

La conception pour la Fabrication additive

Initiation

Design for Additive Manufacturing (DfAM)

Myriam ORQUERA

CODES MOODLE

IMECAD : ismd

Sysmer : sysmer3

BUT: but3

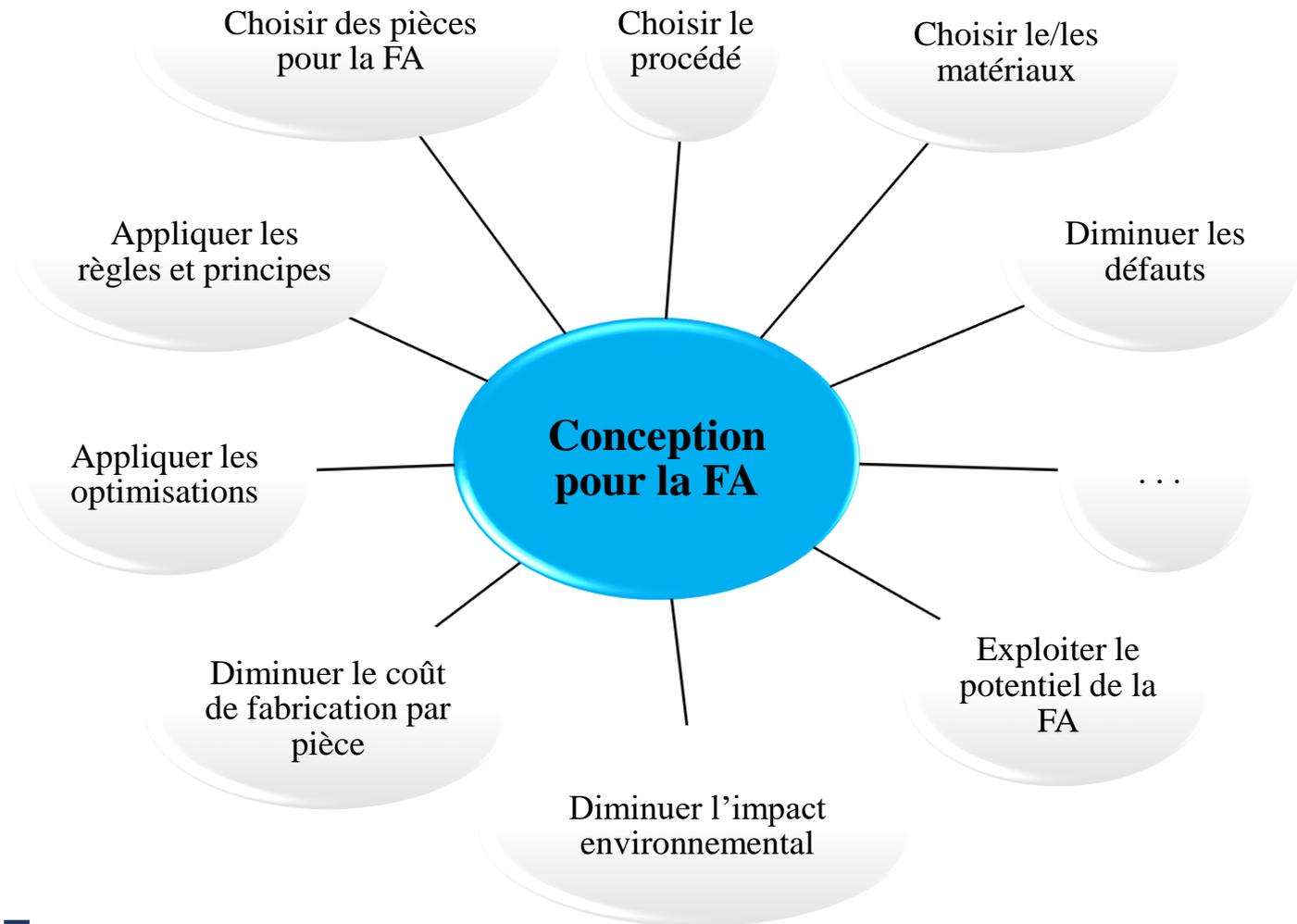
Définition de Design for Additive Manufacturing

DfAM est 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

[Thompson et al., 2016]

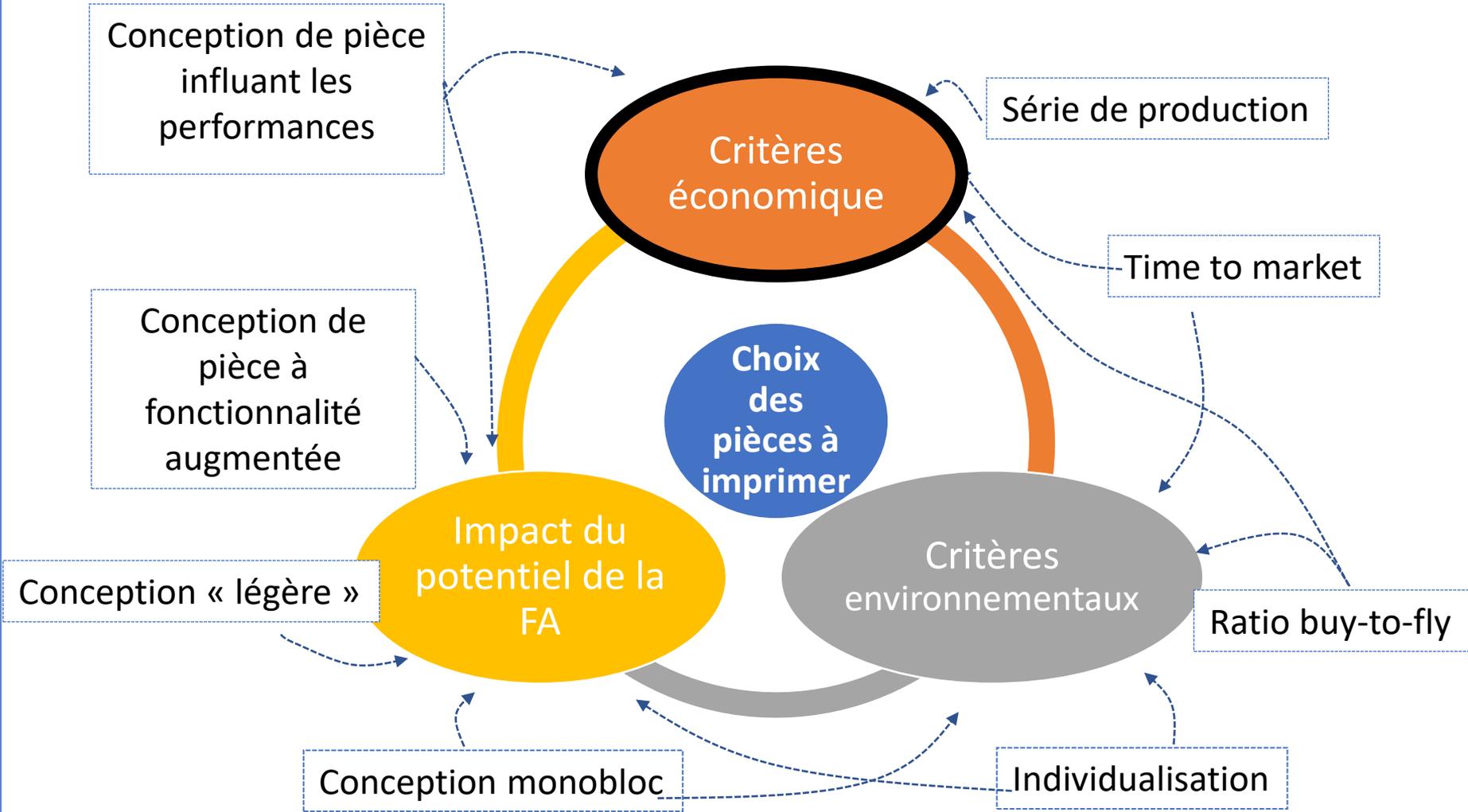
Challenge du DfAM



Conception pour la fabrication additive

Choix des pièces à réaliser en FA

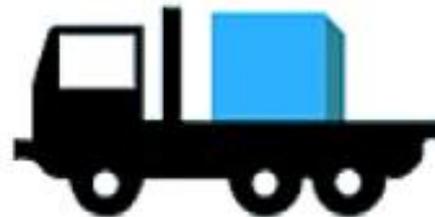
Conception pour la fabrication additive



Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

- Diminution du « Time to market »
 - L'impression 3D = fabrication digitale
 - Pas de nécessité d'outils supplémentaires
 - peu besoin de post-traitement (tels que l'assemblage ou l'usinage)

