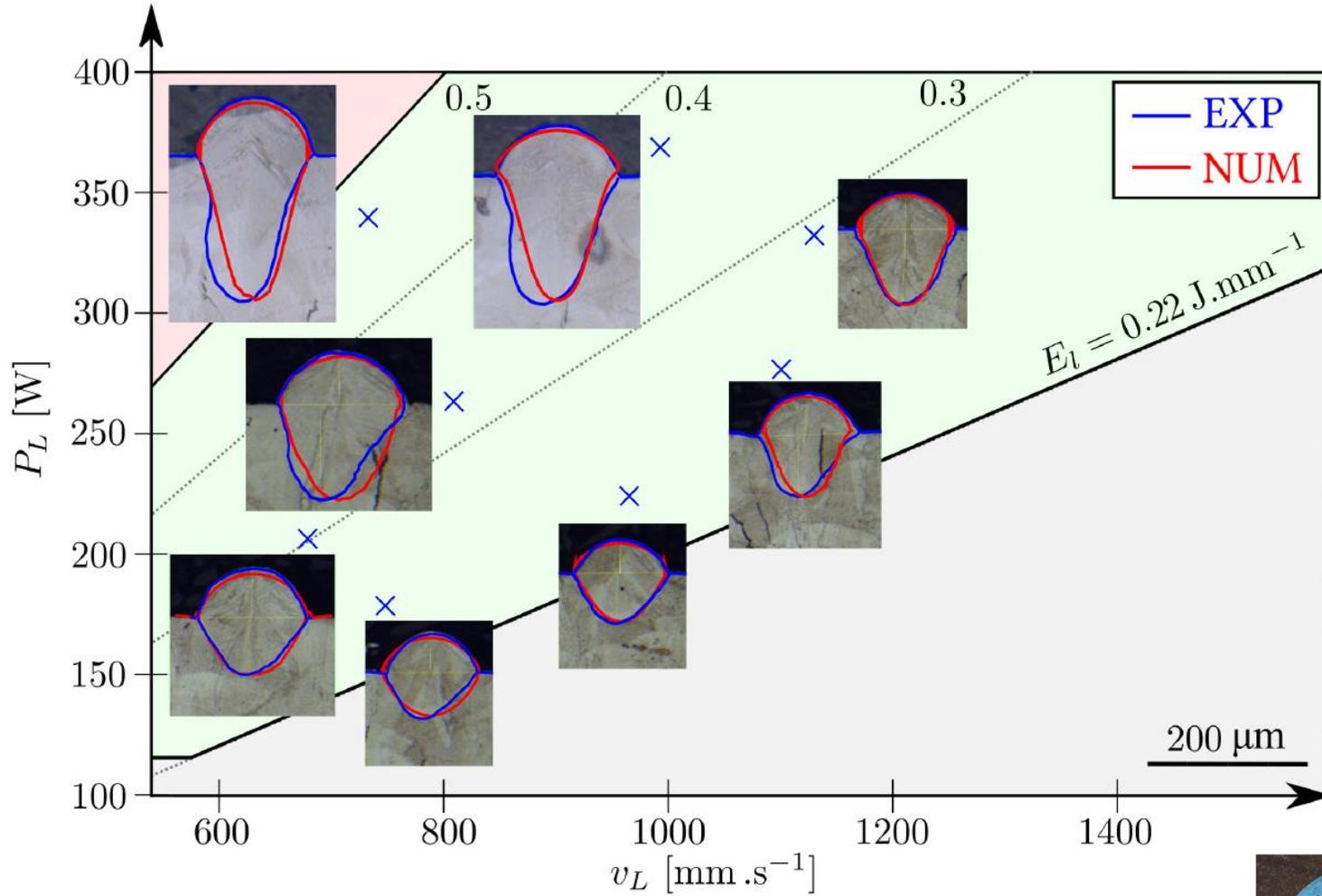


Vaporisation : benchmark numérique et validation

- ▶ Tir statique sur substrat IN625
- ▶ Benchmark avec Y. Mayi (doctorant PIMM, Arts et Métiers) utilisant COMSOL®, en mode ALE
- ▶ Comparaison expérimentale (R. Fabbro *et al.*, PIMM)

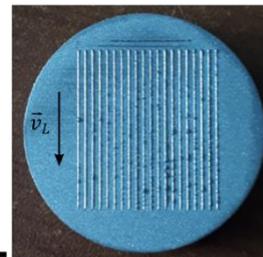


○ COMSOL (ALE)
 ■ CimLib CEMEF (level set)



Simulation numérique.
Thèse d'Alexis Queva,
CEMEF

Base expérimentale.
Thèse de David Grange, CMAT



Hydrodynamique du bain fondu : résultats de simulation

IN738

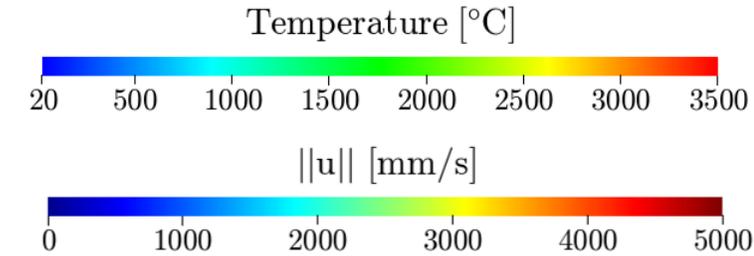
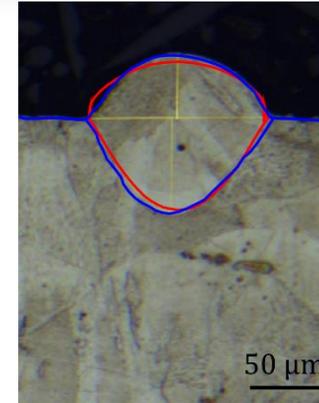
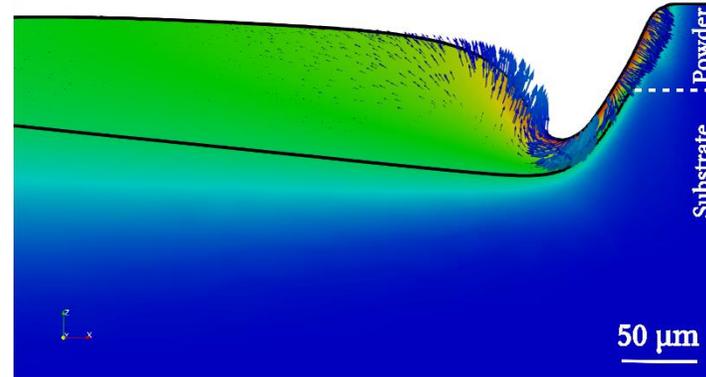
$\phi_L = 100 \mu\text{m}$

$P_L = 230 \text{ W}$

$v_L = 960 \text{ mm/s}$

$E_l = 0,24 \text{ J/mm}$

$R = 0.30$



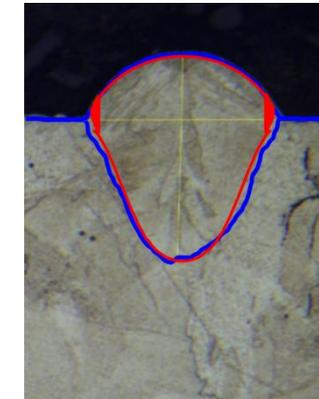
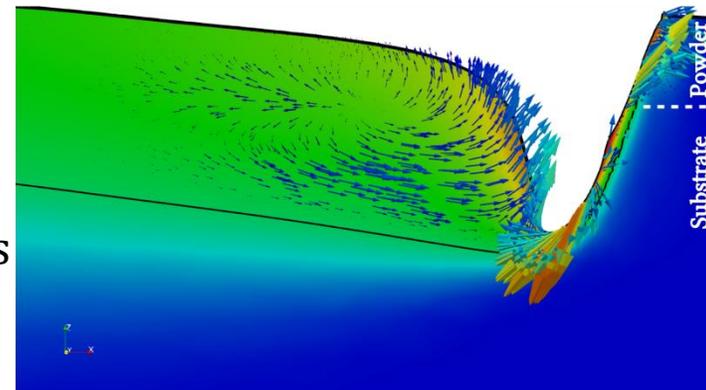
Grange, Queva, Guillemot, Colin, Bartout, Bellet, J Mater Proc Tech (2021)

$P_L = 320 \text{ W}$

$v_L = 1100 \text{ mm/s}$

$E_l = 0,29 \text{ J/mm}$

$R = 0.21$

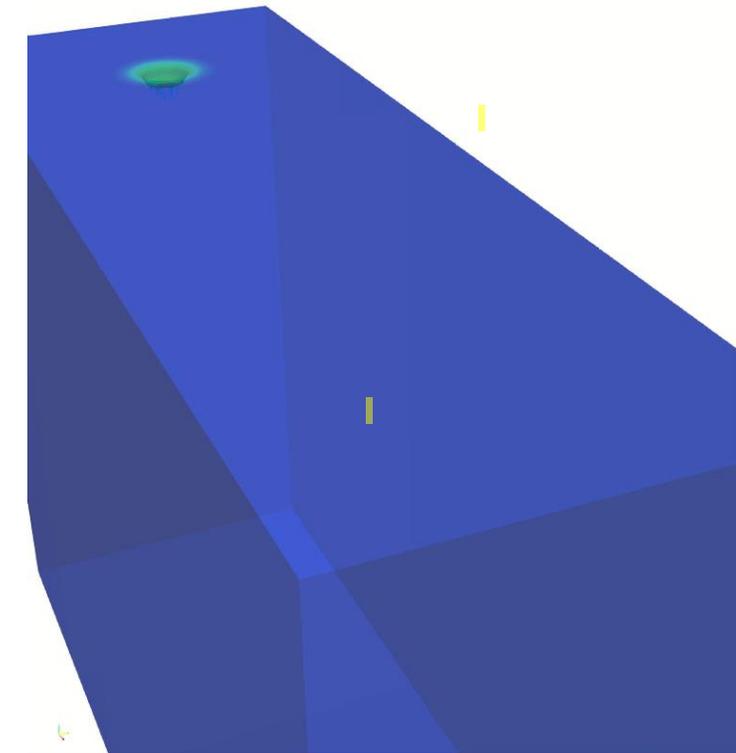
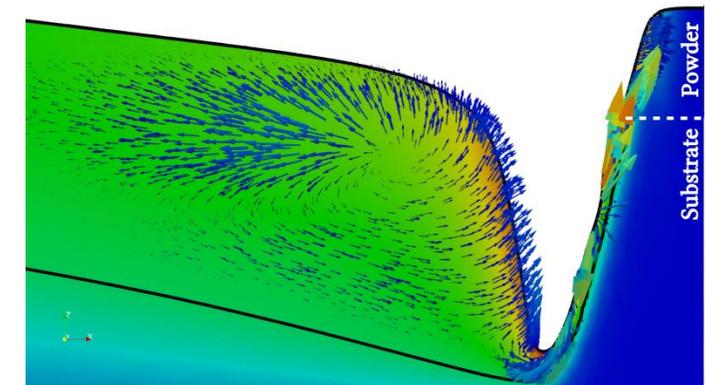


$P_L = 340 \text{ W}$

$v_L = 730 \text{ mm/s}$

$E_l = 0,47 \text{ J/mm}$

$R = 0.18$



Thèse de Yaasin Mayi (Arts et Métiers, PIMM)

Puissance portée par un rayon initial

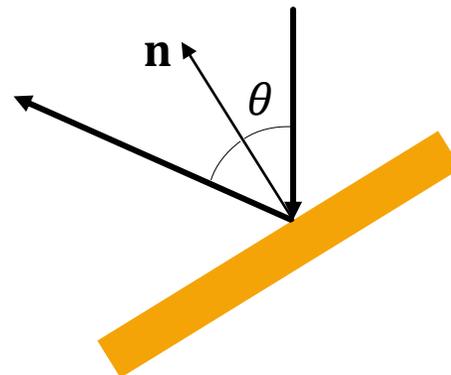
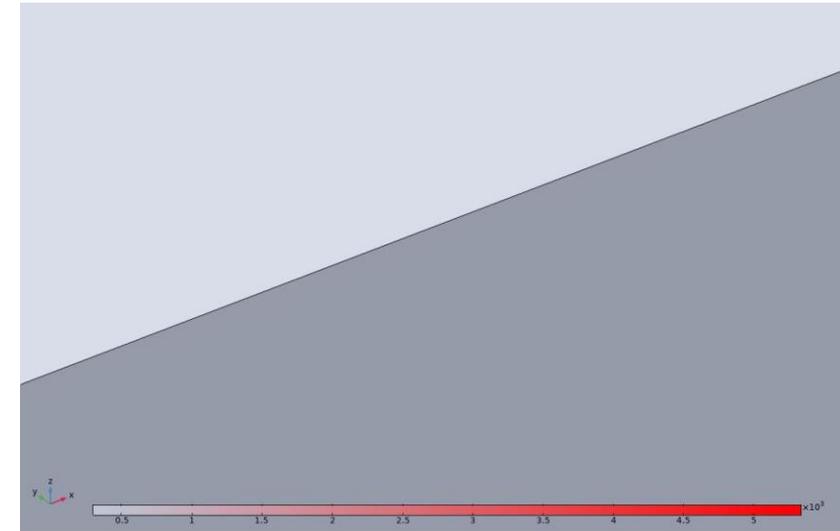
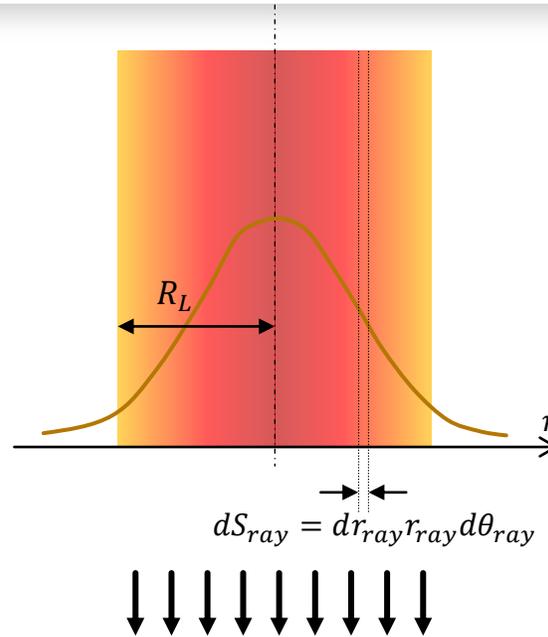
$$P_0 = \frac{2P_L}{\pi R_L^2} \exp\left(-2 \frac{r_{ray}^2}{R_L^2}\right) dS_{ray}$$

