

# CONCEPTION POUR LA FABRICATION ADDITIVE

**Design for Additive Manufacturing (DfAM)**

École d'Ingénieurs de Toulon  
2<sup>ème</sup> année



**Myriam ORQUERA**  
SEATECH  
École d'Ingénieurs de Toulon  
[orquera@univ-tln.fr](mailto:orquera@univ-tln.fr)



*J'entends et j'oublie. Je vois et me souviens. Je fais et je comprends.*  
CONFUCIUS, philosophe chinois (551 – 479 av J.-C.)



## SOMMAIRE

<b>I.</b>	<b>Qu'est-ce que la conception pour la fabrication additive (FA) ?</b>	<b>5</b>
<b>II.</b>	<b>Choix des pièces à réaliser par FA</b>	<b>5</b>
1)	Stratégie économique	6
2)	Stratégie environnementale	7
3)	Stratégie de performance	9
4)	Capabilité de la FA	9
<b>III.</b>	<b>Potentiel de la fabrication additive</b>	<b>10</b>
1)	Regroupement de pièces en une seule (ou conception monolithique)	11
2)	Fabrication directe de liaisons (ou d'assemblages)	12
3)	Diminution de volume et conception légère	12
4)	Complexité des surfaces	13
5)	Optimisations sur les matériaux et optimisations spécifiques	14
➤	Matériaux architecturés	14
➤	Matériaux auxétiques	15
➤	Matériau à gradient	15
<b>IV.</b>	<b>Optimisation paramétrique / topologique</b>	<b>16</b>
1)	Optimisation topologique	16
<b>V.</b>	<b>Comment concevoir pour la fabrication additive ?</b>	<b>22</b>
1)	Les étapes	22
2)	Etape 1 : Spécifications	22
3)	2 <sup>ème</sup> étape : Optimisations	24
4)	3 <sup>ème</sup> étape : Conceptions	29
5)	4 <sup>ème</sup> étape : Validations	33
<b>VI.</b>	<b>Les défauts de l'impression</b>	<b>35</b>
1)	Défauts géométriques	35
2)	Défauts surfaciques	36
3)	Tolérances	36
<b>VII.</b>	<b>Annexe</b>	<b>38</b>
<b>VIII.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>38</b>

# La conception pour la Fabrication Additive

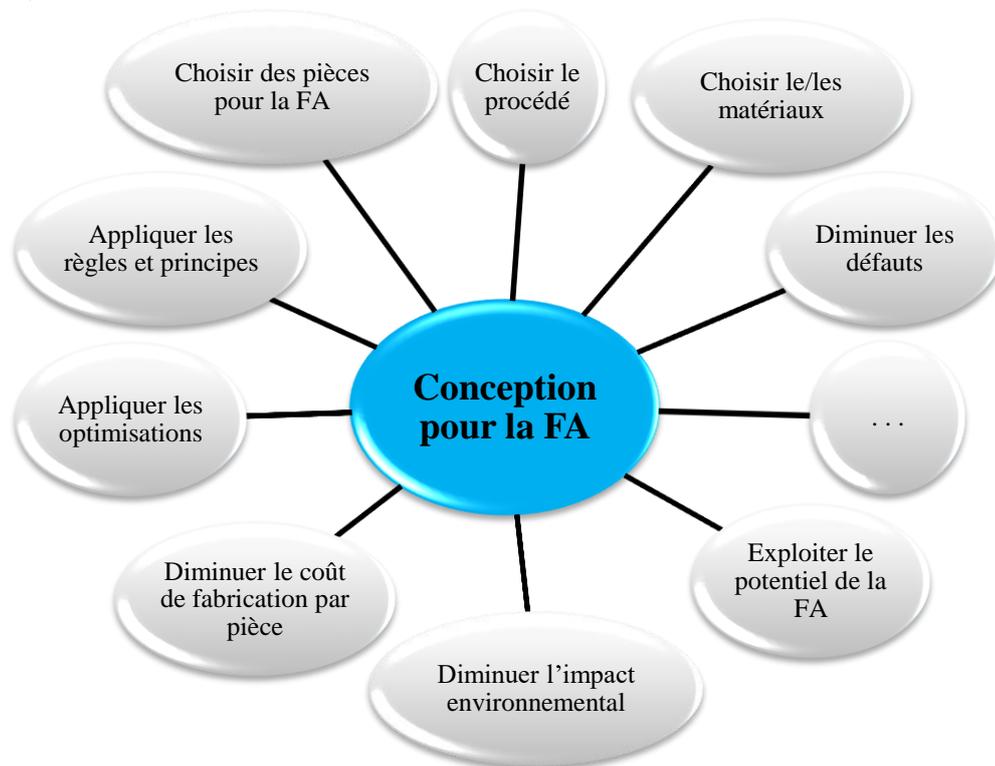
## Design for Additive Manufacturing

### I. Qu'est-ce que la conception pour la fabrication additive (FA) ?

[Thompson et al., 2016] définit la conception pour la fabrication additive (Design for Additive Manufacturing DfAM)) comme la pratique

- de **CONCEVOIR** et **D'OPTIMISER** un produit
- en prenant en compte son procédé de production
- pour réduire le temps et les coûts de développement,
- et augmenter les performances,
- la qualité et la rentabilité

Du choix des pièces à faire en FA au post-traitement en passant par les optimisations, le concepteur a de nombreuses nouvelles compétences à acquérir (Thompson *et al.*, 2016; Vaneker, 2017; Durakovic and Durakovic, 2018).

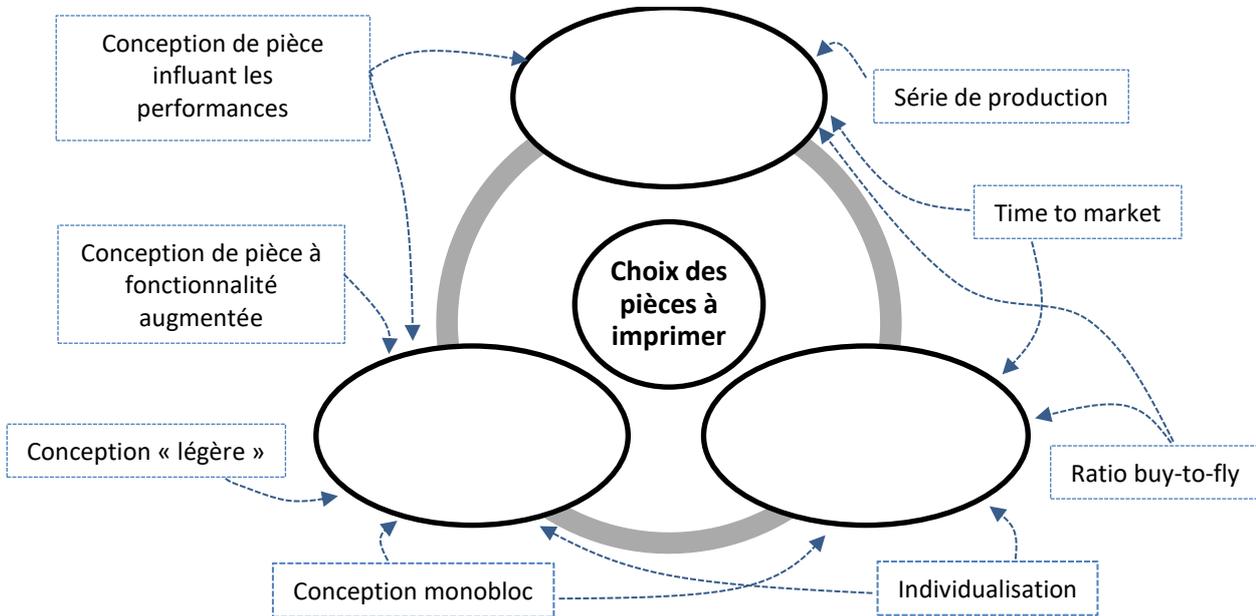


Dans ce polycopié, il sera tout d'abord expliquer quelles sont les pièces ou systèmes à réaliser par fabrication additive. Puis, un chapitre mettra en lumière tout le potentiel de la FA. Une initiation à l'optimisation topologique est proposée. Enfin les étapes de la conception pour la FA seront expliquées.

### II. Choix des pièces à réaliser par FA

Le choix des pièces à fabriquer par FA dépend de quatre critères plus ou moins liés, tels que :

- le critère économique,
- l'impact environnemental,
- les (ou l'ajout de) performances du système fabriqué.
- La fabrication d'une pièce étant dépendante de la capabilité du procédé de FA choisi, le choix des pièces à fabriquer peut aussi dépendre du parc-machine.



**1) Stratégie économique**

**a) Time to market**

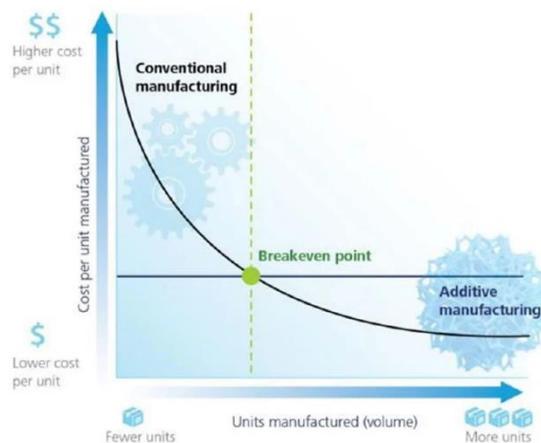
L'impression 3D est aussi appelée fabrication digitale. Cela signifie que la fabrication de la pièce est directement réalisée à partir du fichier CAO sans nécessité d'outils supplémentaires. De plus, une pièce réalisée par FA a peu besoin de post-traitement (tels que l'assemblage ou l'usinage). Cet aspect réduit les délais de commercialisation (Lindwall, Dordlofva and Öhrwall Rönnbäck, 2017). La chaîne logistique diminue considérablement (Cotteleer 2014; Attaran 2017; Mashhadi & Behdad 2017; Gao et al. 2015) et un rapprochement entre le concepteur et la fabrication est possible et permet réactivité et flexibilité.

Time-to-market down 64%



Deloitte University Press, 2014

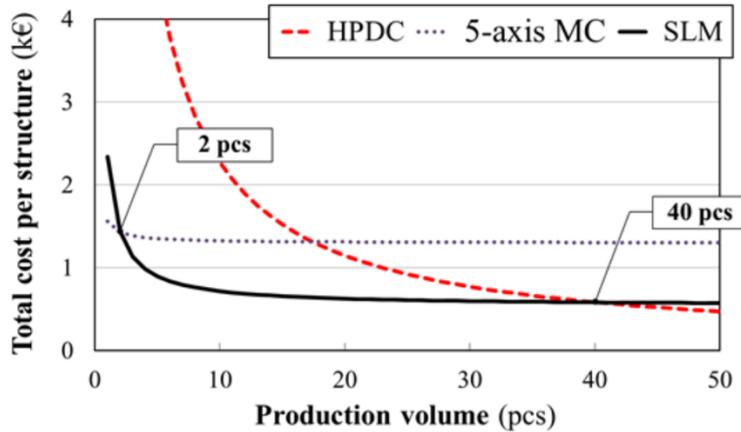
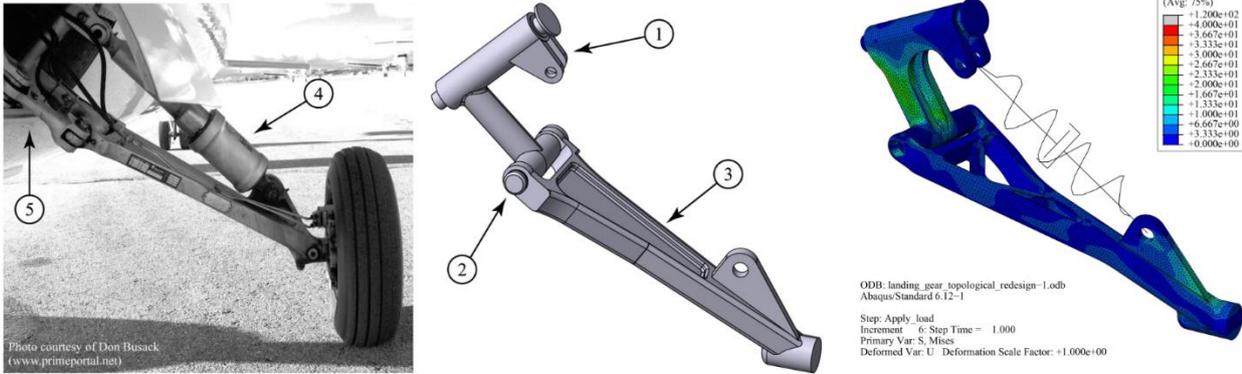
**b) Seuil de rentabilité (break-even point)**



Graphic: Deloitte University Press | DUPress.com

Deloitte University Press, 2014

Une étude de (Atzeni *et al.*, 2013) le break-even point d'un train d'atterrissage réalisé soit par L-PBF soit par usinage 5 axes soit par moulage (HPDC).



(Gebler, Schoot Uiterkamp and Visser, 2014) ont déterminé le seuil de rentabilité de différents procédés de FA par rapport à des procédés conventionnels tel que le montre le Tableau 1. Au vue de l'évolution rapide des technologies mises en œuvre, ce tableau a certainement évolué depuis la date de sa création.

Tableau 1. Seuil de rentabilité de certains procédés de FA par rapport à des procédés conventionnels (Gebler, Schoot Uiterkamp and Visser, 2014)

Break-even point (in pieces)	Printed material	Process comparison
279-5,800	Polymer	SLA compared to injection moulding
7,500	Polymer	FDM compared to injection moulding
14,000	Polymer	SLS compared to injection moulding
42	Aluminium	SLS compared to high-pressure die casting
190	Steel	SLM compared to milling

## 2) Stratégie environnementale

### a) Ratio buy-to-fly

Définition :

La FA est une alternative durable à l'usinage dans la production de pièces à rapport buy-to-fly élevé (Reeves, 2009). (Allen, 2006) montre que pour des pièces en titane à réaliser pour l'aérospatial dont le rapport buy-to-fly est assez élevé, la FA est avantageuse par rapport à la fabrication conventionnelle.



### b) Potential de la FA au service de l'environnement

De nos jours, augmenter la valeur ajoutée d'un mécanisme devient un des principaux axes de recherche. (Burkhart and Aurich, 2015) déterminent quelle pièce sera fabriquée par FA en comptant le nombre de fonctions que la FA peut améliorer. Cette étude prend en compte l'aspect environnemental ainsi que les fonctions spécifiques telles que la diminution de la masse, l'augmentation du transfert thermique, l'amélioration de la dynamique des fluides...

(Yang *et al.*, 2017) montrent que la conception monolithique offre des perspectives intéressantes en termes de réduction de la consommation d'énergie et de l'impact environnemental. Ce résultat est conforté par les travaux de (Yang *et al.*, 2019) qui montrent que la FA peut avoir un impact environnemental plus faible que les procédés conventionnels de par non seulement la conception monolithique mais aussi la diminution de masse, l'augmentation de la durée de vie, et l'amélioration des performances fonctionnelles.

L'ajout de fonctions dans les éléments structurels permet aussi de réduire l'impact environnemental global de ces éléments multifonctionnels tel que le prouvent (Agustí-Juan and Habert, 2017; Walachowicz *et al.*, 2017).

De plus, (Nyamekye *et al.*, 2015) ont montré que des facteurs tels que la consommation de matériaux, les étapes de fabrication, la longueur de la chaîne d'approvisionnement ainsi que la rapidité de la production affectent l'impact environnemental.

### 3) Stratégie de performance

Le terme performance désigne l'étendue de la capacité de la FA à améliorer une pièce ou un produit d'un point de vue technique.

Si la FA permet d'améliorer les performances d'un produit grâce aux optimisations et champ des possibilités, alors le choix de la FA peut être fait.

Ce choix est couramment fait lors de la comparaison entre une pièce réalisée par un procédé d'obtention et celle que l'on pourrait obtenir par FA avec toutes les optimisations possibles. Une estimation des gains fonctionnels permet de conforter un choix.

De plus, il faut s'affranchir des freins psychologiques dus à l'apprentissage classique de conception pour les procédés conventionnels. Les formes et possibilités offerts par la FA sont très différents et beaucoup moins restrictifs que ceux des procédés conventionnels pour lesquels la plupart des concepteurs ont été formés. C'est pourquoi, pour cette étape de choix, il faut connaître toutes les possibilités de la FA ainsi que les avantages cités au chapitre III.

### 4) Capabilité de la FA

On entend par capabilité de la FA, l'adéquation d'un procédé de FA à réaliser une performance demandée. C'est-à-dire, la capacité d'un procédé à réaliser :

- des pièces en un matériau spécifique,  
 Pour certains matériaux difficiles à usiner (titane, céramique), la FA permet de produire une pièce « near net shape » (minimisant les usinages) et avec des formes plus complexes.
- dans l'intervalle de tolérance spécifié,
- ou encore dans les dimensions mentionnées.

Il est nécessaire de connaître les possibilités des différents procédés de FA, c'est-à-dire, les caractéristiques mécaniques, les dimensions maximales... Si l'un des procédés de fabrication additive répond aux attentes, il s'agit d'une raison supplémentaire de réaliser la pièce par FA.

