





La simulation numérique des procédés de fabrication additive par fusion de lit de poudre

Michel BELLET

Qiang CHEN, Charles-André GANDIN, Gildas GUILLEMOT, Yancheng ZHANG

Mastère spécialisé DMS Evry, 28 février 2018

Plan de la présentation

Le contexte

- Simulation numérique des procédés par fusion de lit de poudre
- Modélisation numérique des différents phénomènes physiques
 - Interaction laser-matière
 - Transfert thermique
 - Mécanique des fluides
 - Mécanique du solide
- Simulation numérique du procédé
 - Approche selon deux échelles
 - Échelle du bain fondu et du cordon
 - Echelle de la pièce à construire

Caractérisation du comportement en cours de fabrication (pour alimenter les simulations)

Simulation numérique SLM. A quelle échelle?

Echelle des particules de poudre « microscopique »



- Interaction laser particules de poudre
- Phénomène de dénudation
- Forme de la zone fondue
- Temps de calcul très élevé

Approche lit de poudre continu « mesoscopique »



- Interaction laser lit de poudre
- Forme des dépôts élémentaires (cordons)
- Formation de la microstructure (phases, microségrégation en solidification rapide)
- Génération des contraintes en arrière de la zone fondue
- Apparition de défauts : irrégularités du dépôt, fissuration à chaud

Echelle de la pièce « macroscopique »



- Apport d'énergie et de matière simplifié
- Distribution de température
- Distributions des distorsions et contraintes, pendant le procédé, et résiduelles
- Rôle thermique et mécanique des supports
- Evolution de la microstructure
- Apparition de défauts : fissuration à l'état solide

Khairallah, Anderson, Rubenchik, King, Laser powderbed fusion additive manufacturing: physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones, Acta Materialia (2016) **Chen, Guillemot, Gandin, Bellet**, Three-dimensional finite element thermomechanical modeling of additive manufacturing by selective laser melting for ceramic materials, Additive Manufacturing (2017) Zhang, Guillemot, Bernacki, Bellet, Macroscopic thermal finite element modeling of additive metal manufacturing by selective laser melting process, Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 331 (2018)

Modélisation de l'interaction laser-matière

Densité de flux dans le faisceau laser

- Variable selon machines...
- Approche fréquente : distribution gaussienne

Interaction avec le matériau à l'état granulaire : problème complexe

- Réflexion du rayonnement en surface des particules, fonction de l'incidence
- Réflexions multiples entre les particules
 - Simulations de type lancer de rayon → peu d'énergie transmise dans l'épaisseur du lit de poudre, au-delà de deux fois la taille des particules (?)
 - Effet de dispersion latérale : rayon d'interaction effectif

$$R_{int} > R_L$$

- Opacité ou transparence éventuelle du matériau par rapport au rayonnement
 - Céramiques transparentes au Nd:YAG

Interaction avec le matériau à l'état liquide

Situation a priori plus simple (pas de réflexions multiples)... sauf si « keyhole » prononcé

Boley et al., Appl. Opt. 2015 (Lawrence Livermore, code FRED)





Modélisation de l'interaction laser-matière

En approche « milieu continu », modèles utilisés :

- Modèle de flux surfacique
 - *R* coefficient de réflexion en surface

Modèle de source volumique

- α coefficient d'absorption dans l'épaisseur [m⁻¹]
- Loi de Beer-Lambert

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

$$\phi(r,z) = \phi(r,z=0)\exp(-\alpha z)$$

Terme de source volumique

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

 $\phi(r) = (1 - R) \frac{2P_L}{\pi R_{int}^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{R_{int}^2}\right)$

$$\frac{2P_L}{\pi R_{int}^2} \exp\left(\frac{-2r^2}{R_{int}^2}\right)$$

$$\frac{\int_0^{\frac{3}{2}R_{int}} \phi(r) 2\pi r dr}{P_L(1-R)} = 0.99$$

$$\dot{\varphi}(r)$$

$$\frac{q(r)}{\frac{3}{2}R_{int}} z = 0$$

$$\dot{\varphi}(r, z)$$



Modélisation des transferts thermiques

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
- v champ de vitesse
- *k* conductivité thermique
- T température
- \dot{Q} terme de source (puissance de déformation plastique, effet Joule...
 - ... et source laser précédemment calculée)



Modélisation des transferts thermiques

Propriétés thermiques des lits de poudre

Conductivité : différents modèles

• Loh et al.
$$k_{poudre} = k_m \left(1 - \phi_p\right)^4$$



Loh, Chua, Yeong, Song, Mapar, Sing, Liu, Zhang, Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061, Int J Heat Mass Transfer (2015) Zehner, Schlünder, Thermal conductivity of packings at moderate temperatures, Chemie Ing Tech (1970)