Puissance portée par ce même rayon après une réflexion

$$P_1 = \frac{2P_L}{\pi R_L^2} \exp\left(-2 \frac{r_{ray}^2}{R_L^2}\right) dS_{ray} (1 - (1 - R)\cos\theta)$$

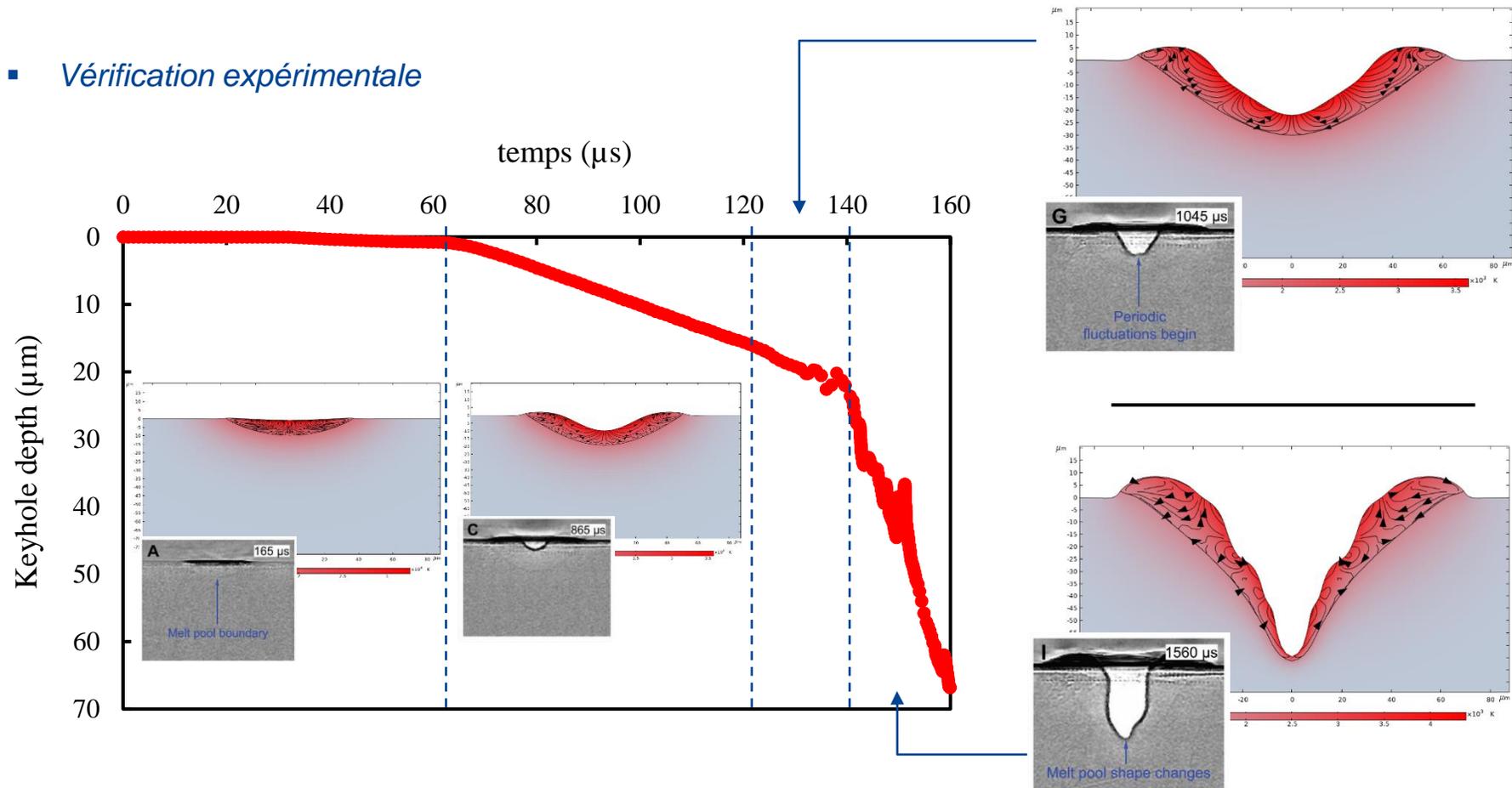
Après n réflexions :

$$P_n = P_0 \prod_{i=1}^n (1 - (1 - R)\cos\theta_i)$$



Thèse de Yaasin Mayi (Arts et Métiers, PIMM)

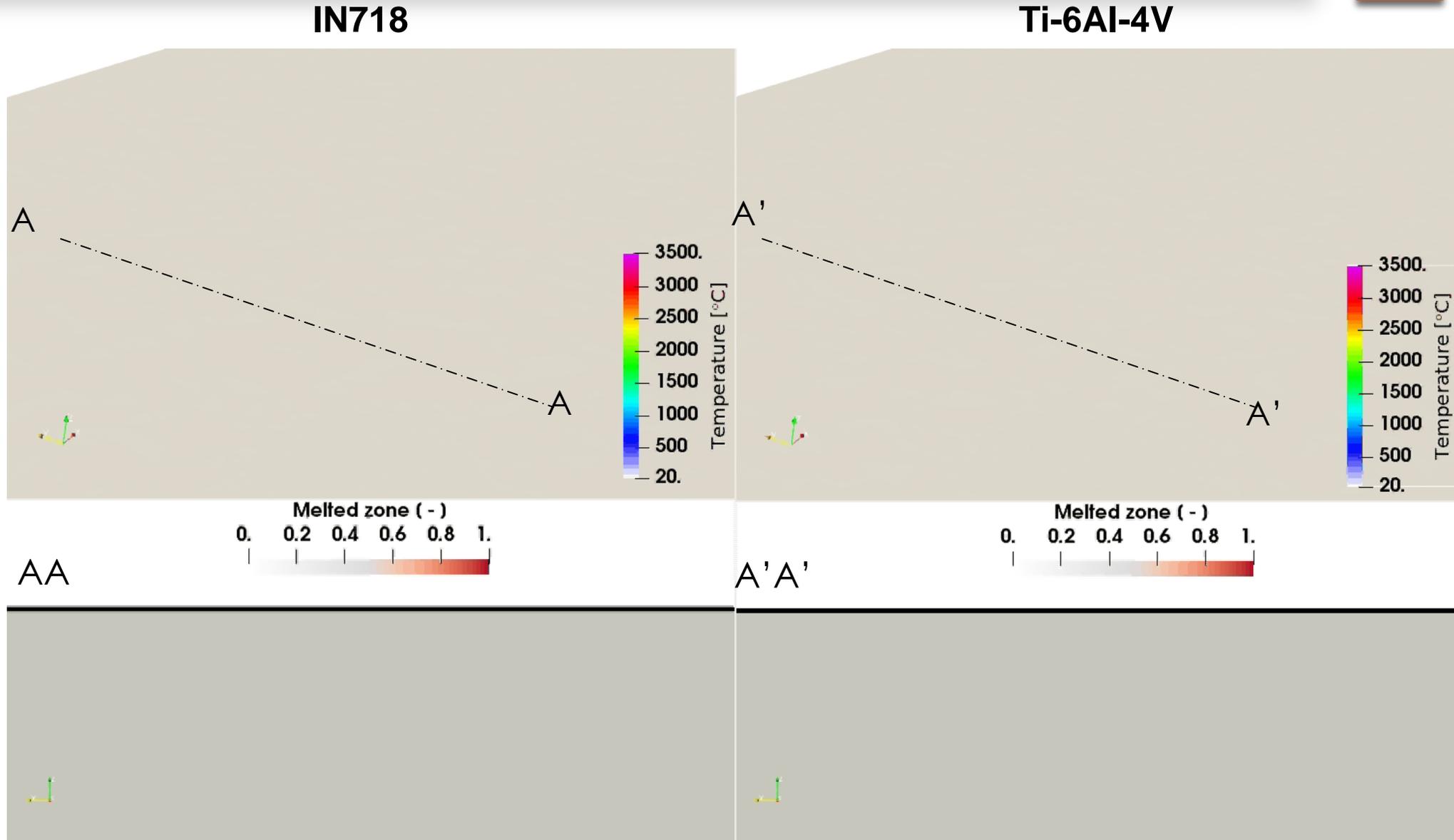
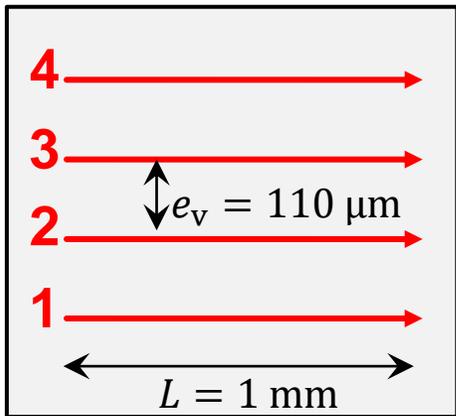
- *Vérification expérimentale*



X-ray images from:
R. Cunningham, A.D. Rolett et al.,
Science, 2019.

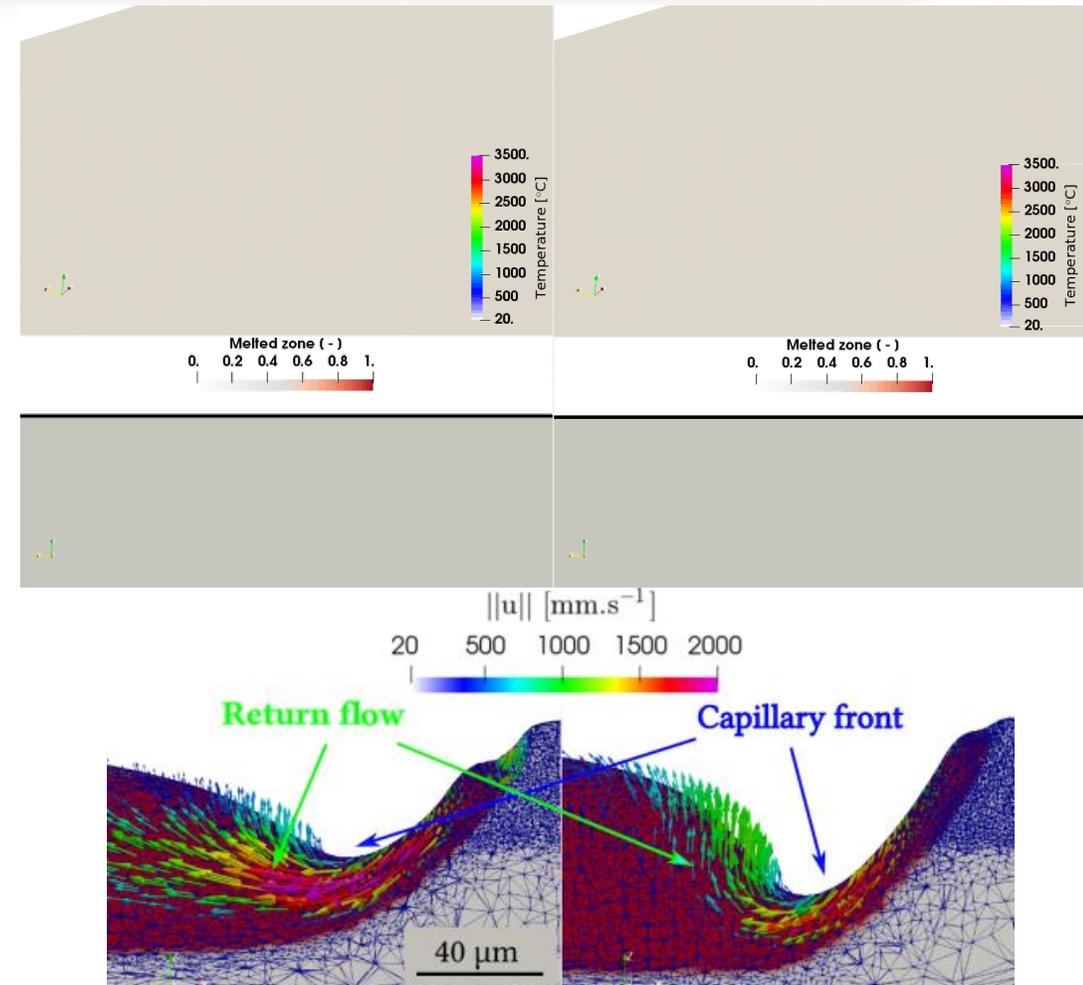
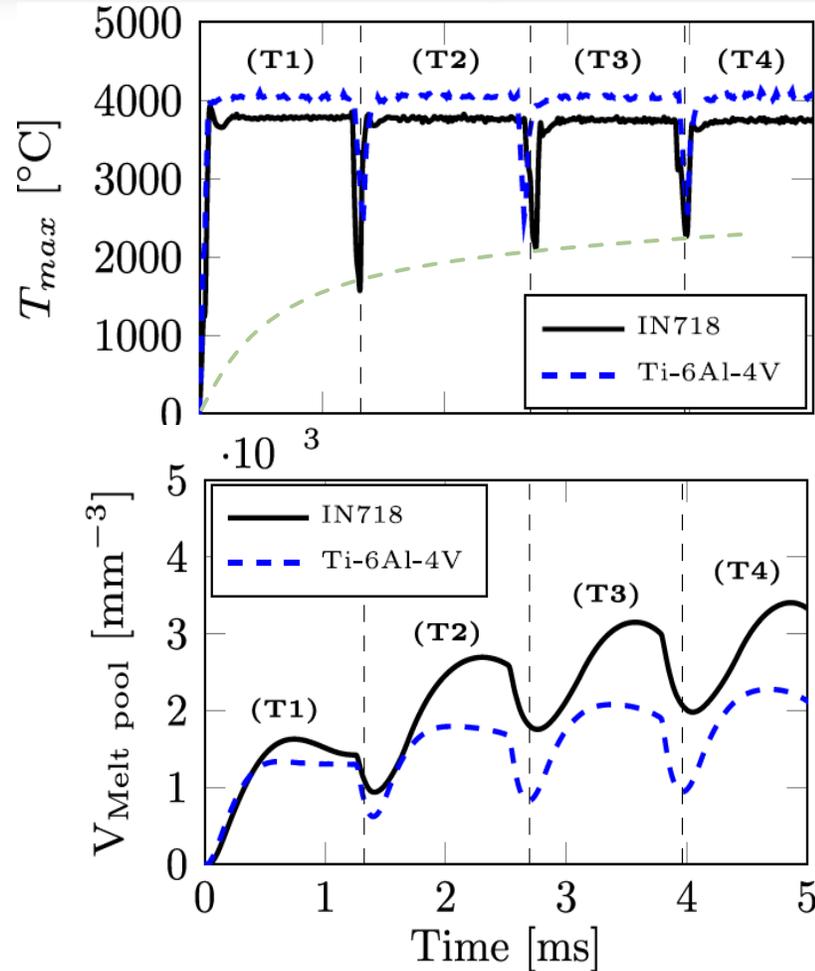
Cordons multiples, juxtaposés