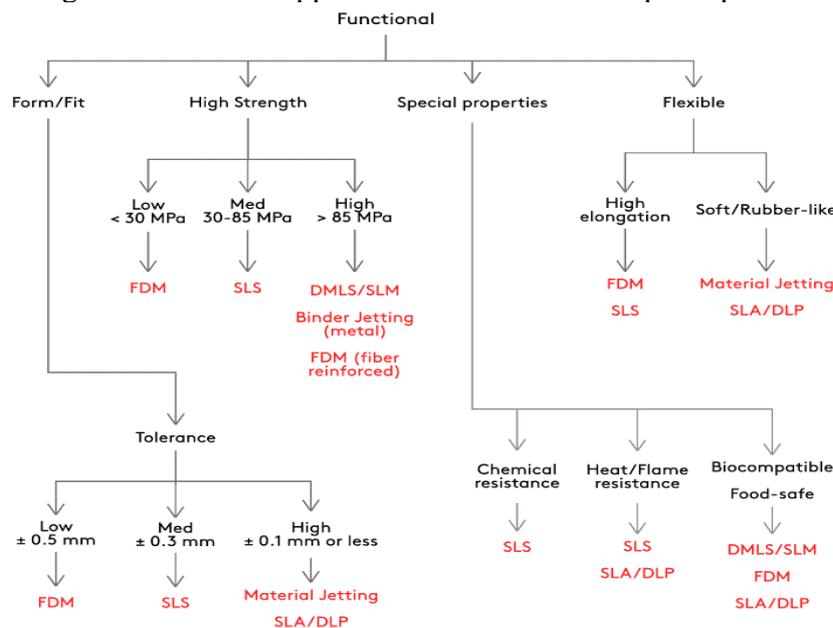


Figure 1. Choix du procédé en fonction des exigences fonctionnelles. Source : www.core77.com

Tableau 2. Liste des tolérances réalisables pour les procédés conventionnels et ceux de FA (uz Zaman et al., 2017)

Class	Manufacturing process	Tolerance (mm)
Traditional manufacturing	Sand casting	1.00–5.50
	Die casting	0.26–0.71
	Investment casting	0.1–0.59
	Low pressure casting	0.23–0.59
	Forging	0.59–3.22
	Extrusion	0.34–3.22
	Sheet forming	0.10–3.22
Additive manufacturing	Stereolithography (SLA)	0.025–0.10
	Digital light processing (DLP)	0.10–0.20
	Multi-jet modeling (MJM)	0.10–0.20
	3D printing (3DP)	0.20–0.40
	Fused deposition modeling (FDM)	0.05–0.5
	Electron beam melting (EBM)	0.20–0.40
	Selective laser sintering (SLS)	0.1–0.46
	Selective laser melting (SLM)	0.05–0.10
	Direct metal laser sintering (DMLS)	0.10–0.20
	Laminated object manufacturing (LOM)	0.25–0.50
	Ultrasonic consolidation (UC)	0.127–0.254
	Laser metal deposition (LMD)	0.125–0.250

### III. Potentiel de la fabrication additive

Le concepteur peut améliorer l’ergonomie d’une pièce, diminuer les pertes de charges d’un conduit etc. De plus, la fabrication additive permet de réaliser des pièces à fonctionnalité augmentée par rapport aux procédés traditionnels. Les procédés de dépôt de matière par couches permettent par exemple de déposer des matériaux différents ou encore de réaliser directement des liaisons cinématiques.

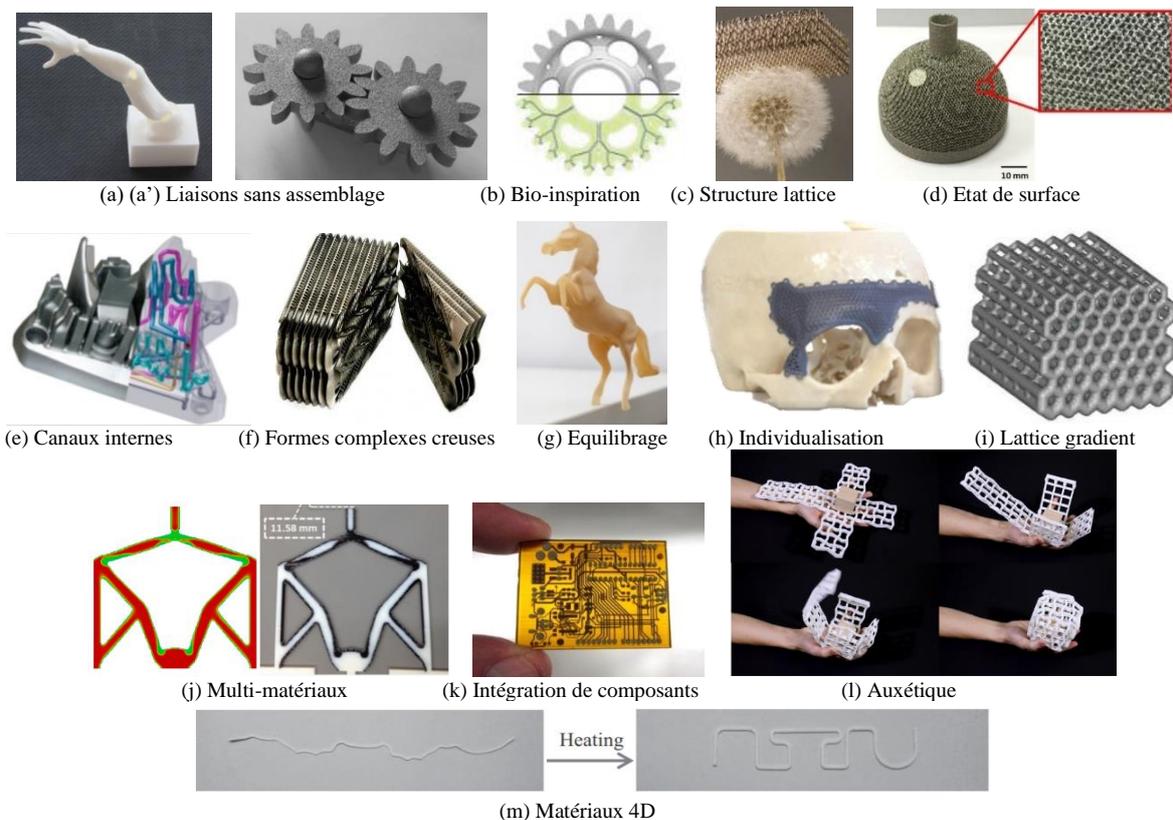


Figure 2. (a) Bras articulé non assemblé (Cali et al., 2012) ; (a') Engrenage direct (Calignano et al., 2014); (b) Roue dentée conçue par bio-mimétisme (Kamps et al., 2017); (c) Matériau lattice dit « le plus léger au monde ». Source : <http://www.boeing.com>; (d) Surface poreuse pour implant orthopédique (Sing et al., 2016); (e) Outillage de moule et canaux internes de refroidissement. Source: Renishaw.com; (f) Coupe d'un échangeur thermique. Source: Polyshape; (g) Figurine équilibrée statiquement (Prévost et al., 2013); (h) Implant de crâne. Source: Poly-Shape/OBL; (i) Structure lattice à gradient (Sun et al., 2016); (j) Optimisation topologique d'une poutre en bi-matière (Gaynor et al., 2014) ; (k) Carte électronique. Source: nano-di.com; (l) Pièces à matériau auxétique proposés par (Ou et al., 2018), appelés KinetiX; (m) Impression 4D avant et après la chauffe (Teoh et al., 2016)

Une augmentation de la valeur ajoutée est possible en FA grâce aux ajouts de fonctions et à l'augmentation de la performance (Campbell, Jee and Kim, 2013). Afin de connaître l'éventail des améliorations possibles, il est important de connaître le champ des possibilités de la fabrication additive. Un panel du champ des possibilités de la fabrication additive est illustré par la Figure 2.

### **1) Regroupement de pièces en une seule (ou conception monolithique)**

La conception monolithique consiste à

Les avantages de la reconception de plusieurs pièces en une seule sont nombreux (Schmelzle *et al.*, 2015; Yang and Zhao, 2016) :

- diminution de la masse,
- diminution du nombre de pièces et des références à gérer,
- diminution du nombre d'interfaces,
- diminution de l'encombrement,
- diminution des interfaces dans lesquelles des fuites sont généralement détectées,
- diminution de l'usinage,
- pas d'éléments d'assemblage,
- augmentation des performances,
- diminution du nombre de matériaux.

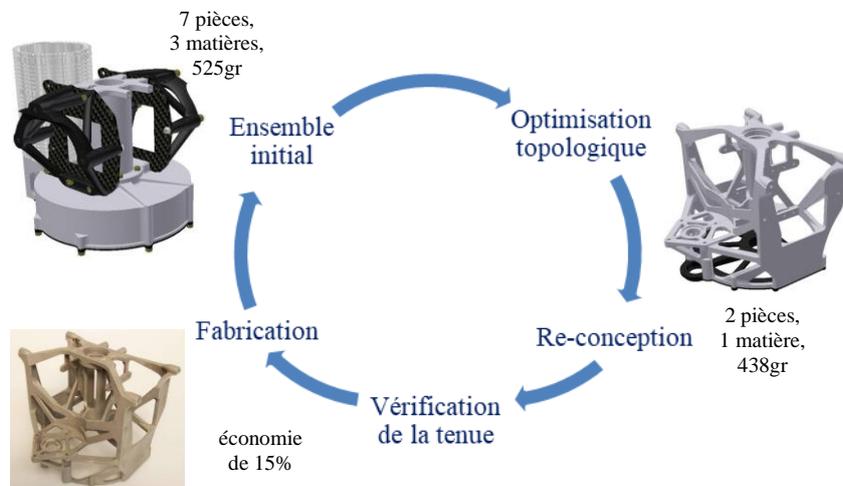


Figure 3. Exemple industriel: Fixation d'un rotor de drone. Source : MBProto

Afin de choisir les pièces à unir, (Boothroyd, 1994) a défini trois critères. Si une réponse positive est apportée à l'un de ces trois critères, alors les pièces ne peuvent être conçues en une seule :

- Pendant le fonctionnement du produit, les pièces ont-elles un mouvement relatif (les mouvements modérés pouvant être compensés par des éléments élastiques intégrés ne sont pas pris en compte) ?
- La pièce doit-elle être d'un matériau différent ou être isolée de toutes les autres pièces déjà assemblées ?
- Les pièces doivent-elles être séparées pour le montage d'une autre ?

(Yang, Santoro and Zhao, 2018) proposent de compléter cette liste en adaptant les recommandations de (Fagade and Kazmer, 1999) à la fabrication additive :

- La conception monolithique implique-t-elle un supplément d'outillage ?
- La conception monolithique implique-t-elle une augmentation significative du coût et de la difficulté de fabrication ?
- La conception monolithique empêche-t-elle la réutilisation du matériau ou son recyclage ?

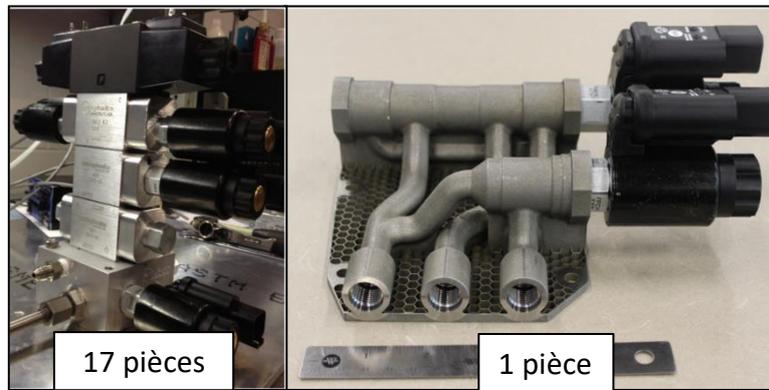


Figure 4. Reconcepting d'un connecteur hydraulique en monolithique (Schmelzle *et al.*, 2015)

## **2) Fabrication directe de liaisons (ou d'assemblages)**

La fabrication directe de liaisons (Figure 2 (a, a')) est la fabrication de mécanismes avec des pièces ayant un ou plusieurs mouvements relatifs, par le procédé de FA et ce, sans opération d'assemblage.

Seuls certains procédés permettent de réaliser directement des assemblages (Cuellar *et al.*, 2018) :

- polymérisation en cuve (Stéréolithographie)
- projection de matière (Polyjet),
- projection de liant (Binder Jetting),
- extrusion de matière (FDM),
- fusion sur lit de poudre (SLS, LBM, EBM).

Comme l'indiquent (De Laurentis and Mavroidis, 2004) le jeu laissé entre les pièces en mouvement, est rempli soit par la poudre, soit par un support. Dans les deux cas, il sera nécessaire de les éliminer, d'où la nécessité d'ouvrir ou de ventiler les volumes piégés. De plus, la direction de fabrication doit être définie afin d'éviter le soutien (si nécessaire).

## **3) Diminution de volume et conception légère**

Il est possible, grâce à la FA, d'obtenir des pièces légères et ce de différentes manières :

- optimisation topologique de la pièce (comme cela sera détaillé ultérieurement),
- conception par matériaux architecturés aussi appelé lattice comme le montre la Figure 2 (c),
- réalisation de parois semi-creuses emplies de structures de type nid d'abeille ou lattice comme le montre la Figure 5,



Figure 5. Concept de culasse de F1 réalisée sous LBM (Inovar Communications Ltd, 2016)

- concevoir avec des matériaux à densités différentes (voir chapitre III.5)), les parties de la pièce qui sont peu sollicitées pouvant être réalisées par une matière dont la densité est plus faible,
- réaliser une conception monolithique ou des assemblages directs (comme vu au sous-chapitre précédent),
- adapter la reconception des pièces aux contraintes de fabrication de la FA.

En effet, lors de la reconception d'une pièce, il est important de s'affranchir des contraintes de fabrication des procédés traditionnels (accessibilité des outils par exemple). Ainsi (Ren and Galjaard, 2015) proposent-ils la reconception d'un nœud de fixation d'une structure à tensegrité pour le procédé LBM (voir la Figure 6). La pièce d'origine est réalisée en mécano-soudé.

La démarche suivie est la suivante :

- prise en compte des surfaces fonctionnelles,
- optimisation topologique,
- vérification de la tenue,
- puis reconception en prenant en compte les contraintes de fabrication.

Une nouvelle étude a permis de mettre en évidence l'obsolescence du positionnement des trous réalisant l'encastrement avec les câbles de maintien de la structure. Le positionnement d'origine était contraint par le procédé de soudage, qui pour la fabrication additive n'a pas lieu d'exister. Ainsi, tout en gardant la fonctionnalité des trous, leurs entraxes ont été diminués comme le montre la Figure 6.

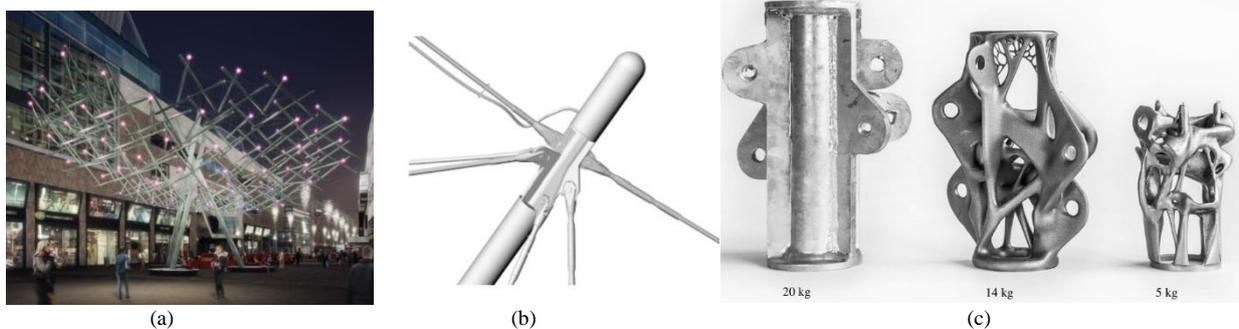


Figure 6. (a) Structure de tensegrité ; (b) Détail du nœud de fixation ; (c) Comparaison entre la pièce conventionnelle, la pièce topologiquement optimisée et la pièce topologiquement optimisée et ayant reçu les modifications de fixation. (Ren and Galjaard, 2015)

Un gain important de masse et de volume est mis en évidence en comparant les pièces traditionnelles aux pièces fabriquées par FA.

Ainsi les avantages de la fabrication additive sont:

- diminution de la masse des pièces mobiles, de la masse embarquée, voir Figure 2 (c) à la page 10,
- diminution des effets d'inertie (vibrations, fatigue des pièces de liaison...),
- diminution de la résistance au mouvement,
- diminution des dimensions des composants de transmission de puissance et de guidage (roulement, clavette...),
- diminution du brut de matière,
- diminution du coût matière.

#### **4) Complexité des surfaces**

Les technologies de FA offrent au concepteur une plus grande liberté dans la réalisation des formes géométriques complexes. L'avantage de la FA est que cette complexité n'entraîne aucun coût supplémentaire (voir Figure 7). En effet, aucun outillage, aucune expertise supplémentaire de l'opérateur, ni même un temps de fabrication supplémentaire ne sont nécessaires ; alors qu'il existe une relation directe entre la complexité géométrique d'une pièce et le coût du moule pour l'obtenir en fonderie (Gao *et al.*, 2015).

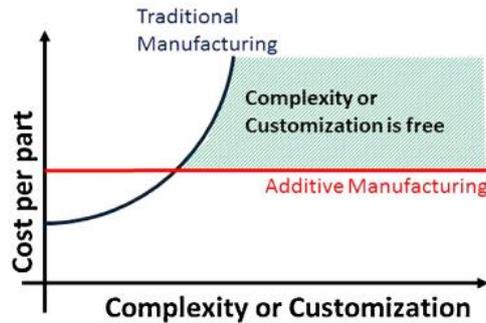


Figure 7. Comparaison du coût de la complexité de surface entre la FA et les procédés traditionnels (Conner et al., 2014)

La conception de formes complexes, à coût fixe quelle que soit la taille de la série, présente de nombreux avantages. Cela permet :

- une adaptabilité aux modifications fréquentes (pour les moules par exemple, Figure 2 (e)),
- de réaliser des formes complexes (obtenues par exemple lors d'une optimisation topologique), voir Figure 2 (b, c, f, h),
- d'obtenir des états de surface variés, voir Figure 2 (d),
- de réaliser des canaux internes ou d'autres formes creuses, voir Figure 2 (e, f),
- d'intégrer des fonctions supplémentaires (comme l'absorption au choc, les échanges thermiques, l'équilibrage statique et/ou dynamique d'une pièce, la diminution des pertes de charges, la diminution des pertes de frottement, l'augmentation de l'aérodynamisme, l'amortissement...), voir Figure 2 (e, f, g),
- de réaliser des pièces uniques, voir Figure 2 (h),
- de réaliser du bio-mimétisme, voir Figure 2 (b).

Cette dernière possibilité permet de concevoir des pièces pour la FA par bio-mimétisme. Le bio-mimétisme tire profit des formes, des processus et des écosystèmes de la nature, puis les imite pour concevoir (Rosen, 2007). La bio inspiration et la FA permettent d'ouvrir le champ de créativité aboutissant ainsi à des conceptions de pièces répondant au mieux au besoin (Emmelmann *et al.*, 2011).

## **5) Optimisations sur les matériaux et optimisations spécifiques**

La FA offre de nombreuses autres possibilités. Quelques exemples sont montrés dans les sous-chapitres suivants.

### **a) Matériaux innovants**

On entend par matériaux innovants, les matériaux architecturés, auxétiques, à gradients et enfin, les matériaux de type 4D.