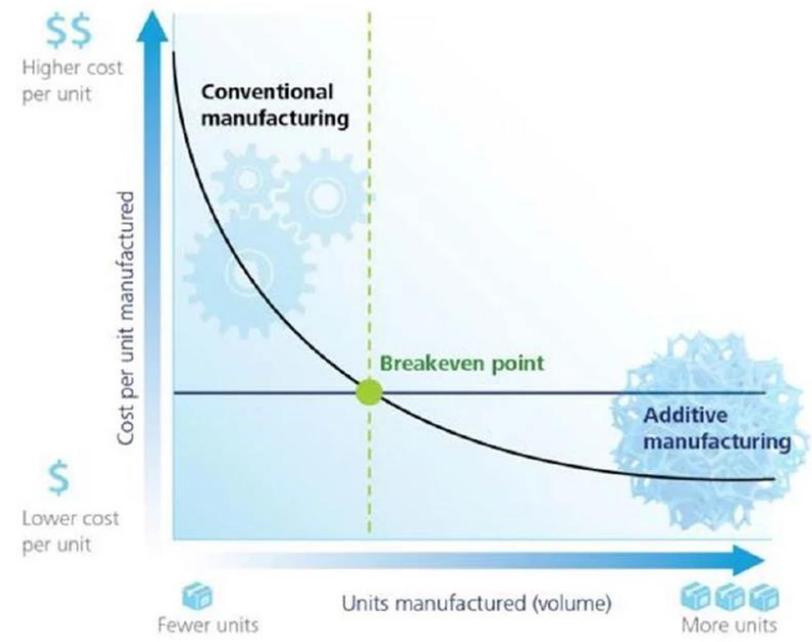
Time-to-market down 64%



Deloitte University Press, 2014
Orquera@univ-tln.fr

Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

- Break-even point :
 - C'est le seuil de rentabilité



Graphic: Deloitte University Press | DUPress.com

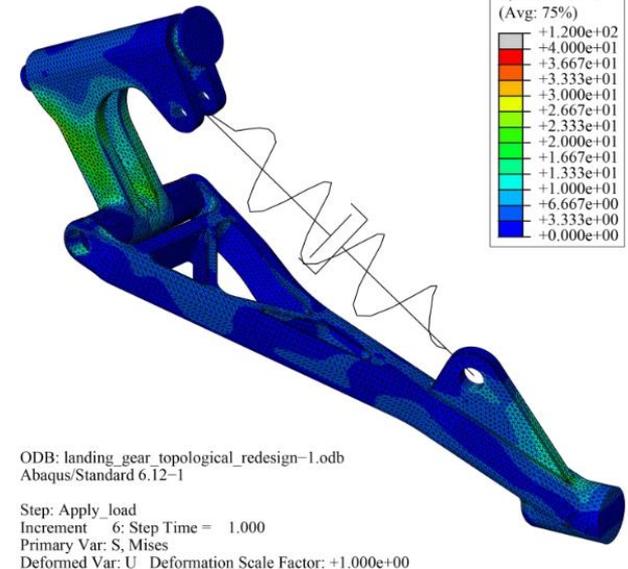
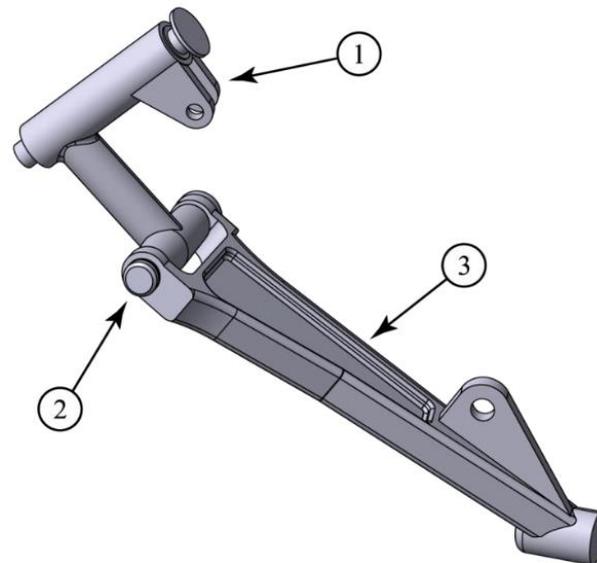
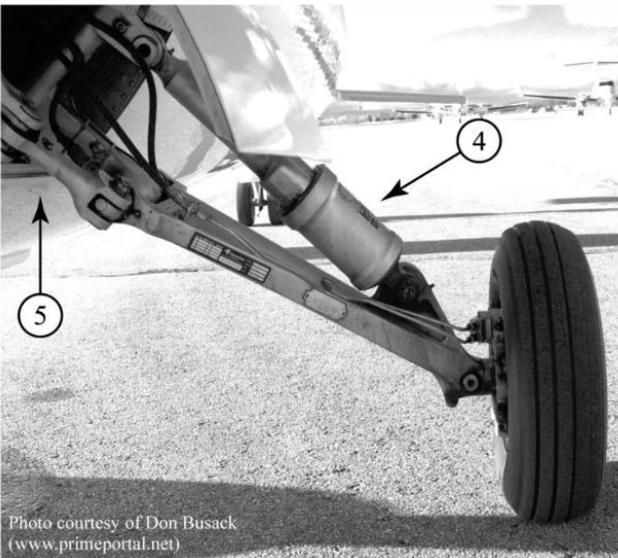
[Gebler et al., 2014]

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

ception pour la fabrication additive

Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

- Break-even point : [Atzeni et al. 2013]
 - Comparaison entre le moulage à haute pression, l'usinage 5 axes et la L-PBF
 - Pour un train d'atterrissage



Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

- Break-even point : [Atzeni et al. 2013]
 - Comparaison entre le moulage à haute pression, l'usinage 5 axes et la L-PBF
 - Pour un train d'atterrissage

fabrication additive

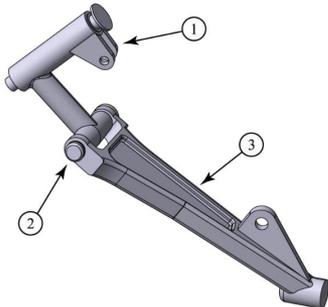
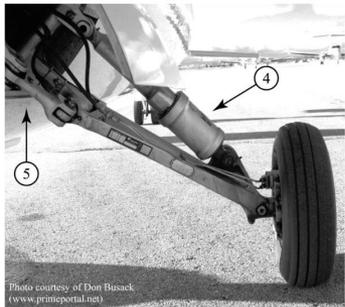
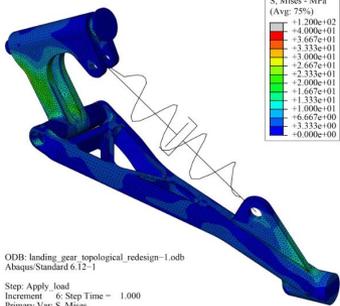
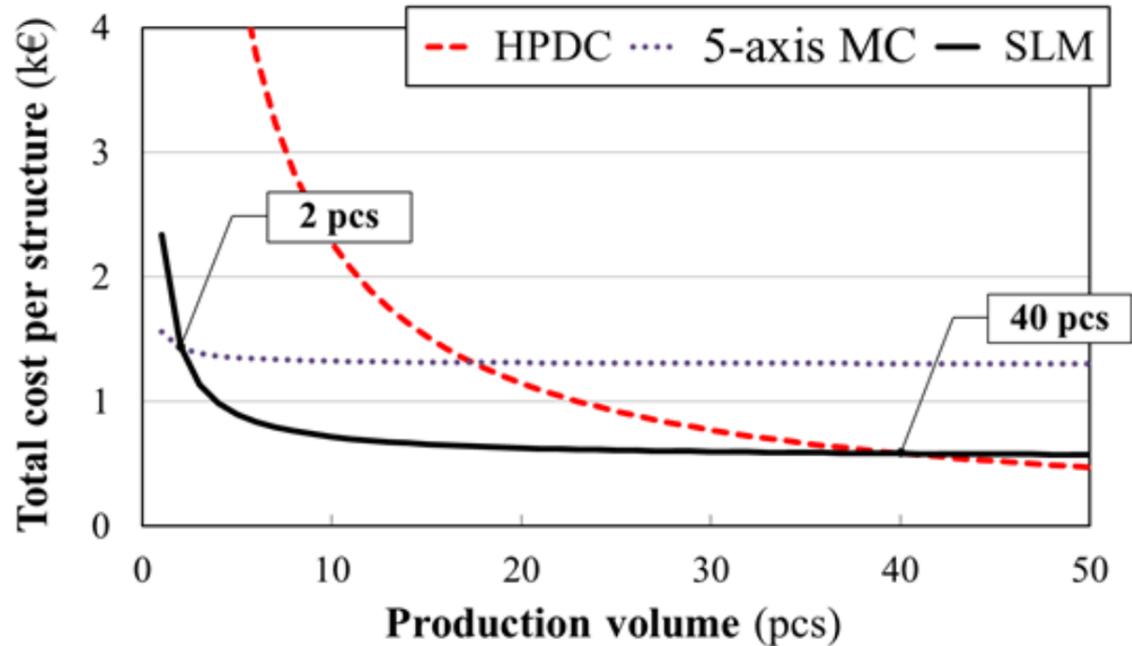


Photo courtesy of Don Busack (www.primisportal.net)



ODB: landing_gear_topological_redesign-1.odb
 Abaqus Standard 6.12-1
 Step: Apply load
 Increment: 6; Step Time = 1.000
 Primary Var: S, Mises
 Deformed Var: U ; Deformation Scale Factor: +1.000e+00



Conc

Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

- Ratio buy-to-fly :
 - Rapport entre la masse de matière mise en œuvre pour réaliser une pièce et la masse qui est effectivement utilisée en fonctionnement
 - La FA réalise un ratio proche de 3:1 à 1:1