Mécanique des fluides

Equation de conservation de la quantité de mouvement

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

Comportement visqueux, compressible

$$\mathbf{s} = 2\mu \left(\dot{\mathbf{\epsilon}} - \frac{1}{3} \operatorname{tr}(\dot{\mathbf{\epsilon}}) \mathbf{I} \right) \qquad \dot{\mathbf{\epsilon}} = \frac{1}{2} \left(\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^{\mathrm{T}} \right) \qquad \operatorname{tr}(\dot{\mathbf{\epsilon}}) = \nabla \cdot \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}$$

Traitement de la perte de volume de la poudre lors de la fusion





Mécanique des fluides

Tension de surface

Densité de force surfacique, normale à l'interface liquide/gaz

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

Marangoni

Densité de force surfacique, tangentielle à l'interface liquide/gaz

$$\mathbf{T} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \nabla_{S} T \qquad \nabla_{S} T = \nabla T - (\nabla T \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}$$
$$\gamma(T) = \gamma_{ref} + \frac{\partial \gamma}{\partial T} (T - T_{ref})$$

Flottabilité (négligeable)

$$\mathbf{f}_{v} = \rho_{ref} \left[1 - \beta_{v} \left(T - T_{ref} \right) \right] \mathbf{g}$$





Mise en œuvre numérique



Chen, Guillemot, Gandin, Bellet, Three-dimensional finite element thermomechanical modeling of additive manufacturing by selective laser melting for ceramic materials, Additive Manufacturing 16 (2017) 124-137

Simulation numérique « meso » : approche continue, formulation level-set

- Formulation level-set
- Système multidomaine : D_i , $i = \{1, 2\}$
 - $\blacktriangleright Domaine D_2 : le gaz$
 - Domaine D₁: 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 $\psi = 0$





Simulation numérique « meso » : approche continue, formulation level-set

0.8

0.6

0.4

0.2

-1

12

Formulation level-set

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

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

- Autour de l'interface : $\{\chi\} = \sum_i \mathcal{H}^{D_i} \chi^{D_i}$
- Dans le domaine 1 : $\chi^{D_1} = \langle \chi \rangle = \sum_j g_j \chi^{\alpha_j}$
- ► Fonction Dirac lissée :

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



Simulation numérique « meso » : approche continue, formulation level-set

- 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

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

$$\{\rho\}\left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\nabla \mathbf{v})\mathbf{v}\right] = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \mathbf{s}\right] + \{\rho\}\mathbf{g} + \mathbf{f}_{\nu} \qquad \mathbf{s} = 2\{\mu\}\left(\dot{\mathbf{\epsilon}} - \frac{1}{3}\mathrm{tr}(\dot{\mathbf{\epsilon}})\mathbf{I}\right)$$

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



Simulation numérique « meso » : approche continue, formulation level-set

- 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)



14

Simulation numérique « meso » : éléments finis, maillage

Discrétisation par éléments finis

- Formes faibles exprimées en formulation mixte (vitesse, pression)
- Discrétisation spatiale : éléments tétraèdres linéaires
 - Stabilisation par formulation VMS en mécanique des fluides
 - Hachem, Rivaux, Kloczko, Digonnet, Coupez, Stabilized finite element method for incompressible flows with high Reynolds number, J. Comp. Phys. 229 (2010) 8643-8665
 - Chen, Guillemot, Gandin, Bellet, Three-dimensional finite element thermomechanical modeling of additive manufacturing by selective laser melting for ceramic materials, Additive Manufacturing 16 (2017) 124-137
 - Stabilisation par ajout de degrés de liberté « bulle » en vitesse en mécanique du solide
 - Bellet, Fachinotti, ALE method for solidification modelling, Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. 193 (2004) 4355-4381
 - Bellet, Jaouen, Poitrault, An ALE-FEM approach to the thermomechanics of solidification processes with application to the prediction of pipe shrinkage, Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow 15 (2005) 120-142

Contrôle du maillage

- Estimation d'erreur a posteriori sur les champs calculés par les solveurs éléments finis
 - Coupez, Metric construction by length distribution tensor and edge based error for anisotropic adaptive meshing, J. Comp. Phys. 230 (2011) 2391-2405
- Définition de métriques de maillage en fonction de ces estimateurs
 - Chen, Guillemot, Gandin, Bellet, Three-dimensional finite element thermomechanical modeling of additive manufacturing by selective laser melting for ceramic materials, Additive Manufacturing 16 (2017) 124-137



