

La conception pour la Fabrication additive

Design for Additive Manufacturing (DfAM)

Myriam ORQUERA



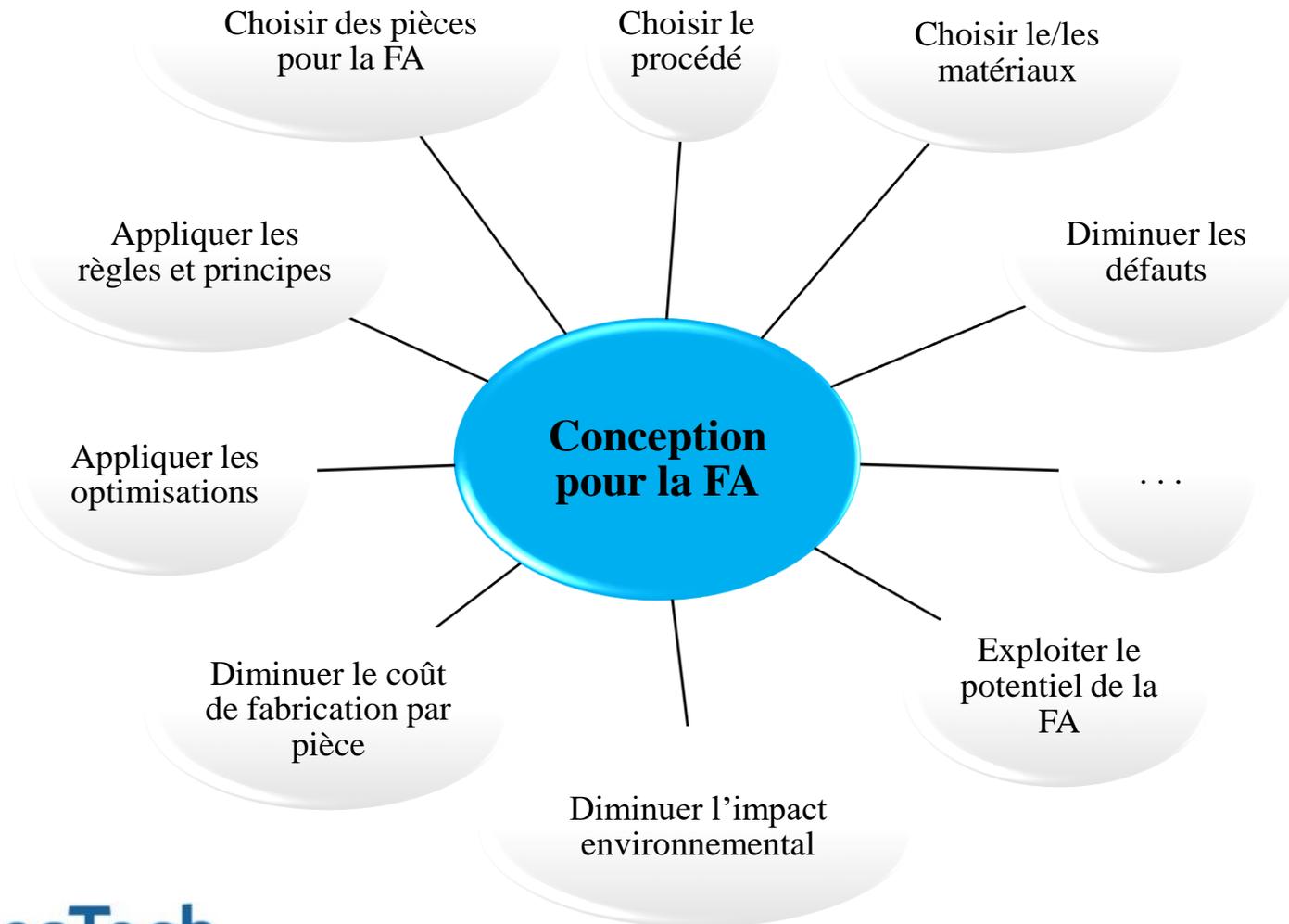
Définition

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]

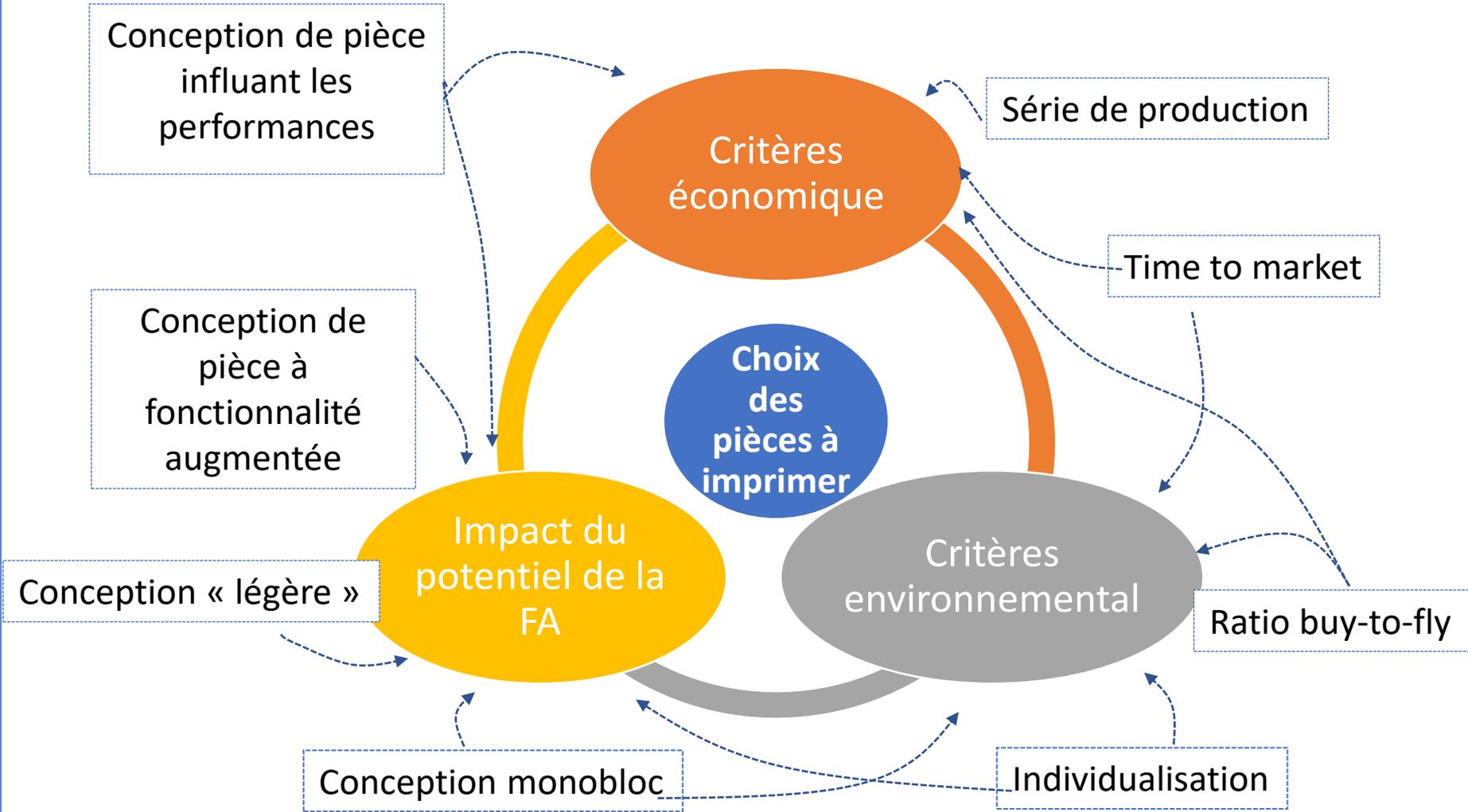
Challenge du DfAM



Conception pour la fabrication additive

Choix des pièces à réaliser en FA

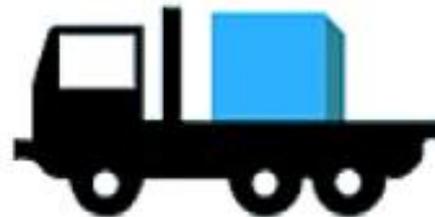
Conception pour la fabrication additive



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)

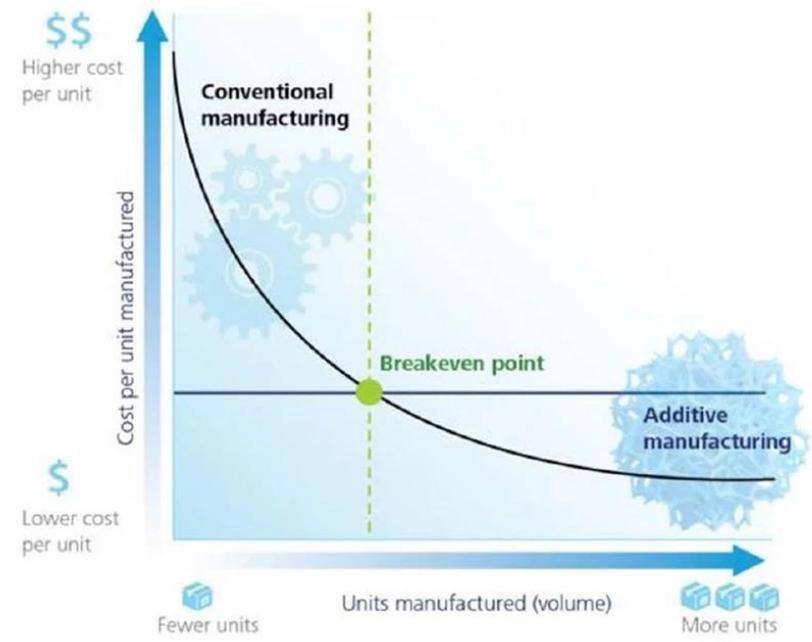
Time-to-market down 64%



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

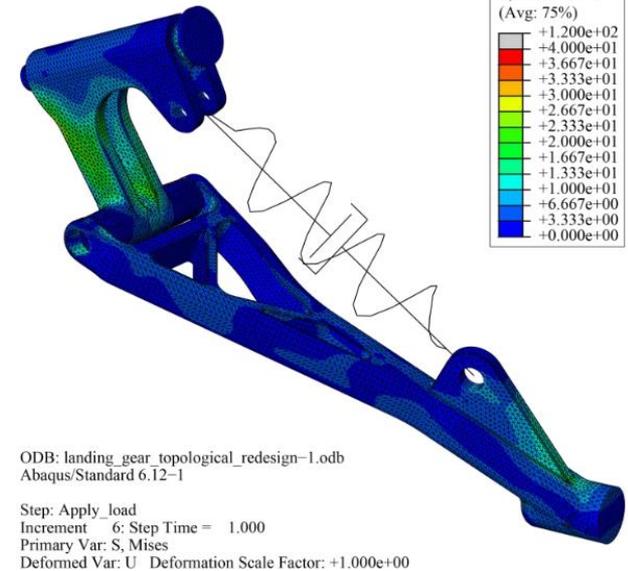
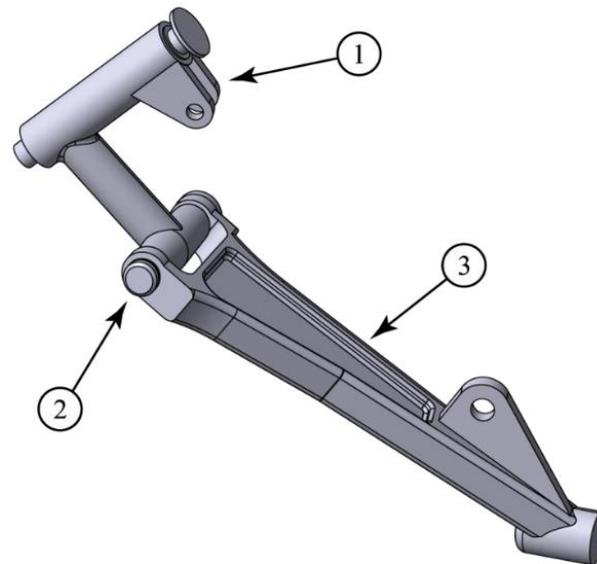
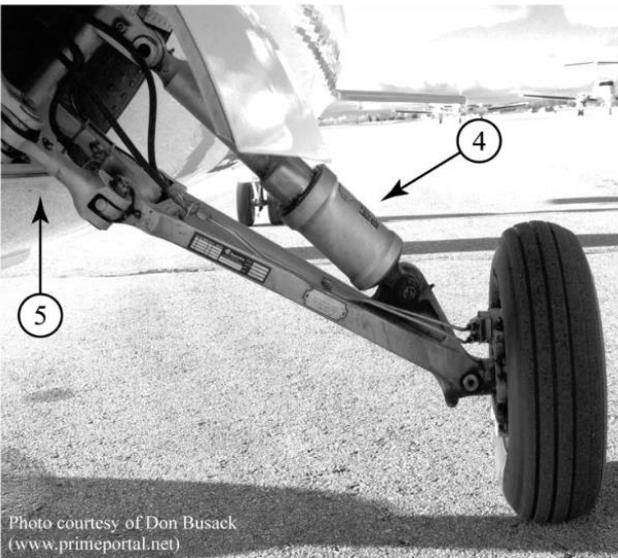
[Gebler et al., 2014]

ception pour la fabrication additive

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

Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

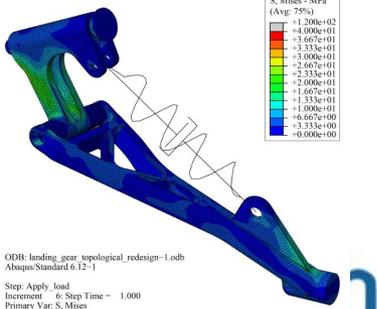
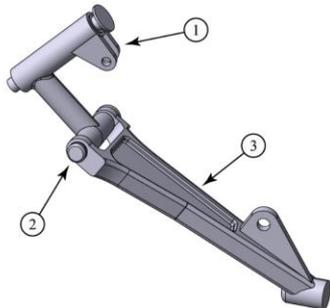
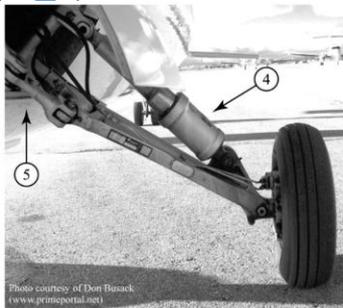
- Break-even point : [Atzeni et al. 2013]
 - Comparaison entre le moulage à haute pression, l'usinage 5 axes et la L-PBF
 - Pour un train d'atterrissage



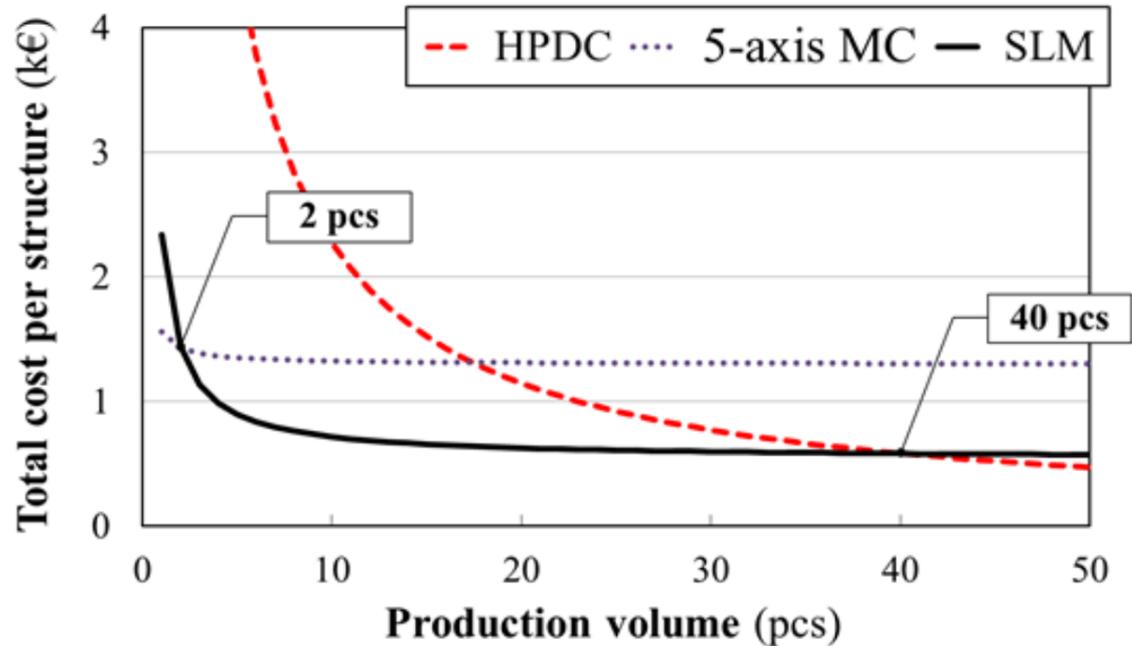
Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

