



Fabrication additive métallique : modélisation et simulation numérique

Michel Bellet

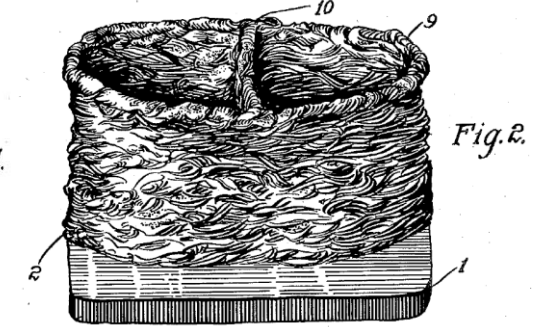
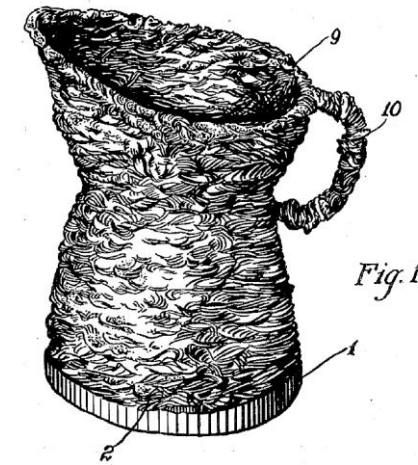
Remerciements à Qiang Chen, Charles-André Gandin, Gildas Guillemot,
Joël Keumo Tematio, Alexis Queva, Lucas Ravix, Yancheng Zhang

Aussois, janvier 2024

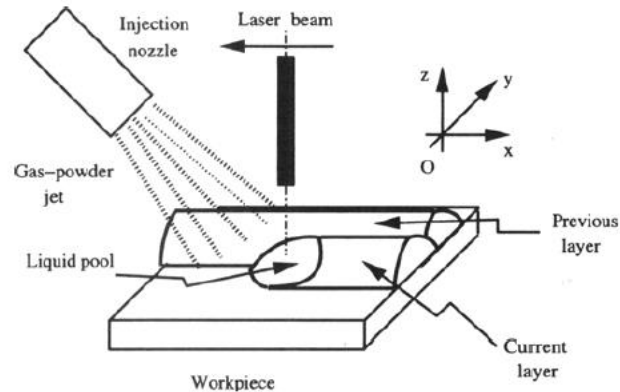
AUX ORIGINES

Le soudage pour assembler, pour réparer

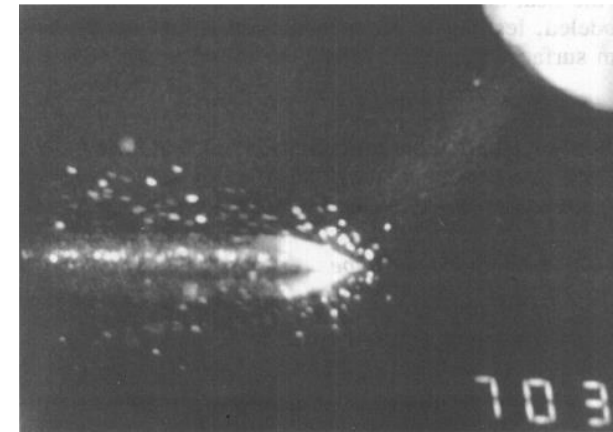
Ralph Baker, "Method of making decorative articles," 1925. US Patent 1,533,300



Le « cladding » pour réparer



Picasso, Rappaz et al., *Met Trans B* 1994



Hoadley & Rappaz, *Met Trans B* 1992

La fabrication additive = « l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique ». (norme NF E 67-001)



SOMMAIRE

Principaux procédés

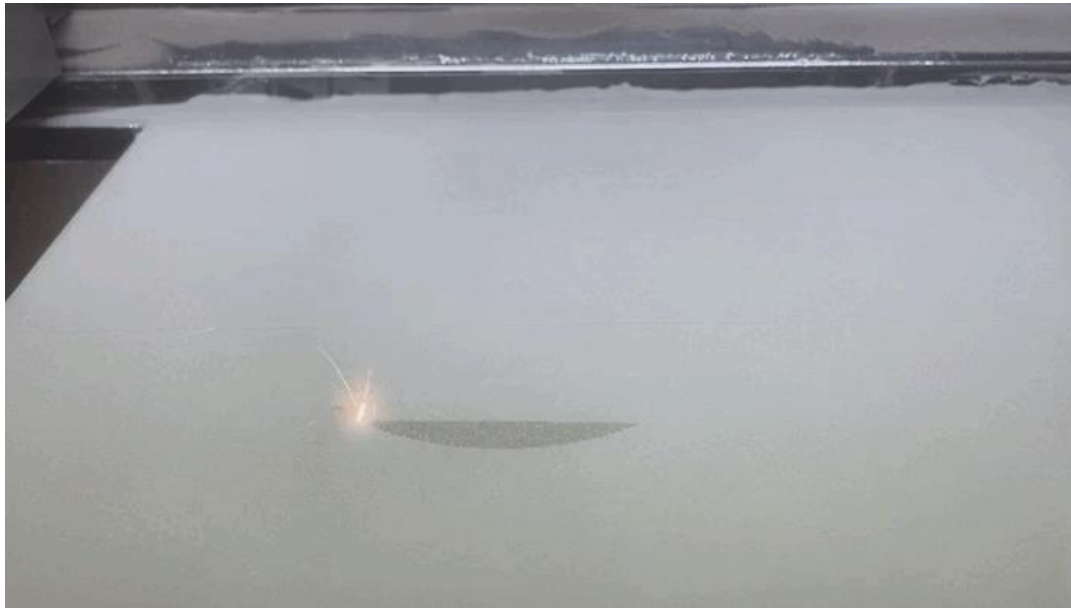
Phénomènes physiques et modélisation

Simulation numérique

- Echelle cordon
- Echelle pièce

Conclusions & perspectives

Comment imprime-t-on les métaux aujourd'hui ?



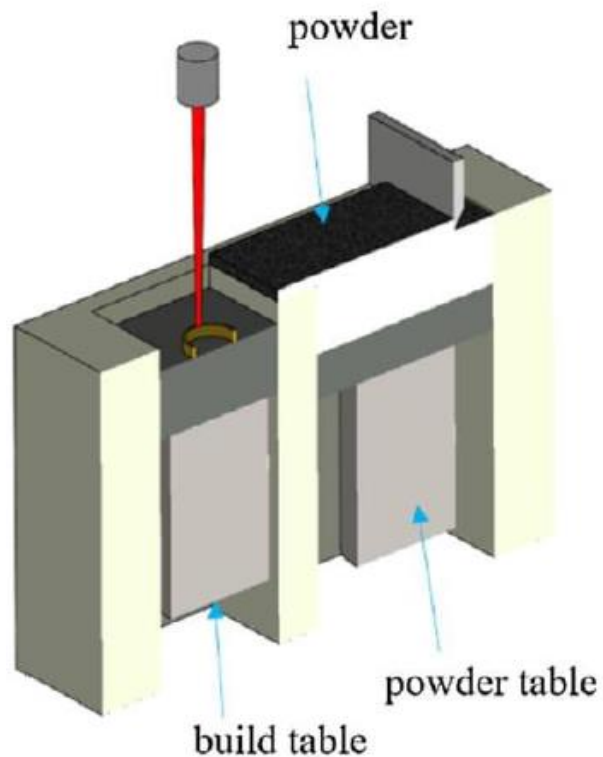
Centre des Matériaux – Mines Paris - PSL



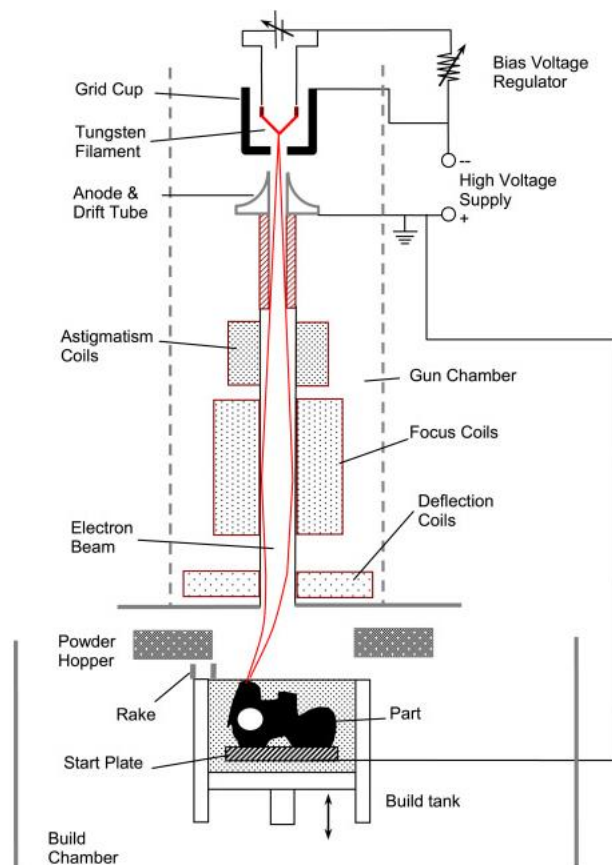
Relativity Space

A partir de **POUDRE** atomisée

Directement...



L-PBF
Laser powder bed fusion



SP Narra, *Encycl. Mater.* 2022

E-PBF
Electron beam

Video : youtube.com/watch?v=DtNilLyRv-I

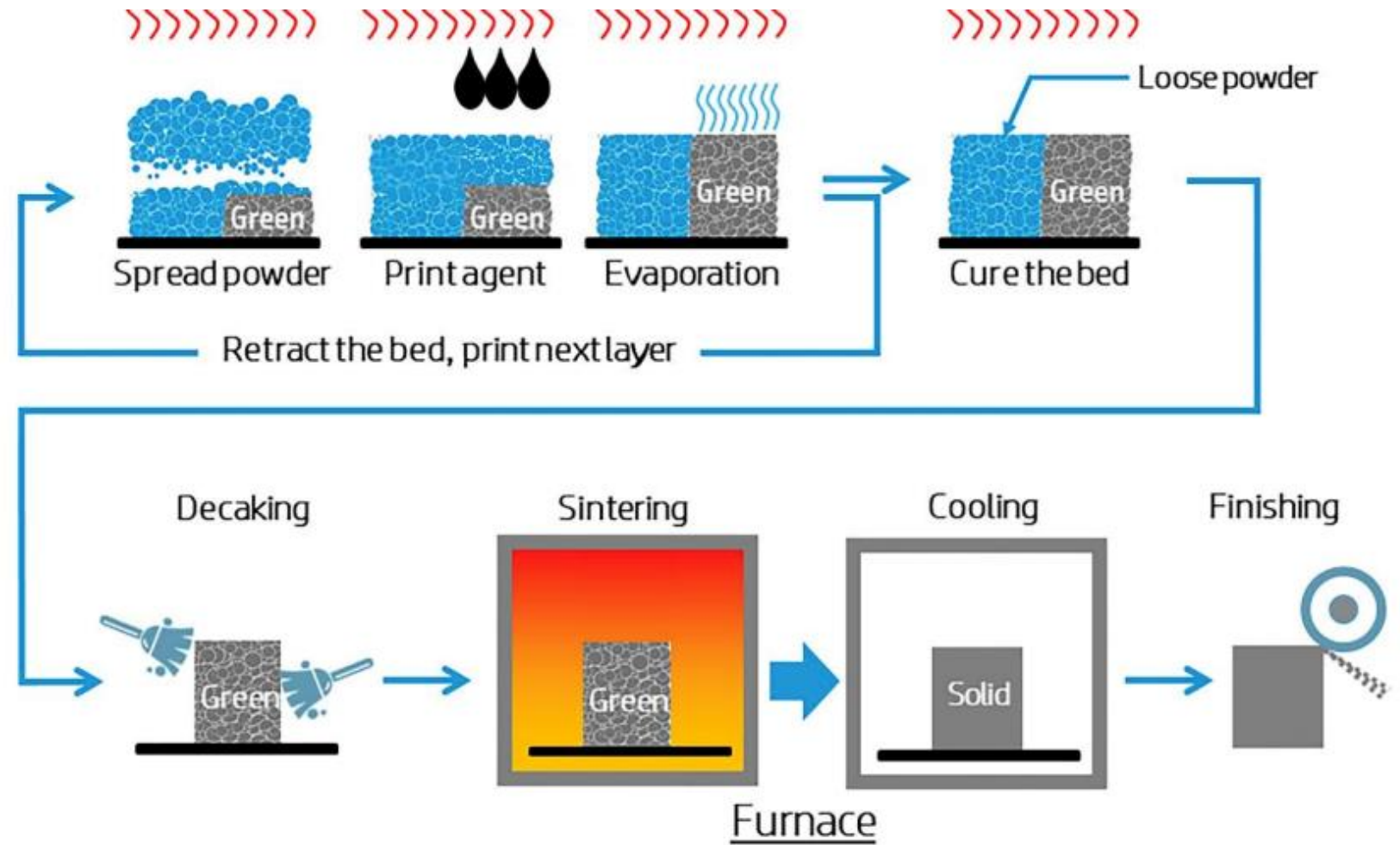


Laser – projection de poudre



A partir de **POUDRE** atomisée

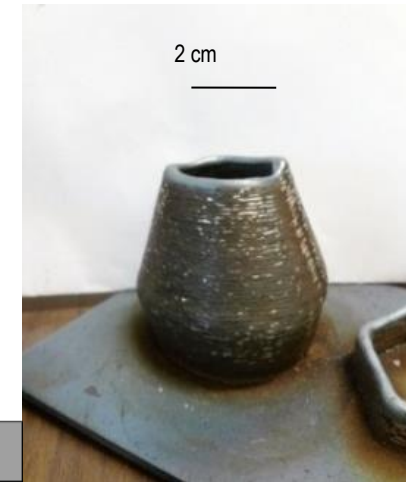
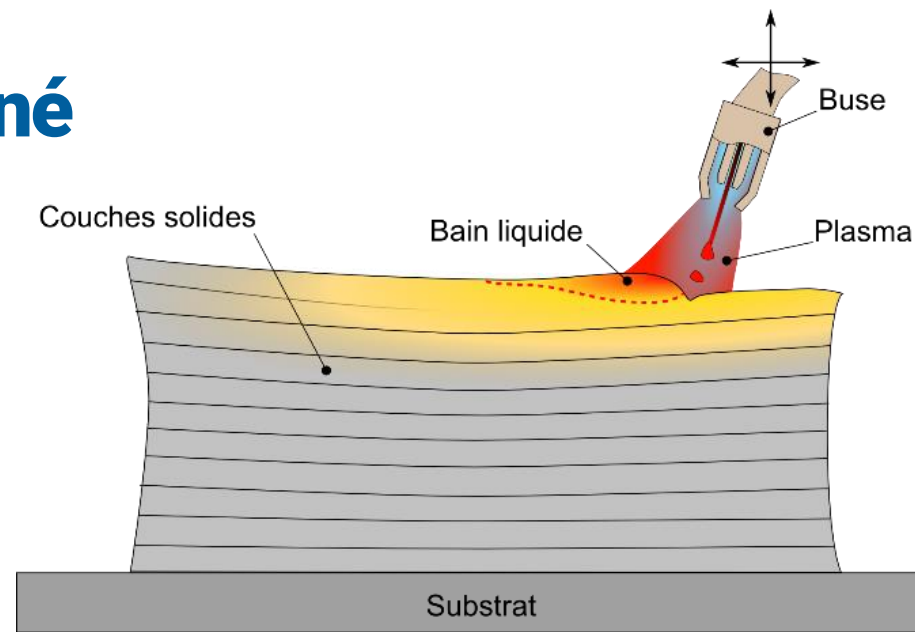
... ou indirectement
(et sans fusion!)



MBJ – Metal binder jetting

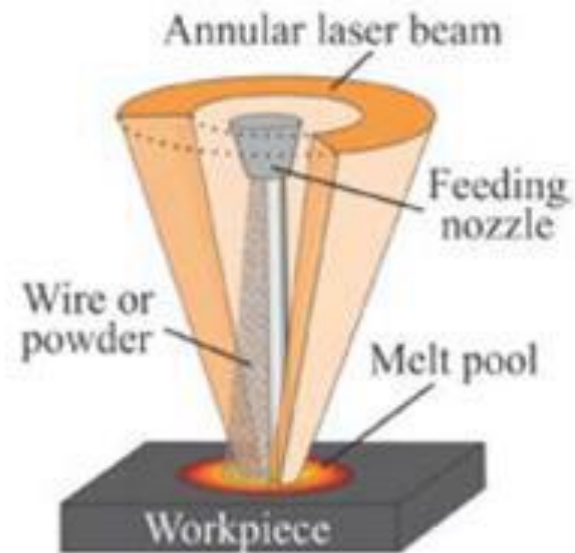
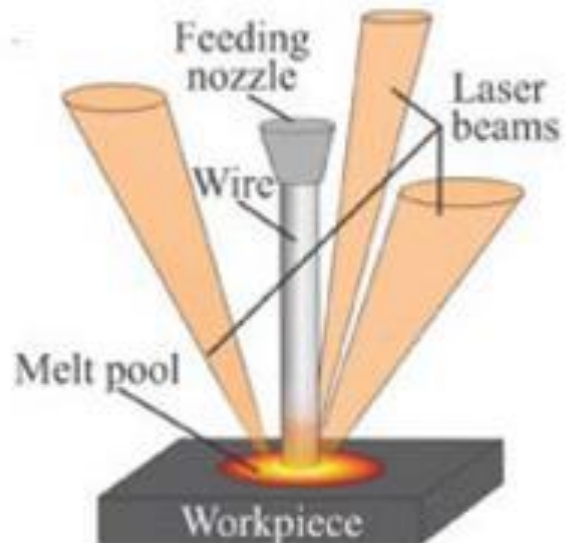
A partir de FIL laminé

WAAM – Wire arc AM



LMGC – U. Montpellier

WLAM – Wire laser AM



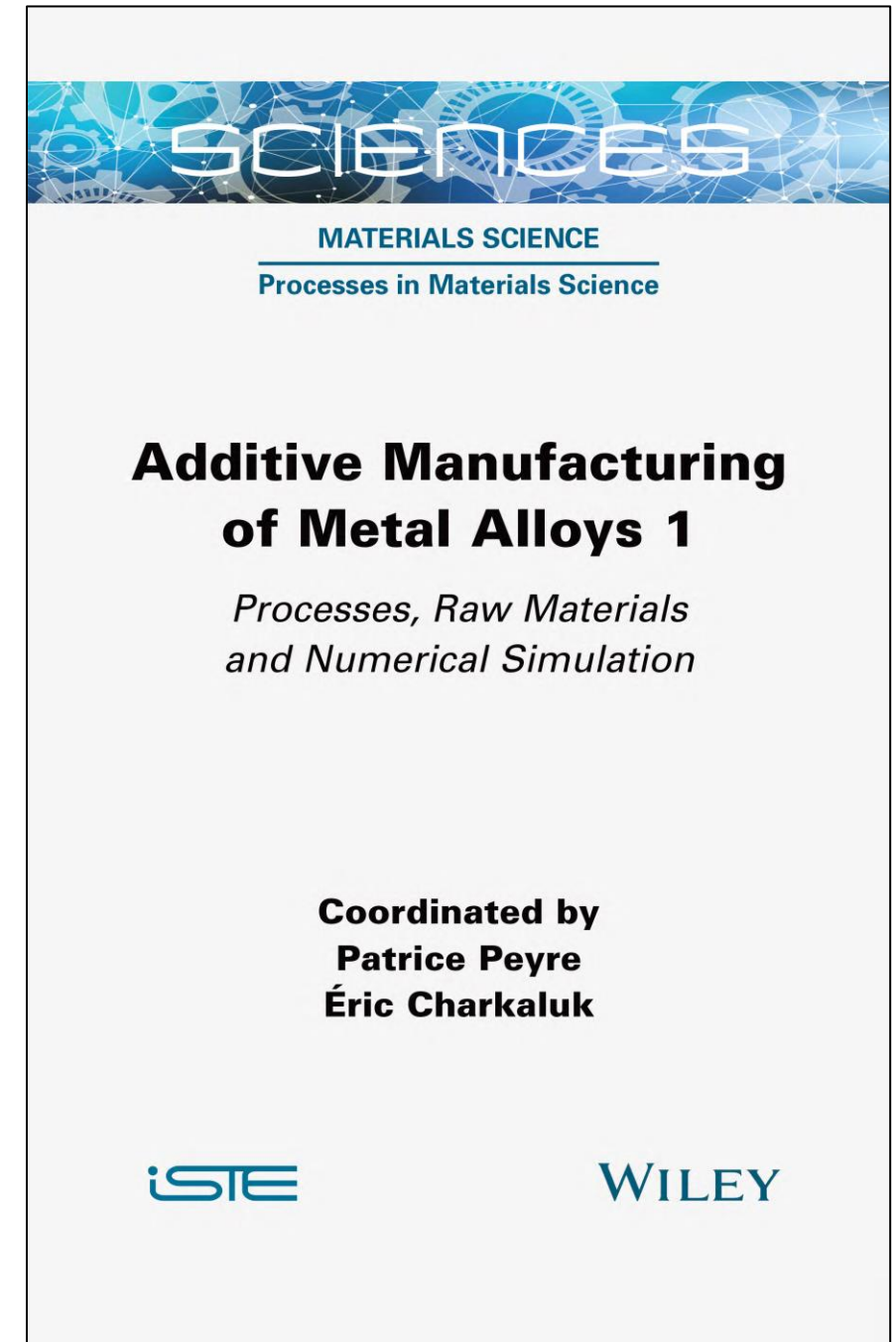
LURPA – ENS Paris Saclay

Les points communs

- Fabrication directe, basée sur la CAO
- Rapidité de définition des gammes de fabrication
- L'applicabilité à une grande variété de matériaux
- ...

