



**HAL**  
open science

## **Proposition d'une chaîne numérique adaptée à la refabrication pour les procédés de fabrication additive : application au cas de la technologie EBM**

Julien Lepagnier, Pierre-Thomas Doutre, Christelle Grandvallet, Frédéric Vignat

### ► **To cite this version:**

Julien Lepagnier, Pierre-Thomas Doutre, Christelle Grandvallet, Frédéric Vignat. Proposition d'une chaîne numérique adaptée à la refabrication pour les procédés de fabrication additive : application au cas de la technologie EBM. Manufacturing'21, Jun 2024, GRENOBLE, France. <hal-04920982>

**HAL Id: hal-04920982**

**<https://hal.science/hal-04920982v1>**

Submitted on 30 Jan 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



Proposition d'une chaîne numérique adaptée à la refabrication pour les procédés de fabrication additive : application au cas de la technologie EBM

Julien LEPAGNIER(a), Pierre-Thomas DOUTRE(a), Christelle GRANDVALLET(a), Frédéric VIGNAT(a)

(a)Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, Grenoble, F-38000, France.

Mail : julien.lepagnier@grenoble-inp.fr; pierre-thomas.doutre@grenoble-inp.fr;  
christelle.grandvallet@grenoble-inp.fr; frederic.vignat@grenoble-inp.fr

Résumé : Les avancées actuelles dans le domaine de la fabrication additive ouvrent la voie à des solutions innovantes. La réparation de pièces en fait partie et représente une perspective particulièrement pertinente dans le contexte actuel d'épuisement des matières premières et de sobriété énergétique. Aussi, afin de permettre la refabrication de pièces grâce aux procédés de fabrication additive, il est nécessaire d'adapter la chaîne numérique existante. Cet article propose ainsi une évolution de la chaîne numérique actuelle afin de rendre possible la refabrication de pièces endommagées. Pour cela, l'article traite dans un premier lieu de la détermination du ou des volumes endommagés dans le but de les couper pour les retirer. La stratégie de découpe tient compte des spécificités du procédé additif tout en maximisant le volume intact, afin d'éviter la reconstruction d'un volume trop important. Après retrait de la partie endommagée par usinage, la seconde partie de l'article traite d'un cas d'étude appliqué à la technologie Electron Beam Melting (EBM). Pour cela une méthode de mise en position est proposée ainsi qu'un outillage de maintien en position. La dernière partie de l'article est consacrée à une étude de cas de pièce à refabriquer avec la technologie de fusion de poudre par faisceau d'électrons (PBF-EB). La chaîne numérique illustrée dans ce papier permet en effet de refabriquer des pièces. Il serait néanmoins nécessaire de l'éprouver sur d'autres cas d'étude et d'automatiser la stratégie de découpe.

Mots clés : Remanufacturing, Refabrication, Chaîne numérique, EBM.

## 1 Introduction

Les avancées actuelles dans le domaine de la fabrication additive (FA) ouvrent la voie à des solutions innovantes. La refabrication (ou en anglais "remanufacturing") de pièces endommagées en fait partie et représente une perspective particulièrement pertinente dans le contexte actuel d'épuisement des matières premières et de sobriété énergétique. Les auteurs anglophones [1,2,3,4] s'accordent sur la définition suivante de la refabrication : " a method of returning a used product from the customer's perspective to at least original equipment manufacturer (OEM) performance specifications and giving the resulting product a guarantee that is at least equal to that of a newly produced equivalent". Tous leurs articles utilisent le même matériau métallique que la pièce d'origine ou un matériau compatible. La figure 1 offre une mise en contexte de cette définition et situe le processus de refabrication dans le cycle de vie d'un produit. Après les phases conventionnelles de "conception", "fabrication", "distribution", "usage", l'introduction des étapes de "récupération de produit" (pour le refabriquer) et l'obtention d'un nouveau "produit refabriqué" permettent de prolonger la durée de vie du produit. Cette étape de refabrication est généralement réalisée par un ingénieur CAO/FAO.

