

# Réduction de modèle pour l'évaluation des contraintes et déformations des pièces issues de fabrication additive

B. Bognet<sup>1</sup>, O. Desmaison<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>GeM Ecole Centrale Nantes, France

<sup>2</sup>ESI Group, France

SNS-CFV 26 juin 2018



SOFIA: Solutions for Industrial Metal Additive Manufacturing

# Plan

---

## Introduction

Problématique  
et choix des  
modèles

Stratégie de  
réduction de  
modèle

Résultats

Perspective et  
conclusion

- 1 Introduction
- 2 Problématique et choix des modèles
- 3 Stratégie de réduction de modèle
- 4 Résultats
- 5 Perspective et conclusion

# Introduction

## Introduction

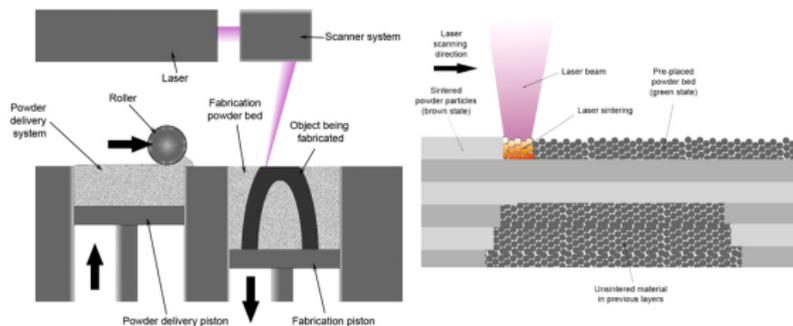
Problématique et choix des modèles

Stratégie de réduction de modèle

Résultats

Perspective et conclusion

## Technologie d'intérêt : Selective laser melting (SLM)



## Stratégie de conception/fabrication typique :

- Design (optimisation topologique)
- Design des supports pour le soutien et la dissipation thermique (optimisation topologique)
- Vérification de la fabricabilité
- Fabrication

# Introduction

## Introduction

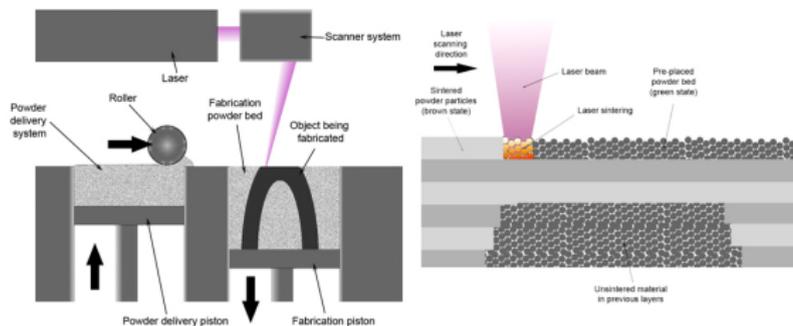
Problématique et choix des modèles

Stratégie de réduction de modèle

Résultats

Perspective et conclusion

## Technologie d'intérêt : Selective laser melting (SLM)



## Stratégie de conception/fabrication typique :

- Design (optimisation topologique)
- Design des supports pour le soutien et la dissipation thermique (optimisation topologique)
- Vérification de la fabricabilité
- Fabrication

## Introduction

Problématique  
et choix des  
modèles

Stratégie de  
réduction de  
modèle

Résultats

Perspective et  
conclusion

## Vérification de la fabricabilité : simulation à l'échelle macro

---

Points importants pour la santé de la pièce et de la machine :

- Précision de la géométrie : dépend des paramètres du procédé
- Les contraintes résiduelles maîtrisées pour assurer l'intégrité de la pièce
- **Déformation maîtrisée de la pièce lors de la fabrication**

## Contraintes pour l'outil de vérification :

---

Nécessité d'avoir un outil de simulation **rapide** et suffisamment précis pour vérifier la fabricabilité *in situ*

Quantités d'intérêt :

- Quantités d'intérêt principale : déplacement vertical de la couche supérieure (évitement de collisions)
- Quantités d'intérêt secondaire : contraintes résiduelles (santé pièce)

## Introduction

Problématique  
et choix des  
modèles

Stratégie de  
réduction de  
modèle

Résultats

Perspective et  
conclusion

## Vérification de la fabricabilité : simulation à l'échelle macro

---

Points importants pour la santé de la pièce et de la machine :