$P_L = 285 \text{ W}$
 $R_L = 50 \text{ }\mu\text{m}$
 $v_L = 0.96 \text{ m s}^{-1}$
 $\Delta z_p = 40 \text{ }\mu\text{m}$



	IN718	Ti-6-4
T_L [°C]	1336	1636
T_S	1170	1536
ΔT_{solid}	166	100
γ [N m ⁻¹]	1.9	1.4
$\partial\gamma/\partial T$	-1.1	-2.4
[N m ⁻¹ K ⁻¹]	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$

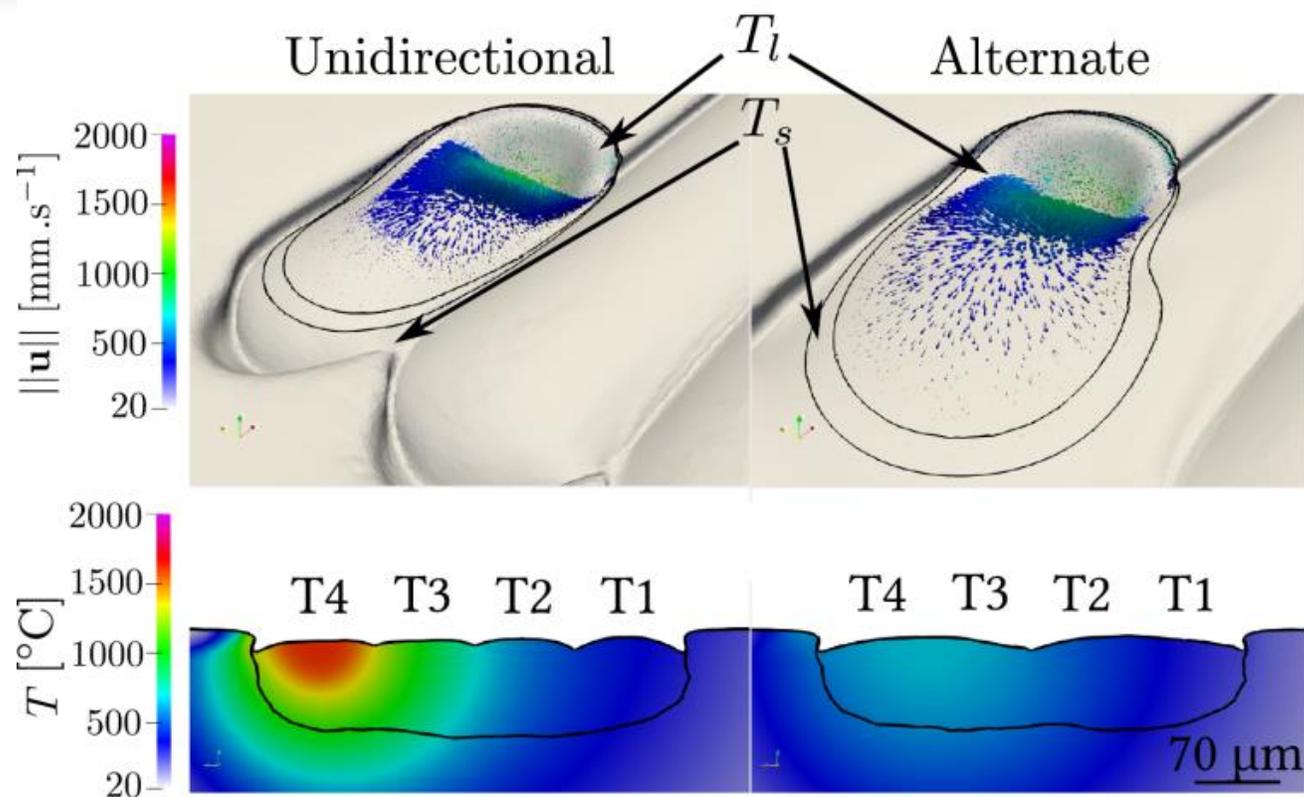
Cordons multiples, juxtaposés



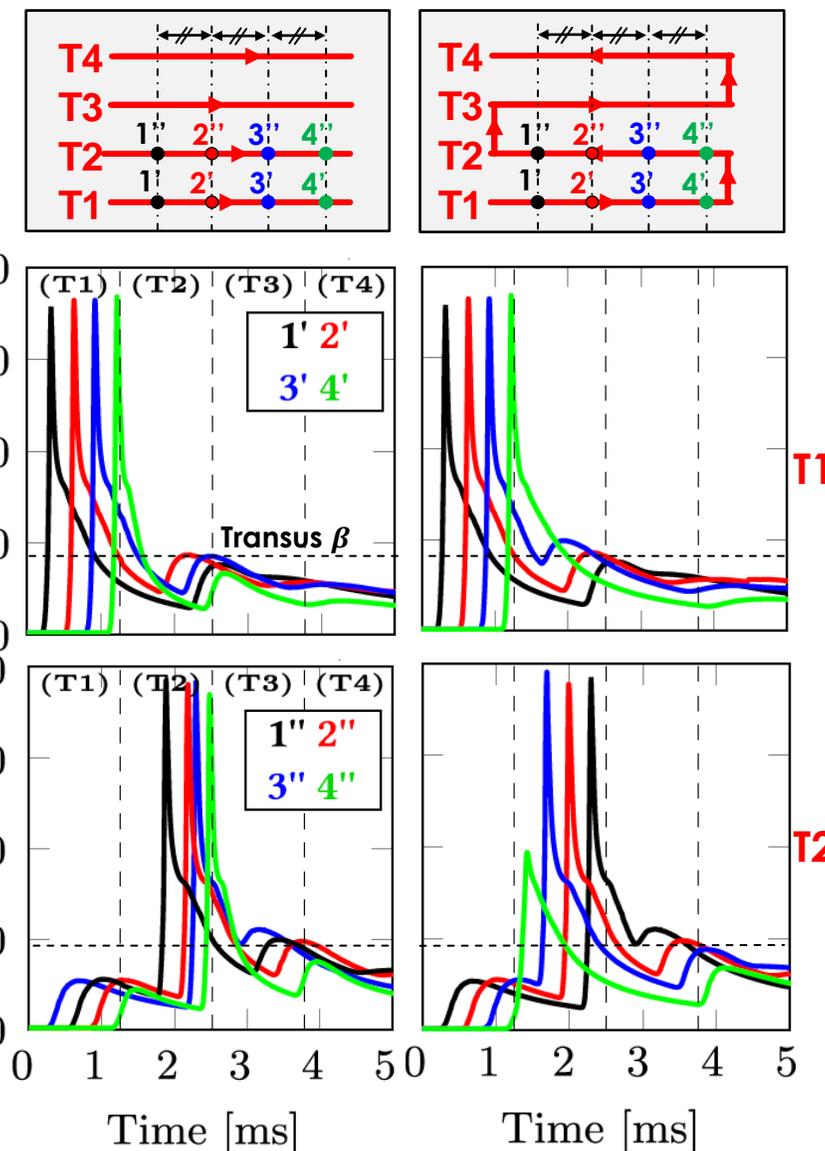
- Températures plus élevées pour Ti-6-4 (effet de la densité plus faible, qui compense L_{vap} plus élevée)
- Augmentation du volume du bain de fusion
- Régime quasi-stationnaire atteint au 4^{ème} cordon

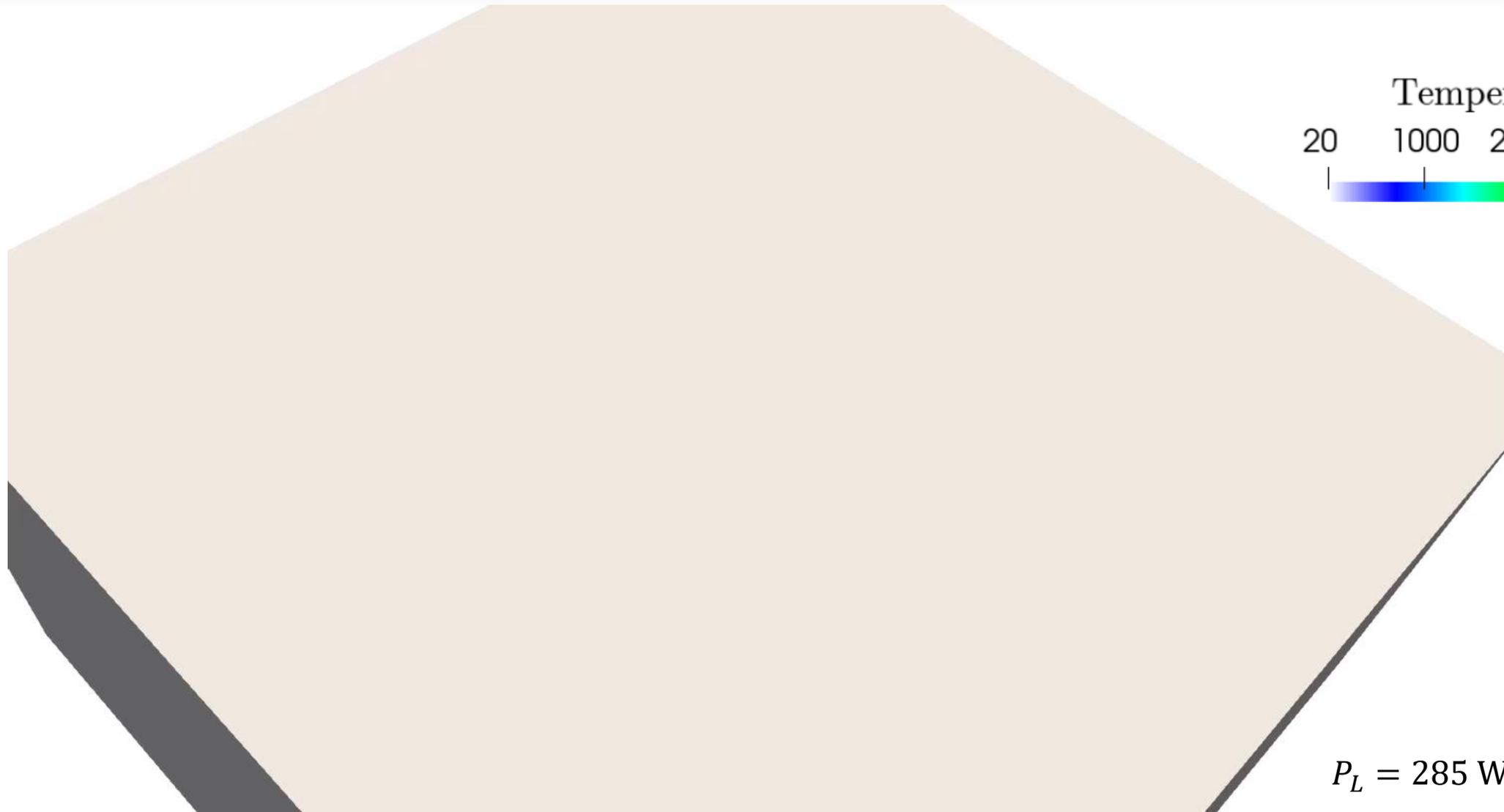
IN718 $\gamma^{IN718} = 1.9 \text{ N m}^{-1} > \gamma^{Ti-6-4} = 1.4 \text{ N m}^{-1}$
 et pressions de recul comparables
 ⇒ Keyhole plus important pour Ti-6-4

Cordons multiples, juxtaposés



- En scan aller-retour
 - Élargissement marqué au point de rebroussement,
 - Aplatissement de la surface par effet de tension de surface
- Effets importants en fabrication des piliers de réseaux lattice...





Temperature [°C]
20 1000 2000 3000 4000

$$P_L = 285 \text{ W}, v_L = 960 \text{ mm/s}$$

► **Conservation de la quantité de mouvement**

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} - \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = 0$$

► **Modèles de comportement mécanique**

- Matériau à l'**état granulaire**, et le **gaz**

Modèle **newtonien**

- Matériau à l'**état dense**

- $T > T_L$ (état liquide): newtonien
- $T_L > T > T_S$ (intervalle de solidification): viscoplastique
- $T_S > T$ (état solide): **Elastique-viscoplastique**

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}} = \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{el} + \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{vp} + \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{th}$$

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{el} = \frac{1+\nu}{E} \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \frac{\nu}{E} \text{tr}(\dot{\boldsymbol{\sigma}}) \mathbf{I}$$

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{vp} = \frac{\sqrt{3}}{2\bar{\sigma}} \left[\frac{\bar{\sigma} - \sigma_Y}{\sqrt{3}K_{vp}\bar{\epsilon}^n} \right]_+^{\frac{1}{m}} \mathbf{s}$$

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{th} = -\frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \mathbf{I}$$