#### **➤ Matériaux architecturés**

On appelle les matériaux architecturés, les matériaux présentant des variations géométriques et/ou de composition à l'échelle mésoscopique (0,1 à 10 mm), dans le but d'obtenir des propriétés particulières à l'échelle macroscopique (Bouaziz, Bréchet and Embury, 2008), voir la Figure 2 (c).

Il existe de nombreux avantages à l'utilisation de ce type de matériau tels que :

- allègement de structures,
- modification des échanges thermiques,
- amélioration de la bio-intégration,
- absorption des chocs/impacts,
- amortissement des vibrations,
- absorption acoustique,
- ...

### ➤ Matériaux auxétiques

Les matériaux auxétiques présentent un coefficient de Poisson négatif à l'échelle macroscopique, contrairement aux matériaux conventionnels, qui ont un retrait transversal lors de la traction axiale (Yang *et al.*, 2015). Les avantages de ces matériaux sont :

- Absorption des chocs,
- Adaptation de la forme en fonction d'une sollicitation.

Récemment, (Ou *et al.*, 2018) ont proposé une nouvelle génération de matériaux auxétiques appelés les KinetiX permettant des transformations spatiales sous une sollicitation simple, voir la Figure 2 (l).

### ➤ Matériau à gradient

Un matériau à gradient est un matériau à évolution spatiale de ses propriétés par changement :

- de la densité du matériau,
- de la composition du matériau (multi-matériaux)
- des paramètres géométriques d'une structure cellulaire, voir la Figure 2 (i).

D'après (Kumar Bohidar, Sharma and Mishra, 2014), les matériaux à gradient ont un grand potentiel dans les applications où les conditions de fonctionnement sont difficiles, notamment les boucliers thermiques, les tubes d'échangeurs thermiques, les implants biomédicaux, etc.

### ➤ Matériaux 4D

D'après (Khoo *et al.*, 2015), « L'impression 4D est un processus de fabrication additive intégrant des matériaux intelligents dont la forme de départ est celle imprimée en 3D. Après la fabrication, l'objet 3D répondrait de manière prévue aux stimuli externes de l'environnement ou par l'interférence de l'homme, ce qui entraînerait un changement de forme ou de propriétés physiques au fil du temps. ». La Figure 2 (m) présente un exemple.

## b) Intégration de composants et/ou multi matériaux

Une pièce peut être qualifiée de multi-matériaux lorsqu'elle est composée d'au moins deux matériaux primaires. Ils peuvent être distribués continûment ou non à l'intérieur de la structure (Muller, 2013). Lorsque la distribution est continue, on parle alors de pièce multi-matériaux à gradient continu.

Il existe des procédés de FA permettant la fabrication de pièces comportant plusieurs matériaux: la projection de matière (PolyJet) (Gaynor *et al.*, 2014; Meisel, 2015; Wang *et al.*, 2015; Vaithilingam *et al.*, 2016; Krivec *et al.*, 2017) ainsi que la stratification de couches (LOM). D'autres procédés peuvent aussi le permettre si des prédispositions ou des modifications sur la machine sont effectués (Vaezi *et al.*, 2013; Bandyopadhyay and Heer, 2018) : l'extrusion de matière (FDM), la projection de liant (Binder Jetting) (Le Néel, Mognol and Hascoët, 2018), le CLAD (Hofmann *et al.*, 2014) ou dépôt de matière sous énergie concentrée (DED) ou encore et plus rarement la Photopolymérisation (SLA) et la fusion sur lit de poudre (LBM). Cette particularité permet d'obtenir des pièces dont le comportement en tout point peut être différent. De plus, dans le chapitre optimisation topologique, il a été montré que l'interprétation des densités intermédiaires peut être réalisée par un choix de réalisation de pièce multi-matériaux.

Le fait de pouvoir réaliser des pièces multi-matériaux permet également des ajouts de fonctions tels que (Vaezi *et al.*, 2013) :

- Isoler ou protéger une partie de la pièce,
- Amortir des vibrations,
- Améliorer la conductivité thermique à des endroits précis,
- Réaliser un comportement particulier de la pièce sous sollicitation, voir Figure 2 (j),
- Augmenter une ergonomie (grip d'une poignée par exemple) ou une esthétique particulière,
- Réaliser et/ou enrober des composants électriques,
- Diminuer le volume d'une pièce (en diminuant les éléments d'assemblage par exemple),
- Diminuer le temps d'assemblage et de collage, voir Figure 2 (j).

Enfin, il est aussi possible de réaliser des composants particuliers tels que des cartes électroniques, voir Figure 2 (k).

### c) Nano-impression

La nano-impression peut se définir par la réalisation de pièces imprimées dont les formes sont à l'échelle microscopique ( $< 100 \mu\text{m}$ ). Les procédés permettant de réaliser cela sont résumés dans l'article de (Vaezi, Seitz and Yang, 2013). Les applications sont nombreuses comme l'indique (Nanoscribe, 2017).

### d) Réparation et ajouts de fonctions

Certains procédés de FA (CLAD, WAAM) permettent de réparer des pièces mécaniques par ajout de matière (Frechard, 2015; Harris, 2017). Cela ajoute un avantage à la fabrication d'un point de vue impact environnemental matière (Walachowicz et al., 2017; Wits et al., 2016).

Il est aussi possible de réaliser un ajout d'entités sur des pièces pré-produites tel que le montre la Figure 8 à la page 16.

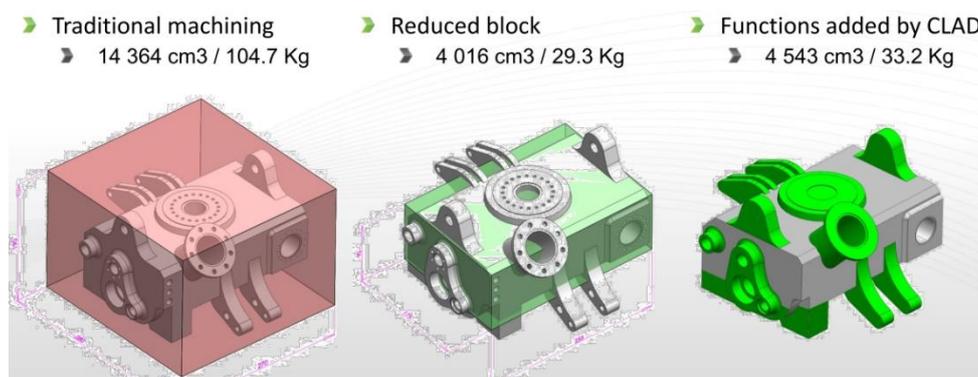


Figure 8. Comparaison entre une pièce réalisée par procédé conventionnel (usinage) et par le procédé CLAD (Frechard, 2015)

## IV. Optimisation paramétrique / topologique

### 1) Optimisation topologique

#### a) Définition

Pour (Thompson *et al.*, 2016), «L'optimisation topologique est une approche numérique qui identifie où le matériau doit être placé dans un domaine donné pour obtenir une fonctionnalité désirée (rigidité par exemple) et pour un ensemble donné de charges et de contraintes, tout en optimisant la qualité telle que la quantité de matériau / le poids ou la répartition uniforme des contraintes».

Et d'après (Guo and Cheng, 2010) l'optimisation topologique «vise à trouver le moyen optimal de répartition des matériaux dans la structure».

Ainsi l'optimisation topologique permet à partir d'un domaine donné d'obtenir un concept de répartition de matière atteignant un objectif et répondant à des contraintes.

Une formulation simple et générique d'un problème d'optimisation peut s'écrire de la manière suivante (Kim, Querin and Steven, 2002; Bendsøe and Sigmund, 2003; Zhou *et al.*, 2004; Cavazzuti *et al.*, 2011) :

$$\min_{\Gamma \in \Omega} f(\Gamma)$$

$$\text{Tel que } c(\Gamma) \geq 0$$

Avec :

- $\Gamma$  : ensemble des variables de conception
- $\Omega$  : domaine (ou espace de conception)
- $f(\Gamma)$  : fonction objectif
- $c(\Gamma)$  : fonction contrainte

Une formulation mathématique permettant d'optimiser la topologie d'une structure (dans un volume de matière fixé, noté  $\Omega$ ) peut être écrite en terme d'énergie de déformation totale  $U$  dans le domaine élastique (Eschenauer and Olhoff, 2001; Bendsøe and Sigmund, 2003) :

$$\min_{\Gamma \in \Omega} U(\underline{d})$$

Tel que  $\underline{\underline{K}} \cdot \underline{d} = \underline{F}$

Où

- $\underline{F}$  : vecteur des efforts
- $\underline{d}$  : vecteur des déplacements globaux
- $\underline{\underline{K}}$  : matrice de rigidité
- $\underline{\underline{K}} \cdot \underline{d} = \underline{F}$  : loi de comportement élastique
- $\Gamma$  : variable de conception

$U$  peut être écrit (en écriture élément finis) de la manière suivante:

$$U(d) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \cdot \int_{V_i} \underline{\underline{\varepsilon}}_i^T(d) \cdot \underline{\underline{E}}_i(\Gamma) \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}_i(d) \cdot dV_i$$

Avec

- $\underline{\underline{E}}_i$  : matrice d'élasticité de l'élément  $i$
- $\underline{\underline{\varepsilon}}_i$  : vecteur déformation de l'élément  $i$
- $V_i$  : volume de l'élément  $i$
- $N$  : le nombre total d'éléments finis

La distribution des matériaux est contrôlée par une variable de conception qui peut être exprimée par une fonction de commutation définie comme suit :

$$\Gamma(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in \Omega_S \\ 0 & \text{si } \begin{cases} x \in \Omega \\ x \notin \Omega_S \end{cases} \end{cases}$$

Où  $\Omega$  désigne tout le domaine de conception et  $\Omega_S$  le domaine occupé par la matière isotrope.  $x$  est un point structurel.

Cela signifie qu'à chaque élément sera assigné un matériau "solide" ou du "vide".

Plutôt que d'utiliser une fonction de commutation, le modèle de matériau SIMP (Simple Isotropic Material with Penalization) couvre toute la gamme des valeurs de densité comprises entre 0 et 1 (Zhou and Rozvany, 1991; Rozvany, Zhou and Birker, 1992; Bendsøe, 1995; Bendsøe and Sigmund, 1999). Ainsi, sous la formulation de minimisation de flexibilité (ou compliance), une variable continue (telle que  $0 \leq \rho \leq 1$ ) est introduite. Chaque élément peut être considéré comme un matériau poreux avec des vides microscopiques. Pour obtenir une distribution de densité allant de 0 à 1, la méthode suppose que la rigidité du  $i$ -ème élément est donnée par :

$$E_i(\Gamma) = \rho_i^p(\Gamma) \cdot E^*$$

Où  $E^*$  est la rigidité initiale du matériau isotrope,  $\rho_i$  la densité de l'élément  $i$  et  $p$  le facteur de pénalité ( $1 \leq p \leq 4$ ). Son rôle est de pénaliser la densité intermédiaire ( $p \geq 3$  est généralement requis), comme le

montre la Figure 9. Ainsi, l'interprétation du résultat sera plus facile car l'effet damier dû aux densités intermédiaires sera diminué (voir Figure 10).

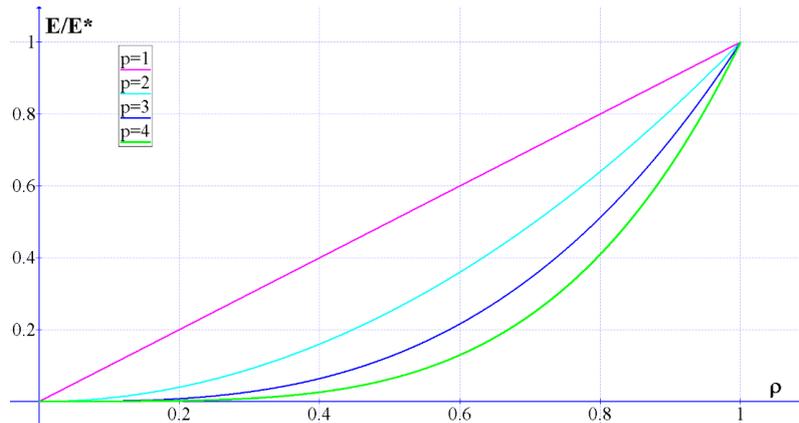


Figure 9. Influence du paramètre p sur la pénalisation de la densité

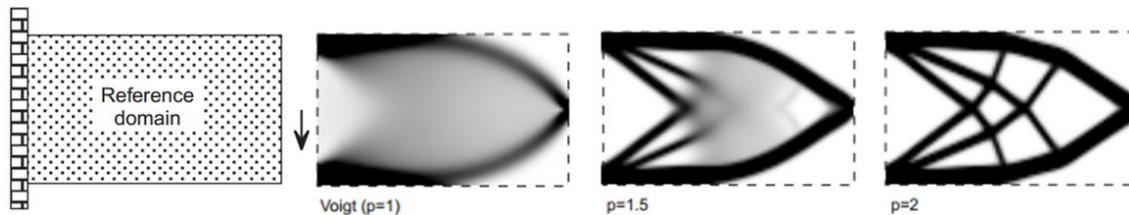


Figure 10. Influence du facteur de pénalisation p sur l'effet damier (Bendsøe and Sigmund, 1999)

Grâce à sa simplicité et à ses bons résultats, le modèle SIMP est implémenté dans de nombreux codes commerciaux de calcul par éléments finis et d'optimisation pour la conception (Eschenauer and Olhoff, 2001; Kim, Querin and Steven, 2002; Saadlaoui *et al.*, 2017) et utilisé pour la conception des pièces fabriquées par FA (Aremu *et al.*, 2010; Krishna, Mahesh and Sateesh, 2017).

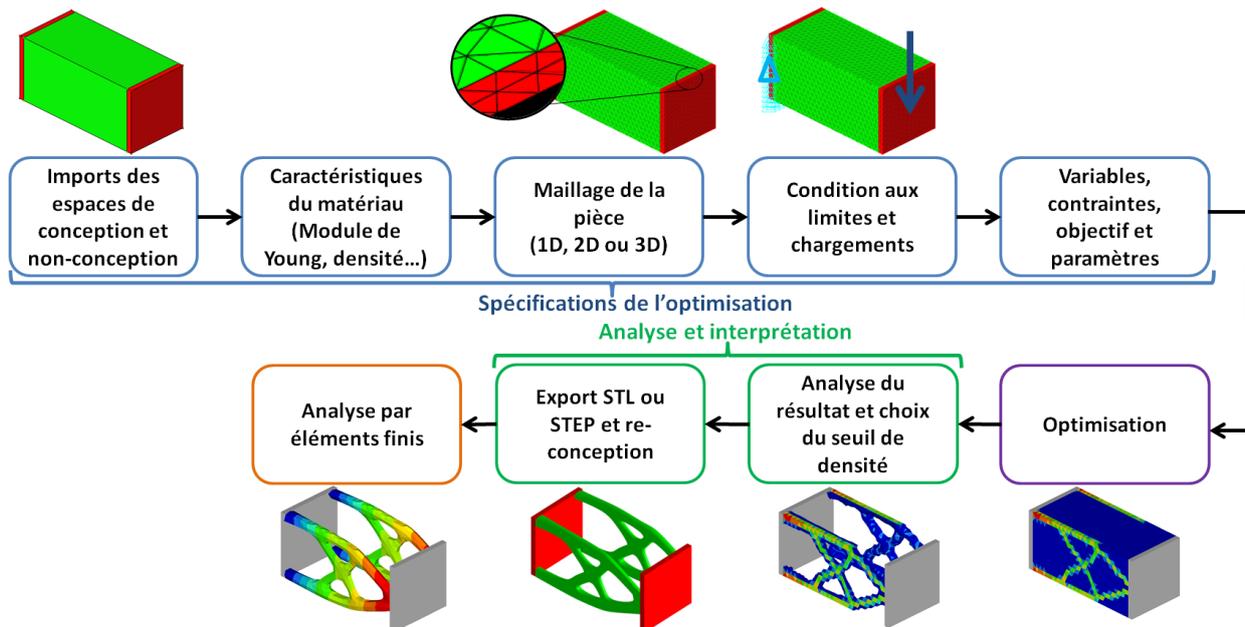


Figure 11. Processus d'optimisation topologique à l'aide du logiciel Optistruct de la société ALTAIR. Support d'étude : poutre encastree-libre (espace de conception en vert et de non conception en rouge). Objectif : Minimisation de la masse avec contrainte de déplacement vertical. (Orquera, 2019)

**b) Définition de l'espace de conception et de l'espace de non-conception**

L'espace de conception (EC) est le volume qui pourra être modifié lors d'une optimisation (Rodrigue and Rivette, 2010; Ponginan, 2015). Pour (Tang and Zhao, 2014), l'espace de conception est défini comme un volume qui est utilisé pour relier des surfaces fonctionnelles (SF) et les aider à remplir leurs

rôles fonctionnels. L'espace de conception devrait être le plus grand possible «pour explorer toutes les opportunités d'amélioration de la conception» comme le conseillent (Goelke, 2016).

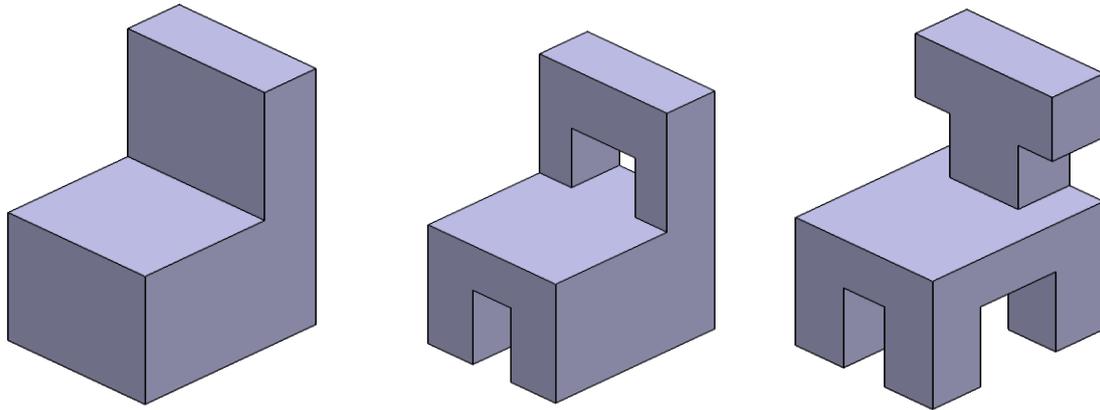


Figure 12. Exemples d'espaces de conception pour l'optimisation topologique d'une chaise

Un espace de non conception (ENC), est la partie de la pièce dans laquelle le logiciel ne modifie pas la répartition de matière.