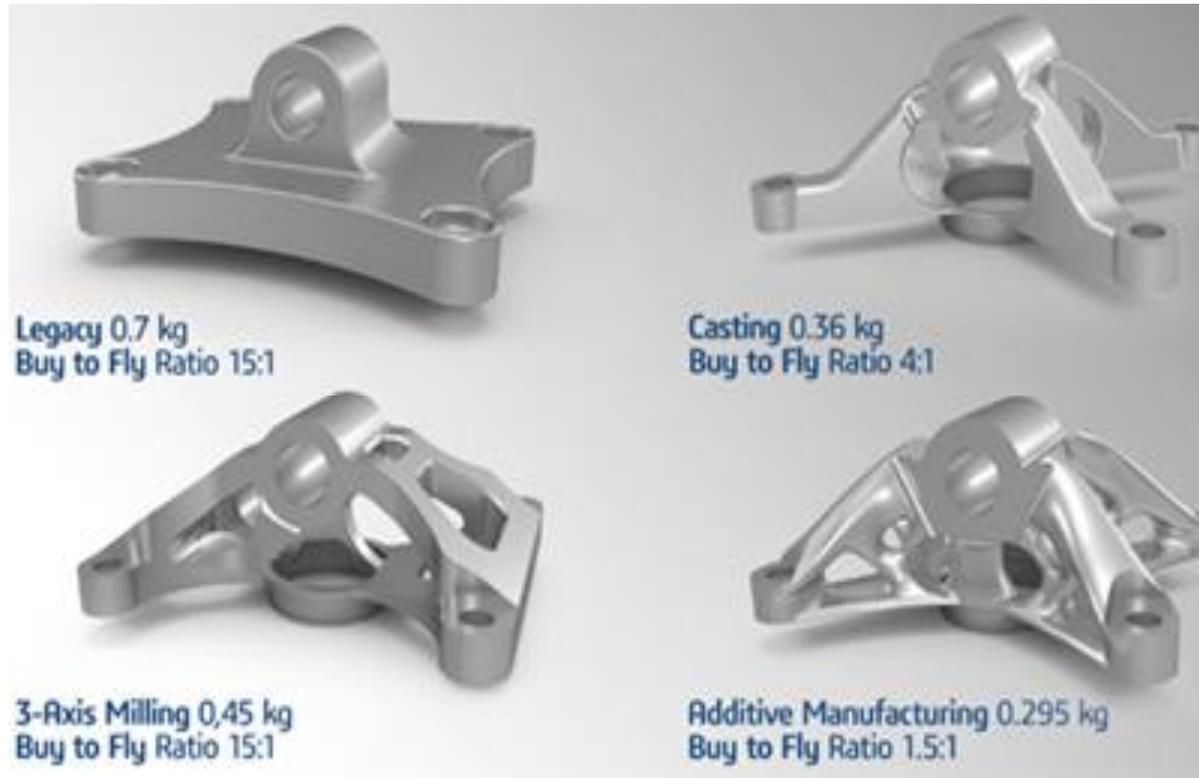


www.machiningnews.com

Orquera@univ-tln.fr

Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

- Ratio buy-to-fly :

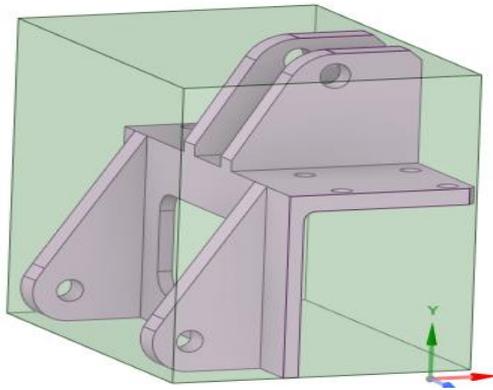


Source: www.3ds.com

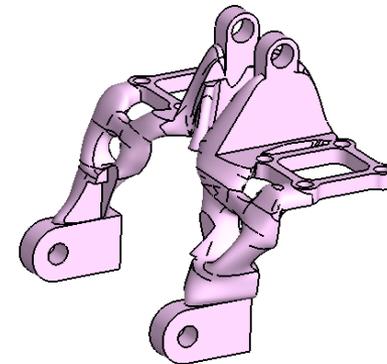
Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

- Application
 - Reconception d'une pièce en aluminium pour le L-PBF par l'entreprise Exail, pour le drone A18
 - Calculez le ratio BtF de la

Pièce usinée



pièce L-PBF



$BtFu =$

Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

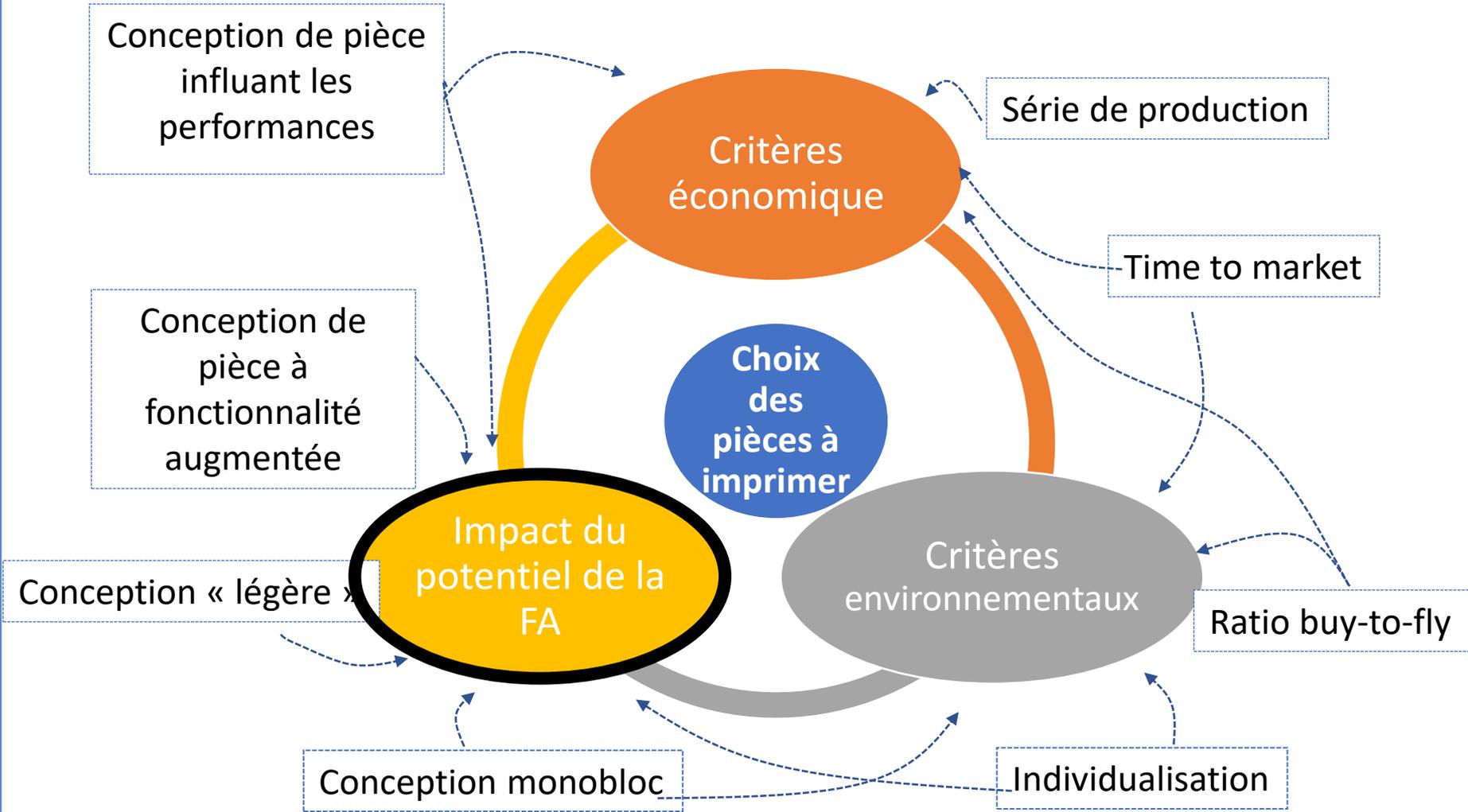
- Individualisation (customization)
 - Adaptabilité aux modifications fréquentes (moules)
 - Surfaces complexes
 - Unicité des pièces



Implant de crane
Courtesy of Poly-Shape/OBL

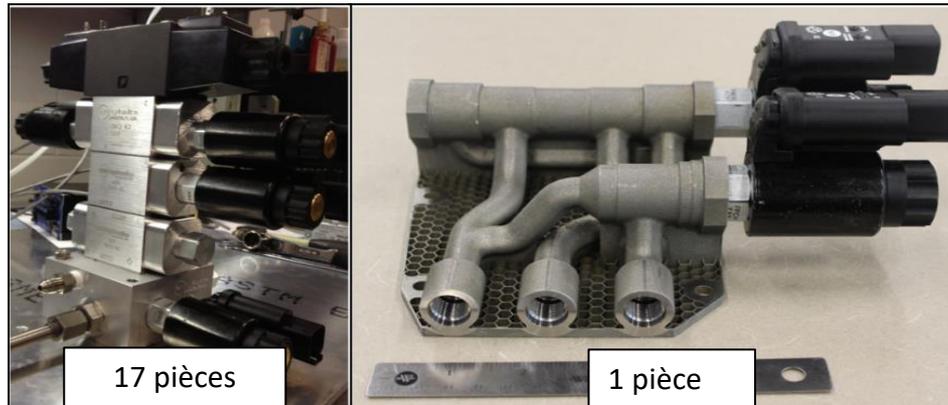
Choix des pièces à réaliser en FA

Conception pour la fabrication additive



Champ des possibilités de la FA

- Conception monolithique (part consolidation)
 - Définition:
reconcevoir un ensemble de pièces en une seule
 - Diminue le nombre d'interfaces
 - Diminue les assemblages
 - Diminue l'encombrement
 - Diminue le nombre de matériaux
 - ...

