



HAL
open science

Remanufacturing de pièce par procédé additif et soustractif : Proposition méthodologique et cas d'études sur des potences de vélo

Y Malyani, Damien Evrard, Guillaume Mandil

► **To cite this version:**

Y Malyani, Damien Evrard, Guillaume Mandil. Remanufacturing de pièce par procédé additif et soustractif : Proposition méthodologique et cas d'études sur des potences de vélo. 24ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2019, Brest, France. <hal-02335098>

HAL Id: hal-02335098

<https://hal.science/hal-02335098v1>

Submitted on 28 Oct 2019

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.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

Remanufacturing de pièce par procédé additif et soustractif : Proposition méthodologique et cas d'études sur des potences de vélo

Y. MALYANI^a, D. EVRARD^a, G. MANDIL^a

a. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP¹, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

Résumé :

Ce travail vise à développer une méthodologie permettant de contribuer à fermer la boucle de l'économie circulaire en reconfigurant des pièces mécaniques à l'aide d'outils de fabrication additive et soustractive. La reconfiguration des pièces se définit ici comme un processus par lequel des pièces en fin de vie sont modifiées pour rendre possible leur retour dans un état neuf prolongeant leur durée de vie, ces pièces sont ici utilisées dans une application similaire à leur utilisation première. Cette stratégie s'appuie sur les possibilités offertes par le remanufacturing et son utilisation comme un outil pour participer à la soutenabilité des systèmes de production.

Abstract :

The development of economical and safer societies requires to improve the means of transport and of energy production. Rotating machines hold a central place. (11 Italique) Interligne (1.15)

Mots clefs : Fabrication additive, Remanufacturing, Produit en fin de vie, Gamme de fabrication, économie circulaire, soutenabilité.

Introduction

La fabrication additive regroupe un ensemble de techniques qui permettent de construire des pièces par ajout de matière, généralement en empilant des couches les unes sur les autres. Elle est principalement utilisée pour réaliser rapidement des prototypes de pièces ou de produits [?]. Les procédés de fabrication additive métallique sont utilisables pour la « refabrication » de pièces en fin de vie [?]. Dans ce cas, il est essentiel de s'assurer que les processus employés permettent une fabrication des produits avec un matériau qui soit compatible avec leur usage. La prise en compte des caractéristiques et performances de ces techniques dans une stratégie de soutenabilité, comme celle proposée par Le [?] peut offrir des opportunités pour modifier des pièces en fin de vie et les réutiliser avec ou sans modifications, sans retourner au niveau de matière première.

1. Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

fig1.eps

FIGURE 1 – Vision du processus général de la stratégie de Le [?].

Dans ce contexte, le problème est d'identifier les étapes nécessaires pour modifier une pièce donnée afin qu'elle soit adaptée à de nouvelles caractéristiques. Ce travail fait l'hypothèse que la pièce initiale et la pièce à obtenir sont toutes les deux complètement définies.

L'objectif du présent article est de traiter cette hypothèse de méconnaissance des pièces de départ les plus appropriées afin de fabriquer la pièce souhaitée. Autrement dit, c'est de trouver la manière d'identifier la pièce de départ qui permette d'atteindre à moindre coût les fonctions et / ou géométries de la pièce finale souhaitée. La réponse à cet objectif requiert de trouver des moyens d'identifier la meilleure pièce de départ qui permettra d'atteindre à moindres coûts les fonctions ou géométries de la pièce finale souhaitée.

Pour cela, une méthode en trois étapes est proposée afin de caractériser les pièces de départ, de les comparer avec la pièce finale souhaitée en enfin d'évaluer et sélectionner la pièce initiale la plus pertinente.

Après la description du déroulement de la méthode proposée, un cas d'étude est détaillé. Il s'agit de fabriquer une potence de vélo en aluminium de conception récente à partir d'anciennes pièces dont la géométrie était différente. Pour ce cas d'étude, nous utiliserons un robot 6 axes combiné avec un poste à souder de type MIG² utilisant la technologie CMT³ pour déposer des cordons de soudure d'aluminium sur les potences à configurer. Enfin, les résultats seront discutés et une conclusion sera tirée quant à l'apport de l'approche proposée pour sélectionner un pièce initiale adéquate.