- 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



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



Urquera@univ-tln.fr

Conc



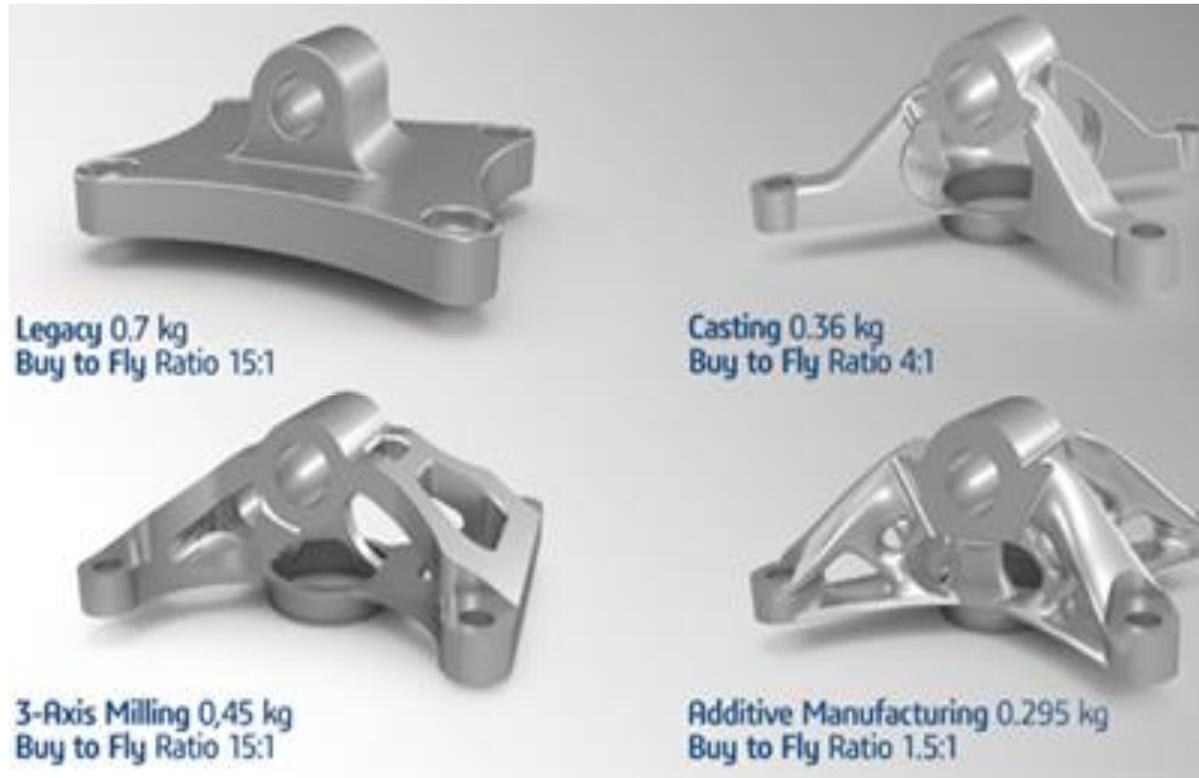
Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

- 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



Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

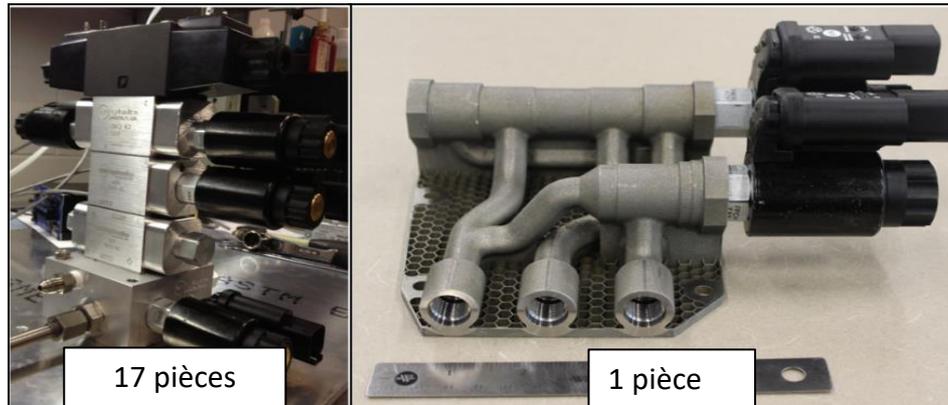
- Ratio buy-to-fly :



Source: www.3ds.com

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
 - ...

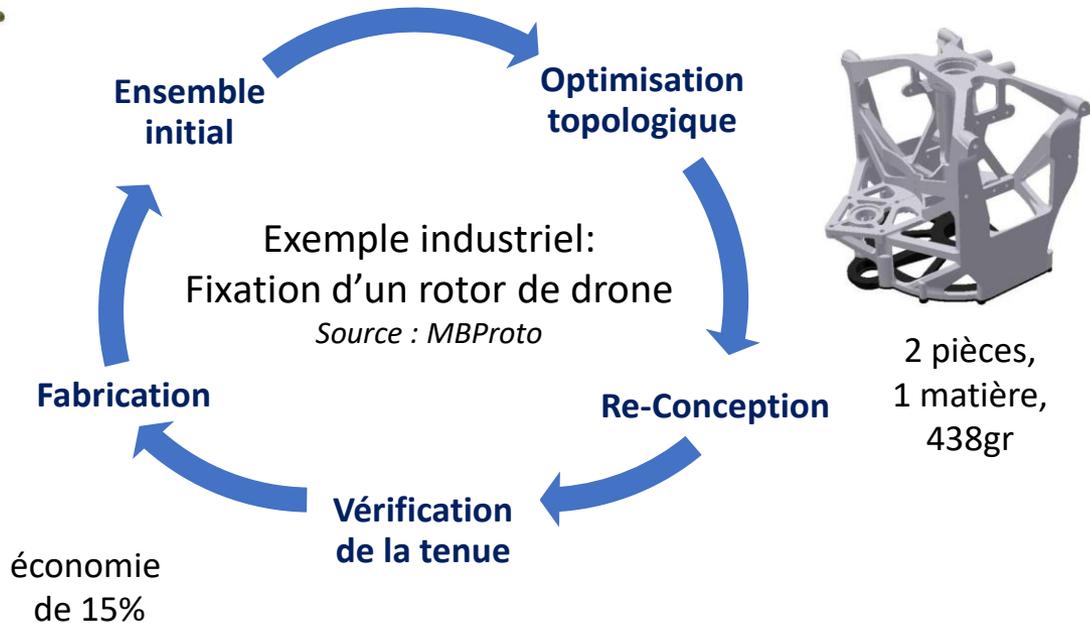


Le champ des possibilités de la FA

- 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



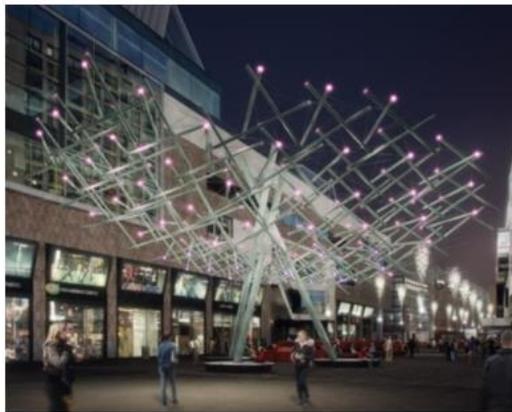
Bras articulé non assemblé
(Cali et al., 2012)



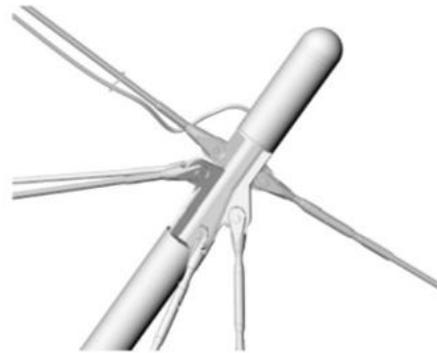
Engrenage direct
(Calignano et al., 2014)

Le champ des possibilités de la FA

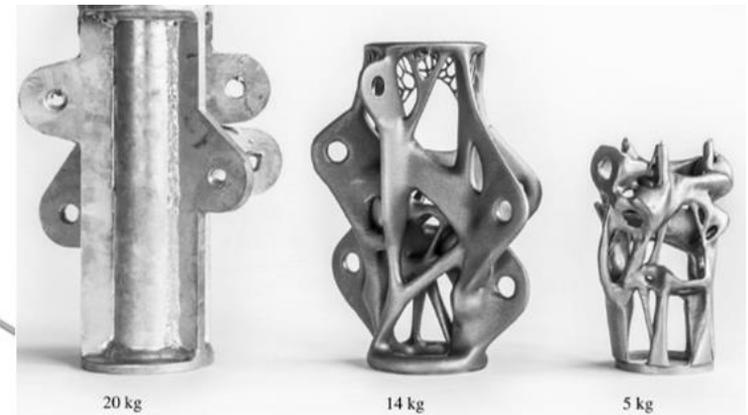
- Conception légère par optimisation



(a)



(b)



(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 LBM
(Inovar Communications Ltd, 2016)



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



Matériau le plus léger au monde Boeing

Source : <http://www.boeing.com>
15/88 .../...

Le champ des possibilités de la FA

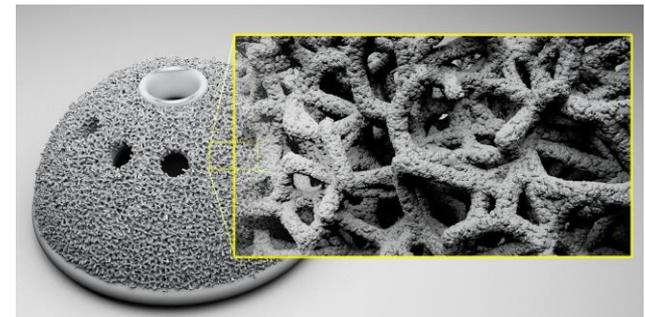
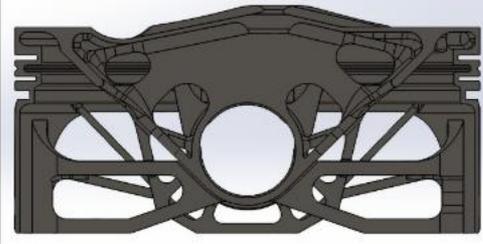
- Conception légère, les avantages sont:
 - Diminution de la masse des pièces mobiles
 - Diminution des effets d'inertie (vibration, fatigue des pièces de liaison...)
 - Augmentation de la tenue mécanique
 - Isolation...

Le champ des possibilités de la FA

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



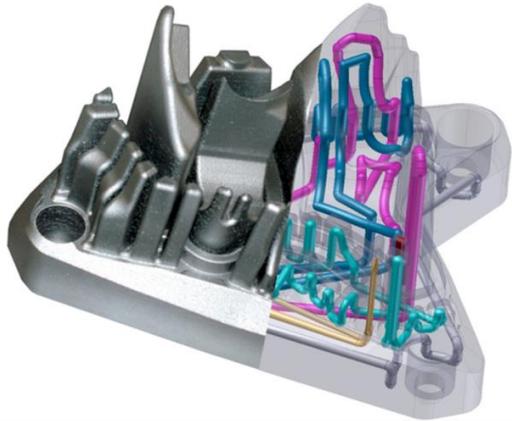
Piston topologiquement optimisé, Source : <http://solidthinking.com/>
Optimisation topologique d'un piston [Barbiero, 2017]



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

Critère économique du choix des pièces à réaliser en FA

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



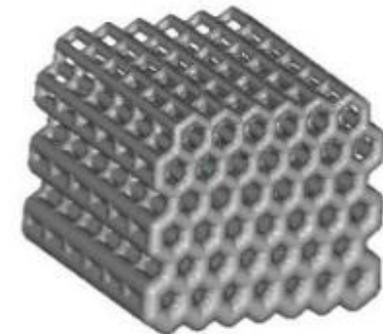
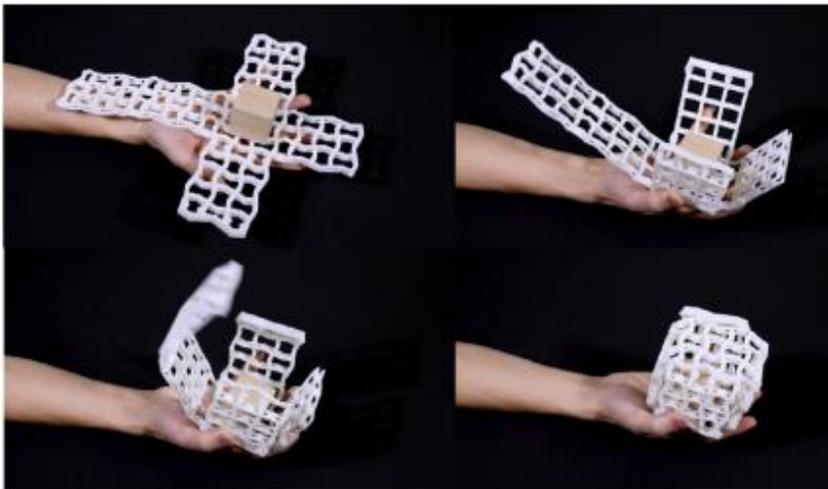
Implant de crane
Courtesy of Poly-Shape/OBL

Le champ des possibilité de la FA

- Matériaux innovants,
 - les matériaux architecturés,
 - auxétiques,
 - à gradients

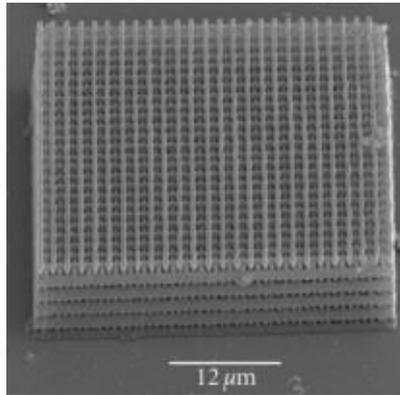


Matériaux à coefficient
de poisson négatif
Source : martstructures.wikispaces.com/



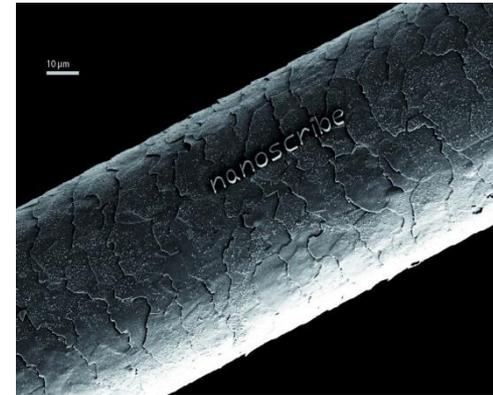
Le champ des possibilités de la FA

- Matériaux innovants,
 - Nano-impression
 - les matériaux de type 4D



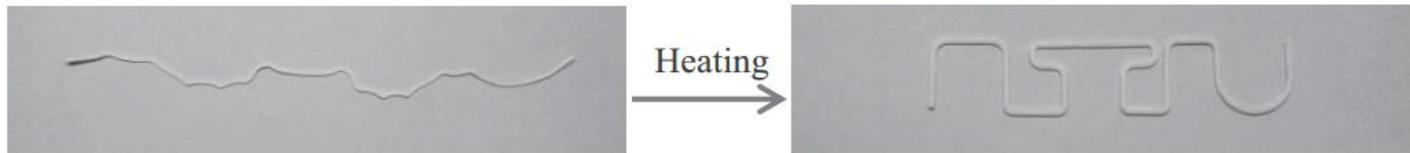
Nano-impression

Source: (Ovsianikov A, et al 2008)



Nano-inscription

Source: nanoscribe.de



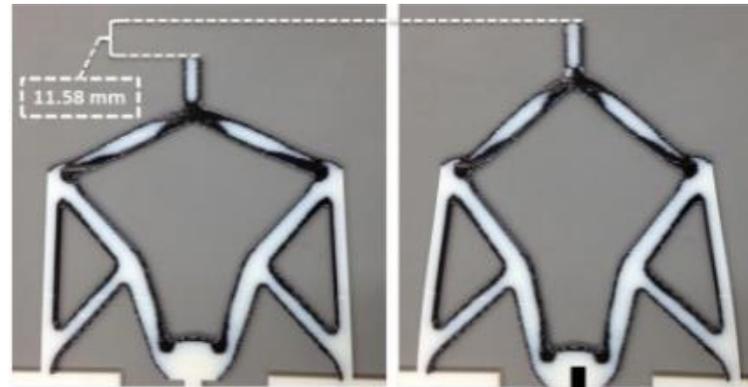
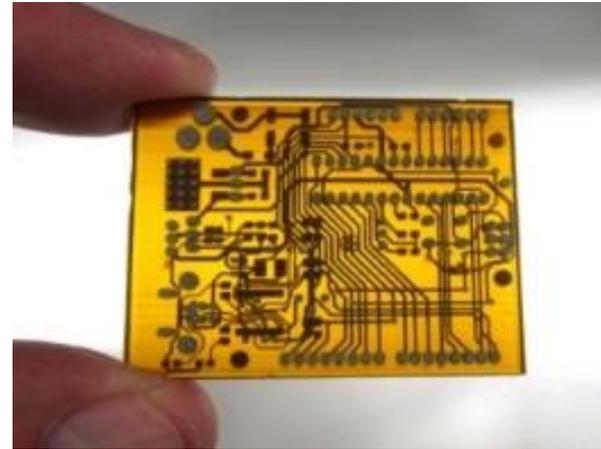
Exemple d'une impression avant et après la chauffe

Source: (Teoh et al. 2016)

Orquera@univ-tln.fr

Le champ des possibilité de la FA

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

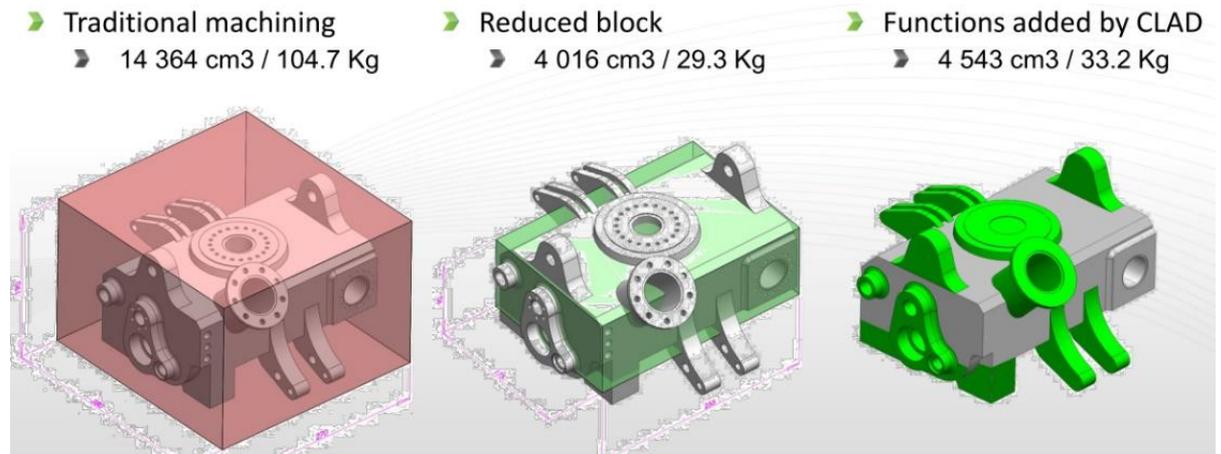


Le champ des possibilités de la FA

- 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
- Minimisation de l'énergie de déformation totale U dans le domaine élastique
(Bendsøe & Sigmund, 2003; Eschenauer & Olhoff, 2001)

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

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

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 ; Γ : variable de conception

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

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

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

Ω domaine de conception; Ω_S 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".

