

Fabrication Additive

GM-3-PROFA

Équipe Procédés de Fabrication

T. Chaise, T. Elguedj, F. Girardin, L. Martini, N. Noel,

N. Tardif

Généralités

Fabrication Additive

Produit

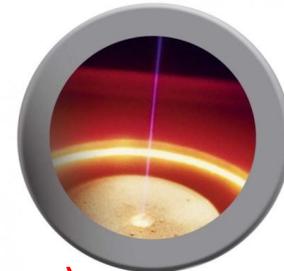


Matériau



Liquides;
Poudres;
Filaments.

Procédé



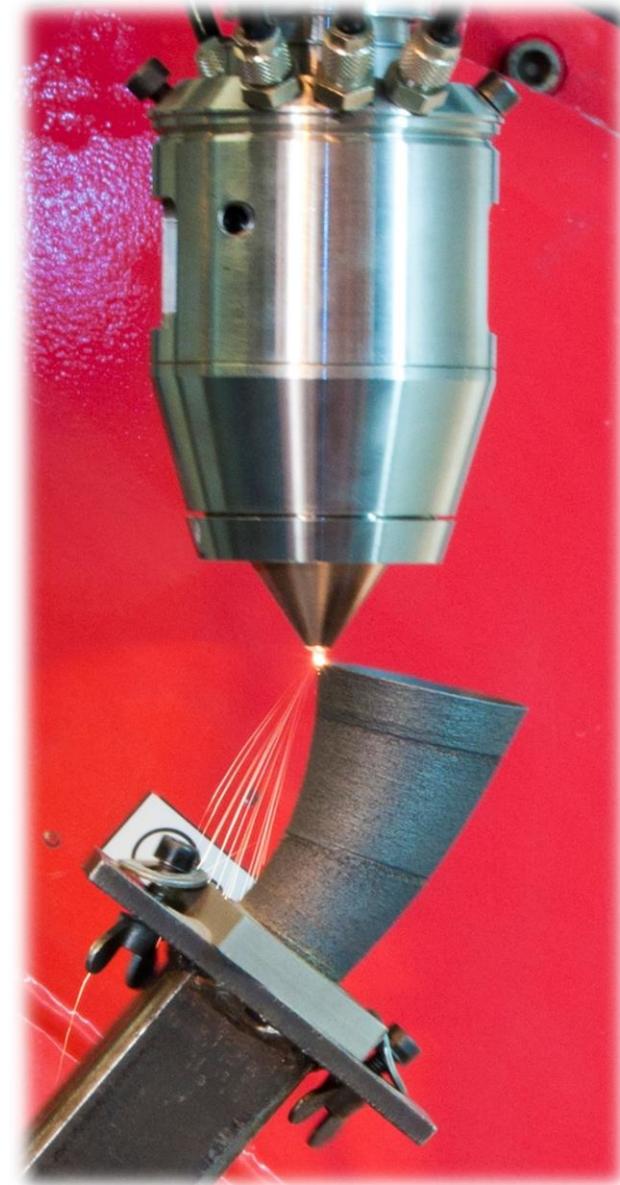
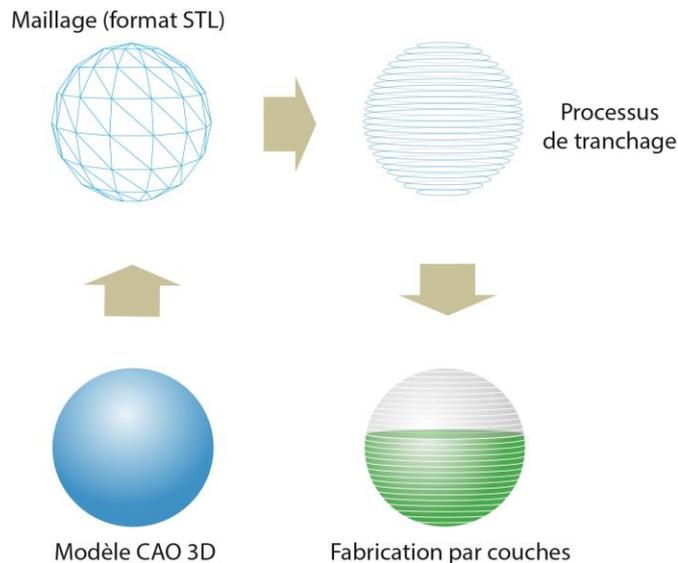
IR (laser, lampes);
UV (lampes);
Faisceau d'électrons;
Chauffage électrique.

Le principe

Moyens de fabrication par addition de matière et sans rupture de la chaîne numérique.

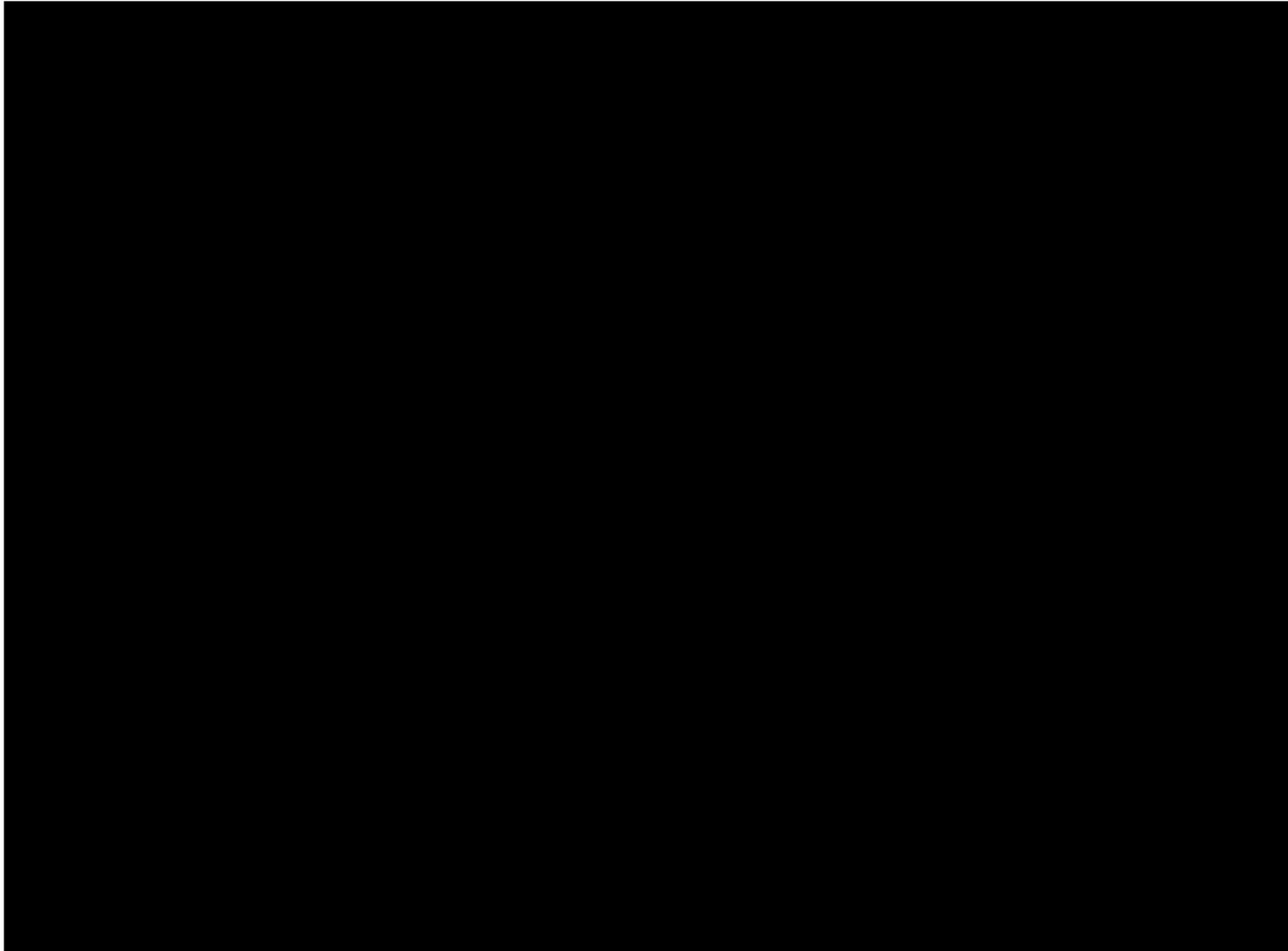
L'addition de matière passe en général par un changement d'état de celle-ci.

La matière est déposée couche par couche.