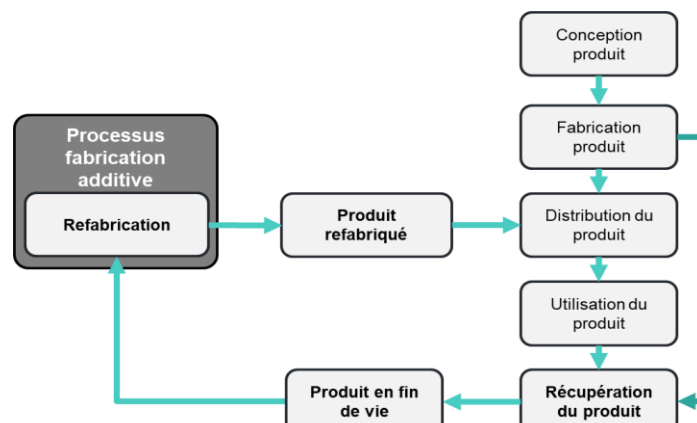


Figure 1 : Phase de refabrication dans le cycle de vie du produit

Cet article vise à examiner la capacité des moyens de la fabrication additive métallique à refabriquer des pièces abimées. En effet, la technologie de dépôt direct d'énergie (DED) se prête particulièrement bien à la refabrication, car la mise et le maintien en position de la pièce à refabriquer ne nécessitent pas d'outillage spécifique, et une surface plane n'est pas nécessaire. En revanche, les technologies de fusion de lit de poudre (ou Powder Bed Fusion PBF) exigent une surface de départ plane et un outillage spécifique pour la mise en position (MIP) et le maintien en position (MAP), bien que le calcul de trajectoire et le post-traitement soient relativement simples.

Cependant, l'utilisation de ces technologies de FA dans ce contexte de refabrication nécessite une adaptation de la chaîne numérique. En effet, alors que de nouvelles contraintes et pratiques apparaissent avec cette activité, les outils numériques d'aide à la préparation de la refabrication ainsi que les différentes étapes du processus doivent être reconsidérés. C'est pourquoi, cet article a pour objectif de faciliter le travail de l'ingénieur CAO/FAO à l'aide d'une chaîne numérique fiable et robuste. Pour ce faire, il s'attache alors à répondre à la

question suivante : Existe-t-il une méthodologie et une chaîne numérique pour la refabrication par FA ?

La section suivante examine un état de l'art axé sur les chaînes numériques existantes en fabrication additive pour la refabrication, ainsi que sur les approches de mise et de maintien en position dans le cadre de la technologie de fusion de lit de poudre (PBF). Elle est suivie d'une proposition de nouvelle chaîne numérique, appliquée à la technologie de fabrication additive EBM sur le cas d'une pale d'hydrolienne endommagée. Les résultats qui ressortent de cet essai serviront alors de preuve de concept pour cette chaîne numérique.

## 2 Etat de l'art

Afin d'étudier comment la refabrication de pièce est abordée et expérimentalement réalisée au sein de la communauté scientifique de la fabrication additive, un état de l'art a été réalisé avec les mots clefs suivants :

Remanufacturing; Refabrication; Chaîne numérique; Fabrication additive; PBF; EBM; Stop and go; Smart piece. Les auteurs [3,5, 6, 7] soulignent le potentiel des procédés de fabrication additive comme le DED ou le PBF pour la refabrication de pièces. En effet, le déploiement de ces technologies dans ce contexte pourrait entraîner des avantages économiques et environnementaux tout en maximisant la durée de vie des produits refabriqués. Mais pour pouvoir tirer pleinement parti des avantages qu'offre la refabrication, certains verrous techniques et technologiques sont à lever. Salah et al. [3] soulignent la nécessité de repenser le processus de conception pour intégrer efficacement l'étape de refabrication. Ils remettent également en question la nécessité de développer une méthodologie permettant de choisir la stratégie de refabrication la plus adaptée au processus de fabrication additive envisagé. De même, Rahito et al. [8] abordent la nécessité de travailler sur la compatibilité des matériaux dans le but de refabriquer avec le même matériau ou une nuance de matériaux légèrement ou totalement différente. Cette problématique est aussi étudiée par Le et al. [9] qui fabriquent des éprouvettes en TA6V avec le procédé de fabrication EBM (Electron Beam Melting) sur un substrat en TA6V. Grâce à des essais mécaniques, [8] conclut que les caractéristiques des pièces refabriquées sont identiques à celles fabriquées en une seule fois. De même Terrazas et al. [10] réalisent grâce aux procédés de fabrication additive EBM des pièces bi-matériaux à base de cuivre et de titane. Ils étudient ensuite la microstructure à l'interface qui diffère de celle généralement obtenue. Une méthodologie de MIP/MAP est également proposée pour la refabrication. La méthode de mise en position est réalisée manuellement à l'aide d'un réglet et permet de centrer la plaque. Pour le maintien en position, la plaque de construction est préalablement usinée de telle sorte que la pièce à refabriquer soit maintenue. Une « plaque masque » est alors obtenue. Les auteurs aboutissent à une erreur de l'ordre de 70 microns suivant z, de 62 microns suivant y et de 324 microns suivant x. D'autres auteurs comme Hossain et al. [11,12] utilisent dans le cadre d'une fabrication EBM une plaque masque pour réaliser le maintien en position. La mise en position est réalisée grâce à une caméra infrarouge. L'erreur de désalignement obtenue avec cette méthode est de l'ordre de  $\pm 0.17$  mm. Dans l'ensemble des articles évoqués précédemment, [8,9,10,11, 12] il est nécessaire de prévoir un outillage qui prend en compte les spécificités du processus de refabrication. Par exemple, dans le cas de l'EBM, la géométrie du substrat doit être plane, et dans le cas du DED, la géométrie du substrat peut être plus complexe. Aussi, les auteurs [13,14,15] détaillent une chaîne