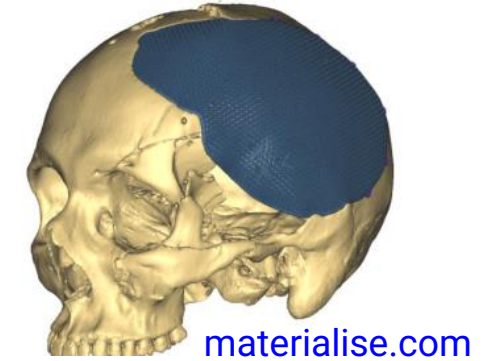
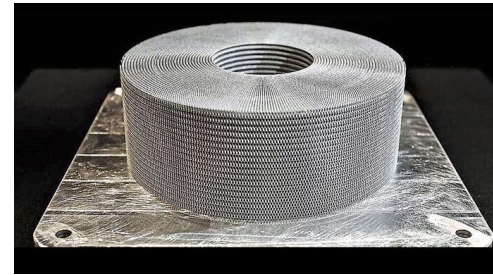
Les facteurs différentiants

- L'environnement du procédé (poudre ou fil)
- La productivité
- Le caractère direct/indirect
- Fusion ou non
- La précision géométrique et l'aspect de surface
- Le besoin de supportage
- Le recyclage (des poudres)
- ...

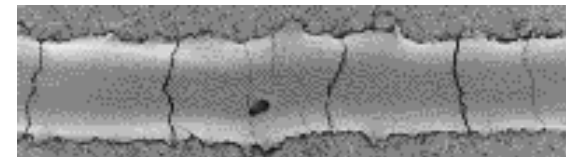
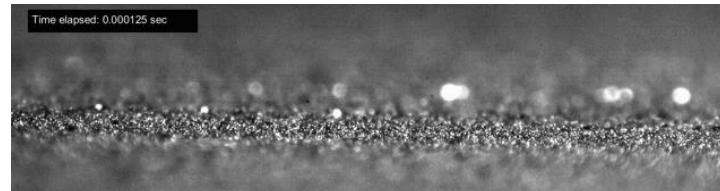
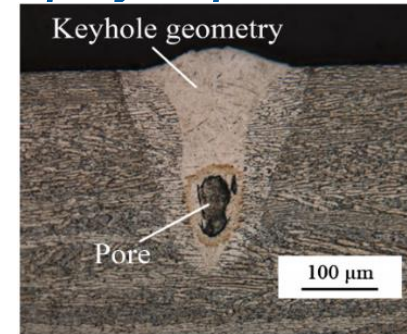
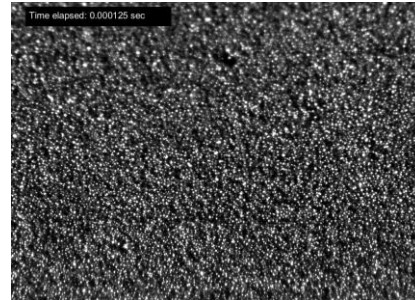
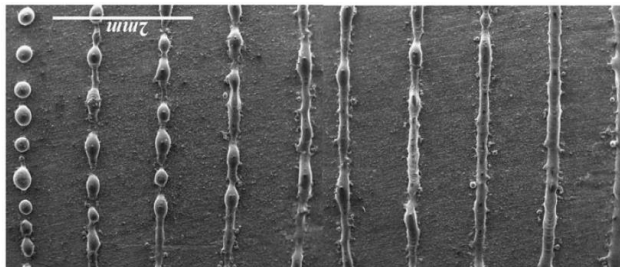


Le cas du L-PBF

Video : [youtube.com/watch?v=Mjf6oaMVWr8](https://www.youtube.com/watch?v=Mjf6oaMVWr8)



Des défauts à différentes échelles, *fruits d'une multiphysique complexe*



Les principaux phénomènes physiques et leur modélisation



PRINCIPAUX PHÉNOMÈNES PHYSIQUES

Interaction laser – matière

Transferts thermiques (au travers du lit de poudre)

Forces électromagnétiques (en WAAM) → Cadiou et al., *Additive Manufacturing* 2020 (UBS Lorient)

Tension de surface et effet Marangoni

Vaporisation et effets induits

Solidification : croissance épitaxiale et germination

Evolutions métallurgiques : précipitation, changements de phase à l'état solide

→ Charles-André Gandin,
Benoît Apollaire, lundi

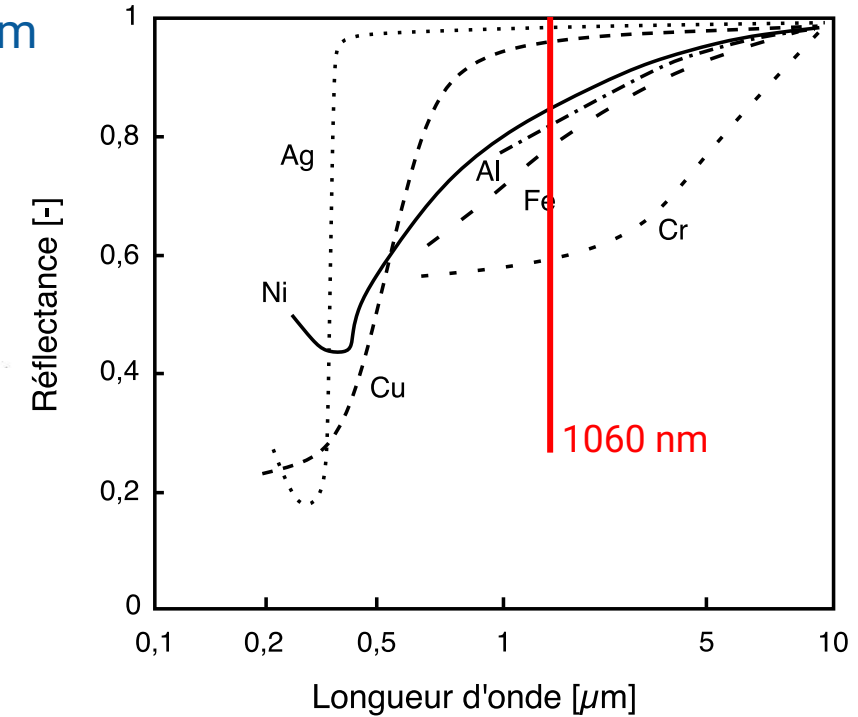
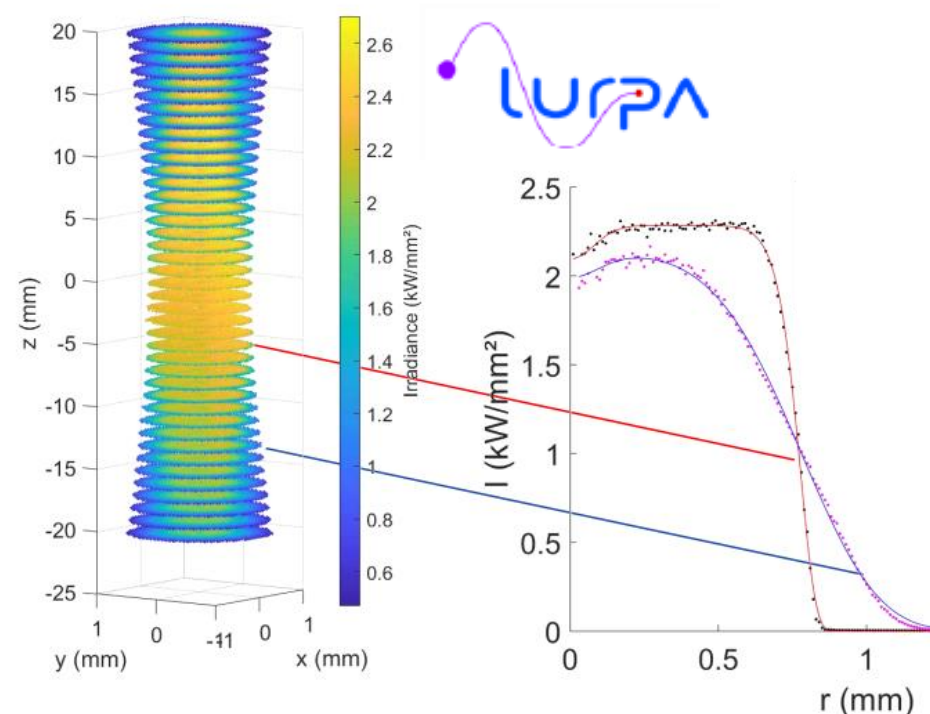
Génération de contraintes internes

INTERACTION LASER - MATIÈRE

- Interaction photons / électrons : théorie de Drude
→ pour les métaux, absorption d'un rayonnement 1060 nm dans ~20 nm
- En L-PBF métallique, interaction surtout avec le bain liquide
→ $A + R = 1$ en surface du bain
forte réflectance !
- Faisceaux gaussiens ou supergaussiens

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

$$\phi(R_L) = \phi_{max} e^{-2} \approx 0,14 \phi_{max}$$



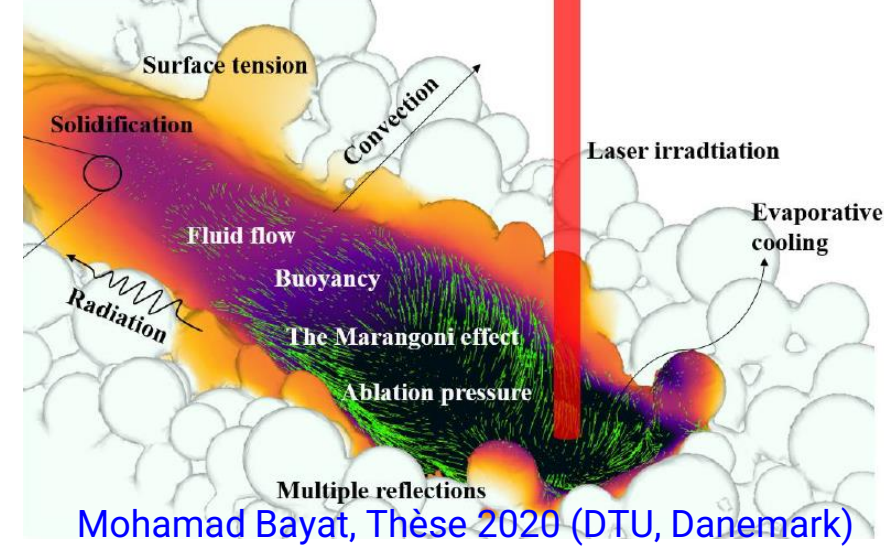
Laurens et al., *Techniques de l'Ingénieur* 1996

FORCES MOTRICES DANS LE BAIN LIQUIDE

Tension de surface

- Selon la normale à l'interface liquide/gaz

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



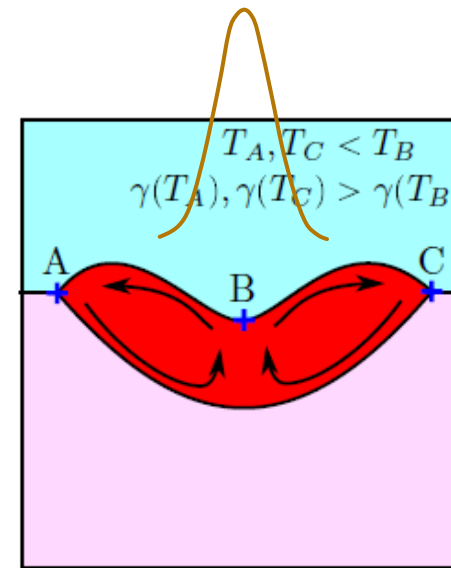
Forces de Marangoni

- Dans le plan tangent à l'interface

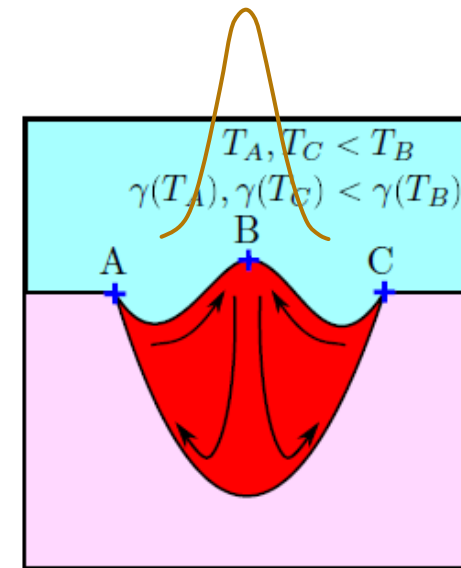
$$\mathbf{T} = \nabla_s \gamma = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \nabla_s T$$

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

$$\gamma(T) = \gamma_{ref} + \frac{\partial \gamma}{\partial T} (T - T_{ref})$$



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



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

Flottabilité (négligeable)

$$\mathbf{f}_{grav} = \rho_{ref} [1 - \beta_v(T - T_{ref})] \mathbf{g}$$

VAPORISATION

■ Théorie de Hertz-Langmuir

Hirano, Fabbro, Muller, *J Phys D: Appl Phys* 2011; Thèse Yaasin Mayi 2021 (PIMM, ENSAM)

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

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

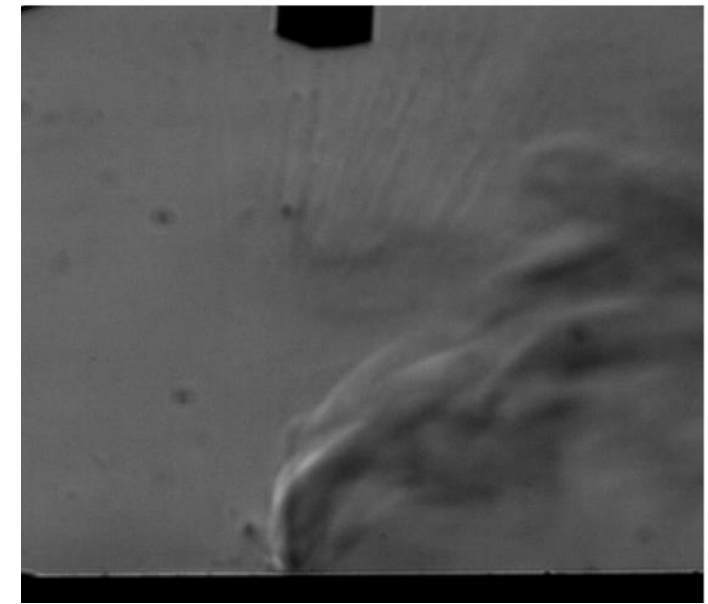
→ Puits thermique à l'interface liquide/gaz

$$\phi_v = -\dot{m} L_v \quad [\text{W m}^{-2}]$$

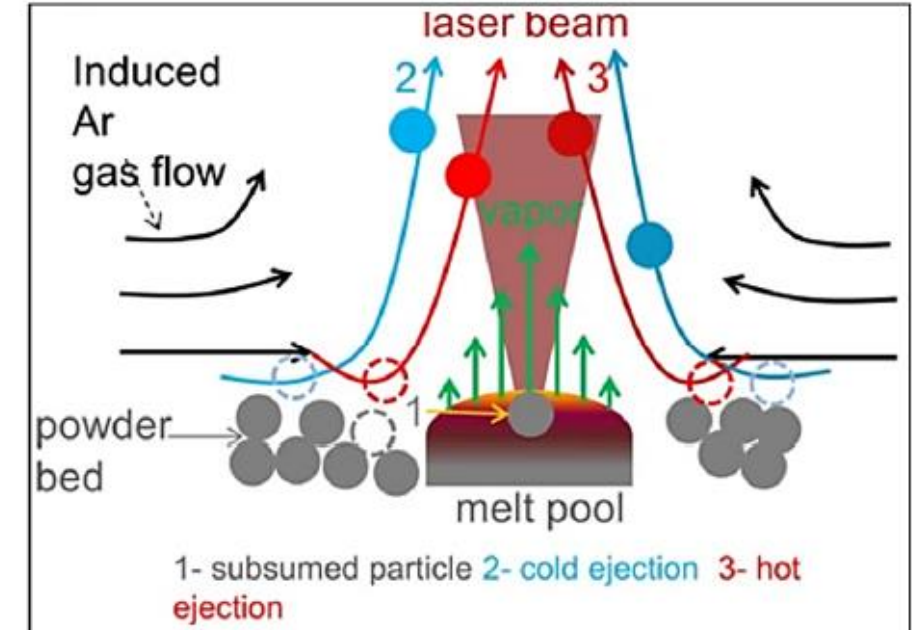
→ Pression de recul

$$\mathbf{T}_{rec} = -\left(\frac{1 + \beta_r}{2}\right) p_{sat}(T) \mathbf{n} \quad [\text{Pa}]$$

■ Effets induits : dénudation, instabilités, éjections (spatters)



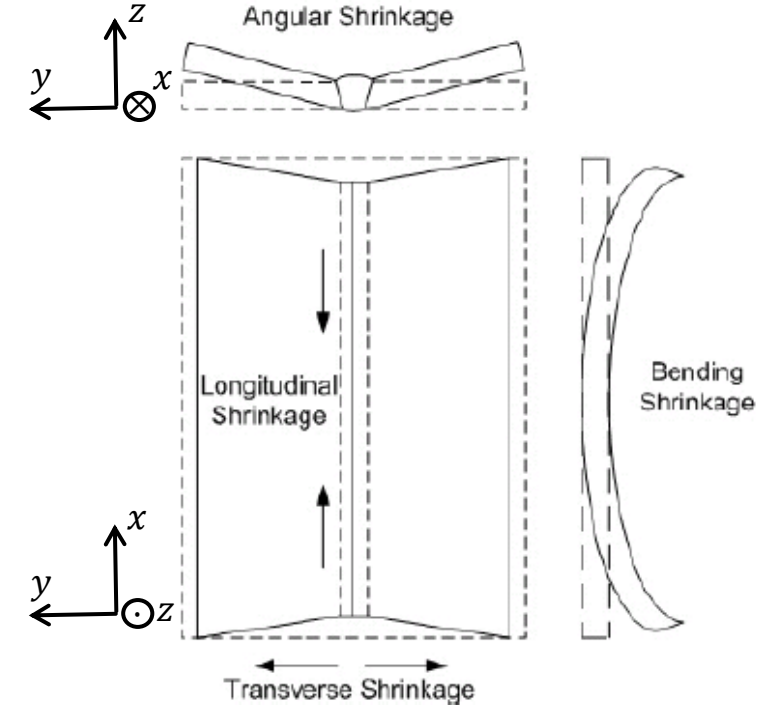
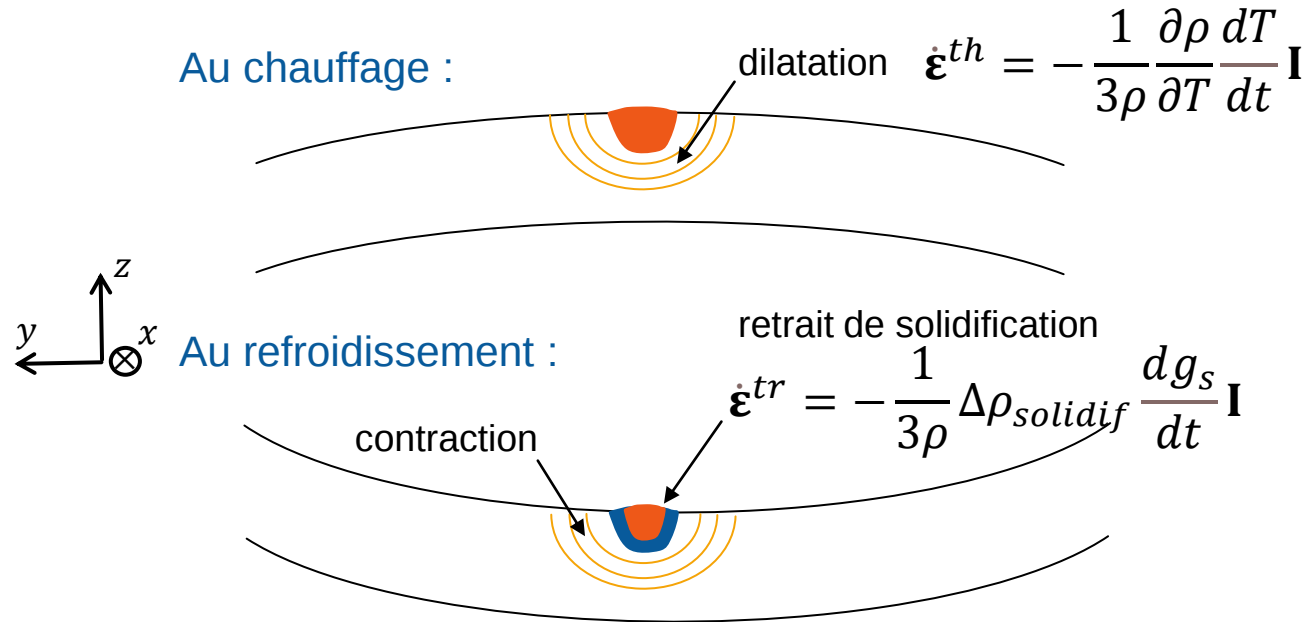
Bidare et al., *Acta Materialia* 2018