1 Revue de littérature

Cette section présente les deux sujets principaux traités dans cet article. Le premier sujet porte sur le remanufacturing et ses différentes stratégies. La seconde porte sur les techniques de fabrication, qu'elles soient additives ou soustractives et les manières de les appliqués au remanufacturing.

1.1 Remanufacturing

Selon la littérature, la stratégie de remanufacturing est généralement composée de trois phases principales : le prétraitement, le traitement et le post-traitement. Le et al. [?] représentent l'ensemble du processus comme le passage par les trois étapes et le recours à différentes techniques, notamment les procédés additifs et soustractifs. Le travail présenté dans cet article se positionne dans l'étape de « pre-processing » et concerne plus spécifiquement la sélection des pièces des seront reconfigurées.

1.2 Fabrication pour le remanufacturing

Les deux points essentiels sur lesquels Le [?] a travaillé sont la planification du processus de fabrication et la gamme de fabrication associée. Ainsi, selon les procédés additifs et soustractifs que l'on envisage d'utiliser la gamme de fabrication obtenue peut être très différente. Parmi les exemples d'application de la fabrication additive pour le remanufacturing, Wilson et al. [?] ont démontré l'efficacité de la technologie Direct Metal Deposition (DMD) dans le reconditionnement des aubes de turbines. Par ailleurs, la technologie d'usinage par commande numérique est généralement utilisée dans des étapes de finition

2. Metal Inert Gaz

3. Cold Metal Transfer

pour obtenir des composants avec des niveaux élevés d'état de surface et de précision dimensionnelle que l'on peut difficilement atteindre en fabrication additive. Cette technologie permet également un temps de production relativement court [?, ?, ?].

Kerbrat et al. [?] ont utilisé une approche de conception pour la fabrication afin d'évaluer la complexité des fonctions au stade de la conception et ont indiqué qu'elle pouvait être produite par usinage ou par procédé de fabrication additive. Cette identification fournit des informations précieuses pour la conception de la planification de processus combinés additifs et soustractifs.

Enfin, selon que l'on s'intéresse à des pièces en fin de vie ou neuves, il est nécessaire de s'intéresser à leurs caractéristiques de surface, leur géométrie et leurs matériaux afin de vérifier s'il est vraiment possible de modifier une pièce en fin de vie pour obtenir une nouvelle pièce fonctionnelle. Dans ce cadre, Vayre et al [?] ont mené une étude pour confirmer la qualité métallurgique des pièces refabriquées par la technique de fusion par faisceau d'électrons (EBM). Contrairement aux procédés de fabrication conventionnels où les pièces sont généralement obtenues en usinant une pièce forgée, partie brute laminée, injectée, extrudée ou moulée, la fabrication additive consiste à construire un objet par ajout de matière couche par couche. Aujourd'hui, de nombreuses techniques de fabrication additive offrent la possibilité de fabriquer des pièces avec différents types de matériaux, comme les polymères, les métaux, les céramiques et les composites [?]. Parmi ces techniques nous trouvons la technologie CMT qui consiste en le soudage par transfert à froid issu d'un procédé de soudage semi-automatique modifié développé par Fronius d'Autriche en 2004 [?]. Un inconvénient de cette technique est que, pendant le soudage, les variations de température dans les soudures et les métaux-mères ont des effets importants sur les caractéristiques des matériaux, les contraintes résiduelles ainsi que sur la précision des dimensions et de la forme des produits soudés [?]. Elle a néanmoins été utilisée dans le cas d'application décrit ci-après, en raison de son accessibilité pour les auteurs.

2 Méthodologie proposée

L'objectif de cette méthode est de permettre de sélectionner parmi un ensemble de pièces existantes celle qui permettra d'atteindre une pièce finale déterminée en cherchant le meilleur compromis entre des critères fonctionnels, des critères de soutenabilité environnementales et des critères de coûts. Cette méthode se décompose en 3 grandes étapes :

- Une étape de caractérisation des pièces initiales et de la pièce finale
- Une association entre le modèle de chaque pièce initiale et celui de la pièce finale
- L'évaluation des performances des associations ainsi obtenues selon les 3 catégories d'indicateurs afin de sélectionner la meilleure pièce de départ possible.