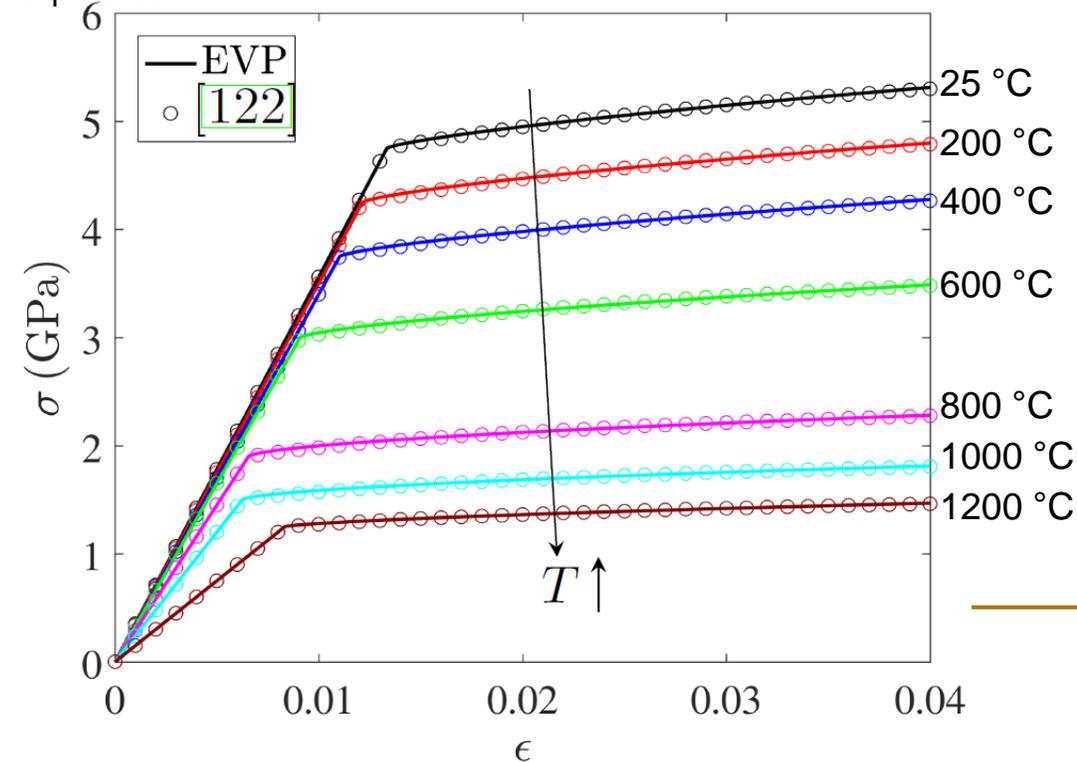
$$\left. \begin{array}{l} \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{el} \\ \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{vp} \\ \dot{\boldsymbol{\epsilon}}^{th} \end{array} \right\} \bar{\sigma} = \sigma_Y + K_{vp} (\sqrt{3})^{m+1} \bar{\epsilon}^n \dot{\bar{\epsilon}}^m$$

► **Modèle de comportement pour l'alumine**

- Données de la littérature : tests de compression de Hertz

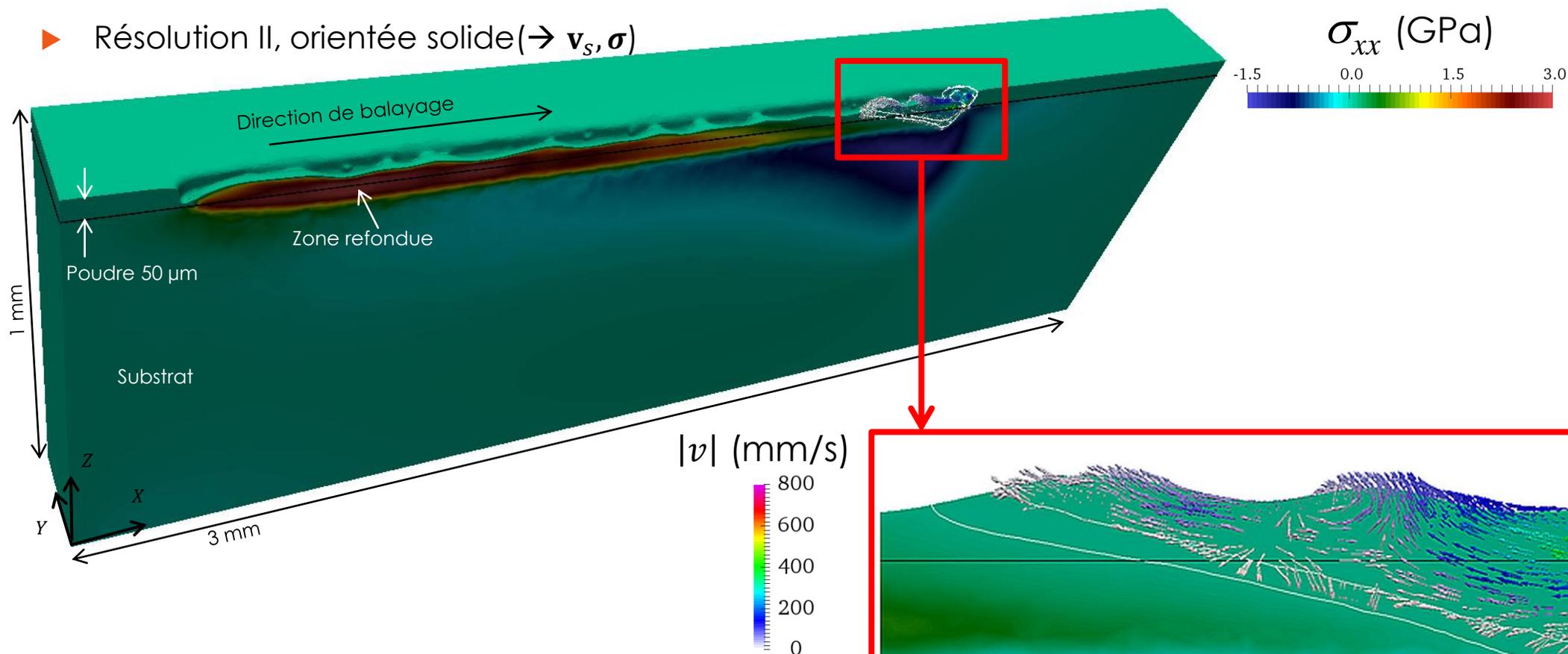
Sanchez-Gonzalez et al., Application of Hertzian tests to measure stress-strain characteristics of ceramics at elevated temperatures, **J Amer Ceram Soc (2007)**

- Identification d'un modèle élasto-plastique
- Extension en élasto-viscoplastique à haute température

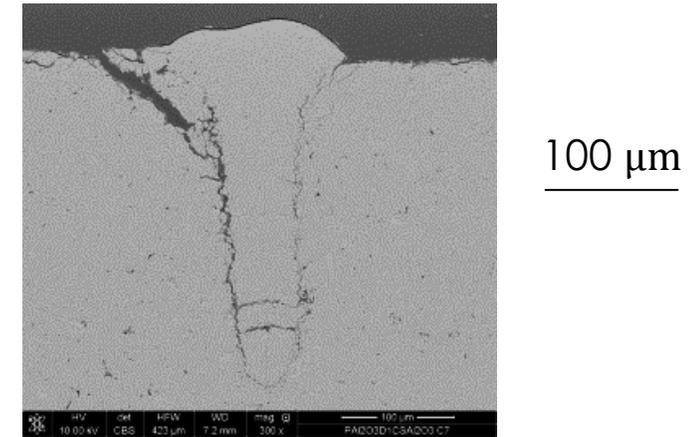
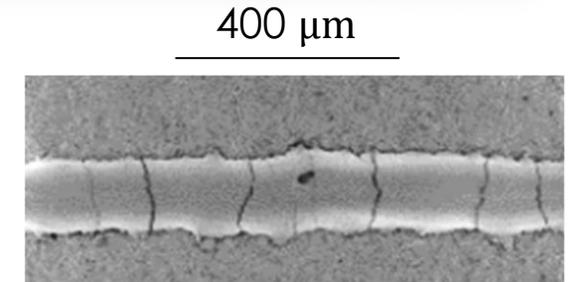
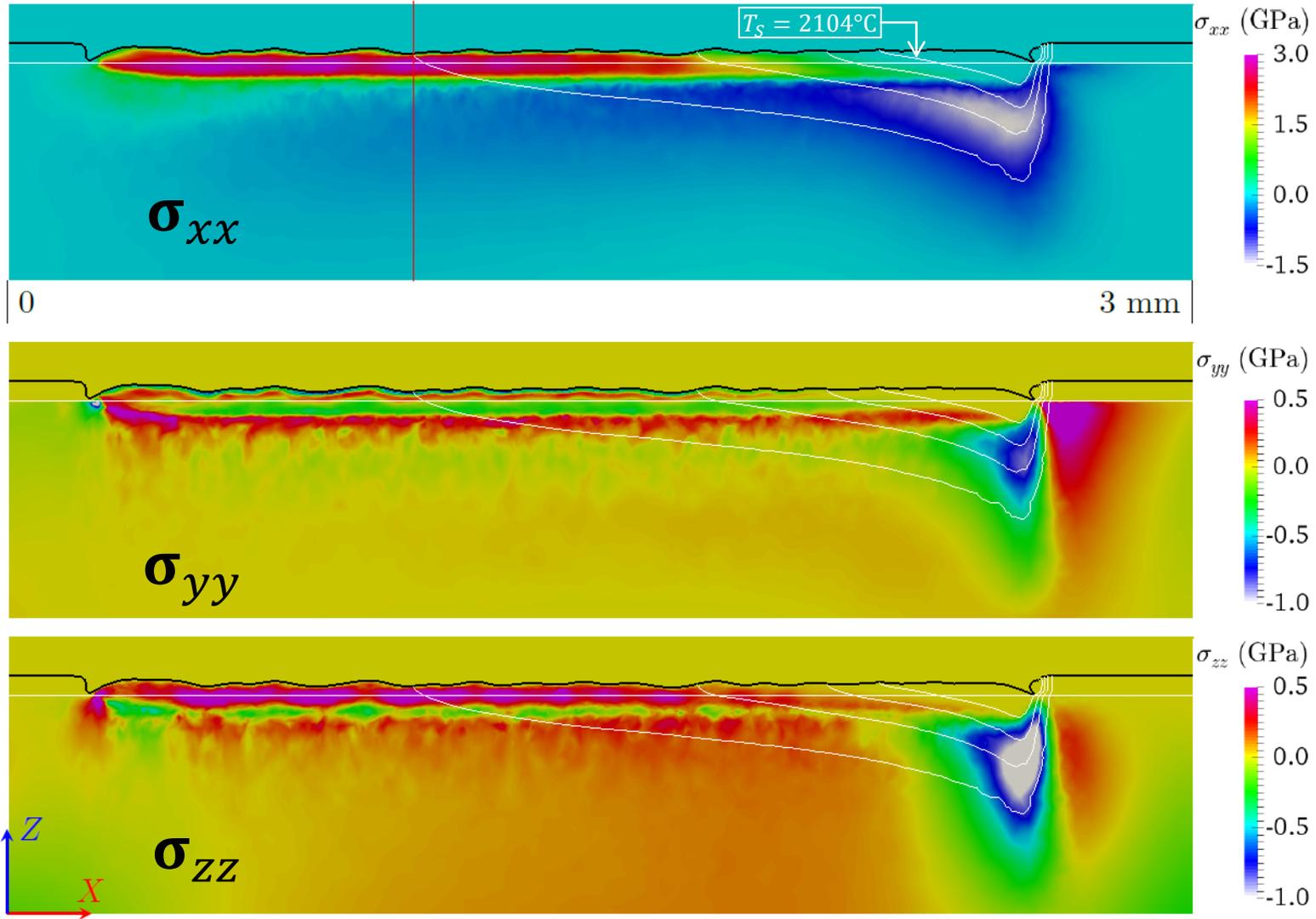


► Double résolution mécanique, à chaque incrément de temps, sur tout le domaine de calcul

- Application de la stratégie développée dans la thèse de Shaojie Zhang (CEMEF, 2020)
- Résolution I, orientée liquide ($\rightarrow \mathbf{v}_l$)
- Résolution II, orientée solide ($\rightarrow \mathbf{v}_s, \boldsymbol{\sigma}$)



Contraintes autour du dépôt élémentaire



Résultats expérimentaux :
Liliana Moniz et al., Centre
des Matériaux, Mines
ParisTech

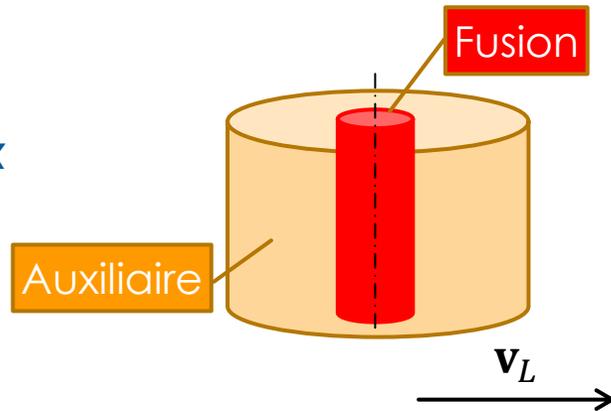
$$P_L = 84 \text{ W} \quad R_{int} = 50 \mu\text{m} \quad v_L = 300 \text{ mm s}^{-1}$$

Effet d'un chauffage additionnel

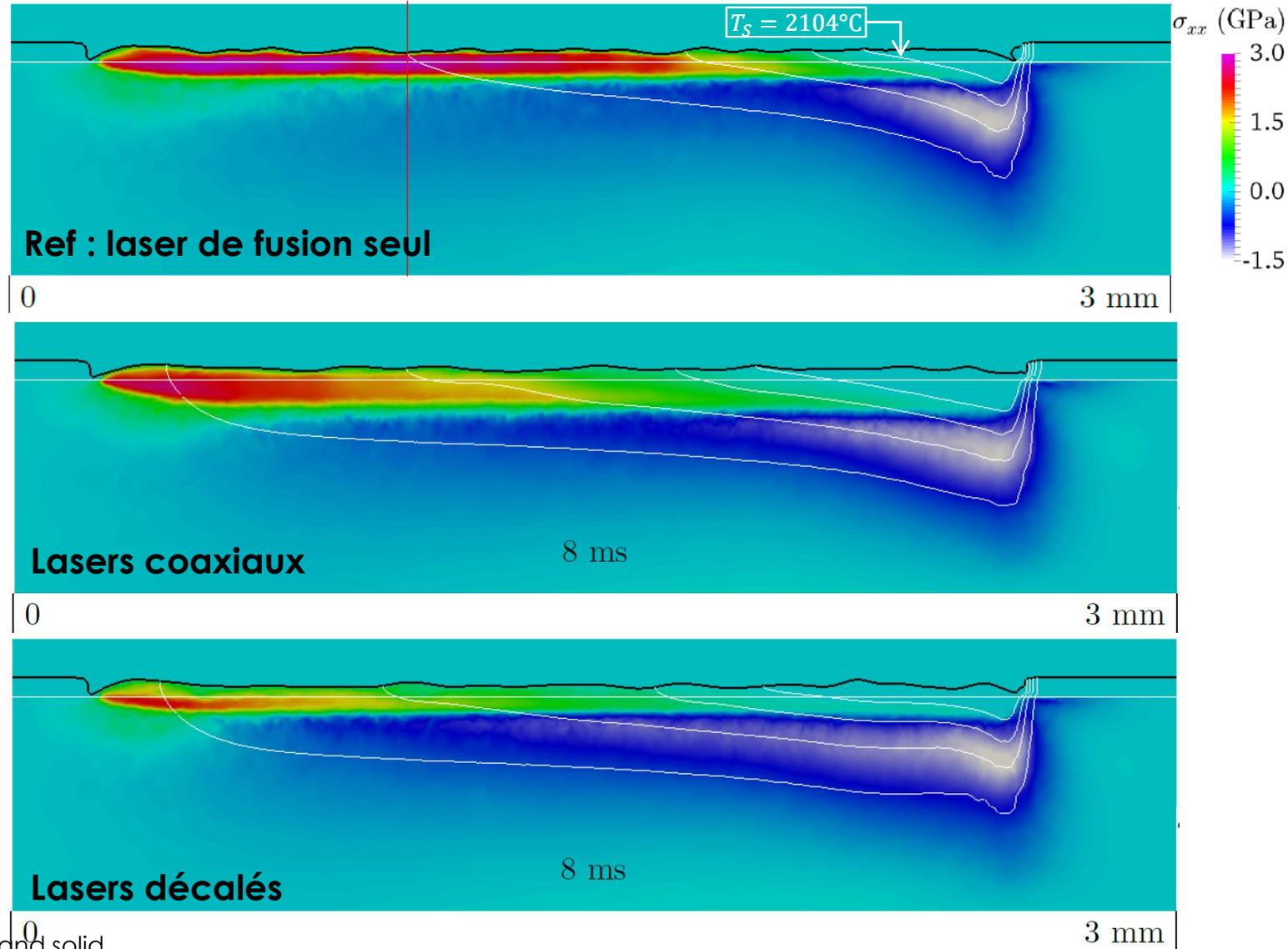
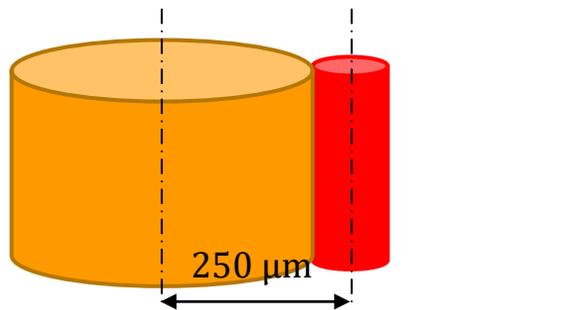
Deux lasers