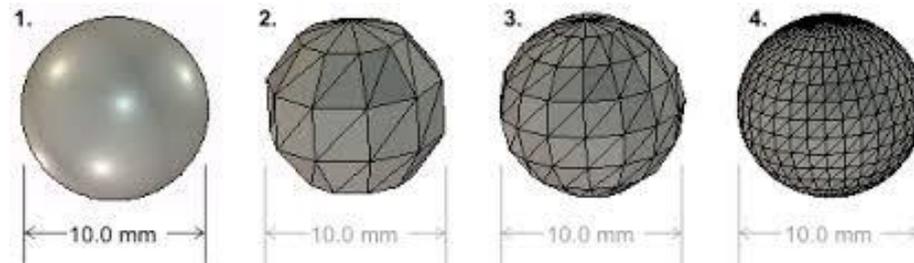
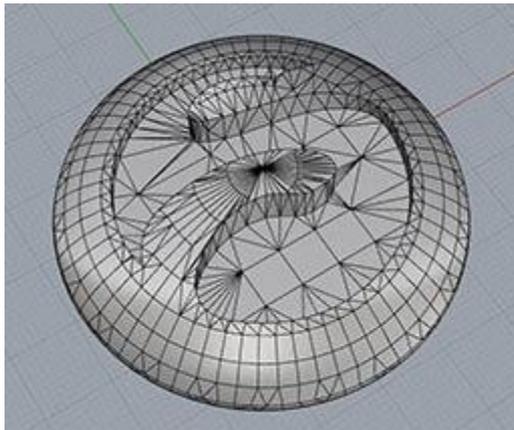
C'est aussi de la fabrication additive!

[PP3DP process.wmv](#)



Notion de format STL

- Stereolithography Tessellation language ou Standard Tessellation Tanguage
- Surface en triangles orientés;
- Simple, tous logiciels CAO;
- Approximation;
- Erreurs possibles : surface non fermée, intersection de triangle...
- Erreur de corde;
- Autres formats VRML Virtual reality Modeling Language ou AMF (triangle curviligne) et bien d'autres...



Fabrication Additive

Produit



Matériau



Liquides;
Poudres;
Filaments.

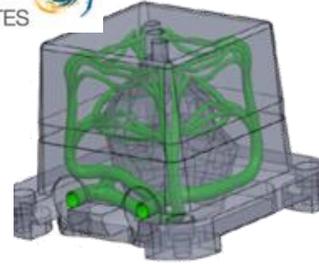
Procédé



IR (laser, lampes);
UV (lampes);
Faisceau d'électrons;
Chauffage électrique.

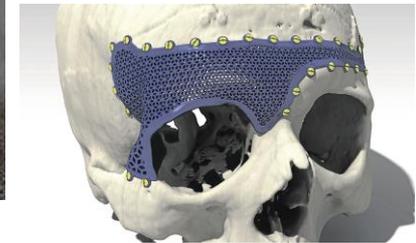
Produits - Marché

I
NNOVATION
P
LASTURGIE
C
OMPOSITES



Outillages

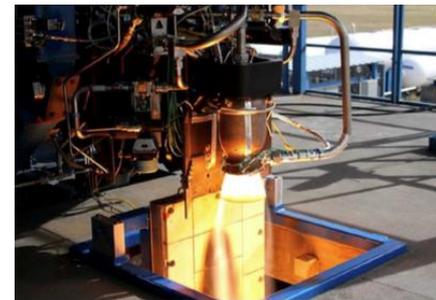
Impression 3D design



Médical



Luxe



aéronautique /
spatial



automobile



(Courtoisie Turboméca)

Données économiques

Marché en très forte croissance
+25% de CA /an depuis 2010



Chiffre d'Affaires

2001 538 M\$

2014 5700 M\$

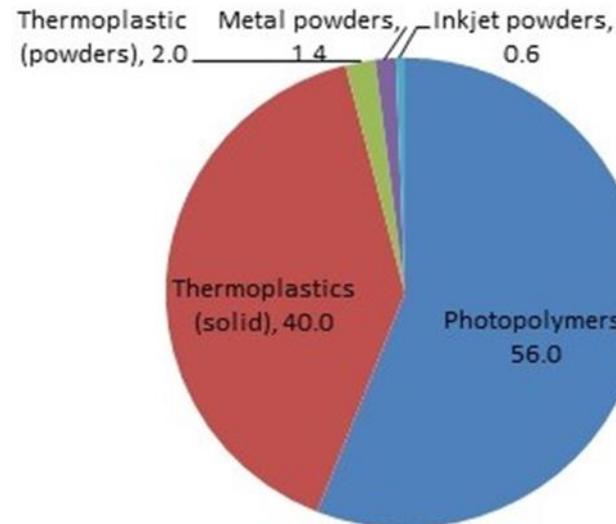
2018 12 700 M\$

Domaines d'activités:
Dentaire, l'horlogerie;
L'automobile;
Le particulier;
.....L'aéronautique.

Procédé de prototypage



Procédé de fabrication directe



Fabrication Additive

Produit

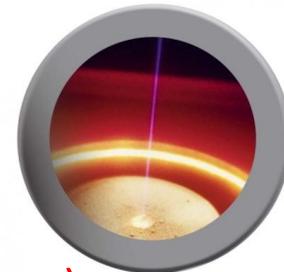


Matériau



Liquides;
Poudres;
Filaments.

Procédé



IR (laser, lampes);
UV (lampes);
Faisceau d'électrons;
Chauffage électrique.

Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

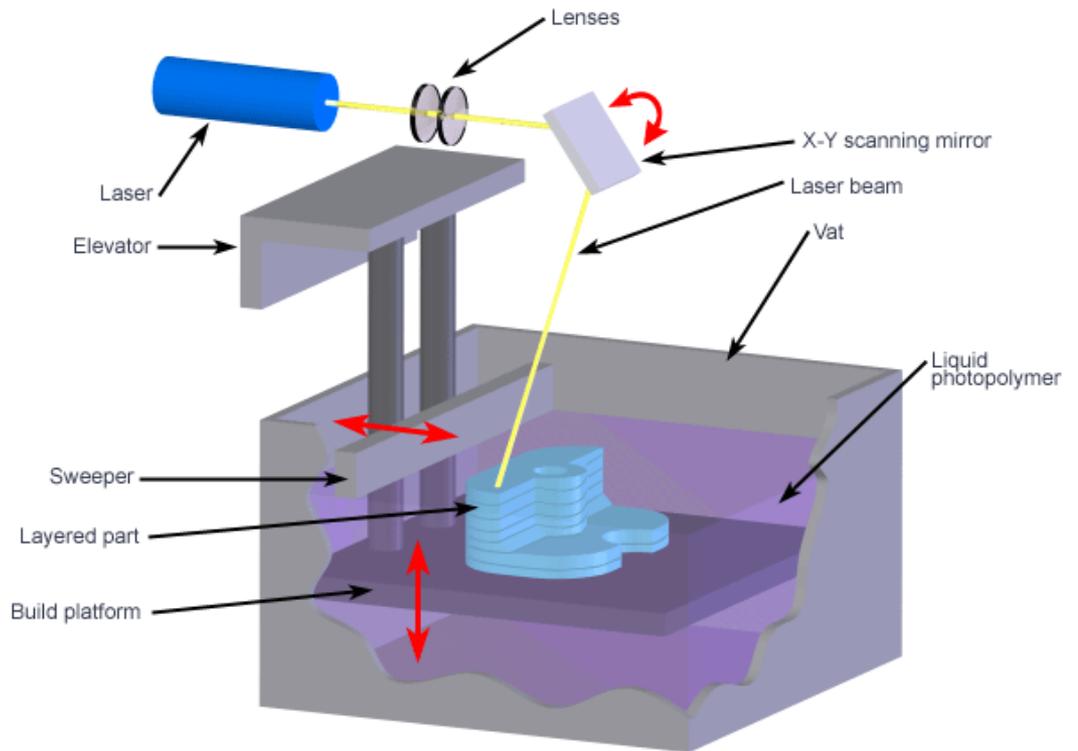
- Polymérisation résine par laser
- Projection de gouttes de matériau
- Projection liant sur un substrat
- Solidification de poudre sous source d'énergie moyenne à forte puissance
- Projection de poudre dans un flux d'énergie
- Extrusion de matière
- Assemblages de couches à partir de feuilles, plaques

Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Polymérisation résine par laser

