

SUJET DE THESE G-SCOP 2026

Titre de la thèse : Maîtrise des stratégies en fabrication additive EB-PBF pour la réalisation de pièces sans support : stratégie, modélisation et validation expérimentale

Directeur(s) de thèse : Yann Ledoux

Co-directeur de thèse : -

Co-encadrant(s) : -

Ecole doctorale : IMEP2

Date de début (souhaitée) : 01/10/2026

Financements envisagés – Contexte – Partenaires éventuels :

Allocation de recherche de l'ED IMEP-2

Description du sujet :

CONTEXTE ET ENJEUX

L'introduction et le développement de la Fabrication Additive (FA) parmi les procédés industriels permettent de repenser le système de production de pièces. Il est désormais possible de produire dans un temps réduit et de manière automatisée, des pièces fonctionnelles et de géométries jusqu'alors impossibles à fabriquer. Malgré les développements de ces technologies, il reste de nombreux défis technologiques et scientifiques à lever pour optimiser les procédés notamment au regard de la qualité des pièces produites, de l'optimisation du matériau utilisé ou encore l'ajout d'opérations de parachèvement des pièces. Le procédé EB-PBF (Electron Beam Powder Bed Fusion) présente des avantages cruciaux permettant de fabriquer des pièces de haute technicité avec une bonne santé matière et un état de contraintes résiduelles faibles contrairement au procédé L-PBF (Laser Powder Bed Fusion). Malgré ces avantages, il reste nécessaire de prévoir des structures de supportage (supports) autour des pièces afin de diffuser la chaleur, stabiliser et d'ancrer les formes en

cours de fusion et ainsi garantir leur fabrication. Ces supports, bien que technologiquement incontournables, nécessitent un temps important pour la préparation des fabrications. De plus, ils représentent un déchet matière significatif dont l'enlèvement est coûteux en temps, présente des risques de détérioration des surfaces fonctionnelles, et génère une perte énergétique globale du procédé [1]. Dans certains cas, cela engendre également des opérations d'usinages locaux pour garantir la qualité géométrique des surfaces. L'alliage de titane TA6V sera utilisé comme matériau de référence notamment en raison des applications pour l'aérospatiale et le médical, qui représentent un enjeu majeur pour la fabrication de pièces critiques à forte valeur ajoutée.

La question de recherche est : Comment mettre en place un couplage entre optimisation de trajectoire de faisceau et modélisation thermique prédictive pour minimiser les supports en EB-PBF via l'approche PointMelt, tout en garantissant la santé matière et les propriétés mécaniques du TA6V ?

Pour répondre à cette question, la thèse s'articule autour de quatre objectifs spécifiques, déclinés selon une approche itérative couplant développement technologique, modélisation numérique et validation expérimentale.

PROBLÉMATIQUE SCIENTIFIQUE

Réduire ou éliminer les supports de fabrication requiert une maîtrise fine du couplage thermique-mécanique et géométrique lors de la fusion. De récents travaux², ont montré que la stratégie de fusion a un impact sur les contraintes résiduelles [2]. En particulier, l'apport ponctuelle d'énergie permettait de limiter les distorsions géométriques [3] et ainsi réduire l'utilisation de support. Cette stratégie, réduit également les zones en surfusion et les défauts métallurgiques [4] et permet d'améliorer les performances des pièces produites [5,6]. Cette stratégie émergente de fabrication, désignée par PointMelt [7,8], offre un avantage distinct par rapport aux approches existantes : contrairement à l'optimisation topologique (coûteuse en temps de calcul) et à l'optimisation d'orientation (géométriquement limitée), elle agit directement sur la physique de la fusion pour minimiser les supports tout en améliorant la santé matière.

Cependant, cette approche nécessite de repenser la définition des opérations de fabrication et doit reposer sur des développements sur trois axes majeurs :

- L'adaptation et l'optimisation des stratégies PointMelt sur les machines EB-PBF (Arcam A1),
- Le développement de modèles numériques prédictifs du comportement thermique en PointMelt pour guider l'optimisation des trajectoires de fabrication,
- L'identification des corrélations entre paramètres de procédé, simulations thermiques et qualité des pièces (santé matière, géométrie, propriétés mécaniques).

OBJECTIFS DE RECHERCHE

Contrairement aux approches d'optimisation d'orientation (purement géométrique) ou de fusion classique, cette thèse vise à développer et valider une approche intégrée couplant optimisation de trajectoire et contrôle thermique (stratégies PointMelt) capable de garantir la fabrication de pièces de qualité avec un supportage minimal voire nul.

Objectifs spécifiques :

- Formuler et implémenter des stratégies PointMelt optimisées, adaptées aux capacités de la machine Arcam A1 disponible au G-SCOP (Plateforme S.mart FA), en fonction des géométries cibles (cavités, parois fines, structures complexes),
- Développer une méthode de pilotage des trajectoires de faisceau (positionnement, vitesse, puissance) basée sur la géométrie à fabriquer et les contraintes thermiques et résultats de simulations numériques

- Construire et valider des modèles numériques prédictifs du comportement thermique en cours de fabrication (distribution de température, gradients thermiques, dilatation), permettant d'anticiper les défauts et distorsions
- Conduire une campagne expérimentale complète de validation pour la caractérisation et la fabrication de pièce en TA6V

La fabrication de pièces de complexité croissante permettra de comparer les gains obtenus entre les différentes stratégies de fabrication. Divers indicateurs seront étudiés comme la santé matière des pièces fabriquées, les opérations additionnelles nécessaires pour éliminer le supportage de pièce ou encore une étude sur les consommations sera réalisée (matière énergie).

