Tirer profit de la fabrication additive : un défi à relever

07/06/2016 PAR BRUNO JETTÉ, MORGAN LETENNEUR, MYKHAILO SAMOILENKO ET VLADIMIR BRAILOVSKI

Résumé

La fabrication additive permet de s'affranchir d'un nombre important de contraintes de conception. Cependant, si l'on souhaite tirer le maximum de cette technologie, il est nécessaire de concevoir les pièces spécifiquement pour cette technologie. Dans cette optique, une pièce d'aéronef est conçue en utilisant l'approche d'optimisation topologique. La pièce optimale n'existant pas, deux concepts de la même pièce sont modélisés, fabriqués et comparés à la pièce initiale en ce qui a trait à la performance. Cette étude a permis de révéler les différents problèmes liés au procédé de fusion sélective laser sur lit de poudre.

Introduction

On imagine souvent que la fabrication additive (FA) permettra de s'affranchir des contraintes de conception et de réaliser des pièces directement sorties de l'imagination des concepteurs. Cependant, les contraintes technologiques des différents procédés de FA impliquent des restrictions non négligeables. Conséquemment, si l'on souhaite profiter au maximum de cette technologie, il est nécessaire de concevoir les pièces spécifiquement pour la fabrication additive. Trois étudiants du Laboratoire sur les alliages à mémoires et systèmes intelligents

(LAMSI) de l'École de technologie supérieure (ÉTS) de Montréal ont tenté de relever ce défi en révisant le design d'une pièce habituellement fabriquée par des procédés classiques. Dans cet article, ces étudiants vous présentent la démarche permettant de revoir la conception d'une pièce structurale afin d'en maximiser les performances grâce à la FA.

Présentation de la pièce et des requis de conception

L'exercice en question est tiré d'un concours de conception tenu par GrabCAD et commandité par la division Fastening Systems & Rings d'Alcoa[1]. La pièce choisie pour cette étude est une pièce d'aéronef de forme relativement simple qui se retrouve notamment dans les charnières des portes du train d'atterrissage.

Dans ce cas-ci, l'enveloppe globale de cette pièce, représentée par la portion grise sur la figure suivante, est imposée par son contexte d'assemblage. La pièce est notamment fixée à une plaque par quatre vis et comporte un palier de roulement sphérique à son extrémité.

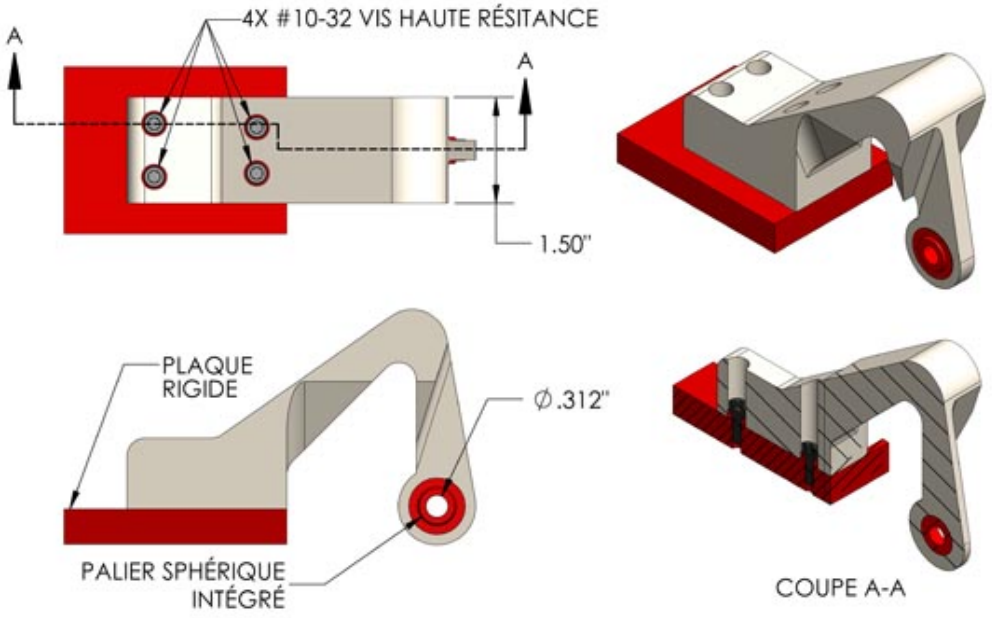


Figure 1 Pièce originale à optimiser

Comme illustré sur la figure ci-dessous, cette pièce est sollicitée selon trois cas de chargements distincts déterminés en fonction du contexte d'utilisation. Le matériau imposé

est un acier inoxydable 15-▲5PH. La contrainte équivalente (Von Mises) maximale dans la pièce ne doit pas dépasser 1000 MPa (le facteur de sécurité de conception est inclus dans les cas de chargement en question).