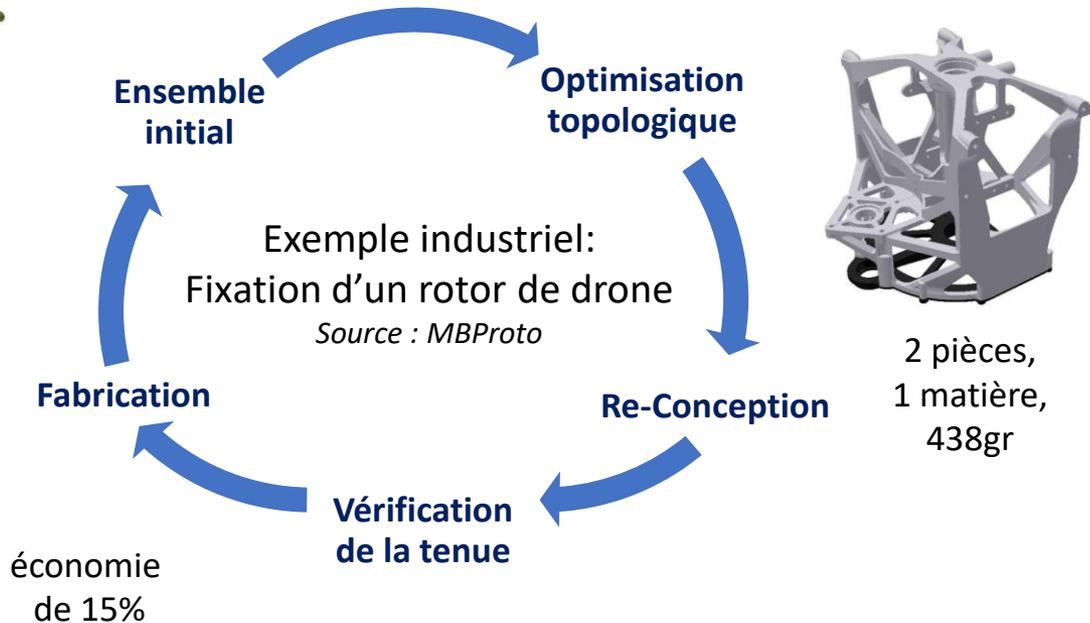


Le champ des possibilités de la FA

- Conception monolithique (part consolidation)



7 pièces,
3 matières,
525gr



2 pièces,
1 matière,
438gr

Le champ des possibilités de la FA

- Fabrication directe de liaisons
 - Fabrication de mécanismes ayant des mobilités sans réaliser d'assemblage



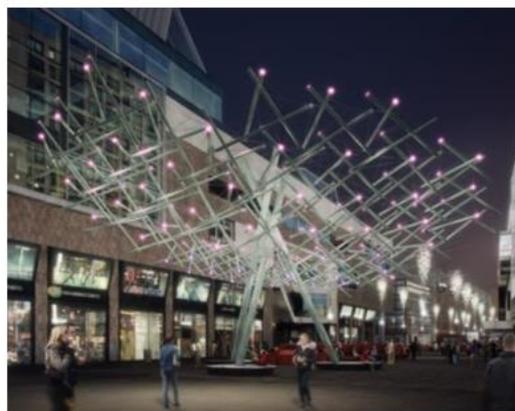
Bras articulé non assemblé
(Cali et al., 2012)



Engrenage direct
(Calignano et al., 2014)

Le champ des possibilités de la FA

- Conception légère par optimisation



(a)

(c)

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)

Le champ des possibilités de la FA

- Conception légère par Matériaux lattice = Treillis
- Conception légère par parois semi -creuses



Concept de culasse de F1 réalisée sous L-PBF
(Inovar Communications Ltd, 2016)



<https://parametrichouse.com/spider-bracket-structure/>



Matériau le plus léger au monde Boeing

Source : <http://www.boeing.com>
20/88 .../...

Le champ des possibilités de la FA

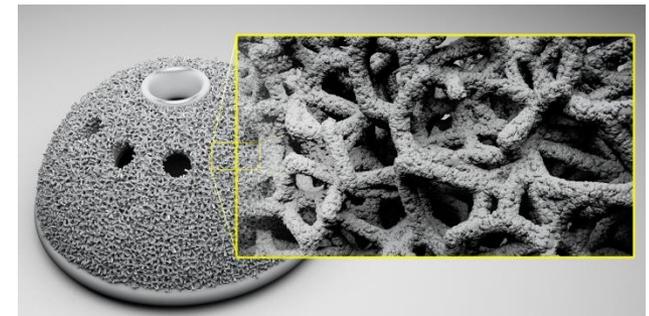
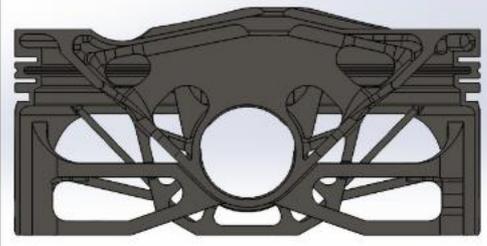
- Conception légère, les avantages sont:
 - Diminution de la masse des pièces mobiles
 - Diminution des effets d'inertie (vibration, fatigue des pièces de liaison...)
 - Augmentation de la tenue mécanique
 - Isolation...

Le champ des possibilités de la FA

- Complexité des formes et des surfaces
 - Réalisation des formes au plus proche de la forme finale
 - La matière est au placée à l'endroit il est nécessaire
 - Complexité volumique ET surfacique



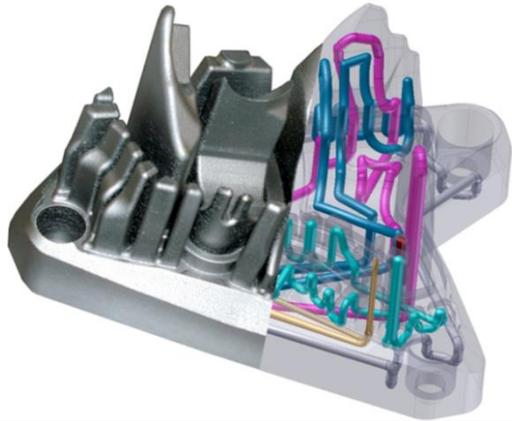
Piston topologiquement optimisé, Source : <http://solidthinking.com/>
Optimisation topologique d'un piston [Barbiero, 2017]



Cementless acetabular cup in Trabecular Titanium™ (DELTA-TT, Lima Corporate)

Le champ des possibilités de la FA

- Complexité des formes
 - Diminution des pertes (pertes de charges, de frottement...)
 - Augmentation de la gestion des énergies (transfert thermique...)
 - Augmentation de l'aérodynamisme



Mould tooling and conformal cooling channels

Source: Renishaw.com

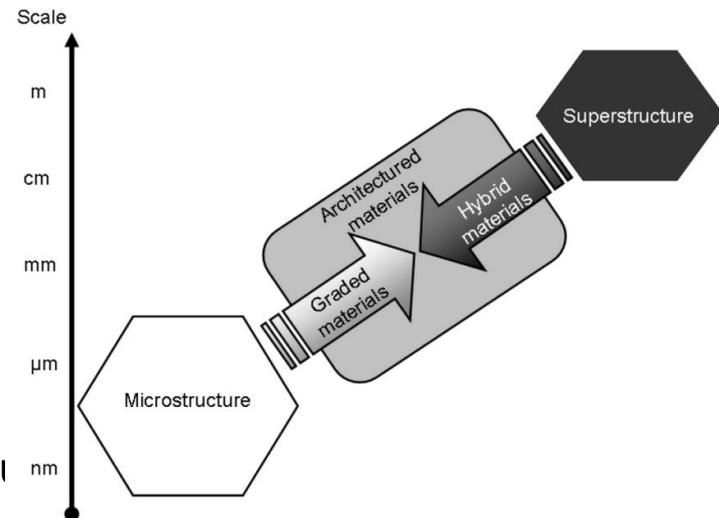


Coupe d'un échangeur thermique

Source: Polyshape

Le champ des possibilités de la FA

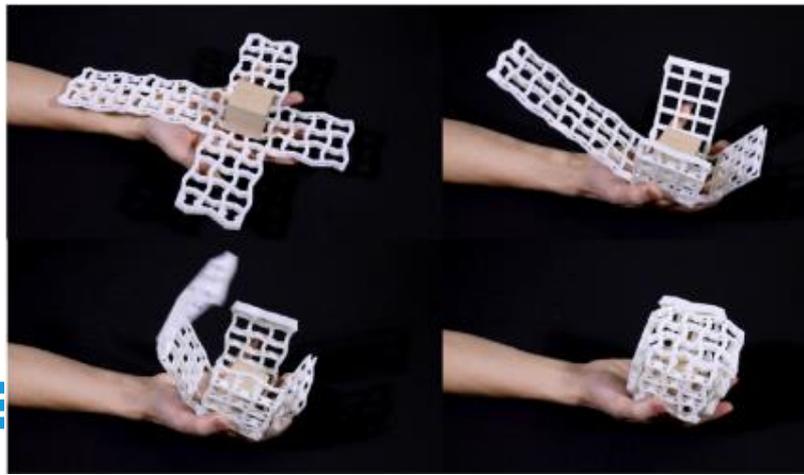
- Matériaux innovants,
 - les matériaux architecturés:
Matériaux présentant des variations géométriques et/ou de composition à l'échelle mésoscopique (0,1 à 10 mm), dans le but d'obtenir des propriétés particulières à l'échelle macroscopique