SLA : Stéréolithographie



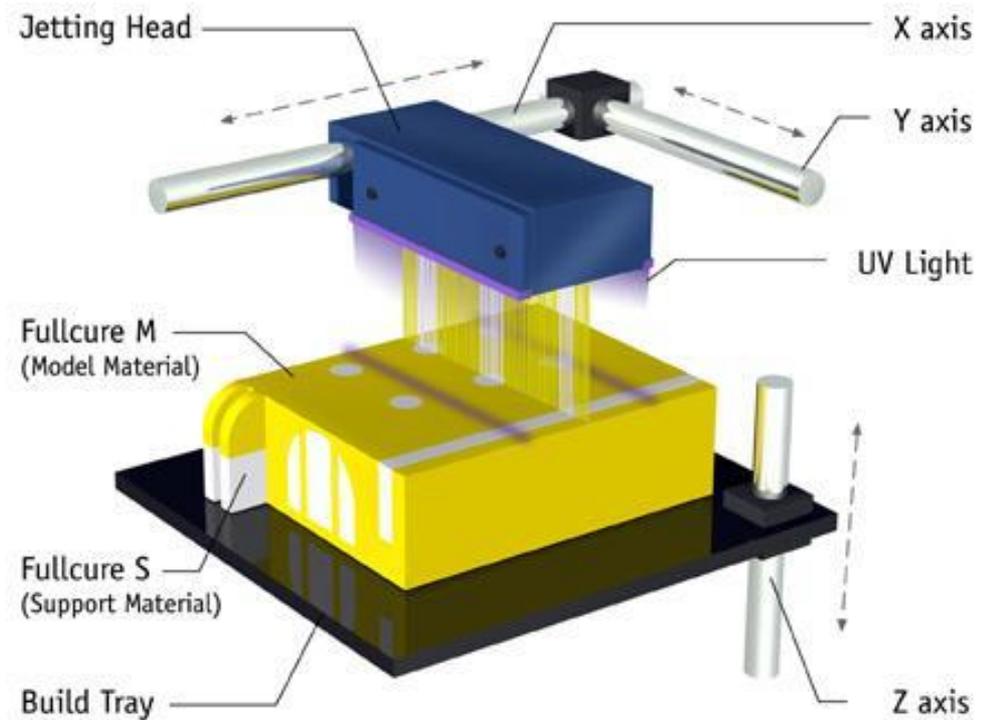
Copyright © 2008 CustomPartNet

Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Projection de gouttes de matériau

exemple : Projet 3510HD au
labo de fabrication additive de
l'INSA de Lyon



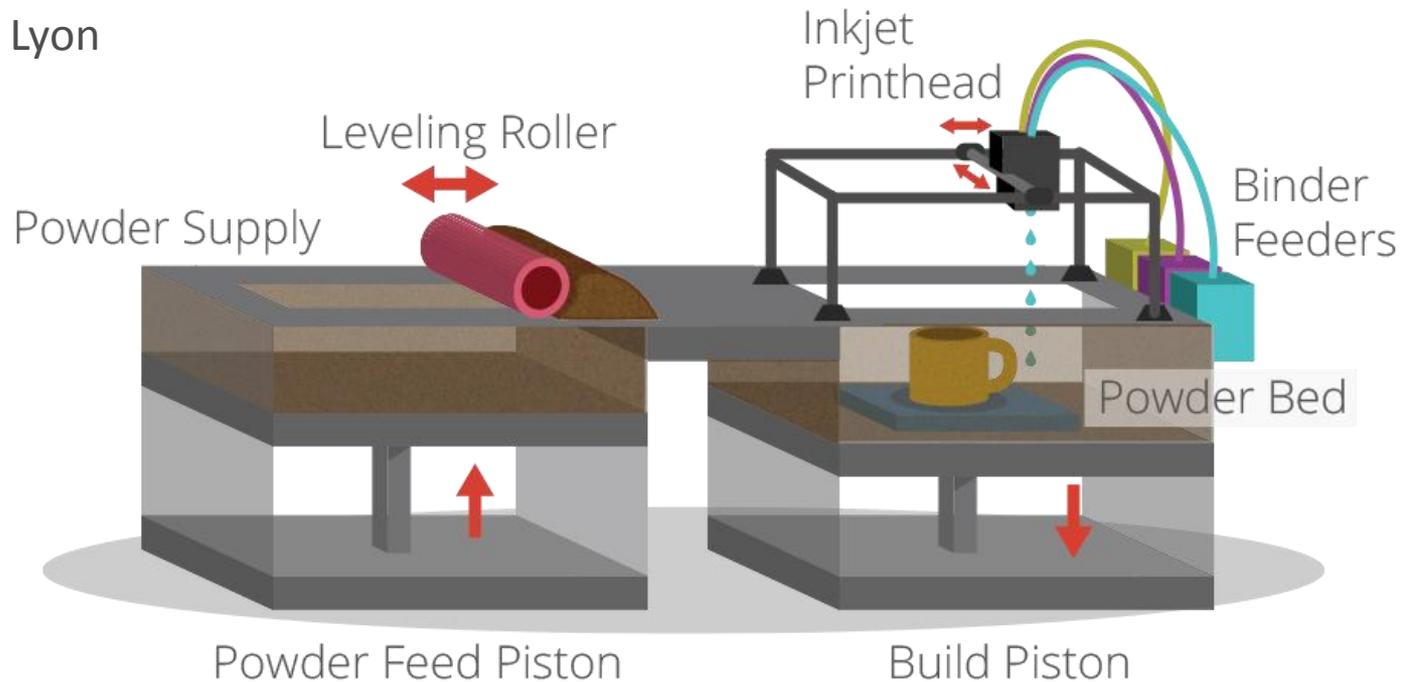
The Objet PolyJet Process

Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Projection liant sur un substrat

exemple : Zcorp... dans le laboratoire de fabrication additive de l'INSA de Lyon



Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Solidification de poudre sous source d'énergie moyenne à forte puissance

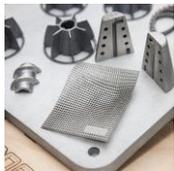
Laser faible puissance :

SLS : selective laser sintering



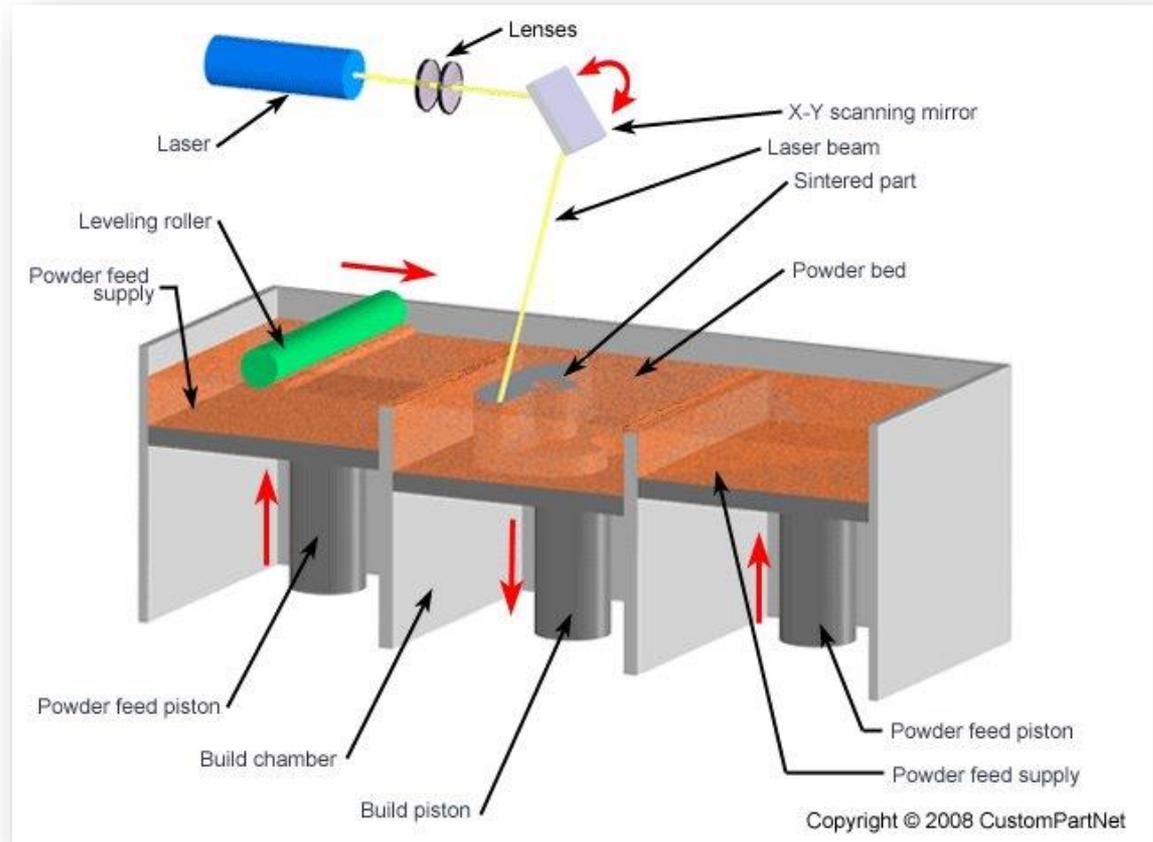
Laser haute puissance :

