

Calcul haute performance sur image pour l'étude de l'impact de défauts issus de fabrication additive LPBF

L. Gautier^{1,2}, D. Bardel², X. Liu¹, M. Chevreuil¹, J. Réthoré¹

¹ Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes, France, {mathilde.chevreuil}@univ-nantes.fr
{lilou.gautier,julien.rethore,xiaodong.liu}@ec-nantes.fr;

² Framatome, {lilou.gautier,didier.bardel}@framatome.com

Résumé —

Le procédé LPBF (Laser Powder Bed Fusion) fait partie des méthodes de fabrication additive métallique les plus utilisées. Cependant, une mauvaise maîtrise de cette technologie peut induire des défauts dont la criticité peut affecter significativement la durabilité des structures. Ce papier présente une démarche permettant de faire un lien direct entre descripteurs statistiques, images des défauts et comportement mécanique du matériau sans recourir à de coûteuses étapes de maillage. Elle se base sur le développement d'un modèle statistique de la répartition spatiale des défauts, du type processus ponctuels, et des simulations éléments finis multi-grilles.

Mots clés — Fabrication additive, LPBF, multi-grilles, processus ponctuels, défautologie.

1 Introduction

La Fabrication Additive (FA) offre des perspectives de conception en rupture, avec des designs inaccessibles par des procédés de fabrication conventionnels [12]. Bien qu'ouvrant la voie à de nombreuses évolutions technologiques, la FA métallique s'est longtemps heurtée à la capacité des ingénieurs à justifier le comportement des matériaux et structures obtenus *via* ces procédés. La FA a ainsi souvent été cantonnée à du prototypage ou des pièces de très faible criticité. Alors qu'elle bénéficie d'une montée en maturité importante dans des domaines aussi critiques que le nucléaire [2], la compréhension de l'impact de potentiels défauts de fabrication pour des pièces de tout type de criticité fait encore l'objet de recherches actives [5]. Le présent papier vise donc, dans ce contexte, à proposer une démarche cherchant à étudier l'impact de distributions de défauts sur le comportement mécanique des matériaux et des structures issues de LPBF. Il s'inscrit dans un objectif, à plus long terme, de caractérisation du comportement des composants à rupture et s'appuie pour cela, sur des simulations éléments finis sur images de tomographie *via* solveur multi-grilles.

2 Fabrication additive par Fusion Laser sur Lit de Poudre (LPBF)

Cette étude se concentre exclusivement sur la fabrication additive par Fusion Laser sur Lit de Poudre (LPBF). Avec ce procédé, les pièces sont fabriquées couches par couches par un laser venant mettre en fusion (et donc densifier) un lit de poudre métallique réapprovisionné à chaque couche. Ces étapes sont illustrées dans la figure 1. Ce procédé de fabrication est dépendant de nombreux paramètres tels que la stratégie de lasage adoptée (dont un exemple est donné en figure 2) ou les caractéristiques de la poudre et du laser. La variabilité des conditions de fabrication (cf. figure 4), ou tout simplement le grand nombre de répétitions de l'interaction poudre-laser sur une même pièce, peuvent être sources de défauts dont les caractéristiques sont nouvelles par rapport à des pièces conventionnelles, telles que les produits forgés par exemple. Ces défauts peuvent être multiples, comme le présente la figure 3, mais généralement identifiés en deux catégories [10]. D'un côté, on retrouve des inclusions de gaz. Elles sont induites par du gaz déjà présent dans la poudre ou généré par vaporisation locale lorsque la densité d'énergie du laser est trop importante (*Keyhole*). Ces pores sont caractérisés par leur forme plus sphérique et leur plus petite taille. Ils peuvent être retrouvés en grand nombre dans les composants. De l'autre, on constate des manques de fusions provoqués par un mauvais recouvrement du laser lors de son tracé. Ils sont plus rares mais aussi

plus grands et avec des facteurs de formes plus importants [9].