Optimisation topologique

Pour obtenir des valeurs de densité comprises entre 0 et 1, on pose:

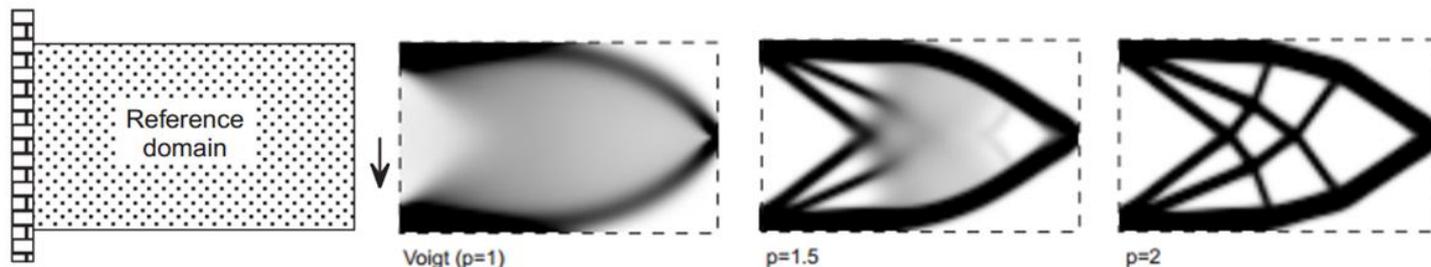
$$E_i(\Gamma) = \rho_i^p(\Gamma) \cdot E^*$$

E^* est la rigidité initiale du matériau isotrope,

ρ_i la densité de l'élément i

p le facteur de pénalité ($p \geq 3$ est généralement requis)

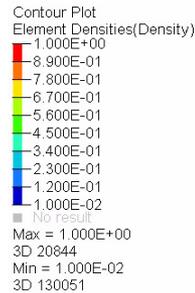
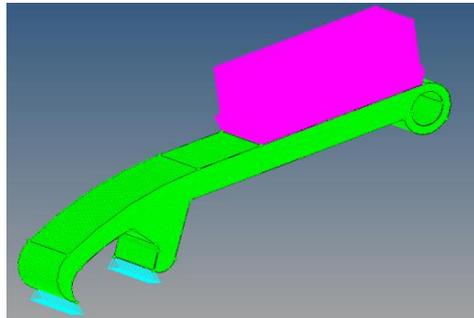
C'est la méthode SIMP (Simple Isotropic Material with Penalization)



Influence du facteur de pénalisation p sur l'effet damier (Bendsøe & Sigmund, 1999)

Optimisation topologique

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



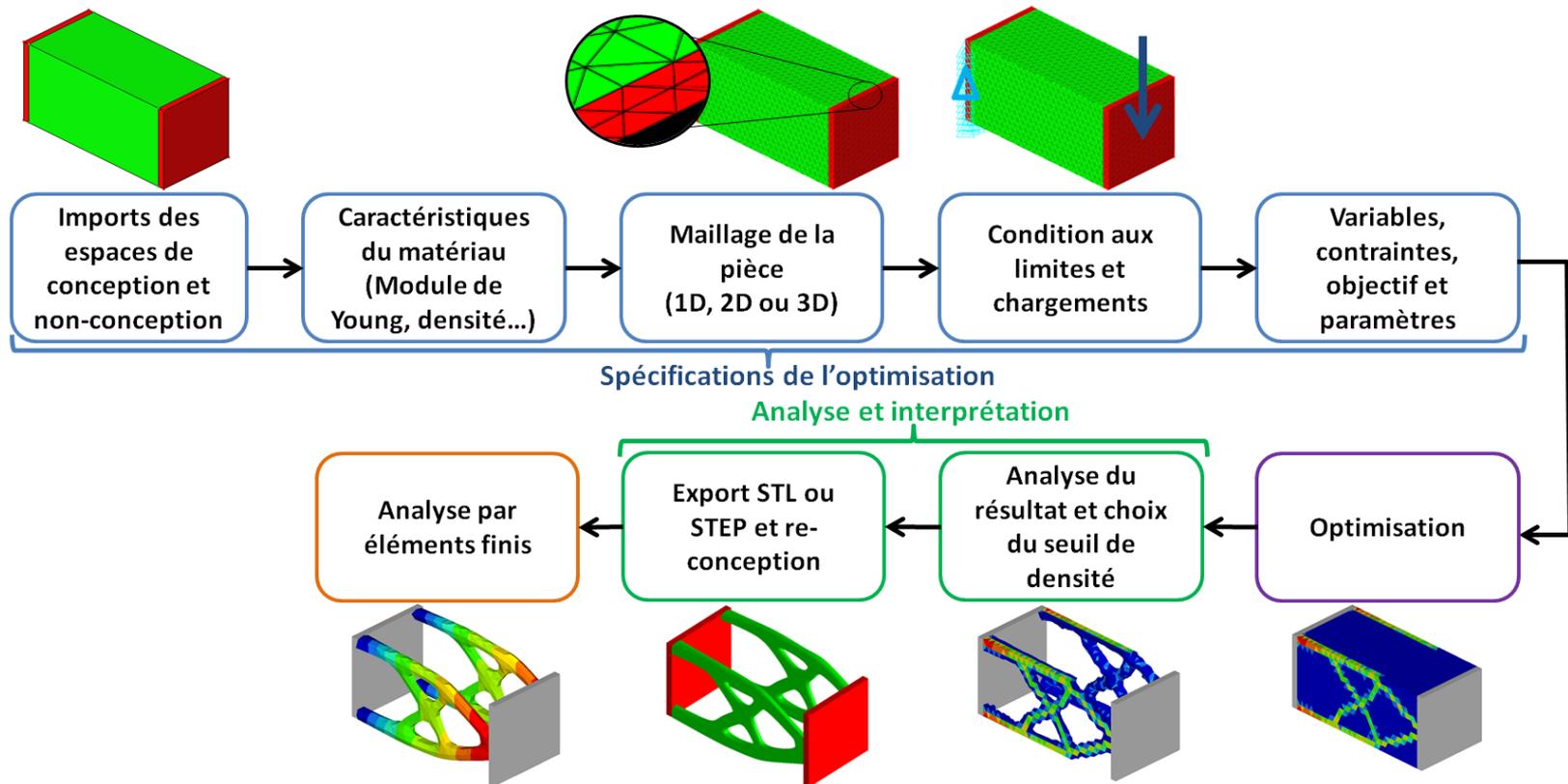
1: Model
Design : Iteration 0 : Frame 1



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

Optimisation topologique

Pour réaliser une optimisation topologique, il faut:



(Orquéra, 2019)

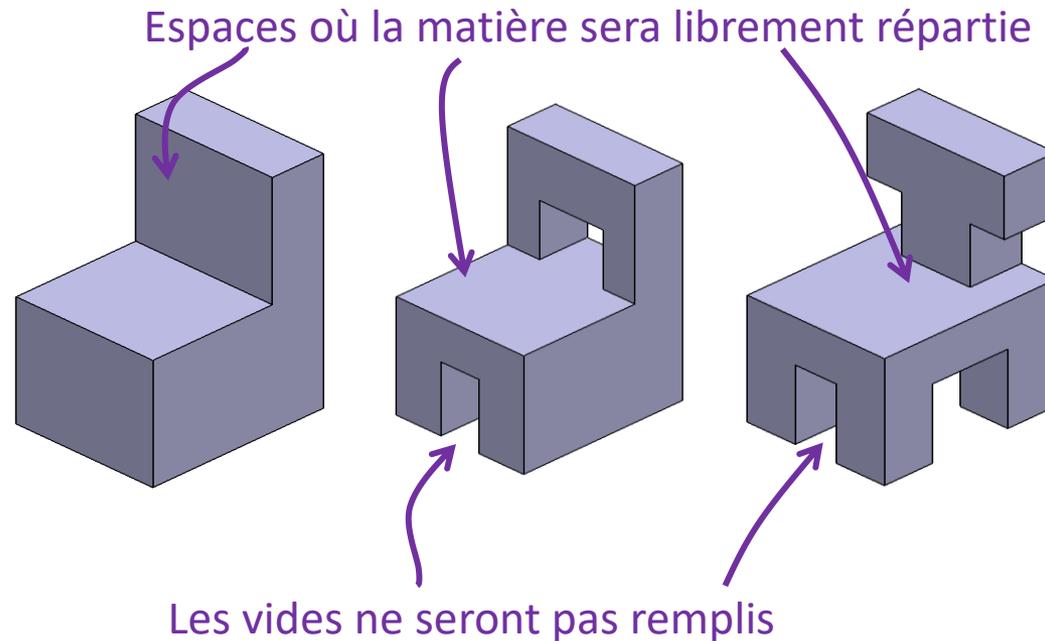
Optimisation topologique

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

Optimisation topologique

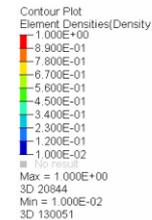
- Différents EC pour une chaise



Optimisation topologique

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



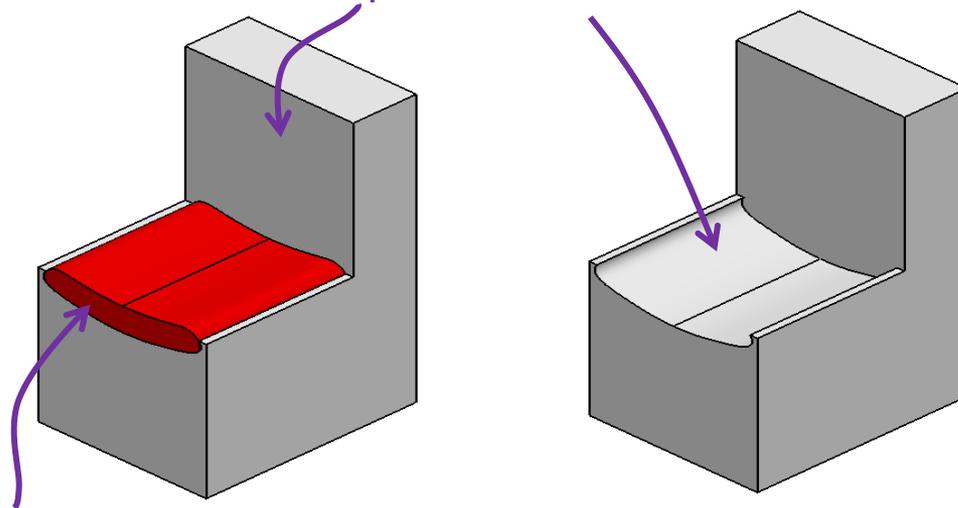
1. Model
Design : Iteration 0 : Frame 1



Optimisation topologique

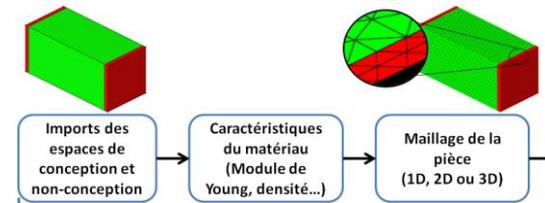
- ENC pour une chaise

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



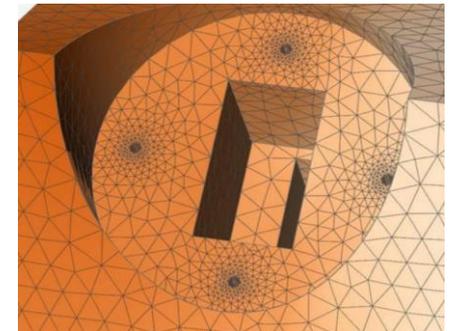
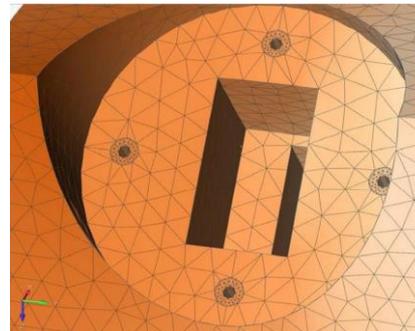
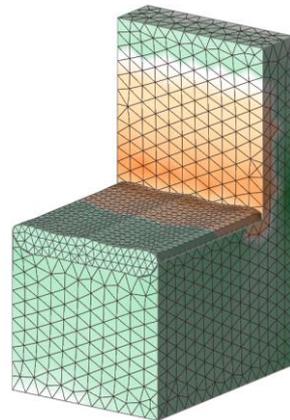
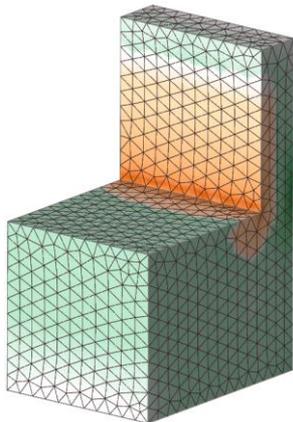
ENC: Volume « non touché » par le logiciel, restera intact.

Optimisation topologique

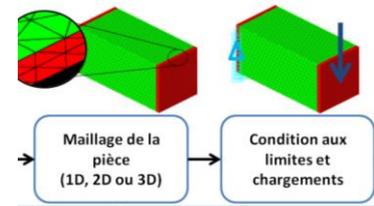


Maillage

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

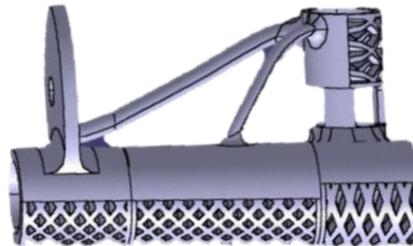


Optimisation topologique



Conditions aux limites

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

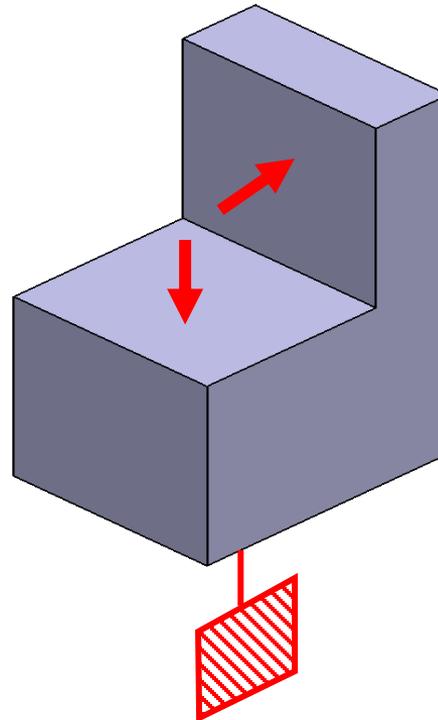


Destruction de la pièce lors du post-traitement par usinage. Adapté de (Doutre, 2015; Hoang et al., 2015)