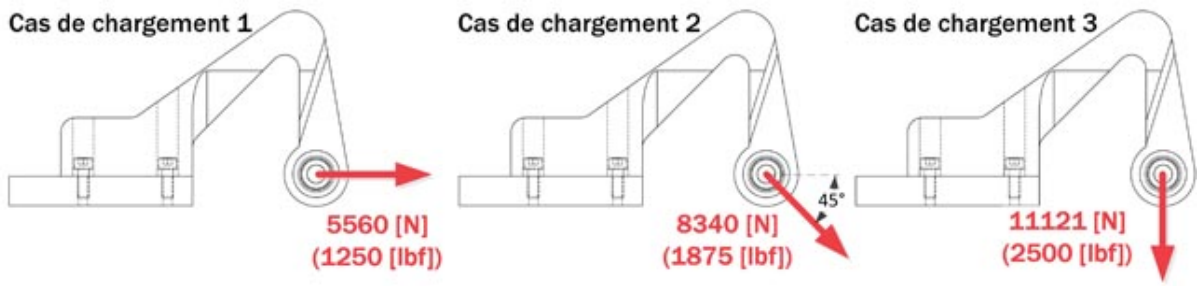


Figure 2 Trois cas de chargements différents à respecter

Le concours impose également le procédé de fabrication de fusion sélective laser sur lit de poudre ou selective laser melting (SLM), en anglais [4]. Conséquemment, la conception de la pièce doit prendre en compte les contraintes technologiques de ce procédé de fabrication.

Processus de raffinement du design grâce à l'optimisation topologique

Le processus d'optimisation d'une pièce en vue de la fabrication additive peut être scindé en cinq grandes étapes telles que présentées par le diagramme qui suit. Chacune de ces étapes demande l'utilisation d'outils d'ingénierie distincts. Tout au long du processus, le concepteur doit garder en tête les principes de fabricabilité par des procédés additifs, en l'occurrence par le procédé SLM. Par exemple, contrairement à certaines idées reçues, la fabrication par SLM nécessite l'utilisation de supports afin de maintenir les parties de la pièce en surplomb (non-autosupportées)[2]. Le lit de poudre présentant une densité bien plus faible que la pièce fabriquée, l'absence de support entraînerait l'effondrement de certaines sections.