- Précision de la géométrie : dépend des paramètres du procédé
- Les contraintes résiduelles maîtrisées pour assurer l'intégrité de la pièce
- **Déformation maîtrisée de la pièce lors de la fabrication**

## Contraintes pour l'outil de vérification :

---

Nécessité d'avoir un outil de simulation **rapide** et suffisamment précis pour vérifier la fabricabilité *in situ*

Quantités d'intérêt :

- Quantités d'intérêt principale : déplacement vertical de la couche supérieure (évitement de collisions)
- Quantités d'intérêt secondaire : contraintes résiduelles (santé pièce)

# Plan

---

Introduction

**Problématique  
et choix des  
modèles**

Stratégie de  
réduction de  
modèle

Résultats

Perspective et  
conclusion

- 1 Introduction
- 2 Problématique et choix des modèles**
- 3 Stratégie de réduction de modèle
- 4 Résultats
- 5 Perspective et conclusion

## Procédé couche par couche

---

fabrication incrémentale → simulation incrémentale  
nombre de couches :  $\sim 10^{2-4}$

## Ajout d'une couche : procédé incrémental

---

plusieurs étapes/incréments peuvent être nécessaire pour décrire la stratégie de fusion d'une couche

## Défis numériques

---

- Couches fine → maillage fin
- Additif → beaucoup de pas de temps
- Multi-physique → problèmes non-linéaires

## Idées pour réduire le coût numérique :

---

- Réduire le temps de calcul pour chaque ajout de couche :
  - En dégradant la physique :
    - Choix d'un modèle simple élasto-plastique avec écrouissage isotrope
    - Problème thermique négligé (utilisation d'une déformation thermique équivalente)
  - En utilisant une stratégie de réduction de modèle
    - Réduction de modèle de type PGD (Proper Generalized Decomposition)
- Réduire le nombre de d'incrément : activation d'une/plusieurs couche à la fois
  - layer lumping

## Idées pour réduire le coût numérique :

- Réduire le temps de calcul pour chaque ajout de couche :
  - En dégradant la physique :
    - Choix d'un modèle simple élasto-plastique avec écrouissage isotrope
    - Problème thermique négligé (utilisation d'une déformation thermique équivalente)
  - En utilisant une stratégie de réduction de modèle
    - Réduction de modèle de type PGD (Proper Generalized Decomposition)
- Réduire le nombre de d'incrément : activation d'une/plusieurs couche à la fois
  - layer lumping

## Idées pour réduire le coût numérique :

- Réduire le temps de calcul pour chaque ajout de couche :
  - En dégradant la physique :
    - Choix d'un modèle simple élasto-plastique avec écrouissage isotrope
    - Problème thermique négligé (utilisation d'une déformation thermique équivalente)
  - En utilisant une stratégie de réduction de modèle
    - Réduction de modèle de type PGD (Proper Generalized Decomposition)
- Réduire le nombre de d'incréments : activation d'une/plusieurs couche à la fois
  - layer lumping

## Idées pour réduire le coût numérique :

---

- Réduire le temps de calcul pour chaque ajout de couche :
  - En dégradant la physique :
    - Choix d'un modèle simple élasto-plastique avec écrouissage isotrope
    - Problème thermique négligé (utilisation d'une déformation thermique équivalente)
  - En utilisant une stratégie de réduction de modèle
    - Réduction de modèle de type PGD (Proper Generalized Decomposition)
- Réduire le nombre de d'incrémentes : activation d'une/plusieurs couche à la fois
  - layer lumping

# Plan

---

Introduction

Problématique  
et choix des  
modèles

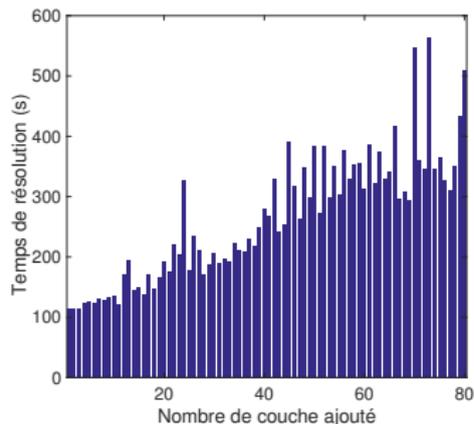
Stratégie de  
réduction de  
modèle

Résultats

Perspective et  
conclusion

- 1 Introduction
- 2 Problématique et choix des modèles
- 3 Stratégie de réduction de modèle**
- 4 Résultats
- 5 Perspective et conclusion