Orquera@univ-tln.fr

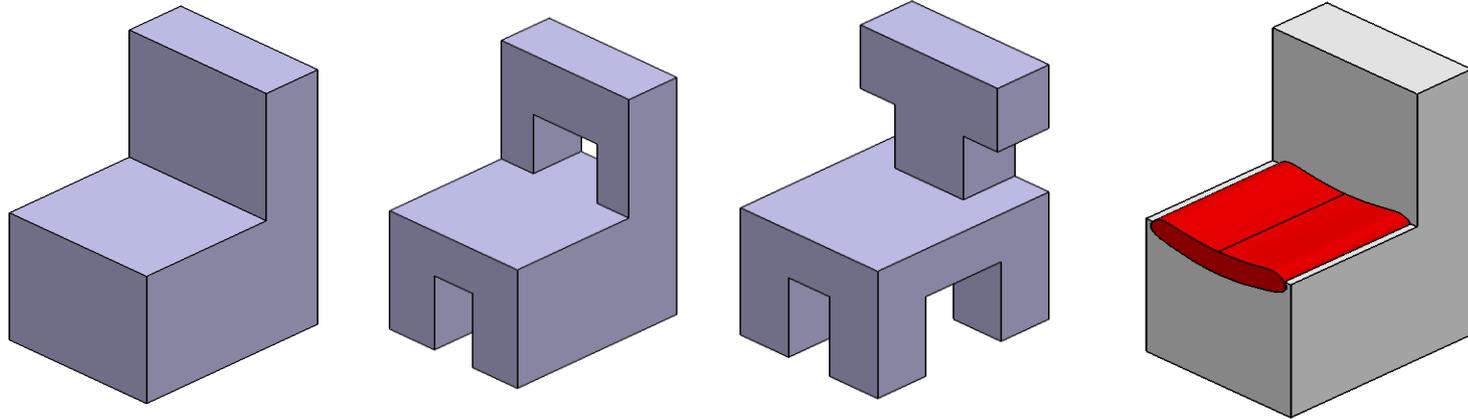
Optimisation topologique

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

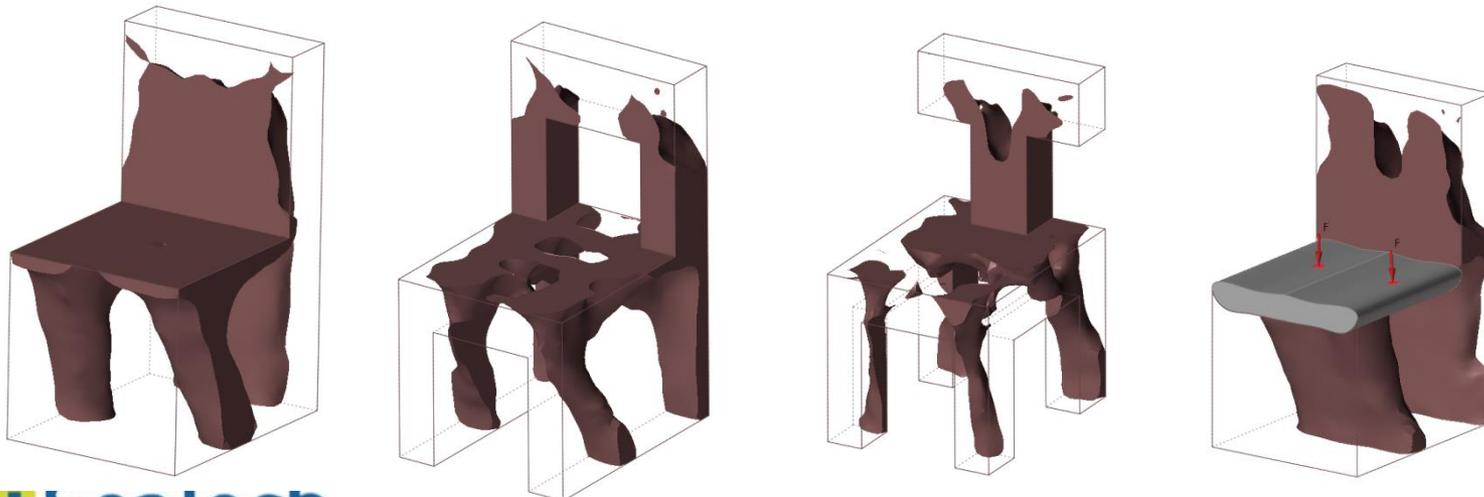


Optimisation topologique

Résultats et analyse pour différents EC

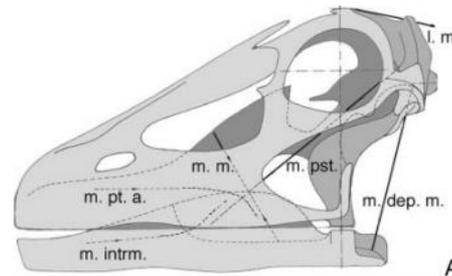
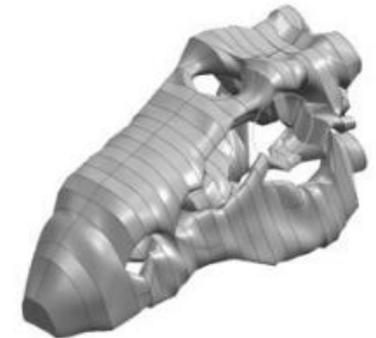
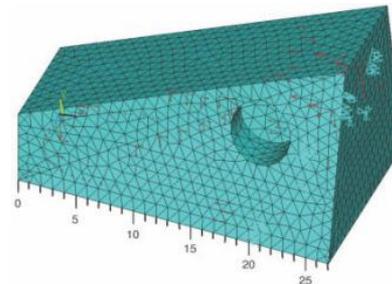
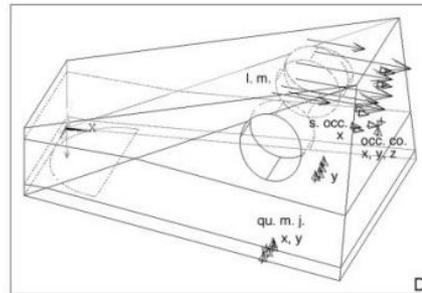
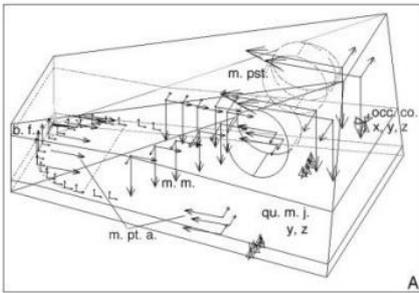


Maximisation de la raideur, 30% masse, seuil de densité 50%



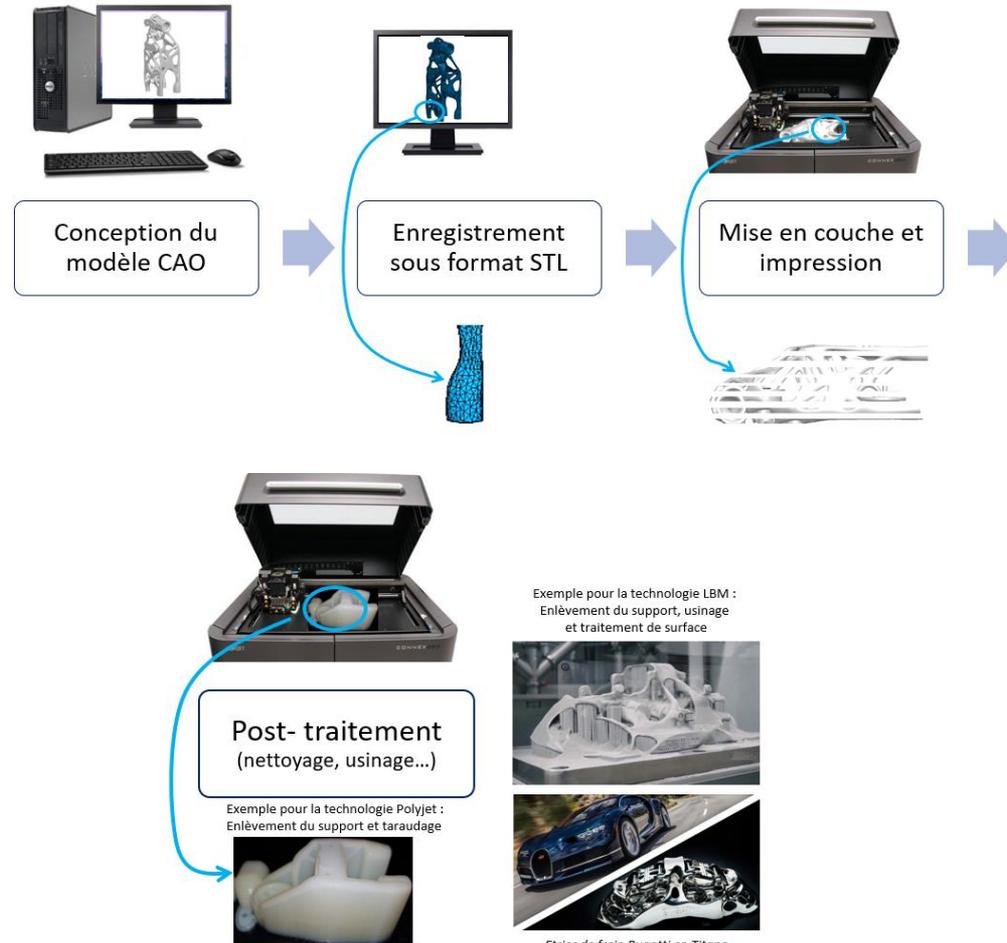
Optimisation topologique

- Exemple



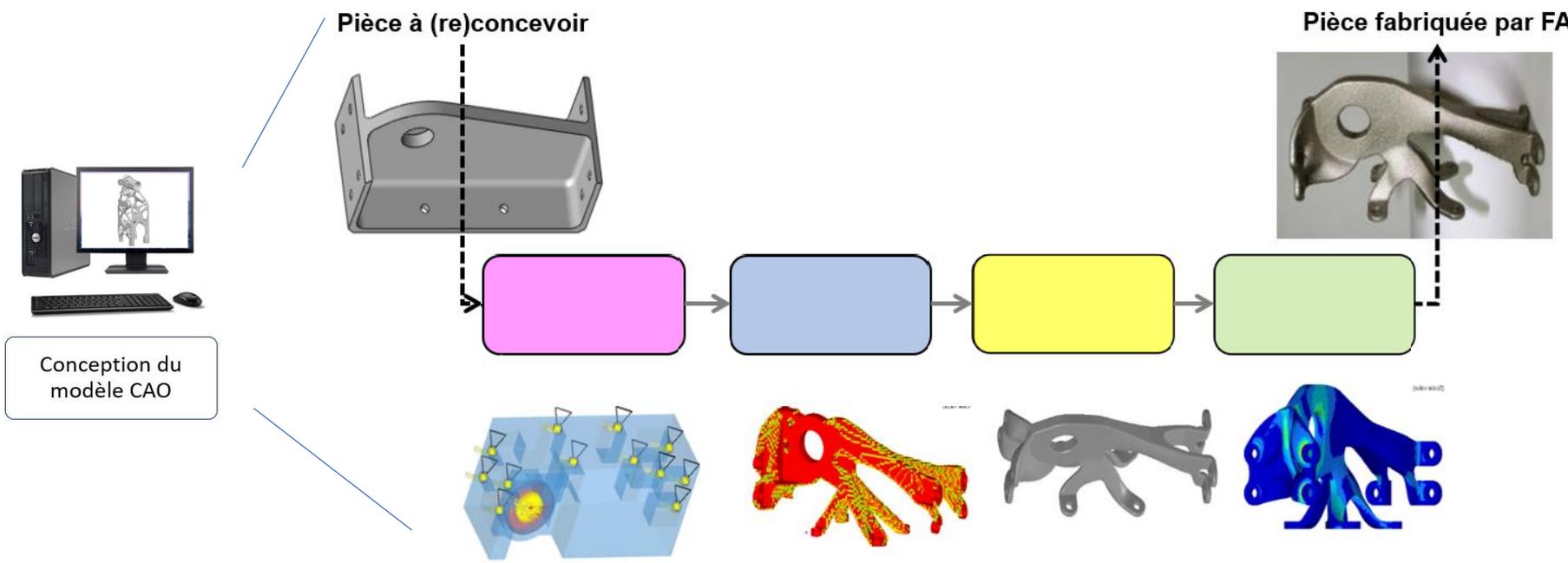
Optimisation topologique avec les cas de charge lors d'une phase de vie d'un diplodocus (Witzel and Preuschoft, 2005)

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



Les étapes de conception pour la FA

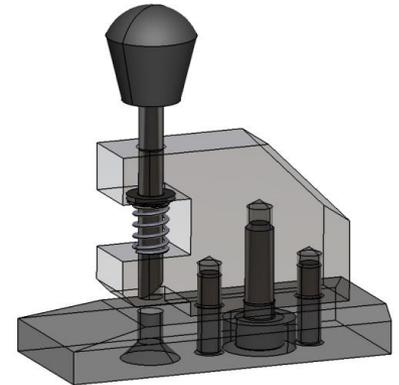
Conception pour la fabrication additive



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

Les étapes de conception pour la FA

- Support d'application : Perforatrice
 - Composé de pièces usinées
 - Découpe des feuilles, cartons et feuilles métalliques de faible épaisseur
 - Milieu d'utilisation : atelier
- A reconcevoir pour la fabriquer par Fusion laser sur lit de poudre LBM
- Objectif principal: Obtenir une perforatrice
 - plus légère
 - moins encombrante
 - plus design
- Fonction principale :
Perforer un trou dans une ou plusieurs feuilles



Les étapes de conception pour la FA

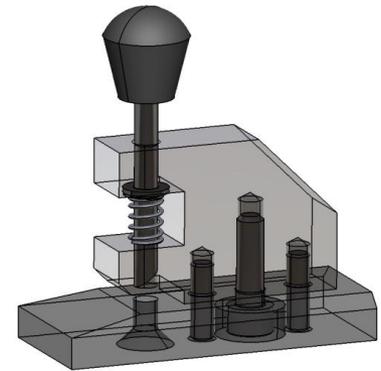
Conception pour la fabrication additive

Spécifications

- Objectif de la (re)conception
- Caractéristiques influant l'objectif
- Justification de la l'utilisation de la FA
- Choix des pièces à imprimer
- Cahier des charges
 - Analyse fonctionnelle
 - Analyse des cycles de vie
 - Estimations des efforts
 - ...

➤ Application sur la perforatrice

- Objectif principal: Obtenir une perforatrice
 - plus légère
 - moins encombrante
 - plus design
- Caractéristiques influant l'objectif
 - La masse (masse actuelle : 121,1 g)
 - Le volume de l'ensemble (volume actuel de la boîte englobante : 41,5 cm³)
 - L'esthétique générale



- Est-ce intéressant de réaliser la perforatrice par FA?

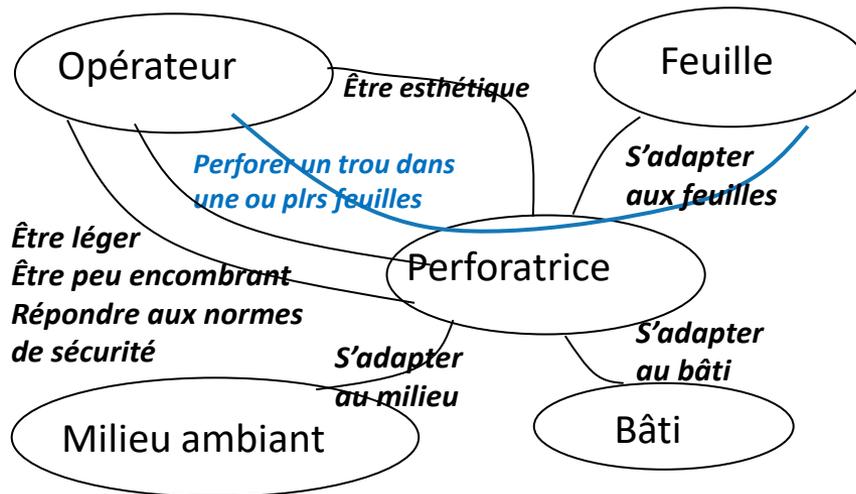
- ✓ • Petite et moyenne série
- ✗ • Besoin de diminution « Time to market »
- ✓ • Ratio buy to fly
- ✓ • Regroupement de pièces en une seule
- ✓ • Individualisation
- ✓ • Conception « légère »
- ✓ • Application du potentiel de la FA

- Quelles sont les pièces en réaliser par FA?

- La FA du carter apportera une valeur ajoutée au mécanisme
- La FA du poinçon et de la poignée n'apporteront pas de manière significative une valeur ajoutée au mécanisme
- Toutefois, à titre d'exercice, tout sera réalisé par FA

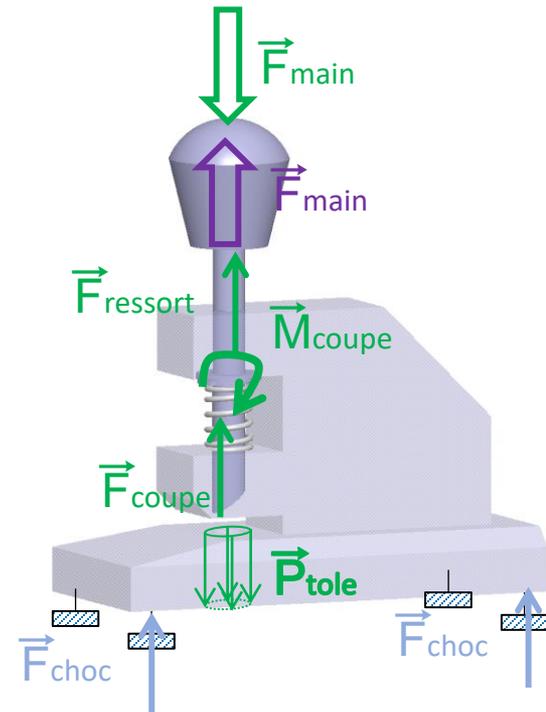
- Déterminons les phases de vie:
 - Fabrication
 - Post-traitement
 - Utilisation
 - Transport/déplacement (non fixé à 1 établi)

- Analyse fonctionnelle : Phase d'utilisation



Fonction	Critère	Niveau	Flexi- bilité
S'adapter aux feuilles	<ul style="list-style-type: none"> • Épaisseur totale • Nb de feuilles • Matière de la feuille 	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%

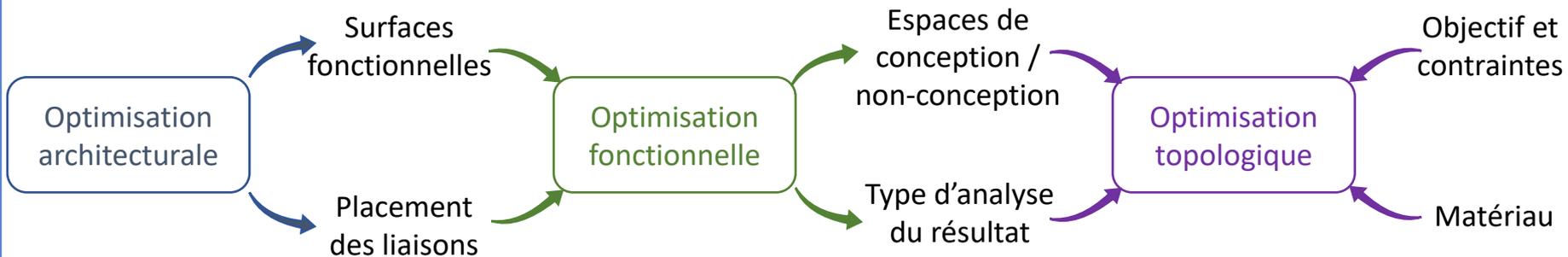
- Conditions aux limites / phase de vie
 - En phase d'utilisation
 - Effort de la main sur le levier 50N
 - Plaque métallique
 - Encastrement sur 4 points
 - En phase de transport
 - En phase de pose/choc



Les étapes de conception pour la FA

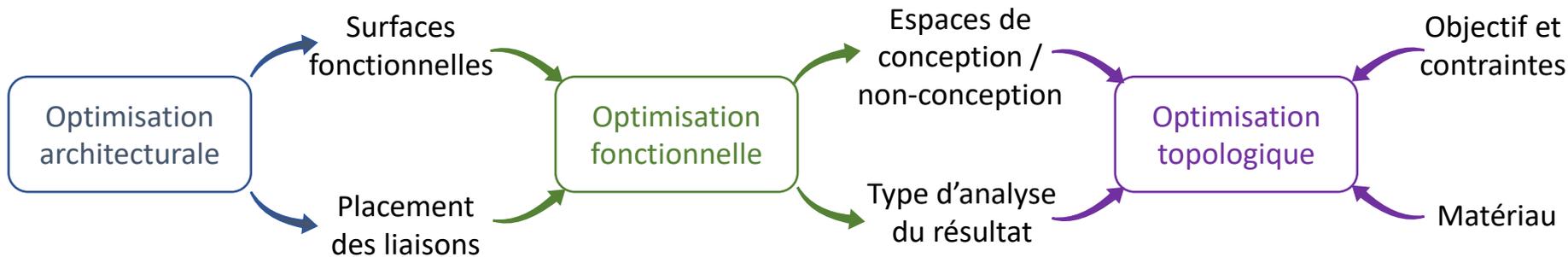
Optimisations

- Sur l'architecture générale
- Sur les surfaces fonctionnelles (+ champ de possibilité)
- Sur l'optimisation topologique



Optimisation architecturale

- Optimisation par une conception monolithique
- Optimisation des liaisons d'interfaces (entre le produit et l'extérieur)
- Optimisation de l'emplacement des liaisons cinématiques



Optimisation architecturale

- Conception monolithique sur la perforatrice?