Le champ des possibilités de la FA

- Matériaux innovants,
 - les matériaux auxétiques,

Ils présentent un coefficient de Poisson négatif à l'échelle macroscopique, contrairement aux matériaux conventionnels, qui ont un retrait transversal lors de la traction axiale

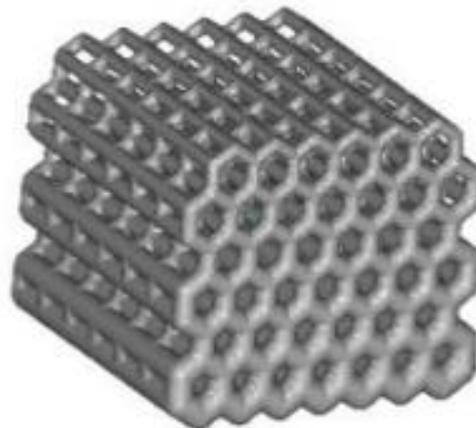


Matériaux à coefficient
de poisson négatif



Le champ des possibilités de la FA

- Matériaux innovants,
 - les matériaux à gradients
 - 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,

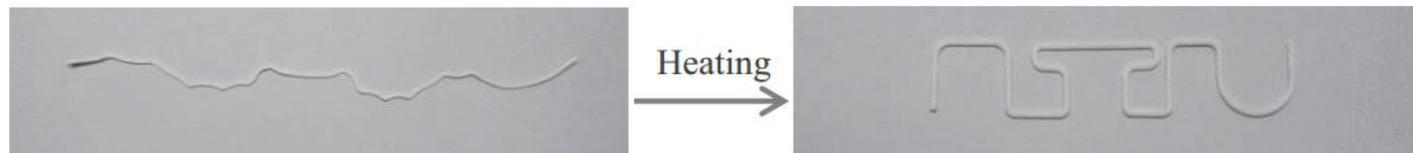


Le champ des possibilités de la FA

- Matériaux innovants,
 - les matériaux de type 4D
 - la forme de départ imprimée en 3D répond 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

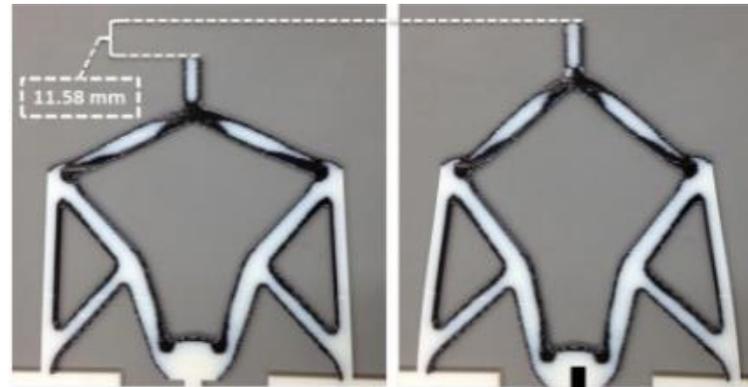
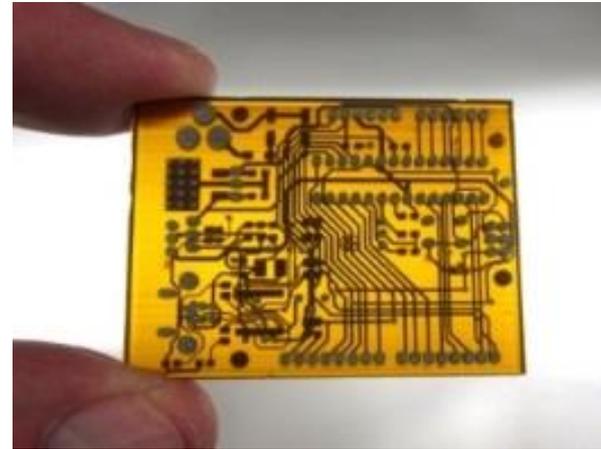
Exemple d'une impression avant et après la chauffe

Source: (Teoh et al. 2016)



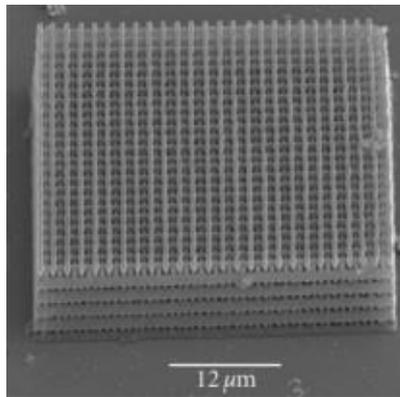
Le champ des possibilités de la FA

- Matériaux innovants,
 - Multi-matériaux
 - Intégration de composants



Le champ des possibilités de la FA

- Matériaux innovants,
 - Nano-impression



Nano-impression

Source: (Ovsianikov A, et al 2008)



Nano-inscription

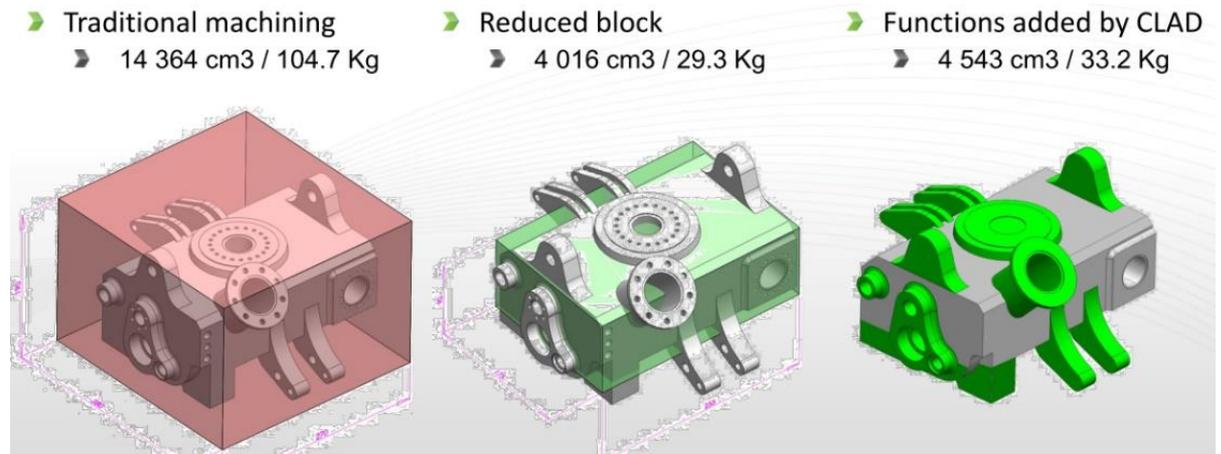
Source: nanoscribe.de

Le champ des possibilités de la FA

- Ajouts de fonction



Figurine équilibrée statiquement
(Prévost et al., 2013)



Ajout de fonction par le procédé CLAD
(Frechard, 2015)

Optimisation topologique

- Permet de trouver la meilleure répartition de matière dans un volume donné pour répondre à un objectif (raideur, déplacement, poids...) et contrainte
- Permet d'obtenir un **CONCEPT** sur lequel un **travail de conception est nécessaire**
- Une formulation mathématique:

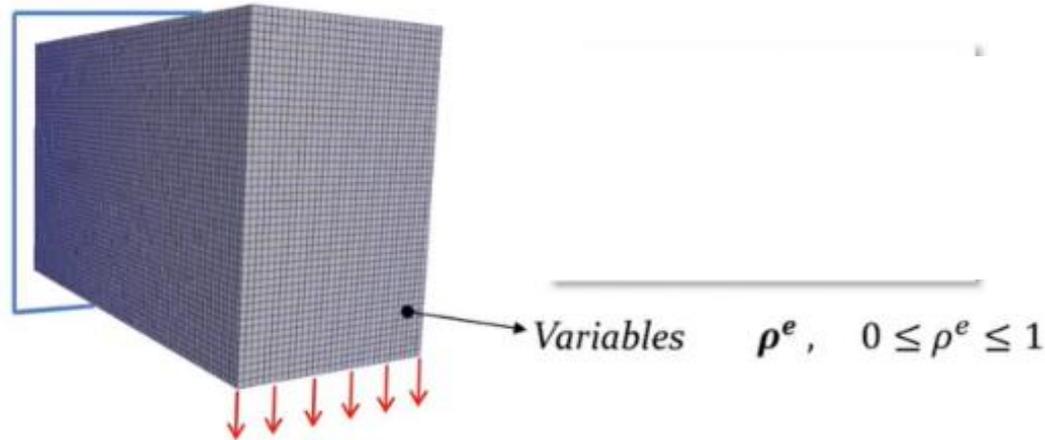
$$\min_{\Gamma \in \Omega} f(\Gamma)$$

Variable Γ
 Fonction objectif $f(\Gamma)$
 Domaine d'étude Ω
 Fonction contrainte $c(\Gamma) \geq 0$