L'utilisation de l'espace de non conception est facultative lors de l'optimisation topologique. Les espaces de non conception sont:

- utilisés pour représenter une pièce extérieure (tel un coussinet),
- un volume qui ne doit pas être modifié (comme un logo, ou une canalisation)
- les volumes sur lesquels les surfaces fonctionnelles subissent des charges.

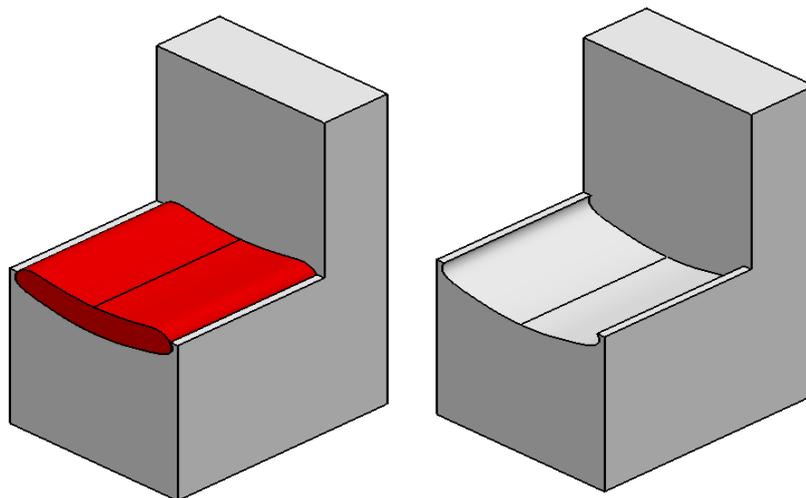


Figure 13. Exemples d'espaces de non-conception pour l'optimisation topologique d'une chaise

### c) Maillage des espaces de conception et de non conception

Le modèle SIMP est un modèle dont le résultat dépend de la précision du maillage (Sigmund and Petersson, 1998) comme le montre la Figure 14. Or lorsque le maillage est fin, le temps de calcul peut devenir très élevé. C'est pourquoi, un compromis entre la taille du maillage et temps de calcul est nécessaire.

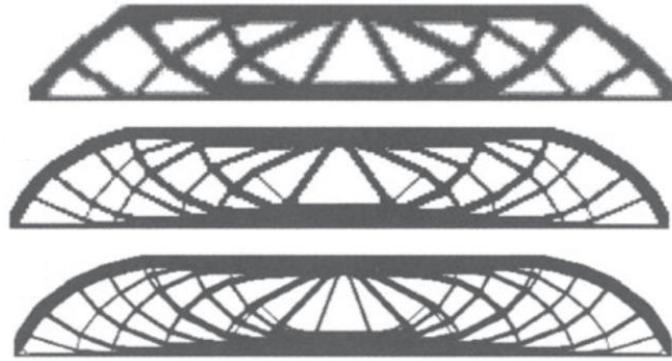


Figure 14. Dépendance au raffinement du maillage (Bendsøe and Sigmund, 2003)

Il est en général indiqué de placer 3 mailles dans les espaces les plus fins et d'appliquer des mailles de tailles plus importantes dans les espaces plus encombrants.

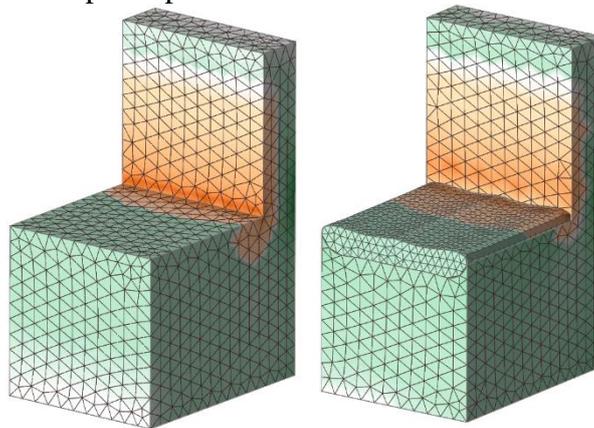


Figure 15. Exemples de maillage de 2 chaises

**d) Conditions aux limites**

Les cas de chargement doivent être déterminés pour chaque étape de la vie de la pièce ou du produit. Cela signifie que doivent être prise en compte des phases de fabrication (montage, usinage...) (Benoist et al., 2018), assemblage, fonctionnement, maintenance, ou étapes de recyclage par exemple. La non-prise en compte des différentes phases de vie peut conduire à la destruction de la pièce comme dans le cas de la Figure 16.

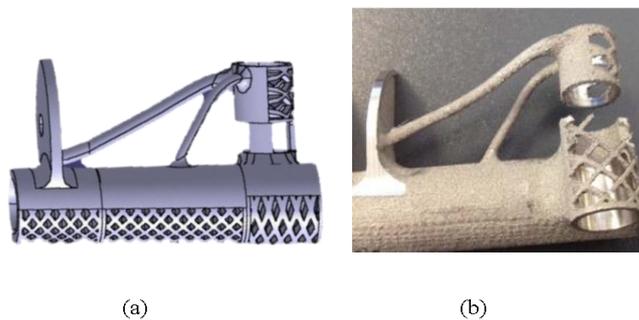
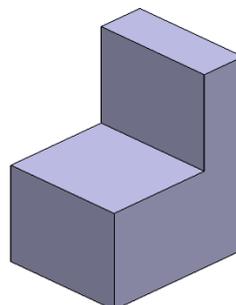


Figure 16. (a) Conception sous CAO; (b) Destruction de la pièce lors du post-traitement par usinage. Adapté de (Doutre, 2015; Hoang et al., 2015)

Dessinez une proposition de conditions aux limites pour la chaise suivante en phase de fonctionnement :

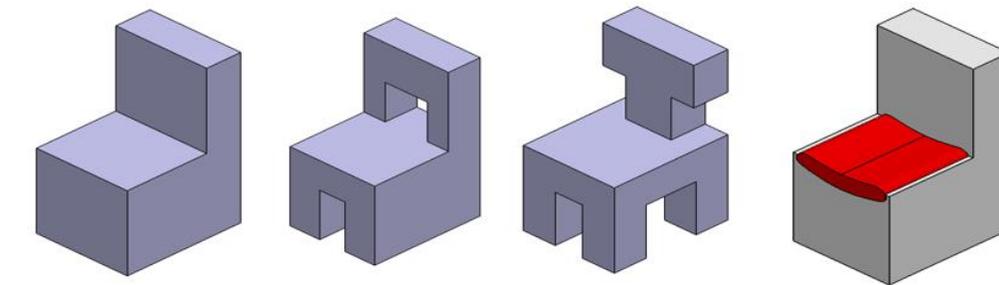


**e) Objectifs, contraintes et paramètres**

L'objectif de l'optimisation dépend du besoin du concepteur. Généralement il s'agit de minimiser la masse ou de minimiser la compliance (flexibilité). Afin de poser correctement le problème d'optimisation, l'objectif doit être accompagné d'une contrainte aidant l'algorithme à converger vers une solution. Par exemples :

- minimiser la masse avec une contrainte en fréquence (maximiser la première fréquence propre),
- minimiser la compliance avec une contrainte sur le volume.

**f) Exemples**



Maximisation de la raideur, 30% masse, seuil de densité 50%

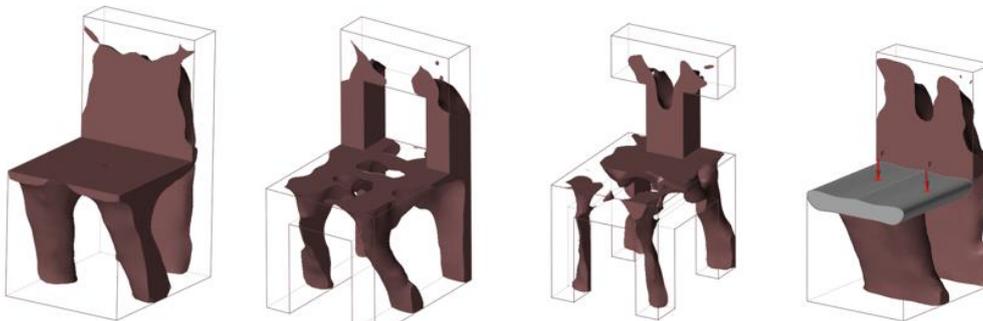


Figure 17. Exemple d'optimisations topologique pour différents EC et ENC d'une chaise

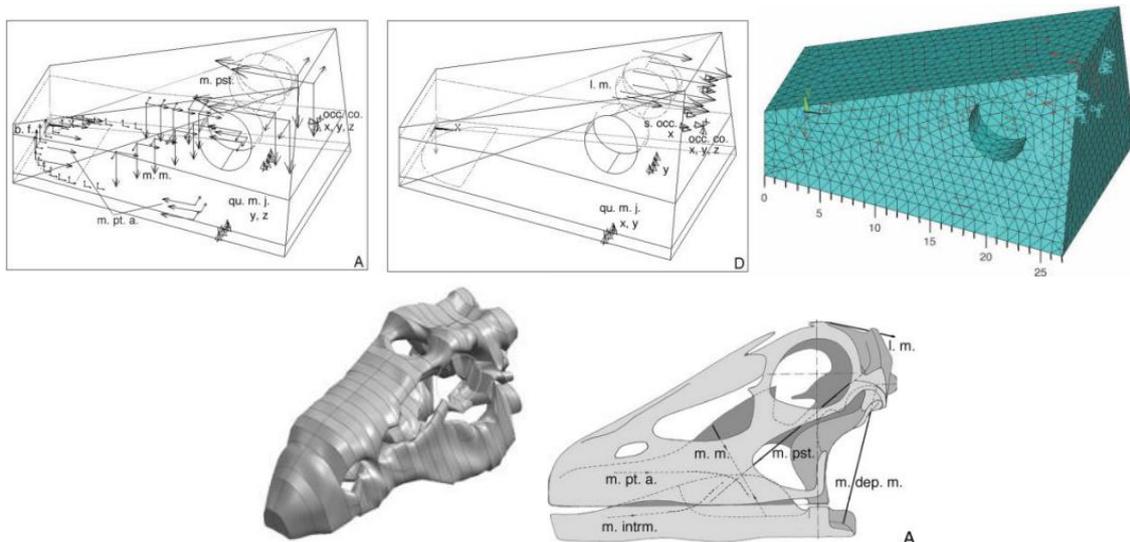


Figure 18. Optimisation topologique avec les cas de charge lors d'une phase de vie d'un diplodocus (Witzel and Preuschoft, 2005)

**V. Comment concevoir pour la fabrication additive ?**

**1) Les étapes**

Les étapes usuelles de conception pour la fabrication additive sont au nombre de quatre comme le montre la Figure 19.

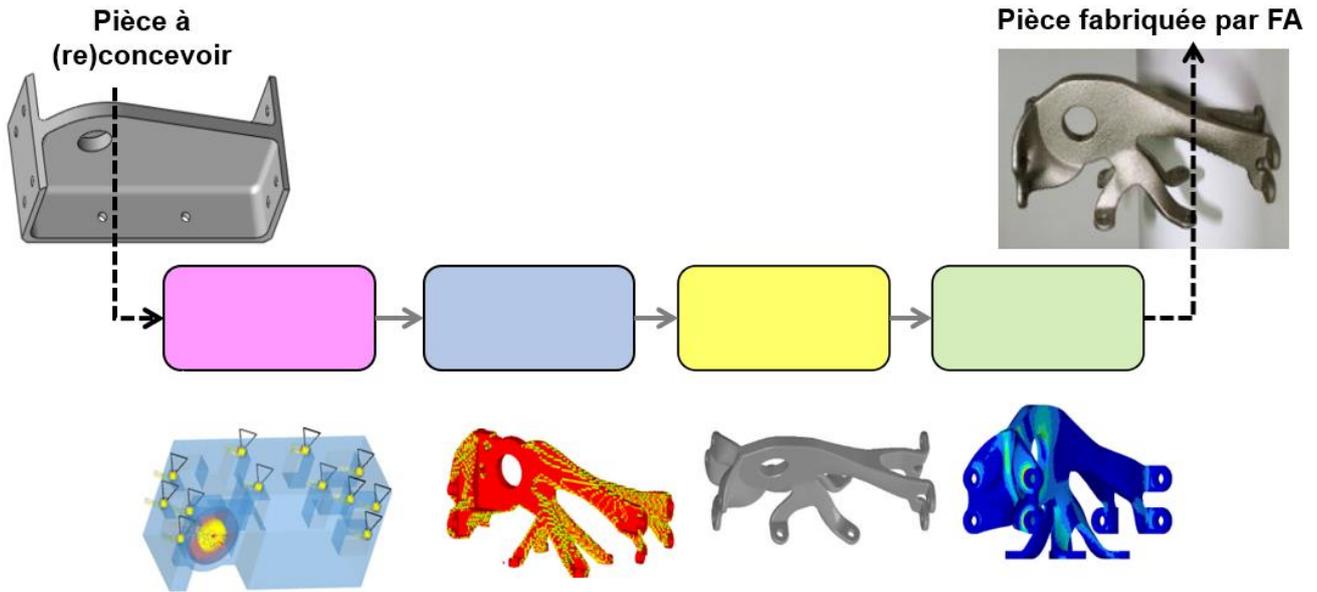


Figure 19. Etapes de conception usuelles illustrées par l'étude de (Seabra *et al.*, 2016)

Nous allons appliquer et détailler chacune de ces étapes à travers un exemple. Il s'agit d'une perforatrice, montrée à la Figure 20, utilisée dans un milieu de type atelier de production. Ce mécanisme est initialement réalisé par des procédés conventionnels de type usinage.

La fonction principale de ce mécanisme est de perforer des feuilles de papier, de carton et des feuilles métalliques de faibles épaisseurs. Dans cette étude de cas, il est proposé de reconcevoir la perforatrice pour la réaliser par fabrication additive.

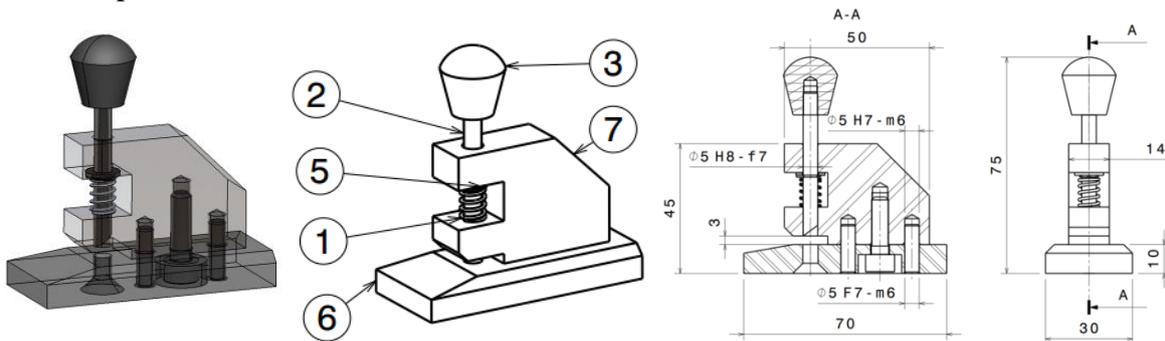
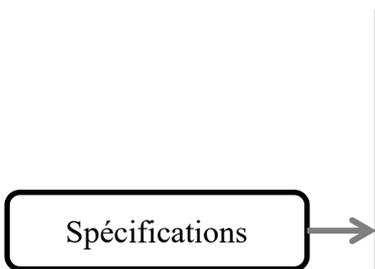


Figure 20. Version initiale de la perforatrice.

**2) Etape 1 : Spécifications**

Cette première étape est celle réalisée pour toute conception, quel que soit le procédé de fabrication. La différence sont les le choix des pièces à fabriquer par FA et l'énoncé clair des objectifs de la conception pour la FA et des critères influant. Toutes les étapes sont définies à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**



### ☞ Application sur la perforatrice :

Les objectifs de cette reconception sont les suivants :

- obtenir une perforatrice plus légère,
- moins encombrante,
- et plus design (dans le sens esthétique).

Les caractéristiques influant l'objectif sont :

- La masse (masse actuelle : 121,1 g)
- Le volume de l'ensemble (volume actuel de la boîte englobante : 41,5 cm<sup>3</sup>)
- L'esthétique générale

Est-ce intéressant de réaliser la perforatrice par FA?

- Petite et moyenne série
- Besoin de diminution « Time to market »
- Ratio buy to fly
- Regroupement de pièces en une seule
- Individualisation
- Conception « légère »
- Conception de pièce influant les performances

Quelles sont les pièces en réaliser par FA?

Les phases de vie sont :

- Fabrication
- Post-traitement
- Utilisation
- Transport/déplacement (non fixé à 1 établi)

Un extrait de l'analyse fonctionnelle externe pendant la phase d'utilisation du cycle de vie est proposé à la

Figure 21.