Simulation thermo-hydraulique du procédé LBM



Simulation des additions élémentaires



- Lit de poudre d'épaisseur 50 μm, porosité : 50%
- $v_L = 200 \text{ mm s}^{-1}$, $P_L = 84 \text{ W}$, $R_{int} = 37.5 \text{ }\mu\text{m}$
- 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 $T_0 = 20^{\circ}$ C
- Viscosité de l'alumine liquide

$$\mu_l(T) = 2.15 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{57685}{R_g T}\right)$$
 [Pa s]
 $\mu_l(T_m = 2054 \text{ °C}) = 0.042 \text{ Pa s}$

- Function 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 $\Delta t = 2 \ \mu s$
- Conditions aux frontières du domaine :

Solidified track	Laser	Gas	
S	Scan	ning direction	
	1	Powder / 30 J	
Substrate	ului I	ł	
Y Z V V V	3 mm		

	Thermique	Fluide	Solide	
Face inférieure	1 - 10 M = 2 V = 1	$\mathbf{v}=0$	$\mathbf{v} = 0$	
4 faces latérales	$n_T = 40$ W m $-$ K $-$	$\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0$	libro	
Face supérieure	adiabatique	libre		





 $T(^{\circ}C)$

20

Adaptation de maillage pilotée par :

02

- La masse volumique (\rightarrow régions A)
- La fraction de liquide (\rightarrow régions B)
- La source de chaleur (\rightarrow région C)
- Taille de maille de fond : 50 μ m

Thermique et maillage



 $T_l = 2104 \,^{\circ}{\rm C}$

Thermo-hydraulique







Thermo-hydraulique – analyse de sensibilité



Thermo-hydraulique – mise en évidence du « balling »





Balling effect (316L stainless steel)

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



Validation : simulation vs expérimental

Thèse de Liliana Moniz au Centre des Matériaux (début oct. 2015) Projet CARNOT « CEFALE »

- Poudre alumine $D_V(50) = 14.9 \,\mu\text{m}$ dopée carbone (60 % porosité)
- Substrat alumine quasi dense non dopée
- **E**paisseur de couche 50 μm
- Laser Yb:YAG, $\lambda_L = 1070 \text{ nm}$, $P_L = 168 \text{ W max}$



Validation - forme de zone fondue : simulation vs expérimental



- Calage de 3 paramètres : R_{int} , α_s et α_l
 - Première identification en utilisant un modèle analytique "simple" : $R_{int} = 73.1 \,\mu\text{m}$; $\alpha_s = 8.13 \,\text{mm}^{-1}$; $\alpha_l = 6.1 \,\text{mm}^{-1}$
 - Utilisation de ces paramètres dans la simulation FEM → Observation de différences entre modèle simple et simulation FEM
 - Seconde identification en utilisant un modèle analytique "simple" et en tenant compte de ces différences
 - \rightarrow obtention d'un "best set" : $R_{int} = 64.6 \,\mu\text{m}$; $\alpha_s = 8.98 \,\text{mm}^{-1}$; $\alpha_l = 3.88 \,\text{mm}^{-1}$. Valeurs utilisées ci-dessus

Validation - forme des cordons : simulation vs expérimental







Simulation de la thermomécanique du solide en procédé LBM – Approche meso



Mécanique du solide

Equation de conservation de la quantité de mouvement, équation d'équilibre

- **Loi de comportement de l'alumine**
 - Loi élasto-plastique modifiée



Sanchez-Gonzalez, Melendez-Martinez, Pajares, Miranda, Guiberteau, Lawn, Application of Hertzian tests to measure stress-strain characteristics of ceramics at elevated températures, J Amer Ceram Soc 90 (2007) 149-153

CINIS

ParisTech

Résultats : thermomécanique du solide + écoulements en zone fondue

- **Double résolution mécanique, à chaque incrément de temps, sur tout le domaine de calcul**
 - ▶ Résolution I, orientée liquide (\rightarrow **v**_l)
 - ▶ Résolution II, orientée solide (\rightarrow v_s, σ)



Contraintes autour du dépôt élémentaire







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



Effet d'un chauffage additionnel

Deux lasers

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





Extension de la simulation meso au drapage

3 cordons juxtaposés Cas #1 – unidirectionnel :



Cas #2 – en aller-retour Cas #3 – unidirectionnel, « hatch » réduit



40

 $(m\pi)^{30}_{20}$ $(m\pi)^{ddv}_{10}$

10

Ž00

powder

220

contact with powder

240

260

gully

280

300

 $Y(\mu m)$

(a) #1

340

360

320



31

 $-N^{\circ}1$

 $-N^{\circ}1$

 $-N^{\circ}2$

380

 $N^{\circ}2$ $-N^{\circ}3$

400

Extension de la simulation meso au drapage





32



Mise en œuvre numérique Deuxième approche : macro, échelle pièce



Simulation numérique « macro », à l'échelle de la pièce

Travaux de Yancheng Zhang, Tenure Track

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 \u03c6 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
 - dans la pièce en cours de construction...
 - ... mais aussi dans la poudre non lasée