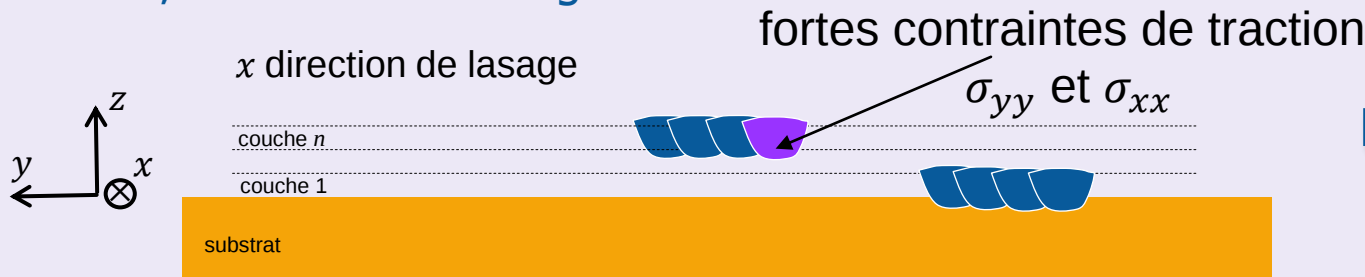
Ly et al., *Nature, Scientific Reports* 2017

GENERATION DE CONTRAINTES

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



- En FA, effet d'auto-bridage



Cyclage thermique

Déposés successives de cordons

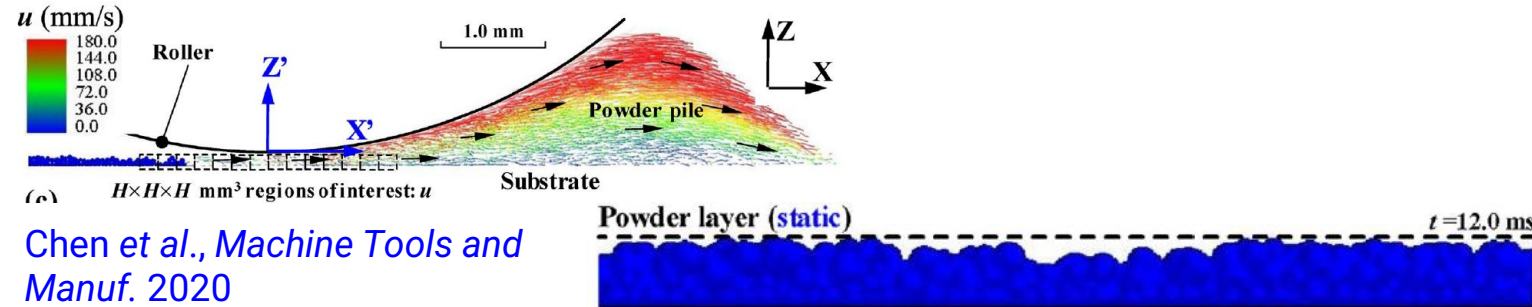
Changements de phase à l'état solide, précipitations

La simulation numérique

Echelle méso

SIMULATION "MESO" : APPROCHES PARTICULAIRES

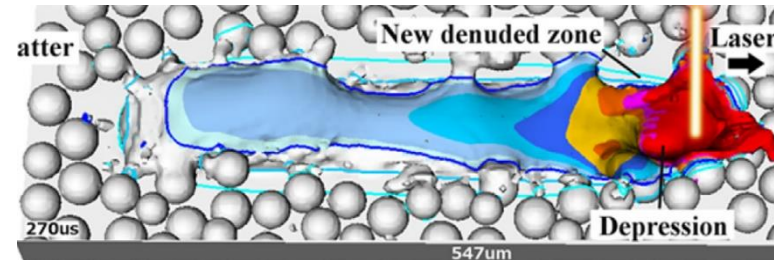
- Simulation de l'état initial du lit de poudre, en tenant compte ou pas de l'étalement par racleur ou rouleau : méthode des éléments discrets (DEM)



Chen et al., *Machine Tools and Manuf.* 2020

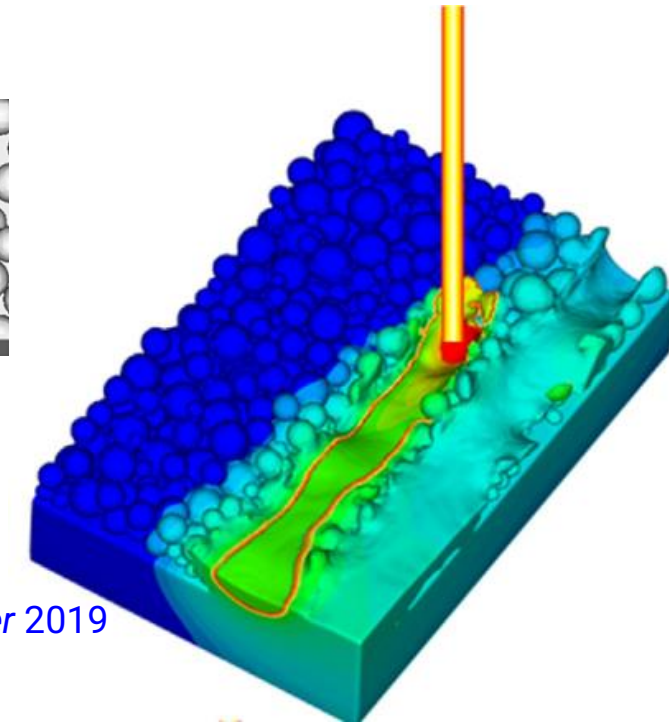
Marchais, Girardot et al., *Comp. Particle Mechanics* 2021

- Interaction laser – particules de poudre : chauffage, fusion, puis écoulements : éléments finis en formulation ALE



Khairallah et al., *Acta Materialia* 2016

- Formation de la zone fondue, manques de fusion, porosités
- Influence de la granulométrie



Bayat et al., *Heat and Mass Transfer* 2019

Temps de calcul très élevé (qq semaines / mm) ➡ Approche méso continue

L'approche meso continue

développée au CEMEF



Qiang Chen
Alexis Queva
Gildas Guillemot

APPROCHE MESO POUR L-PBF

Formulation level set

Domaines et interface

- Matériau Ω_M , Gaz Ω_G
- Fonction distance signée ψ . Interface : $\psi = 0$
- Fonction Heaviside lissée $\mathcal{H}$ dans la zone de transition $\pm\epsilon$
- Fonction Dirac lissée $\delta = -\partial\mathcal{H}/\partial\psi$

Mélange de propriétés en zone de transition

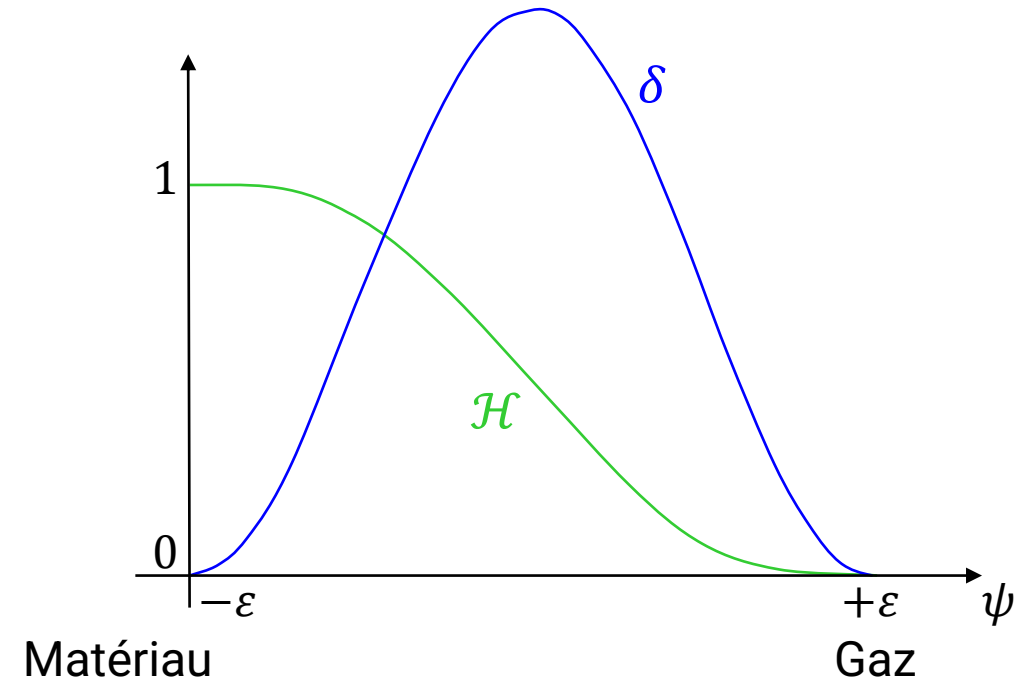
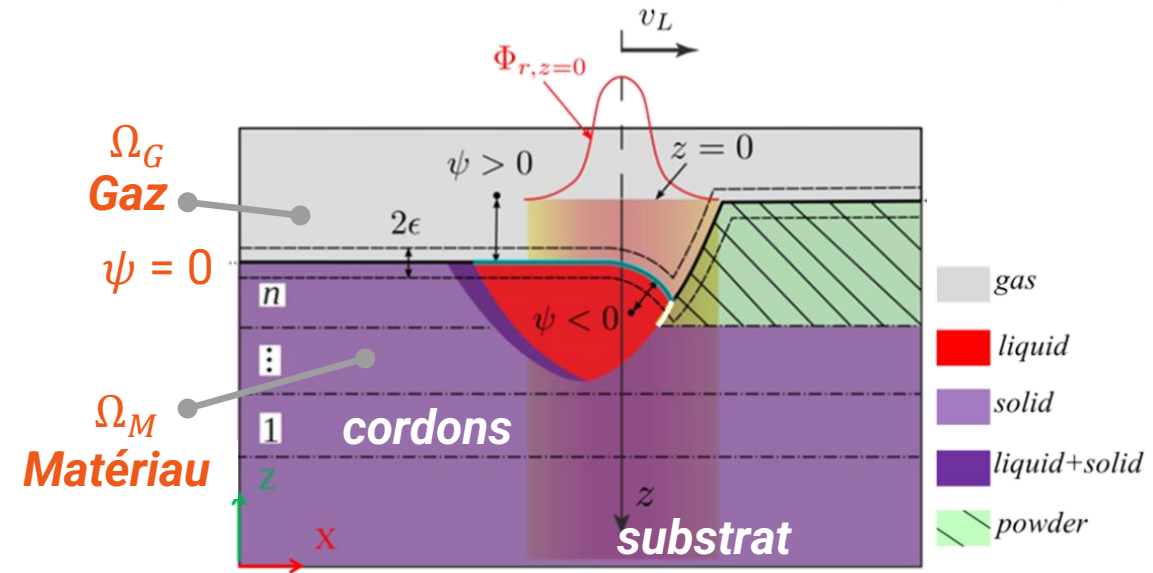
- $\{\chi\} = \mathcal{H}\langle\chi\rangle^M + (1 - \mathcal{H})\chi^G$

Equations de conservation

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

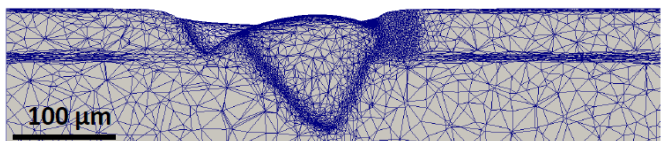
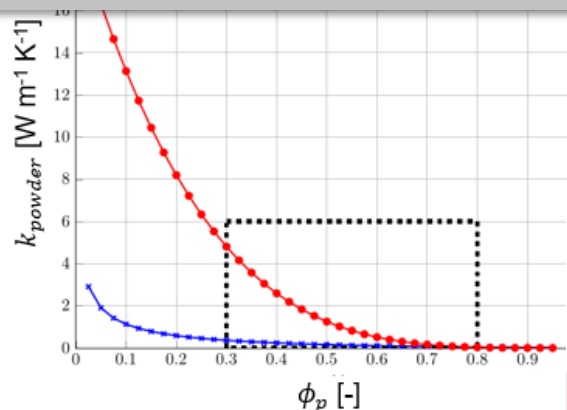
$$\{\rho\} \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\nabla \mathbf{v})\mathbf{v} \right] = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{s}] + \{\rho\}\mathbf{g} + \mathbf{f}_v$$

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



Solveur thermique

- Non linéaire
 - Changement de phase
 - Conductivité du lit de poudre



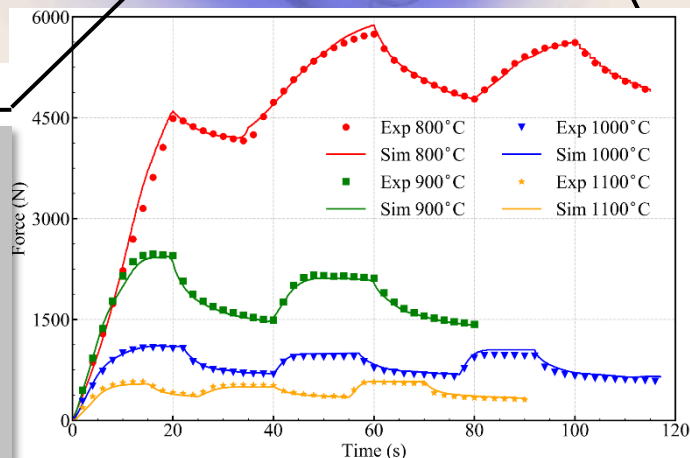
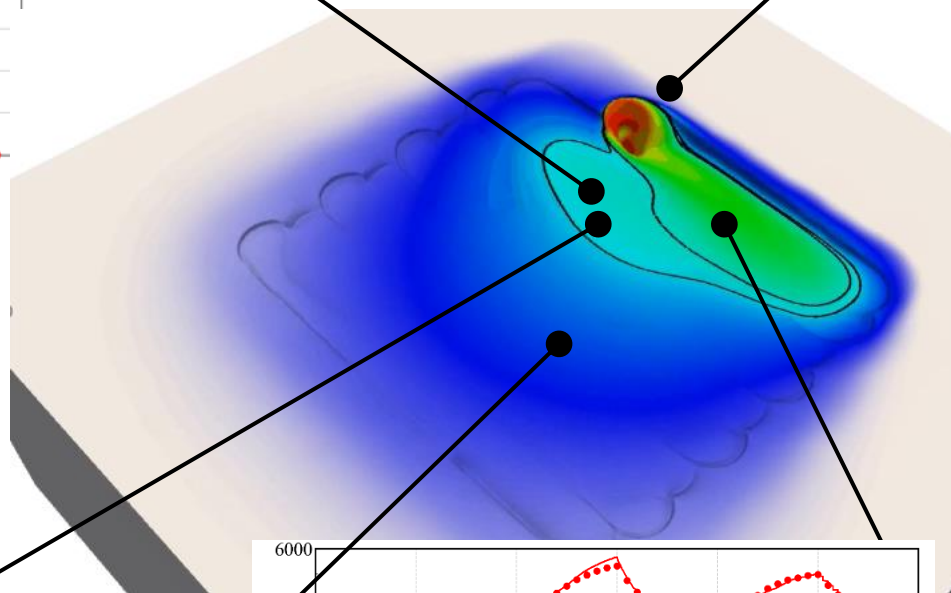
Remaillage adaptatif

- basé sur estimateur d'erreur sur les champs calculés

Comportement mécanique

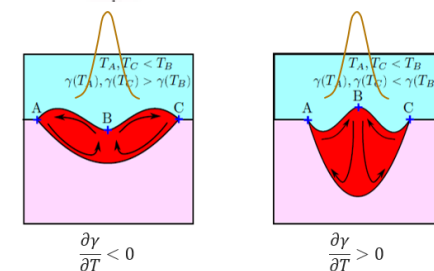
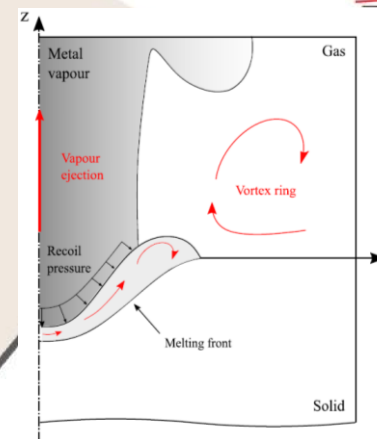
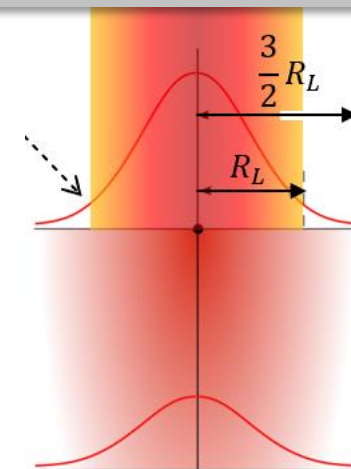
- Milieu poudre : newtonien compressible
- Liquide : newtonien
- Solide :
 - newtonien (viscosité arbitraire)
 - élasto-viscoplastique

Simulation "méso"



Modèle de source laser

- Différents types : gaussien, "top hat"
- Surfacique (ou éventuellement, Beer-Lambert)

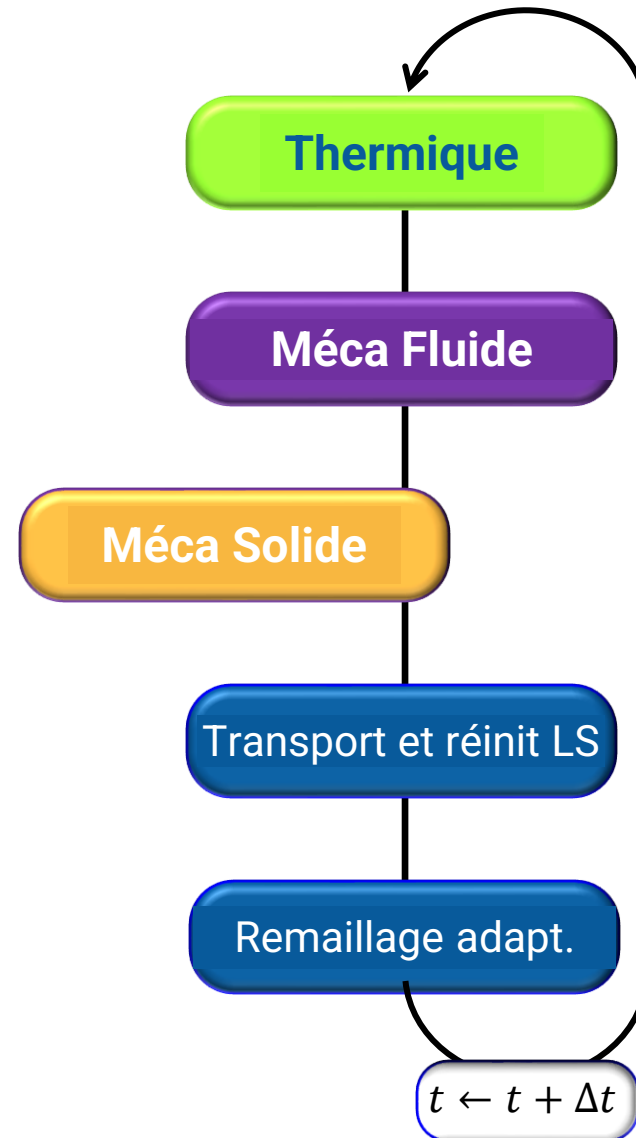


Résolution des écoulements

- Suivi d'interface par level set
- Forces motrices principales
 - Tension de surface, dont Marangoni
 - Vaporisation (pression de recul)