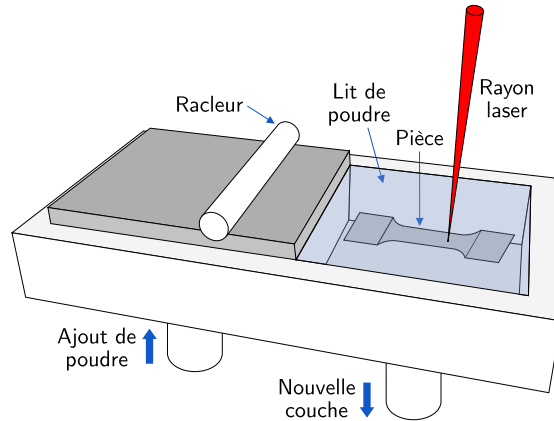


FIGURE 1 – Procédé de fabrication LPBF.

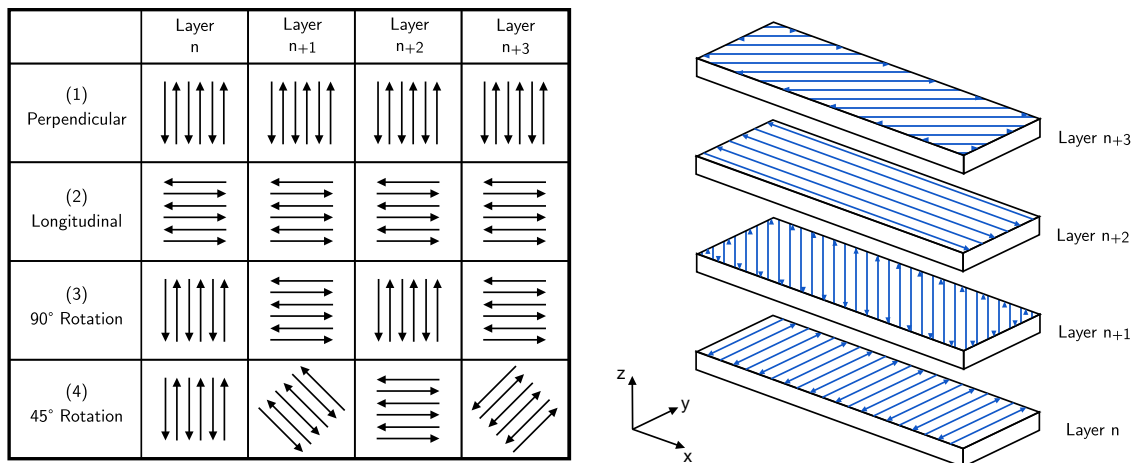


FIGURE 2 – Exemples de stratégies de lasage possibles [11].

Les tailles de ces porosités sont de l'ordre du micron à quelques centaines de micron. Ainsi, en plus de présenter une grande dispersion, leur taille peut s'avérer importante à l'échelle des pièces de fabrication additive. Aussi, du fait de leur origine elles peuvent être réparties différemment à l'intérieur de la pièce [6] selon la stratégie de fabrication adoptée. Les manques de fusions peuvent se retrouver en cluster ou suivant un motif dépendant de la stratégie de lasage, tandis qu'on peut s'attendre à une répartition plus aléatoire des inclusions de gaz isolées.

3 Calcul haute performance sur image avec la méthode multi-grilles

Afin d'étudier l'impact des défauts (ou cluster de défauts) de fabrication additive sur le comportement mécanique, des simulations éléments finis basées sur des méthodes multi-grilles sont proposées *via* le code de calcul développé par X. Liu *et al.* [8].

Cette méthode multi-grilles permet de réaliser directement des calculs sur des images de tomographie sans aucune idéalisation géométrique. Cela favorise ainsi un lien direct entre la méthode de contrôle qualité utilisée sur ces composants issus de fabrication additive et la prédiction de leur comportement mécanique. Ainsi, chaque voxel de l'image constitue un noeud du maillage régulier de la structure étudiée. Un autre avantage déterminant de cette configuration réside dans la possibilité de s'affranchir d'un