- Laser de fusion, $P_L = 84 \text{ W}$, $R_{int} = 50 \mu\text{m}$
- Laser auxiliaire Yb:YAG, $P_L = 60 \text{ W}$, $R_{int} = 200 \mu\text{m}$
- $v_L = 300 \text{ mm s}^{-1}$

Coaxiaux



Tandem



▶ **PARTIE 1 : Phénomènes physiques**

▶ Interaction laser-matière

- ▶ Généralités. Interactions avec le lit de poudre, avec le bain fondu : vaporisation, dénudation, keyhole

▶ Echanges thermiques entre cordon/pièce et environnement

- ▶ Conduction à travers le lit de poudre, mesures thermiques

▶ Hydrodynamique du bain fondu

- ▶ Tension de surface, effet Marangoni, instabilités

▶ Solidification et changements de phase à l'état solide

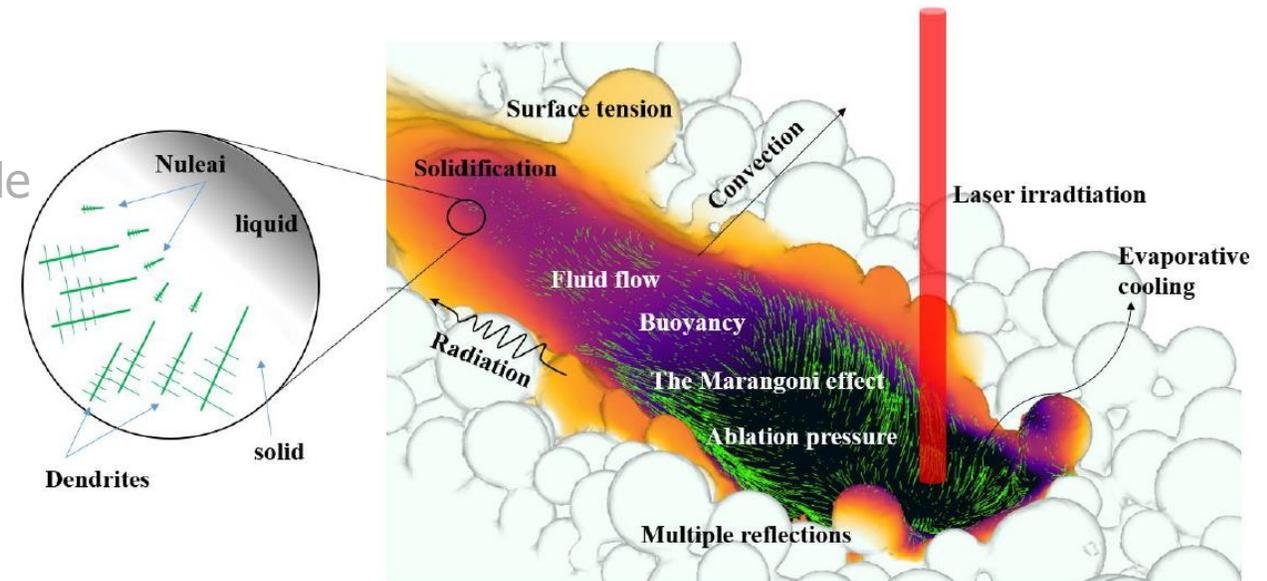
▶ Mécanique du solide

- ▶ Contraintes et distorsions

▶ **PARTIE 2 : Simulation numérique**

▶ Echelle des cordons élémentaires

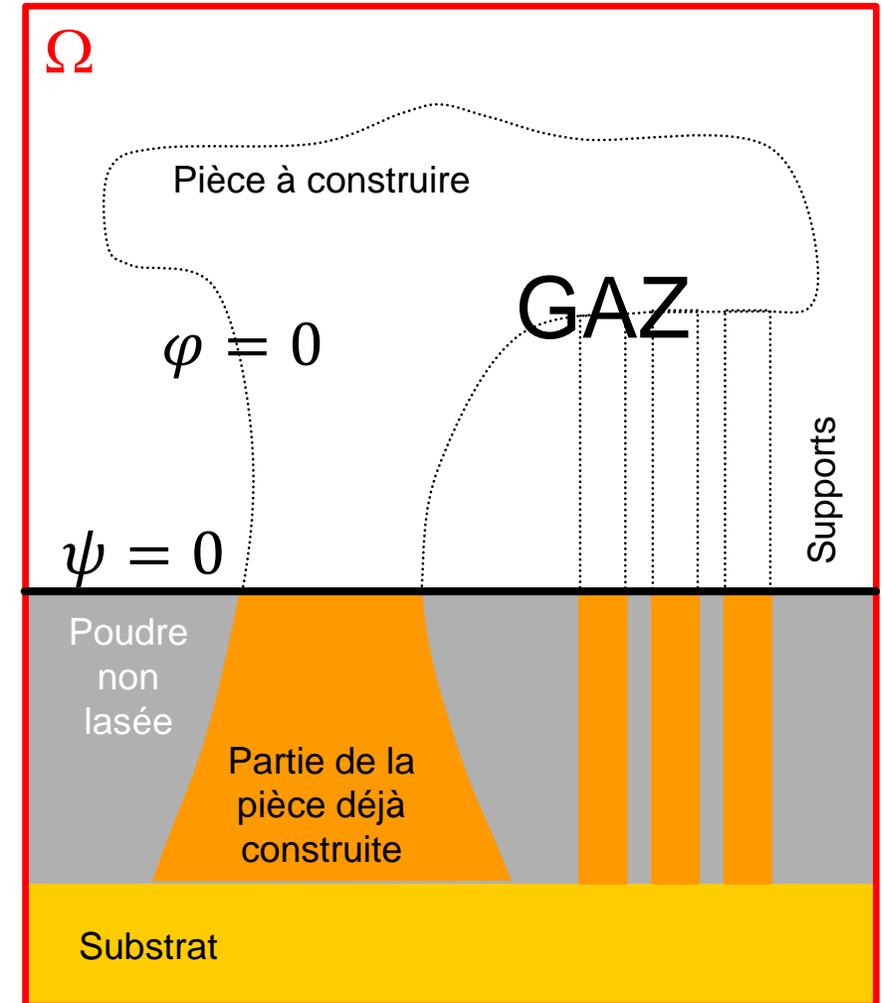
▶ Echelle de la pièce



▶ Travaux de Yancheng Zhang (CEMEF)

▶ Idées directrices

- ▶ Point de départ : la **CAO de la pièce à construire**, complétée par le **substrat** et d'éventuels supports.
- ▶ Maillage de cette CAO
- ▶ Prendre un **maillage de fond** Ω et y immerger le maillage précédent.
- ▶ Construire un **maillage conforme** aux interfaces :
 - matériau / gaz
 - pièce construite / poudre non lasée
- ▶ Au cours du temps, **faire progresser une fonction level set** ψ à travers le maillage, pour simuler le **dépôt de matière couche par couche, ou par fraction de couche**
- ▶ Résoudre à chaque pas de temps les problèmes **thermique** et **mécanique**
 - **Thermique dans tout Ω**
 - **Mécanique seulement dans la pièce** en cours de construction



► **Identification de la surface exposée au laser**

► Base de départ : fichier G-code, issu du traitement de la CAO par un "slicer" (fichier de trajectoire sur toute la construction)

```
G92 E0
G1 Z0.150 F4800.000          → Z : one layer
G1 X3.380 Y3.624 F4800.000   → F4800. : fast feed speed (fraction)
G1 X3.754 Y3.279 E0.02604 F1800.000 → F1800. : feed speed
G1 X5.279 Y1.984 E0.12835
G1 X5.926 Y1.502 E0.16963
.....
```

Fraction de couche : définie par une certaine longueur de scan, l_{scan_lf}

Surface d'une fraction de couche :

$$S_{lf} \approx h_L l_{scan_lf}$$

h_L : distance inter-scan ("hatch" spacing)

Temps de lasage d'une fraction de couche

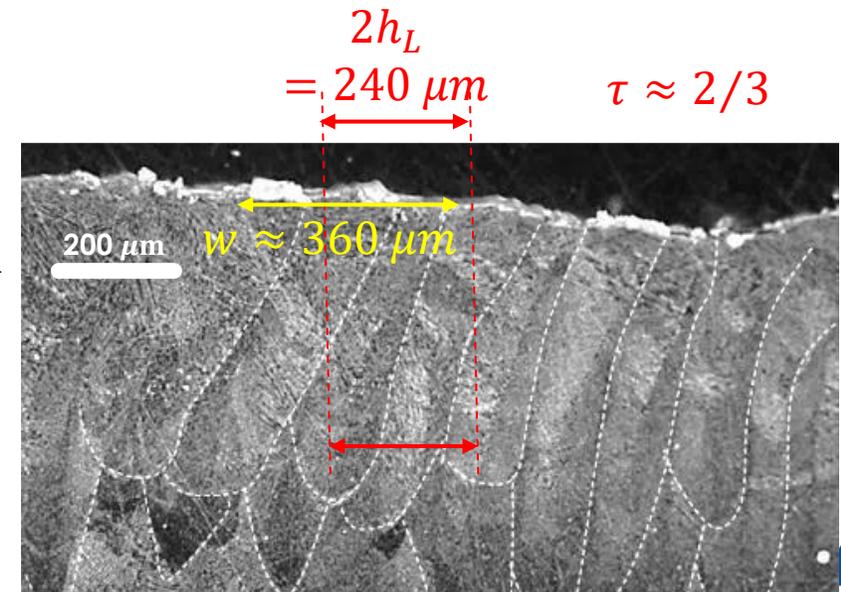
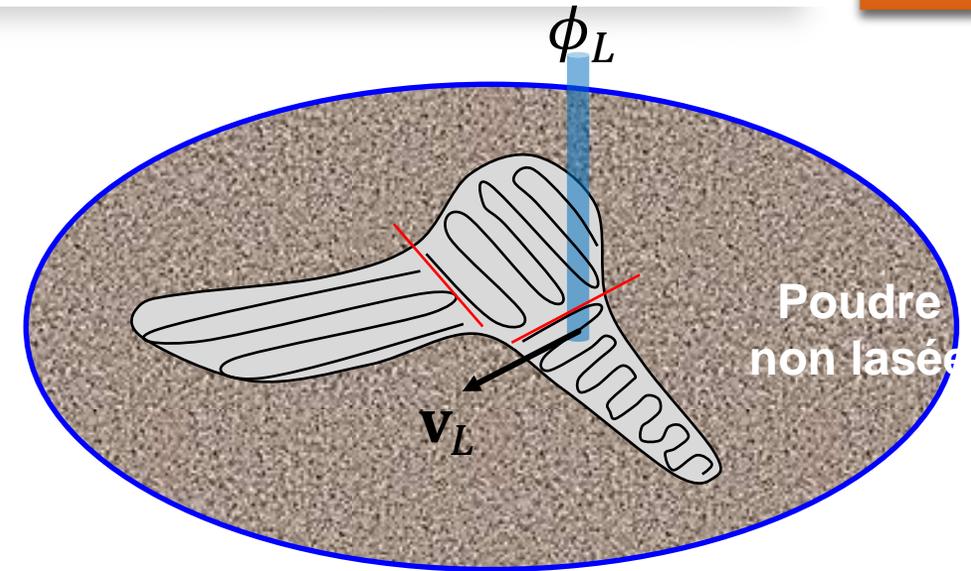
$$t_{scan_lf} \approx \frac{l_{scan_lf}}{v_L} \quad t_{scan_lf} \approx \frac{S_{lf}}{h_L v_L}$$

Remarque : recouvrement des cordons : $\phi_L < h_L < w$

$$h_L = w (1 - \tau)$$

w : largeur de zone fondue

τ : taux de recouvrement (ou de refusion)