numérique adaptée à la fabrication additive mais pas à la refabrication. En conclusion, cet état de l'art fait ressortir le besoin d'une chaîne numérique adaptée à la refabrication de pièce. Pour cela, il est nécessaire d'assurer l'identification des zones saines et des zones endommagées, d'intégrer des spécificités du processus de fabrication, de guider le concepteur vers une mise en position et un maintien en position adéquate lors de la fabrication. L'ensemble de ces besoins est représenté en Figure 2.

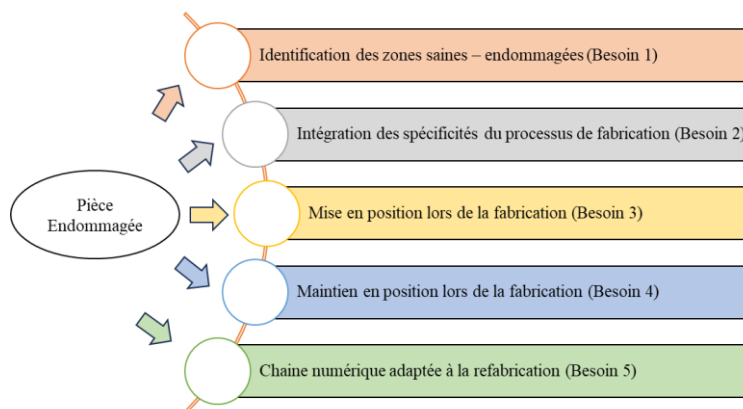


Figure 2 : Opérations nécessaires à la refabrication de pièces

Le Tableau 1 quant à lui résume l'état de l'art au regard de 5 besoins distincts.

Tableau 1 : Résumé de l'état de l'art.

#	1	2	3	4	5	Résultats majeurs
[3]						Etude des verrous technologiques rendant la refabrication peu répandue. Besoin de méthodologie de conception adaptée à la refabrication
[5]						Les technologies de FA sont particulièrement adaptées à la refabrication.
[6]						Technologies de fabrication additive particulièrement adaptées à la refabrication et notamment les technologies de DED.
[7]						Technologies de fabrication additive particulièrement adaptées à la refabrication d'un point de vue économique et environnemental
[8]						Etude des verrous technologiques rendant la refabrication peu répandue.
[9]		X				Refabrication d'éprouvette sur une plaque en titane par le procédé EBM.
[10]		X	X	X		Fabrication de pièces bi-matériaux (cuivre-titane) en EBM. MIP réalisée par un centrage manuel, MAP réalisé grâce à une plaque masque.
[11]		X		X		Refabrication de pièce en titane grâce au procédé de fabrication EBM. Proposition d'une méthode de maintien en position grâce à une plaque masque.
[12]			X			Utilisation d'une caméra infrarouge pour réaliser la MIP. Erreur de désalignement de +/- 0,17mm.
[13]						Proposition d'une chaîne numérique uniquement pour un usage conventionnel de l'EBM.
[14]						Proposition d'une chaîne numérique pour la FA mais pas pour la refabrication.
[15]						Proposition d'une nouvelle chaîne numérique pour la fabrication additive, mais pas dans le cadre de la refabrication

[16] Proposition de technologie pertinente pour effectuer une refabrication (DED ou PBF) par la prise en compte de la topologie du substrat.

Au vu de cette étude bibliographique, on peut par conséquent conclure qu'il n'existe pas actuellement de chaîne numérique adaptée à la refabrication. Cependant, la FA ressort comme une technologie adaptée à ce processus.