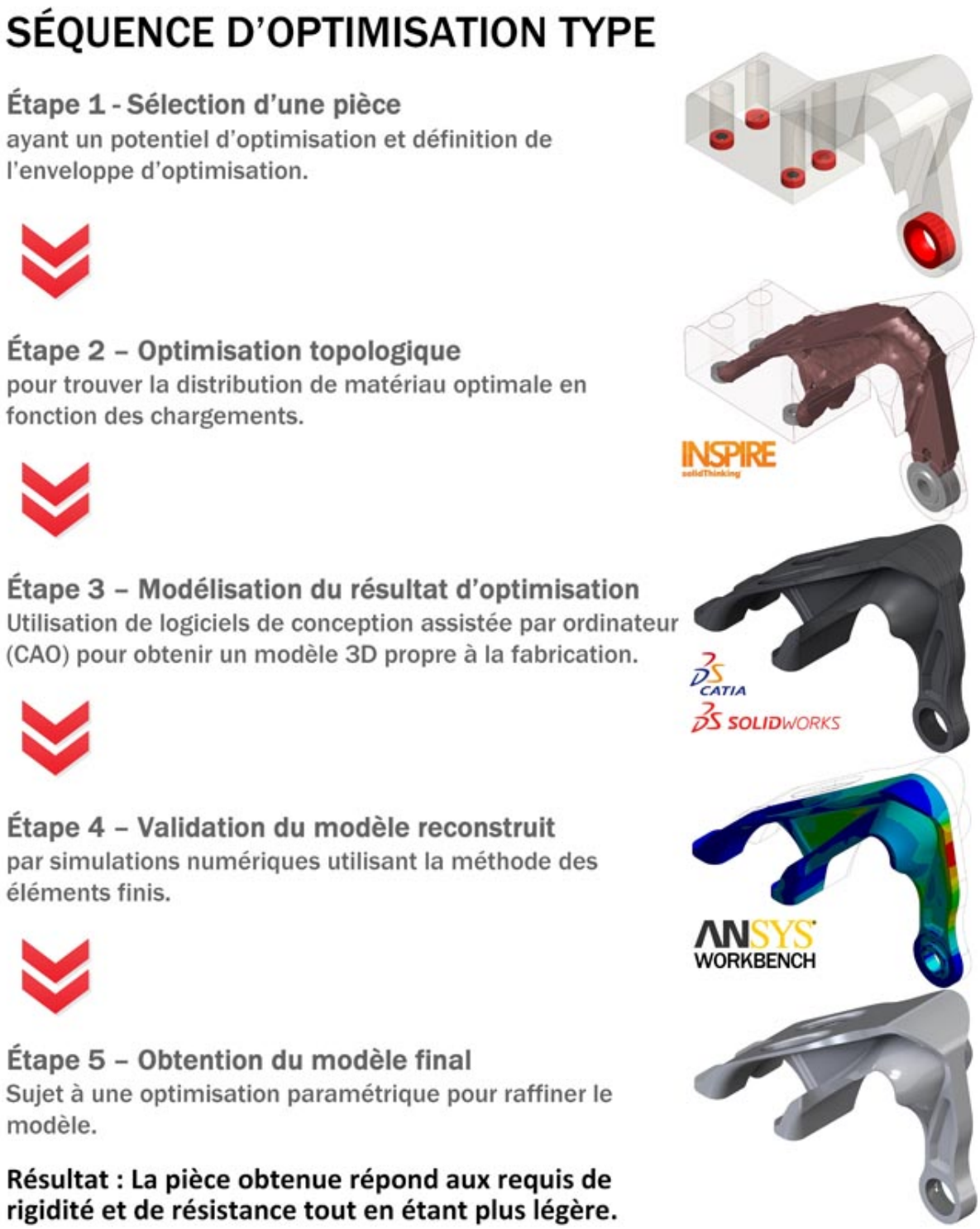


Figure 3 Séquence d'optimisation typique d'une pièce

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS :

Optimisation topologique

Afin de réviser le concept original de la pièce, différents essais d'optimisation topologique ont été effectués avec le logiciel INSPIRE de Solidthinking®.

L’optimisation topologique utilise la modélisation par éléments finis pour trouver dans un volume donné la répartition de matière idéale permettant de cibler un ou plusieurs objectifs de conception. Ces objectifs correspondent fréquemment à la maximisation de la rigidité (moins de déformation une fois chargée) ou à la minimisation de la masse des pièces, et ce, en conservant un niveau adéquat de résistance aux chargements [3].
Dans le cas présent, l’objectif d’optimisation utilisé a été celui de la minimisation de la masse. Cependant, afin de diversifier les résultats de modélisation d’optimisation, deux contraintes de forme ont été appliquées, à savoir la contrainte A (symétrie) et la contrainte B (direction d’extrusion). La vidéo qui suit illustre les résultats de l’optimisation topologique avec un objectif de minimisation de la masse de la pièce en appliquant la contrainte de symétrie (A) et en respectant le critère de résistance imposé par le concours.