$h_L = 120 \mu m$

$\phi_L = 70 \mu m$

Source : thèse V. Gunenthiram, Arts et Métiers, PIMM, 2018

► **Modélisation de l'apport d'énergie**

- Une fraction de couche est **chauffée dans sa totalité**, pendant un temps t_{heat_lf} égal à la durée réelle d'exposition de chaque point au faisceau laser

$$t_{heat_lf} \approx \frac{\phi_L}{v_L}$$

- Avant le dépôt de la fraction de couche suivante, le système **refroidit** pendant un temps t_{cool_lf} tel que :

$$t_{heat_lf} + t_{cool_lf} = t_{scan_lf}$$

- NB : $t_{heat_lf} \ll t_{scan_lf}$

► **Quelle densité de flux appliquer ?**

- **Si flux surfacique :** $P_L(1 - R)t_{scan_lf} = S_{lf}\dot{q}_L t_{heat_lf}$



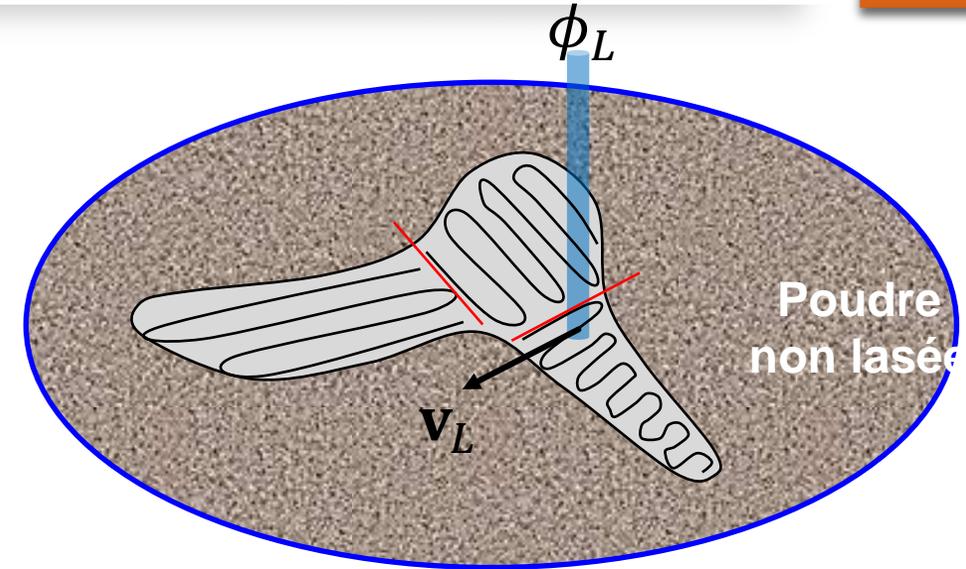
$$\dot{q}_L = \frac{P_L(1 - R)}{h_L \phi_L} \quad [\text{W m}^{-2}]$$

- **Si flux volumique :** $P_L(1 - R)t_{scan_lf} = S_{lf}\Delta z \dot{Q}_L t_{heat_lf}$



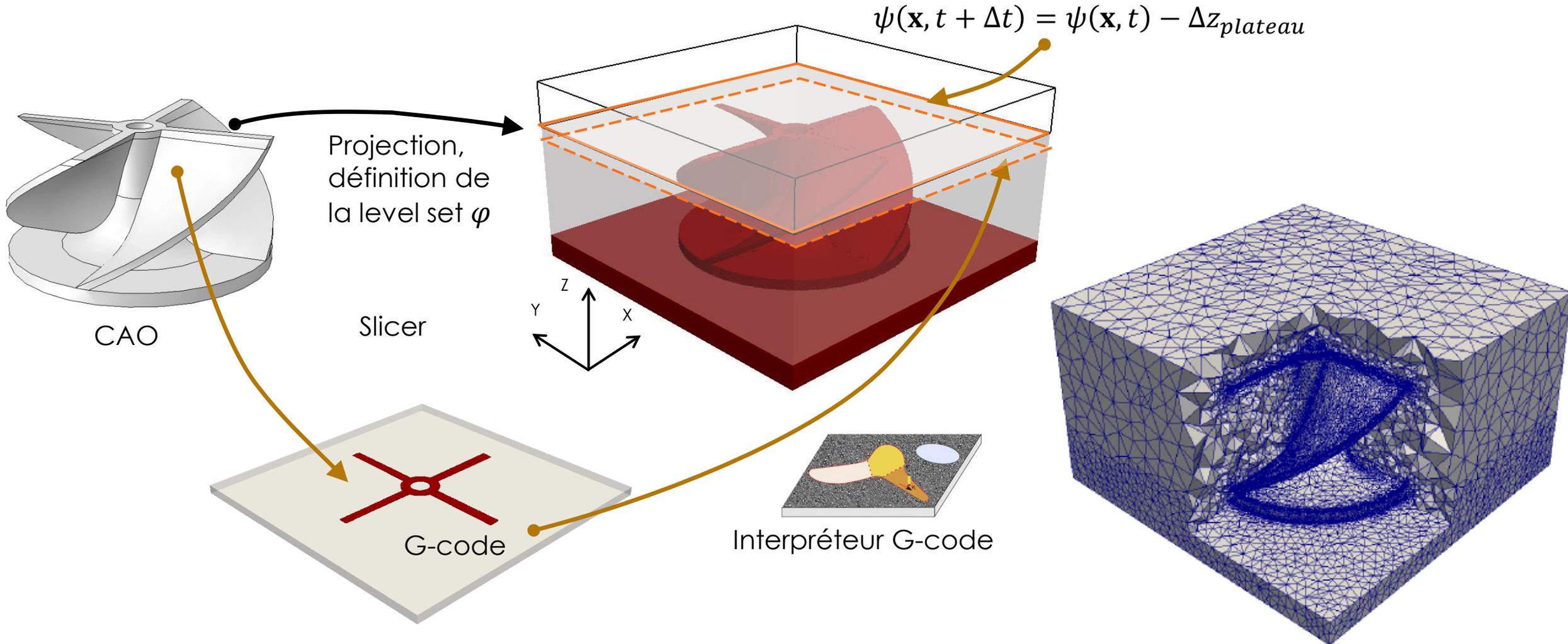
$$\dot{Q}_L = \frac{P_L(1 - R)}{\Delta z h_L \phi_L} \quad [\text{W m}^{-3}]$$

- Suite au dépôt d'une couche, le système refroidit pendant le temps de mise en couche

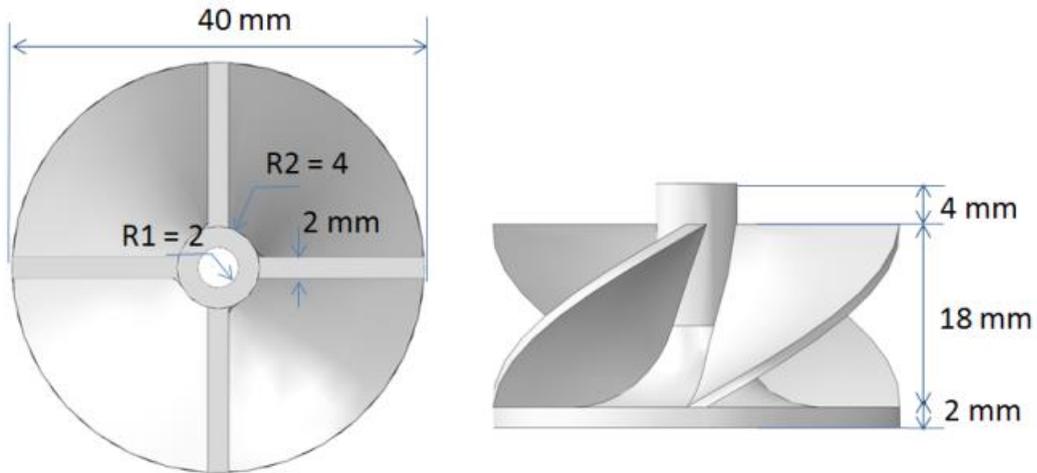


► Pièce en In718

Actualisation de la level set de construction

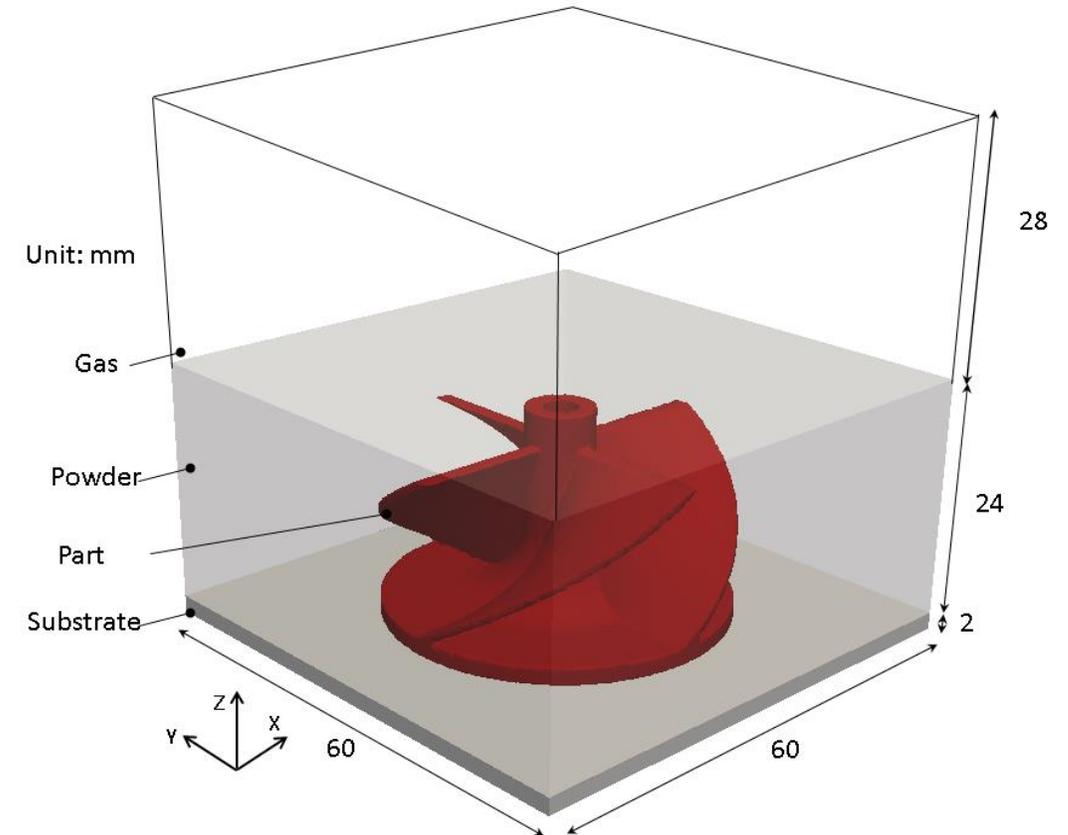


Geometry size



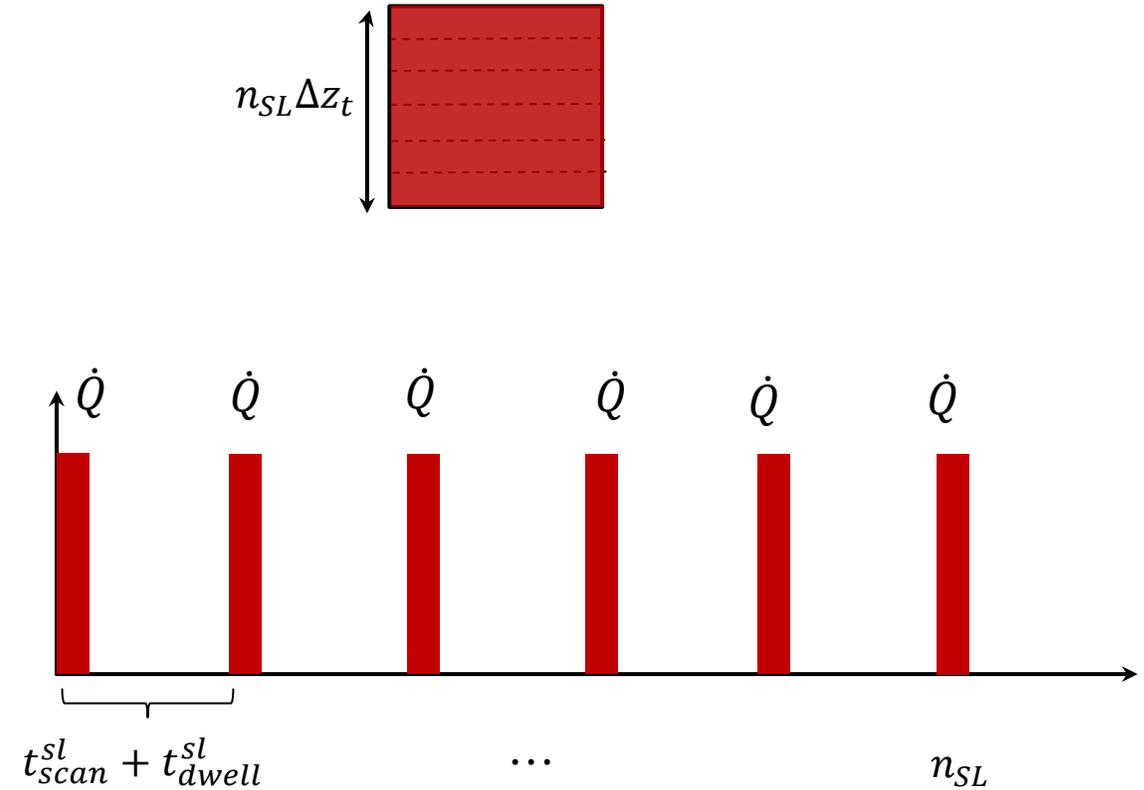
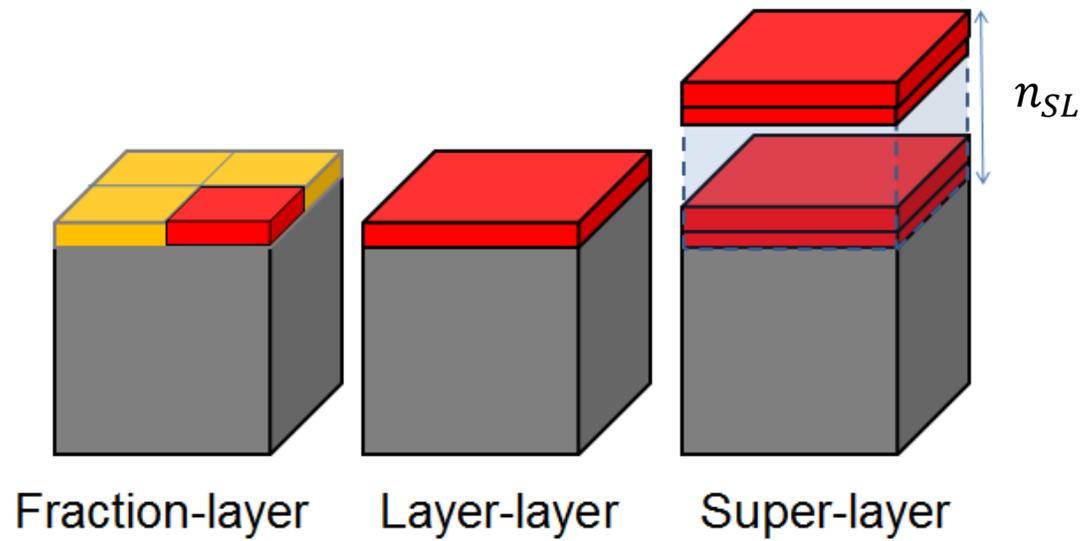
Process parameters (Ti-6Al-4V) : **960** layers