2.1 Caractérisation des pièces

Les critères de base qui sont pris en compte pour caractériser les pièces de départ sont déterminés au travers de trois approches afin d'estimer le niveau de détails et de précision nécessaires. Premièrement, les pièces de départ et les pièces finales sont décrites visuellement, en regardant leur état de surface, leurs matériaux, les procédés de fabrication qui ont permis de les obtenir (forgeage, soudage etc.), leur géométrie. Deuxièmement, des mesures basiques à l'aide d'un pied-à-coulisse et d'outils de mesure manuels ont été effectués. Troisièmement, les pièces ont été numérisées par scanner 3D pour générer les modèles CAO de chacune. Ces 3 étapes sont décrites dans les paragraphes suivants.

Caractérisation visuelle Cette première caractérisation visuelle permet d'acquérir certaines connaissances de base sur l'échantillon de pièces de départ et sur la pièce finale. En effet, elle fournit des informations basiques sur leurs matériaux, leurs états de surfaces (présence de peinture, d'un revêtement, etc.) et le potentiel procédé qui en a permis l'obtention. Une attention particulière sera portée sur des critères d'usure tels que la présence ou l'absence de corrosion ou des traces d'abrasion qui donnent des indications sur le potentiel d'une pièce pour sa refabrication. Lors de cette étape on essaiera également de définir les surfaces fonctionnelles des pièces afin de faciliter l'étape de combinaison.

Caractérisation par mesure basique Avec cette approche, les pièces sont caractérisées géométriquement avec des outils de mesure tels que le pied-à-coulisse ou un reglet afin d'obtenir des informations sur leurs dimension ou géométries (diamètres, angles et longueurs). Ces mesures peuvent servir pour faire des comparaisons entre les différentes pièces (initiales et finales) voire en éliminer certaines qui peuvent avoir des dimensions trop éloignées de la pièce finale souhaitées.

Caractérisation par scanner 3D La troisième approche permet d'acquérir le plus d'informations possibles sur les pièces grâce à la numérisation par scanner 3D. Cette étape va de plus permettre d'obtenir un modèle volumique de chaque pièce qui est nécessaire pour établir la gamme de fabrication selon la méthode proposée par Le [?].

2.2 Association entre un pièce de départ et un pièce finale

Après avoir caractérisé les pièces dans l'étape précédente, les résultats obtenus sont exploités pour faire toutes les combinaisons possibles entre les pièces de départ et la pièce finale, en superposant leurs surfaces fonctionnelles. D'abord, chaque pièce initiale est calée par rapport à la pièce finale afin de rapprocher leurs surfaces fonctionnelles. Les compromis ou contraintes observées sont notées afin d'obtenir une synthèse à même de guider la décision, tout en cherchant à à minimiser les écarts géométriques avec les pièces finales. Dans le cas de la combinaison de plusieurs pièces de départ, il serait possible de réduire la consommation de matière et le temps de processus, en parvenant à des caractéristiques plus proches.

2.3 Sélection finale des potences potentielles

Après avoir défini les combinaisons de pièces en se basant sur les caractéristiques mesurées, les meilleures pièces de départ sont sélectionnées. La sélection se fait par jugement d'expert, au regard des informations recueillies lors des étapes précédentes. La sélection des meilleures combinaisons est basée sur le pourcentage de matière conservée lors du passage de la pièce de départ à la pièce finale ; la quantité de transformation effectuée par chaque processus de fabrication (procédé soustractif et le procédé additif) et les écarts de caractéristiques géométriques entre la potence de départ et la potence la finale. L'ampleur des processus à mettre en œuvre pour transformer les pièces prend en compte la longueur des trajectoires de la machine ou bien l'ordre des épaisseurs à enlever. Concernant, le temps de fabrication additive, le volume de matière à ajouter ou encore la longueur de cordon de soudure employé pour chaque pièce ou combinaison sélectionnée. Le but de cette étape sera de prendre la pièce ou les combinaisons qui représentent un pourcentage de matière enlevée et un pourcentage de de matières ajoutée acceptables et des temps d'usinage et fabrication additive optimums. La Table 1 récapitule les différents critères de choix définis et les approches associées pour leur évaluation.