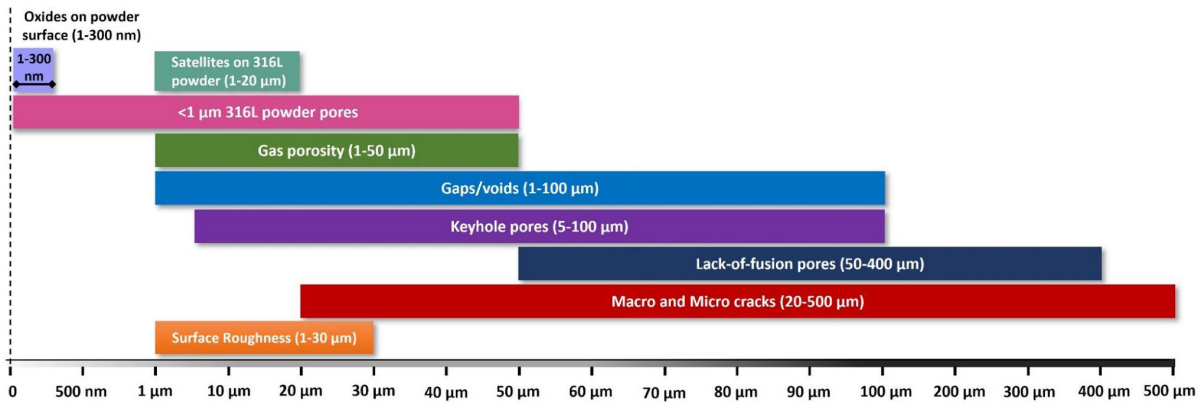


FIGURE 3 – Différents types de défauts identifiés en fabrication additive [13].

long et délicat travail de maillage. Cette remarque est d'autant plus importante que pour un réseau de pores de fine taille, d'orientation quelconque et de fraction volumique significative, cette étape pourrait s'avérer rédhibitoire. Cependant, la présence de très petits défauts, et la nécessité de les décrire de façon convenable ($\simeq 4$ voxels par défaut dans ce papier), engendre un grand nombre d'éléments, de l'ordre de la centaine de millions voire du milliard, selon les composants de fabrication additive considérés. Dans ce contexte l'utilisation d'un solveur efficace devient indispensable pour diminuer les temps de calculs et le stockage de données sur des maillages aussi raffinés.

D'abord, la méthode du Gradient Conjugué Préconditionné (PCG) est utilisée avec un préconditionneur de Jacobi. Ainsi, seul le calcul des termes diagonaux de la matrice tangente est nécessaire et la résolution s'effectue degré de liberté par degré de liberté. Ce solveur présente alors l'intérêt d'une résolution sans aucune matrice qui réduit le coût en mémoire. Il est couplé à la méthode multi-grilles qui permet de diminuer le temps de calcul. Son application à ces travaux est détaillée dans le papier de X. Liu *et al.* [7]. Elle correspond à des itérations de calculs sur des maillages fins, éliminant les erreurs de haute fréquence, et grossiers, éliminant les erreurs de basse fréquence (cf [3, 4]). Ainsi, la convergence globale du code de calcul est accélérée. Ce gain en temps est aussi rendu possible par de fortes possibilités de parallélisation (MPI et openMP).

Aussi, une solution multi-grilles a été préférée dans cette étude par rapport à une approche par FFT car elle est plus adaptée à des conditions limites non périodiques de calcul, nécessaires pour une étude généraliste des composants de fabrication additive.

4 Application à l'étude de l'impact de défauts issus de fabrication additive LPBF

4.1 Description des défauts sur l'échantillon témoin

Un échantillon témoin, de fabrication non optimisée, a été caractérisé par micro-tomographie par Framatome pour la présente étude. La figure 4 présente la projection, sur un plan de normale z (axe de fabrication), de toutes les indications obtenues par la procédure de caractérisation. Les porosités en présence sont ici représentées par leur barycentre mais une description complète (ellipse équivalente, taille, orientation...) est disponible. Un motif de répartition des indications de « type grille » est manifestement identifiable sur cette projection. À noter que la position des défauts selon z ne présente pas de corrélation apparente avec celles selon x et y .

4.2 Modèle de répartition spatiale des défauts

Les données de micro-tomographie peuvent directement être utilisées par le code de simulation multi-grilles. Néanmoins, en vue de réaliser des études paramétriques sur l'impact de la répartition des défauts, un modèle de répartition spatiale des défauts est proposé.