SLM : selective laser melting



Faisceau d'électron :

EBM : Electron beam melting

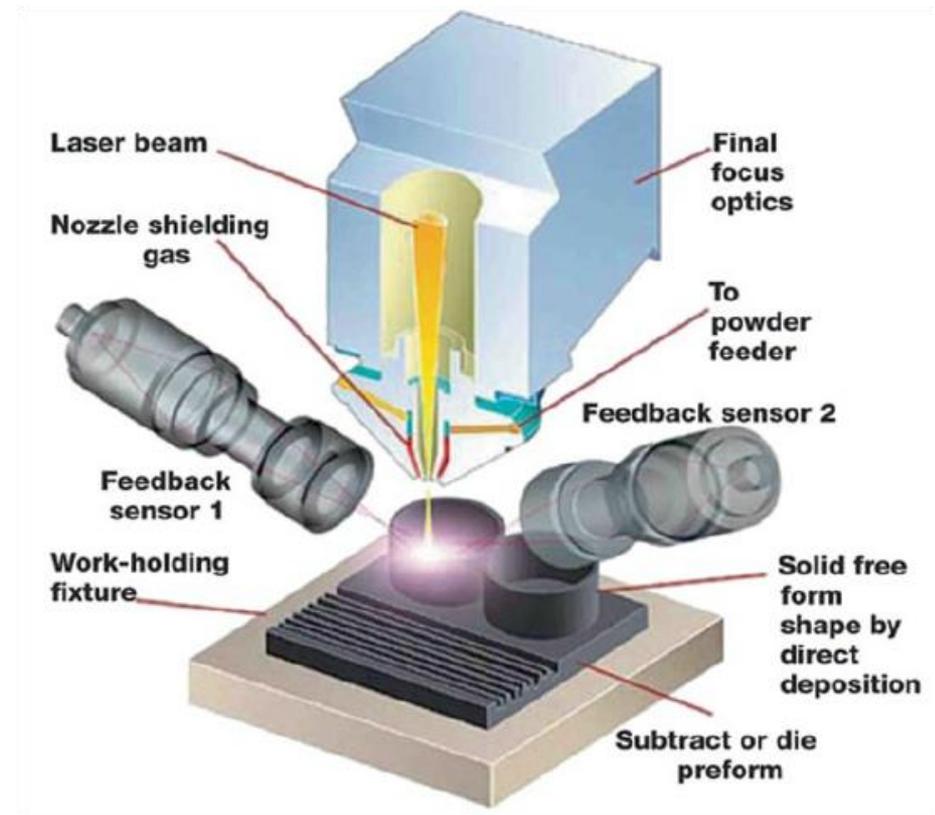


Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Projection de poudre dans un flux d'énergie

exemple : BeAM développé en France

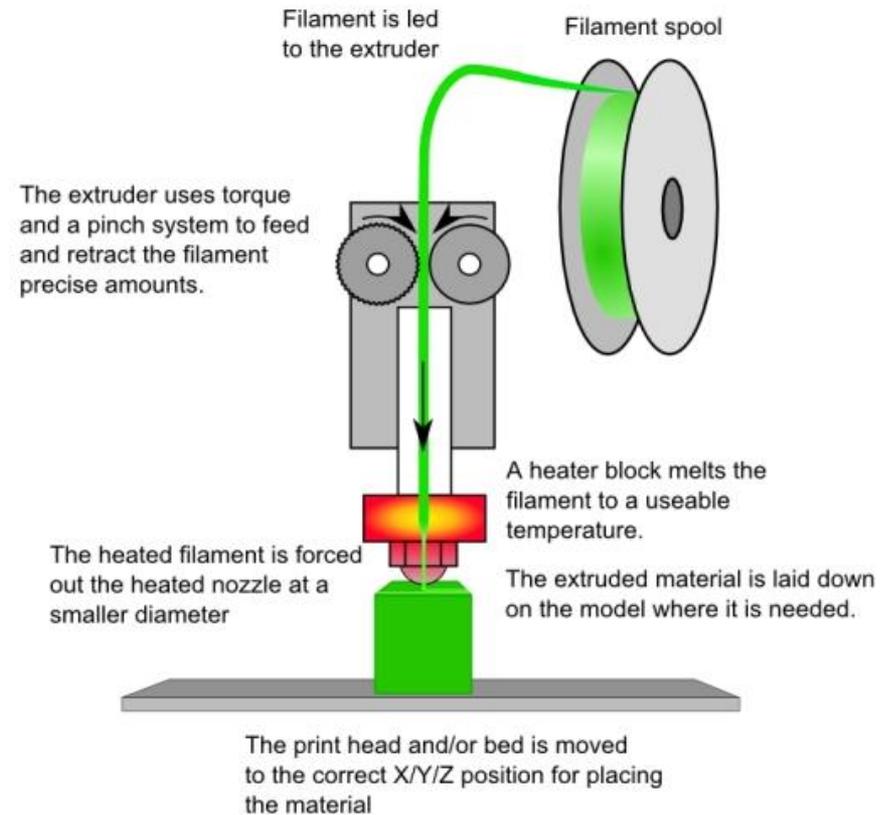


Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Extrusion de matière

exemple : Fusion de fil à travers
une buse chauffante, procédé
FDM
Fortus ...
TP de fabrication additive

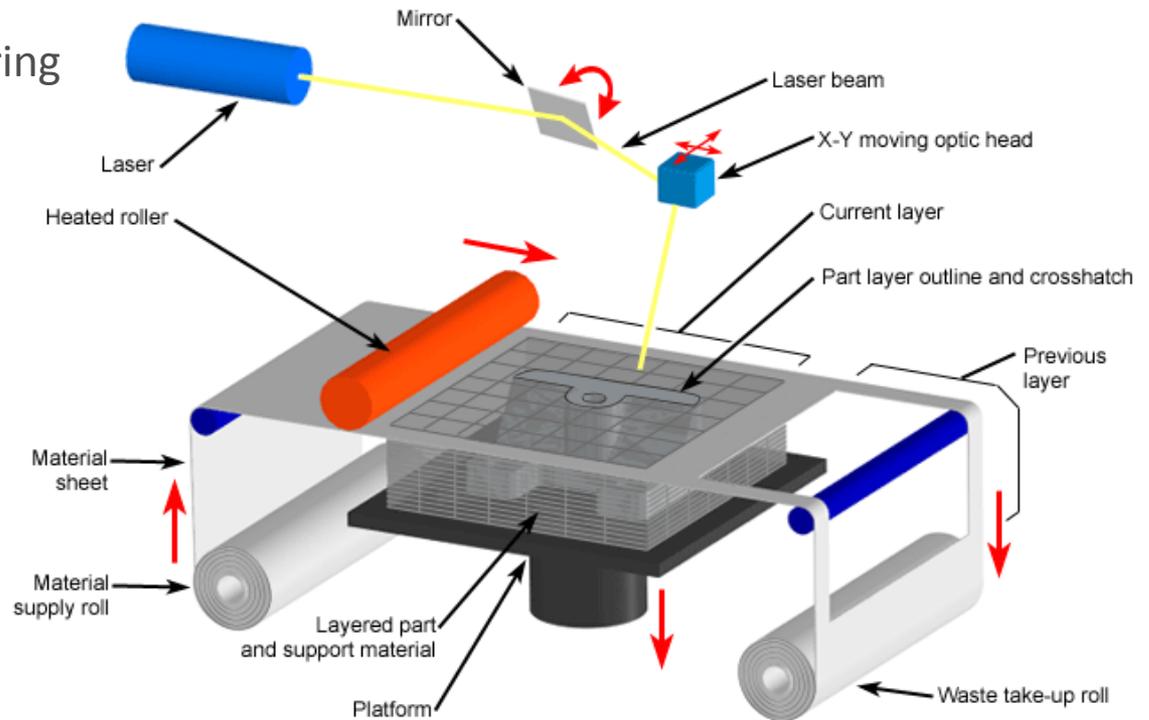
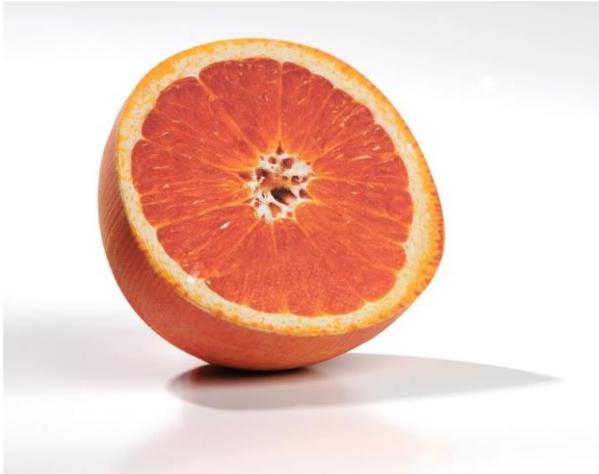