Critères	Approche visuelle	Approche Mesure	Approche Scan
La géométrie actuelle		X	
Dimensions		X	
Procédé de fabrication	X		
État de surface	X		
Présence de corrosion	X		
Traces d'usure	X		
Surfaces fonctionnelles			X

TABLE 1 – Critères tiré par chaque approche

3 Etude de cas

Le cas d'application proposé est le remanufacturing de potences de vélo pour obtenir une autre potence de vélo moderne dont les dimensions sont différentes (fig2.c). Cette pièce correspond à l'axe reliant le haut de la fourche et le guidon du vélo. Deux types sont disponibles pour les jeux de direction standards vissés et les jeux de direction A-headset. D'abord, les potences à plongeur (fig.2.b) pour les jeux vissés qui entrent dans le pivot de fourche et y restent bloquées grâce à un expandeur. Ensuite, les potences A-Headset (fig.2.a) qui enserrant le pivot de fourche et se bloquent autour de celui-ci par pincement. Ainsi, pour relier cette potence au cintre on utilise en générale une bride fermée ou ouverte. Fig.2.a Montage de potence A-Head-Set Fig.2.b Montage de potence à plongeur Fig.2.c Potence finale visée

3.1 Caractérisation des pièces

Dans ce cas d'étude, les trois niveaux d'inspection ont été étudiés (voir III.1) afin de trouver l'applicabilité de chacun.

Inspection visuelle D'après une analyse visuelle de notre échantillon de potences initiales, une classification se dégage avec cinq potences A-Head-Set (fig.3 à gauche) et une potence à plongeur (fig.3 à droite). Étant donné que la pièce finale visée est de type A-Head-Set, on peut déjà écarter la potence à plongeur dont la forme et les dimensions sont trop différentes de la pièce finale pour pouvoir la remanufacturer. Les résultats de cette première inspection de toutes les pièces initiales sont résumés dans la Table 2. Fig.3 Potence A-Head-set / Potence à plongeur

Ensuite les surfaces fonctionnelles des potences A-Headset ont été identifiées. Chaque potence a trois surfaces en contacts avec d'autres composante du vélo; ces composantes sont le guidon, le pivot de la fourche et le roulement du jeu de direction. À partir de ces trois contacts on a pu définir les surfaces fonctionnelles de la potence représentée sur la Fig.5. Ainsi, SF1 correspond à la surface de contact cylindrique entre la potence et le guidon; SF2 correspond à la surface de contact cylindrique entre la potence et la fourche; SF3 correspond à la surface de contact plane entre la potence et le roulement du jeu de direction. Fig.5 Surfaces fonctionnelles d'une potence A-Head-Set.

Inspection par mesure basique : pied-à-coulisse L'étape suivante est l'inspection par mesures basique pour obtenir les données géométriques permettant de caractériser ces potences. Ces caractéristiques sont d'une part les dimensions des surfaces fonctionnelles et d'autre part des dimension permettant de positionner ces surfaces les unes par rapport aux autres. Ainsi, on mesurera les diamètres du

Potence	Procédé de fabrication	Matériaux	État de surface	Corrosion	Traces d'usure
P1	Moulage	Aluminium	Chromage	Pas de vis	Intérieur
P2	Moulage + soudage	Aluminium	Peinture	Pas de vis	Intérieur
P3	Moulage	Aluminium	Chromage	Pas de vis	Intérieur
P4	Moulage	Aluminium	Revêtement	Aucune	Extérieur
P5	Moulage	Aluminium	Brut	Pas de vis	Intérieur
P6	Moulage	Aluminium	Peinture	Aucune	Aucune

TABLE 2 – Caractéristiques des pièces de départ (inspection visuelle)

Potence	Longueur	Diamètre pivot	Diamètre cintre	Hauteur	Angle
P1	127 mm	28 mm	25 mm	26 mm	5 deg
P2	91 mm	28,5 mm	26 mm	35 mm	7 deg
P3	95 mm	28 mm	31 mm	30 mm	6 deg
P4	115 mm	28,5 mm	25,5 mm	35 mm	7 deg
P5	110 mm	28 mm	25 mm	32 mm	6,50 deg
P6	92 mm	28,5 mm	31,5 mm	30 mm	6 deg
PF	40 mm	28,5 mm	31,5 mm	15,75 mm	0 deg

TABLE 3 – Caractéristiques des potences initiales et finale (Inspection par mesure)

pivot et du cintre. De plus, la longueur, l'angle et la hauteur du centre du cintre par rapport à la surface SF3 seront mesurées. Les résultats de cette inspection sont présentés dans la Table.3