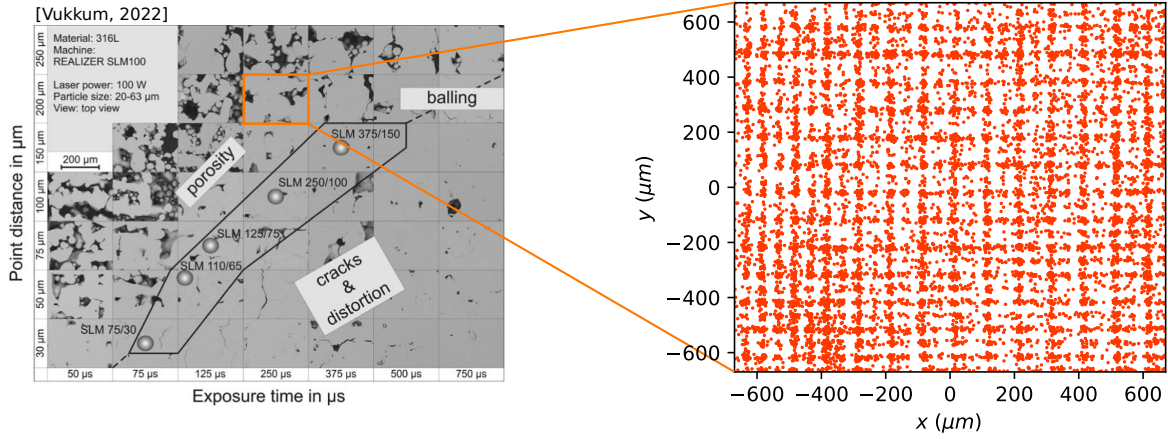


FIGURE 4 – (Gauche) Illustration de l’impact de variations paramétriques sur l’apparition de défauts en LPBF selon Vukcum [13], (Droite) représentation, sur l’échantillon d’étude et par projection suivant Z (axe de fabrication), de tous les défauts présents dans le volume.

Il s’inspire des processus ponctuels de type shot-noise [1] et permettra de simuler des images de tomographies sans avoir recours à des fabrications systématiques. Sa construction, rappelée dans la figure 5, s’articule comme suit.

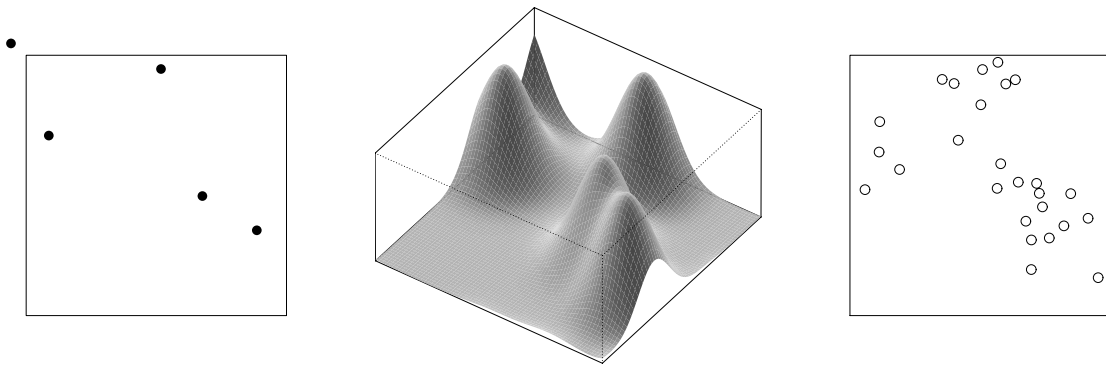


FIGURE 5 – (Gauche) Points *parents*, (Milieu) densité totale des points enfants, (Droite) champ de points résultant [1].