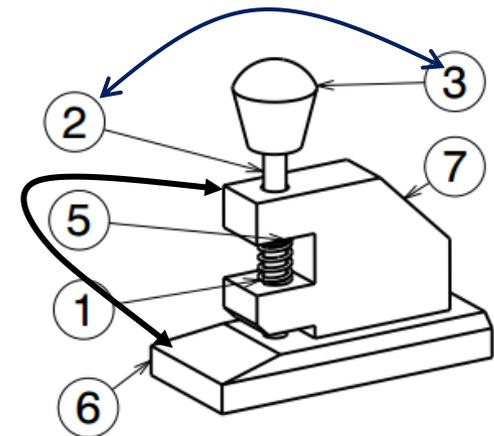
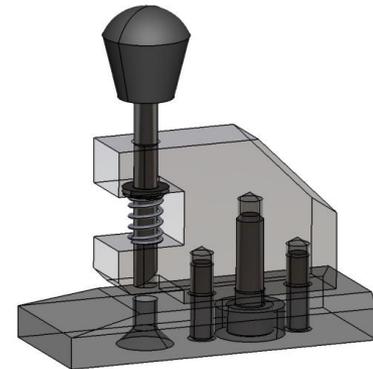
- Union des pièces 7 et 6?

- ✓ 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

➤ **7 et 6 en une seule pièce**

- Union des pièces 2 et 3 ?

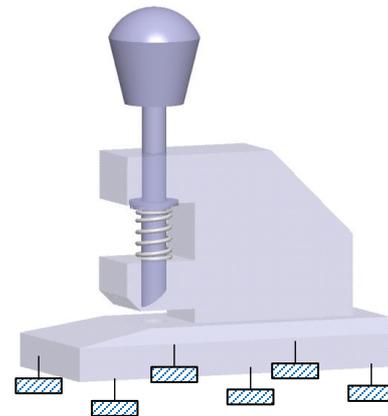
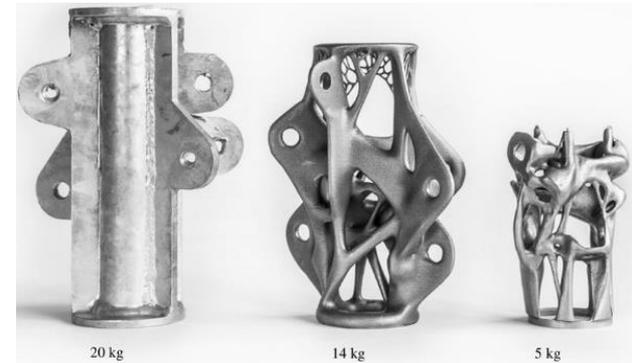
➤ **2 et 3 en une seule pièce**



Optimisation architecturale

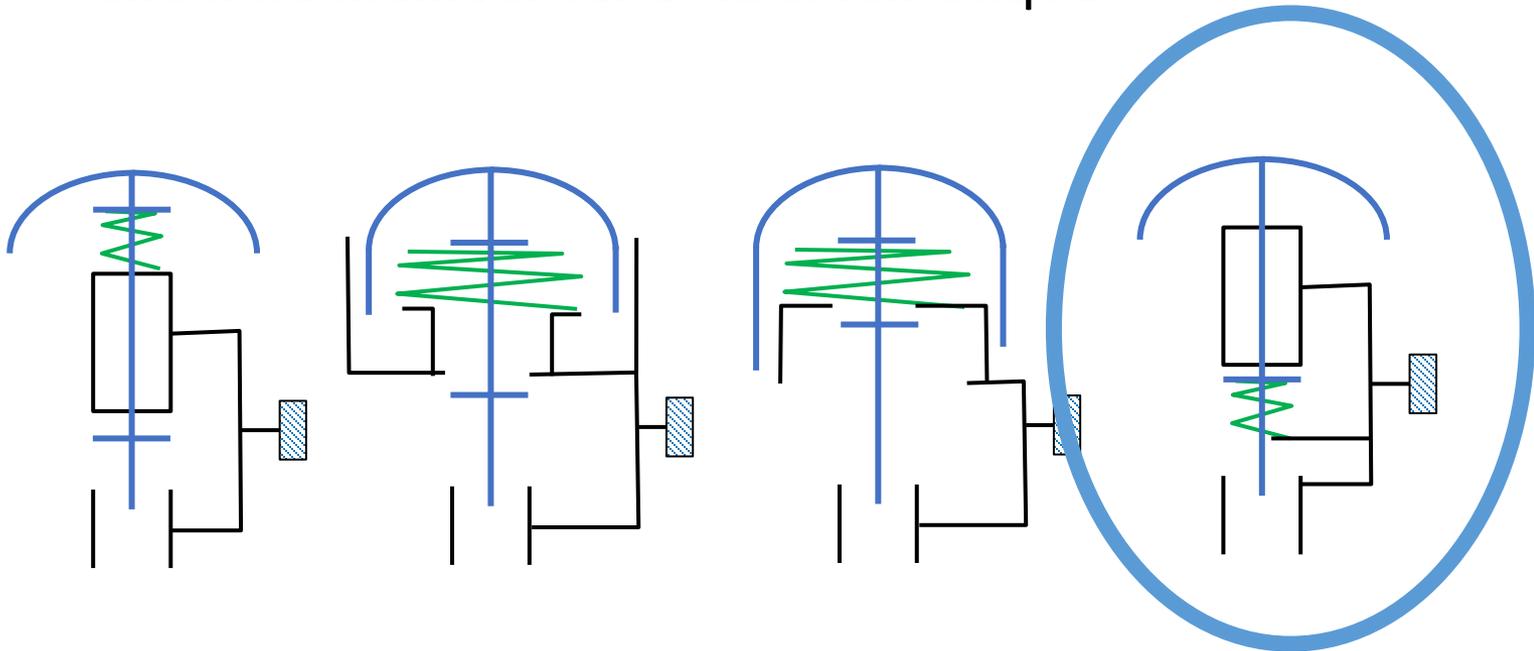
- Optimisation des liaisons d'interface

- Application sur la perforatrice
 - Où se trouvent les liaisons d'interface?
 - Proposer une position pour ces liaisons



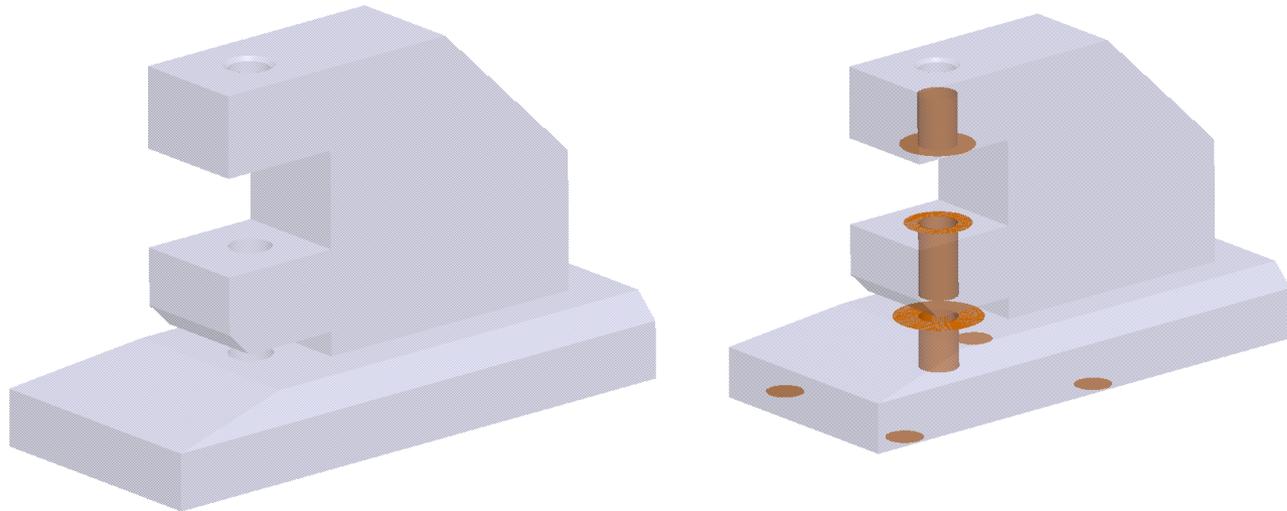
Optimisation architecturale

- Optimisation de l'emplacement des liaisons
 - Choix du meilleur schéma cinématique



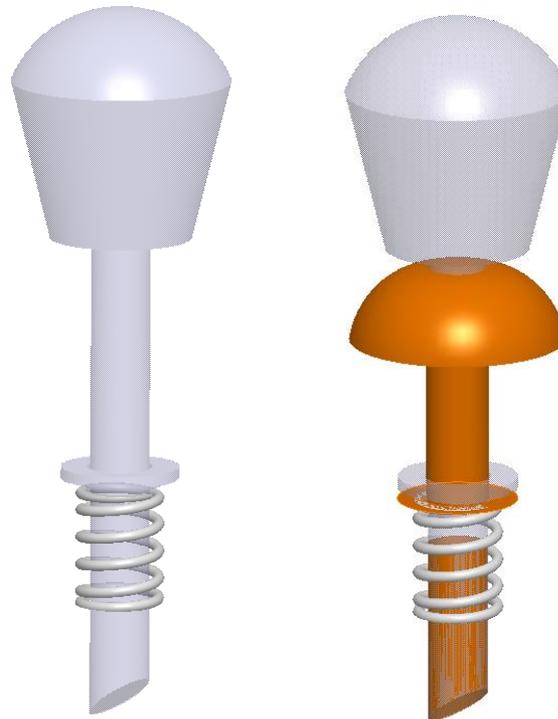
Optimisation Architecturale

- Surfaces fonctionnelles
 - Ce sont des surfaces
 - remplissant une fonction (de guidage, de transmission, ou autre)
 - qui doivent être gardées lors de la conception
 - pouvant être améliorées (exemple: passer d'une forme cylindrique d'une poignée à une forme complémentaire de la main)
- Tracez les surfaces fonctionnelles sur le carter



Optimisation Architecturale

- Tracez les surfaces fonctionnelles sur le poinçon



Optimisation fonctionnelle

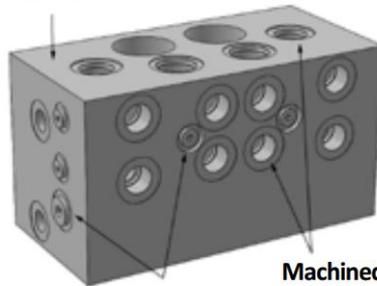
- Les objectifs sont :
 - D'optimiser la transmission de puissance et d'énergie
 - D'optimiser les liaisons cinématiques
- Tout en exploitant tout le potentiel de la FA (hormis les matériaux innovant ou autres)

Optimisation fonctionnelle

- Exemple: Atlas Copco spécialisé dans l'outillage et l'équipement en Suède

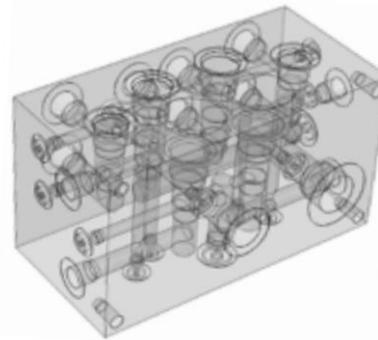


Stainless steel block



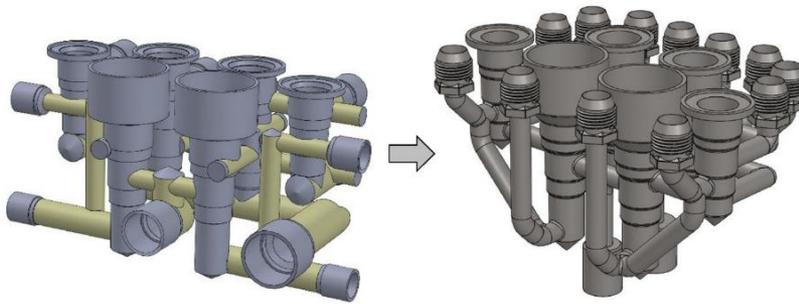
Plugged holes

Machined and drilled input and output ports and channels



Optimisation fonctionnelle

- Exemple: Atlas Copco spécialisé dans l'outillage et l'équipement en Suède
 - Optimisation architecturale
 - Modification du placement des admission/refoulement pour un meilleur montage
 - Optimisation fonctionnelle
 - Réalisation de filetages et pré-taraudages
 - Diminution des pertes de charges



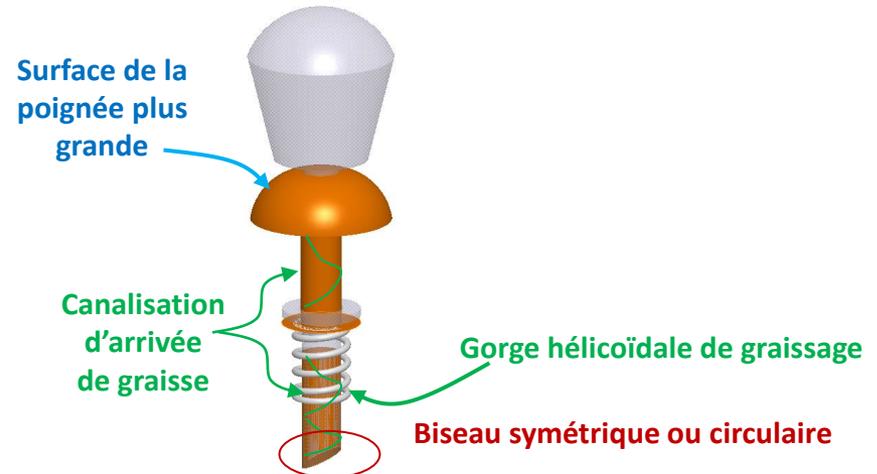
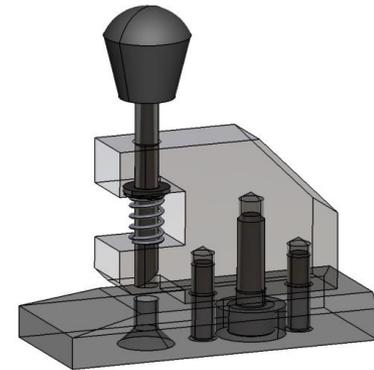
Optimisation fonctionnelle

- Exemple: Atlas Copco spécialisé dans l'outillage et l'équipement en Suède

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		96.9 %	91.2 %
% by volume of support material	N/A	< 2% if band-saw cut from build plate < 0.8 % if EDM cut from build plate	< 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

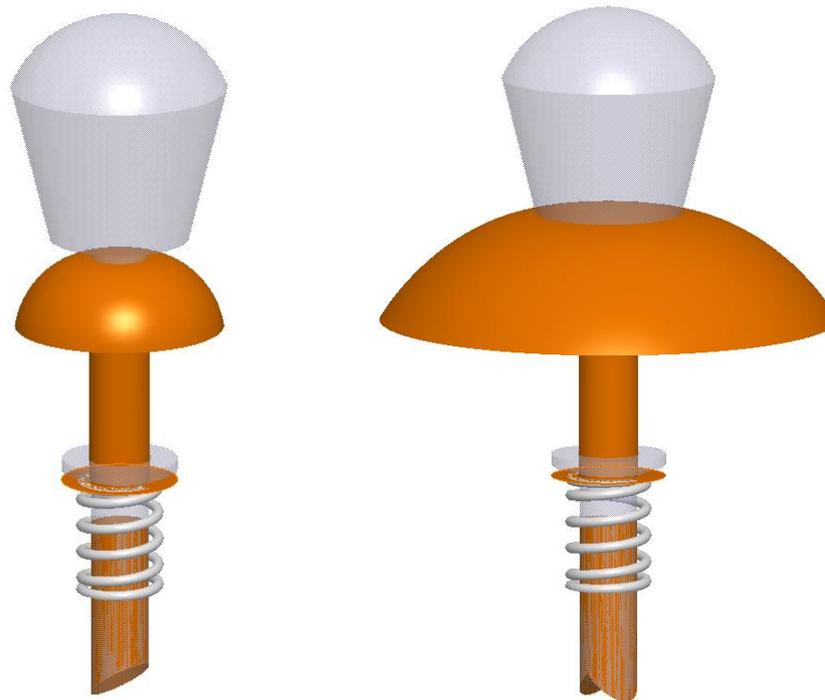
• Comment améliorer les surfaces fonctionnelles sur la perfo?