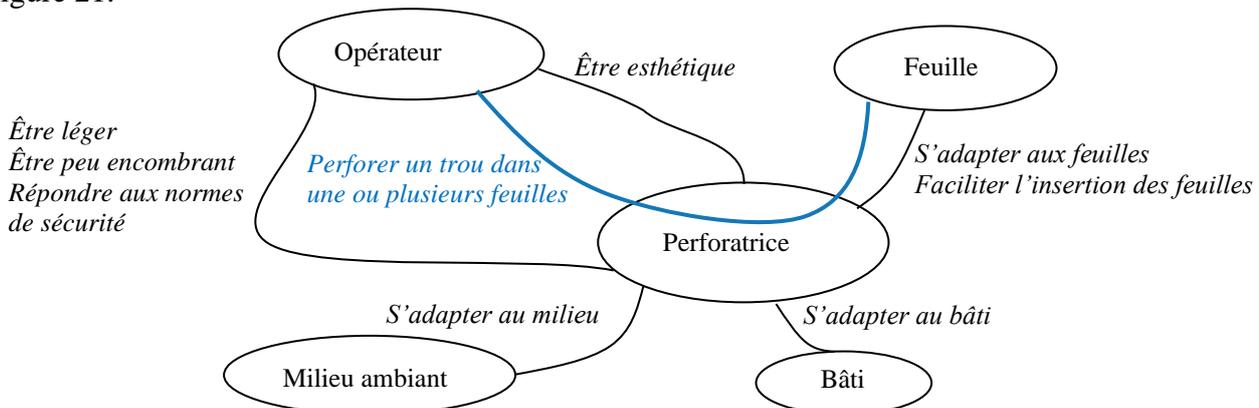
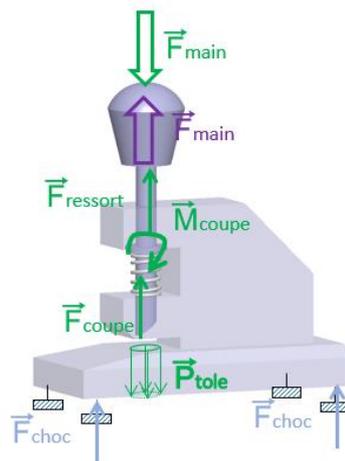


Figure 21. Diagramme des interacteurs de l'étude de cas en phase d'utilisation de la « perforatrice »

Extrait du cahier des charges :

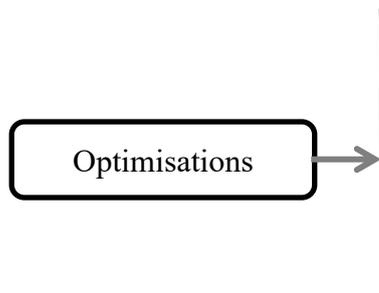
Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité
S'adapter aux feuilles	<ul style="list-style-type: none"> <li>Épaisseur totale</li> <li>Nb de feuilles</li> <li>Matière de la feuille</li> </ul>	ep total 2 mm maximum 3 feuilles cartonnées 1 feuille métallique (0,5mm maxi)	+/-0,5 mm
Être léger	Masse totale	100 gr maximum	+5%
Être peu encombrant	Volume total	40 cm3 maximum	+5%

Les conditions aux limites sont les intensités d'efforts que subit chaque classe d'équivalence du produit. Pour exemple, en phase d'utilisation, la main de l'opérateur effectue une action suivant l'axe de guidage du coulisseau poinçonneur d'environ 50 N.

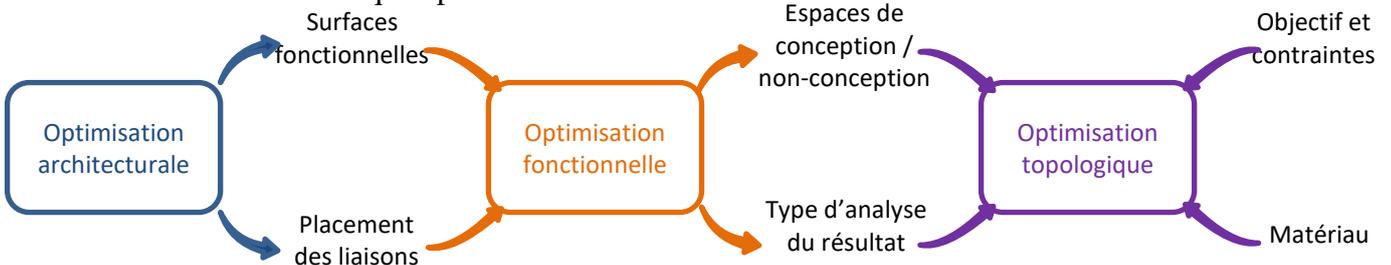


### 3) 2<sup>ème</sup> étape : Optimisations

L'étape optimisations » est composée de 3 optimisations :



Les entrées et sorties de chaque optimisation sont détaillées ci-dessous.



### a) Optimisation architecturale

Par optimisation architecturale, on entend une optimisation d'une pièce ou d'un produit pour atteindre l'objectif de conception (augmenter la rigidité ou diminuer la masse par exemple). Pour un système mécanique, cela se fait en trois étapes :

- Optimiser le nombre de pièces et de matériaux par une conception monolithique.
- Optimiser l'emplacement des liaisons cinématiques.  
Cela doit permettre de diminuer le volume de l'assemblage et d'améliorer son comportement mécanique (cinématique et dynamique).
- Optimiser les liaisons d'interfaces, que ce soit pour une pièce ou un produit mécanique et ce, sans tenir compte de contraintes technologiques de réalisation.  
Cette étape doit permettre de réduire les opérations de montage, le volume de la pièce ou du système et de réduire le nombre de pièces d'assemblage.

#### ☞ Application sur la perforatrice :

- Conception monolithique

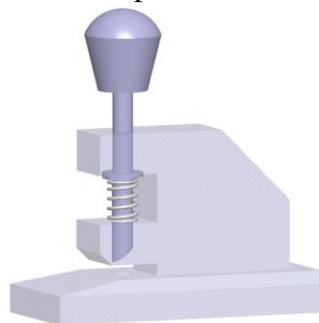
La semelle 6 et le carter 7 (voir Figure 20 à la page 22) peuvent-ils être conçus en une seule pièce ?

- Pas de mvt relatif pdt le fonctionnement ?
- Comportement identique en tout point ?
- Les pièces ne doivent pas être séparées pour le montage ?
- Ne doit pas impliquer un supplément d'outillage ?
- Ne doit pas impliquer une augmentation de coût ou de difficulté de fabrication ?
- Ne doit pas empêcher le recyclage ?

La poignée 3 et le poinçon 2 peuvent-ils être conçus en une seule pièce ?

- Les liaisons d'interfaces

Il s'agit ici du contact entre le bâti et l'établi sur lequel il sera posé. Le système actuel propose un appui plan. Il est possible de réduire la superficie de ce contact à trois ou quatre contacts ponctuels. Pour des raisons de stabilité, le nombre de quatre contacts ponctuels sera retenu.



- Emplacement des liaisons cinématiques

Le système présenté peut avoir des configurations différentes entraînant plus ou moins des variations de volume, une complexification de montage ...

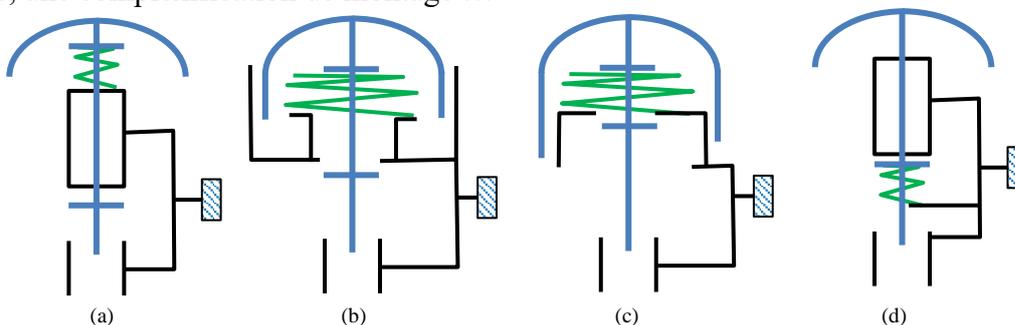
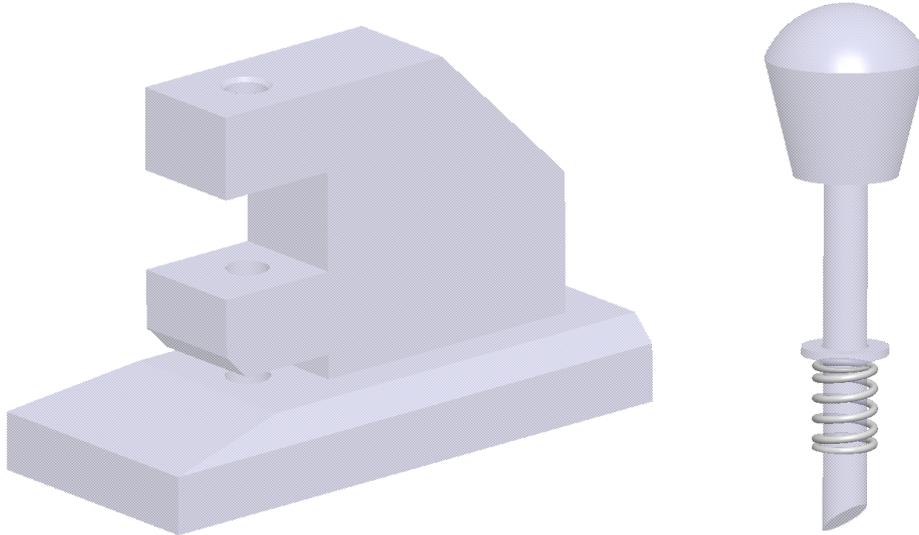


Figure 22. Différentes positions des liaisons et configurations pour le cas d'étude « perforatrice »

Les schémas cinématiques (a) et (d) ont pour différence principale l'emplacement du ressort de rappel. Cet emplacement implique un montage du ressort entre la poignée du poinçon (a) et le bâti ou entre le poinçon et le bâti (d). Le schéma (b) se diffère du schéma (c) par le guidage de la liaison pivot glissante du poinçon par rapport au bâti. Dans le schéma (b), l'alésage est réalisé par le bâti autour de la poignée alors que dans (c) l'alésage est la poignée autour du bâti. Ces deux schémas vont induire un encombrement plus grand que pour le (a) et le (d). Afin de répondre aux objectifs de reconception les schémas (a) et (d) de la *Figure 22* sont les plus adaptés. A titre d'exemple, le schéma (d) sera retenu.

- Surfaces fonctionnelles

Tracez les surfaces fonctionnelles sur le carter et sur le poinçon.



### **b) Optimisation fonctionnelle**

L'optimisation fonctionnelle correspond à l'optimisation d'une pièce ou d'un produit mécanique en exploitant les opportunités de la FA. Il s'agit d'améliorer une pièce ou un produit en termes de performances et de fonctionnalités. Trois points doivent être améliorés pour atteindre cet objectif, et ce, quelle que soit la phase du cycle de vie en fonctionnement considérée :

- Le flux de transmission de puissance.  
Cela correspond aux dispositifs mécaniques permettant de transmettre un mouvement d'une pièce à une autre.
- Le flux d'énergie (comme le carburant ou le système hydraulique).  
Cela correspond aux écoulements fluides, aux transferts thermiques, aux flux magnétiques et électriques...
- Les liaisons cinématiques.

De plus, un potentiel d'amélioration pourra être obtenu par le bio-mimétisme ou le choix de matériaux innovants qui sera un choix à établir par le concepteur.

Un exemple illustrant bien l'optimisation fonctionnelle est la réalisation par la société Atlas Copco d'un connecteur hydraulique par L-PBF. Spécialisé dans l'outillage et l'équipement en Suède la réalisation pour une plate-forme de forage souterrain a exploité le potentiel de la FA en réalisant des canalisations diminuant les pertes de charges et en réalisant des pré taraudages (Diegel *et al.*, 2020).

Le Tableau 3 indique les gains en masse, temps de fabrication et temps de livraison de la pièce.

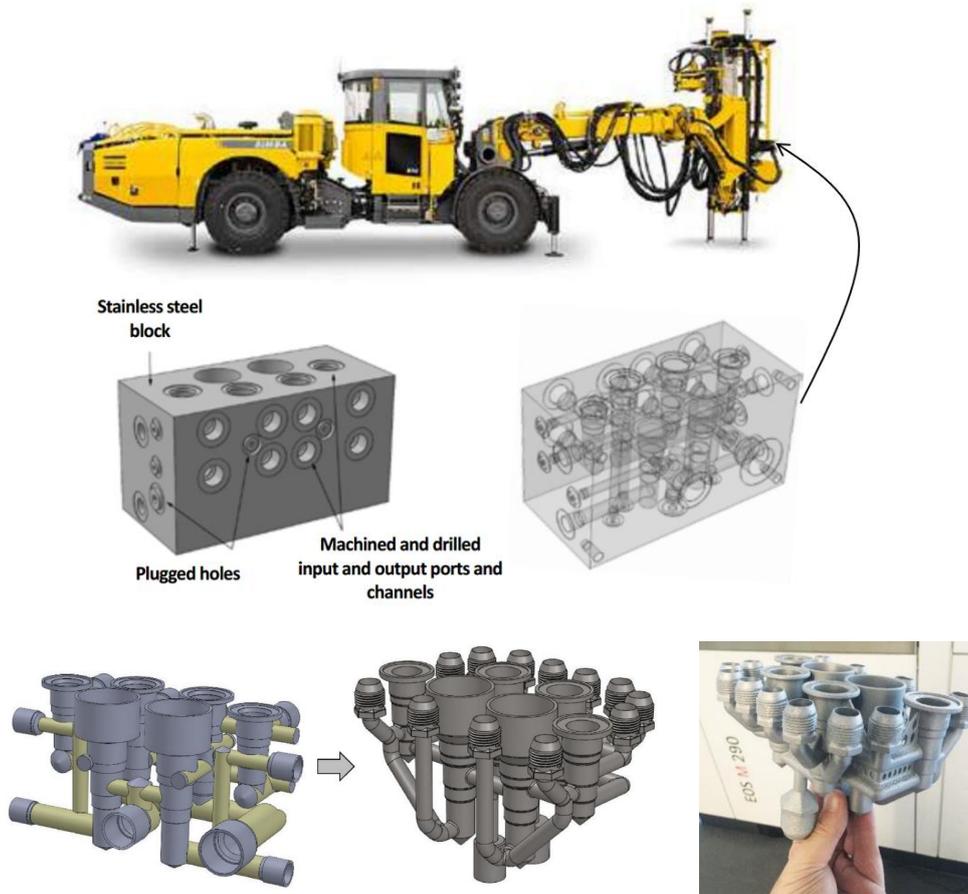


Figure 23. Les étapes de conception et réalisation du connecteur (Diegel *et al.*, 2020)

Tableau 3 : Comparatif entre fabrication traditionnel, FA et matériau

Wall thickness:	N/A but shortest distance from pipe to outer wall was 10 mm	uniform 2 mm pipe thickness with 1.5 mm support walls and gussets	uniform 2 mm pipe thickness with 1.5 mm support walls and gussets
Material:	316 stainless steel	AlSi10Mg	316 l stainless steel
Part weight	16.2 Kg (inc. hydraulic fittings)	0.494 Kg	1.4 Kg
Weight saving % by volume of support material	N/A	96.9 % < 2% if band-saw cut from build plate < 0.8 % if EDM cut from build plate	91.2 % < 2% if band-saw cut from build plate < 0.8 % if EDM cut from build plate
Pre and post-processing time	15 min to screw in and seal hydraulic fittings	15 min	30 minutes
Manhattan distance	2346 mm	1744 mm	1744 mm
Ultimate burst pressure	66,220 PSI (456 MPA)	26,687 psi (184 MPA)	36,201 psi (249 MPA)
Max allowable pressure	33,150 PSI (228 MPA)	7832 psi (53.9 MPA)	14,330 psi (98 MPA)
Design factor		.5	.5
Max Hydraulic hose operating pressure	4750 psi (32 MPA)		
Technology	CNC machined	EOS M290 metal powder-bed fusion AM system	Renishaw AM250 metal powder-bed fusion AM system
Cost	US\$1200.40	US\$1300.00	US\$1,579.48
Manufacturing/print time:	12 h CNC time, 4 week lead time	26.36 h – 3 lattice filled cylinder test parts = ~24 h	24 h
Manufacturer	CAMEX	UoA CDAM Lab	RAM3D

☞ **Application sur la perforatrice :**

Proposez des améliorations pour optimiser le fonctionnement de la perforatrice sur le poinçon :

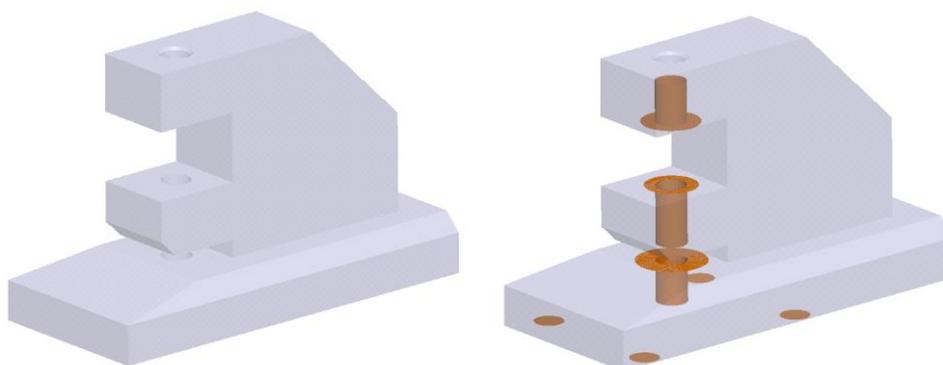
- Diminution du frottement
- Annulation de l'arc boutement
- Récupération tout l'effort de l'opérateur



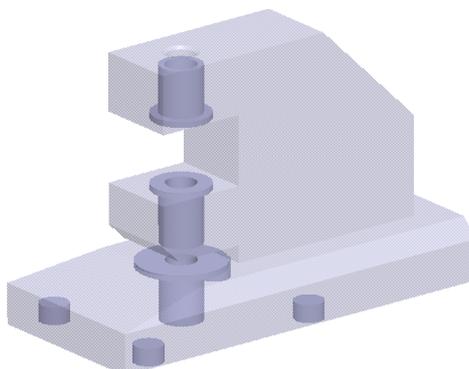
c) **Optimisation topologique**

☞ **Application sur la perforatrice :**

A partir des étapes illustrées à la Figure 11 page 18, tracez les espaces de non-conception du carter.



Proposez un espace de conception.



Suite à cela, les étapes pour l'optimisation sont figurées ci-dessous.