## Exemple de simulation "full"



- Dé-raffinement difficile → temps de calcul augmente à chaque ajout de couche

# Séparation des variables pour résolution PGD : plusieurs options

Introduction

Problématique et choix des modèles

Stratégie de réduction de modèle

Résultats

Perspective et conclusion

## Séparation 2D/1D<sup>1</sup>

Chercher la solution de problème défini sur  $\Omega_{xyz} = \Omega_{xy} \otimes \Omega_z$  sous la forme :

$$\mathbf{u}(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \begin{pmatrix} u_{xy}^i(x, y) \cdot u_z^i(z) \\ v_{xy}^i(x, y) \cdot v_z^i(z) \\ w_{xy}^i(x, y) \cdot w_z^i(z) \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^N \mathbf{u}_{xy}^i \circ \mathbf{u}_z^i$$

Avantages :

- Adapté à une structure couche par couche
- Complexité 2D
- Réduit efficacement le temps de calcul

Inconvénients :

- Nécessité de séparation sous la forme  $C_{xyz}^{ij} = \sum_{i=1}^N C_{xy}^{ij} \otimes C_z^{ij}$  des quantités
- Efficacité moindre quand  $N$  est grand

1. B BOGNET et al. "Advanced Simulation of Models Defined in Plate Geometries : 3D Solutions with 2D Computational Complexity". In : *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 201-204 (2012), p. 1-12

# Séparation des variables pour résolution PGD : plusieurs options

Introduction

Problématique et choix des modèles

Stratégie de réduction de modèle

Résultats

Perspective et conclusion

## Séparation 3D/1D

Chercher la solution de problème défini sur  $\Omega_{xyzn} = \Omega_{xyz} \otimes \Omega_n$  (où  $n$  est le numéro du domaine) sous la forme :

$$\mathbf{u}(x, y, z, n) = \sum_{i=1}^N u_{xyz}^i(x, y, z) \cdot u_n^i(n)$$

Avantages :

- Adapté à une structure couche par couche
- Complexité 3D mais d'une seule couche
- L'ajout d'une couche rajoute 1DDL au problème
- Moins intrusif car une les opérateurs tangents sont 3D

Inconvénients :

- Ajoute une dimension

# Séparation 3D/1D

Introduction

Problématique  
et choix des  
modèles

Stratégie de  
réduction de  
modèle

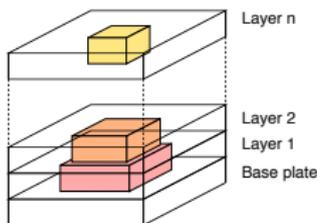
Résultats

Perspective et  
conclusion

## Représentation séparée de la géométrie

$\Lambda(x, y, z)^i$  représente la partie fusionnée de la couche  $i$

Domaine complet :  $\Omega(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^N (\Omega(x, y, z) \cdot \Lambda(x, y, z)^i + i \cdot e_z)$



- Chaque couche contient un sous-ensemble des DDL/éléments du domaine  $\Omega_{xyz}$
- Le domaine 3D (discrétisé) doit être compatible avec les interfaces de toutes les couches

Représentation séparée des inconnues pour les incréments de solution :

$$\Delta \mathbf{U}(x, y, z, n) = \sum_{i=1}^M \Delta \mathbf{U}_{(xyz)}^i(x, y, z) \cdot \Delta \mathbf{U}_{(n)}^i(n)$$

## Résolution :

Pour chaque incrément de solution :

$$\mathbf{K}_t(x, y, z, n) \Delta \mathbf{U}(x, y, z, n) = R(x, y, z, n)$$

L'incrément est enrichi successivement :

$$\Delta \mathbf{U}(x, y, z, n) = \sum_{i=1}^M \Delta \mathbf{U}_{(xyz)}^i \cdot \Delta \mathbf{U}_{(n)}^i + P_{(xyz)} \cdot T_{(n)}$$