Modélisation des résultats d’optimisation

Notez que l’optimisation topologique donne uniquement des indices quant à la géométrie de la pièce finale. C’est au concepteur de modéliser la pièce optimisée en utilisant un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO). Les deux pièces obtenues en utilisant les logiciels de CAO SolidWorks® (optimisation A) et CATIA® (optimisation B) sont présentées sur la figure 4. Les différences entre ces deux pièces prouvent qu’il peut exister une multitude de pièces optimisées, mais jamais « LA » pièce OPTIMALE

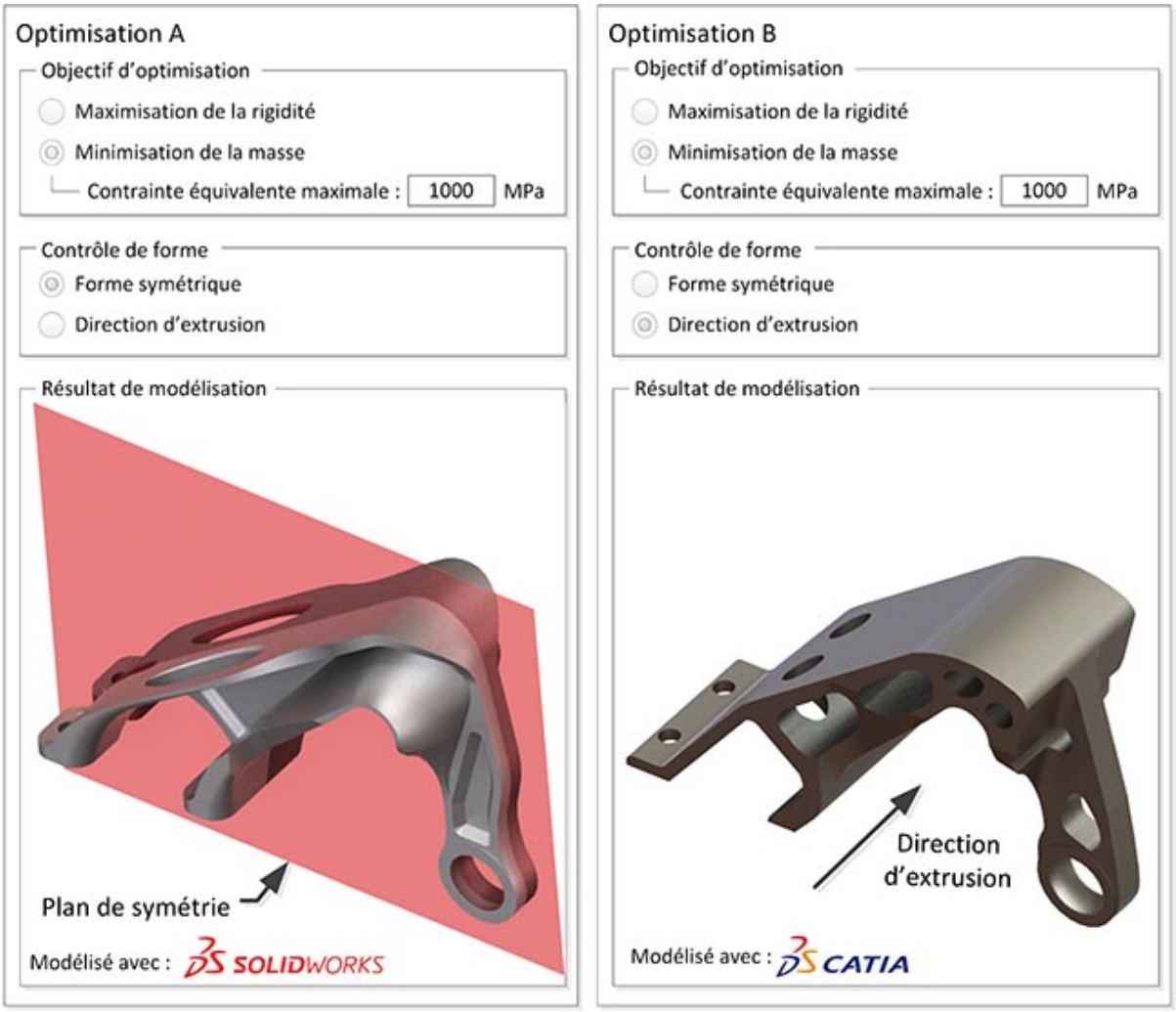


Figure 4 Réglages des deux approches d'optimisation ainsi que les résultats de modélisation

Validation du modèle reconstruit

Après cette tâche, les nouveaux modèles sont validés par rapport aux requis de conception dans un logiciel de simulations numériques utilisant la méthode des éléments finis (MEF). Dans le cas présent, ANSYS® Workbench est utilisé.