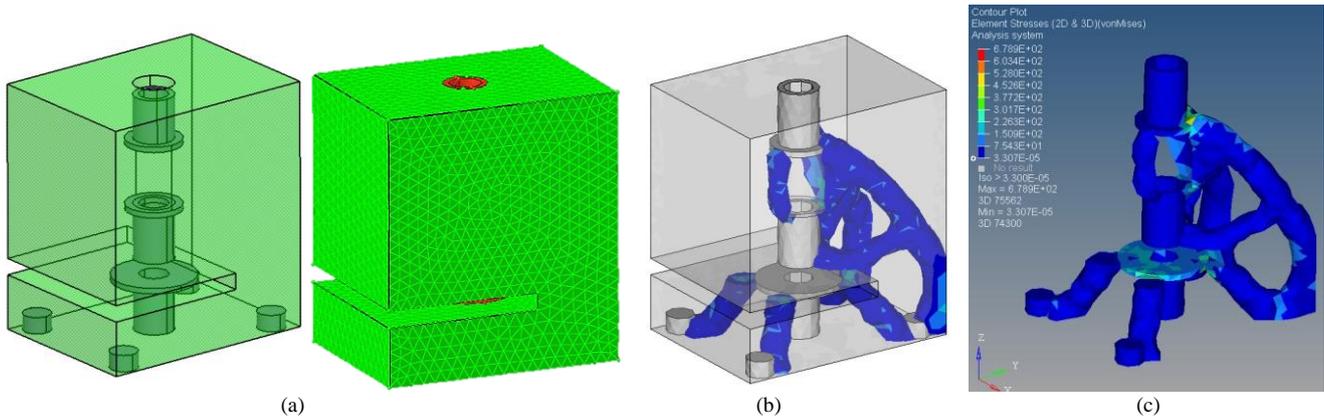


Figure 24. Quelques étapes lors de l'optimisation topologique du carter de la « Perforatrice ». (a) Maillage des volumes ; (b) Choix du seuil de densité ; (c) Vérification du comportement du résultat non re-conçu. Etude de cas « la perforatrice » sous la suite HyperWorks

#### 4) 3<sup>ème</sup> étape : Conceptions

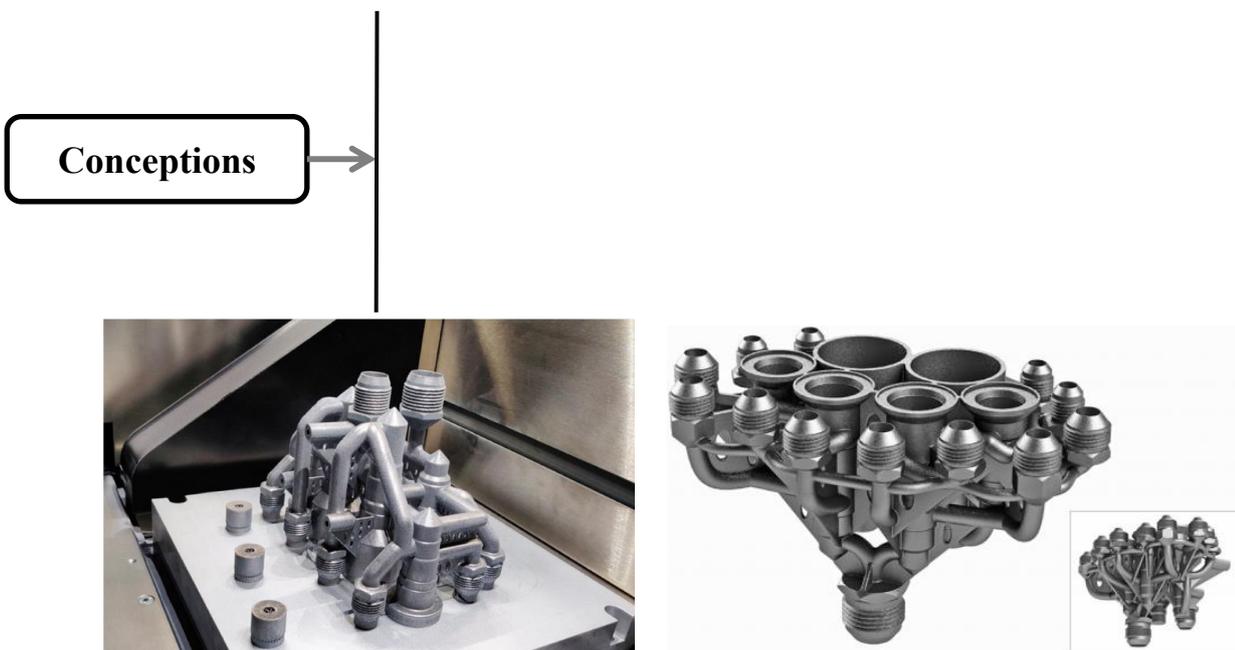


Figure 25. Pièce brute (à gauche) avec supports, surpasseur d'usinage... ; Pièce finit (à droite)

##### a) Conception de la pièce fini

La conception de la pièce « finie » doit prendre en compte les règles de tracé (et astuces), les contraintes de fabrication permettant d'éviter les défauts de fabrication, une quantité de supports trop importante, un temps de fabrication élevé...

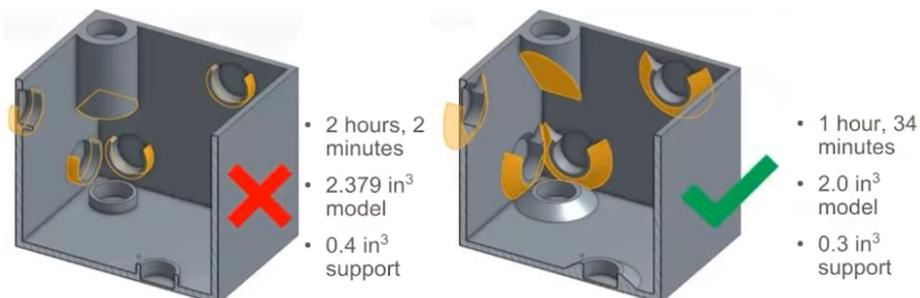


Figure 26. Astuces pour diminuer la quantité de support et le temps de fabrication (source <https://www.cati.com>)



Figure 27. Astuces pour la réalisation de surfaces en porte à faux (source : renishaw.com)

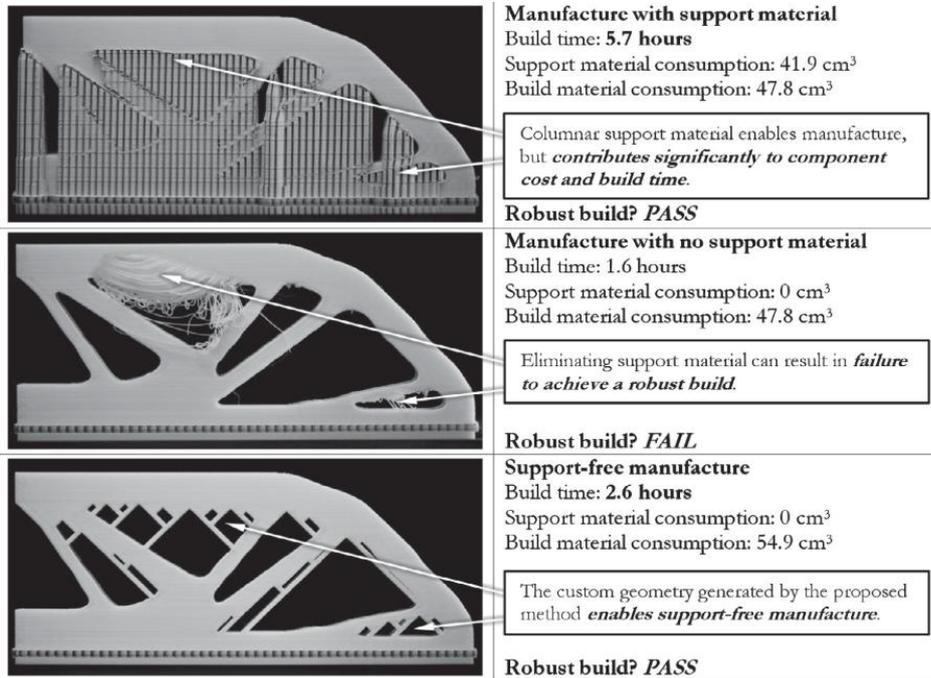
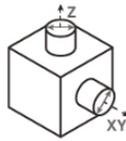


Figure 28. Astuces pour la réalisation de surfaces en porte à faux en éliminant tout support (Leary *et al.*, 2014)

structure		unfavourable	favourable	explanation	restrictions and recommendations		
Design Process – TiAl6V4	general geometry / part form	general			<ul style="list-style-type: none"> <li>part size must consider substrate plate dimensions</li> <li>rotate, scale or separate parts if necessary</li> </ul>	max. part dimensions incl. substrate plate: x = ca. 250 mm, y = ca. 250 mm, z = ca. 215 mm (see machine manufacturers for more information; larger machines available)	
		general part size	inclusion of substrate platform			<ul style="list-style-type: none"> <li>integration of substrate platform into part possible</li> <li>reduction of manufacturing time and costs</li> <li>hybrid manufacturing approach</li> </ul>	
			height			<ul style="list-style-type: none"> <li>radii at the interface part / substrate platform prevent part strip off during manufacturing process</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>the larger the interfaces layer, the larger the radius should be</li> <li>r=3-5 mm suitable for TiAl6V4</li> </ul>
		cavities	integration of functions	height			<ul style="list-style-type: none"> <li>part height in build up direction should equal multiple layer thicknesses</li> </ul>
	volume					<ul style="list-style-type: none"> <li>prefer integral part design</li> <li>reduction of manufacturing time</li> </ul>	
	design					<ul style="list-style-type: none"> <li>use cavities in order to reduce the part volume to be exposed</li> <li>reduction of manufacturing time and cost</li> </ul>	
					<ul style="list-style-type: none"> <li>avoid powder nesting by designing simple cavity geometries</li> </ul>		

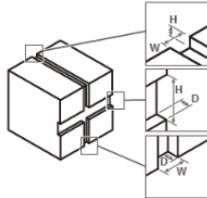
Figure 29. Extrait de règles de tracé pour la L-PBF titane (Kranz, Herzog and Emmelmann, 2015)



Diamètre minimum d'un pion

XY : 3,0 mm  
Z : 3,0 mm

Un pion avec un rayon trop petit peut ne pas s'imprimer correctement. Le rapport entre la hauteur et le diamètre doit être pris en compte, car les composants hauts et fins peuvent onduler ou se détacher.

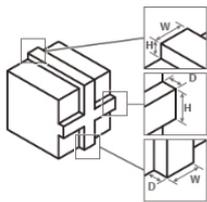


Composante de gravure minimum

H : 0,13 mm  
W : 0,5 mm  
  
H : 1,5 mm  
D : 0,5 mm  
  
W : 0,5 mm  
D : 0,5 mm

Les gravures peuvent se fondre dans le reste du modèle si elles sont trop petites, c'est pourquoi il est conseillé de respecter les dimensions minimales indiquées.

Les exemples les plus courants incluent le texte et la texture.



Composante de relief minimum

H : 0,13 mm  
W : 1 mm  
  
H : 1,3 mm  
D : 0,5 mm  
  
W : 1 mm  
D : 0,5 mm

Les reliefs sont soumis aux mêmes règles que les gravures, si les reliefs ne sont pas assez prononcés et trop petits ils se fondent dans le reste du modèle.

Figure 30. Extrait de règles de tracé pour la FdM Métallique (Neofab, 2019)

🔑 **Application sur la perforatrice :**

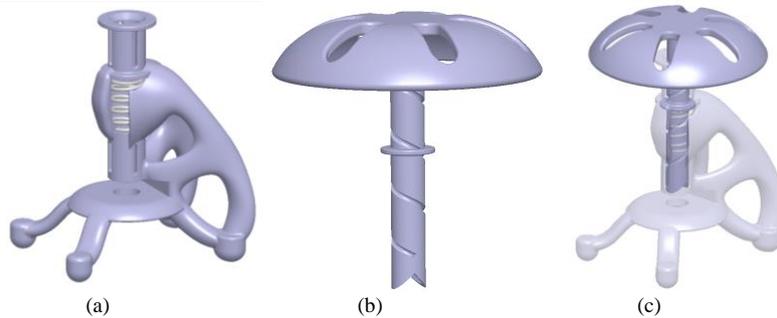


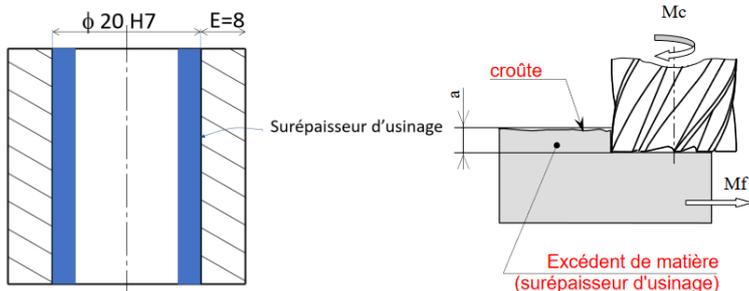
Figure 31. (a) Reconception du carter ; (b) Reconception du poinçon ; (c) Assemblage fini de la « perforatrice »

**b) Conception de la pièce brut**

La conception du brut de fabrication doit prendre en compte les surépaisseurs d'usinage, les supports qu'il faudra enlever (facultatif), le correctif aux déformations lors de la fabrication...

- Surépaisseur d'usinage

C'est l'épaisseur nécessaire pour l'enlèvement de la matière par usinage. Plus la qualité est importante plus il y aura des opérations d'usinage



Mode d'usinage	Opérations	Copeaux minima
Tournage	Écroûtage	1 à 3
	Ébauche sans écroûtage	1
Fraisage	Ébauche après écroûtage	0.5
Rabotage	Demi-finition	0.5
	Finition	0.2
Rectification	Finition	0.05
Rodage	Finition	0.03
Brochage	Finition	0.05

*Valeurs usuelles des copeaux minima pour les principales opérations d'usinage*

- Perçages (surfaces en porte à faux)

Pour éviter la partie en porte à faux des perçages, des formes en losange peuvent être réalisées. Un perça pourra par la suite obtenir le perçage dessiné initialement sur le modèle finit.



Figure 32. Astuces pour diminuer les supports et défauts géométriques. Comparaison entre la pièce obtenue par optimisation topologique (à gauche) et la pièce ayant subi en plus des modifications suivant les règles de tracé adaptées au procédé LBM pour diminuer les supports et le post traitement (à droite). (Saunders, 2017)

- Les supports

Les supports ont trois rôles

- Le maintien des surfaces en porte à faux
- Evacuer la chaleur
- Lier la pièce au plateau

Si les supports sont nécessaires et que le concepteur souhaite les dessiner (pour l'optimiser par exemple) alors ils font partis du modèle CAO de la pièce brut.



Figure 33. Exemple de support lattice réalisé par optimisation lors de la conception (Vaissier *et al.*, 2019)

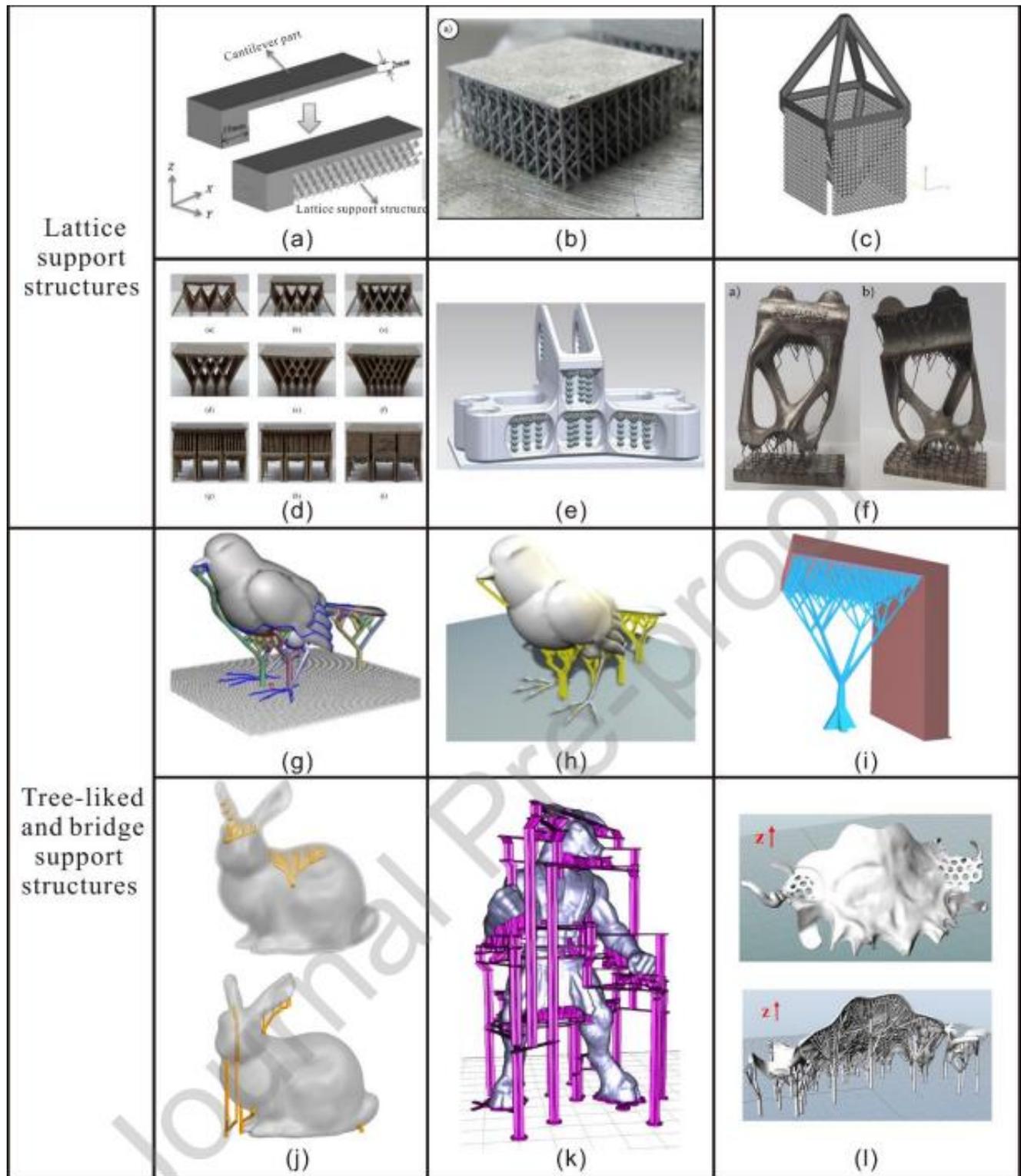
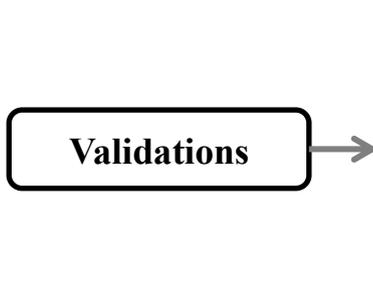


Figure 34. Exemples de différents types de support (Wang *et al.*, 2021)

**5) 4<sup>ème</sup> étape : Validations**



**a) Validation en phases de fonctionnement**

Avant de lancer la production, des phases de validation sont nécessaires. Une validation en phase de fonctionnement permettra de valider le produit dans les phases de vie d'utilisation. Cette validation est nécessaire car la reconception diffère de l'optimisation topologique proposée, il faut donc vérifier sa tenue aux sollicitations mécaniques. Cette vérification peut être réalisée par analyse sous éléments finis en statique mais aussi en dynamique à l'aide de logiciels tels que ADAMS, SolidThinking Inspire ou autre.