Afin de rendre les résultats obtenus par mesure lisible, une comparaison (table.4) entre les dimensions des potences initiales et la potence finale a été effectuée. Cette comparaison a permis de distinguer les potences initiales les plus proches géométriquement de la potence visée en fonction du pourcentage d'écart. La première remarque qu'on peut tirer de cette comparaison est que toutes les potences de départ ont une longueur au moins deux fois plus grande que la longueur de la potence finale, ainsi qu'un angle non négligeable qui varie dans une intervalle [+5,+7]; cependant, cette angle est uniquement utilisée commercialement. La hauteur mesurée du centre du cintre par rapport à la surface de base le long de l'axe du pivot permet de mieux définir la position du cintre par rapport à la fourche. En regardant les deux autres critères, qui sont le diamètre de pivot et le diamètre de cintre, on peut conclure que les potences P3 et P6 sont les plus proches de la potence finale par rapport aux autres (P1, P2, P4 et P5).

3.2 Combinaisons des potences de départ et finales

Après avoir obtenu les résultats de l'approche visuelle et l'approche de mesure basique (l'approche de scanner 3D sera traité plus tard), les combinaisons entre les potences de départ et la potence finale ont été effectuées en superposant leurs surfaces fonctionnelles manuellement (Fig.4).

Potence	Longueur	Pivot	Cintre	Hauteur	Angle
P1	317,5%	98,25%	76,36%	165,08%	+ 5
P2	227,5%	100%	82,54%	222,22%	+7
P3	237,5%	98,25%	98,41%	190,47%	+6
P4	287,5%	100%	80,95%	222,22%	+7
P5	275%	98,25%	76,36%	203,19%	+6,5
P6	230%	100%	100%	190,47%	+6

TABLE 4 – Caractéristiques des potences initiales / Caractéristiques de la potence finale

Combinaisons	Masse conservée	Nb. opé. soustractif	Nb. opé. additif	Écarts géométriques
P1-PF	30%	3	2	très important
P2-PF	50%	3	2	très important
P3-PF	50%	2	2	Important
P4-PF et P5-PF	30%	3	2	Important
P6-PF	50%	2	2	Négligeable

TABLE 5 – Critères de sélection des meilleures combinaisons

Fig.4 Superposition manuelle des potences

Ensuite, chaque potence initiale a été calée par rapport la potence finale afin de rapprocher leurs surfaces fonctionnelles SF1, SF2 et SF3. L'utilité de cette approche est de regarder toutes les surfaces fonctionnelles superposées l'une par rapport à l'autre (e.g. superposer la SF1 de la potence P1 avec la SF1 de la potence finale PF) et noter les contraintes et les compromis présents. En général, toutes les combinaisons représentent des contraintes et des compromis qu'il faut minimiser pour rapprocher les surfaces fonctionnelles des potences initiales aux surfaces fonctionnelles de la potence finale ; les contraintes majeures rencontrées lors de la superposition de ces surfaces fonctionnelles ont été la différence des dimensions des diamètres de cintre et de pivot. Cela implique peut-être la nécessité d'enlèvement de la matière pour certaines potences ou d'ajout de matière pour d'autres. Il existe également un décalage au niveau des deux premières surfaces fonctionnelles SF1 et SF2 généré par la hauteur du centre du cintre par rapport à la surface de base le long de l'axe de pivot. Si on prend la combinaison de la potence initiale P1 et la potence finale PF, en premier temps nous avons calé la surface fonctionnelle SF1 de la potence initiale P1 par rapport à la surface fonctionnelle SF1 de la potence finale, alors elles sont décalées à cause de l'angle de la potence P1. En plus, la potence P1 a un capot à deux vis contre un capot à quatre pour la potence PF. Aussi, on a remarqué une différence au niveau des diamètres de cintre des deux potences (diamètre de cintre de potence P1 est supérieur au diamètre de la potence PF). En réitérant cette opération pour la deuxième surface fonctionnelle SF2 et la troisième surface fonctionnelle SF3 des deux potences P1 et PF. Concernant SF2, nous avons trouvé que la surface SF2 de la potence P1 est aussi décalées par rapport à la surface SF2 de la potence PF à cause de l'angle de la potence P1. Notons aussi que la potence P1 a un diamètre de pivot plus grand que le diamètre de pivot de la potence PF. En revanche, les hauteurs des cylindres de pivots des deux potences sont égaux. La superposition de la troisième surface fonctionnelle SF3 des potence P1 et PF nous a montré que la surface de SF3 de la potence P1 est légèrement grande par rapport à la surface SF3 de la potence PF. Le même principe a été appliqués sur toutes les autres combinaisons et n'ont pas été reproduits ici par souci de place.