Orquera@univ-tln.fr

Optimisation topologique

- Le concept ainsi obtenu est une définition implicite de la géométrie
- C'est-à-dire une représentation en bitmap

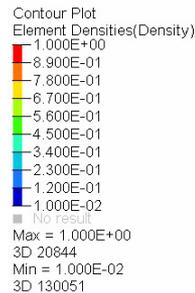
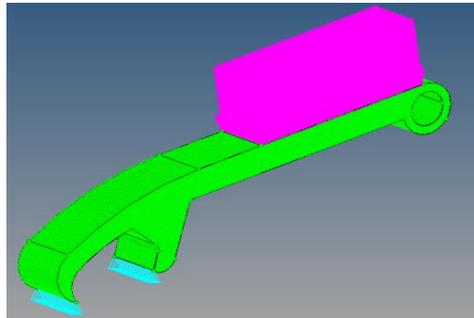


$$\min_{\rho \in \Omega} \text{flexibilité}(\rho)$$

$$\text{Tel que } \text{Masse}(\rho) \leq \frac{1}{4} \text{masse initiale}$$

Optimisation topologique

- Exemple d'un décapsuleur
 - Objectif: Compliance minimale
 - Contrainte: $\frac{1}{4}$ masse



1: Model
Design : Iteration 0 : Frame 1



Optimisation topologique d'un décapsuleur à l'aide du solveur
Optistruct de la suite HyperWorks de la société Altair

Optimisation topologique

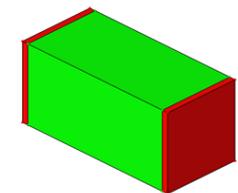
- Exemple d'une poutre encastree libre
 - Objectif: Compliance minimale (= raideur maximale)
 - Contrainte: $\frac{1}{4}$ volume



Source www.map.polytechnique.fr/~allaire/

Optimisation topologique

Pour réaliser une optimisation topologique, il faut:



Imports des
espaces de
conception et
non-conception

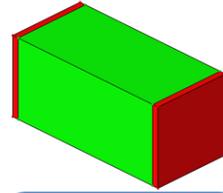


Spécifications de l'optimisation

Analyse et interprétation

(Orquéra, 2019)

Orquera@univ-tln.fr

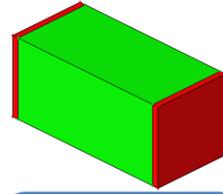


Imports des
espaces de
conception et
non-conception

Optimisation topologique

Espace de Conception (EC), définition:

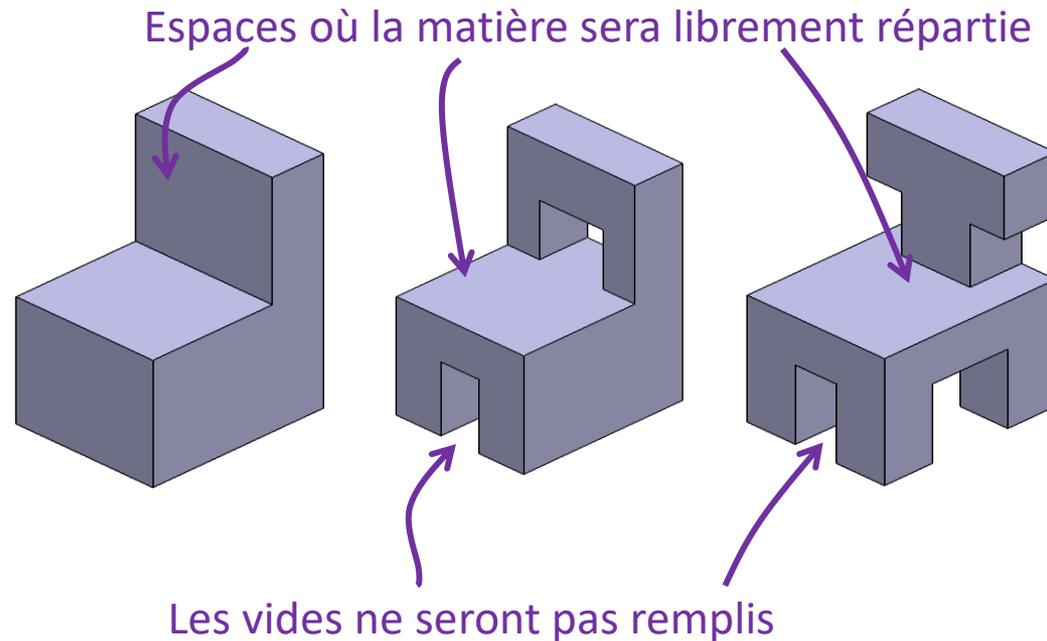
- Volume de la pièce permettant
 - De relier toutes les surfaces fonctionnelles, et les espaces de non conception
 - Utilisant tout l'espace (l'encombrement) libre et utile
 - C'est dans ce volume que le logiciel d'optimisation topologique fera la répartition de la matière
 - Les dimensions de l'EC influe sur les résultats de l'optimisation, il faut donc bien le choisir



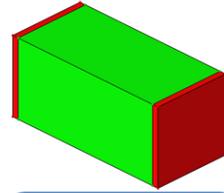
Imports des
espaces de
conception et
non-conception

Optimisation topologique

- Différents EC pour une chaise



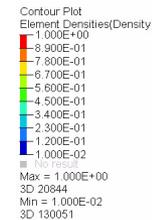
Optimisation topologique



Imports des
espaces de
conception et
non-conception

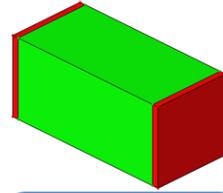
Espace de Non Conception (ENC), définition:

- C'est le volume que le logiciel d'optimisation topologique ne modifiera pas, que l'on veut garder en l'état
- C'est en général le volume de la pièce comprenant :
 - une surface fonctionnelle
 - une surface de transmission d'effort
- Les ENC ne sont pas obligatoires



1: Model
Design : Iteration 0 : Frame 1



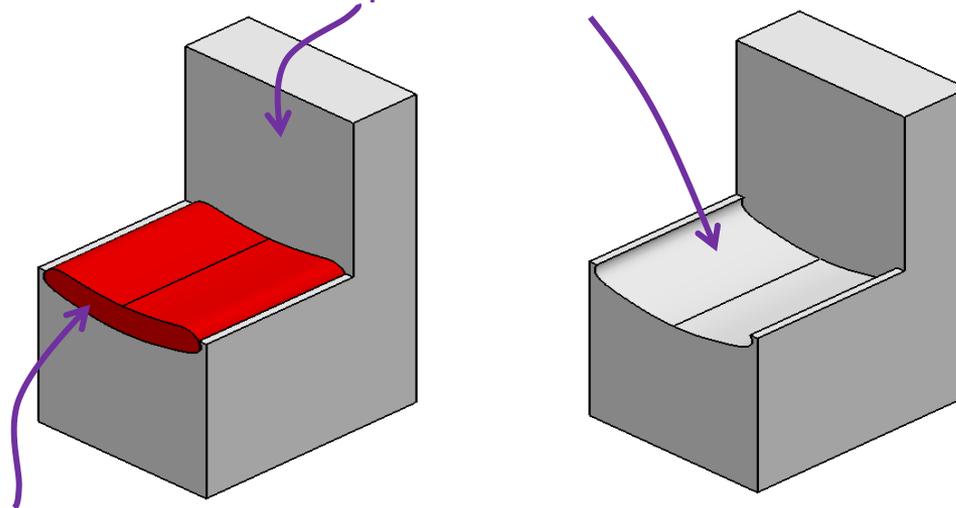


Imports des
espaces de
conception et
non-conception

Optimisation topologique

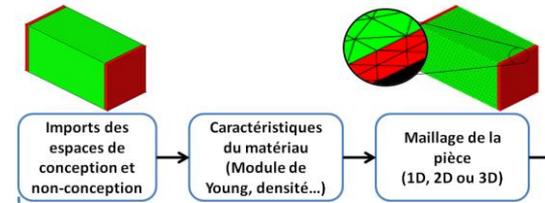
- ENC pour une chaise

Espace où la matière sera librement répartie,
modifié pour recevoir l'ENC



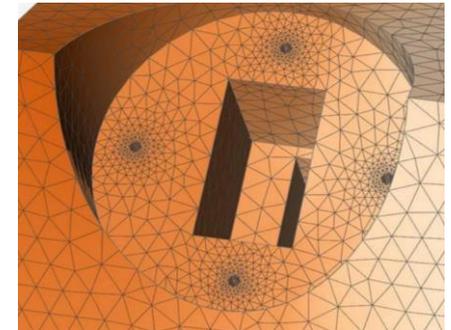
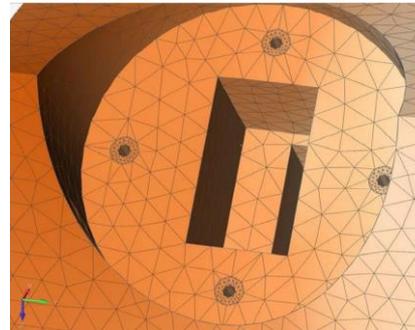
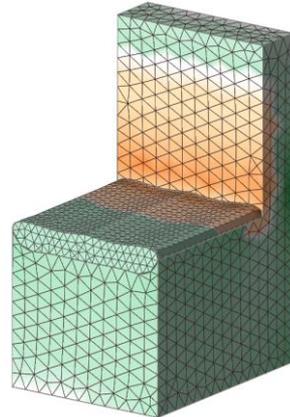
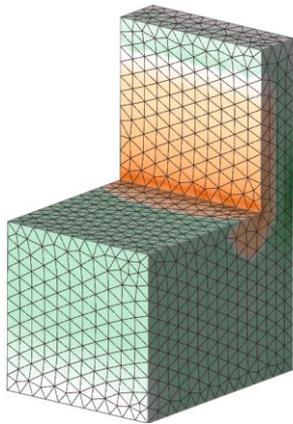
ENC: Volume « non touché » par le logiciel, restera intact.