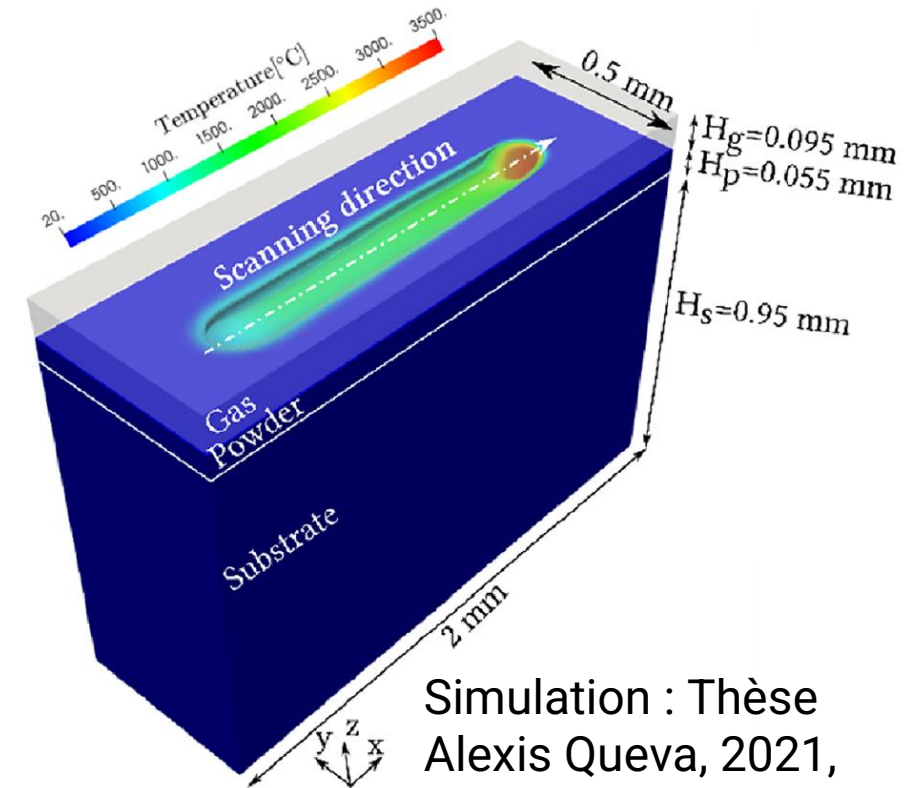
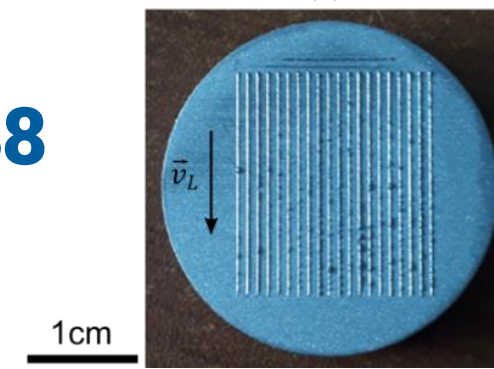
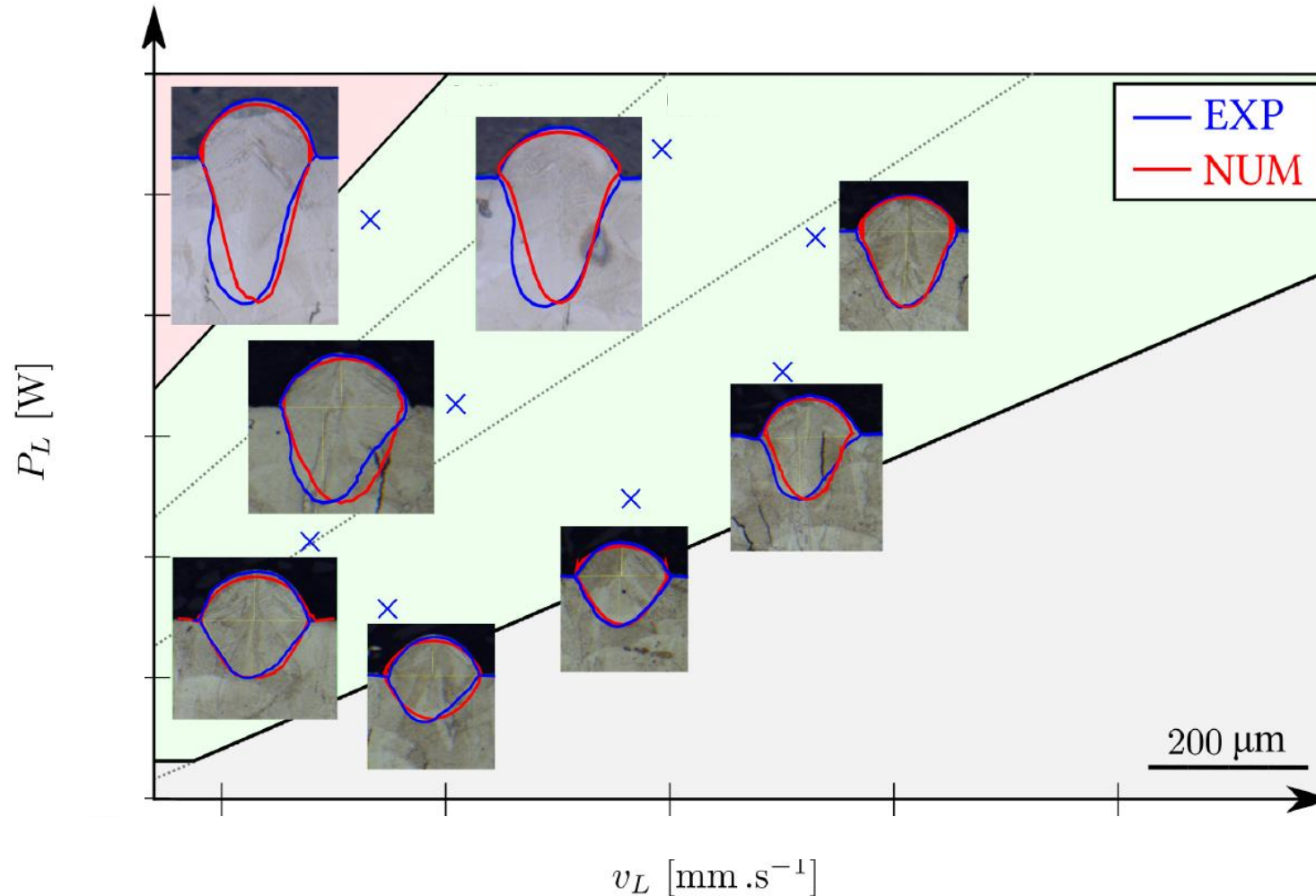
ORGANISATION DES CALCULS



COMPARAISON AVEC L'EXPERIENCE : IN738



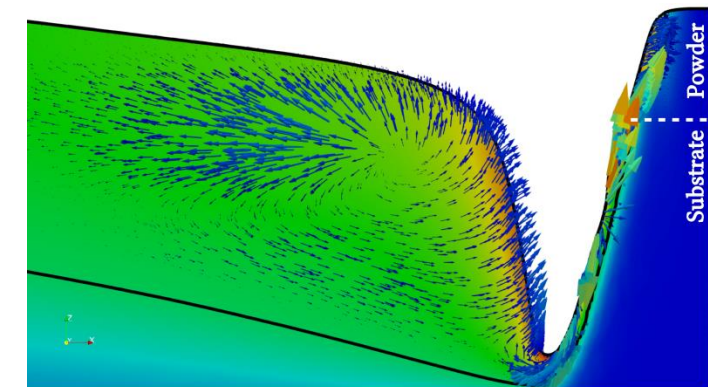
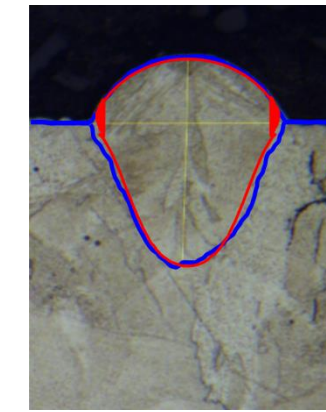
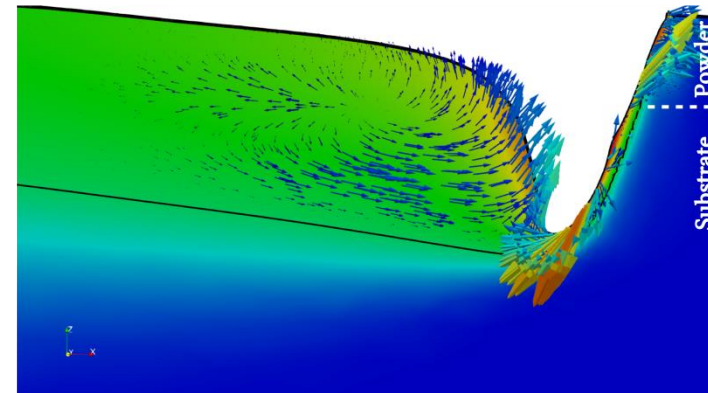
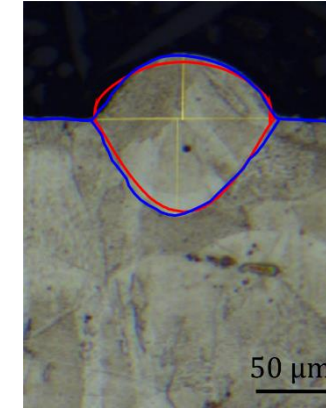
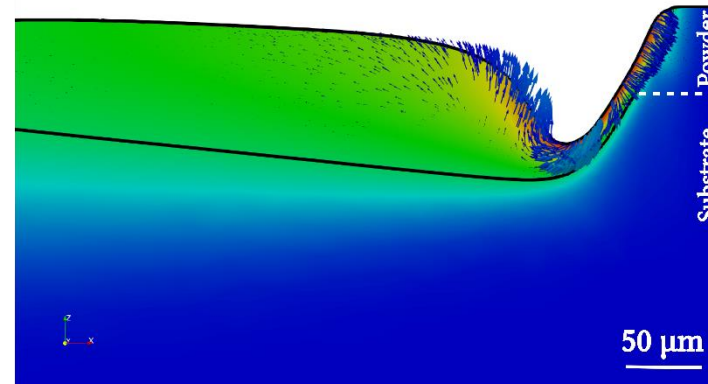
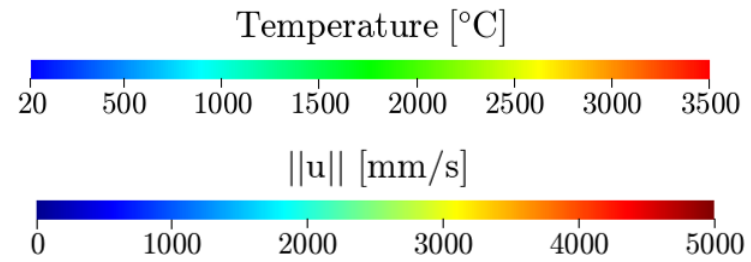
Thèse David Grange, 2020
Centre des Matériaux – Mines Paris



Simulation : Thèse
Alexis Queva, 2021,
CEMEF – Mines Paris



IN738, $\phi_L = 100 \mu\text{m}$



VALIDATION THERMIQUE PAR IMAGERIE IR

Expérimental
NIST: Lane *et al.*,
*Integrating
Materials and Manufacturing
Innovation 2020*

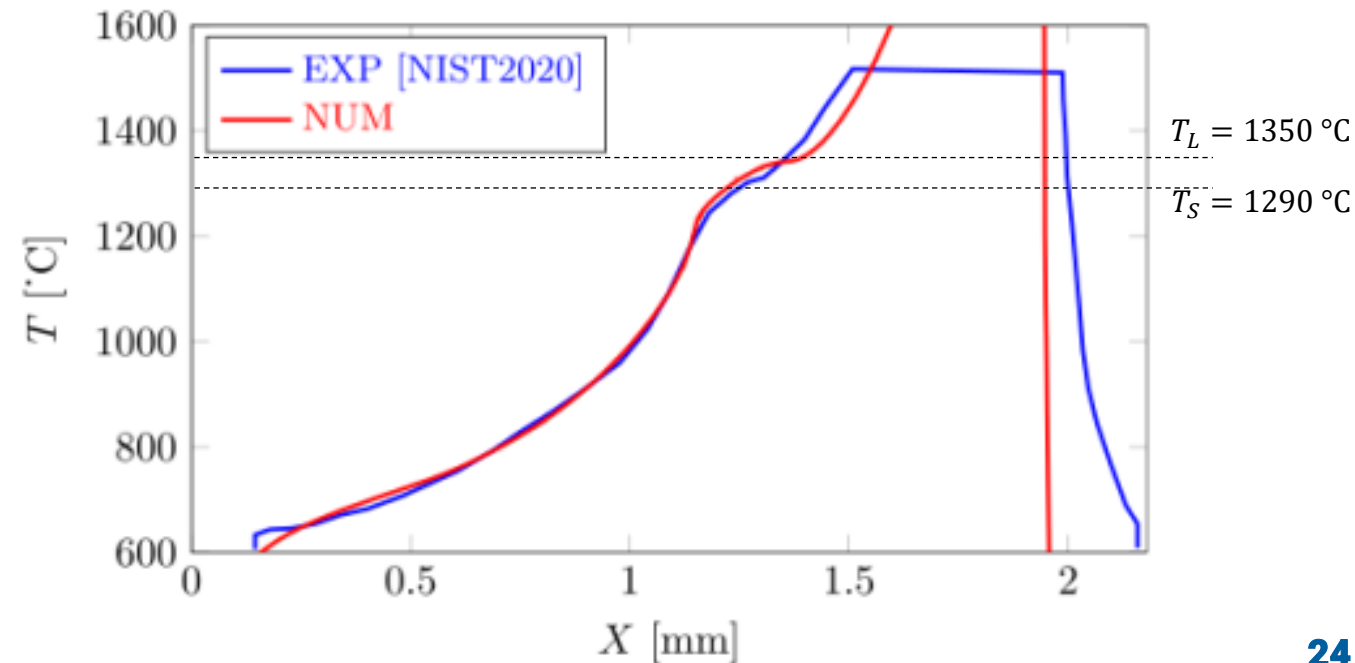
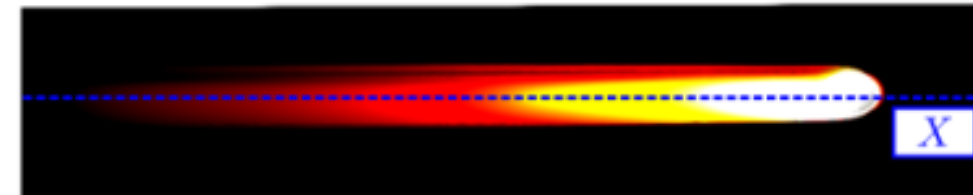
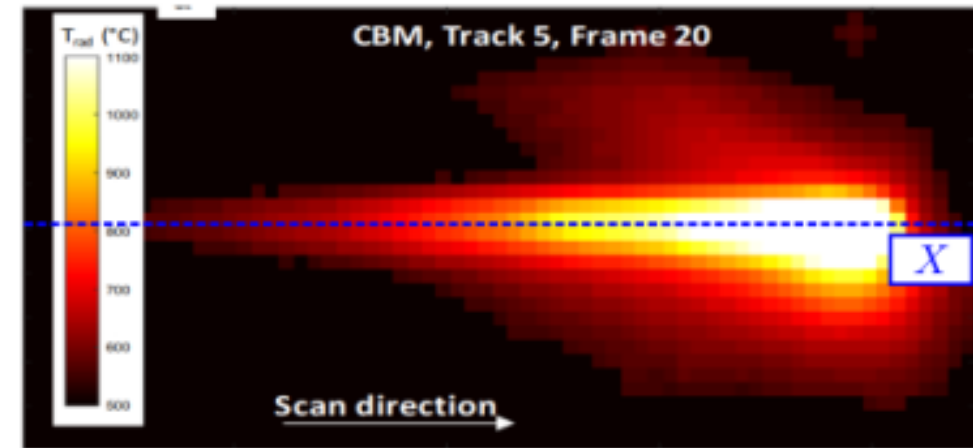
IN625

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

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

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

Simulation

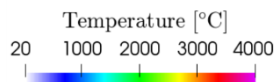




EXTENSION : CORDONS MULTIPLES...

IN718

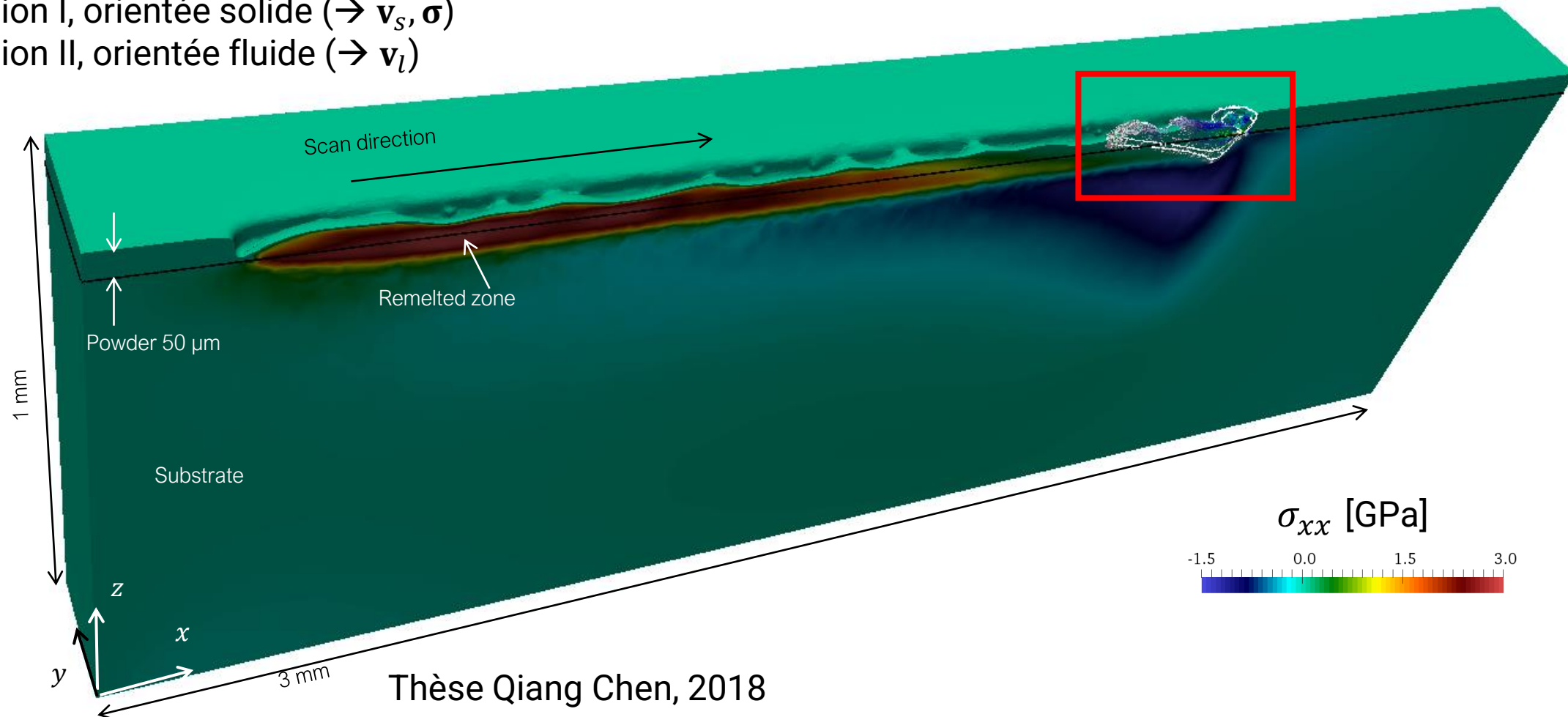
3 couches successives
d'un pilier de "lattice"
9 cordons par couche
1 mm²



APPLICATION : L-PBF D'UNE CERAMIQUE (ALUMINE)

Résolution de la mécanique du solide,
à chaque pas de temps, sur tout le domaine,
avec une loi de comportement élasto-viscoplastique,

- Résolution I, orientée solide ($\rightarrow \mathbf{v}_s, \boldsymbol{\sigma}$)
- Résolution II, orientée fluide ($\rightarrow \mathbf{v}_l$)

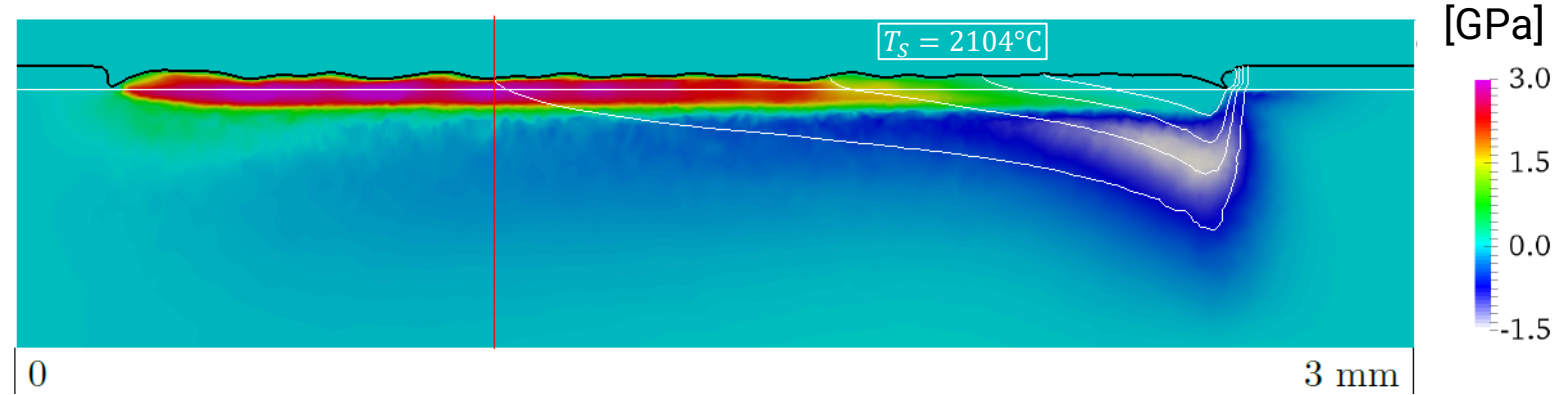


FORMATION DES CONTRAINTES

Laser de fusion

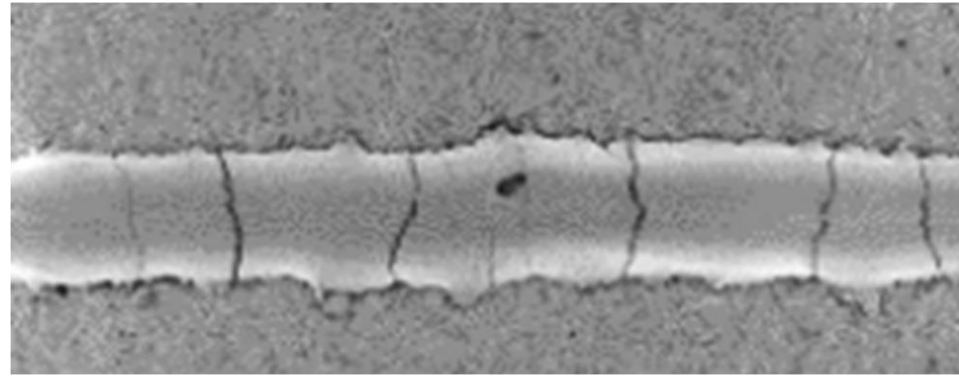
$$P_L = 84 \text{ W}, \phi_L = 100 \text{ } \mu\text{m},$$