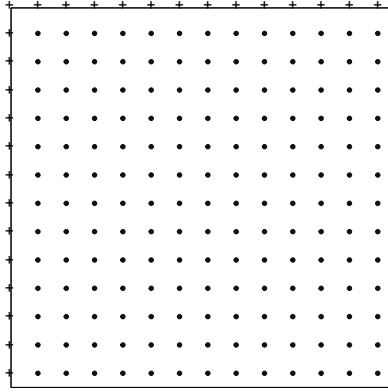
D’abord, une grille de points est générée pour correspondre à l’organisation des défauts mise en évidence dans la partie 4.1 (Figure 6a). Elle est ainsi complètement paramétrée par sa période et un vecteur translation définissant sa position. Chaque nœud de la grille constitue alors un point *parent* du processus ponctuel.

À chacun de ces points *parents* sont associés des points *enfants*. Leur nombre est défini, pour chaque nœud selon une loi de Poisson homogène d’intensité

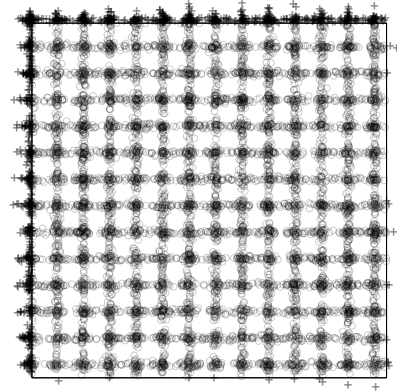
$$\lambda^{pois} = (1 - \alpha) \frac{N}{N^{grid}} \quad (1)$$

avec N le nombre total de points souhaité, N^{grid} le nombre de points parents et α un coefficient de proportionnalité détaillé plus loin.

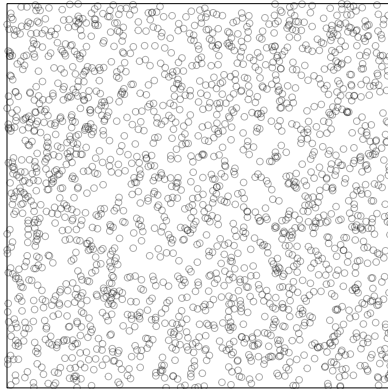
Leur répartition est choisie pour reproduire au mieux le motif de grille identifié. Ainsi, les points enfants sont distribués à part égale autour de chaque nœud de la grille suivant deux gaussiennes bidimensionnelles. Elles sont orientées le long des axes x et y selon les deux directions principales de la grille. Chacune d’elle est définie par une matrice de corrélation diagonale avec σ_1 dans la direction principale de la grille considérée et $\sigma_2 \ll \sigma_1$ dans la direction transverse qui représente la dispersion autour de la grille. Une réalisation de ce processus est présenté dans la figure 6b.



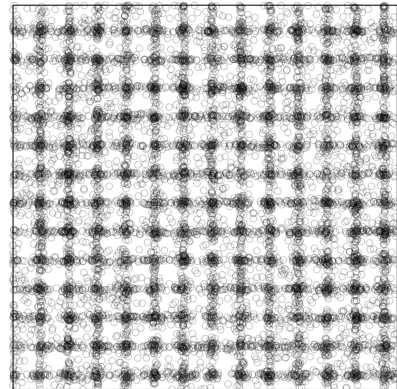
(a) Étape ❶ - grille.



(b) Étape ❷ - enfants.



(c) Étape ❸ - CSR.



(d) Réalisation du processus ponctuel final.

FIGURE 6 – Étapes de construction du processus ponctuel modélisant la répartition spatiale des défauts dans le volume.

Une part d'aléa dans la position des défauts est ajoutée avec un processus de Poisson homogène qui correspond à une répartition complètement aléatoire (CSR). Il est défini par son intensité

$$\lambda^\alpha = \alpha \frac{N}{W} \quad (2)$$

avec W l'aire de la fenêtre de génération du processus ponctuel et α la proportion des points répartis aléatoirement.

Un champ ponctuel tel que présenté dans la figure 6c est généré. Il est superposé aux points *enfants* pour obtenir le processus ponctuel final dont un exemple de réalisation est présenté dans la figure 6d. Les paramètres du modèle ont été fixés *a priori* pour reproduire les observations de tomographie sur ce composant spécifique.