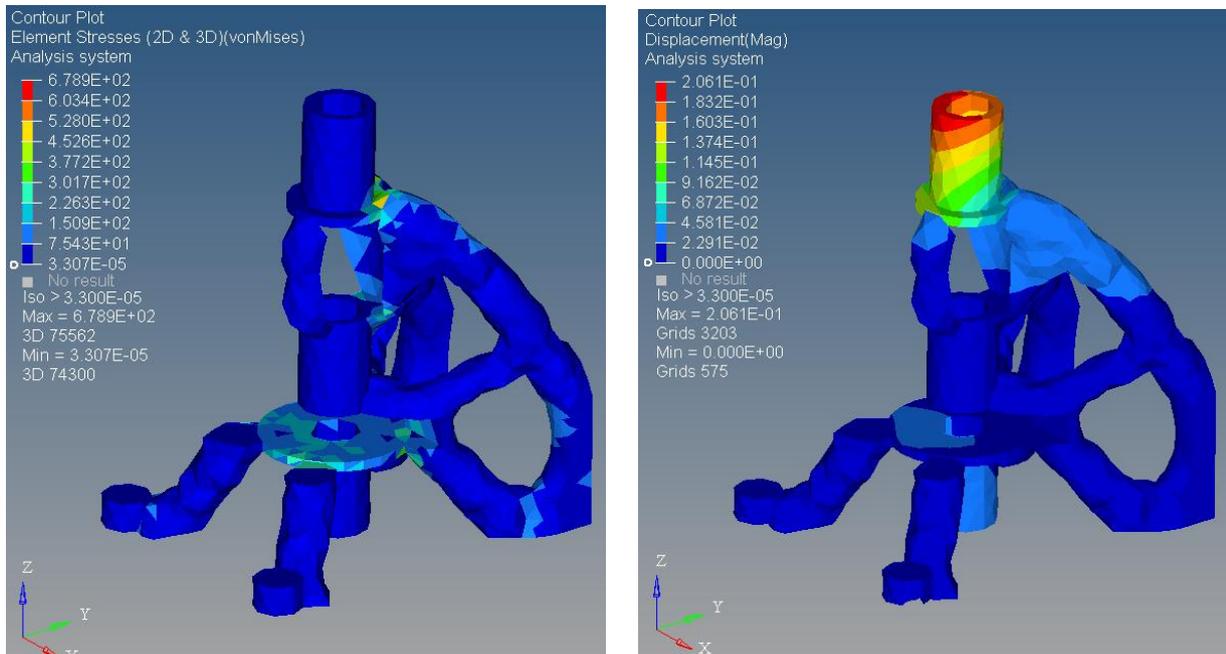


Figure 35. Vérification de la tenue du carter lors de la phase de fonctionnement

**b) Validation en phases de fabrication / post-traitement**

Une validation en phases de fabrication ainsi que de post-traitement permettra de valider la qualité de sa fabrication et assemblage.

La simulation de fabrication permettra de vérifier la fabricabilité de la pièce, les distorsions de matière possibles, le bon choix de l'orientation. Les correctifs des distorsions devront être appliqués sur le modèle CAO. Le dessin du brut de fabrication sera modifié pour prendre en compte les correctifs pour réduire les distorsions.

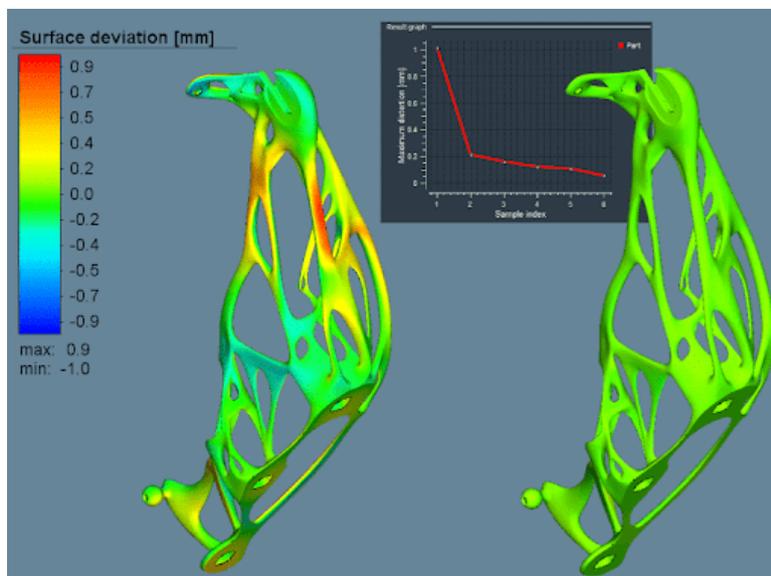


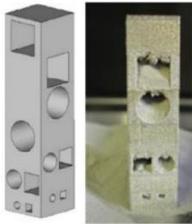
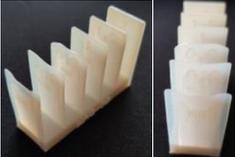
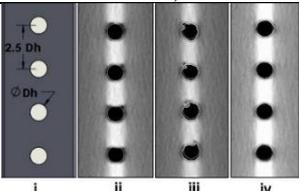
Figure 36. Vérification des distorsions

## VI. Les défauts de l'impression

### 1) Défauts géométriques

On entend par défaut géométrique l'écart entre les formes résultant de la fabrication et les formes nominales définies par la CAO (forme cylindrique ou plane par exemple). Ces défauts peuvent être nuisibles à l'assemblage et au bon fonctionnement. Le Tableau 4 suivant recense de manière non exhaustive les défauts identifiés lors d'impression et ce, quel que soit le procédé.

Tableau 4. Les défauts géométriques classiques en FA

Nom du défaut	Images et références	Procédés de FA concernés	Causes
<b>Effondrement de matière</b>	 <p>Bavures sur un ¼ de tube réalisé par FDM (Chalvin <i>et al.</i>, 2019)</p>	FDM	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Surface à trop forte pente, en porte à faux ou en surplomb</li> <li>– Manque de support</li> <li>– Mauvaise orientation de la pièce</li> <li>– Mauvaise conception</li> </ul>
<b>Scories</b>	 <p>Scories sur LBM (Poyraz <i>et al.</i>, 2015)</p>	LBM	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Surface en porte à faux ou en surplomb</li> <li>– Manque de support</li> <li>– Mauvaise orientation de la pièce</li> <li>– Mauvaise conception</li> </ul>
<b>Manque de matière</b>	 <p>Paroi trop fine sur Polyjet (fabriquée par la plateforme MAQ-3D de l'université de Toulon)</p>	Tous les procédés sauf ceux dédiés pour la nano-impression	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Résolution du procédé</li> </ul>
<b>Distorsion, gauchissement (warping)</b>	 <p>Gauchissement de surface réalisée par LBM (Cooper <i>et al.</i>, 2015)</p>  <p>Gauchissement en FDM (Neofab, 2018)</p>	FDM LBM EBM CLAD WAAM	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Retrait thermique</li> <li>– Retrait de solidification</li> <li>– Manque de support pour l'évacuation thermique</li> <li>– Mauvaise conception</li> </ul>
<b>Défaut de forme</b>	 <p>Défaut de cylindricité de perçages en fonction de l'orientation de fabrication LBM (Snyder <i>et al.</i>, 2016)</p>	FDM LBM EBM	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Retrait thermique</li> <li>– Manque de support pour l'évacuation thermique</li> <li>– Mauvaise orientation de la pièce</li> <li>– Manque de support pour le « maintien de la matière »</li> <li>– Mauvaise conception</li> </ul>



### 2) Défauts surfaciques

Les défauts surfaciques sont ceux du 2<sup>ème</sup> au 4<sup>ème</sup> ordre recensés par les normes GPS. Ils sont relatifs aux ondulations, aux effets escaliers, à la rugosité...

(Pandey, Reddy and Dhande, 2007) ont proposé d'estimer la rugosité en fonction de l'inclinaison des pièces ainsi que du temps nécessaire de fabrication (Figure 37).

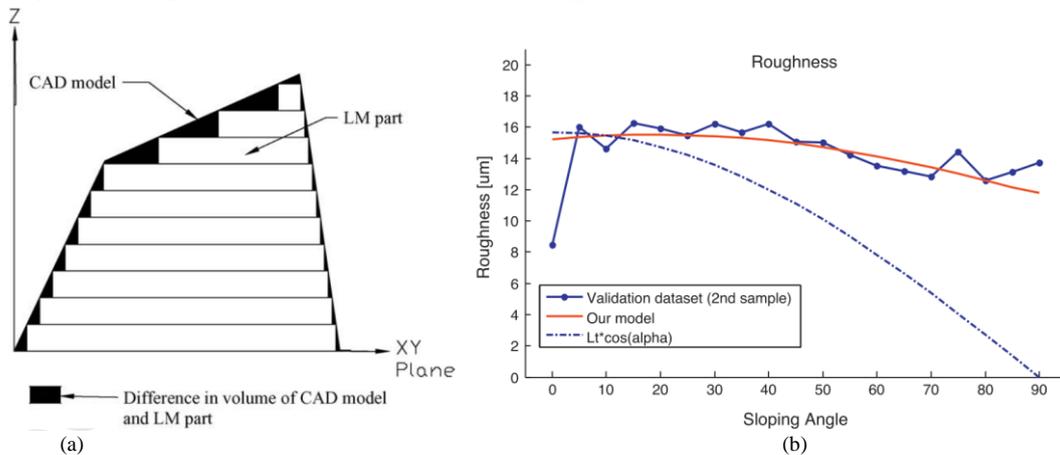


Figure 37. (a) Effet escalier (Pandey, Reddy and Dhande, 2007); (b) Impact de l'orientation de l'impression sur la rugosité pour le procédé LBM adapté de (Strano et al., 2013)

### 3) Tolérances

A ce jour peu d'articles existent sur ce sujet. (Lieneke et al., 2015, 2016) ont réalisé des mesures dimensionnelles sur des pièces réalisées par les technologies FDM, SLS et LBM. Il est à noter que les intervalles de tolérance obtenus en FA dépendent de l'orientation de fabrication comme le montre la Figure 38.

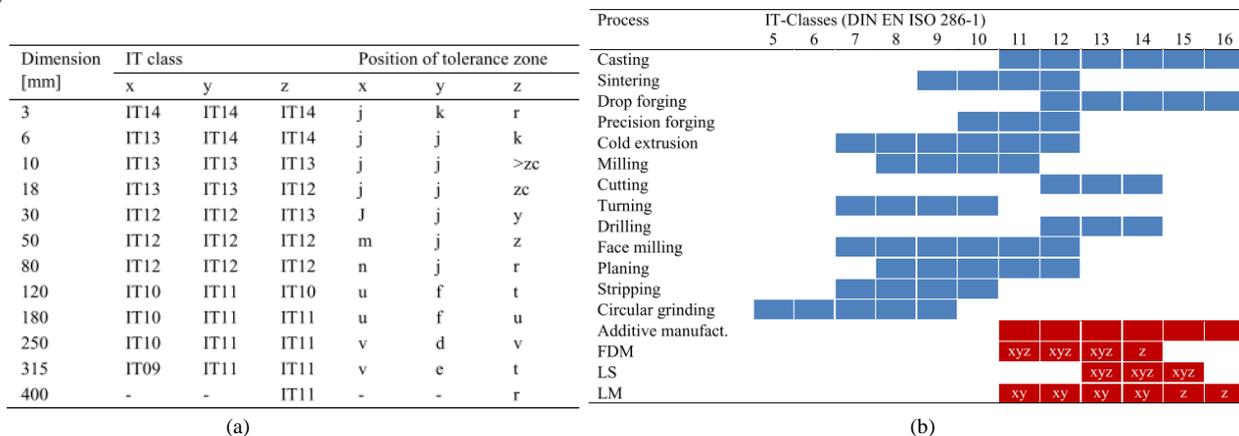


Figure 38. (a) Qualité des intervalles de tolérance (IT) et position de l'IT (DIN EN ISO 286-1) pour la FDM ; (b) Comparaison des IT entre les procédés de fabrication conventionnels et trois procédés de FA (Lieneke et al., 2015, 2016)

Tableau 5. Liste des tolérances réalisables pour les procédés conventionnels et ceux de FA (uz Zaman et al., 2017)

Class	Manufacturing process	Tolerance (mm)
Traditional manufacturing	Sand casting	1.00–5.50
	Die casting	0.26–0.71
	Investment casting	0.1–0.59
	Low pressure casting	0.23–0.59
	Forging	0.59–3.22
	Extrusion	0.34–3.22
	Sheet forming	0.10–3.22
Additive manufacturing	Stereolithography (SLA)	0.025–0.10
	Digital light processing (DLP)	0.10–0.20
	Multi-jet modeling (MJM)	0.10–0.20
	3D printing (3DP)	0.20–0.40
	Fused deposition modeling (FDM)	0.05–0.5
	Electron beam melting (EBM)	0.20–0.40
	Selective laser sintering (SLS)	0.1–0.46
	Selective laser melting (SLM)	0.05–0.10
	Direct metal laser sintering (DMLS)	0.10–0.20
	Laminated object manufacturing (LOM)	0.25–0.50
	Ultrasonic consolidation (UC)	0.127–0.254
	Laser metal deposition (LMD)	0.125–0.250

**VII. Annexe**

**Les règles de conception à respecter pour l'impression 3D**



	Murs supportés	Murs non supportés	Support et porte-à-faux	Détails en relief et gravés	Pont horizontal	Trous	Raccordement/déplacement des pièces	Trous de fuite	Caractéristiques minimales	Diamètre de pinçon	Tolérance
	Murs reliés au reste de l'impression sur au moins deux côtés.	Les murs non supportés sont reliés au reste de l'impression sur moins de deux côtés.	L'angle maximum auquel un mur peut être imprimé sans avoir besoin de support.	Les caractéristiques du modèle qui sont surélevées ou encastrées sous la surface du modèle.	L'envergure qu'une technologie peut imprimer sans avoir besoin de support.	La portée qu'une technologie peut imprimer sans avoir besoin d'aide.	Le jeu recommandé entre deux pièces mobiles ou de liaison.	Le diamètre minimal des trous d'évacuation pour permettre l'enlèvement des matériaux supports.	La taille minimale recommandée d'un élément pour s'assurer qu'il n'y ait pas d'erreur d'impression.	Le diamètre minimum auquel une goupille peut être imprimée.	La tolérance attendue (précision dimensionnelle) d'une technologie spécifique.
Dépôt de Filament	0.8 mm	0.8 mm	45°	0.6 mm de large & 2 mm de hauteur	10 mm	Ø 2 mm	0.5 mm		2 mm	3 mm	±0.5 % (limite inférieure ±0.5 mm)
Stéréolithographie	0.5 mm	1 mm	support toujours requis	0.4 mm de large et de hauteur		Ø 0.5 mm	0.5 mm	4 mm	0.2 mm	0.5 mm	±0.5% (limite inférieure ±0.15 mm)
Frittage sélectif par laser (SLS)	0.7 mm			1 mm de large et de hauteur		Ø 1.5 mm	0.3 mm pour les pièces mobiles et 0.1 mm pour les connexions	5 mm	0.8 mm	0.8 mm	±0.3% (limite inférieure ±0.3 mm)
Projection de matériaux	1 mm	1 mm	support toujours requis	0.5 mm de large et de hauteur		Ø 0.5 mm	0.2 mm		0.5 mm	0.5 mm	±0.1 mm
Projection de liant	2 mm	3 mm		0.5 mm de large et de hauteur		Ø 1.5 mm		5 mm	2 mm	2 mm	±0.2 mm pour le métal & ±0.3 mm pour le sablage
Frittage laser direct des métaux	0.4 mm	0.5 mm	support toujours requis	0.1 mm de large et de hauteur	2 mm	Ø 1.5 mm		5 mm	0.6 mm	1 mm	±0.1 mm

Figure 39. (Neofab, 2018)

**VIII. BIBLIOGRAPHIE**

Agustí-Juan, I. and Habert, G. (2017) 'Environmental design guidelines for digital fabrication', *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 2780–2791. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.190.

Allen, J. (2006) *An investigation into the comparative costs of additive manufacture vs. Machine from solid for aero engine parts, ROLLS-ROYCE PLC DERBY (UNITED KINGDOM)*. doi: 10.14339/RTO-MP-AVT-139-17.

Aremu, A. et al. (2010) 'Suitability of SIMP and BESO topology optimization algorithms for additive manufacture', in *Twenty First Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 679–692.

Attaran, M. (2017) 'The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing', *Business Horizons*, 60(5), pp. 677–688. doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.

Atzeni, E. et al. (2013) 'Additive manufacturing as a cost-effective way to produce metal parts', *High Value Manufacturing*, Bartolo PJ(CRC Press (GBR)), pp. 3-8.

Bandyopadhyay, A. and Heer, B. (2018) 'Additive manufacturing of multi-material structures', *Materials Science and Engineering R: Reports*, 129, pp. 1–16. doi: 10.1016/j.msere.2018.04.001.

Bendsøe, M. P. (1995) *Optimization of structural topology, shape, and material*. Edited by Springer. Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-03115-5.

Bendsøe, M. P. and Sigmund, O. (1999) 'Material interpolation schemes in topology optimization', *Archive of Applied Mechanics*, 69(9–10), pp. 635–654. doi: 10.1007/s004190050248.

Bendsøe, M. P. and Sigmund, O. (2003) *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-05086-6.