### 2.1 Questions de recherche

À la suite de cet état de l'art, les questions suivantes émergent par rapport aux objectifs de ce travail de recherche :

- Comment adapter la chaîne numérique de la FA à la refabrication ?
- Comment appliquer cette chaîne numérique à la technologie fusion de lit de poudre par faisceau électron ?

Pour répondre à ces questions, et sur la base des résultats de l'état de l'art, cet article présente par la suite en Section 3 une méthodologie générale pour réaliser la refabrication de pièce quelle que soit la technologie de fabrication additive. Elle est complétée par une chaîne numérique détaillant les différents fichiers créés tout au long du processus. Toutefois, chaque technologie utilisée apportera des spécificités propres à la chaîne numérique, comme la création d'outillages supplémentaires, la délimitation de la frontière entre les zones saines et à refabriquer, etc. La mise en pratique de cette chaîne numérique avec la technologie EBM sert ainsi de preuve de concept et a l'avantage de présenter les différents verrous à lever pour cette activité de refabrication (Section 4).

## 3 Proposition d'une chaîne numérique

La chaîne numérique pour la refabrication prend en entrée le modèle CAO de la pièce d'origine ainsi que le scan de la pièce endommagée car un moyen de comparaison est nécessaire dans un premier temps. La Figure 3 présente une proposition de nouvelle chaîne numérique adaptée à la refabrication et articulée en 7 points. Ceux-ci sont détaillés étape par étape dans les sections qui suivent.

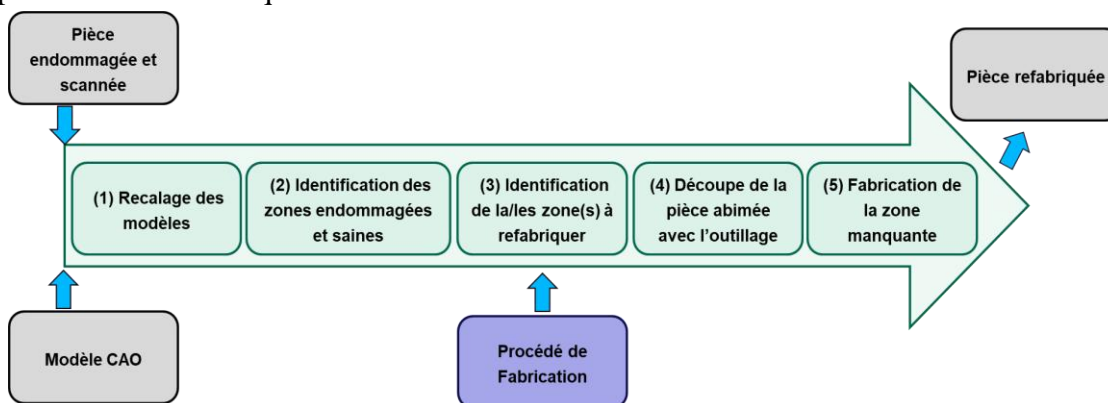


Figure 3 : Etapes du processus de refabrication

### 3.1 Recalage

La première étape de la chaîne numérique implique un recalage approximatif des différents modèles les uns par rapport aux autres afin de comparer le modèle endommagé (issu d'un scan) au modèle théorique spécifié. Une proposition de méthode de recalage est présentée en Figure 4. Elle commence par un pré-recalage manuel effectué par l'ingénieur CAO/FAO afin d'éviter des temps de calcul excessifs. La deuxième étape consiste à identifier visuellement une zone intacte dans le modèle 3D non endommagé ; celle-ci sert en effet de base pour la suite du recalage. Enfin, la dernière étape est automatisée dans le logiciel Rhino Grasshopper et vise à minimiser l'écart des pièces aux moindres carrés entre les parties non endommagées. Ce processus de recalage permet ainsi de caractériser les zones comme saines ou endommagées dans la pièce.