3.3 Sélection finale des potences potentielles

Dans cette étape la sélection des meilleures pièces de départ est effectuée, en se basant sur les résultats de cette approche et les approches précédentes, en choisissant les meilleures combinaisons potence initiale - potence finale. La sélection de ces derniers est basée sur les critères définis précédemment (partie III.3) ; ces critères sont le pourcentage de matière à conserver ; le temps des processus de fabrication (procédé soustractif et le procédé additif) et l'écart de caractéristiques géométriques entre la potence idéale et la potence la finale (Table 6).

Pourcentage de masse à conserver Ce critère va nous permettre de classer nos potences initiales selon la quantité de matière gagnée sur chaque pièce. Plus que le pourcentage de masse à conserver est

important plus que le coût et le temps de processus diminuent. En effet, Pour évaluer chaque potence initiale est comparée avec la potence finale pour identifier l'endroit où nous avons besoin de couper la potence initiale et décider quelle partie de la potence initiale nous devons garder pour s'approcher géométriquement de la potence finale. On a ainsi trouvé que les potences P2, P3 et P6 représentent un pourcentage important de 50%. En revanche, les potences P1, P4 et P5 ont un pourcentage faible de 30%.

3.3.1 Quantité de transformation par processus

La connaissance de la quantité de transformation par processus a permis d'estimer le temps des processus. En effet, pour avoir le temps d'usinage on détermine la longueur des trajectoires de la machine et l'ordre des épaisseurs de matière à enlever. Concernant, le temps de fabrication additive nous allons calculer le volume de matière à ajouter et calculer la longueur de cordon de soudure vu que nous allons travailler avec le robot de soudure CMT. Le calcul de temps des processus sera traité plus tard.

Fabrication soustractive Après avoir évaluer la quantité de transformation de procédé soustractif pour chaque potence de départ, on a trouvé que les potences initiales P3 et P6 représentent moins de transformation par rapport aux autres potences. En effet, ces deux potences ont les mêmes diamètres de cintre et de pivot que la potence finale. Par contre, ces potences ont besoin d'être coupé et finit par usinage.

Fabrication additive En regardant chaque potence initiale vis-à-vis la potence finale, on a trouvé qu'elles avaient toutes besoin d'un capot à quatre vis et un volume de matière pour compléter la surface fonctionnelle SF1. Le capot à quatre vis et le volume de matière seront ajouter par le robot de soudure CMT.

Écarts géométriques Pour évaluer l'écart des caractéristiques géométriques nous avons regardé l'influence de la hauteur du centre du cintre par rapport à la surface fonctionnelle SF3 le long de l'axe du pivot des potences initiales ; et la différence au niveau de diamètre de cintre et de diamètre de pivot. Pour cela, on a défini trois niveaux d'écart géométriques : « écarts géométriques très importants » correspond à l'influence de la hauteur du centre du cintre par rapport à la surface fonctionnelle SF3 et l'influence de la différence des diamètres de cintre et de pivot ; « écarts géométriques important » qui correspond uniquement à l'influence de la hauteur du centre du cintre par rapport à la surface fonctionnelle SF3 et « écarts géométriques négligeables » qui signifie que la hauteur du centre du cintre par rapport à la surface fonctionnelle SF3 n'a pas d'influence. Pour ce critère on constate que la potence initiale P6 est la plus prometteuse vu qu'elle présente des écarts géométriques négligeables. Après avoir évalué chaque potence initiales selon les critères de sélection définis, on peut dire que la potence P6 est la potence la plus prometteuses. On la sélectionne donc en se basant sur plusieurs critères. D'abord, son état de surface propre vu qu'elle ne présente ni de corrosion ni d'usure. Par contre, sa surface contient de la peinture qu'on pourra traiter rapidement par sablage. Ensuite, cette potence a les mêmes dimensions de diamètres (cintre et pivot), ce qui signifie moins de modification d'où moins de temps de processus. Ensuite, son pourcentage de masse à conserver est de l'ordre de 50% plus grand que le pourcentage des