Les différents chargements y sont appliqués successivement et les critères de conception y sont validés. Dans la majorité des cas, le travail de modélisation et de validation nécessite de nombreuses itérations. Idéalement, cette étape de raffinement géométrique utilise une optimisation paramétrique qui interrelie les logiciels de CAO et de la MEF.

Les simulations numériques permettent de comparer les différents résultats d'optimisation entre eux. À cet effet, les contraintes équivalentes maximales, les déplacements maximaux de l'axe du palier sphérique pour chacun des trois cas de chargement, de même que la masse des

deux concepts sont présentés dans le tableau suivant et comparés au design original de la pièce.

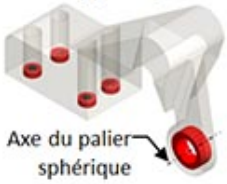
Concepts / Métriques	Enveloppe originale	Optimisation A	Optimisation B
			
Masse de la pièce [g] (Écart relatif [%] par rapport à l'enveloppe initiale)			
	859	319 (-63)	357 (-58)
Contrainte équivalente max [MPa] (Écart relatif [%] par rapport à l'enveloppe initiale)*			
Cas 1 (5560 [N] @ 0°)	734	953 (+30)	936 (+27)
Cas 2 (8340 [N] @ -45°)	769	997 (+30)	988 (+29)
Cas 3 (11121 [N] @ -90°)	522	938 (+80)	794 (+52)
Déplacement total max de l'axe du palier sphérique [mm] (Écart relatif [%] par rapport à l'enveloppe initiale)			
Cas 1 (5560 [N] @ 0°)	0.9	1.5 (+68)	1.6 (+75)
Cas 2 (8340 [N] @ -45°)	0.7	1.2 (+66)	1.4 (+102)
Cas 3 (11121 [N] @ -90°)	0.6	1.2 (+88)	0.9 (+48)
Pointage Q_σ (qualité par rapport aux contraintes) → Cible : augmenter			
		1.67	1.76
Pointage Q_δ (qualité par rapport aux déplacements) → Cible : augmenter			
		0.86	0.85

*Tableau 1 Comparaison des résultats d'optimisation, de modélisation et de simulation. *Notez que dans tous les cas, les pièces A et B supportent les charges appliquées sans faillir.*

Les deux dernières lignes de ce tableau affichent les pointages de qualité d'optimisation par rapport aux contraintes (Q_σ) et déplacements (Q_δ). Ces pointages sont exprimés par les équations suivantes :

$$Q_\sigma = \sum_{i=1}^{3} \omega_i \frac{|\Delta m|_i}{\Delta\sigma_{\max_i}} \; ; \; Q_\delta = \sum_{i=1}^{3} \omega_i \frac{|\Delta m|_i}{\Delta\delta_{\max_i}} \; ; \; \sum_{i=1}^{3} \omega_i = 1$$

où i est le cas de chargement, $|\Delta m|_i$ est l'écart relatif (%) de réduction de la masse, $\Delta\sigma_{\max_i}$ et $\Delta\delta_{\max_i}$ sont, respectivement, les écarts relatifs (%) de l'augmentation de la contrainte équivalente maximale et du déplacement maximal, et ce, par rapport au cas de référence (pièce originale). Enfin, ω_i est le coefficient de pondération de chaque cas de chargement et ses valeurs ont été choisies de manière à donner la même importance à chaque cas.

Il est à noter que *l'Optimisation B* donne un meilleur pointage de qualité d'optimisation en ce qui a trait à la résistance (contrainte), tandis que *l'Optimisation A* offre un meilleur pointage en ce qui a trait à la rigidité (déplacement). Les deux optimisations respectent néanmoins tous les requis de conception

Préparation pour la fabrication

Préparation pour la fabrication

Le travail préparatoire de fabrication consiste en l'ajout de supports (zones marquées en rouge sur la figure suivante) ainsi qu'au choix de l'orientation de la pièce dans le système de FA. Ce choix influence grandement le temps de fabrication ainsi que les opérations de post-fabrication en ce qui concerne l'enlèvement des supports. Cette préparation est réalisée avec le logiciel Magics développé par la société Materialise.