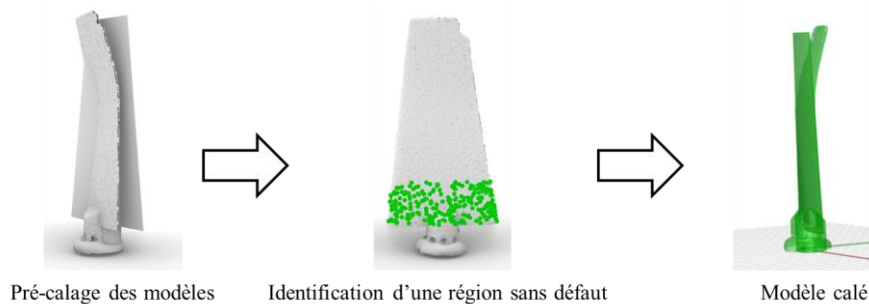


Figure 4 - Approche de recalage des modèles de pale

### 3.2 Identification des zones endommagées

À la suite des opérations de recalage exposées dans la section 3.1, il devient impératif de définir la frontière entre la portion intacte et la partie endommagée. Pour ce faire, il est essentiel d'intégrer les spécifications du cahier des charges, notamment en veillant à ce que l'erreur de recalage demeure inférieure à la tolérance stipulée dans les plans, ainsi qu'à celle induite par le processus de fabrication (Figure 5).

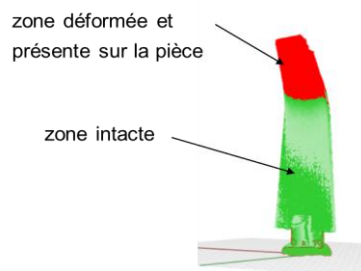


Figure 5 : Identification visuelle des différentes zones d'une pale

### 3.3 Identification de la/les zone(s) à refabriquer

La forme de la frontière entre la zone saine et la zone endommagée peut être complexe et doit s'adapter aux procédés de fabrication. Dans le cas d'une fabrication par technologie lit de poudre, la forme de la première couche doit être plane. Il est recommandé de couper la pièce avec un plan au plus proche la frontière entre la zone endommagée et la zone saine tout en gardant la totalité de la zone endommagée. Avec la technologie DED pour laquelle une forme complexe de la frontière est possible, il faut en revanche suivre la frontière entre la zone endommagée et la zone saine avec les contraintes d'encombrement de la tête de dépose. Pour

pouvoir refabriquer des pièces, il est nécessaire de prendre en compte les particularités des frontières, telles qu'illustrées dans le figure 5. Ce tableau représente le type de frontière approprié pour le processus de refabrication additive envisagé. De plus, dans le but de réduire au minimum la taille de la partie à reconstruire, il est primordial de créer une nouvelle frontière F2 qui soit aussi proche que possible de la frontière F1 obtenue précédemment.

### *3.4 Découpe de la pièce abimée*

Après détermination de la frontière la plus appropriée, il est nécessaire de retirer la partie de la pièce endommagée et de conserver la partie de la pièce qui est saine selon cette frontière. Pour ce faire, des outils de FAO peuvent être mis en œuvre afin de générer des trajectoires d'usinage assurant une découpe selon la frontière précédemment définie. La découpe peut ensuite être réalisée par une machine-outil et avec l'aide d'un logiciel de FAO qui aura généré les trajectoires d'usinage. Une fois la découpe terminée, une inspection de l'état de surface sera utile pour une éventuelle opération de finition. Toutefois, cet article ne prend pas en compte toute étape intermédiaire entre la découpe et la refabrication.

### *3.5 Fabrication de la zone manquante*

La dernière étape du processus de refabrication consiste en la réalisation de la partie préalablement endommagée et retirée. Plusieurs options se présentent alors selon la technologie FA choisie : Dans le cas d'une fabrication par DED, la trajectoire du dépôt de cordon doit être préalablement calculée et générée. De même, il faut s'assurer que la pièce à refabriquer est correctement mise en position par exemple à l'aide de mors. Dans le cas d'une fabrication par lit de poudre, la surface de départ étant plane, les opérations de MIP et MAP ainsi que les outillages seront d'une grande importance.

A noter que, comme indiqué précédemment, la refabrication implique d'utiliser un matériau identique ou un alliage compatible avec la partie inférieure et saine de la pièce.

En ce qui concerne la chaîne numérique, la Figure 6 donne un aperçu des différents fichiers exploités tout au long du processus de refabrication. Ceux-ci sont principalement des fichiers en format STEP créés ou modifiés.