APPROCHE METHODOLOGIQUE ET CONTRIBUTIONS

L'approche scientifique repose sur une approche intégrée et itérative combinant : (1) développement et implémentation de stratégies PointMelt sur Arcam A2 ; (2) modélisation numérique thermique prédictive ; (3) validation expérimentale pour des pièces réalisées en TA6V (santé matière, géométrie, propriétés) ; (4) corrélation expérience-modèles et optimisation globale.

De premiers essais ont permis de montrer la faisabilité de ce type de stratégie et des expérimentaux in-situ permettent de mesurer des champs thermiques et leurs dynamiques en cours de fabrication.

Principales contributions attendues :

Méthode générale pour piloter les opérations de fabrication à base de stratégie PointMelt; modèles numériques prédictifs validés ; base de données paramétriques TA6V et définition de règles de fabrication; démonstration expérimentale de réduction des supports (au moins une réduction de 50 % ciblé) sans dégradation de qualité.

Valorisation : 3-4 articles internationaux, communications conférences.

REFERENCES

- [1] Benjamin Vayre. Conception pour la fabrication additive, application à la technologie EBM. Génie des procédés. Université de Grenoble, 2014. Français.
- [2] Zhao, X.; Wei, Y.; Mansour, R.; Dadbakhsh, S.; Rashid, A. Effect of Scanning Strategy on Thermal Stresses and Strains during Electron Beam Melting of Inconel 625: Experiment and Simulation. *Materials* 2023, 16, 443. <https://doi.org/10.3390/ma16010443>
- [3] Ramos, Davi & Belblidia, Fawzi & Sienz, J.. (2019). New scanning strategy to reduce warpage in additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 10.1016/j.addma.2019.05.016.
- [4] Andwana, P., Lee, Y.: Influence of scan strategy on porosity and microstructure of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam powder bed fusion. *Materials Today, Communications* 24, 100962 (2020)
- [5] Westrich, Y., Kammermeier, E., Wahlmann, B. et al. Three-dimensional spot melting patterns in electron beam powder bed fusion: high efficiency and tailored texture. *Prog Addit Manuf* 10, 10549–10562 (2025). <https://doi.org/10.1007/s40964-025-01255-6>
- [6] Dehoff, Ryan & Kirka, M. & Sames, W. & Bilheux, Hassina & Tremsin, Anton & Lowe, Larry & Babu, Sudarsanam. (2014). Site specific control of crystallographic grain orientation through electron beam additive manufacturing. *Materials Science and Technology*. 31. 1743284714Y.000. 10.1179/1743284714Y.0000000734.
- [7] Babu SS, Raghavan N, Raplee J et al (2018) Additive manufacturing of nickel superalloys: opportunities for innovation and challenges related to qualification. *Metall and Mater Trans A* 49:3764–3780. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4702-4>
- [8] Plotkowski A, Ferguson J, Stump B et al (2021) A stochastic scan strategy for grain structure control in complex geometries using electron beam powder bed fusion. *Addit Manuf* 46:102092. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2021.102092>

Contact(s) : yann.ledoux@grenoble-inp.fr

ENGLISH VERSION

Title: Driving Support-Free Additive Manufacturing Strategies in EB-PBF: Strategy, Modeling, and Experimental Validation

Brief Description:

Additive Manufacturing (AM) has revolutionized production by enabling the fabrication of complex geometries with reduced lead times and automated processes. However, significant technological and scientific challenges remain to optimize part quality, material efficiency, and post-processing operations. The EB-PBF (Electron Beam Powder Bed Fusion) process offers substantial advantages over L-PBF, including superior material quality and low residual stress levels. Nevertheless, support structures remain technologically essential to dissipate heat, stabilize geometry during fusion, and anchor parts. These supports represent a significant material waste and require costly removal operations that risk damaging functional surfaces, degrade overall process efficiency, and may necessitate additional machining. This thesis addresses the critical question: How can beam trajectory optimization be coupled with predictive thermal modeling to minimize supports in EB-PBF using the PointMelt approach while guaranteeing material quality and mechanical properties in TA6V titanium alloy?

The research tackles the scientific problem of reducing or eliminating supports through precise control of thermal-mechanical-geometric coupling during fusion. Recent studies demonstrate that fusion strategies significantly impact residual stresses and distortions. The emerging PointMelt strategy—based on localized energy input—reduces thermal gradients, minimizes metallurgical defects, and improves overall part performance. Unlike topology optimization (computationally expensive) or orientation optimization (geometrically limited), PointMelt directly acts on fusion physics to minimize supports while enhancing material quality.

This thesis adopts an integrated, iterative approach combining: (1) development and implementation of optimized PointMelt strategies on the Arcam A1 machine; (2) predictive thermal numerical modeling; (3) experimental validation using TA6V titanium alloy; and (4) model-experiment correlation and global optimization.

Specific objectives include: formulating and implementing adapted PointMelt strategies for diverse geometries; developing beam trajectory piloting methods based on thermal constraints and numerical simulation; constructing validated predictive thermal models; and conducting comprehensive experimental campaigns characterizing material quality, geometry, and mechanical properties.

Expected contributions: a general method for PointMelt-based manufacturing operations, validated predictive models, parametric TA6V database with manufacturing rules, and experimental demonstration of at least 50% support reduction without quality degradation. **Results** will be disseminated through 3-4 international articles and conference communications.