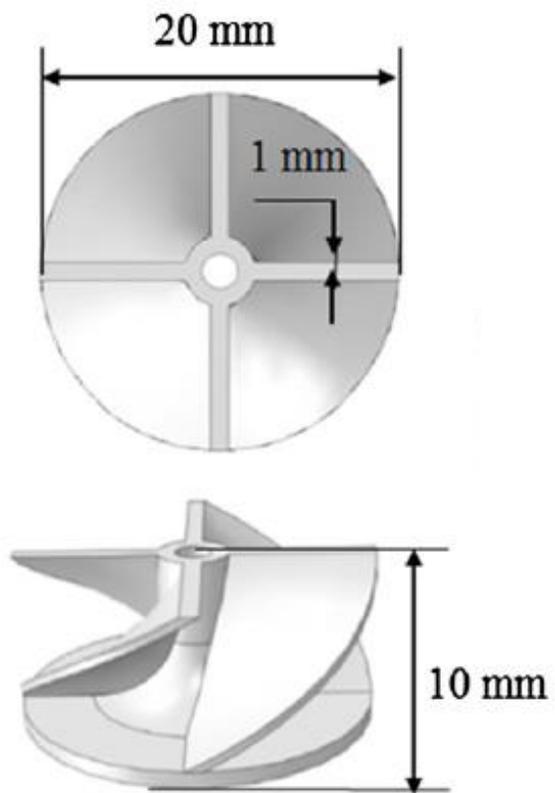
	Properties	values
Laser and process	Norminal power, P_L [W]	200
	Reflection coefficient, R	0.3
	Scan speed, v_L , [mm/s]	1200
	Norminal laser diameter, Φ_L [μm]	145
	Hatch distance, H_{hd} [μm]	100
	Overlay coefficient, $\tau = 1 - \frac{H_{hd}}{\Phi_L}$	0.31
	Thickness of incremental addition, ΔZ_p [μm]	25
	Interlayer dwell time, t_{dwell} [s]	15
	Total layer	960
Heat exchange	Initial temperature, T_0 [$^{\circ}\text{C}$]	20
	Environment temperature, T_{ext} [$^{\circ}\text{C}$]	20
	Convection coefficient (except top surface), h_{conv} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]	15



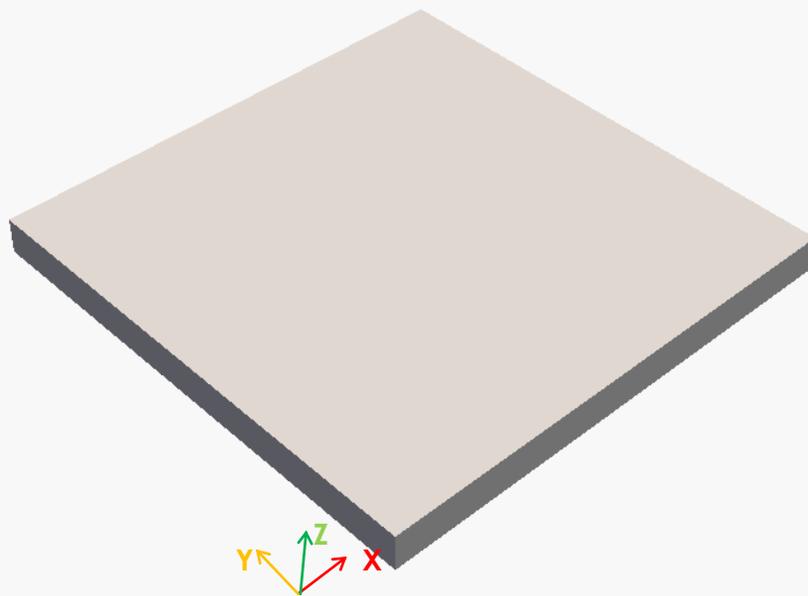
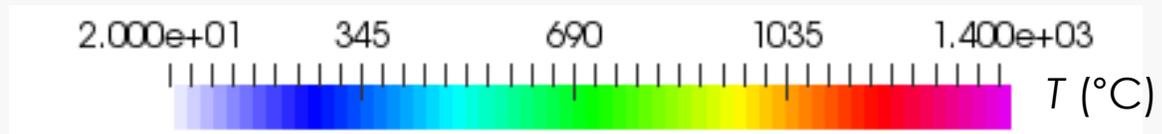
Simulation model

► Approche "super-couche"

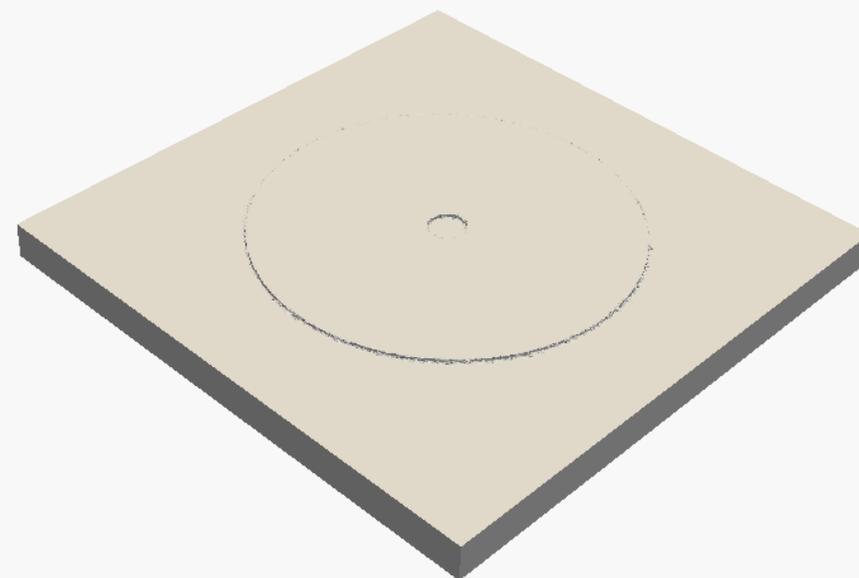




960 couches, $\phi_L = 200 \mu\text{m}$, ~ 2 Melts



Pièce + poudre non lasée

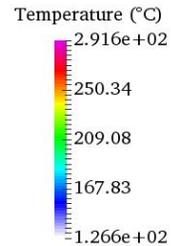
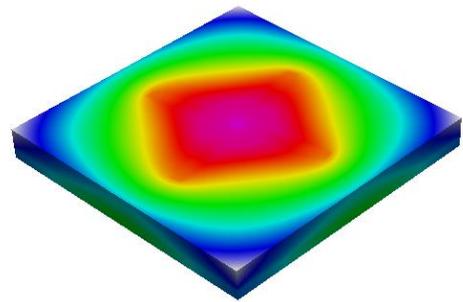


Pièce seule

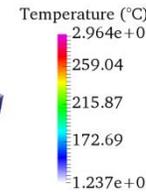
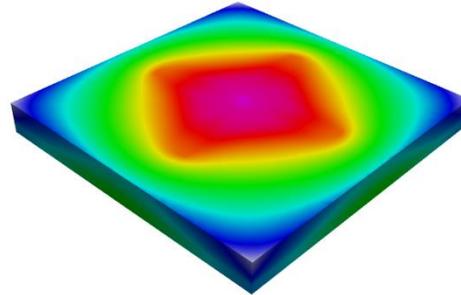
Assessment of superlayer simulation

Temperature distribution after 180 layers

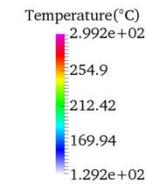
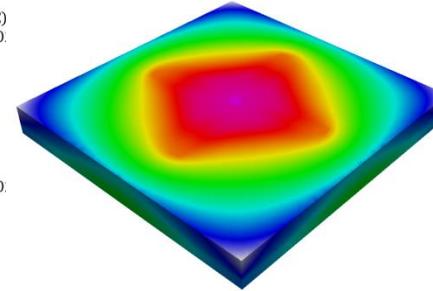
$T^{max} = 291.6 \text{ }^\circ\text{C}$



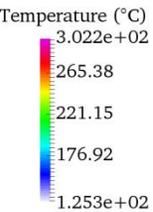
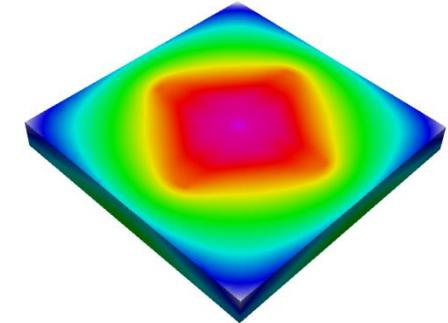
$T^{max} = 296.4 \text{ }^\circ\text{C}$



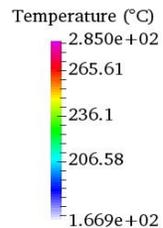
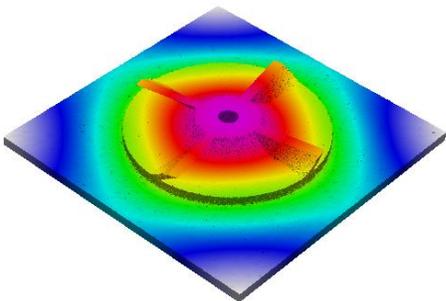
$T^{max} = 299.2 \text{ }^\circ\text{C}$



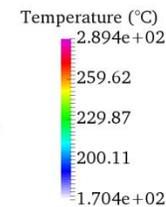
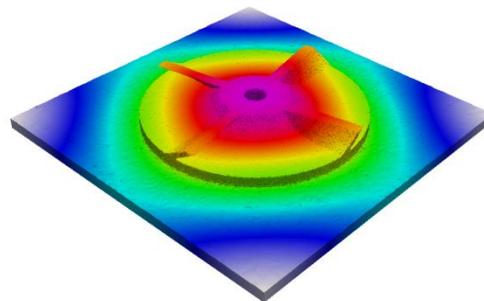
$T^{max} = 302.2 \text{ }^\circ\text{C}$



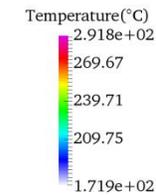
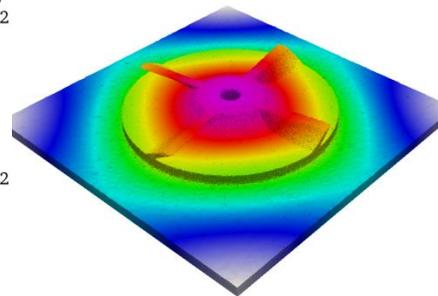
$T^{max} = 285 \text{ }^\circ\text{C}$



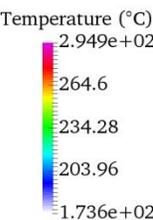
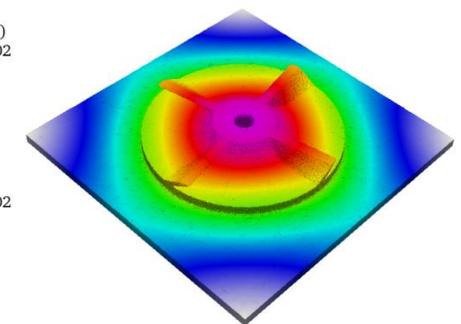
$T^{max} = 284.9 \text{ }^\circ\text{C}$