Malgré une connaissance avisée des contraintes technologiques du procédé, la première tentative de fabrication n'a pas été concluante. Les figures qui suivent en témoignent. Ces défauts de fabrication peuvent être expliqués par un manque de supports ainsi qu'une configuration non optimale de ces derniers. Néanmoins, la révision des supports a permis une fabrication réussie lors de la seconde tentative.

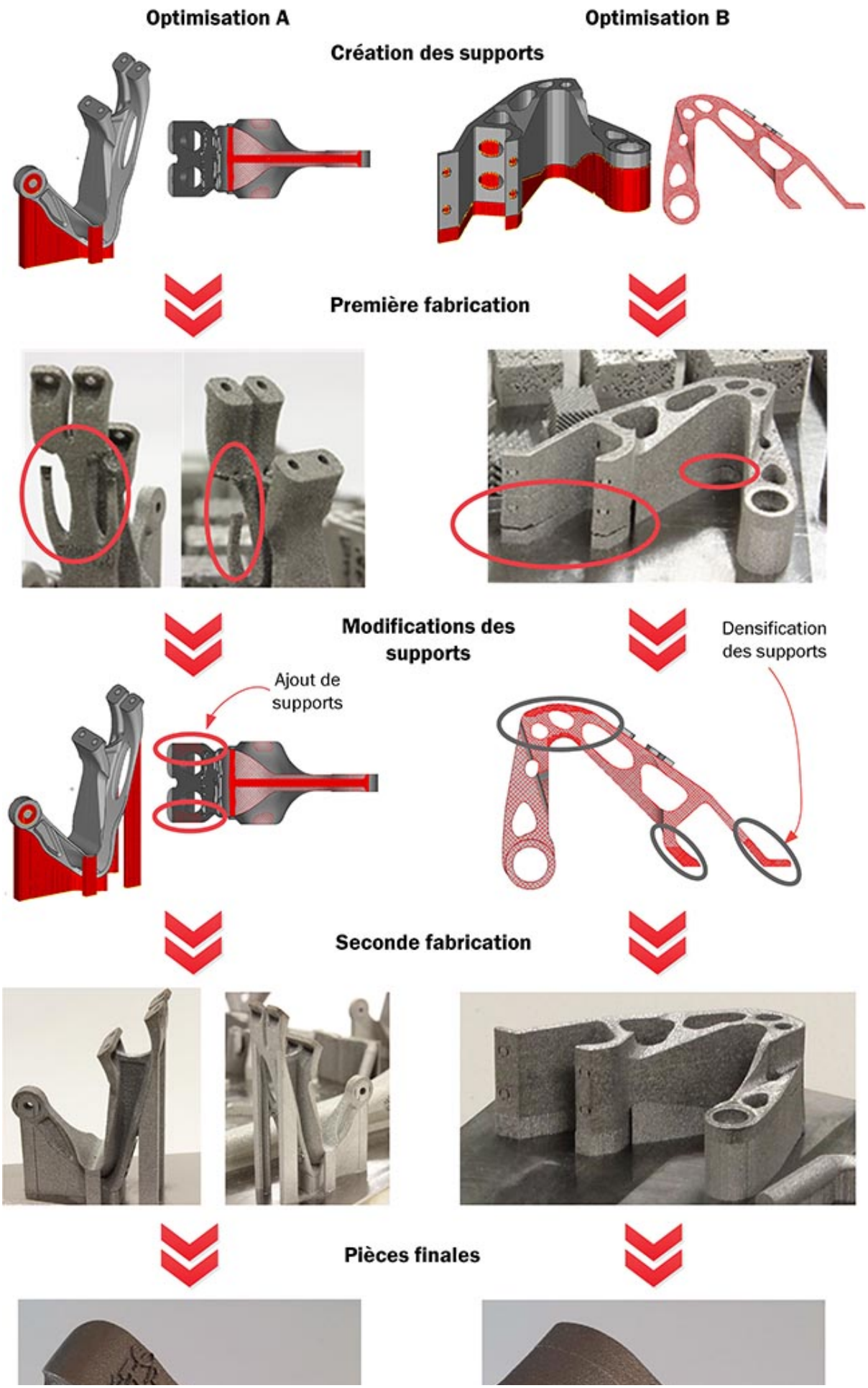

Optimisation A
Optimisation B
Création des supports
Première fabrication
Modifications des supports
Densification des supports
Ajout de supports
Seconde fabrication
Pièces finales