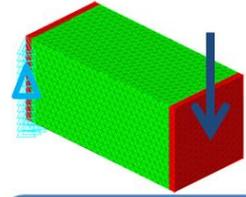
Optimisation topologique



Maillage

- Plus il est fin, plus le temps de calcul est élevé
- Maillage évolutif pour que 3 mailles rentrent dans l'épaisseur la plus petite



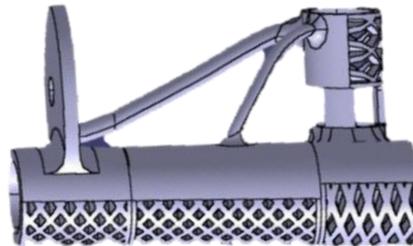


Condition aux
limites et
chargements

Optimisation topologique

Conditions aux limites

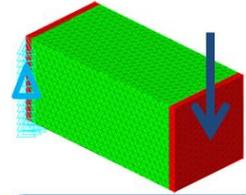
- cas de chargement pour chaque étape de la vie
 - phases de fabrication (montage, usinage...)
 - assemblage,
 - fonctionnement,
 - maintenance,
 - étapes de recyclage ...



Destruction de la pièce lors du post-traitement par usinage. Adapté de
(Doutre, 2015; Hoang et al., 2015)

Orquera@univ-tln.fr

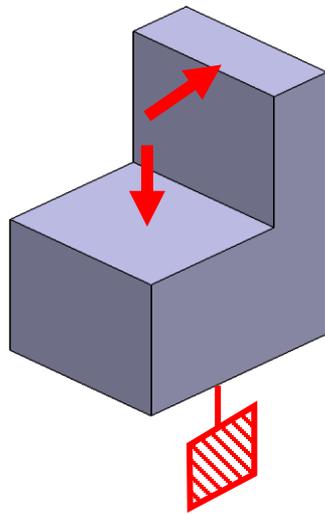
Optimisation topologique



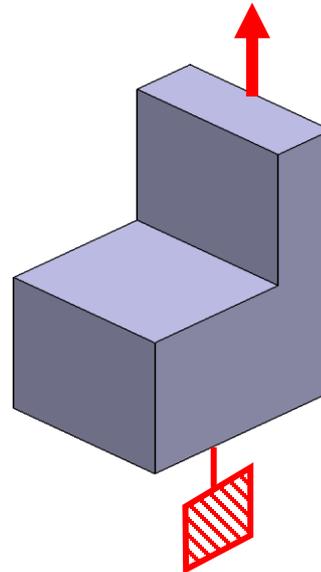
Condition aux limites et chargements

- Conditions aux limites

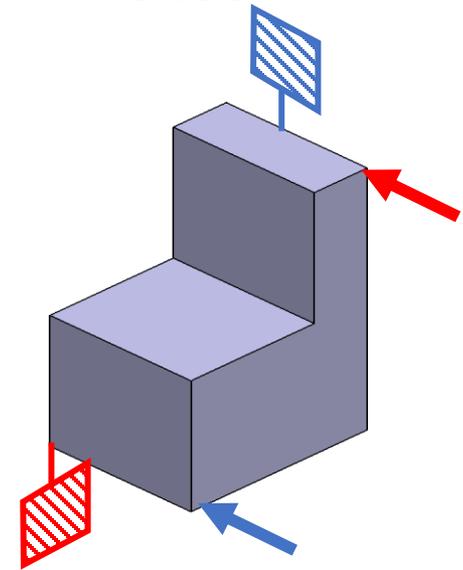
- Dessinez une proposition de conditions aux limites pour la chaise suivante,
- en fonctionnement



rangement

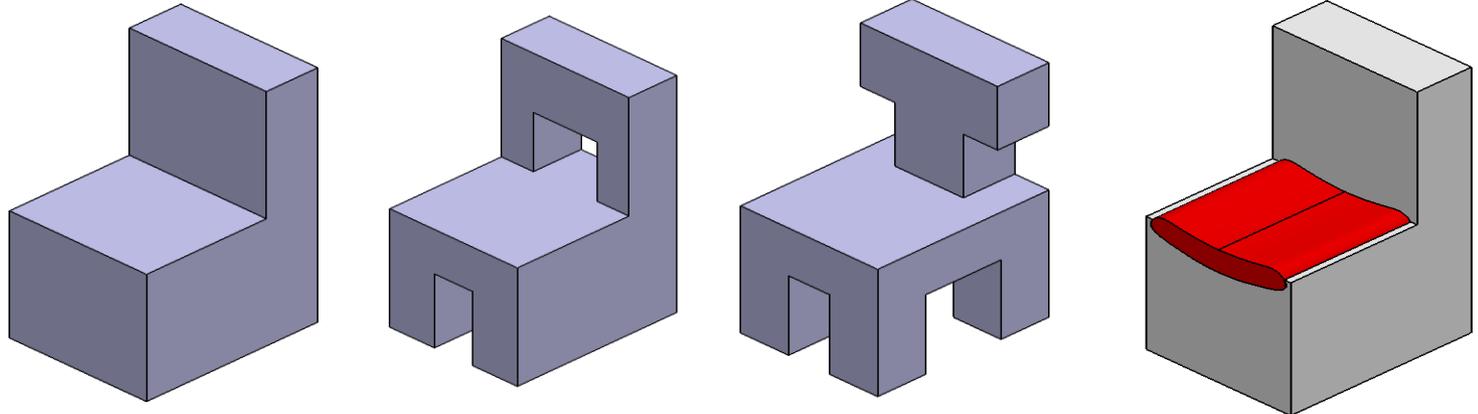
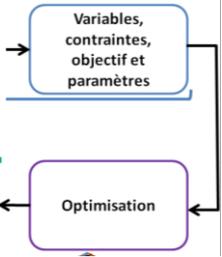