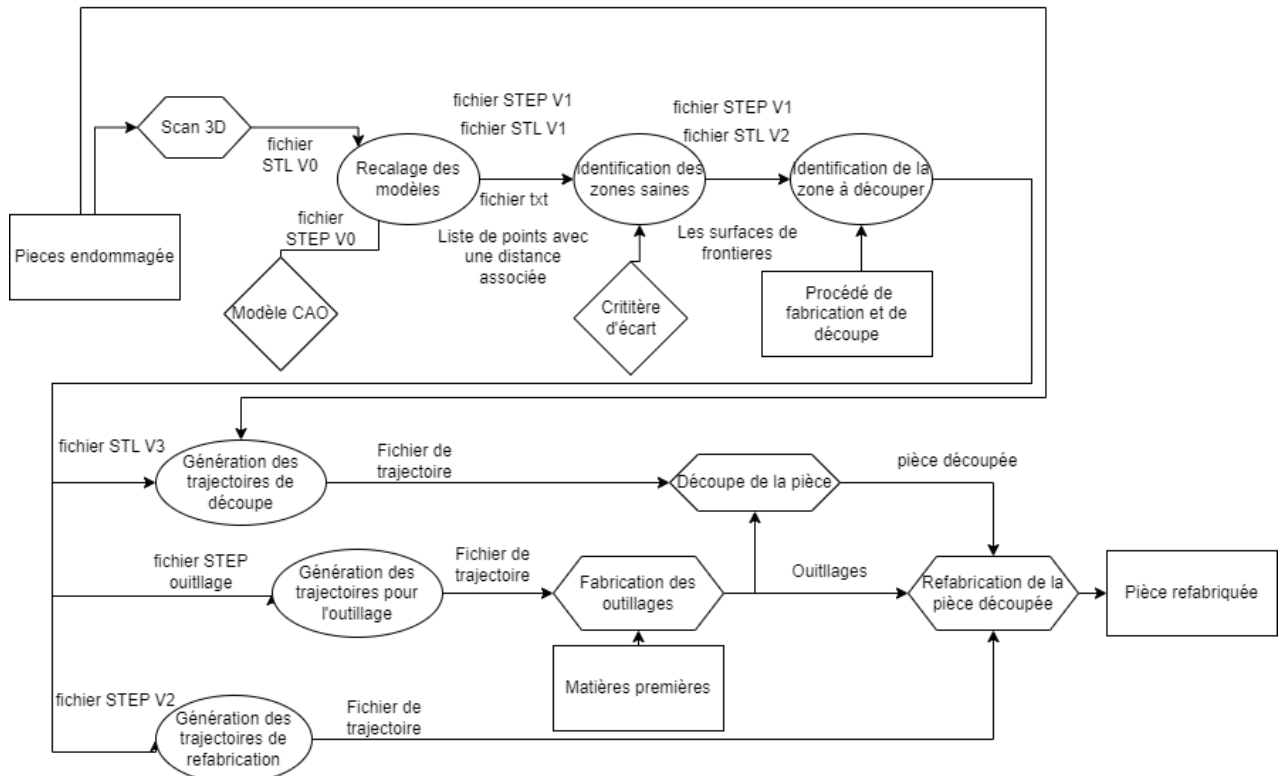


Figure 6 : Proposition de chaîne numérique de refabrication

En conclusion, cette chaîne numérique proposée aide à traiter les défauts de pièce tels que la casse, les fissures, ou encore la porosité, qui peuvent se corriger par une refabrication et prolongeront la fin de vie de la pièce. Elle a les avantages suivants :

- Identification automatique des défauts géométriques grâce au recalage automatique des modèles
- Génération automatique des volumes à refabriquer incluant les paramètres et contraintes du processus de fabrication

Toutefois, la sélection de la partie saine pour le recalage doit encore être automatisée, et un développement plus poussé serait nécessaire pour prendre en compte les différentes contraintes des processus de fabrication additive. Un exemple d'application de cette chaîne numérique avec la technologie EBM est proposé dans la section suivante afin de montrer les différentes étapes et éprouver cette chaîne numérique.

## 4 Preuve de concept sur EBM

### 4.1 Cas d'étude

Cette étude se focalise sur la refabrication par le procédé de fabrication additif EBM d'une pale d'hydrolienne endommagée, comme illustré à la figure 7 (a). À la suite des étapes de recalage et d'identification des zones endommagées, telles qu'illustrées sur les figures 4 et 5, il est impératif de considérer les spécificités du procédé de fabrication EBM. Cela implique notamment une surface de découpe plane, comme indiqué à la figure 7 (b). Cette surface de découpe doit affleurer le masque qui assure le maintien en position et permet les dépôts des premières couches de poudre, comme illustré à la figure 7 (c). Le masque dispose de quatre trous d'un diamètre de 1 mm ayant pour fonction de faciliter la mise en position. En effet, en dirigeant le faisceau d'électrons à travers ces quatre trous, nous sommes en mesure de

déterminer leurs coordonnées. Cette manipulation nous permet de connaître la position exacte de la pièce placée dans la machine et donc d'ajuster la position de la partie à reconstruire dans la CAO de telle sorte qu'après refabrication les deux parties de pièces (saine et à reconstruire) soit alignées. Les résultats de refabrication sont illustrés figure 7(d) et (e) représentant respectivement la pale maintenue dans le masque et la pale sortie du masque.