Figure 5 Étapes de la fabrication des pièces

Ce qu'il faut retenir :

- La fabrication additive possède un fort potentiel d'optimisation de la conception d'une pièce;
- L'optimisation topologique est une démarche mathématique permettant aux concepteurs de trouver une distribution de matière judicieuse en fonction des requis de conception;
- Il existe une distinction entre pièce optimisée et pièce optimale;
- La FA nécessite des connaissances particulières pour être en mesure d'en tirer profit [5];
- La conception pour la FA n'est pas encore une science bien maîtrisée et passe, pour le moment, par quelques étapes d'essais et d'erreurs pour réaliser une pièce. Pour pallier ces lacunes, des outils de simulation du procédé SLM sont en train d'être développés au LAMSI.

Auteurs

Bruno Jetté (membre de l'équipe) est étudiant à la maîtrise en génie mécanique à l'École de technologie supérieure de Montréal (ÉTS) et membre du LAMSI. Ses projets portent sur l'optimisation structurale de pièces pour la fabrication additive en incorporant des structures cellulaires ordonnées.

Morgan Letenneur (membre de l'équipe) est étudiant à la maîtrise en génie mécanique à l'École de technologie supérieure de Montréal (ÉTS) et membre du LAMSI. Ses travaux portent sur le développement de nouvelles poudres pour la fabrication additive.

Mykhailo Samoilenko (membre de l'équipe) est étudiant à la maîtrise en génie mécanique à l'École de technologie supérieure de Montréal (ÉTS) et membre du LAMSI. Ses projets portent sur l'investigation des phénomènes de combustion de carburants dans les structures cellulaires produites par fabrication additive.

Le professeur Vladimir Brailovski œuvre dans plusieurs projets multidisciplinaires exigeant une expertise dans les domaines des matériaux, de la conception et des procédés de fabrication. Depuis 20 ans, il s'intéresse plus particulièrement à la conception et la fabrication des dispositifs en alliages à mémoire de forme et dans ce domaine, il jouit d'une forte reconnaissance internationale. La fabrication additive représente une extension naturelle de ses activités de recherche dans le domaine des procédés de la mise en forme. Il est professeur titulaire au département de génie mécanique de l'École de technologie supérieure de Montréal (ÉTS).

RÉFÉRENCES

[1] Le concours en question s'est déroulé du 7 janvier au 7 février 2016 et a reçu près de 320 inscriptions de concepts.

[2] Pour s'initier sur les contraintes de fabrication induites par le procédé de SLM, se référer au document de Crucible Design : http://www.crucibledesign.co.uk/images/uploaded/guides/bs7000-part-2-a-management-guide-download-original.pdf

[3] Pour en apprendre plus sur la fabrication additive, se référer au livre « Topology Optimization : Theory,Methods, and Applications » de (Bendsoe et Sigmund, 2003)

[4] Pour de plus amples informations sur les différents procédés de fabrication additive, se référer aux articles de Madame Sylvie Doré
http://substance.etsmtl.ca/fabrication-additive-un-tour-dhorizon-pour-aider-vous-y-retrouver-1-de-4/
http://substance.etsmtl.ca/fabrication-additive-un-tour-dhorizon-pour-aider-vous-y-retrouver-2de4/
http://substance.etsmtl.ca/fabrication-additive-un-tour-dhorizon-pour-aider-vous-y-retrouver-3-de-4/

http://substance.etsmtl.ca/fabrication-additive-un-tour-dhorizon-pour-aider-vous-y-retrouver-4-de-4-2/

[5] Pour s'initier à la fabrication additive dans sa généralité, se référer au document de 3DHubs ; https://www.3dhubs.com/knowledge-base#section=featured

RÉFÉRENCES DES IMAGES

L'image d'entête provient de Flickr.com prise par Mikel, source. Les figures 1 et 2 ont été adaptées des requis de conception du concours de GrabCAD. Pas de restriction d'usage connue. Les autres figures sont des auteurs. La licence CC de Substance s'applique.