$$v_L = 300 \text{ mm s}^{-1}$$



Contrainte axiale σ_{xx}

400 μm





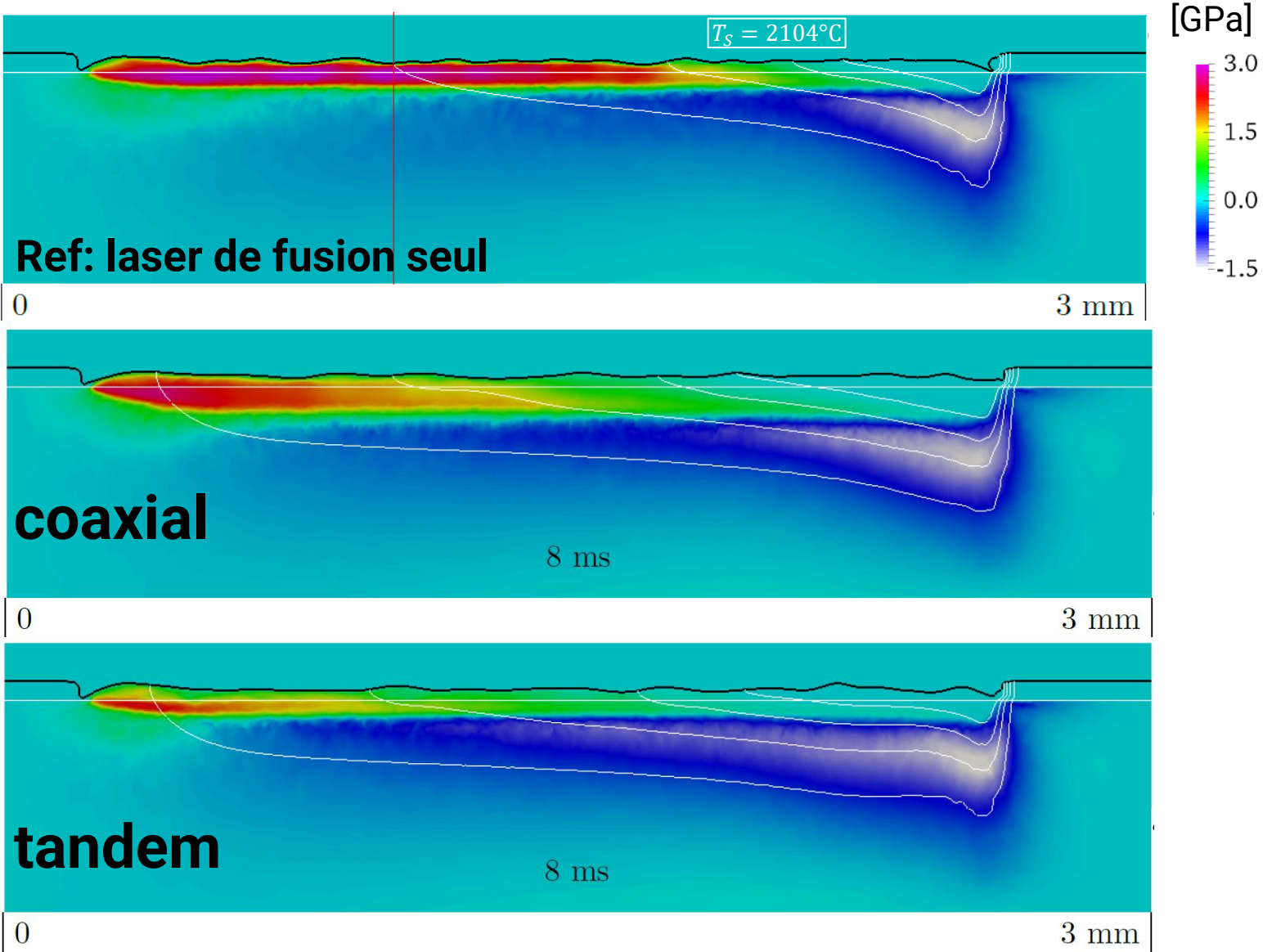
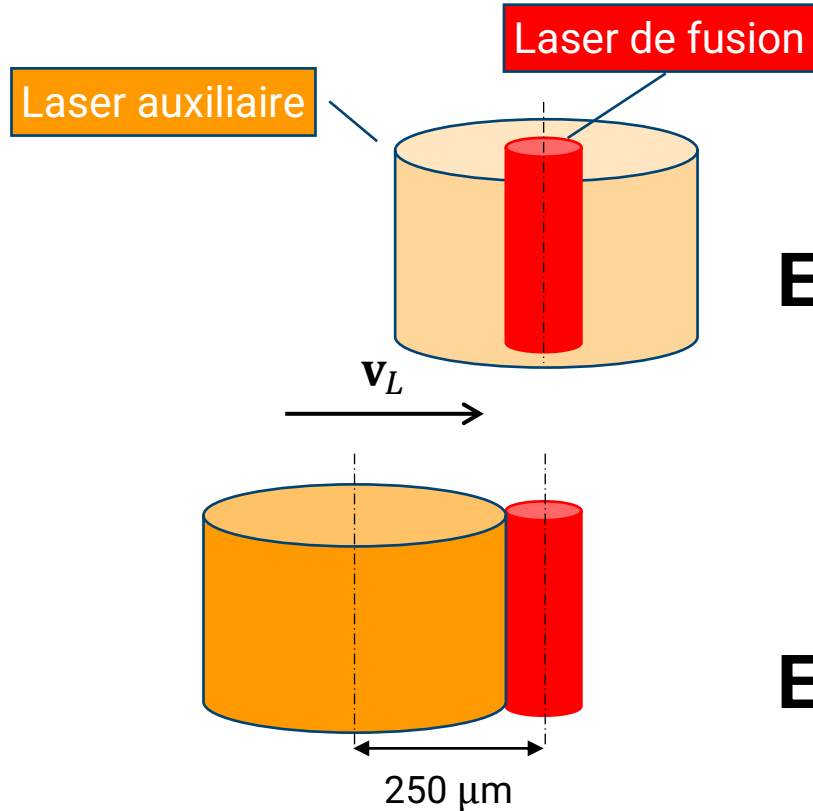
IMPACT D'UN CHAUFFAGE ADDITIONNEL

Laser de fusion

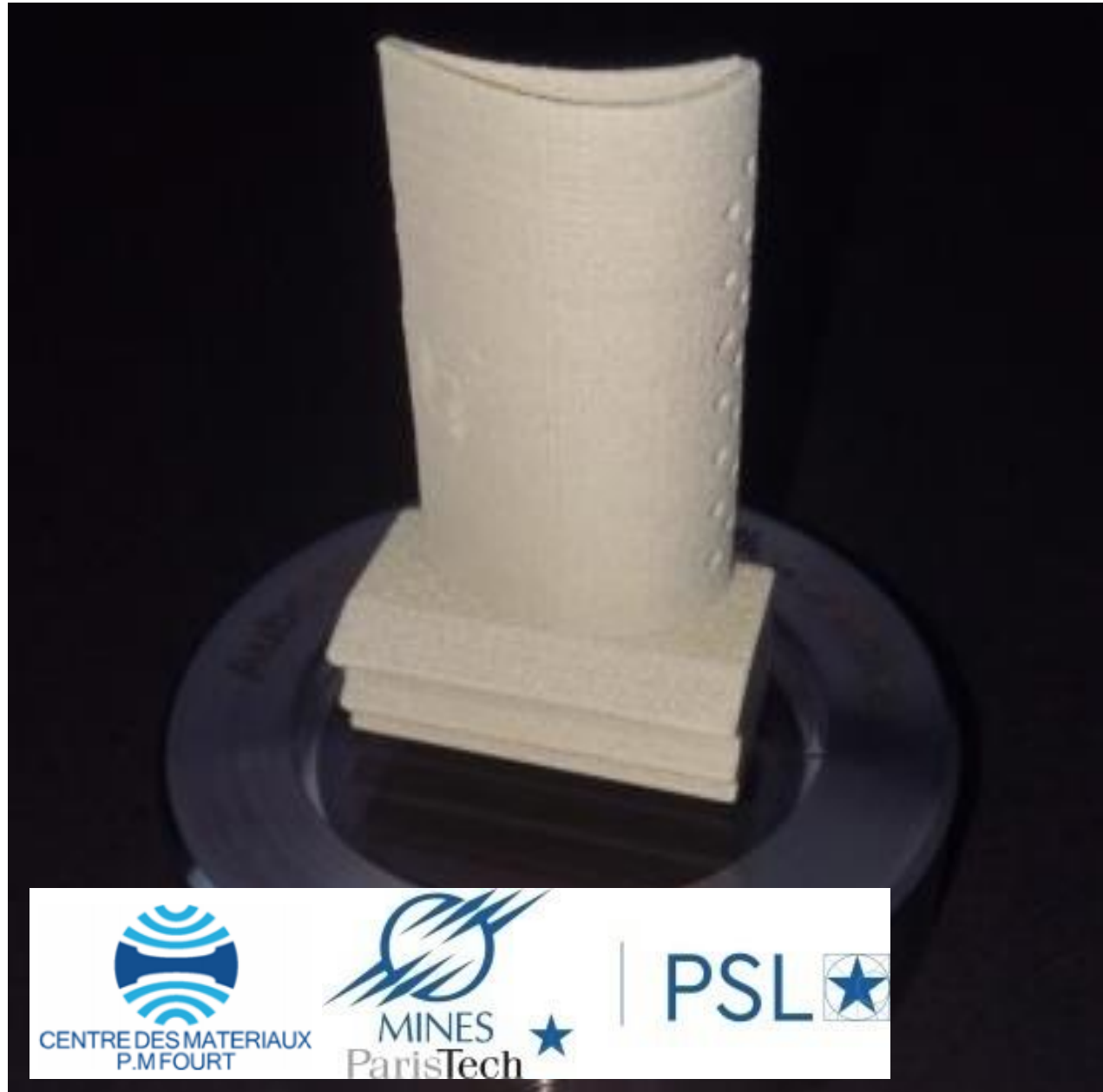
$$P_L = 84 \text{ W}, \phi_L = 100 \text{ }\mu\text{m},$$

$$v_L = 300 \text{ mm s}^{-1}$$

2nd laser $P_L = 60 \text{ W}, \phi_L = 400 \text{ }\mu\text{m}$



Contrainte axiale σ_{xx}



Thèse Liliana Moniz
2020
Centre des Matériaux
Mines Paris - PSL

La simulation numérique

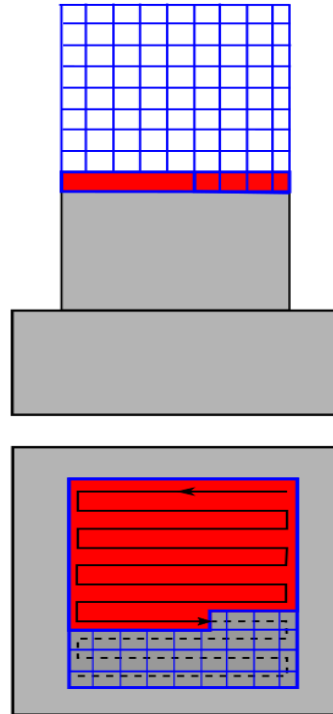
Approche macro

CALCULER SUR UN DOMAINE EN EXPANSION

► Méthodes classiques

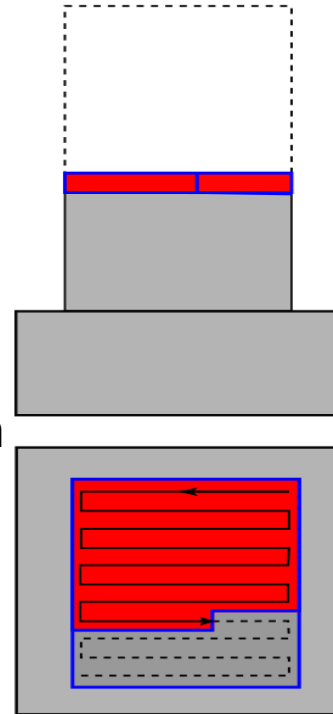
"Quiet element"

- Tout le domaine est maillé, a priori
- Activation progressive des éléments
- Propriétés fictives dans les régions non encore actives (construites)
- Facilité d'implémentation (Nbre elts et connectivité constante)
- Matrices mal conditionnées : temps calcul ↗ si utilisation de solveurs itératifs



"Element birth"

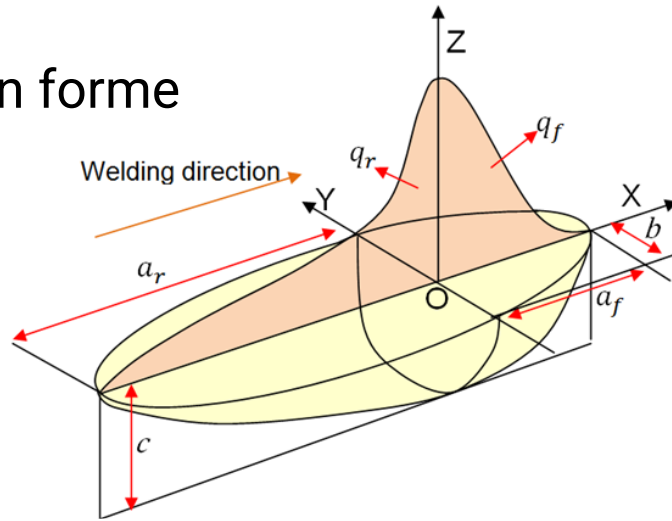
- Croissance progressive du maillage de calcul...
- ...par activation et ajout de nouveaux éléments
- Résolution limitée à la pièce en construction : matrices plus petites, bien conditionnées → rapidité
- Plus difficile d'implémentation
- L'initialisation des éléments ajoutés est délicate et peut impacter le bilan d'énergie



LA PHYSIQUE DU BAIN EST IGNOREE → sources thermiques volumiques

Source de Goldak,
pseudo-gaussienne en forme
de double ellipsoïde

Goldak, *Met. Trans. B* 1984

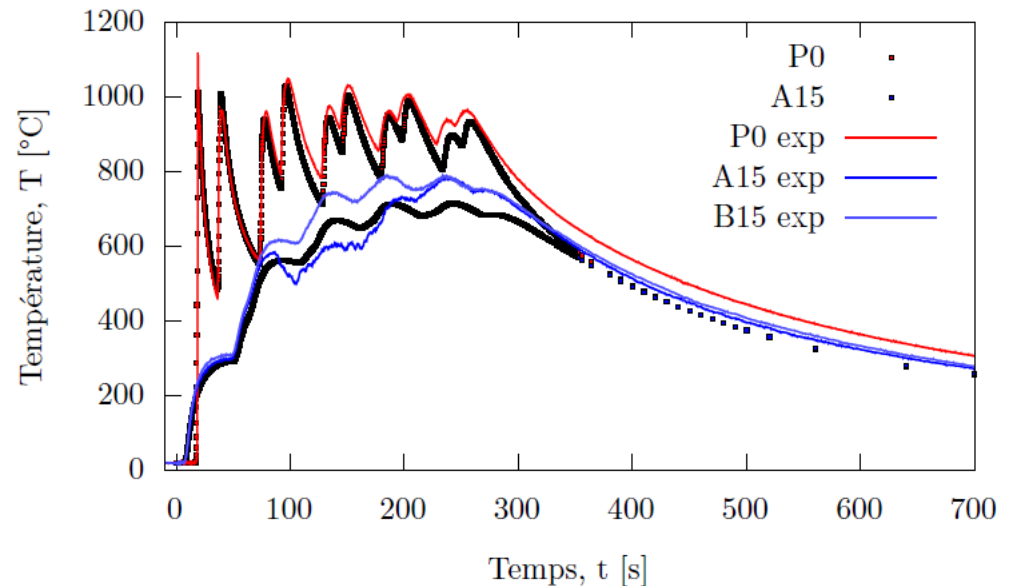
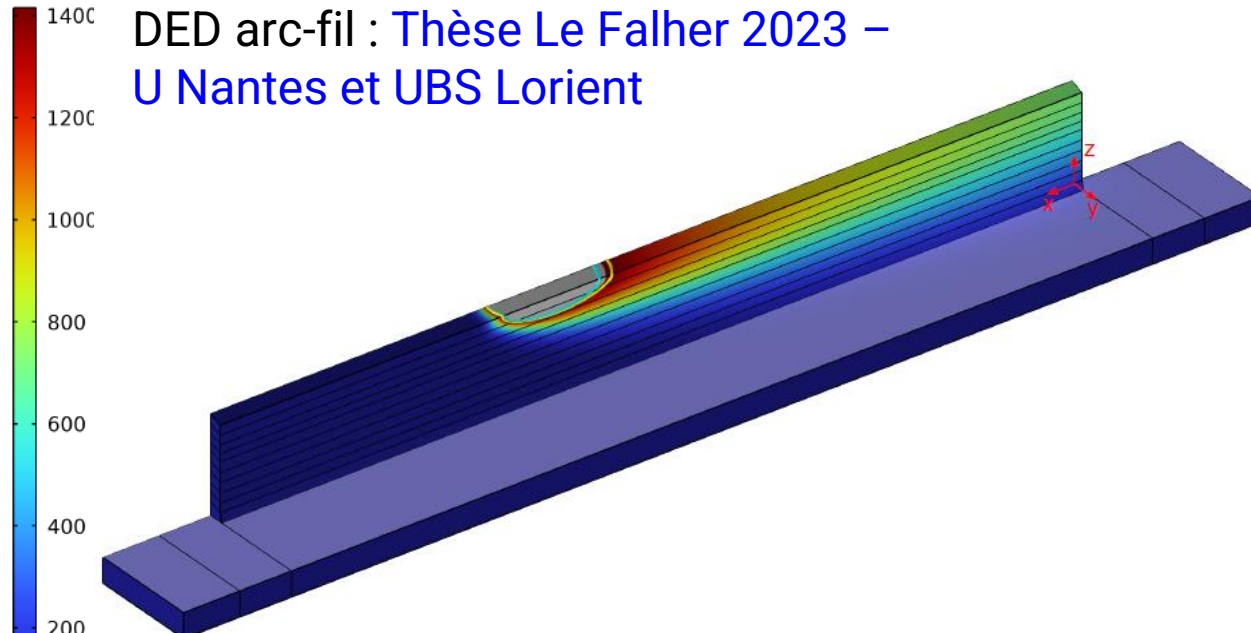


- La distribution d'énergie peut être encore plus "rustique" :

$$\dot{Q} = \frac{AP_L}{\sum V_{elt}^{act}}$$

Chiumenti *et al.*, *Additive Manufacturing* 2017 ; Thèse Lucas Ravix 2022

- $\sum V_{elt}^{act}$ varie en fonction de Δt
- Largeur ou hauteur de dépôt doivent être définies a priori, d'après l'expérience ou une simulation méso

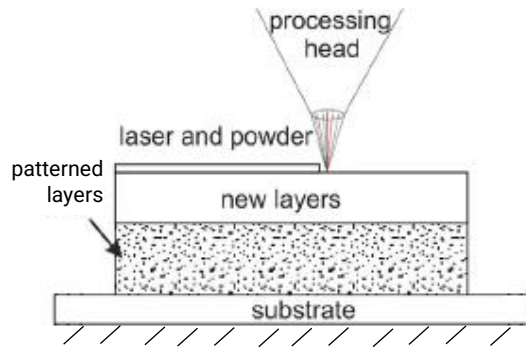


MESURE DES DISTORSIONS

Essai DED-poudre instrumenté : [Biegler et al., Additive Manufacturing 2018 \(Fraunhofer + BAM, Berlin\)](#)



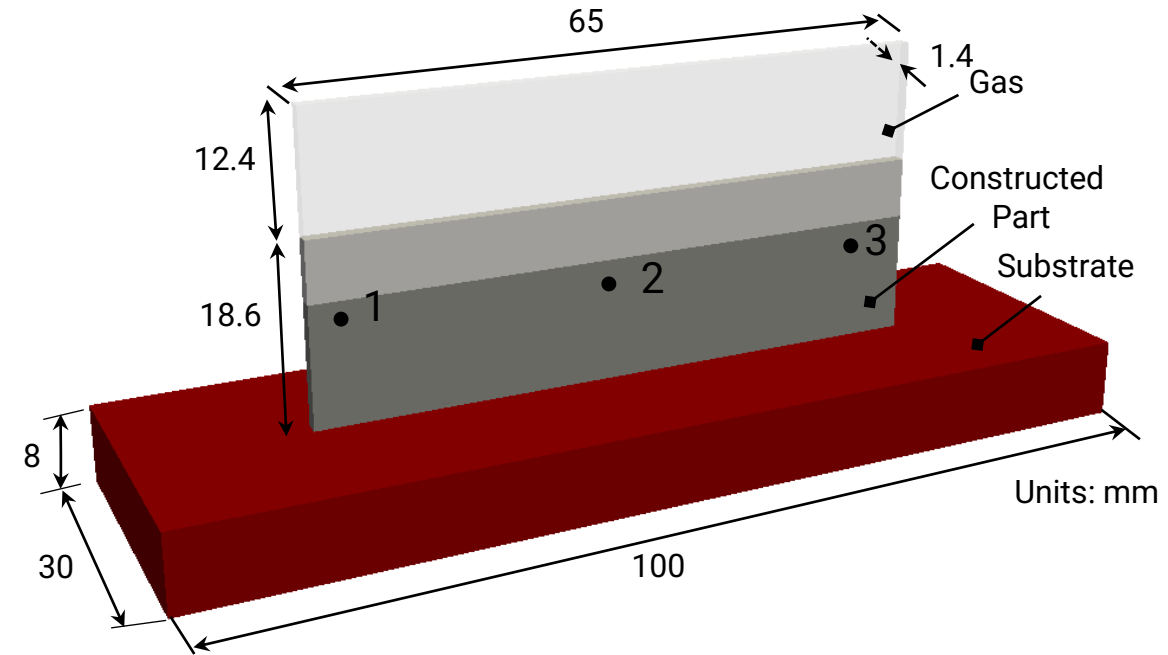
Mur en 316L, 30 couches



1. Dépôt de 20 couches
2. Retour à l'ambiante
3. Application d'un mouchetis
4. Dépôt des 10 couches finales, avec suivi DIC