choc

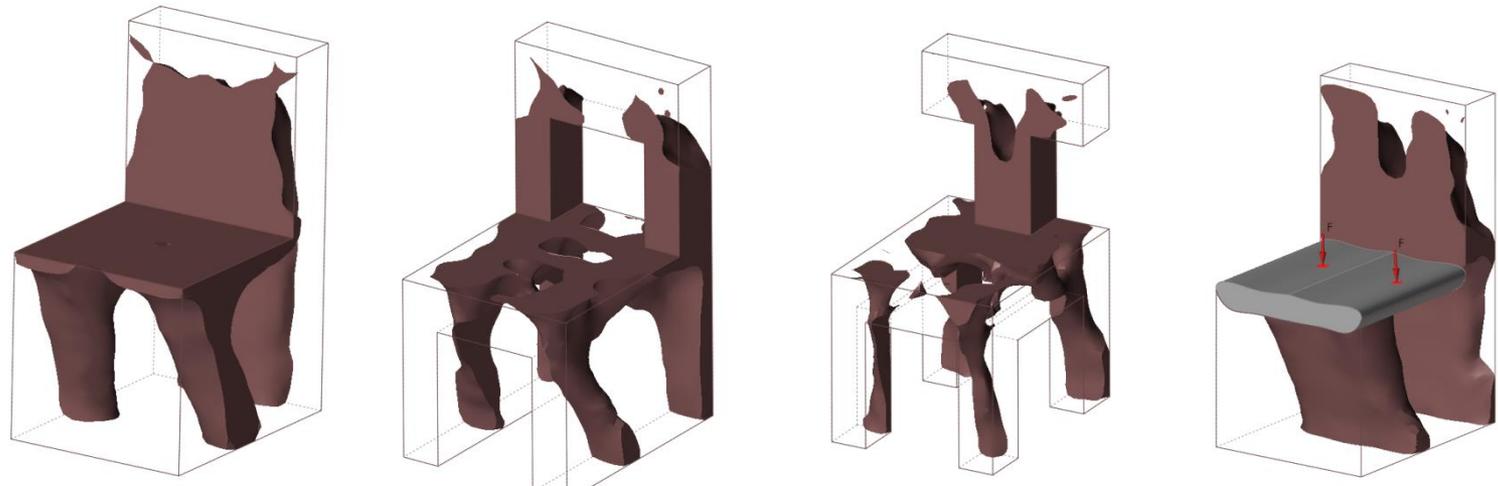


Optimisation topologique

Résultats et analyse pour différents EC

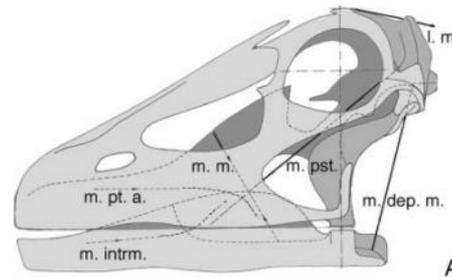
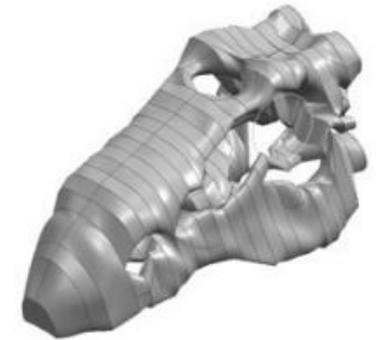
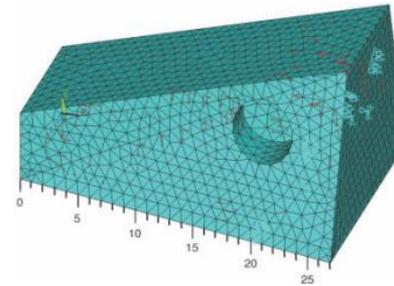
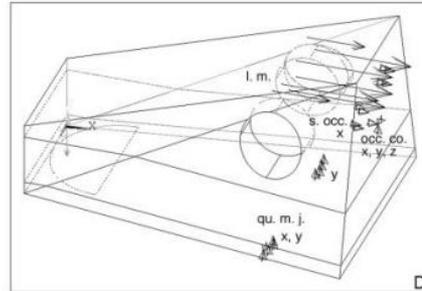
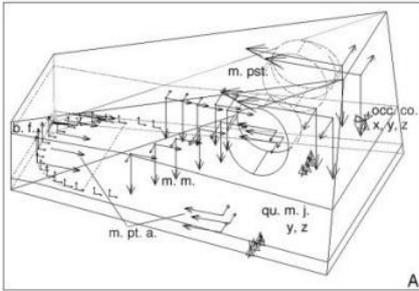


Maximisation de la raideur, 30% masse, seuil de densité 50%



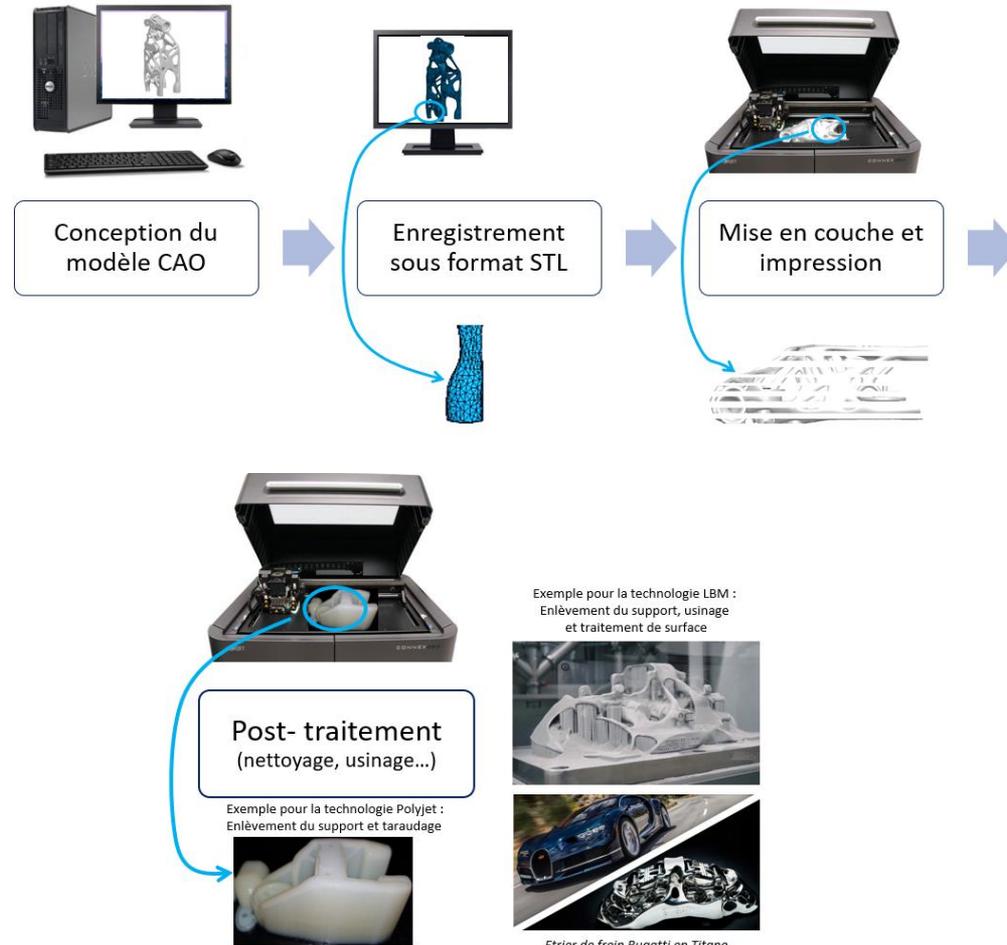
Optimisation topologique

- Exemple



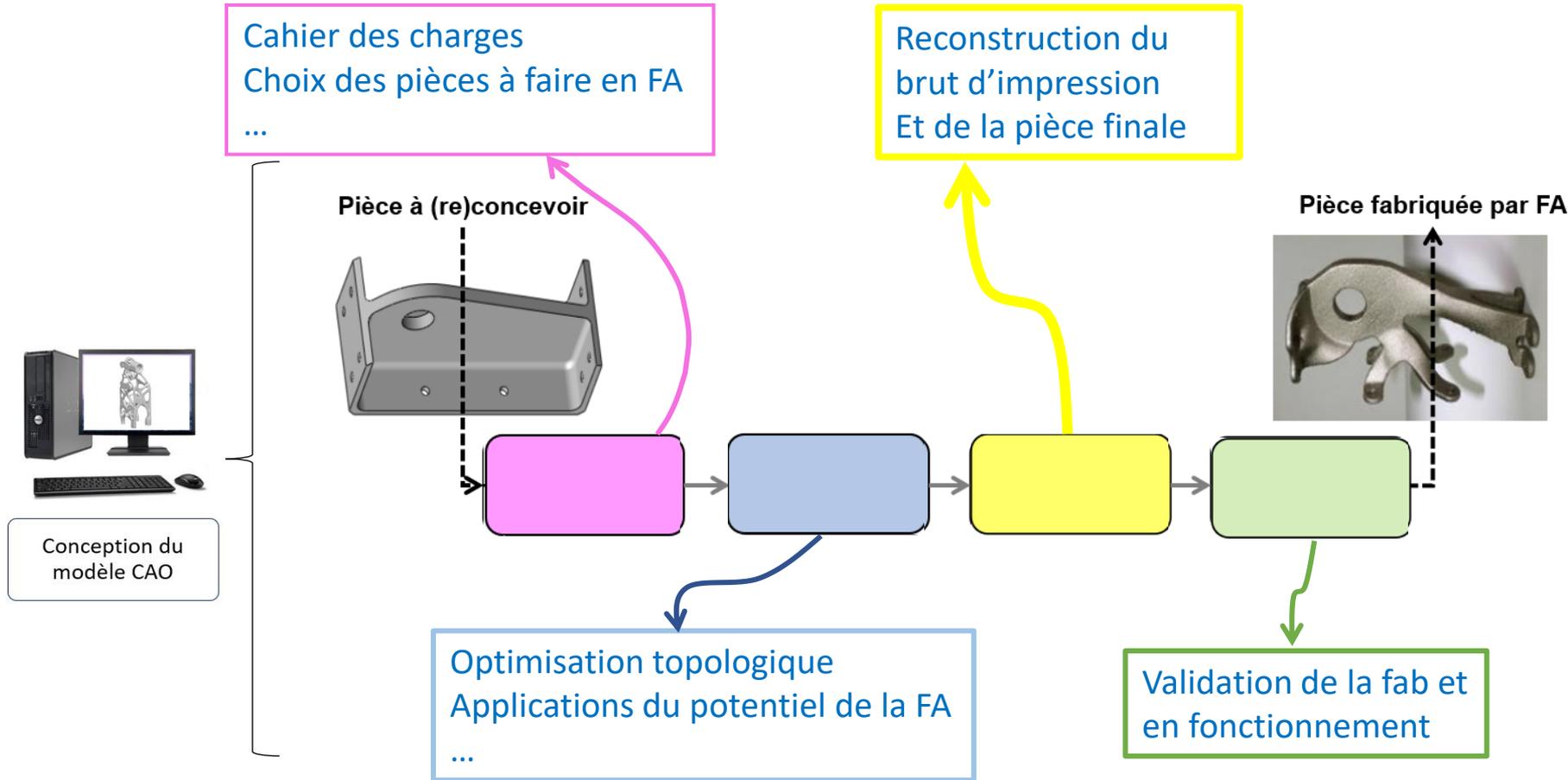
Optimisation topologique avec les cas de charge lors d'une phase de vie d'un diplodocus (Witzel and Preuschoft, 2005)

Les étapes de conception pour la FA dans le processus de FA



Les étapes de conception pour la FA

Conception pour la fabrication additive



Sous-étapes de la phase 1 de conception du modèle CAO, adapté de (Seabra *et al.*, 2016)

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Avez-vous des questions?