Fabrication Additive

Classification en 7 familles (norme ISO 17296-2) :

- Assemblages de couches à partir de feuilles, plaques

Procédé LOM :
Laminated Object manufacturing



Copyright © 2008 CustomPartNet

Fabrication Additive

Produit

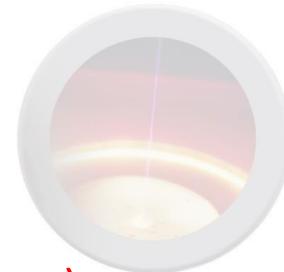


Matériau



Liquides;
Poudres;
Filaments.

Procédé



IR (laser, lampes);
UV (lampes);
Faisceau d'électrons;
Chauffage électrique.

Matériau	Exemple	Type de procédé suivant norme ISO 17296						
		SLA	Projection de goutte	Projection de liant	SLS, SLM, EBM	Projection de poudre dans un flux d'énergie	Extrusion de matière	Assemblage de couches laminées
Résines thermodurcissables	Epoxies Acrylates	X	X					
Résines thermoplastiques	Polyamide, ABS, PPSF		X	X	X		X	X
Bois	Papier							X
Métaux	Acier, Alliages de titane, cobalt, chrome nickel			X	X	X		X
Céramiques industrielles	Alumine, Zircone, Silicone	X		X	X			X
Céramique structurelle	Ciment, sable			X	X		X	

Fabrication Additive

Produit

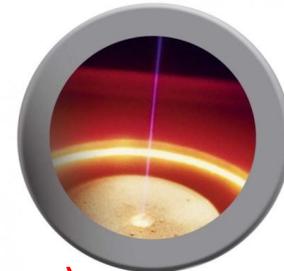


Matériau



Liquides;
Poudres;
Filaments.

Procédé

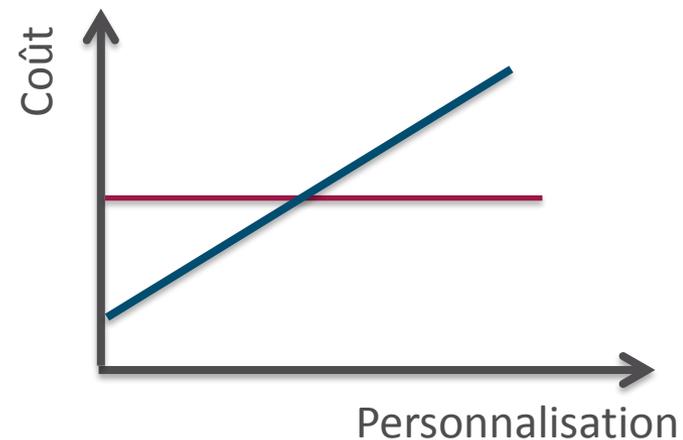
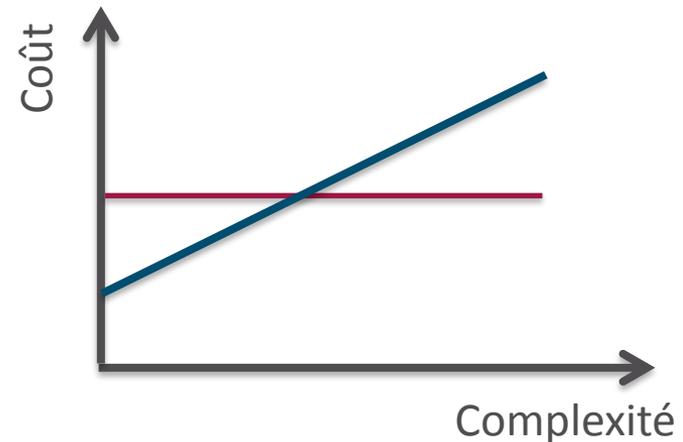
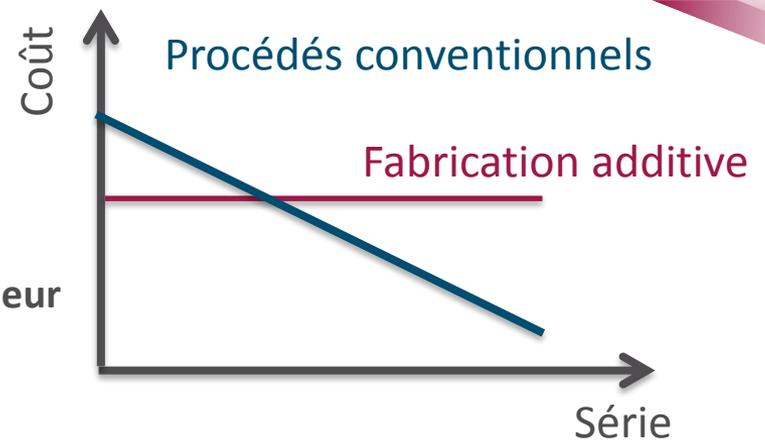


IR (laser, lampes);
UV (lampes);
Faisceau d'électrons;
Chauffage électrique.

Relation produit procédé

La fabrication additive est très attractive mais elle ne supplantera jamais les procédés conventionnels. Elle leur est complémentaire pour les produits/applications présentant les caractéristiques suivantes :

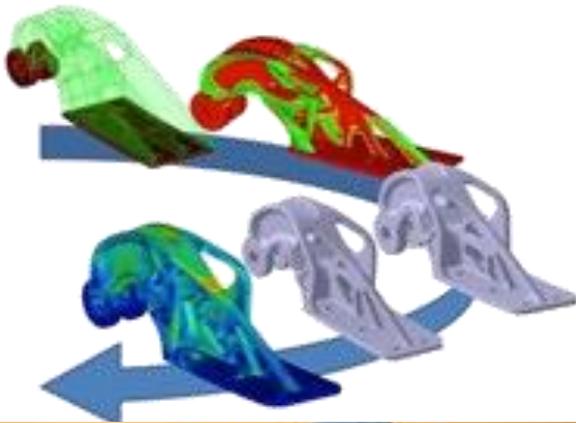
- **Complexité des formes réalisables**
 - Réduction des assemblages
 - Possibilité de réaliser des canaux internes complexes
 - Allègement des structures
- **Pas d'outillage spécifique / Evolution intégrée en temps réel**
 - Personnalisation
 - Service après-vente (0 stock)
- **Possibilité de fonctionnaliser les surfaces (texturation)**



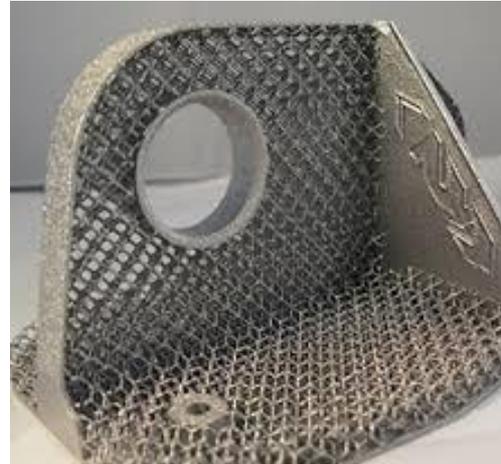
Relation produit-procédé : Repenser la conception