Paramètres expérimentaux

Puissance laser	P_L	400 W
Vitesse laser	v_L	10 mm/s
Diamètre spot	$\varnothing_L$	0.6 mm
Épaisseur couche	Δz	0.62 mm
Temps interpasse	t_d	30 s



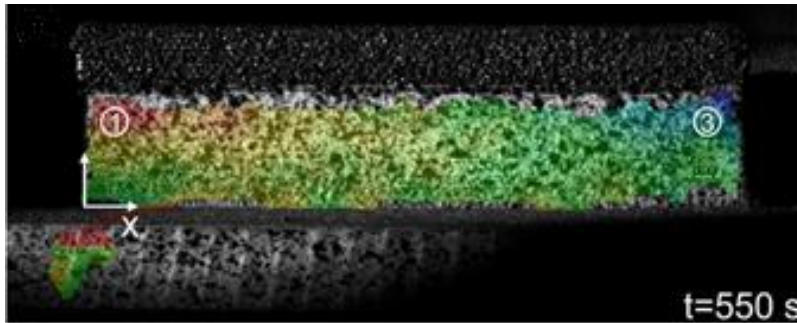
Simulation complète : Y. Zhang et al. (CEMEF)

Conditions limites

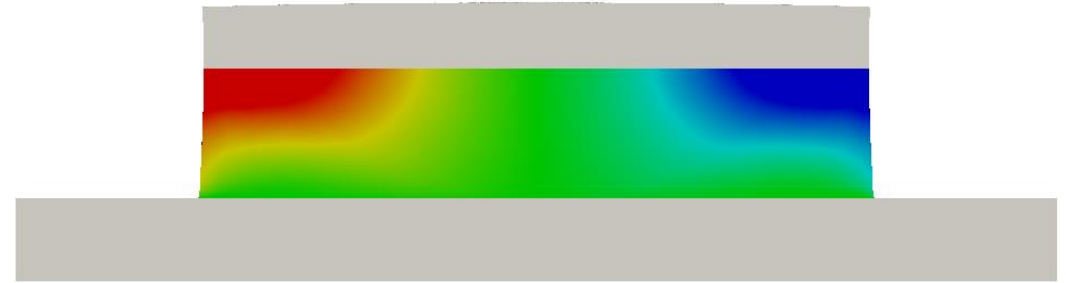
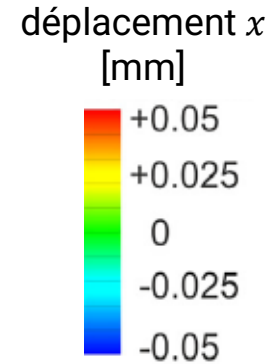
Thermique : convection-rayonnement sur toutes les surfaces

Mécanique : surface inférieure du substrat fixée

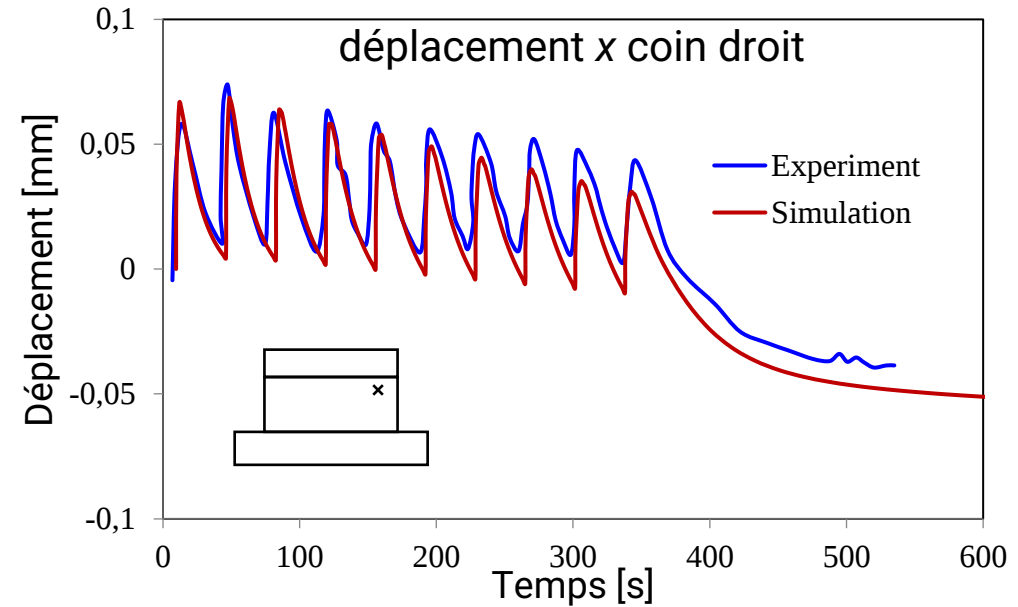
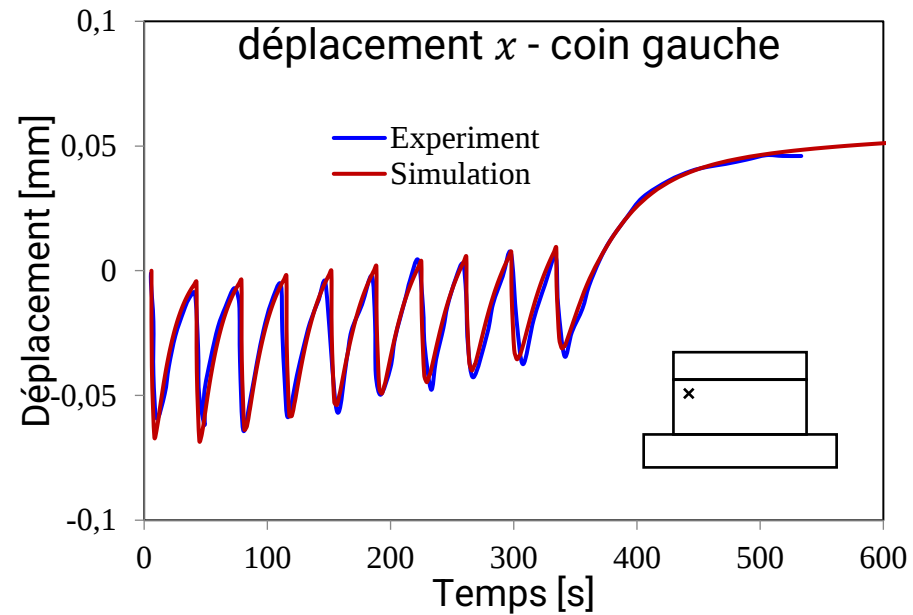
MESURE DES DISTORSIONS



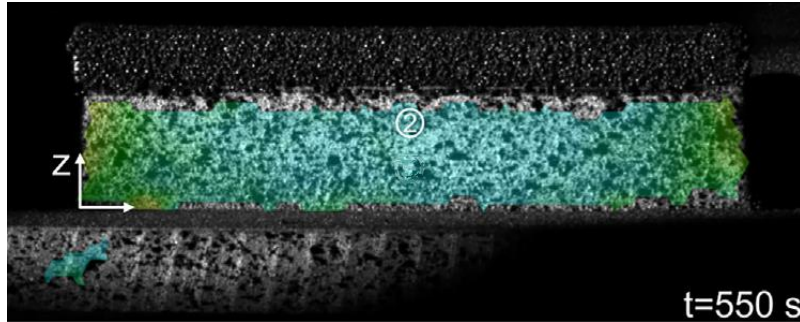
Couche #30 : Mesure DIC



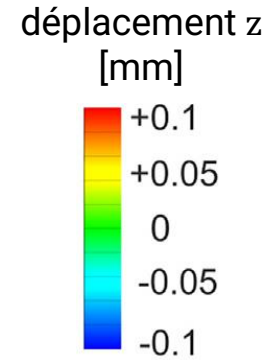
Simulation : Y. Zhang *et al.* (CEMEF)



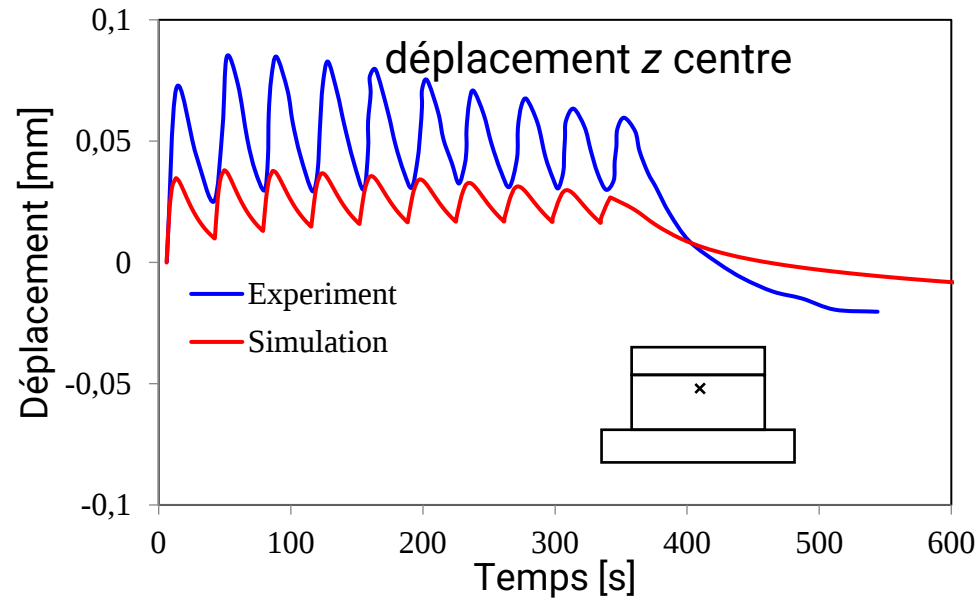
MESURE DES DISTORSIONS



Couche #30 : Mesure DIC



Simulation : Y. Zhang *et al.* (CEMEF)

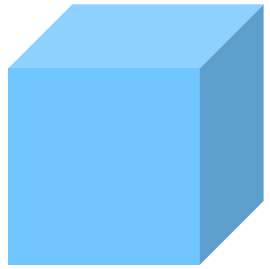


- Bon accord sur u_x ...
- ... mais pas sur u_z

Résultats similaires trouvés par Biegler *et al.*

→ **Comportement anisotrope !**

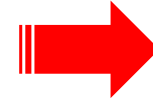
LE SUIVI DES TRAJECTOIRES A SES LIMITES...



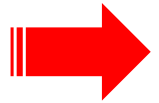
1 cm³

Procédé L-PBF

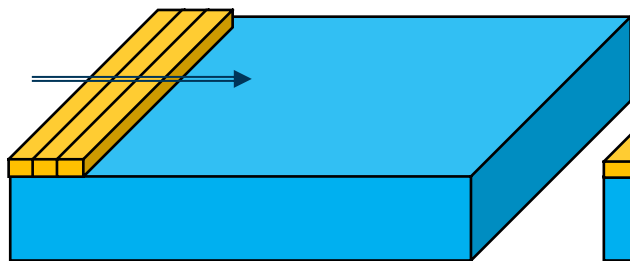
- Diamètre laser = 70 μm
 - $\Delta z = 40 \mu\text{m} \rightarrow 250$ couches
 - Inter-scan = 50 $\mu\text{m} \rightarrow 200$ scans/couche
- $\rightarrow$ Longueur lasée : 500 m !**



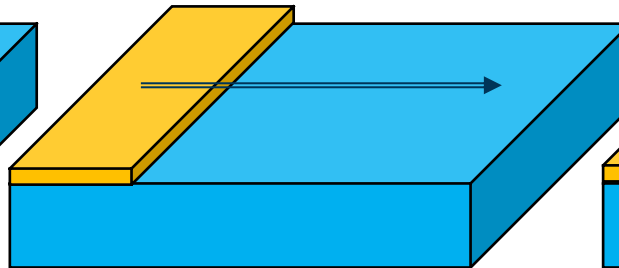
Le suivi de trajectoire est ok lorsque les tailles et temps caractéristiques de dépôt sont non négligeables devant ceux de la pièce
 $\rightarrow$ DED : WAAM, WLAM, Proj. poudre



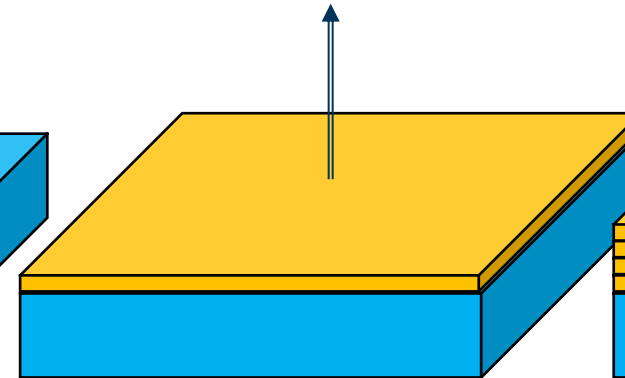
En L-PBF, approches par batch :



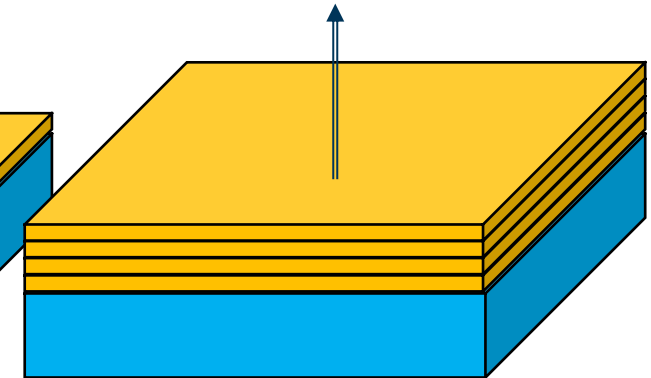
par ligne de scan



par fraction de couche

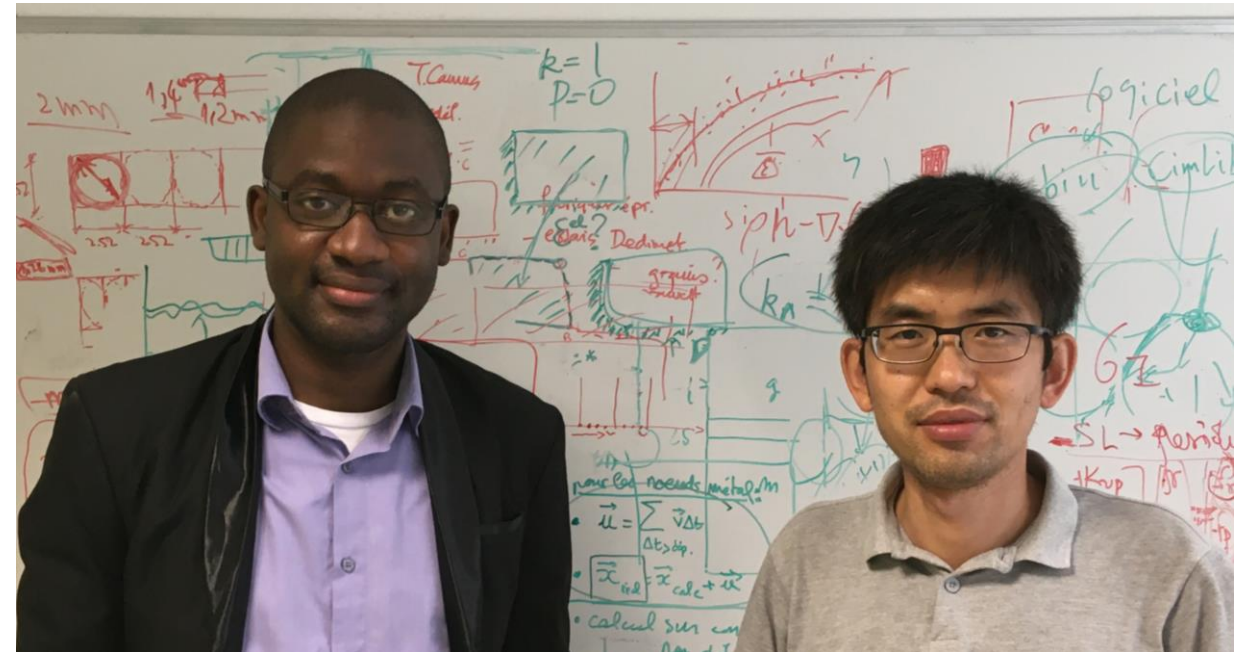


par couche



par groupes de couches

L'approche macro développée au CEMEF



THERMOMÉCANIQUE MACRO

Remailleur adaptatif

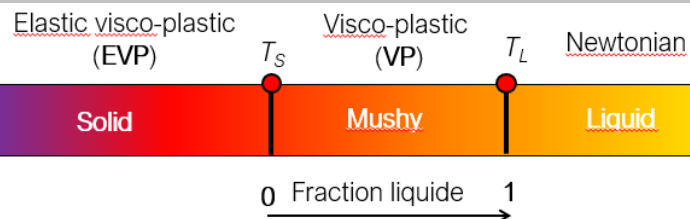
- basé sur estimateur d'erreur sur les champs calculés

Solveur thermique

- Activation des couches ou fractions
- Définition du chargement thermique dans chaque couche, ou fraction

