

# Remanufacture de pièce par procédé additif et soustractif : proposition méthodologique et cas d'études sur des potences de vélo

Y. MALYANI<sup>a</sup>, D. EVRARD<sup>a</sup>, G. MANDIL<sup>a</sup>

a. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP<sup>1</sup>, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

## Résumé :

*Ce projet 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 industriel 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 industries. Actuellement, les processus de la fabrication additive permettent une fabrication de produits avec un matériau compatible avec leur usage. La prise en compte des performances de ces techniques dans une stratégie soutenable comme celle proposée dans ce projet peut offrir des opportunités pour modifier les pièces et les réutiliser directement sans retourner au niveau de matière première. Le problème est donc d'identifier les étapes pour modifier une pièce donnée afin qu'elle soit adaptée à de nouvelles caractéristiques. Répondre à cette question requiert de trouver des moyens d'identifier la pièce de départ qui permette d'atteindre à moindres coûts les fonctions ou géométries de la pièce finale souhaitée, d'une part. Pour cela, il est nécessaire, entre autres, de trouver comment caractériser les pièces initiales potentielles. Pour étudier cette question, un cas d'étude a été utilisé. Il s'est agi de fabriquer des potences de vélo en aluminium de conception récente à partir d'anciennes pièces dont la géométrie était différente. Dans le cas du recours à la fabrication additive, la technologie Cold Metal Transfer a été employée grâce à un robot de soudure permettant les dépôts de matière nécessaires. Cet article présente les résultats de cette recherche. Tout d'abord, une revue de littérature pour déterminer les caractéristiques des différentes pièces potentielles en fin de vie telles que l'état de surface de la pièce, les caractéristiques de matières et les caractéristiques géométriques est présentée. Ensuite, la méthodologie permettant d'analyser ces caractéristiques afin de choisir la meilleure pièce de départ pour produire la pièce finale souhaitée, ainsi que les étapes de transformations nécessaires sont détaillés. Une troisième partie montre le cas d'études avec les potences de vélo. Enfin, une discussion sur l'apport d'une telle approche alliant procédés soustractifs et additifs pour la soutenabilité et le besoins d'autres considérations que purement techniques, des conclusions et perspectives seront proposées.*

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

1. Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

## 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 [1]. Les procédés de fabrication additive métallique sont utilisables pour la « refabrication » de pièces en fin de vie [2]. 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 [3] 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.

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 MIG<sup>2</sup> utilisant la technologie CMT<sup>3</sup> 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 une 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

Le remanufacturing consiste à re-fabriquer une pièce ou un produit ayant des performances équivalentes à celles d'un produit neuf, à partir de produits ou pièces usagées. 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. [3] 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 qui seront reconfigurées.

---

2. Metal Inert Gaz

3. Cold Metal Transfer

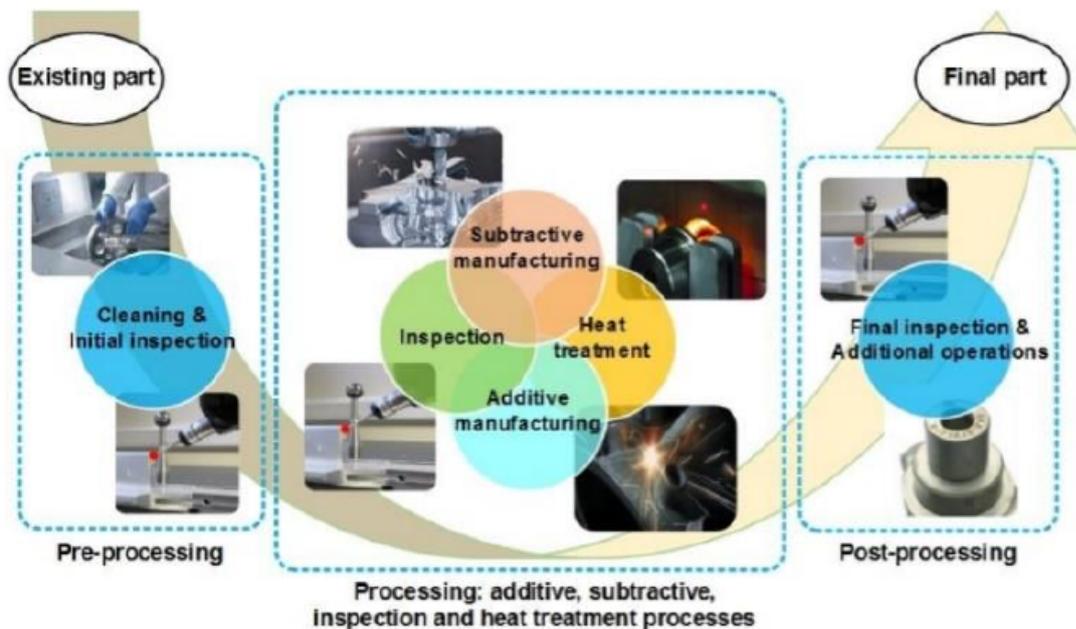


FIGURE 1 – Vision du processus général de la stratégie de Le [3].