- Diminution du frottement
 - Gorges /cavités de graissage
- Annulation de l'arc boutement
 - longueur de guidage suffisant
 - pas de couple lors de la coupe par une forme biseautée symétrique ou circulaire
- Récupérer tout l'effort de l'opérateur
 - Ergonomie de la poignée



Optimisation fonctionnelle

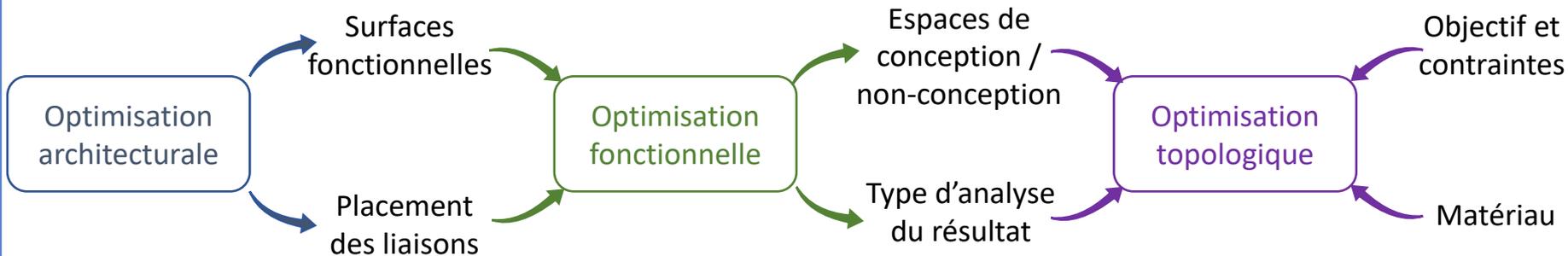
- Nouvelles surfaces fonctionnelles du poinçon



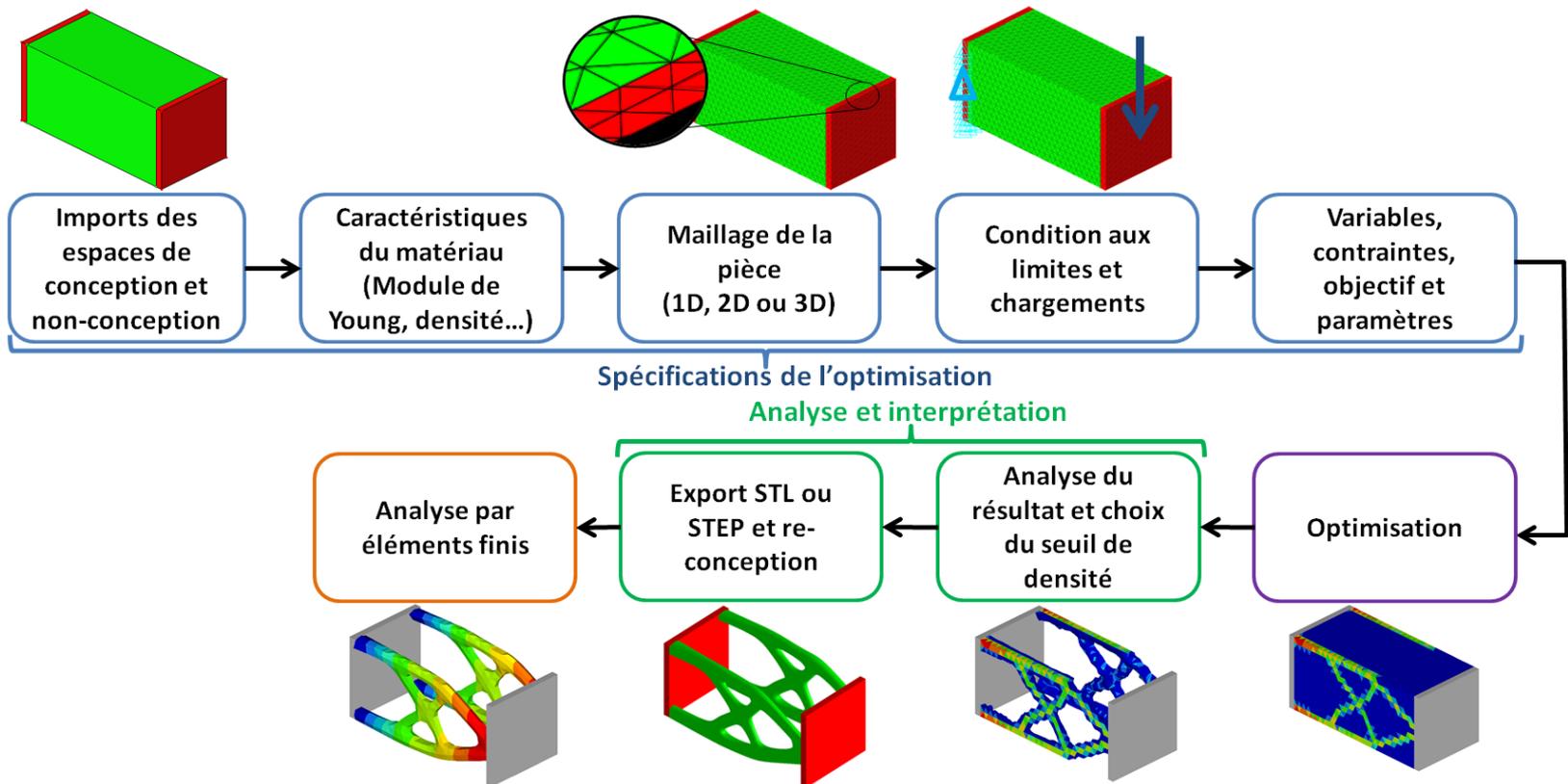
Les étapes de conception pour la FA

Optimisations

- Sur l'architecture générale
- Sur les surfaces fonctionnelles (+ champ de possibilité)
- Sur l'optimisation topologique

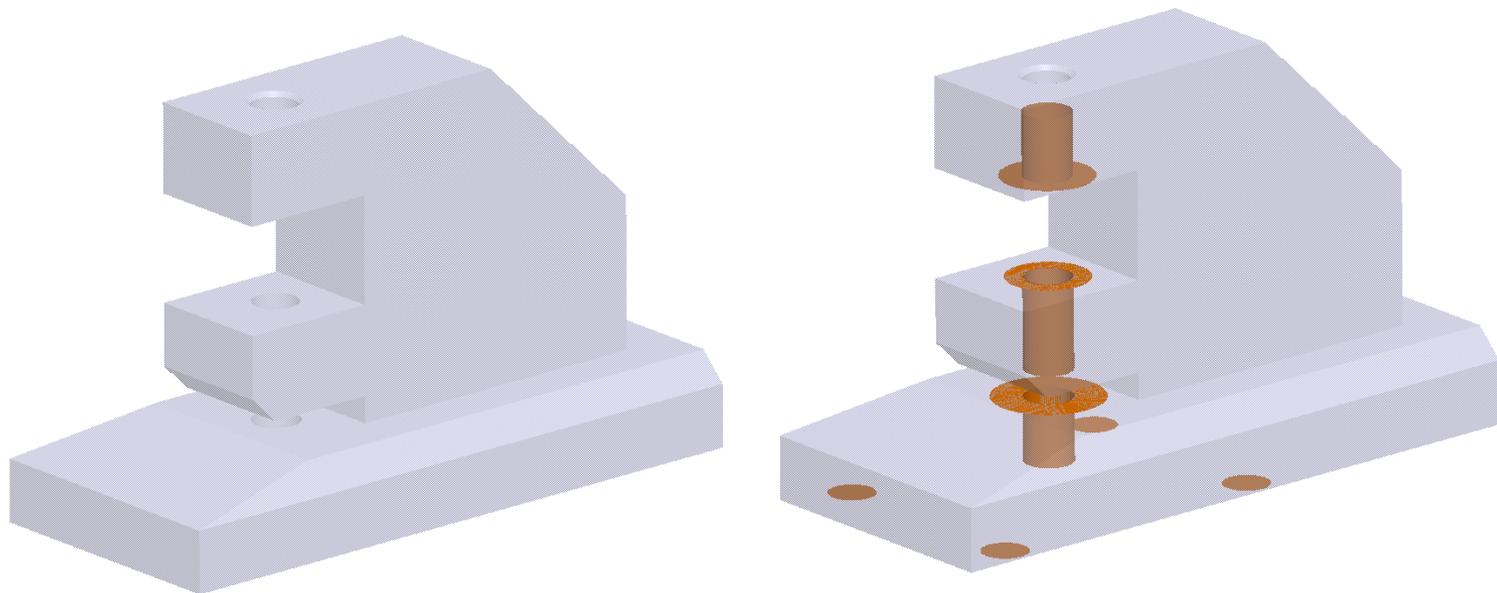


Optimisation topologique _ Rappel



Optimisation topologique

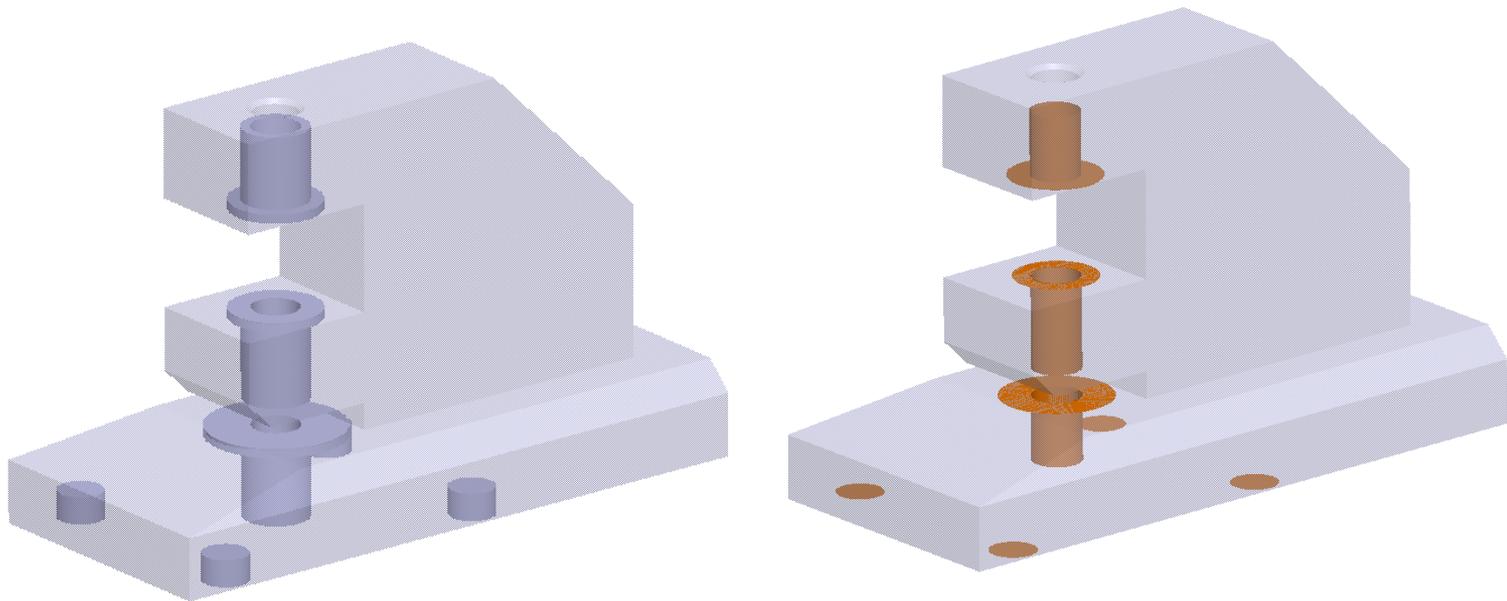
- Application sur la perforatrice
 - Tracez les espaces de non conception du carter



Optimisation topologique

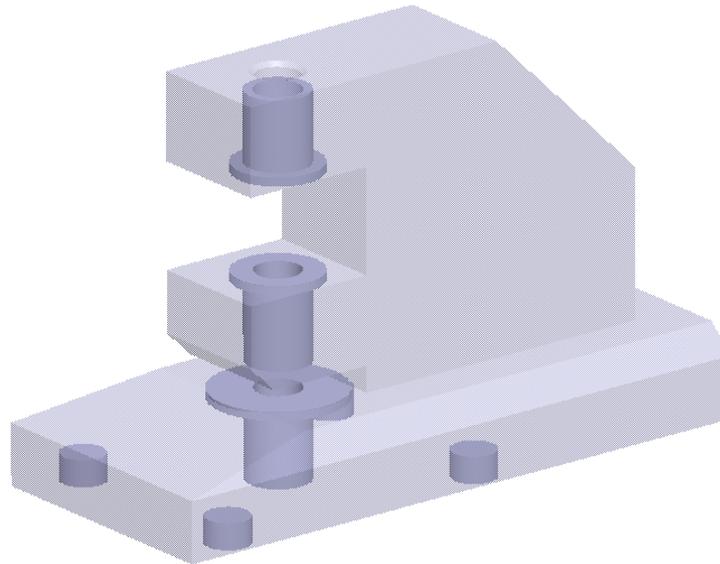
➤ Application sur la perforatrice

- Tracez les espaces de non conception du carter



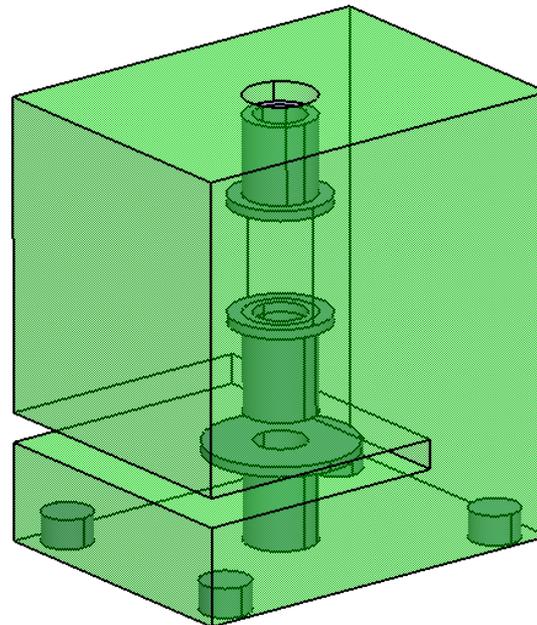
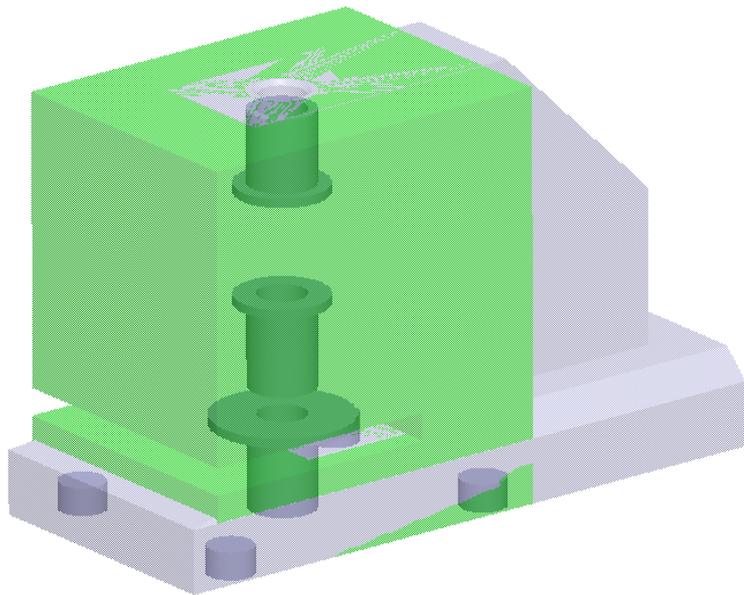
Optimisation topologique

- Application sur la perforatrice
 - Proposez un espace de conception du carter



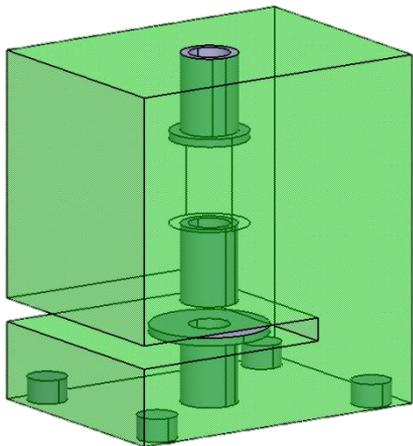
Optimisation topologique

- Application sur la perforatrice
 - Proposez un espace de conception du carter

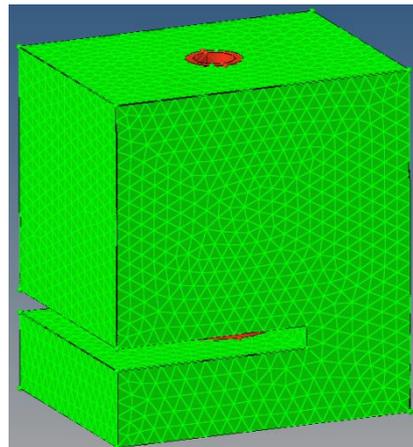


• Etapes de l'optimisation topologique

Insérer EC + ENC
Indiquer la matière

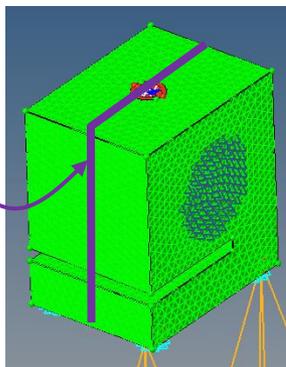


Maillage

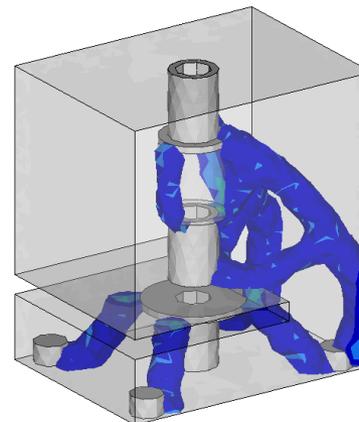


Imposer les efforts et liaisons
Et Objectif d'optimisation

Définition d'un
plan
de symétrie

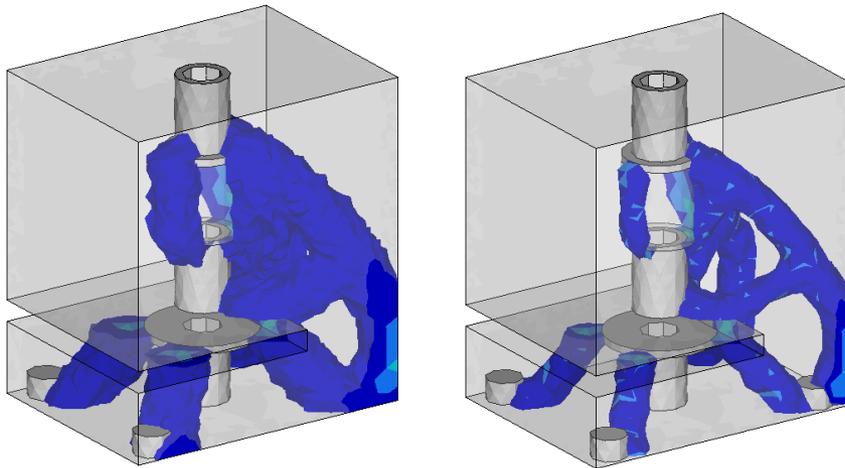


Analyser le résultat

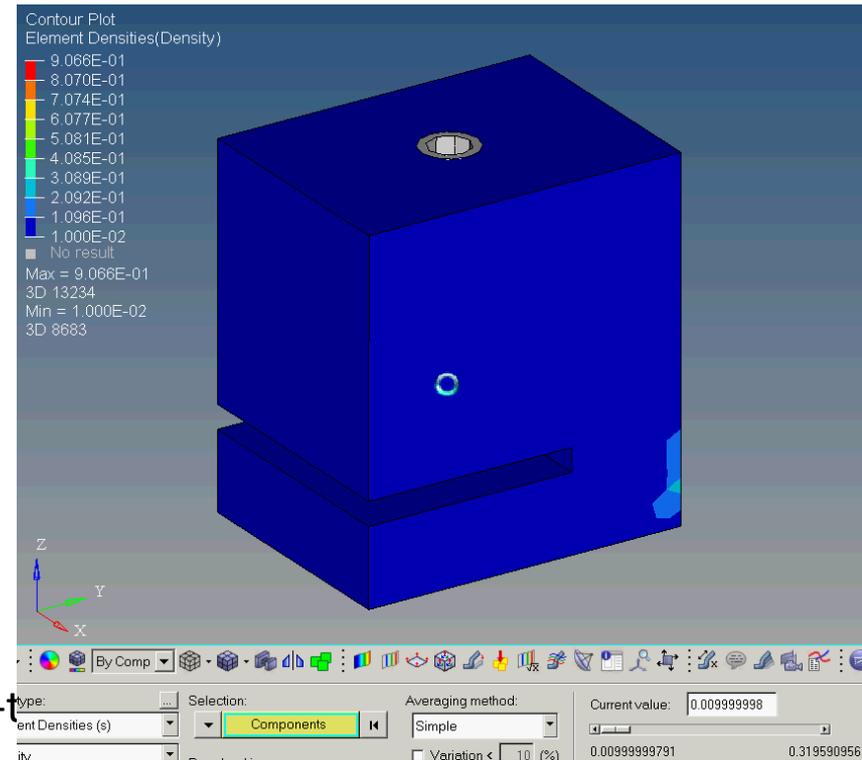


Optimisation topologique

- Analyse du résultat
 - La valeur du seuil de densité joue sur l'épaisseur des « bras »
 - Choisir la valeur paraissant la plus « viable »