Solveur mécanique

- Comportement élasto-viscoplastique

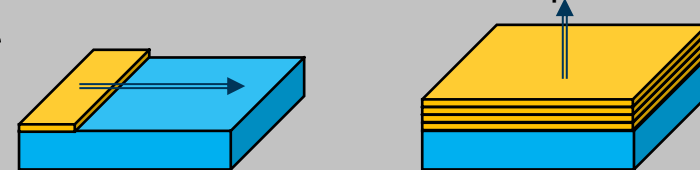


"Slicer" et descripteur de trajets laser

- G-code ou équivalent

Fractionneur ou groupeur de couche

- Sur critère distance ou surface parcourue



Level set 1
 $\psi = 0$

$\Omega_{méca}$

Pièce
partiel^{lmt}
construite

Substrat

Ω_{ther}

gaz

Level set 1
 $\psi = 0$

Level set 2
 $\varphi = 0$

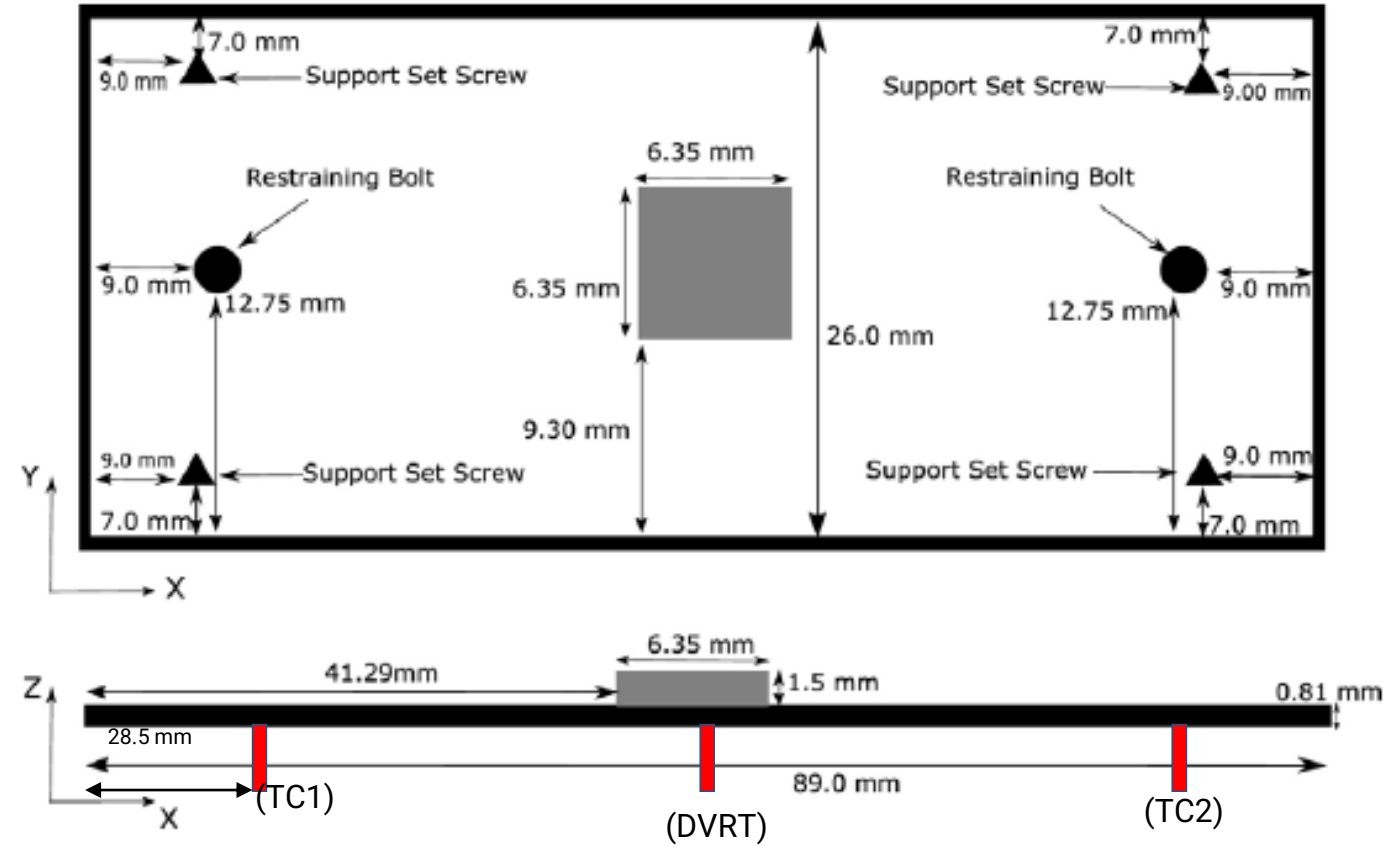
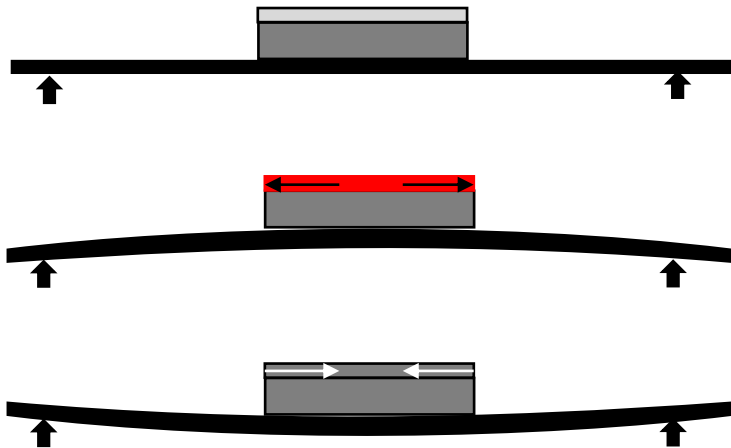
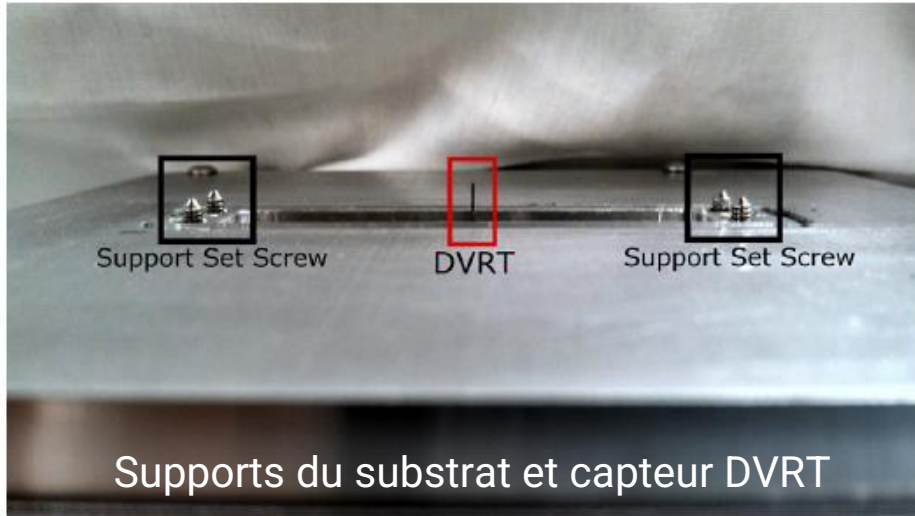
$\varphi > 0$

Pièce
partiel^{lmt}
construite

Substrat

THERMO-MECANIQUE

- Expérience instrumentée : Dunbar, Denlinger *et al.*, *Additive Manufacturing* 2016 (Penn State U)

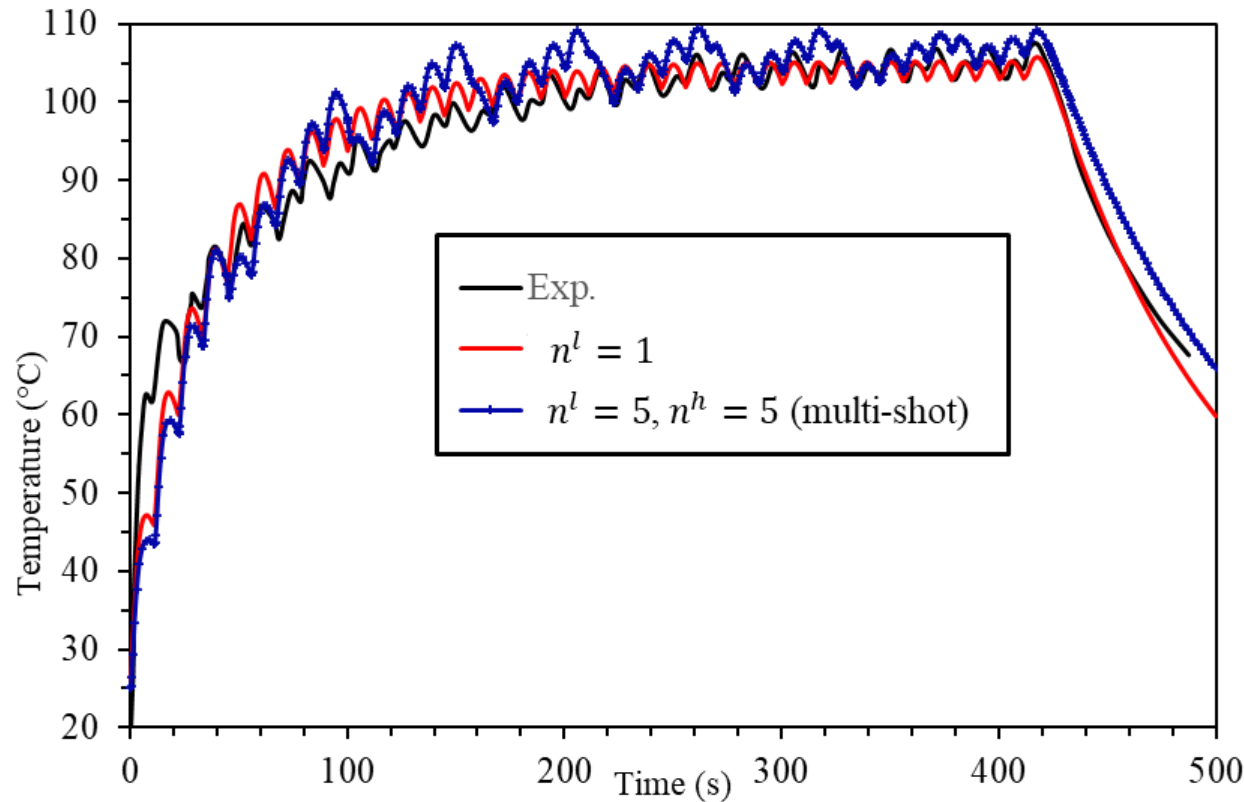


Dépôt In718, 38 couches de 40 μm (1,5 mm)

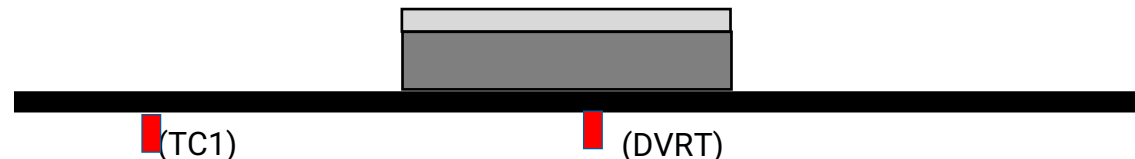
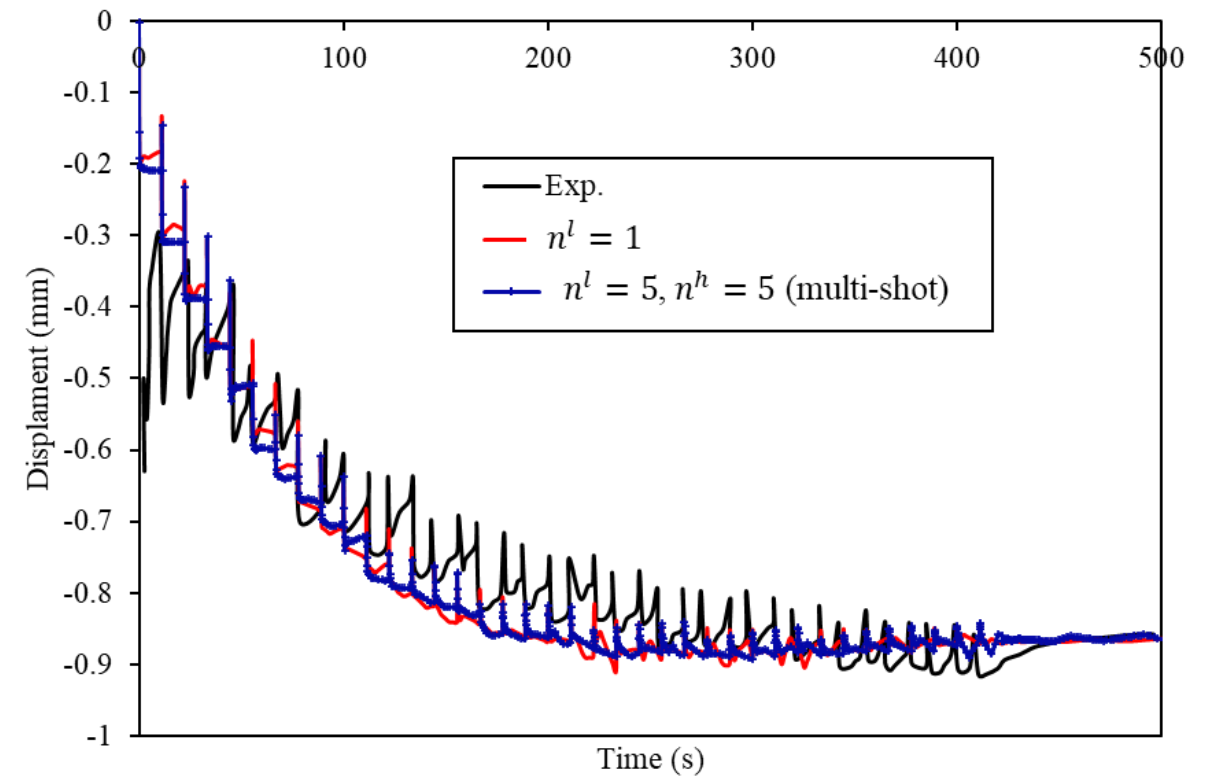
THERMO-MECANIQUE

- Expérience instrumentée : Dunbar, Denlinger *et al.*, *Additive Manufacturing* 2016
- Simulation : Y. Zhang (Cemef – Mines Paris - PSL)

Température TC1



Déplacement vertical



THERMO-MECANIQUE

Pièce en TA6V

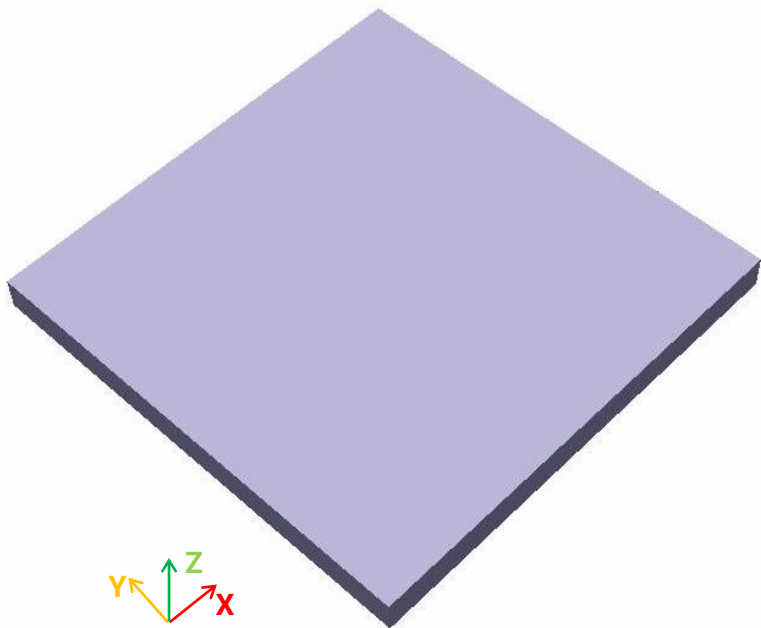
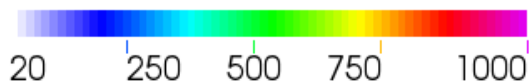
$\phi = 40 \text{ mm}$, $h = 24 \text{ mm}$

960 couches de $25 \mu\text{m}$

$P_L = 200 \text{ W}$, $\phi_L = 145 \mu\text{m}$

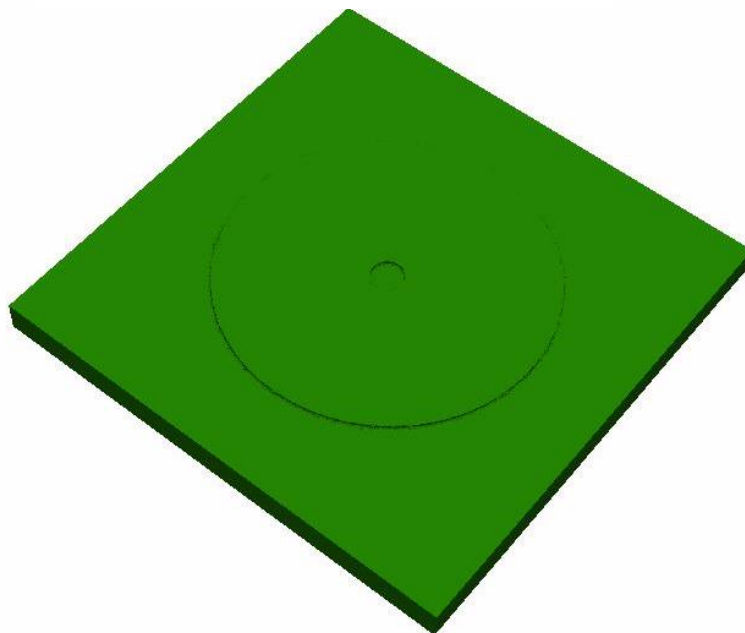
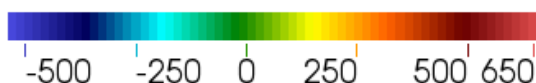
$H = 100 \mu\text{m}$, $v_L = 1.2 \text{ m/s}$

$T (^{\circ}\text{C})$



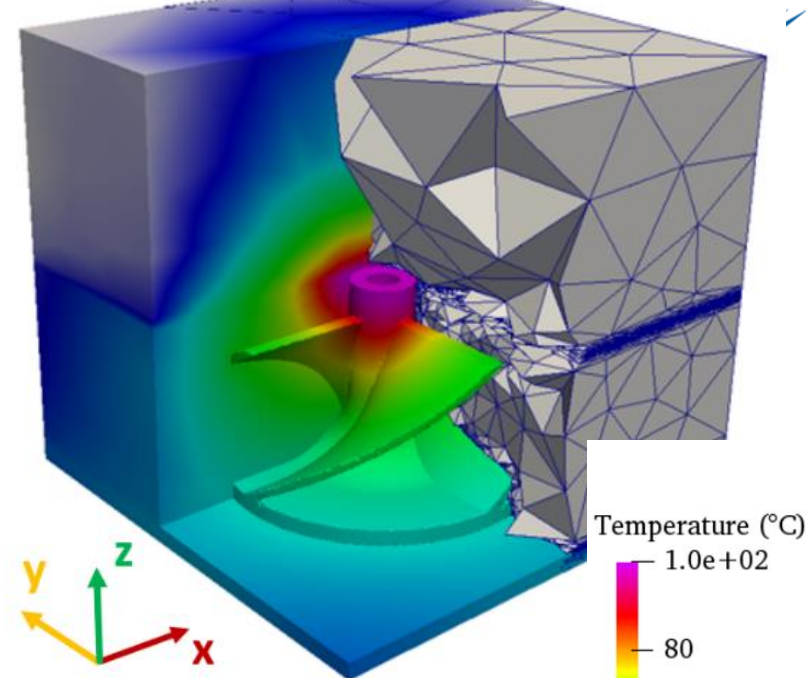
Température dans l'ensemble
pièce + poudre non lasée

$\sigma_{xx} (\text{MPa})$

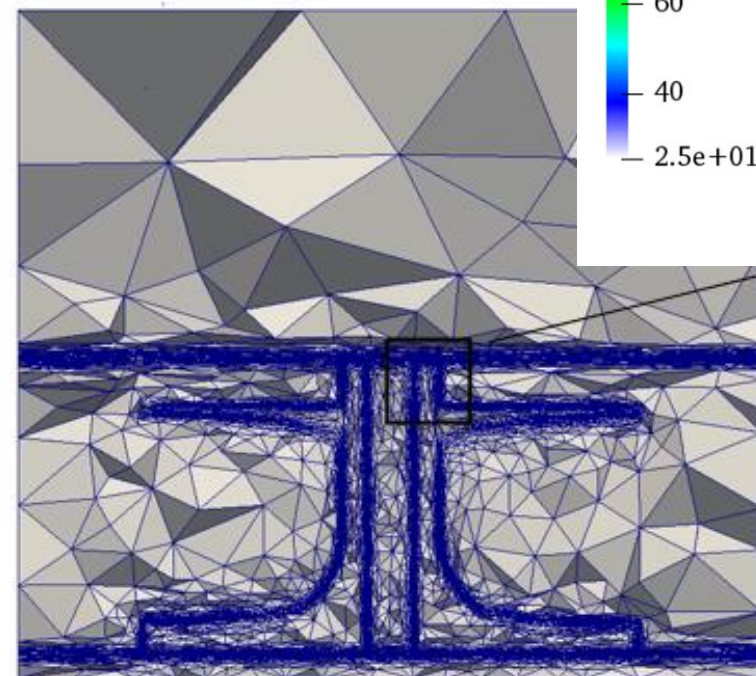


Contrainte σ_{xx}
dans la pièce seule

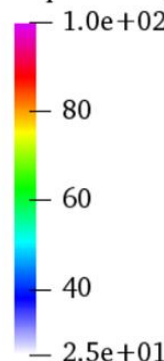
Temps calcul thermo-meca macro = qq 10^{aines} h. Coûteux !!



En fin de construction

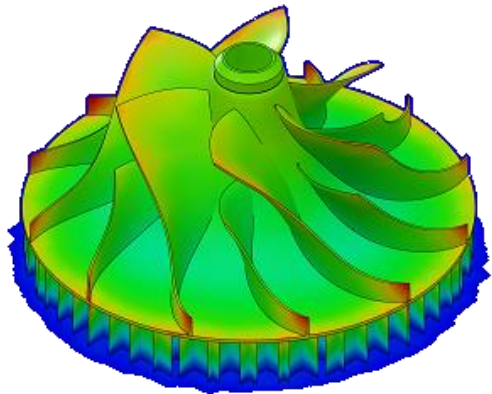


Temperature ($^{\circ}\text{C}$)



POUR CALCULER PLUS VITE...

■ La méthode "Inherent Strain"

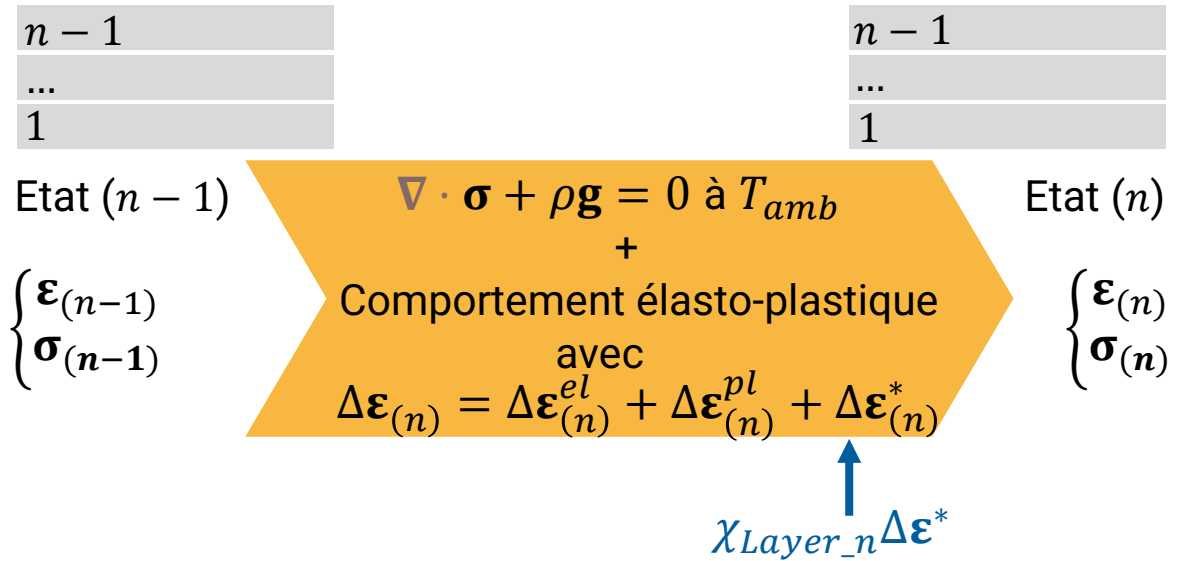


3DS Simulia

- 3D Sim – ANSYS®
- 3DS Simulia
- Netfabb Simulation – Autodesk
- Virfac® iAM - GEONX (GE™ Additive)
- Additive Manufacturing – ESI
- Simufact Additive – MSC Softwares

Cette méthode – totalement déconnectée de la physique du procédé – ne peut en aucun cas permettre d'obtenir des résultats satisfaisants en termes de distorsions et de contraintes résiduelles : [Bellet, Keumo Tematio, Zhang, Int. J. Num. Meth. Eng. 125 \(2024\)](#)

■ Une meilleure alternative : la méthode "Inherent Strain Rate"





LA METHODE "INHERENT STRAIN RATE", EN 3 POINTS

POINT 1 : Reconsidérer la **simulation thermomécanique instationnaire (TEVP)**, en la linéarisant

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{th} \quad \left\{ \begin{array}{l} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{el} = (\mathbf{D}^{el})^{-1} \dot{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{1+\nu}{E} \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \frac{\nu}{E} \text{tr}(\dot{\boldsymbol{\sigma}}) \mathbf{I} \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{th} = (\beta/3) \dot{T} \mathbf{I} \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \frac{3}{2\bar{\sigma}} \left[\frac{\bar{\sigma} - (\sigma_Y + R(\bar{\varepsilon}))}{k} \right]_+^{1/m} \mathbf{s} = \frac{3\dot{\bar{\varepsilon}}}{2\bar{\sigma}} \mathbf{s} \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0}$$



$$\bar{\sigma} = \sigma_Y + R(\bar{\varepsilon}) + k\dot{\bar{\varepsilon}}^m$$



Non-linéarité...