$T^{max} = 291.8 \text{ }^\circ\text{C}$



$T^{max} = 294.9 \text{ }^\circ\text{C}$



$n_{SL} = 1$

$n_{SL} = 5$

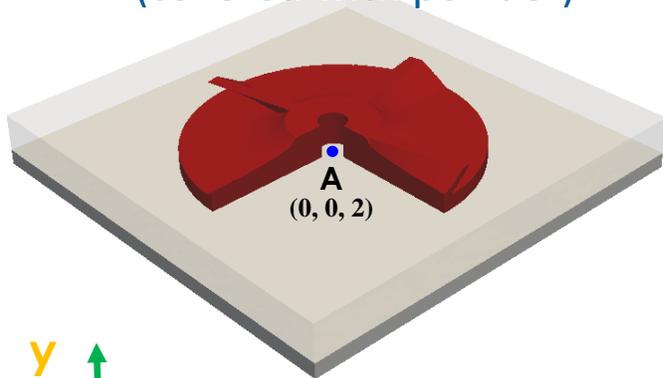
$n_{SL} = 10$

$n_{SL} = 15$

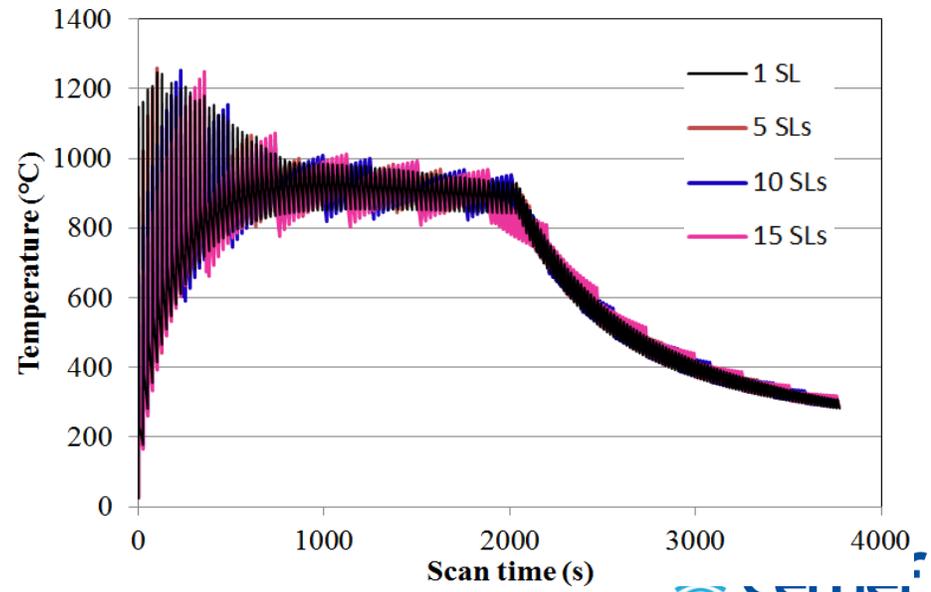
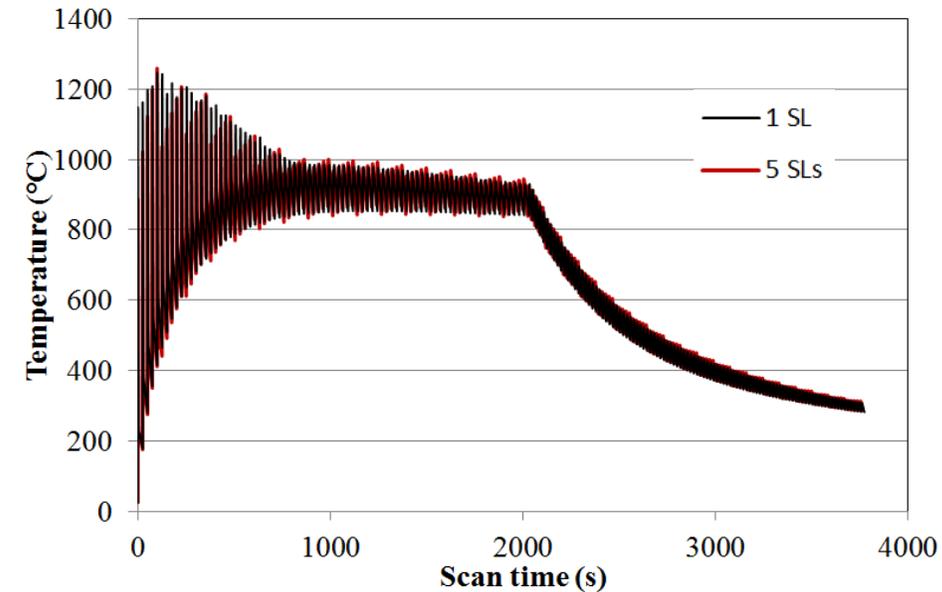
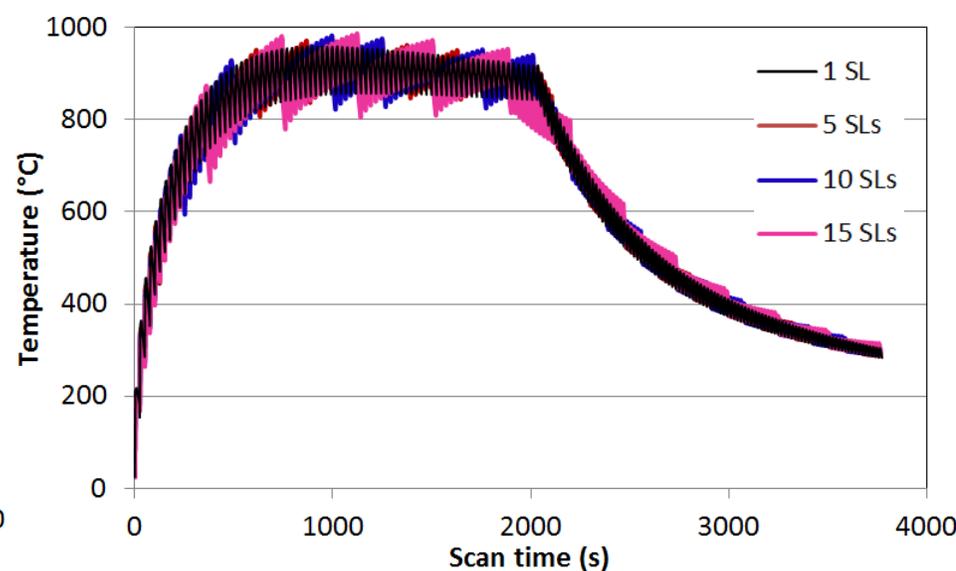
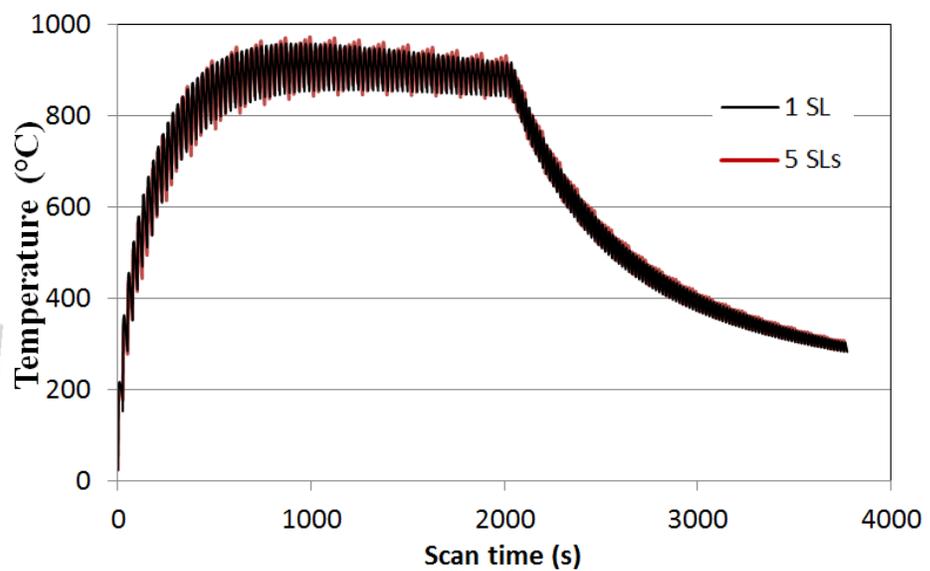
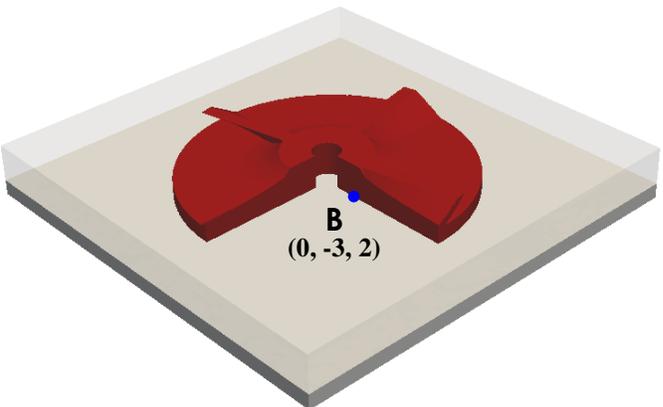
Assessment of superlayer simulation

Temperature evolution

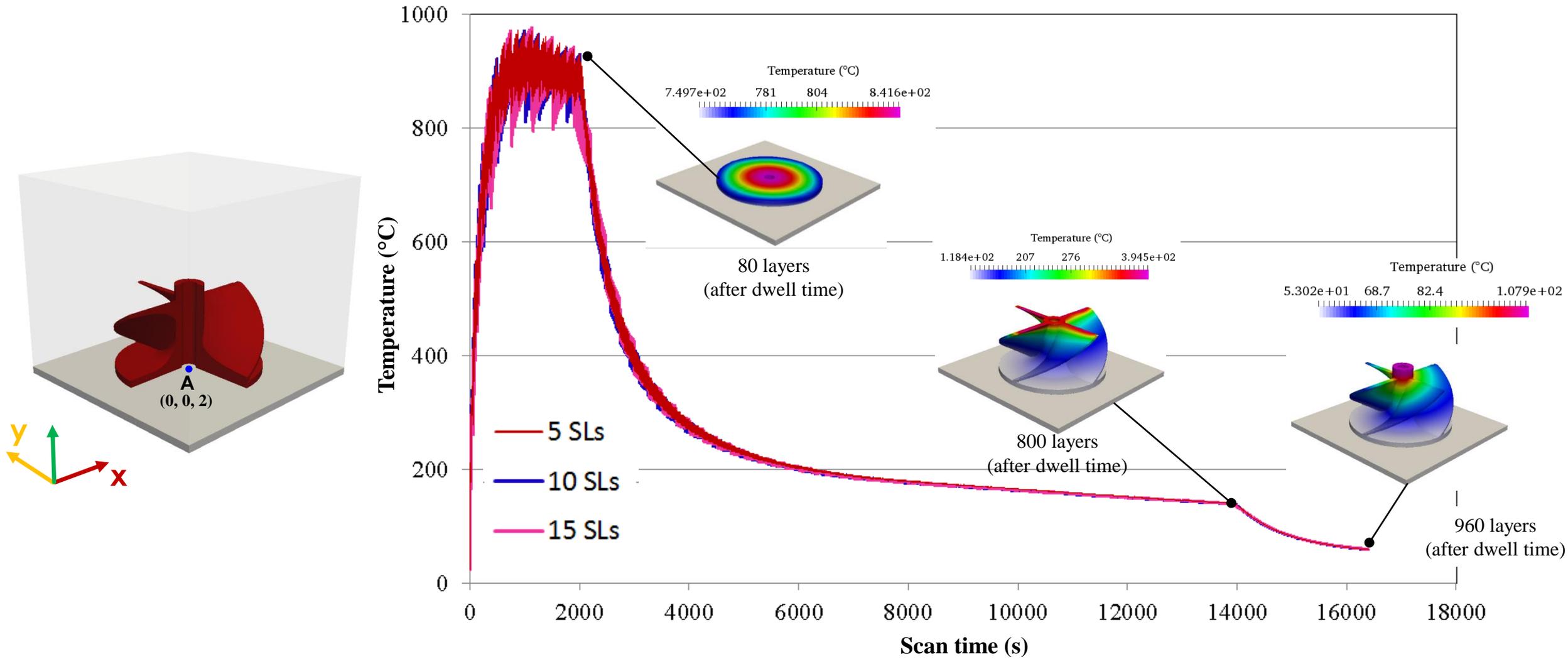
@bottom center
(covered with powder)



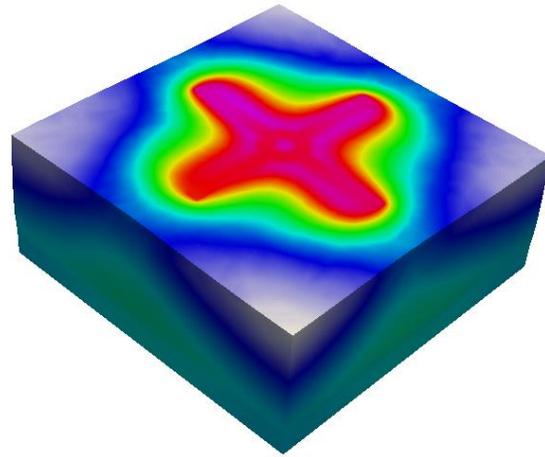
@bottom, in the part



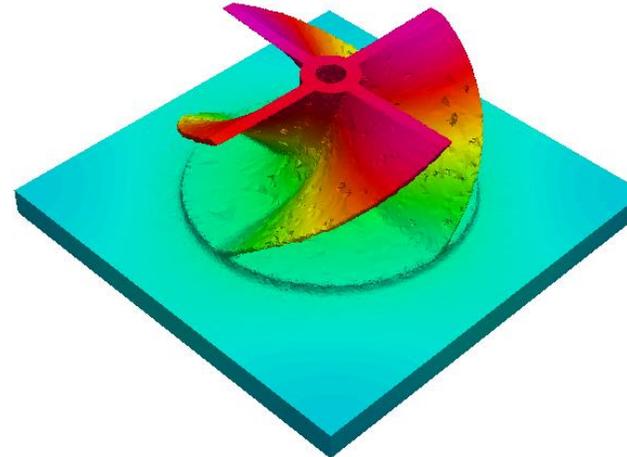
Temperature evolution



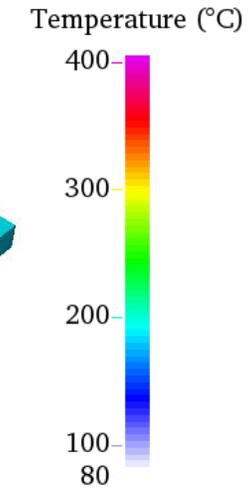
► *Fin de construction : température*



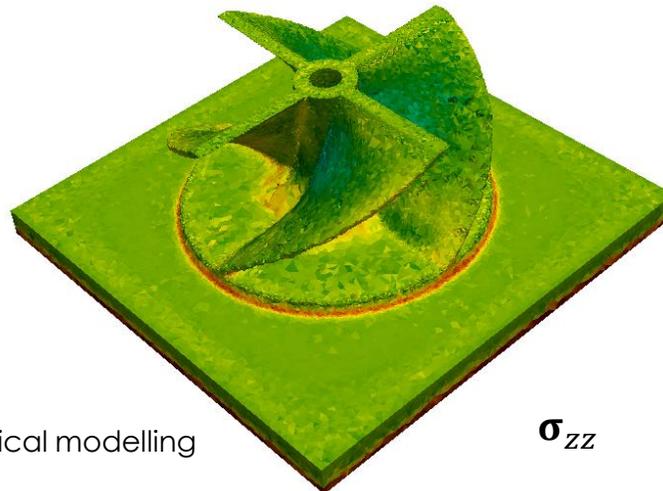
Pièce + poudre non lasée



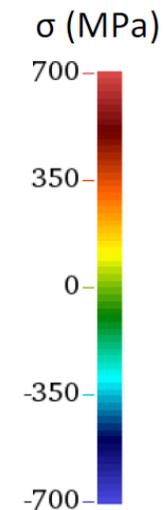
Pièce seule



► *Fin de construction + 2h : contraintes résiduelles*



σ_{zz}



- ▶ Le procédé L-PBF a un caractère multiphysique très marqué, avec de forts couplages
 - ▶ Observation in-situ difficile
 - ▶ Instrumentation délicate
 - ▶ Complexité de mieux en mieux captée par le développement de simulations numériques

- ▶ Les simulations numériques se développent à différentes échelles (cordons, pièce)
 - ▶ mais restent coûteuses

- ▶ Les recherches en cours au Cemef
 - ▶ Modèles de solidification rapide (thèse Paul Martin, en relation avec la thèse d'Elisa Borgès au CMAT)
 - ▶ Simulation du procédé WLAM : écoulements en zone fondue, formation du cordon, formation de la microstructure à l'échelle du cordon (thèse Zichen Kong)
 - ▶ Simulation couplée microstructure / mécanique à l'échelle du cordon L-PBF (thèse Zixuan Li)
 - ▶ Simulation couplée microstructure / mécanique à l'échelle de la pièce L-PBF (thèse Trung Chien Vo)
 - ▶ Réduction de modèle (post-doc Joël Keumo Tematio)

- ▶ A venir
 - ▶ Simulation couplée thermique / précipitations à l'échelle de la pièce (thèse Cifre Safran, //thèse Matthieu Assainte CMAT)
 - ▶ Thèses et post-doc sur procédé MBJ (chaire en collaboration avec le CMAT)