DFAM : Design for additive manufacturing

- La fabrication additive repousse les potentialités de conception des produits

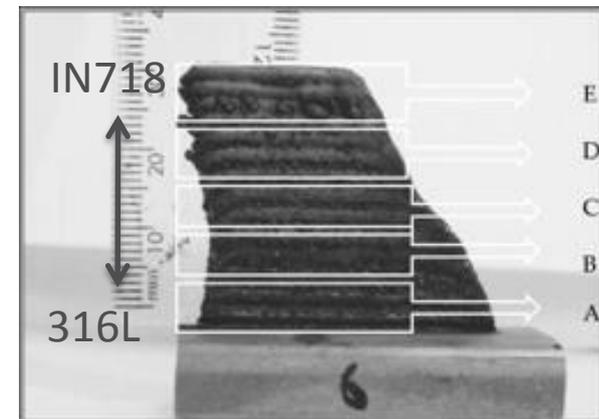


Structure bio inspirée

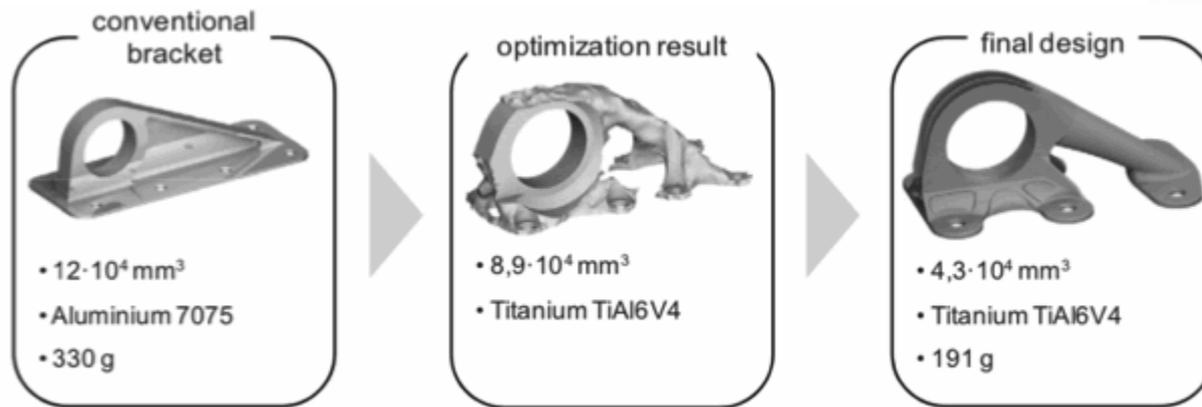


Structure architecturée

Structure FGM
Gradient de mélange
métallurgique



Relation produit-procédé - Outil d'optimisation topologique



Relation produit-procédé - Exemple de reconception réussie



Gains:
De poids sur l'ensemble 20%,
Facilité de montage,
Diminution du nombre de composants,
Economie de 15%.

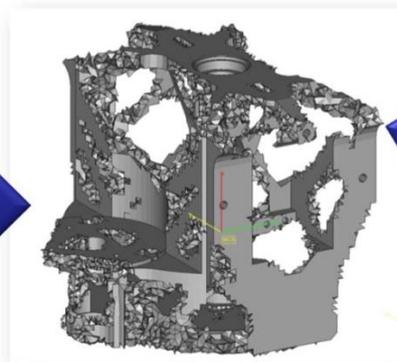
Relation produit-procédé - Exemple de reconception réussie

- Définitions des contraintes mécaniques par Flying Cam Application
- Re-conception spécifique du châssis (Logiciel Topol) par Sirris Topologie
- Fabrication du châssis en Aluminium MB Proto Matière/ Géométrie

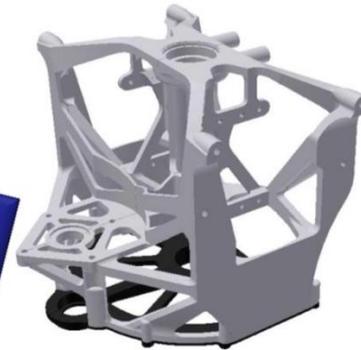
Re-conception pour RM technologie



7 composants
3 matériaux



Re-conception via le logiciel Topol. Fichier STL



2 composants
(facilite le montage)
1 matériau

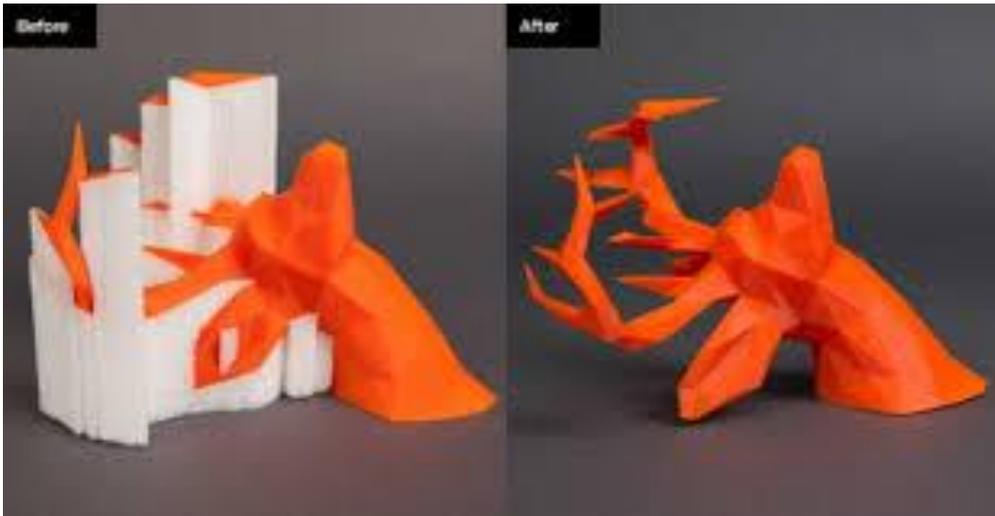
Fabrication SLM
Aluminium

Allègement
530g \Rightarrow 438g
Résistance.

Relation produit procédé : Contraintes de conception

- **Si les potentiels de conception sont énormes, il reste quelques contraintes de conception à prendre en compte. Ces contraintes dépendent du procédé mis en jeu :**
 - Précision et état de surface souvent médiocres
 - Nécessité de parachèvement à optimiser et potentiellement à réaliser manuellement
 - Présence de supports pour certaines technologies

Relation produit procédé : Notion de support



- **Rôle :**

- Ils supportent les surfaces en contre-dépouille ou en porte à faux
- Ils préviennent d'une déformation de la pièce lors du process.
- Ils dissipent la chaleur.
- Ils constituent un support provisoire à une pièce en construction, qui serait rigide finie mais fragile pendant le process.

- **A prendre en compte :**

- dépend de l'orientation de la pièce dans la zone de fabrication
- Enlèvement mécanique et/ou chimique
- **Ne concerne pas tous les procédés**

Fabrication Additive

Produit

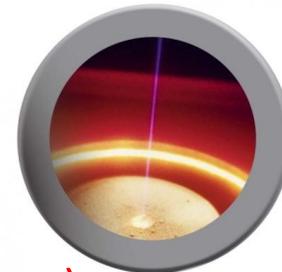


Matériau



Liquides;
Poudres;
Filaments.

Procédé



IR (laser, lampes);
UV (lampes);
Faisceau d'électrons;
Chauffage électrique.

Relation matériau procédé

- **L'ajout de matière passe en général par un changement de phase qui a lieu localement au point d'impression et donc de façon inhomogène sur la pièce. Ainsi bien que fortement procédé dépendantes, les caractéristiques des pièces issues de fabrication additive sont les suivantes :**