On obtient le problème non-linéaire en  $P_{(xyz)}$  et  $T_{(n)}$  :

$$\left[ \sum_{i=1}^M \mathbf{K}_t^i_{(xyz)} \cdot \delta_{(n)}^{in} \right] (P_{(xyz)} \cdot T_{(n)}) =$$
$$(R_{(x,y,z)} \cdot R_{(n)}) - \left[ \sum_{i=1}^M \mathbf{K}_t^i_{(xyz)} \cdot \delta_{(n)}^{in} \right] \left( \sum_{i=1}^M \Delta \mathbf{U}_{(xyz)}^i \cdot \Delta \mathbf{U}_{(n)}^i \right)$$

# Résolution par point fixe

Introduction

Problématique  
et choix des  
modèles

Stratégie de  
réduction de  
modèle

Résultats

Perspective et  
conclusion

## Résolution en $P_{(xyz)}$ :

$T_{(n)}$  est connu, on effectue les intégrales dans la dimension  $n$  :

$$\left[ \sum_{i=1}^M \alpha^i \mathbf{K}_{t_{(xyz)}}^i \right] (P_{(xyz)}) = \\ (R_{(x,y,z)} \cdot R_{(n)}) - \left[ \sum_{i=1}^M \mathbf{K}_{t_{(xyz)}}^i \cdot \delta_{(n)}^{in} \right] \left( \sum_{i=1}^M \Delta \mathbf{U}_{(xyz)}^i \cdot \Delta \mathbf{U}_{(n)}^i \right)$$

## Résolution en $T_{(n)}$ :

$P_{(xyz)}$  est connu, on effectue les intégrales dans la dimension  $(x, y, z)$  :

$$\left[ \sum_{i=1}^M \beta^i \delta_{(n)}^{in} \right] (T_{(n)}) = \\ (R_{(x,y,z)} \cdot R_{(n)}) - \left[ \sum_{i=1}^M \mathbf{K}_{t_{(xyz)}}^i \cdot \delta_{(n)}^{in} \right] \left( \sum_{i=1}^M \Delta \mathbf{U}_{(xyz)}^i \cdot \Delta \mathbf{U}_{(n)}^i \right)$$

# Résolution par point fixe

Introduction

Problématique  
et choix des  
modèles

Stratégie de  
réduction de  
modèle

Résultats

Perspective et  
conclusion

## Résolution en $P_{(xyz)}$ :

$T_{(n)}$  est connu, on effectue les intégrales dans la dimension  $n$  :

$$\left[ \sum_{i=1}^M \alpha^i \mathbf{K}_{t_{(xyz)}}^i \right] (P_{(xyz)}) = \\ (R_{(x,y,z)} \cdot R_{(n)}) - \left[ \sum_{i=1}^M \mathbf{K}_{t_{(xyz)}}^i \cdot \delta_{(n)}^{in} \right] \left( \sum_{i=1}^M \Delta \mathbf{U}_{(xyz)}^i \cdot \Delta \mathbf{U}_{(n)}^i \right)$$

## Résolution en $T_{(n)}$ :

$P_{(xyz)}$  est connu, on effectue les intégrales dans la dimension  $(x, y, z)$  :

$$\left[ \sum_{i=1}^M \beta^i \delta_{(n)}^{in} \right] (T_{(n)}) = \\ (R_{(x,y,z)} \cdot R_{(n)}) - \left[ \sum_{i=1}^M \mathbf{K}_{t_{(xyz)}}^i \cdot \delta_{(n)}^{in} \right] \left( \sum_{i=1}^M \Delta \mathbf{U}_{(xyz)}^i \cdot \Delta \mathbf{U}_{(n)}^i \right)$$

# Schéma de résolution

Introduction

Problématique  
et choix des  
modèles

Stratégie de  
réduction de  
modèle

Résultats

Perspective et  
conclusion

détail du schéma global :