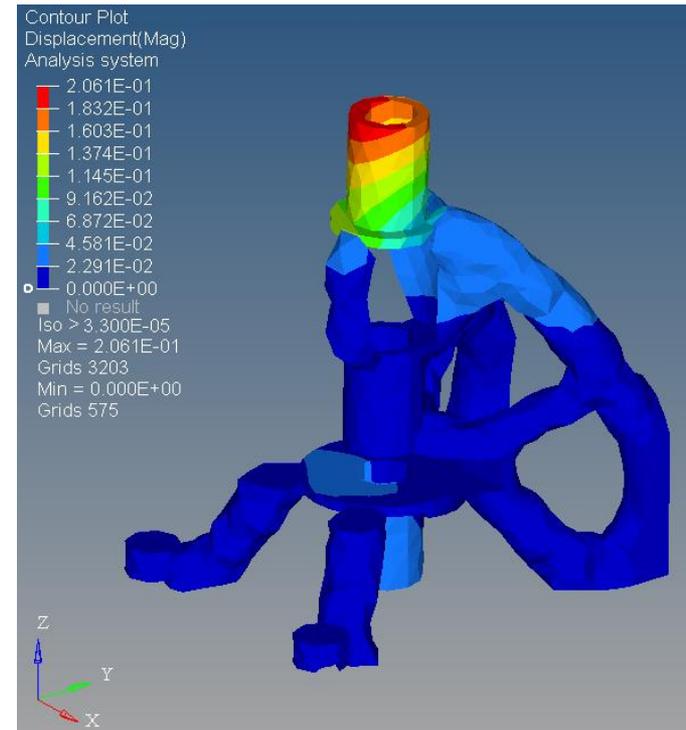
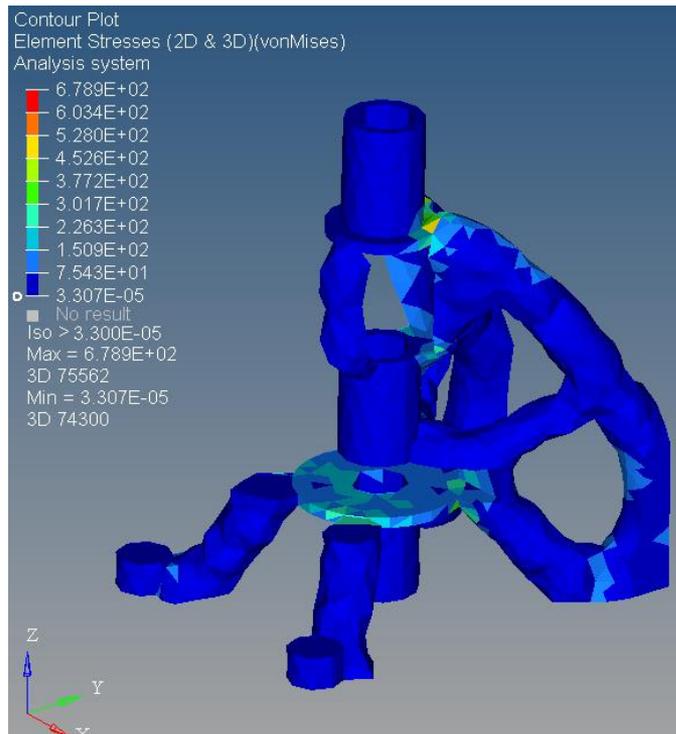


Influence de la valeur de la densité minimal sur le résultat

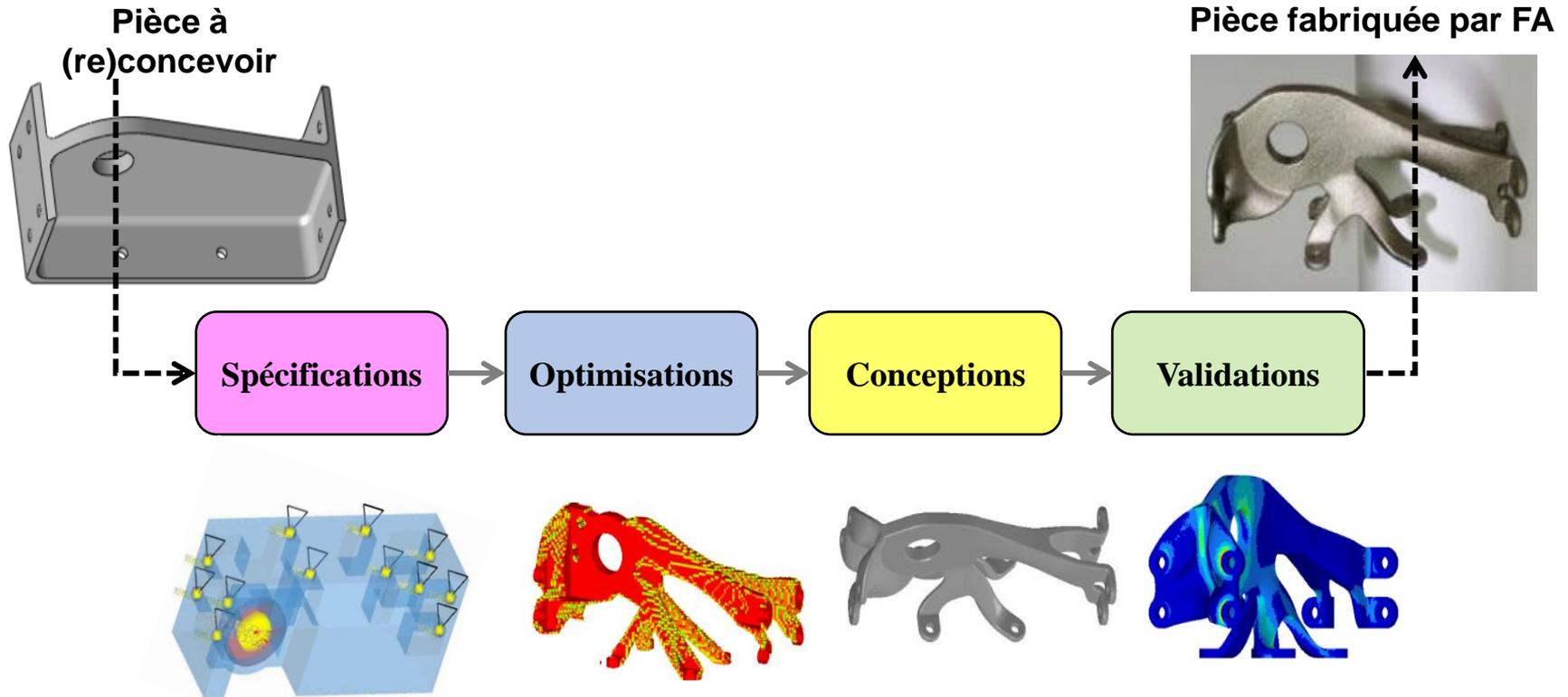


Optimisation topologique

- Vérification de la tenue mécanique
 - Résultat de l'optimisation, pour le cas de charge 1 : Utilisation



Les étapes de conception pour la FA



Adapté de (Seabra et al., 2016)

Orquera@univ-tln.fr

Les étapes de conception pour la FA

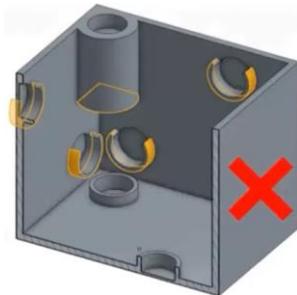
Conceptions

- Conception de la pièce fini
- Conception de la pièce imprimée sans plateau (avant post-traitement, avec ou sans support...)

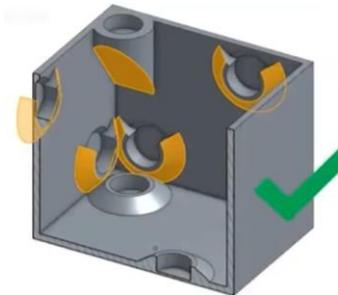


Reconception du modèle fini

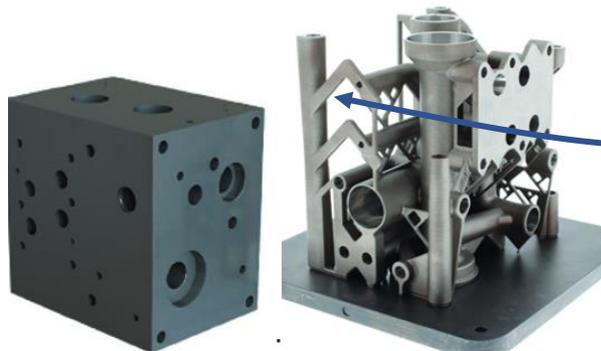
- Appliquer les astuces de conception
 - Surfaces en porte à faux :
 - diminue les supports et les scories



- 2 hours, 2 minutes
- 2.379 in³ model
- 0.4 in³ support



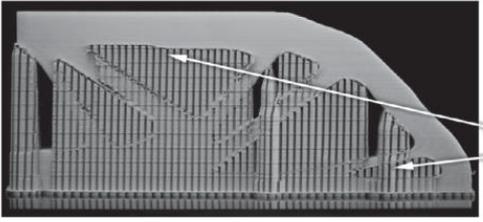
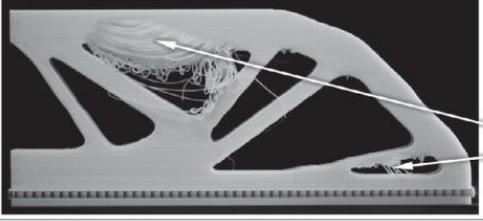
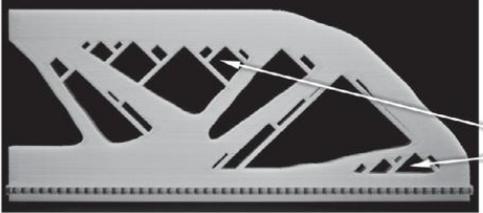
- 1 hour, 34 minutes
- 2.0 in³ model
- 0.3 in³ support



Angle permettant aux surfaces d'être autoportantes

Reconception du modèle fini

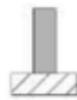
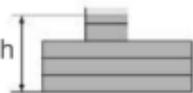
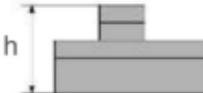
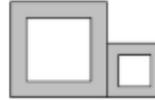
- Appliquer les astuces de conception
 - Elimination du support

	<p>Manufacture with support material Build time: 5.7 hours Support material consumption: 41.9 cm³ Build material consumption: 47.8 cm³</p> <p>Columnar support material enables manufacture, but <i>contributes significantly to component cost and build time.</i></p> <p>Robust build? PASS</p>
	<p>Manufacture with no support material Build time: 1.6 hours Support material consumption: 0 cm³ Build material consumption: 47.8 cm³</p> <p>Eliminating support material can result in <i>failure to achieve a robust build.</i></p> <p>Robust build? FAIL</p>
	<p>Support-free manufacture Build time: 2.6 hours Support material consumption: 0 cm³ Build material consumption: 54.9 cm³</p> <p>The custom geometry generated by the proposed method <i>enables support-free manufacture.</i></p> <p>Robust build? PASS</p>

(Leary *et al.*, 2014)

Reconception du modèle fini

- Appliquer les règles de tracé en fonction des contraintes de fabrication

structure		unfavourable	favourable	explanation	restrictions and recommendations
Design Process – TiAl6V4 general geometry / part form	general			<ul style="list-style-type: none"> part size must consider substrate plate dimensions rotate, scale or separate parts if necessary 	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)
	inclusion of substrate platform			<ul style="list-style-type: none"> integration of substrate platform into part possible reduction of manufacturing time and costs hybrid manufacturing approach 	
				<ul style="list-style-type: none"> radii at the interface part / substrate platform prevent part strip off during manufacturing process 	<ul style="list-style-type: none"> the larger the interfaces layer, the larger the radius should be r=3-5 mm suitable for TiAl6V4
	height			<ul style="list-style-type: none"> part height in build up direction should equal multiple layer thicknesses 	layer thickness: 20 - 50 µm TiAl6V4: 30 µm (see manufacturing machine documentation)
	integration of functions			<ul style="list-style-type: none"> prefer integral part design reduction of manufacturing time 	

Reconception du modèle fini

	Murs supportés	Murs non supportés	Support et porte-à-faux	Détails en relief et gravés	Pont horizontal
	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
					
Dépôt de Filament	0.8 mm	0.8 mm	45°	0.6 mm de large & 2 mm de hauteur	10 mm
Stéréolithographie	0.5 mm	1 mm	support toujours requis	0.4 mm de large et de hauteur	
Frittage sélectif par laser (SLS)	0.7 mm			1 mm de large et de hauteur	
Projection de matériaux	1 mm	1 mm	support toujours requis	0.5 mm de large et de hauteur	
Projection de liant	2 mm	3 mm		0.5 mm de large et de hauteur	
Frittage laser direct des métaux	0.4 mm	0.5 mm	support toujours requis	0.1 mm de large et de hauteur	2 mm

Reconception du modèle fini

- Application sur la perforatrice
 - Modèle fini

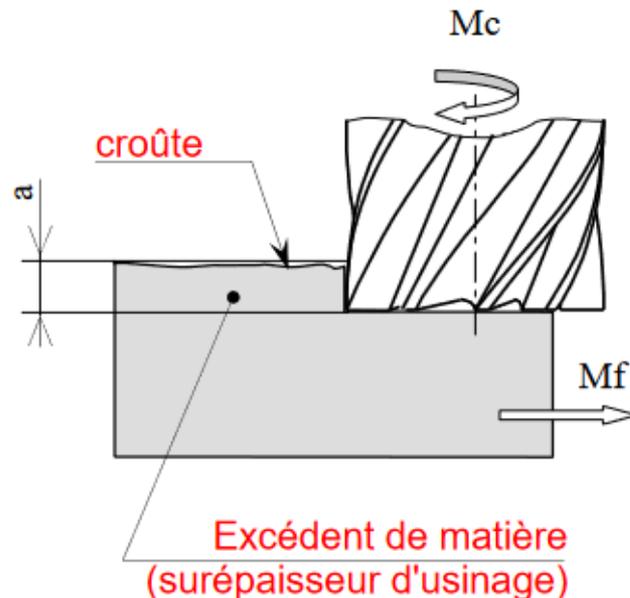
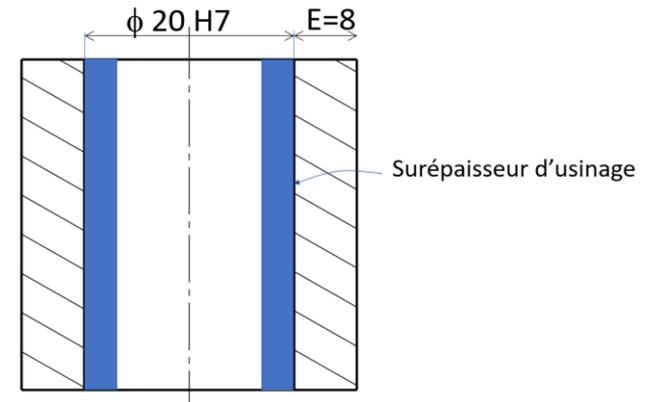


(Leary *et al.*, 2014)

Orquera@univ-tln.fr

Reconception du brut de fabrication

- Surépaisseur d'usinage
 - Plus la qualité est importante plus il y aura des opérations d'usinage



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

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

Reconception du brut de fabrication

- Perçages (surfaces en porte à faux)