Benoist, V. et al. (2018) 'Improved design methodology for additive manufacturing including machining

- load cases : application to an aeronautical’, in *Conférence MUGV 2018 et Manufacturing ’21*.
- Boothroyd, G. (1994) ‘Product design for manufacture and assembly’, *Computer-Aided Design*, 26(7), pp. 505–520. doi: [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(94\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0010-4485(94)90082-5).
- Bouaziz, O., Bréchet, Y. and Embury, J. D. (2008) ‘Heterogeneous and architected materials: A possible strategy for design of structural materials’, *Advanced Engineering Materials*, 10(1–2), pp. 21–36. doi: 10.1002/adem.200700289.
- Burkhart, M. and Aurich, J. C. (2015) ‘Framework to predict the environmental impact of additive manufacturing in the life cycle of a commercial vehicle’, *Procedia CIRP*, 29, pp. 408–413. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.194.
- Cali, J. *et al.* (2012) ‘3D-printing of non-assembly, articulated models’, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 31(6), p. 130. doi: Artn 130 10.1145/2366145.2366149.
- Calignano, F. *et al.* (2014) ‘Direct fabrication of joints based on direct metal laser sintering in aluminum and titanium alloys’, *Procedia CIRP*, 21, pp. 129–132. doi: 10.1016/j.procir.2014.03.155.
- Campbell, R. I., Jee, H. and Kim, Y. S. (2013) ‘Adding product value through additive manufacturing’, in *The Design Society*.
- Cavazzuti, M. *et al.* (2011) ‘High performance automotive chassis design: A topology optimization based approach’, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 44(1), pp. 45–56. doi: 10.1007/s00158-010-0578-7.
- Chalvin, M. *et al.* (2019) ‘Automatic multi-axis path planning for thinwall tubing through robotized wire deposition’, *Procedia CIRP*, 79, pp. 89–94. doi: 10.1016/j.procir.2019.02.017.
- Conner, B. P. *et al.* (2014) ‘Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services’, *Additive Manufacturing*, 1, pp. 64–76.
- Cooper, K. *et al.* (2015) ‘Contact-free support structures for part overhangs in powder-bed metal additive manufacturing’, *Progress in Additive Manufacturing*, 1, pp. 9–20. Available at: [https://www.sme.org/uploadedFiles/Membership/Members-Only\\_Content/Chou-Kevin\\_Contact-Free-Support-Structures-for-Par.pdf](https://www.sme.org/uploadedFiles/Membership/Members-Only_Content/Chou-Kevin_Contact-Free-Support-Structures-for-Par.pdf).
- Cotteleer, M. J. (2014) ‘3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth’, *SIMT Additive Manufacturing Symposium*, p. 23. Available at: [http://simt.com/uploads/4881/SIMT\\_AM\\_Conference\\_Keynote.pdf](http://simt.com/uploads/4881/SIMT_AM_Conference_Keynote.pdf).
- Cuellar, J. S. *et al.* (2018) ‘Additive manufacturing of non-assembly mechanisms’, *Additive Manufacturing*, 21, pp. 150–158. doi: 10.1016/j.addma.2018.02.004.
- Diegel, O. *et al.* (2020) ‘Design for additive manufacturing process for a lightweight hydraulic manifold’, *Additive Manufacturing*, 36(July), p. 101446. doi: 10.1016/j.addma.2020.101446.
- Doutre, P. (2015) ‘Conception pour la fabrication additive’, in *20e Assises européennes de fabrication additive*.
- Durakovic, B. and Durakovic, B. (2018) ‘Design for Additive Manufacturing : Benefits , Trends and Challenges’, 6(2), pp. 179–191. doi: 10.21533/pen.v6i2.224.
- Emmelmann, C. *et al.* (2011) ‘Laser additive manufacturing and bionics: Redefining lightweight design’, *Physics Procedia*, 12(PART 1), pp. 364–368. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.046.
- Eschenauer, H. A. and Olhoff, N. (2001) ‘Topology optimization of continuum structures: A review’, *Applied Mechanics Reviews*, 54(4), p. 331. doi: 10.1115/1.1388075.
- Fagade, A. A. and Kazmer, D. (1999) ‘Optimal componet consolidation in molded product design’, in *Design Engineering Technical Conference, Las Vegas*. NEvada.
- Frechard, J. (2015) ‘CLAD process to build and repair aeronautic parts’, in *Assises Européennes de la Fabrication Additive*. Châtenay-Malabry.

- Gao, W. *et al.* (2015) 'The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering', *Computer-Aided Design*, 69, pp. 65–89. doi: 10.1016/j.cad.2015.04.001.
- Gaynor, A. T. *et al.* (2014) 'Multiple-material topology optimization of compliant mechanisms created via polyjet three-dimensional printing', *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), p. 061015. doi: 10.1115/1.4028439.
- Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M. and Visser, C. (2014) 'A global sustainability perspective on 3D printing technologies', *Energy Policy*, 74(C), pp. 158–167. doi: 10.1016/j.enpol.2014.08.033.
- Goelke, M. (2016) *5 ways to rethink optimization*. Available at: <https://altairuniversity.com/24623-5-ways-to-rethink-optimization/> (Accessed: 6 December 2017).
- Guo, X. and Cheng, G.-D. (2010) 'Recent development in structural design and optimization', *Acta Mechanica Sinica*, 26(6), pp. 807–823. doi: 10.1007/s10409-010-0395-7.
- Harris, I. D. (2017) 'Development and implementation of metals additive manufacturing', in *Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry*, pp. 215–224. doi: 10.1201/9781315119106.
- Hoang, T. *et al.* (2015) 'Place du prototype dans l'étape d'analyse d'un processus de reconception de pièce pour une fabrication additive', in *14ème Colloque National AIP PRIMECA.*, pp. 1–6.
- Hofmann, D. C. *et al.* (2014) 'Developing gradient metal alloys through radial deposition additive manufacturing', *Scientific Reports*, 4. doi: 10.1038/srep05357.
- Inovar Communications Ltd (2016) 'FIT AG: Laying the foundations for high-volume metal Additive Manufacturing', *Magazine for Metal Additive Manufacturing Industry*, 2(3), pp. 49–58. Available at: Published by Inovar Communications Ltd [www.metal-am.com](http://www.metal-am.com).
- Kamps, T. *et al.* (2017) 'Systematic biomimetic part design for additive manufacturing', *Procedia CIRP*, 65, pp. 259–266. doi: 10.1016/j.procir.2017.04.054.
- Khoo, Z. X. *et al.* (2015) '3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing', *Virtual and Physical Prototyping*, 10(3), pp. 103–122. doi: 10.1080/17452759.2015.1097054.
- Kim, H., Querin, O. M. and Steven, G. P. (2002) 'On the development of structural optimization and its relevance in engineering design', *Design Studies*, 23(1), pp. 85–102.
- Kranz, J., Herzog, D. and Emmelmann, C. (2015) 'Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4', *Journal of Laser Applications*, 27(S1), p. S14001. doi: 10.2351/1.4885235.
- Krishna, L. S. R., Mahesh, N. and Sateesh, N. (2017) 'Topology optimization using solid isotropic material with penalization technique for additive manufacturing', *Materials Today: Proceedings*, 4(2), pp. 1414–1422. doi: 10.1016/j.matpr.2017.01.163.
- Krivec, M. *et al.* (2017) 'Exploiting the combination of 3D polymer printing and inkjet Ag-nanoparticle printing for advanced packaging', *Microelectronic Engineering*, 176, pp. 1–5. doi: 10.1016/j.mee.2016.12.021.
- Kumar Bohidar, S., Sharma, R. and Mishra, P. R. (2014) 'Functionally Graded Materials: A Critical Review', *International Journal of Scientific Footprints*, 2(4), pp. 18–29.
- De Laurentis, K. J. and Mavroidis, C. (2004) 'Rapid fabrication of a non-assembly robotic hand with embedded components', *Assembly Automation*, 24(4), pp. 394–405. doi: 10.1108/01445150410562606.
- Leary, M. *et al.* (2014) 'Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures', *Materials and Design*, 63, pp. 678–690. doi: 10.1016/j.matdes.2014.06.015.
- Lieneke, T. *et al.* (2015) 'Systematical determination of tolerances for additive manufacturing by measuring linear dimensions', in *26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin*.

- Lieneke, T. *et al.* (2016) 'Dimensional tolerances for additive manufacturing: Experimental investigation for Fused Deposition Modeling', *Procedia CIRP*, 43, p. 286291. doi: 10.1016/j.procir.2016.02.361.
- Lindwall, A., Dordlofva, C. and Öhrwall Rönnbäck, A. (2017) 'Additive manufacturing & the product development process: Insights from the space industry', *21st International Conference on Engineering Design, ICED 2017*, 5(DS87-5), pp. 345–354. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029782661&partnerID=40&md5=a5e50f29cd06eb235b3a98a4c618302e>.
- Mashhadi, A. R. and Behdad, S. (2017) 'Measuring the complexity of additive manufacturing supply chains', in *ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2017 collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing*, pp. 1–10. doi: 10.1115/MSEC2017-2871.
- Meisel, N. A. (2015) *Design for additive manufacturing considerations for self-actuating compliant mechanisms created via multi-material polyjet 3D printing*. Thèse. Virginia Polytechnic Institute.
- Muller, P. (2013) *Fabrication additive de pièces multimatériaux, Thèse de Doctorat*. Mechanical engineering. Ecole Centrale de Nantes (ECN).
- Nanoscribe (2017) 'Spectrum of applications. Innovative solutions for microfabrication on the nano-, micro- and mesoscale'. <https://www.nanoscribe.de/>. Available at: <https://www.nanoscribe.de/files/7315/4391/3079/ApplicationFlyer-PPGT2.pdf>.
- Le Néel, T. A., Mognol, P. and Hascoët, J.-Y. (2018) 'Design for additive manufacturing : multi material sand mold', *Rapid & TCT*.
- Neofab (2018) 'Éléments clés à prendre en compte pour l'impression 3D'. [www.neofab.fr](http://www.neofab.fr). Available at: [www.neofab.fr](http://www.neofab.fr).
- Neofab (2019) 'Design Guide Metal X'. [www.neofab.fr](http://www.neofab.fr). Available at: <https://markforged.com/metal-x/>.
- Nyamekye, P. *et al.* (2015) 'Overview of sustainability studies of CNC machining and LAM of stainless steel', *Physics Procedia*, 78(August), pp. 367–376. doi: 10.1016/j.phpro.2015.11.051.
- Orquéra, M. (2019) *Conception pour la fabrication additive : Approche méthodologique pour les systèmes mécaniques multi-corps*.
- Ou, J. *et al.* (2018) 'KinetiX - designing auxetic-inspired deformable material structures', *Computers and Graphics (Pergamon)*, 75, pp. 72–81. doi: 10.1016/j.cag.2018.06.003.
- Pandey, P. M., Reddy, N. V. and Dhande, S. G. (2007) 'Part deposition orientation studies in layered manufacturing', *Journal of materials processing technology*, 185(1), pp. 125–131. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.120.
- Ponginan, R. (2015) *Practical aspects of structural optimization: A Study Guide*. 2nd ed. E-. Edited by Altair University.
- Poyraz, O. *et al.* (2015) 'Investigation of support structures for direct metal laser sintering (DMLS) of IN625 parts', *Proceedings of Solid Freeform Fabrication (SFF) Symposium*, pp. 560–574. Available at: <https://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2015/2015-45-Poyraz.pdf>.
- Prévost, R. *et al.* (2013) 'Make it stand', *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(4), p. 81. doi: 10.1145/2461912.2461957.
- Reeves, P. (2009) 'Additive manufacturing – A supply chain wide response to economic uncertainty and environmental sustainability', in *7th International Conference on Industrial Tools and Material Processing Technologies*.
- Ren, S. and Galjaard, S. (2015) 'Topology optimisation for steel structural design with additive manufacturing', in *Modelling Behaviour*. Springer Cham, pp. 35–44. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/283634763\\_Topology\\_Optimisation\\_for\\_Steel\\_Structural\\_Design\\_with\\_Additive\\_Manufacturing](https://www.researchgate.net/publication/283634763_Topology_Optimisation_for_Steel_Structural_Design_with_Additive_Manufacturing).

- Rodrigue, H. and Rivette, M. (2010) 'An assembly-level design for additive manufacturing methodology', *IDMME - Virtual Concept*, pp. 1–9. doi: 10.1007/978-2-8178-0169-8.
- Rosen, D. W. (2007) 'Design for additive manufacturing: a method to explore unexplored regions of the design space', in *18th Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 402–415. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/15289160802349862>.
- Rozvany, G. I. N., Zhou, M. and Birker, T. (1992) 'Generalized shape optimization without homogenization', *Structural Optimization*, 4(3–4), pp. 250–252. doi: 10.1007/BF01742754.
- Saadlaoui, Y. *et al.* (2017) 'Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes', *Journal of Manufacturing Systems*, 43, pp. 178–186. doi: 10.1016/j.jmsy.2017.03.006.
- Saunders, M. (2017) 'Is topological optimisation really optimal?', in *Renishaw*. Available at: <https://www.linkedin.com/pulse/topological-optimisation-really-optimal-marc-saunders>.
- Schmelzle, J. *et al.* (2015) '(Re)Designing for part consolidation: understanding the challenges of metal additive manufacturing', *ASME Journal of Mechanical Design*, 137(11), p. 111404. doi: 10.1115/1.4031156.
- Seabra, M. *et al.* (2016) 'Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components', *Procedia Structural Integrity*, 1, pp. 289–296. doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.039.
- Sigmund, O. and Petersson, J. (1998) 'Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima', *Structural optimization*, 16(1), pp. 68–75. doi: 10.1007/BF01214002.
- Sing, S. L. *et al.* (2016) 'Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs', *Journal of Orthopaedic Research*, 34(3), pp. 369–385. doi: 10.1002/jor.23075.
- Snyder, J. C. *et al.* (2016) 'Build direction effects on additively manufactured channels', *Journal of Turbomachinery*, 138(5), p. 051006. doi: 10.1115/1.4032168.
- Strano, G. *et al.* (2013) 'Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting', *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4), pp. 589–597. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.11.011.
- Sun, C. N. *et al.* (2016) 'Design and fabrication of functionally graded components by selective laser melting', in *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- Tang, Y. and Zhao, Y. F. (2014) 'Design method for lattice-skin structure fabricated by additive manufacturing', in *ASME. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Montreal, Quebec, Canada, p. V02BT02A030. doi: 10.1115/IMECE2014-38645.
- Teoh, J. E. M. *et al.* (2016) 'Preliminary investigation of 4d printing technology for deployable UAV development', in *Proceedings of the 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2016)*, pp. 288–293.
- Thompson, M. K. *et al.* (2016) 'Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65, pp. 737–760. doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.
- uz Zaman, U. K. *et al.* (2017) 'Integrated product-process design to suggest appropriate manufacturing technology: a review', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(1–4), pp. 1409–1430. doi: 10.1007/s00170-016-9765-z.
- Vaezi, M. *et al.* (2013) 'Multiple material additive manufacturing - Part 1: A review: This review paper covers a decade of research on multiple material additive manufacturing technologies which can produce complex geometry parts with different materials', *Virtual and Physical Prototyping*, 8(1), pp. 19–50. doi: 10.1080/17452759.2013.778175.
- Vaezi, M., Seitz, H. and Yang, S. (2013) 'A review on 3D micro-additive manufacturing technologies',

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5–8), pp. 1721–1754. doi: 10.1007/s00170-012-4605-2.
- Vaissier, B. *et al.* (2019) ‘Genetic-algorithm based framework for lattice support structure optimization in additive manufacturing’, *CAD Computer Aided Design*, 110, pp. 11–23. doi: 10.1016/j.cad.2018.12.007.
- Vaithilingam, J. *et al.* (2016) ‘Optimisation of substrate angles for three dimensional inkjet printing of multi- functional and multi-material parts’, in *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- Vaneker, T. H. J. (2017) ‘The role of design for additive manufacturing in the successful economical introduction of AM’, *Procedia CIRP*, 60, pp. 181–186. doi: 10.1016/j.procir.2017.02.012.
- Vo, T. H. *et al.* (2018) ‘Typology of geometrical defects in Electron Beam Melting’, *Procedia CIRP*, 75, pp. 92–97. doi: 10.1016/j.procir.2018.04.033.
- Walachowicz, F. *et al.* (2017) ‘Comparative energy, resource and recycling lifecycle analysis of the industrial repair process of gas turbine burners using conventional machining and additive manufacturing’, *Journal of Industrial Ecology*, 21(S1), pp. S203–S215. doi: 10.1111/jiec.12637.
- Wang, K. *et al.* (2015) ‘Designable dual-material auxetic metamaterials using three-dimensional printing’, *Materials and Design*, 67, pp. 159–164. doi: 10.1016/j.matdes.2014.11.033.
- Wang, Z. *et al.* (2021) ‘Support point determination for support structure design in additive manufacturing’, *Additive Manufacturing*, 47(March), p. 102341. doi: 10.1016/j.addma.2021.102341.
- Wits, W. W., García, J. R. R. and Becker, J. M. J. (2016) ‘How additive manufacturing enables more sustainable end-user maintenance, repair and overhaul (MRO) strategies’, *Procedia CIRP*, 40, pp. 693–698. doi: 10.1016/j.procir.2016.01.156.
- Witzel, U. and Preuschoft, H. (2005) ‘Finite-Element Model Construction for the Virtual Synthesis of the Skulls in Vertebrates : Case Study of Diplodocus’, *The Anatomical Record Part A: Discoveries in Molecular, Cellular, and Evolutionary Biology: An Official Publication of the American Association of Anatomists*, 283(2), pp. 391–401. doi: 10.1002/ar.a.20174.
- Yang, L. *et al.* (2015) ‘Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing’, *International Journal of Solids and Structures*, 69–70, pp. 475–490. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2015.05.005.
- Yang, S. *et al.* (2017) ‘A generic sustainability assessment model towards consolidated parts fabricated by additive manufacturing process’, *Procedia Manufacturing*, 10, pp. 831–844. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.086.
- Yang, S. *et al.* (2019) ‘Understanding the sustainability potential of part consolidation design supported by additive manufacturing’, *Journal of Cleaner Production*, 232, pp. 722–738. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.380.
- Yang, S., Santoro, F. and Zhao, Y. F. (2018) ‘Towards a numerical approach of finding candidates for additive manufacturing-enabled part consolidation’, *Journal of Mechanical Design*, 140(4), p. 041701. doi: 10.1115/1.4038923.
- Yang, S. and Zhao, Y. F. (2016) ‘Conceptual design for assembly in the context of additive manufacturing’, in *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 27th Annual International*, pp. 1932–1944.
- Zhou, M. *et al.* (2004) ‘An integrated approach to topology, sizing, and shape optimization’, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(5), pp. 308–317. doi: 10.1007/s00158-003-0351-2.
- Zhou, M. and Rozvany, G. I. N. (1991) ‘The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization’, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 89(1–3), pp. 309–336. doi: 10.1016/0045-7825(91)90046-9.
- Berchon M. et Bertier L., « L’impression 3D », Serial makers, Eyrolles, 2013, EAN13 : 782212135220.

Hascoët, JY, Mognol, P, 2014. *Du prototypage rapide à la fabrication directe*. Cours, ENS Nantes.

Le Ber, R, Blin, M, 2014, *L'impression 3D, Enjeux et perspective*. DIRECCTE Centre, en partenariat avec CCI Centre. <http://www.centre.direccte.gouv.fr/L-impression-3D-etat-des-lieux-et>

Bernard, A, 2014. *Impression 3D, de l'idée au produit*. Visiatome, Marcoule, 17 avril 2014