## 1.2 Fabrication pour le remanufacturing

Les deux points essentiels sur lesquels Le [3] 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. [4] 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 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 [3, 4, 5].

Kerbrat et al. [6] 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. [2] 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 [3]. 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 [7]. 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 [8]. 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 environnementale 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 basiques et rapides de mise en oeuvre afin d'obtenir des informations basiques 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. L'objectif de cette étape de mesure basique, est de pourvoir sélectionner la meilleure pièce de départ parmi un lot. Une fois la pièce sélectionnée, une caractérisation plus fine sera nécessaire pour déterminer sa gamme de remanufacture.

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	
Modèle numérique 3D			X

TABLE 1 – Critères tiré par chaque approche

**Caractérisation par scanner 3D** Cette 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 [3].

## 2.2 Association entre une pièce de départ et la 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. Ces combinaisons sont obtenues en essayant de superposer les 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 alors notées afin d'obtenir une synthèse à même de guider la décision, tout en cherchant à minimiser les écarts géométriques avec les pièces finales, la consommation de matière et le temps de refabrication.

## 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. Dans cet article, en première approche, 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 matière 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.

## 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 (voir figure 4). Cette pièce permet de réaliser



FIGURE 2 – Montage de potence A-Head-Set



FIGURE 3 – Montage de potence A-Head-Set



FIGURE 4 – Potence finale visée



FIGURE 5 – Potence aheadset / Potence à plongeur

une liaison encastement entre le pivot de la fourche et le guidon du vélo. Deux types de potences sont disponibles pour les jeux de direction standards vissés et les jeux de direction aheadset. D'abord, les potences à plongeur (figure 3) pour les jeux vissés qui entrent dans le pivot de fourche et y restent bloquées grâce à un expandeur. Ensuite, les potences aheadset (figure 2) qui enserrant le pivot de fourche et se bloquent autour de celui-ci par pincement en utilisant une bride fermée ou ouverte.

### 3.1 Caractérisation des pièces

Dans ce cas d'étude, les trois niveaux d'inspection (voir table 1) ont été étudiés 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 aheadset (figure 5 à gauche) et une potence à plongeur (figure 5 à droite). Étant donné que la pièce finale visée est de type aheadset, 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.

Ensuite les surfaces fonctionnelles des potences aheadset ont été identifiées. Chaque potence a trois



FIGURE 6 – Surfaces fonctionnelles d'une potence headset.

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	Anodisation	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)

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 figure 6. 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.

**Inspection par mesure basique : pied-à-coulisse** Pour notre cas d'étude, les mesures basiques ont été obtenues par des outils basiques tels que le pied à coulisse ou le réglet, afin d'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 dimensions permettant de positionner ces surfaces les unes par rapport aux autres. Ainsi, on mesurera les diamètres du 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 lisibles, 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 un intervalle  $[+5^\circ, +7^\circ]$  ; cependant, cet angle est uniquement utilisé commercialement. La hauteur mesurée du centre du cintre par rapport à la surface de base le long de

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

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

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

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 (voir figure 7).

Ensuite, chaque potence initiale a été calée par rapport à la potence finale afin de rapprocher leurs surfaces fonctionnelles SF1, SF2 et SF3 (voir figure 6). 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



FIGURE 7 – Superposition manuelle des potences

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

TABLE 5 – Critères de sélection des meilleures combinaisons

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.

Afin de mieux illustrer l'approche, le paragraphe suivant va détailler la façon de combiner la potence initiale P1 avec la potence finale PF. Dans un premier temps nous avons superposé la surface fonctionnelle SF1 de la potence initiale P1 avec la surface fonctionnelle SF1 de la potence finale. Puis la position axiale des 2 cylindres a été choisie de façon à faire coïncider la surface SF2 avec le plus de matière possible de la potence P1. D'autre part, nous avons également remarqué que la potence P1 avait quelques caractéristiques différentes de la potence PF : P1 a un capot à deux vis contre un capot à quatre vis pour la potence PF. P1 a également un diamètre de la surface SF2 plus petit que celle de PF. Nous avons ensuite réitéré la superposition des surfaces fonctionnelles en utilisant les surfaces SF2 et SF3 pour compléter la liste des contraintes et des compromis résultant de ces associations.

Le même principe a été appliqué sur toutes les autres combinaisons de potences initiales avec la potence finale. Ces résultats n'ont pas été reproduits ici par souci de concision.

### 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 des obtenus lors de la combinaison entre la pièce finale et les pièces initiales candidates.