Au vu des connaissances sur les défauts de fabrication additive, les deux couches de ce processus ponctuel pourraient être associées aux deux types de défauts : les points *enfants* pour les manques de fusion et le CSR pour les inclusions de gaz. Ici, le modèle est calibré pour une grille correspondant à une stratégie de lasage avec rotation de 90° , cependant, il est aussi facilement généralisable à d'autres motifs illustrés dans la figure 2. Il suffit pour cela d'ajuster la définition de la grille ainsi que le nombre et l'orientation des distributions gaussiennes. La coordonnée z des défauts est choisie suivant une loi uniforme (probabilité similaire pour chaque couche fabriquée), proche de la distribution observée, et associée aléatoirement à un couple (x,y) . La répartition spatiale différenciée selon le type de défaut retrouvée généralement n'est pas observée avec cette tomographie spécifique. Ainsi, la taille et l'orientation des défauts sont piochées parmi les données de tomographie disponible et attribuées aléatoirement aux positions.

4.3 Simulation numérique avec solveur multi-grilles

Une fois les populations de défauts complètement définies, des images en niveau de gris correspondantes sont générées. Elles servent d'entrée au code de calcul avec solveur multi-grilles.

Des premiers calculs en élasticité (cf. eq 3) sont réalisés en traction uni-axiale selon z pour représenter le comportement de volume d'une éprouvette plane.

$$\underline{\underline{\sigma}} = 2G\underline{\underline{\varepsilon}} + \left(K - \frac{2}{3}G \right) \text{trace}(\underline{\underline{\varepsilon}})\underline{\underline{I}}. \quad (3)$$

La figure 7 présente l'écart à la contrainte de Von Mises dans un plan $[y, z]$ entre une éprouvette sans défauts et une éprouvette avec une porosité de 1%. Cette méthodologie permet ainsi d'étudier directement l'influence des défauts sur le champ de contraintes et les possibles effets de cluster pouvant apparaître en fabrication additive.

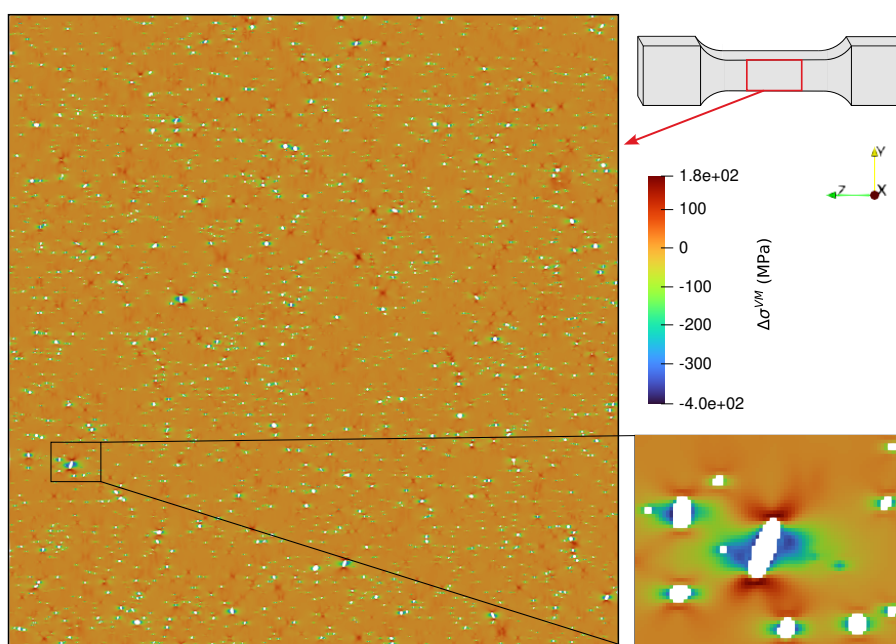


FIGURE 7 – Résultat du calcul élastique multi-grilles : écart entre la contrainte de Von Mises obtenue sur un composant réel et sur une éprouvette de référence sans défauts.

5 Conclusion et perspectives

Ces travaux présentent la combinaison d'outils mis en place pour étudier l'influence de défauts issus de fabrication additive LPBF sur le comportement mécanique des composants.