... qui disparaît si on remplace l'inconnue $\dot{\bar{\varepsilon}}$ par une estimation a priori : $\dot{\bar{\varepsilon}}^*$

L'inherent strain rate



$$\bar{\varepsilon}(t) = \bar{\varepsilon}(t - \Delta t) + \dot{\bar{\varepsilon}}^* \Delta t$$

$$\bar{\sigma}(t) = \sigma_Y + R(\bar{\varepsilon}(t)) + k\dot{\bar{\varepsilon}}^{*m}$$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{vp} = \frac{3\dot{\bar{\varepsilon}}^*}{2\bar{\sigma}(\dot{\bar{\varepsilon}}^*)} \mathbf{s}$$

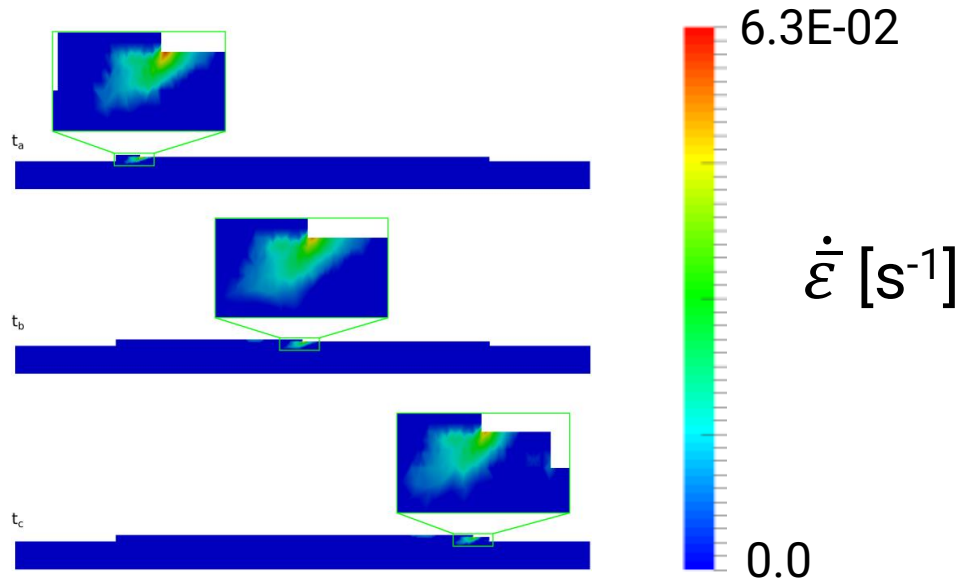
Comportement viscoplastique linéarisé!

LA METHODE ISR, EN 3 POINTS

POINT 2 : Procéder à l'estimation de l'inherent strain rate partout dans le domaine

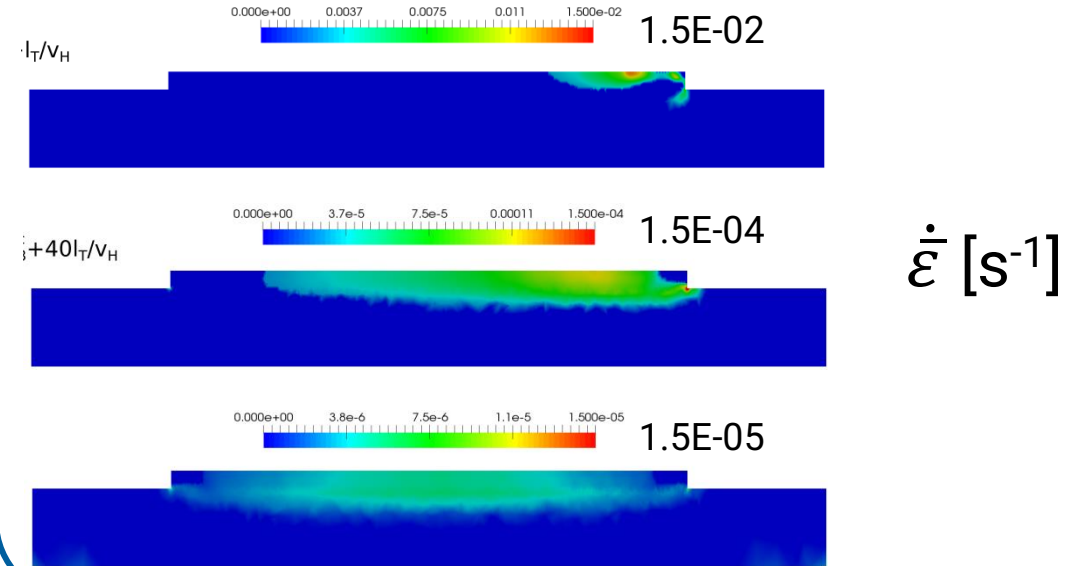
Ici en contexte DED (poudre, WAAM, WLAM)

Phase de dépôt en DED : la simulation TEVP montre un régime permanent de distribution concentrée de $\dot{\varepsilon}$:



- Un domaine de forme arbitraire simple
- dans lequel $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}_{moy}$
- et $\dot{\varepsilon}^* = 0$ ailleurs

En interpasse : la simulation TEVP montre un étalement de la distribution et une décroissance des valeurs de $\dot{\varepsilon}$:



- Une stratégie d'extrapolation temporelle
- et de filtrage : imposition à zéro des valeurs trop faibles



LA METHODE ISR, EN 3 POINTS

POINT 3 : Corriger les contraintes

Identifier $\dot{\varepsilon}^*$ et le domaine d'application

Résoudre le problème linéarisé

Etape de correction

Dans chaque élément fini,

- Réécrire les équations de comportement, **non linéaires**, à satisfaire...

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{el} + \dot{\varepsilon}^{vp} + \dot{\varepsilon}^{th}$$

$$\dot{\varepsilon}^{el} = (\mathbf{D}^{el})^{-1} \dot{\sigma}$$

$$\dot{\varepsilon}^{th} = (\beta/3) \dot{T} \mathbf{I}$$

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = (3\dot{\varepsilon}/2\bar{\sigma}) \mathbf{s}$$

- ... mais **en conservant le champ de vitesse obtenu lors de la résolution linéaire** !

Pour mieux estimer, localement, la vitesse de déformation généralisée et le tenseur des contraintes

NB : tout ceci est **effectué à coût calcul négligeable** (résolution locale dans chaque élément)

- → une équation scalaire, d'inconnue $\dot{\varepsilon}$...

$$F(\dot{\varepsilon}) = \sqrt{\frac{3}{2} (\mathbf{s}^{(t)} + 2\mu\Delta t\dot{\varepsilon}) : (\mathbf{s}^{(t)} + 2\mu\Delta t\dot{\varepsilon})} - (\sigma_Y + R(\bar{\varepsilon}^{(t)} + \Delta t\dot{\varepsilon}) + k\dot{\varepsilon}^m + 3\mu\Delta t\dot{\varepsilon}) = 0$$

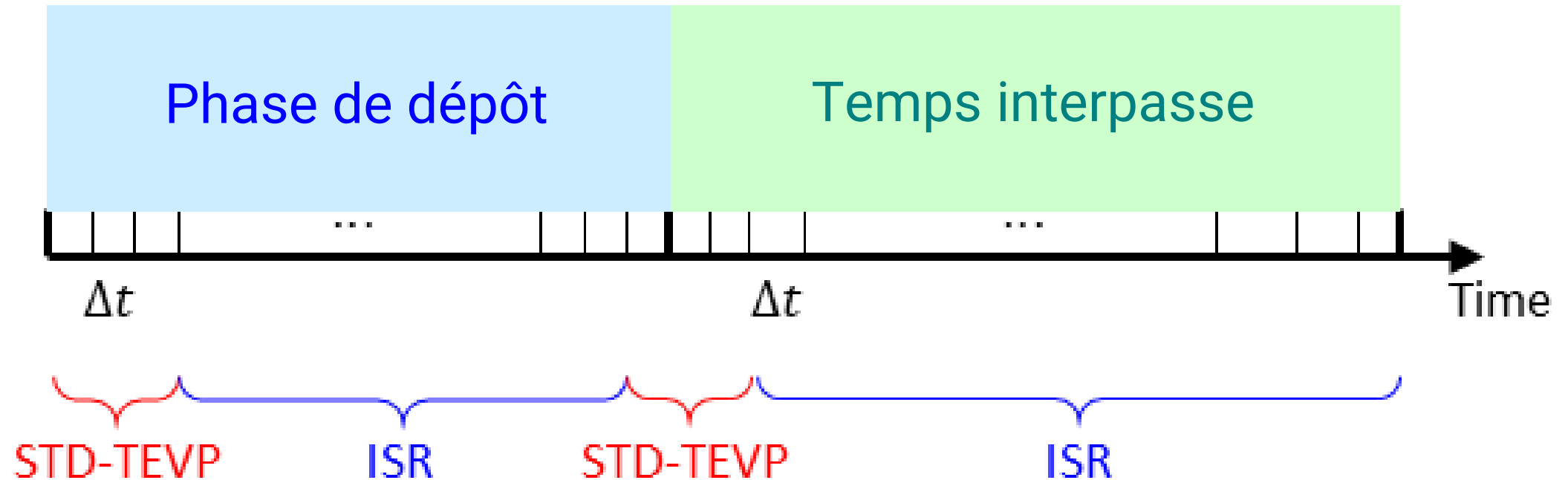
- ... qu'on résout par la méthode de Newton...

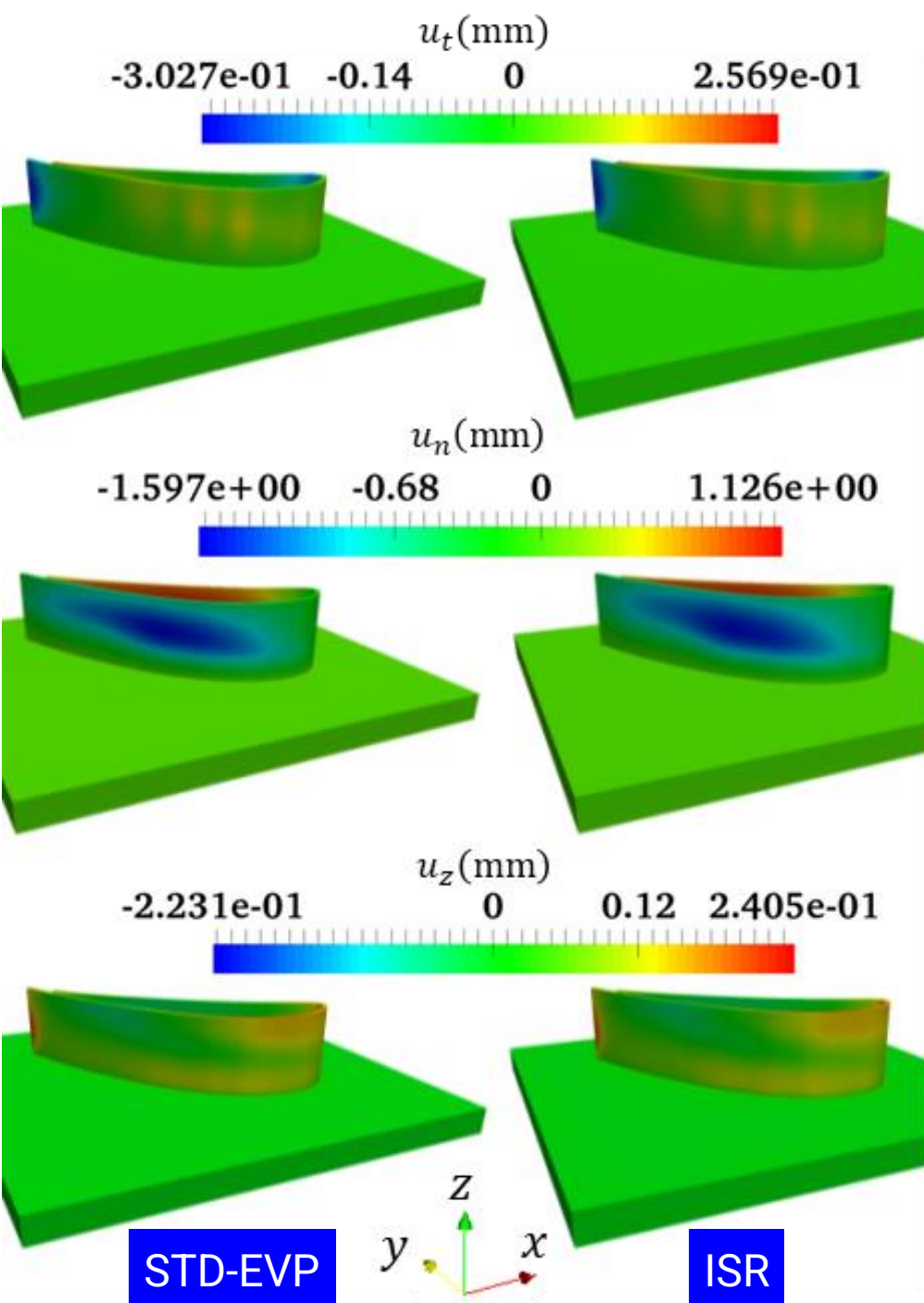
- ... pour reconstruire le déviateur des contraintes : $\mathbf{s}^{(t+\Delta t)} = \frac{1}{1 + \frac{3\mu\Delta t\dot{\varepsilon}}{\bar{\sigma}(t+\Delta t)}} (\mathbf{s}^{(t)} + 2\mu\Delta t\dot{\varepsilon})$



LA METHODE ISR : ORGANISATION GÉNÉRALE

Pour chacune des couches...



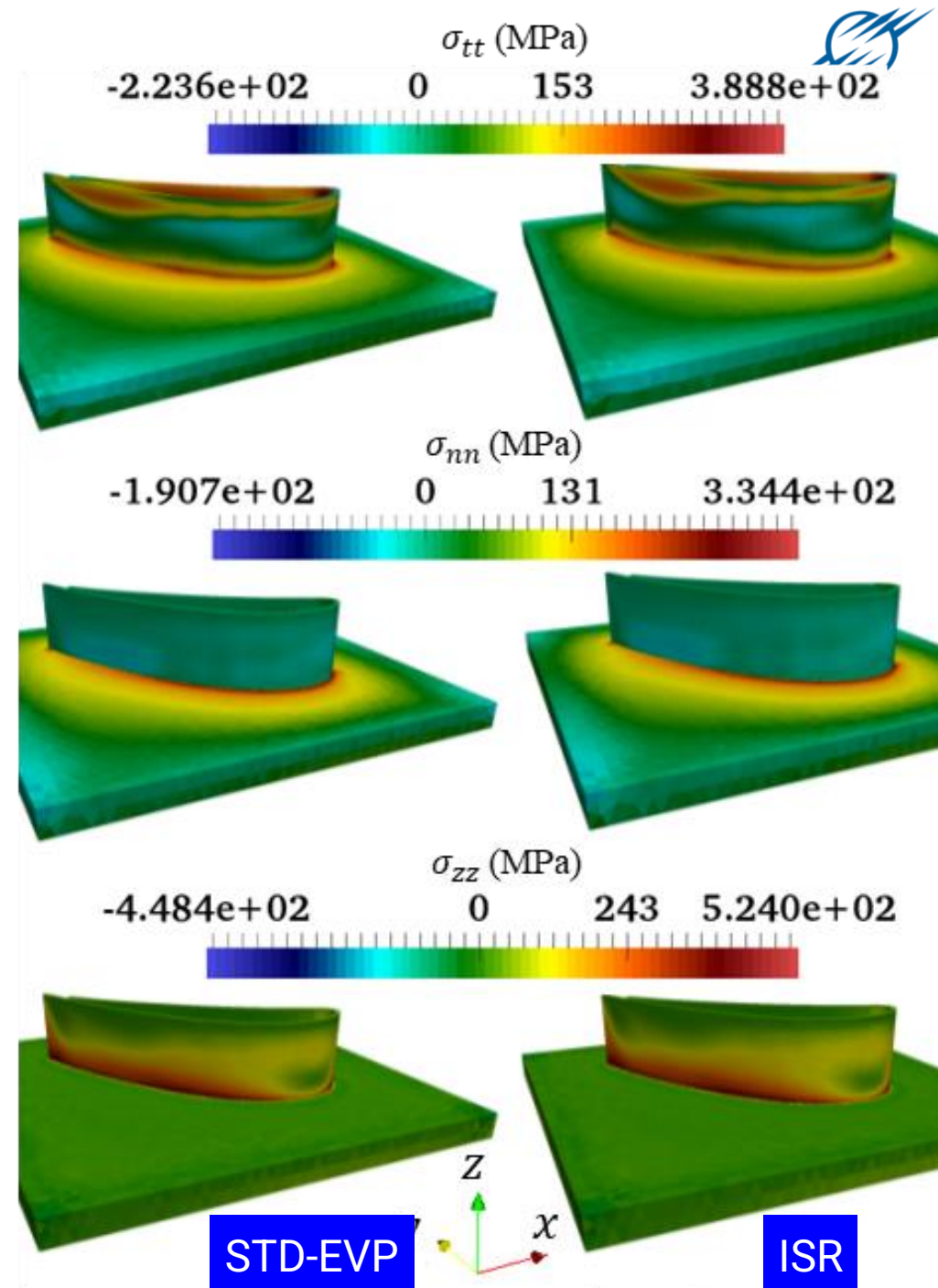


Pièce DED poudre 30 couches en fin de construction

Biegler et al., *Additive
Manufacturing* 2018

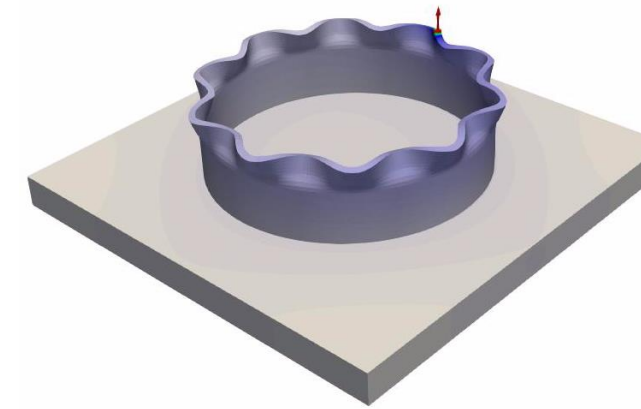
Résultats quasi
identiques

Gain de temps
= 5.4

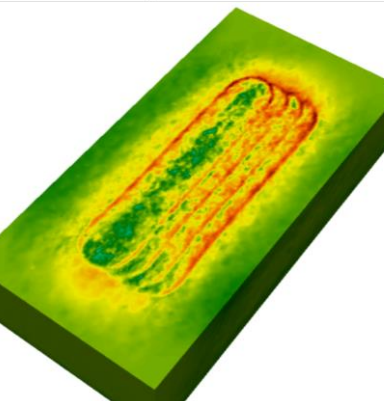
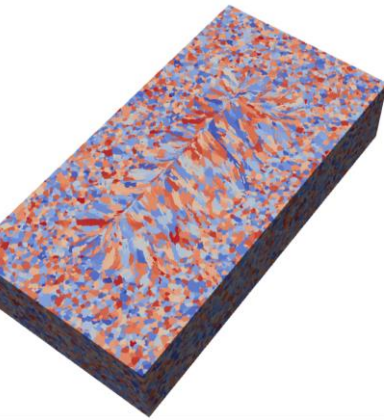


CONCLUSIONS

- Les simulations méso et macro font l'objet d'efforts de recherche intenses dans la communauté
- Elles sont déjà utiles pour sélectionner des paramètres, des stratégies opératoires
- L'aspect multi-échelle (macro → méso et méso → macro) est pour l'instant trop peu investigué



Quelques études en cours au CEMEF



- Prédiction de la structure de grains par CA-FE
- Elasto-viscoplasticité cristalline,
 - Echelle méso : [thèse Zixuan Li](#)
 - Echelle macro : [thèse Trung-Chien Vo](#)
- Modèles de microségrégation multicomposés en solidification rapide, à implémenter dans les simulations méso : [thèse Paul Martin](#)
- Modélisation de la précipitation à l'état solide : [thèse Sylvain Ducottet](#)
- Simulation WLAM : [thèse Zichen Kong](#)
- Réduction de modèle : ISR + ROM (POD) : [post-doc Joël Keumo-Tematio](#). Tps calcul / 100 !