**Pour** chaque nouvelle couche **Faire**

**Pour** chaque incrément  $\Delta F$  **Faire**

initialisation du résidu :  $R \rightarrow \delta F$

incrément de contrainte élastique

**Tant que**  $\| R \| < \varepsilon$  **Faire**

calcul de  $\mathbf{K}_t(x, y, z, n)$

**Tant que**  $\Delta \mathbf{U}(x, y, z, n)$  non convergé **Faire**

**Tant que**  $P_{(xyz)} \cdot T_{(n)}$  non convergé **Faire**

calcul de  $P_{(xyz)}$

calcul de  $T_{(n)}$

**fin tant que**

**fin tant que**

nouveau résidu  $R \rightarrow R - \Delta \phi$

**fin tant que**

résultat incrément

**fin pour**

résultat couche

**fin pour**

résultat pièce

# Plan

---

Introduction

Problématique  
et choix des  
modèles

Stratégie de  
réduction de  
modèle

**Résultats**

Perspective et  
conclusion

- 1 Introduction
- 2 Problématique et choix des modèles
- 3 Stratégie de réduction de modèle
- 4 Résultats**
- 5 Perspective et conclusion

Introduction

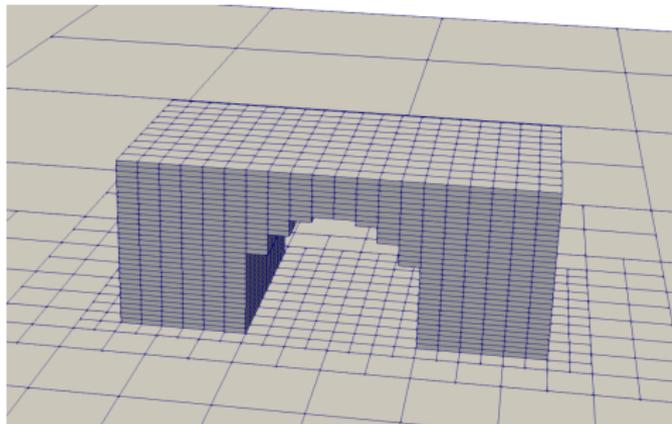
Problématique  
et choix des  
modèles

Stratégie de  
réduction de  
modèle

Résultats

Perspective et  
conclusion

## Géométrie considérée



- 50 k ddl
- 15 k elements hexa
- 80 couches "numériques"

# Résultats

Introduction

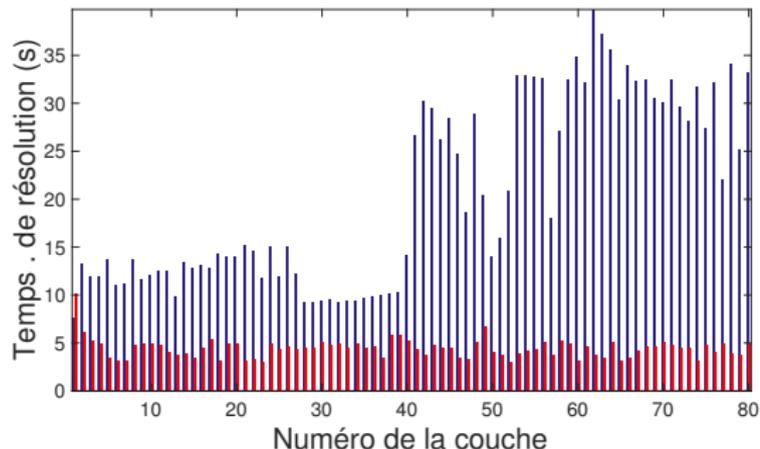
Problématique et choix des modèles

Stratégie de réduction de modèle

Résultats

Perspective et conclusion

## Comparaison du temps de calcul avec le modèle 3D 'full'



## Avantage de la représentation séparée :

- les fonctions connues de  $(x, y, z)$  et de  $(n)$  sont utilisées comme base de projection avant l'enrichissement

# Plan

---

Introduction

Problématique  
et choix des  
modèles

Stratégie de  
réduction de  
modèle

Résultats

Perspective et  
conclusion

- 1 Introduction
- 2 Problématique et choix des modèles
- 3 Stratégie de réduction de modèle
- 4 Résultats
- 5 Perspective et conclusion

Introduction

Problématique  
et choix des  
modèles

Stratégie de  
réduction de  
modèle

Résultats

Perspective et  
conclusion

## Conclusion

---

- Efficace pour réduire le temps de calcul
- Peu intrusif pour le calcul des opérateurs tangents
- Dans le cas de modification de design, la solution précédente peut être utilisée comme base de départ pour la projection

## Future work

---

- Évaluer la performance sur des modèles réels industriels