Suite à une caractérisation par microtomographie, permettant d'extraire les distributions spatiales et de taille des défauts, un modèle statistique de répartition adapté à des configurations typiques de fabrication additive a été proposé. Cette méthode offre ainsi la possibilité de générer des images représentatives (ou extrapolées) de fabrications LPBF en vue d'un couplage avec un code de calcul multi-grilles. Les calculs réalisés ont permis des premières analyses d'études de nocivité de défauts *via* des indicateurs de sur-contrainte locale (écart à la contrainte de Von Mises). Ces travaux devront être poursuivis pour mieux appréhender les modes de ruines, notamment *via* la simulation de scénarios de rupture incluant un comportement élastoplastique du matériau dans le solveur multi-grilles. L'impact des effets de bords pourra aussi être pris en compte.

Références

- [1] A. Baddeley, E. Rubak, R. Turner, *Spatial Point Patterns : Methodology and Applications with R.*, New York : Chapman and Hall/CRC, 2015.
- [2] D. Bardel, G. Badinier, D. Magne, S. Cachat, E. Schweitzer, D. Blavius, J. Klar, C. Wiltz, J. Strumpell, *Additive manufacturing for Fuel components : an overview of key achievements at Framatome*, Top Fuel, Santander, Spain, 2021.
- [3] A. Brandt, *Multi-level adaptive solutions to boundary-value problems*, Math. Comput. 31, 333–390, 1997.
- [4] A. Brandt, O. Livne, *Multigrid techniques : 1984 guide with applications to fluid dynamics*, vol. 67, SIAM, 2011.
- [5] C. Hensley, K. Sisco, S. Beauchamp, A. Godfrey, H. Rezayat, T. McFalls, D. Galicki, F. List III, K. Carver, C. Stover, D.W. Gandy, S.S. Babu, *Qualification pathways for additively manufactured components for nuclear applications*, Journal of Nuclear Materials, vol. 548, p. 152846, 2021.
- [6] M. Laleh, A. E. Hughes, S. Yang, J. Wang, J. Li, A. M. Glenn, W. Xu, M. Y. Tan, *A critical insight into lack-of-fusion pore structures in additively manufactured stainless steel*, Additive Manufacturing, vol. 38, p. 101762, 2021.
- [7] X. Liu, J. Réthoré, M.-C. Baietto, P. Sainsot, A. A. Lubrecht. *An efficient strategy for large scale 3D simulation of heterogeneous materials to predict effective thermal conductivity*, Computational Materials Science, 166, pp.265-275, 2019.
- [8] X. Liu, J. Rethore, M.-C. Baietto, P. Sainsot, A. A. Lubrecht *An efficient finite element based multigrid method for simulations of the mechanical behavior of heterogeneous materials using CT images*, Comput Mech, vol. 66, n° 6, p. 1427-1441, 2020.
- [9] T. Ronneberg, C. M. Davies, P. A. Hooper, *Revealing relationships between porosity, microstructure and mechanical properties of laser powder bed fusion 316L stainless steel through heat treatment*, Materials & Design, vol. 189, p. 108481, 2020.
- [10] N. Sanaei, A. Fatemi, N. Phan, *Defect characteristics and analysis of their variability in metal L-PBF additive manufacturing*, Materials & Design, vol. 182, p. 108091, 2019.
- [11] R. Tangestani, T. Sabiston, A. Chakraborty, L. Yuan, N. Krutz, E. Martin, *An Efficient Track-Scale Model for Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing : Part 2—Mechanical Model*, Frontiers in Materials, vol. 8, 2021.
- [12] T. Vaneker, A. Bernard, G. Moroni, I. Gibsona, Y. Zhang, *Design for additive manufacturing : Framework and methodology*, CIRP ANN-MANUF TECHN, vol. 69, n° 2, p. 578-599, 2020.
- [13] V. B. Vukkum, R. K. Gupta, *Review on corrosion performance of laser powder-bed fusion printed 316L stainless steel : Effect of processing parameters, manufacturing defects, post-processing, feedstock, and microstructure*, Materials & Design, vol. 221, p. 110874, 2022.
- [14] A. E. Wilson-Heid, A. M. Beese, *Combined effects of porosity and stress state on the failure behavior of laser powder bed fusion stainless steel 316L*, Additive Manufacturing, vol. 39, p. 101862, 2021.