Forte Anisotropie liée à la stratégie de fabrication

Perte de ductilité par rapport au métal de base

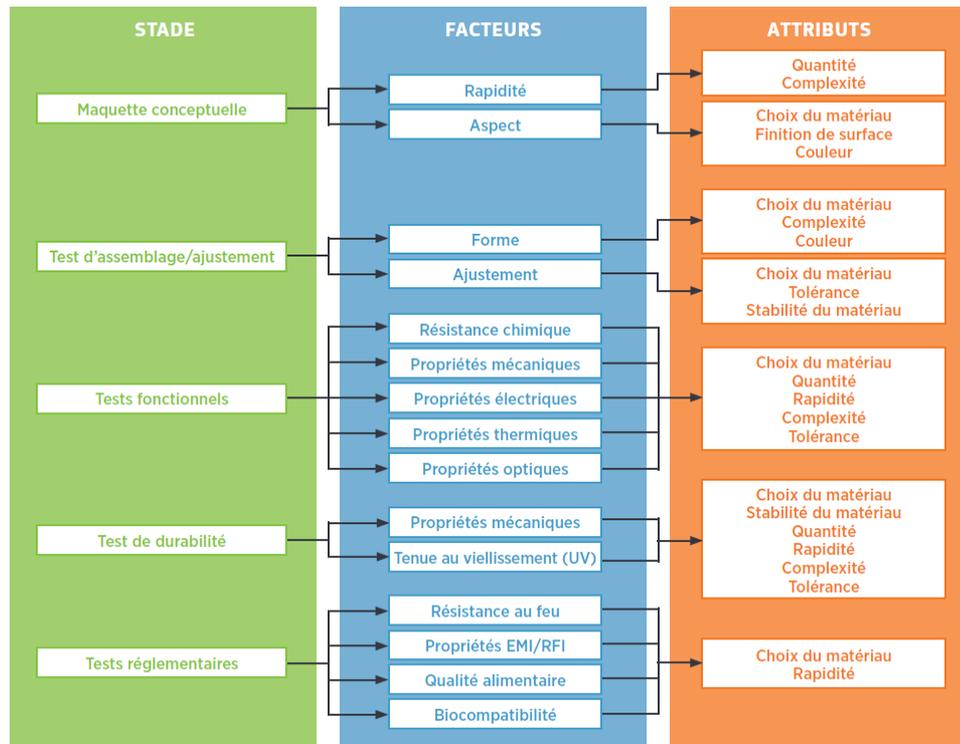
Présence de contraintes internes (déformation / Risque en fatigue)

Présence de défauts de type porosité/délamination

Fabrication Additive : Bilan

Nombreuses technologies avec des capacités très différentes

1 pièce à produire  1 procédé optimal



Fabrication Additive : Bilan

- **Bilan :**



Révolution en terme de forme réalisable

Agilité du procédé

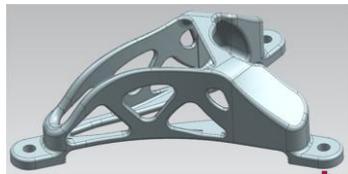
Production lente



Qualité dimensionnelle et état de surface

Procédés jeunes : manque de certification de toute la chaîne de valeur des procédés pour application à des pièces de structure.

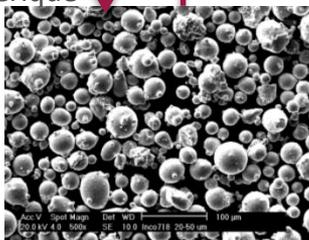
Exemple de chaîne de valeur associée au SLM :



Conception
Chaînage numérique



Procédés



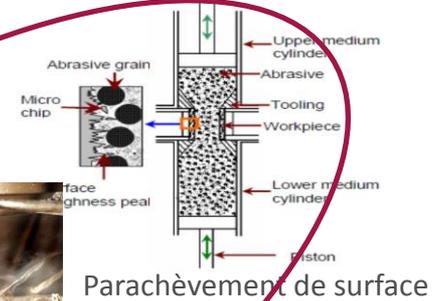
élaboration et recyclage



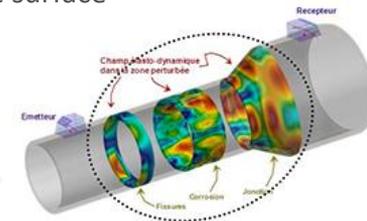
Traitement thermique



Usinage



Parachèvement de surface

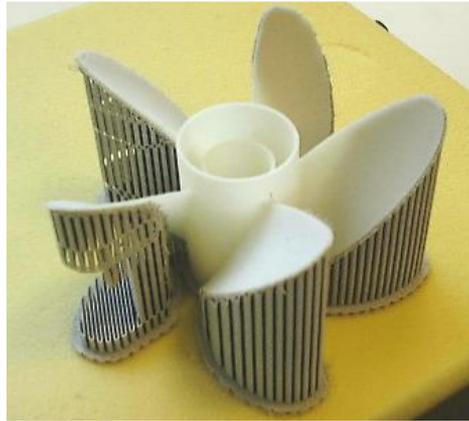


Contrôle

Procédé FDM

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

Produit



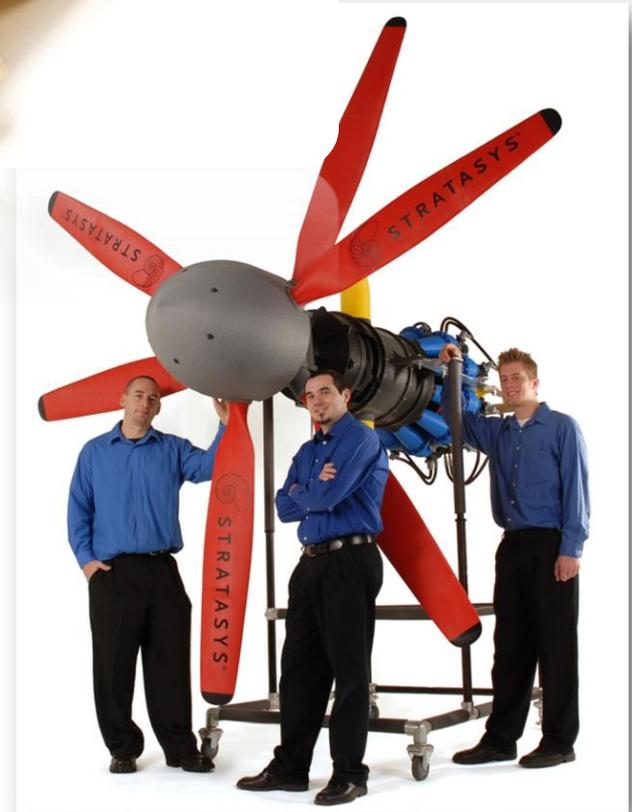
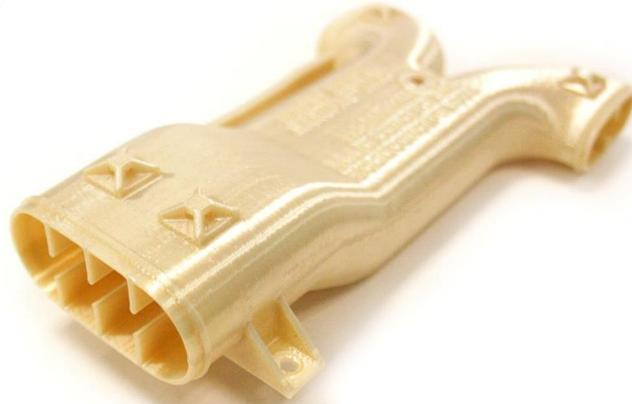
Matériau