Reconception du brut de fabrication

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

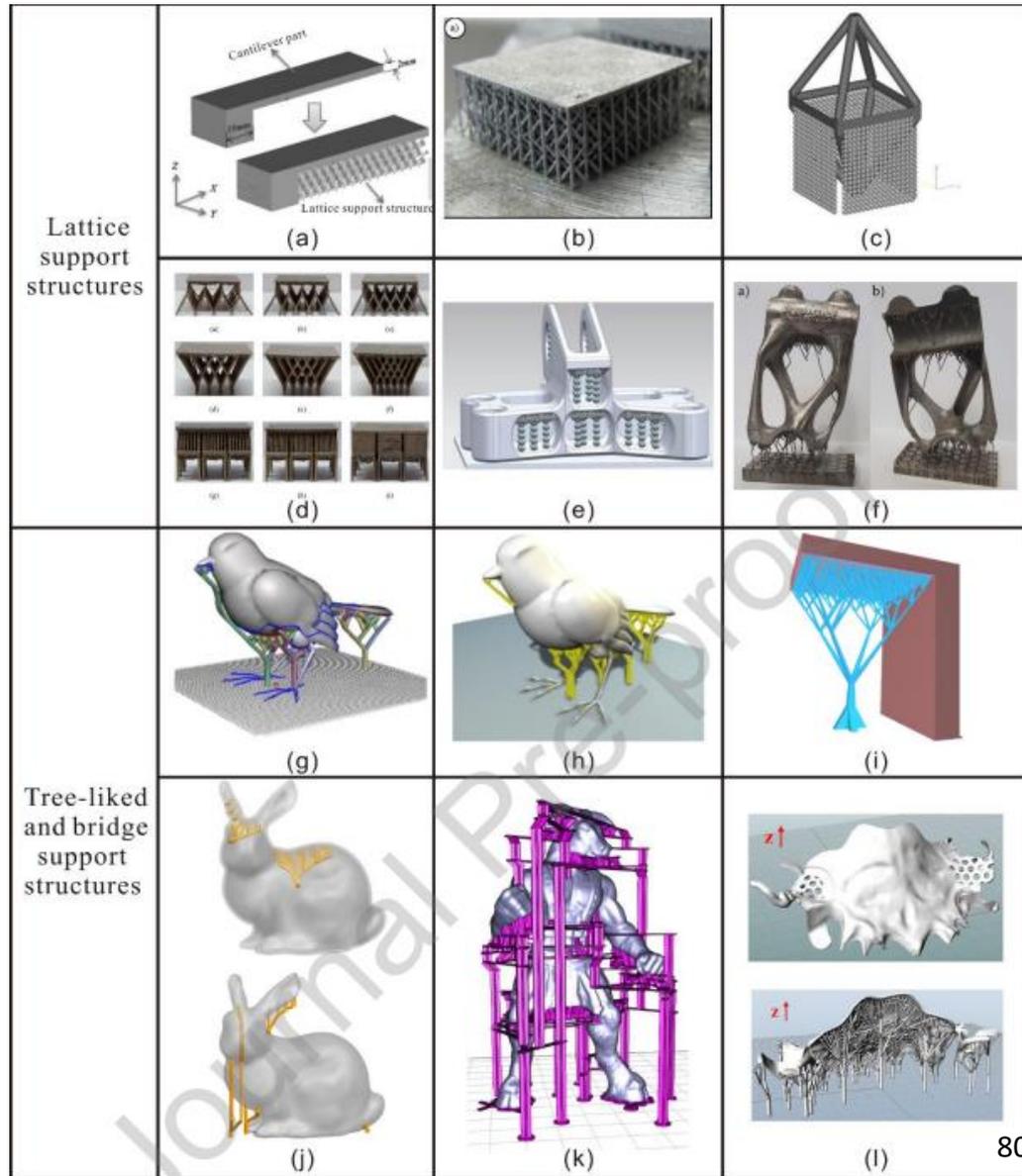
Reconception du brut de fabrication

- Supports
 - A intégrer au modèle CAO brut si
- S'ils n'ont pas pu être éliminé par la conception
- Qu'il est souhaité de les optimiser

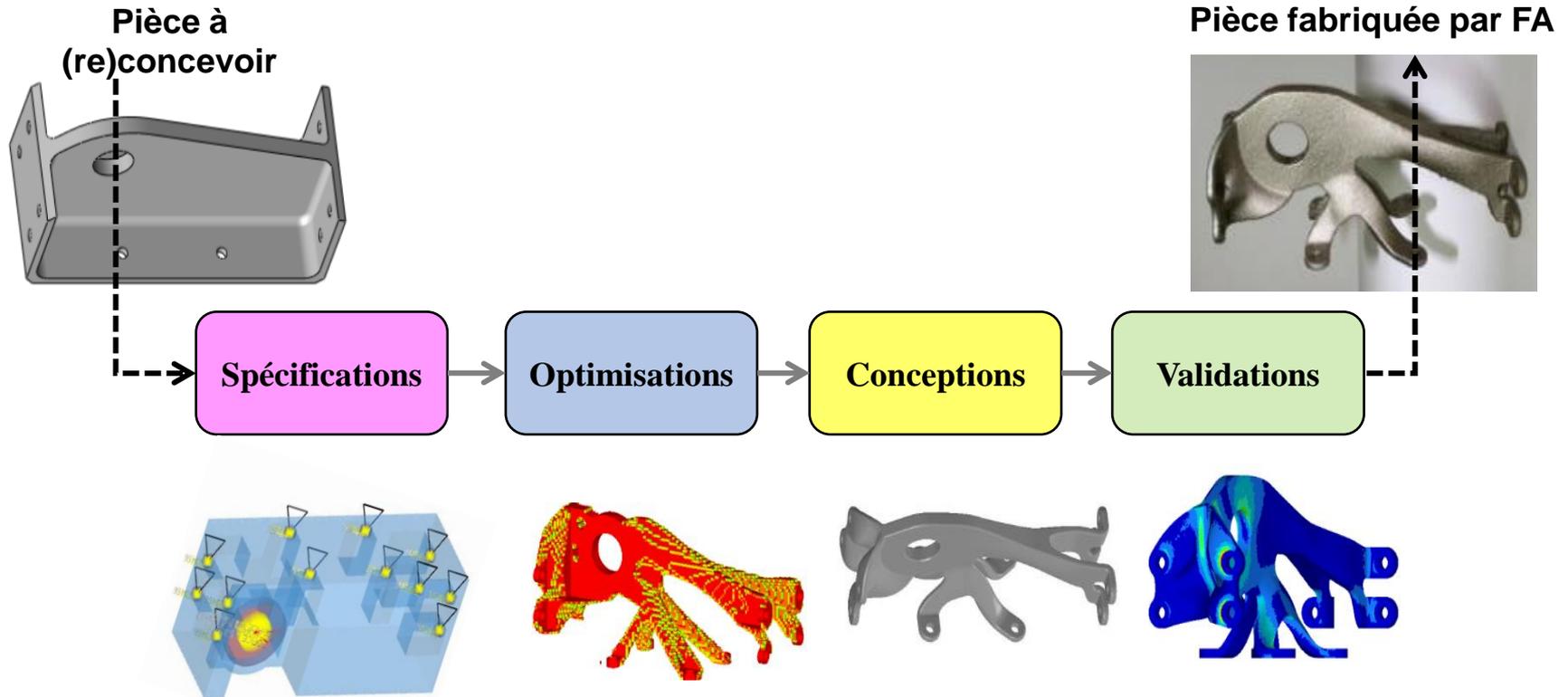


Reconception du brut de fabrication

- Supports



Les étapes de conception pour la FA



Adapté de (Seabra et al., 2016)

Orquera@univ-tln.fr

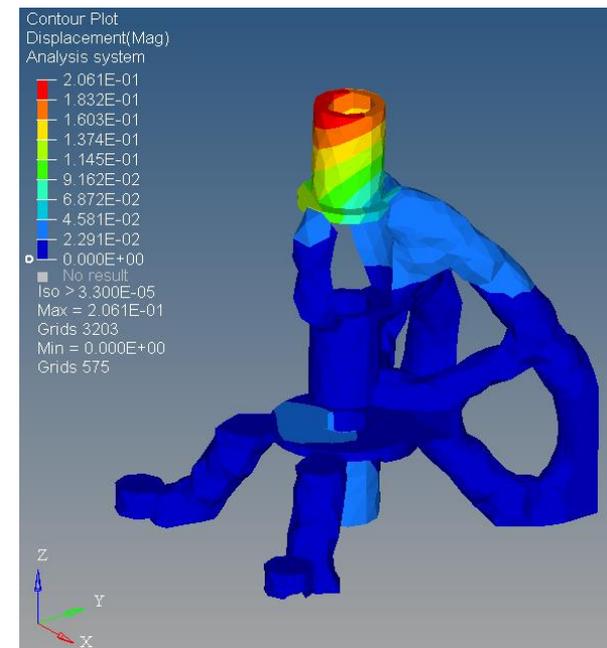
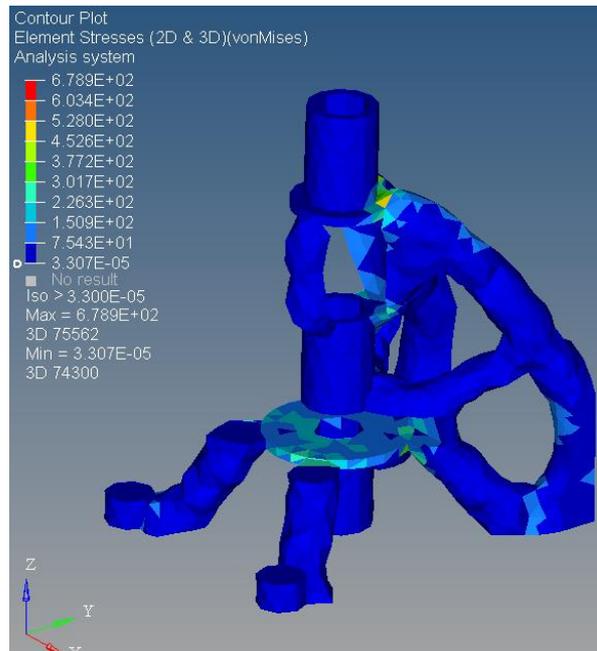
Les étapes de conception pour la FA

Validations

- Validation en phase de fonctionnement
- Validation en phase de fabrication

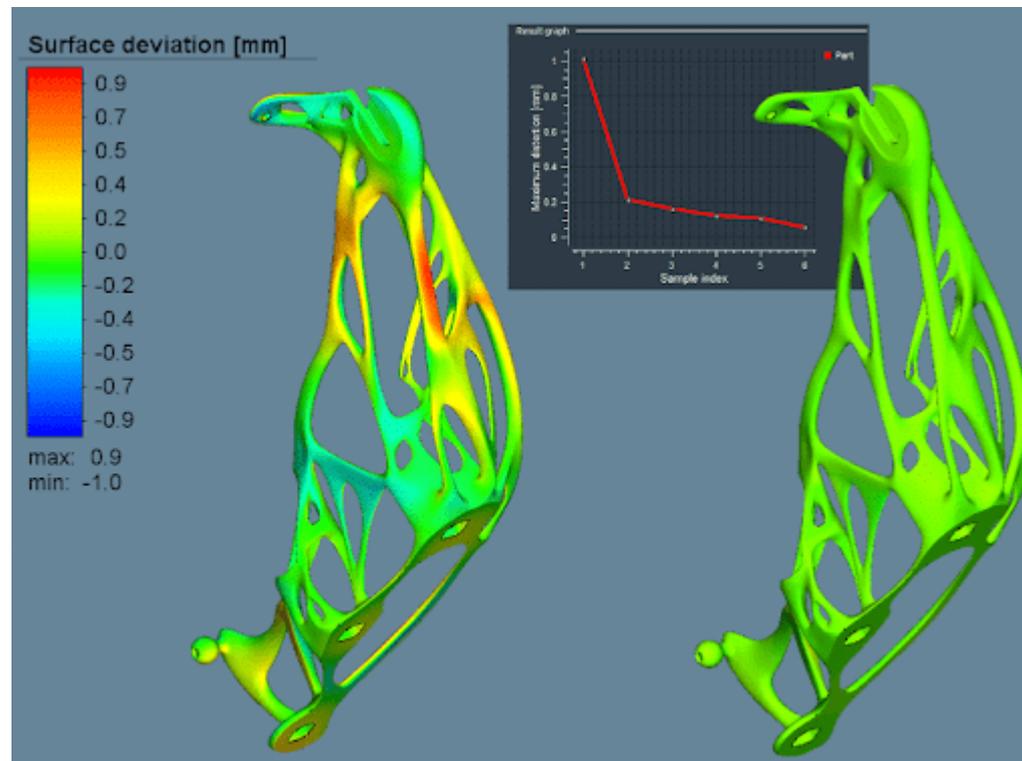
Validation de fonctionnement

- Vérification de la tenue mécanique
 - Résultat de l'optimisation, pour le cas de charge 1 : Utilisation



Validation de fabrication

- Vérification la fabrication par simulation numérique



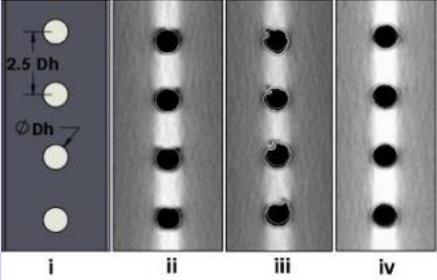
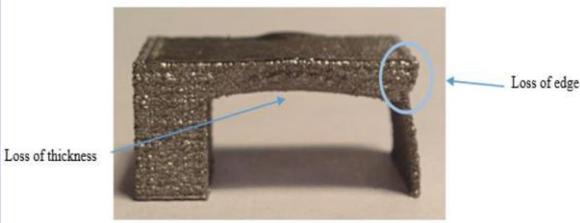
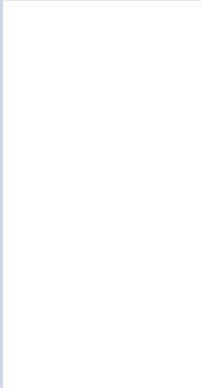
Les défauts possibles

Nom du défaut	Images et références	Procédés de FA concernés	Causes
Effondrement de matière	 <p>Bavures sur un ¼ de tube réalisé par EDM (Chalvin et al. 2019)</p>		<p>—</p> <p>—</p> <p>—</p> <p>—</p>

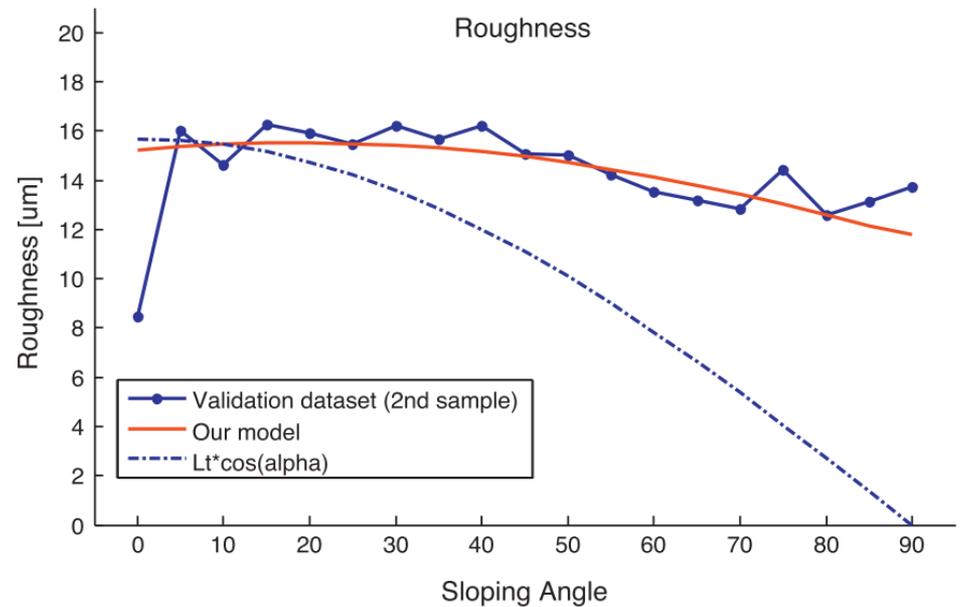
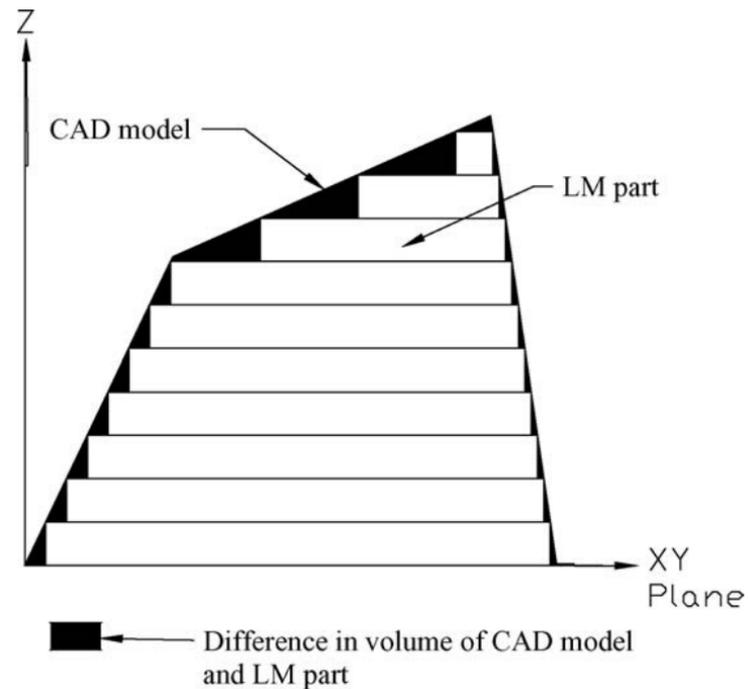
Les défauts possibles

Nom du défaut	Images et références	Procédés de FA concernés	Causes
<p>Manque de matière</p>	 <p>Paroi trop fine sur Polyjet (fabriquée par la plateforme MAQ-3D de l'université de Toulon)</p>	<p>F</p> <p>F</p>	<p>—</p>

Les défauts possibles

Nom du défaut	Images et références	Procédés de FA concernés	Causes
<p>Défaut de forme</p>	 <p>Défaut de cylindricité de perçages en fonction de l'orientation de fabrication LBM (Snyder <i>et al.</i>, 2016)</p>  <p>Défaut de planéité, d'épaisseur et de perte de l'angle vif (Vo <i>et al.</i>, 2018)</p>		

La rugosité



Les tolérances

Process	IT-Classes (DIN EN ISO 286-1)											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Casting							■	■	■	■	■	■
Sintering					■	■	■	■				
Drop forging								■	■	■	■	■
Precision forging						■	■	■				
Cold extrusion			■	■	■	■	■	■				
Milling				■	■	■	■					
Cutting								■	■	■		
Turning			■	■	■	■						
Drilling								■	■	■		
Face milling			■	■	■	■	■	■				
Planing				■	■	■	■	■				
Stripping			■	■	■	■						
Circular grinding	■	■	■	■	■							
Additive manufact.							■	■	■	■	■	■
FDM							xyz	xyz	xyz	z		
LS SLS									xyz	xyz	xyz	
LM L-PBF							xy	xy	xy	xy	z	z

En conclusion

- La conception d'un système pour la fabrication additive requiert une méthodologie rigoureuse
- Les gains pendant le fonctionnement peuvent être très élevés
- Il faut s'affranchir des limitations de conception apprises jusqu'à présent
- Le bureau d'études / bureau des méthodes / service calcul ne sont plus séparés pendant l'étude
- Les libertés et contraintes de tracé FA dépendent du procédé
- Il faut bien connaître le procédé utilisé
- Les logiciels de CAO ne sont pas encore au point
- Des astuces de conception apparaissent chaque jour (veille technologique)

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Avez-vous des questions?