autres potences initiales sauf la potence P2 et P3 qui ont également un pourcentage de masse à conserver de 50%, mais on ne les a pas sélectionnées vu qu'elles présentent un écart géométrique difficile à modifier. En effet, ces deux potences ont un angle de $\angle 7$ qui a généré un décalage au niveau des surfaces fonctionnelles lors de la combinaison de ces potences avec la potence finale visée. En revanche, la présence de l'angle de $\angle 6$ sur la potence P6 ne décale pas ces surfaces fonctionnelles par rapport aux surfaces fonctionnelles de la potence finale PF. Comme nous avons mentionné précédemment (voir IV.1.ii) cet angle est uniquement utilisé commercialement donc nous pouvons négliger son influence.

4 Discussion et conclusions

Les travaux présentés dans cet article visent à développer une méthodologie en s'appuyant sur les procédés de fabrication additive et soustractive. Le but de la méthodologie est de répondre à la question de recherche comment identifier la pièce de départ qui permet d'atteindre à moindre coût les fonctions et / ou géométries de la pièce finale souhaitée ? En effet, la méthodologie que nous avons proposée nous a permis de définir le maximum de critères possibles pour identifier la meilleure pièce de départ puis les évaluer selon plusieurs approches. D'après la méthodologie, la pièce en fin doit être évaluée selon trois étapes : d'abord, visuellement en regardant son état de surface pour vérifier s'il y a de la peinture, la corrosion ou encore de l'usure, connaître son matériau est également important. Ensuite, il est pertinent de mesurer les dimensions et définir la géométrie actuelle de la pièce en fin de vie. En plus, l'idée de faire des combinaisons entre les pièces de départ et les pièces finales nous permet de prendre les avantages de chaque pièce initiale individuelles, tout en minimisant les écarts géométriques avec les pièces finales d'une part. D'autre part, en créant une pièce très proche de l'une des pièces finales à partir de ces combinaisons peut réduire la consommation de matière et le temps de processus. Les critères de choix des meilleures pièces de départ que nous avons définis via notre méthodologie peuvent être modifiés vu que nous n'avons pas traité l'approche de scanner 3D, cette approche peut permettre d'avoir les modèles CAO de nos potences de départ ce qui pourra nous donner accès à d'autres critères de choix plus pertinents.

5 Remerciements

Les auteurs aimeraient bien remercier S.MART pour le robot et IDEX pour les scans 3D ainsi que les responsables de la plateforme GINOVA pour leur temps et leur aide.

Références

- [1] INSEE, Robotique, impression 3D : des technologies propres à l'industrie Les TIC et le commerce électronique dans les entreprises en 2018. En ligne : <https://insee.fr/fr/statistiques/3896461?sommaire=3856444> 2019.
- [2] B. Vayre, F. Vignat, F. Villeneuve, Identification on some design key parameters for additive manufacturing : application on Electron Beam Melting, *Procedia CIRP* 7 (2013) 264 – 269.
- [3] Van Thao Le, Proposition d'une stratégie soutenable pour donner une nouvelle vie à une pièce en s'appuyant sur les techniques de fabrication additive, Thèse (2017).
- [4] J. Michael Wilson, et al, Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis, *Journal of Cleaner Production* 80 (2014) 170-178.

- [5] 2 V.T. Le, H. Paris, G. Mandil, Process planning for combined additive and subtractive manufacturing technologies in a remanufacturing context, *Journal of manufacturing systems* 44 (2017) 243-254.
- [6] 1 O. Kerbrat, P. Mognol, J.Y. Hascoet, A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. *Computers in Industry, Computers in Industry* 62 (2011) 684-692.
- [7] 7 S. Selvi , A. Vishvaksenan , E. Rajasekar, Cold metal transfer (CMT) technology - An overview, *Defence Technology* 14 (2018) 28 – 44.
- [8] 9 Talalaev Robert, Veinthal Renno, Laansoo Andres, Sarkans Martins. Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products. *Est J Eng* 2012;18 : 243-50.
- [9] 4 V.T. Le, H. Paris, G. Mandil, Extraction of features for combined additive manufacturing and machining processes in a remanufacturing context, *Section 2.1 Additive Manufacturing* (2016) 181-190.