Approche « macro » - dépôt d'une couche, ou d'une fraction de couche

Identification de la surface exposée au laser

Base de départ : fichier G-code ou équivalent, issu du traitement de la CAO par un « slicer » (fichier de trajectoire du laser sur toute la construction)

G92 E0

G1 Z0.150 F4800.000 G1 X3.380 Y3.624 F4800.000 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

 \rightarrow Z: one layer F4800. : fast feed speed (fraction)

Temps de lasage de chaque fraction de couche

$$t_{scan_lf} = \frac{l_{scan_lf}}{v_L}$$

Estimation de la surface de chaque fraction de couche

$$S_{lf} = l_{scan_lf} \phi_L (1 - \tau)$$

 τ : taux de recouvrement

des scans





Approche « macro » - dépôt d'une couche, ou d'une fraction de couche

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 ?

$$P_L t_{scan_lf} = S_{lf} \dot{q}_L t_{heat_lf} \qquad \qquad \dot{q}_L = \frac{P_L}{\phi_L^2 (1-\tau)}$$

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





Approche « macro » - exemple d'application



Approche « macro » - exemple d'application





Approche « macro » - exemple d'application

Fin de construction : température







Simulation numérique « macro » - Valorisation : Transvalor

- Transvalor : spin-off de MINES ParisTech, leader sur logiciels de simulation des procédés de transformation (FORGE[®], THERCAST[®] ...)
 - Développement du logiciel ADDITIVE3D initié début 2017, sur base THERCAST[®]
 - Objectif : simulation macro des procédés DMD et SLM













Caractérisation du comportement mécanique en condition de FA

- THESE SAFRAN (Feng Gao, débutée en octobre 2017)
- Déterminer le comportement à très haute température (proche fusion)
- Machine « Dedimet » développée au CEMEF
 - Essais de traction / relaxation avec chauffage résistif (effet Joule), sous vide ou atmosphère contrôlée
 - Champ de déplacement par corrélation d'images (interférométrie de speckles laser)
 - Champ de température par imagerie infra-rouge (+ thermocouples, + pyromètres)
 - Tractions/relaxations successives
 - Modélisation électrique / thermique / mécanique couplée, implémentée dans FORGE[®]
 - Identification par analyse inverse
 - Caractérisation de l'élastoviscoplasticité anisotrope
 - Alliages TA6V et In718





43

Conclusions et perspectives

- A partir d'un formalisme commun, deux approches différentes on été développées
 - « meso » : à l'échelle de l'addition élémentaire
 - « macro » : à l'échelle de la pièce
- Des analyses de sensibilité et des validations ont été montrées
- Les validations quantitatives sont encore à consolider
- L'extension de l'approche « meso » aux métaux est en cours :
 - Travaux de thèse d'Alexis Queva avec Safran
- L'extension à d'autres procédés est engagée :

Procédé additif arc-métal

Projet ANR « MACCADAM » (Coord. LMGC Montpellier, Frédéric Deschaux-Baume) Thèse à démarrer cette année 2018 au Cemef



Procédé DMD laser





Perspectives : structure de solidification et fissuration à chaud

Problématique industrielle : prédiction de la structure de solidification, contrôle de la fissuration à chaud



- Bases de départ
 - Simulation « meso » du procédé SLM (Thèse Qiang Chen)
 - Simulation de la structure de grains par approche CAFE en soudage
 - Shijia CHEN, thèse MINES ParisTech 2014
 - Application au soudage multipasse avec ajout matière
 - Développement de critères de fissuration à chaud (Thèse Koshikawa, Mines ParisTech 2016)



Chen, Guillemot, Gandin, Three-dimensional cellular automatonfinite element modeling of solidification grain structures for arcwelding processes, **Acta Materialia 115 (2016) 448-467** Koshikawa, Bellet, Gandin, Yamamura, Bobadilla, Study of hot tearing during steel solidification through ingot punching test and its numerical simulation, Metall. Mater. Trans. A 47 (2016) 4053-4067



45

Perspectives : thermomécanique pour la prédiction des ruptures de support

- Problématique industrielle : prédiction de la rupture à l'état solide pendant la construction, en particulier rupture des structures de supportage
- **Base de départ.** Simulation SLM macro
 - Travaux de Yancheng ZHANG, CEMEF
 - Modélisation thermomécanique 3D

Source: www.croftam.co.uk

upport Structure