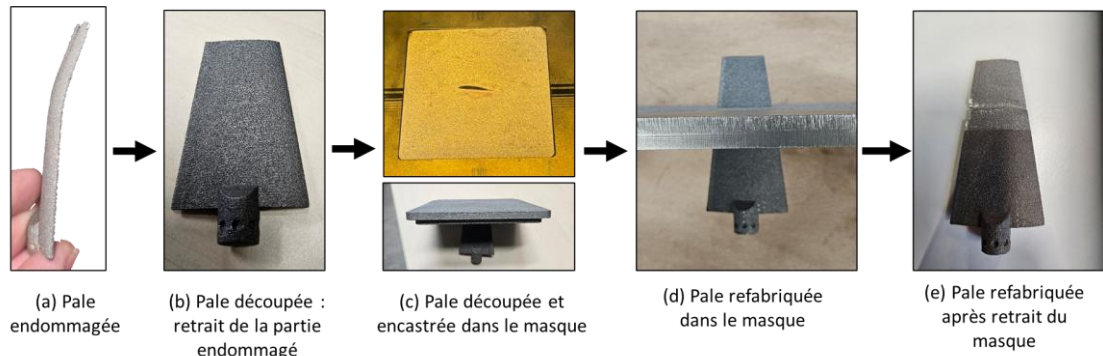


Figure 7 : Refabrication d'une pale d'hydrolienne en EBM.

#### 4.2 Analyses du produit obtenu et discussion

La pièce refabriquée est scannée dans le but de quantifier les défauts liés à notre méthode de mise en position. La figure 8 illustre les différents défauts. A l'interface entre la partie refabriquée et la partie saine nous avons un défaut de l'ordre de 0.3 mm. Le défaut moyen sur la partie refabriquée est de  $\pm 0.15$ mm. Sur la partie supérieure de la pale, on observe une augmentation significative du défaut. Cette observation peut provenir du fait que la pièce a été bloquée dans l'outillage. Lors de son retrait, une presse a été utilisée, entraînant des déformations. Pour les expérimentations futures, il sera impératif de revoir la conception de l'outillage afin de prévenir ce type de déformation. Les résultats que nous obtenons sont équivalents à ceux de [11], [10] et [12] qui utilisent dans un cas une caméra infrarouge et dans l'autre cas un régleur.

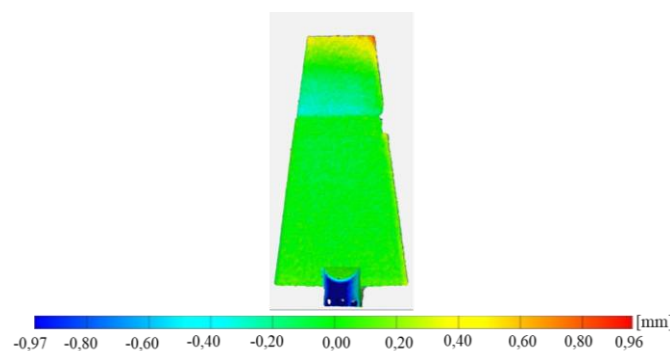


Figure 8: carte de couleur des résultats et erreur

## 5 Conclusion et Perspectives

### 5.1 Conclusion

Ce travail a pour objectif de présenter une nouvelle chaîne numérique spécifiquement conçue pour la refabrication de pièces par fabrication additive. Cette proposition intègre des stratégies

d'identification et de découpe de la zone endommagée, en tenant compte des particularités des procédés de fabrication additive envisagés (PBF - DED). Cette chaîne numérique a été testée dans le contexte de la technologie EBM. À cette fin, un dispositif de mise et de maintien en position a été développé. Une stratégie de mise en position a été mise en œuvre grâce au faisceau d'électrons de la machine, éliminant ainsi le besoin de dispositifs supplémentaires pour cette opération. Les défauts moyens obtenus avec cette approche de mise en position sont d'environ  $\pm 0.15$  mm.