La sélection des meilleures combinaisons est basée sur les critères définis dans la section 2.3. Ces critères sont le pourcentage de matière conservée ; le temps des processus de fabrication (procédés soustractifs et procédés additifs) et l'écart de caractéristiques géométriques entre la potence idéale et la potence finale. Les résultats de l'évaluation de ces critères à dire d'expert sont présentés dans la table 5.

#### 3.3.1 Pourcentage de masse à conserver

Ce critère va nous permettre de classer nos potences initiales selon la quantité de matière conservée sur chaque pièce. Plus le pourcentage de masse conservée est important, plus 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 l'ordre de 50%. En revanche, les potences P1, P4 et P5 ont un pourcentage plus faible de l'ordre de 30%.

### 3.3.2 Temps de transformation par processus

La connaissance du nombre de phases de la gamme de transformation a servi ici d'estimateur pour le temps de processus. Le nombre de phase du processus de fabrication a été évalué séparément pour les phases de fabrication soustractive et les phases de fabrication additive.

**Fabrication soustractive** Pour toutes les combinaisons étudiées il est nécessaire de recourir à 2 opérations soustractives. Tout d'abord il faut couper la potence initiale pour la raccourcir. Enfin nous aurons recours à de la fabrication soustractive pour réaliser les étapes de finitions. Néanmoins, nous avons aussi évalué que les potences initiales P3 et P6 nécessiteraient moins de transformation soustractives que les autres potences car ces dernières ont les mêmes diamètres de cintre et de pivot que la potence finale. Nous avons donc évalué qu'il faudrait 2 opérations soustractives pour les potences P3 et P6 et 3 opérations pour toutes les autres.

**Fabrication additive** De la même façon que pour les étapes soustractives, le fait que les potences P3 et P6 disposent d'une surface SF3 (fixation du cintre) au bon diamètre permettra de réutiliser le capot existant de ces potences. Pour toutes les autres potences, nous avons estimé qu'un nouveau capot serait fabriqué par une opération additive supplémentaire.

### 3.3.3 Ecart 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'écarts 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 importants » 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.

### 3.3.4 Sélection finale

En combinant les critères de la section 3.3 et les caractéristiques relevées lors de l'inspection initiale (voir table 3) nous pouvons confirmer que le choix de la potence P6 semble le plus prometteur. D'abord, son état de surface propre vu qu'elle ne présente ni trace 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.

## 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 ? Nous avons proposé une méthodologie en 3 étapes — caractériser, combiner évaluer — qui permet de sélectionner dans un lot une pièces de départ répondant aux mieux à 3 types de critères (fonctionnels, économiques et environnementaux). L'application au cas d'étude des potences de vélo a permis de démontrer l'applicabilité de la méthode puisque nous avons réussi à sélectionner une potence parmi 6 lors du traitement de ce cas d'étude choisi pour illustrer la proposition.

Néanmoins certains points pourraient être améliorés. Nous pensons en particulier qu'il serait utile de disposer de méthodes d'évaluation des critères de sélection moins subjectives que celles à base de dire d'expert. Par exemple, pour les associations des surfaces fonctionnelles, une approche utilisant les SATT [9] pourrait permettre de rendre le processus plus objectif. De la même façon le mode d'évaluation du critère de temps d'usinage semble facilement perfectible. Enfin, pour notre cas d'étude, nous n'avons utilisé que les moyens de métrologie disponible sur la plateforme S.mart GINOVA. Dans une perspective d'industrialisation de cette démarche il sera également nécessaire d'adapter les moyens de caractérisation (et de métrologie) aux objectifs, à la typologie des pièces envisagées et aux volumes de pièces à traiter, par exemple.

## 5 Remerciements

Les auteurs aimeraient bien remercier S.MART Grenoble Alpes et les personnels techniques de la plateforme GINOVA pour la mise à disposition du robot de soudage CMT et des autres moyens de production. Nous remercions également l>IDEX Univ. Grenoble Alpes pour la mise à disposition des scanners 3D.

## 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] 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 de doctorat, Université Grenoble Alpes (2017).
- [4] Wilson, J., 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] Le V.T. , Paris H., Mandil G., Process planning for combined additive and subtractive manufacturing technologies in a remanufacturing context, *Journal of manufacturing systems* 44 (2017) 243-254.
- [6] Kerbrat O., Mognol P., Hascoet J-Y., A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. *Computers in Industry, Computers in Industry* 62 (2011) 684-692.

- [7] Selvi S. Vishvakshenan A., Rajasekar E., Cold metal transfer (CMT) technology - An overview, Defence Technology 14 (2018) 28 – 44.
- [8] Talalaev R., Veinthal R., Laansoo A., Sarkans M., Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products. Est J Eng 2012 ;18 : 243-50.
- [9] Desrochers, A., Modèle conceptuel du dimensionnement et du tolérancement des mécanismes. Représentation dans les systèmes CFAO. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris (1991).