## 5.2 Perspectives

Des améliorations pourraient être apportées aux algorithmes de recalage et d'identification des zones saines ou endommagées afin d'améliorer leur automatisation. Une étude sur l'orientation optimale du plan de coupe pourrait être entreprise dans le but de minimiser systématiquement le volume de la pièce à reconstruire. Des améliorations supplémentaires liées à l'outillage pour la technologie EBM pourraient être explorées. Les trous des masques, fabriqués avec un diamètre de 1 mm et une forme cylindrique, peuvent être une source potentielle de défauts lors de la mise en position de la pièce. Une analyse approfondie sur le diamètre et la forme optimale des trous, l'orientation de fabrication la plus pertinente, voire le recours à l'usinage pour réduire les défauts, pourrait être envisagée. L'ajustement de l'intensité du faisceau d'électrons pourrait également être exploré pour améliorer la précision de la mise en position. Pour les futures expérimentations, il sera nécessaire de revoir l'outillage afin d'éviter que la pièce refabriquée ne reste coincée dans le masque et ne soit endommagée lors de son retrait. Une étude approfondie des caractéristiques du matériau à l'interface avec la pièce refabriquée ainsi que ses propriétés mécaniques pourrait être entreprise.

## Références

- [1] Leino M., Pekkarinen J., & Soukka R. (2016). *The role of laser additive manufacturing methods of metals in repair, refurbishment and remanufacturing—enabling circular economy. Physics Procedia*, 83 752-760.
- [2] Matsumoto, M., Yang, S., Martinsen, K., & Kainuma, Y. (2016). *Trends and research challenges in remanufacturing. International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, 3(1), 129-142.
- [3] Salah B, Ziout A, Alkahtani M, et al (2021). *A Qualitative and Quantitative Analysis of Remanufacturing Research. Processes* 9:1766.
- [4] Wahab D. A., & Azman A. H. (2019). *Additive manufacturing for repair and restoration in remanufacturing: An overview from object design and systems perspectives. Processes*, 7(11), 802.
- [5] Aziz N.A., Adnan N.A.A., Wahab D.A., Azman A.H. (2021). *Component design optimisation based on artificial intelligence in support of additive manufacturing repair and restoration: Current status and future outlook for remanufacturing. J Clean Prod* 296:126401.
- [6] Kanishka K., Acherjee B. A. (2023). *systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration. J. Manuf. Process.* 89, 220–283.
- [7] Manco P., Caterino M., Rinaldi M., Macchiaroli R. (2023). *A sustainability-oriented methodology to compare production strategies: The case of AM-based remanufacturing Journal of Cleaner Production*, Volume 423 2023 138594, ISSN 0959-6526
- [8] Rahito Wahab D.A., Azman A.H. (2019). *Additive Manufacturing for Repair and Restoration in Remanufacturing: An Overview from Object Design and Systems Perspectives.*
- [9] Le V. T. (2017). *Proposition d'une stratégie soutenable pour donner une nouvelle vie à une pièce en s'appuyant sur les techniques de fabrication additive. Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes.*

- [10] Terrazas C. A., Gaytan S. M., Rodriguez E., Espalin D., Murr L. E., Medina F., & Wicker R. B. (2014). Multi-material metallic structure fabrication using electron beam melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1), 33-45. SDM, Embedded components, Sensors, Smart parts.
- [11] Hossain M. S., Gonzalez J. A., Hernandez R. M., Shuvo M. A. I., Mireles J., Choudhuri A., ... & Wicker, R. B. (2016). Fabrication of smart parts using powder bed fusion additive manufacturing technology. *Additive Manufacturing*, 10 58-66
- [12] Hossain M. S., Mireles J., Morton P., Lin Y., Terrazas C. A., & Wicker, R. B. (2018). Part re-registration during process interruption of electron beam melting additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1), 337-344.
- [13] Béraud N., Vignat F., Villeneuve F., Dendievel R. (2015). Evaluation de la chaîne numérique en fabrication par Electron Beam Melting. 14ème Colloque National AIP PRIMECA, La Plagne, France.
- [14] Bonnard R. (2010). Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive. *Sciences de l'ingénieur [physics]*. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2010.
- [15] Bonnard R., Mognol P., Hascoët J. A. (2010). new digital chain for additive manufacturing processes. *Virtual and Physical Prototyping*, 5 (2), pp.75-88.
- [16] Lahour Y., & Brissaud D. (2018). A technical assessment of product/component re-manufacturability for additive remanufacturing. *Procedia Cirp*, 69 142-147.