Procédé



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM



Source : StratasyS

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM



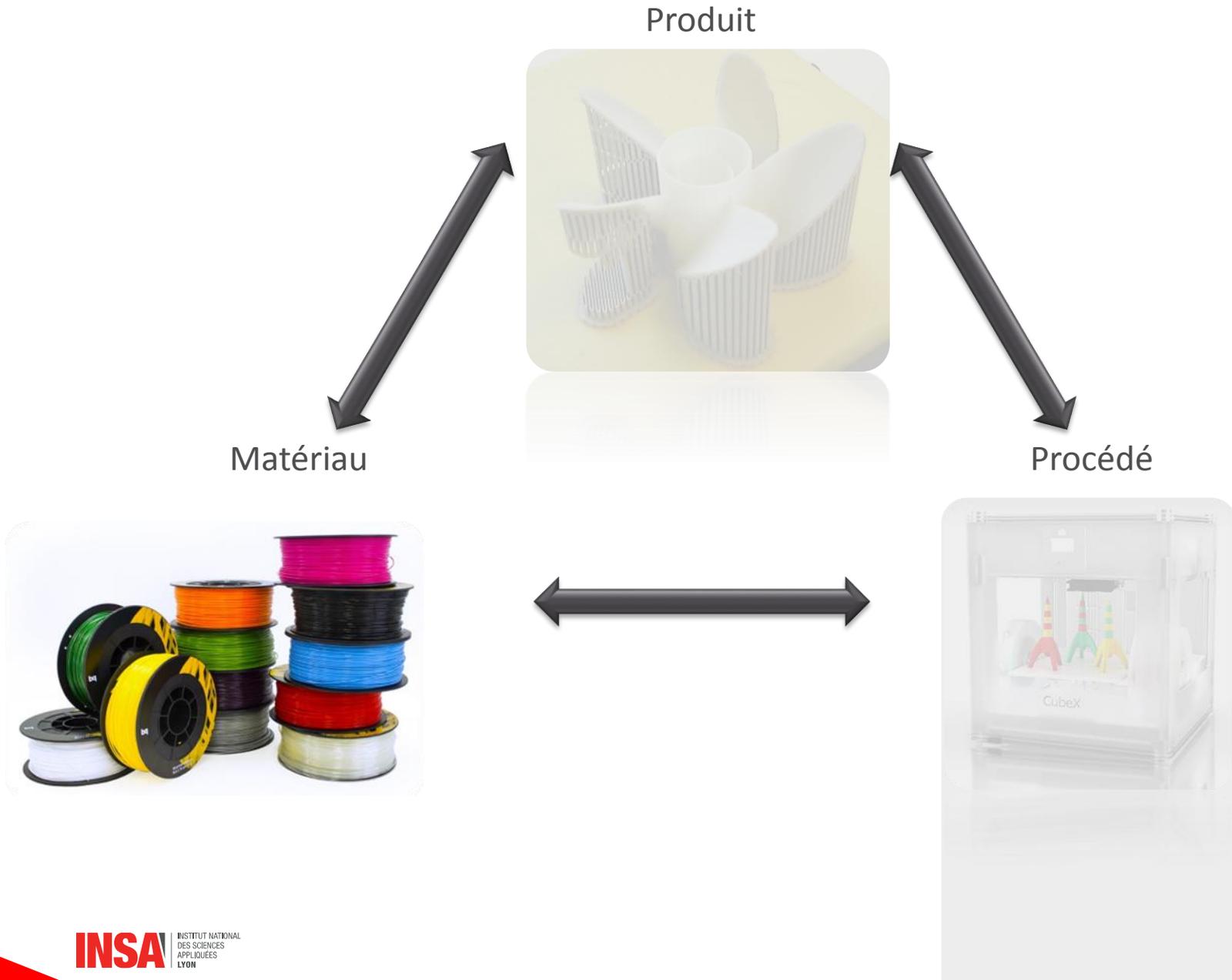
Source : mojoptix

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM



Source : mojoptix

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

Les plus courants :

- **ABS** *acrylonitrile butadiène styrène*, thermoplastique, chimie du carbone
- **PLA** *acide polyactique*, thermoplastique bio sourcé (amidon mais)
- Les possibles : PC, PS, nylon, PPSF, ULTEM
- Et d'autres...

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

Données fournies par STRATASYS

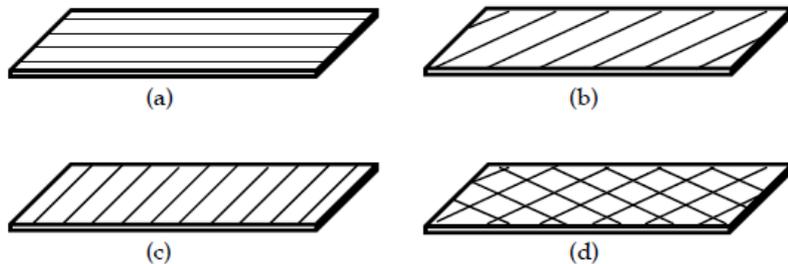
ABS *acrylonitrile butadiène styrène*
FDM E 2300 Mpa, σ 35 Mpa, A% 3

ULTEM *polyéthirémide*
FDM E 2200 Mpa, σ 70 Mpa, A% 6

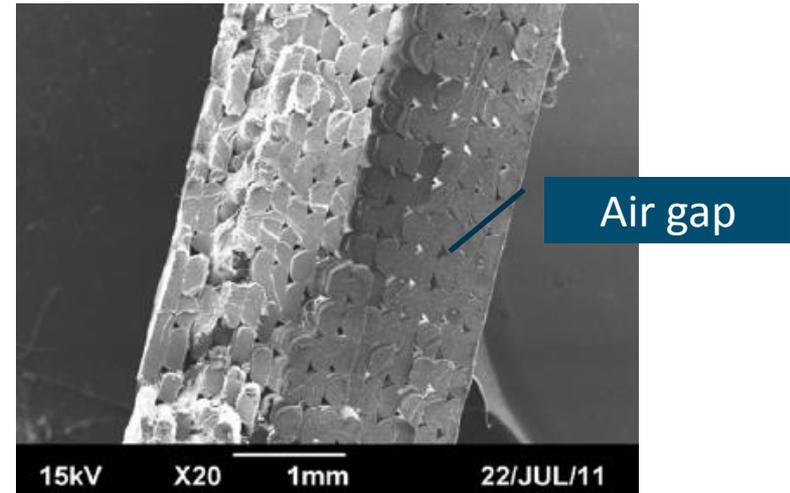
Attention!

Dépend du type de remplissage, de l'orientation de dépose

Essai d'orientation sur ABS

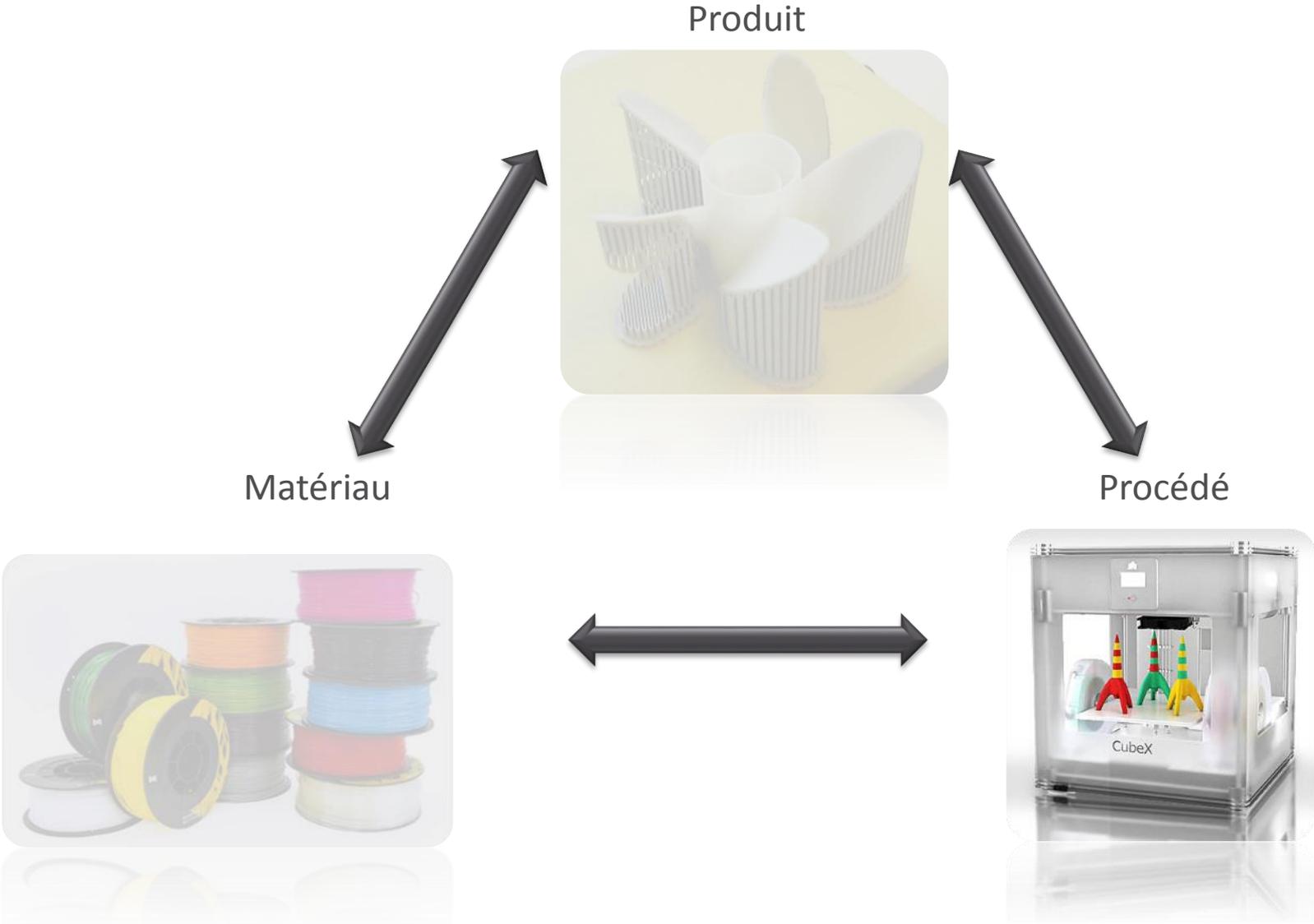


Source : C. Ziemian



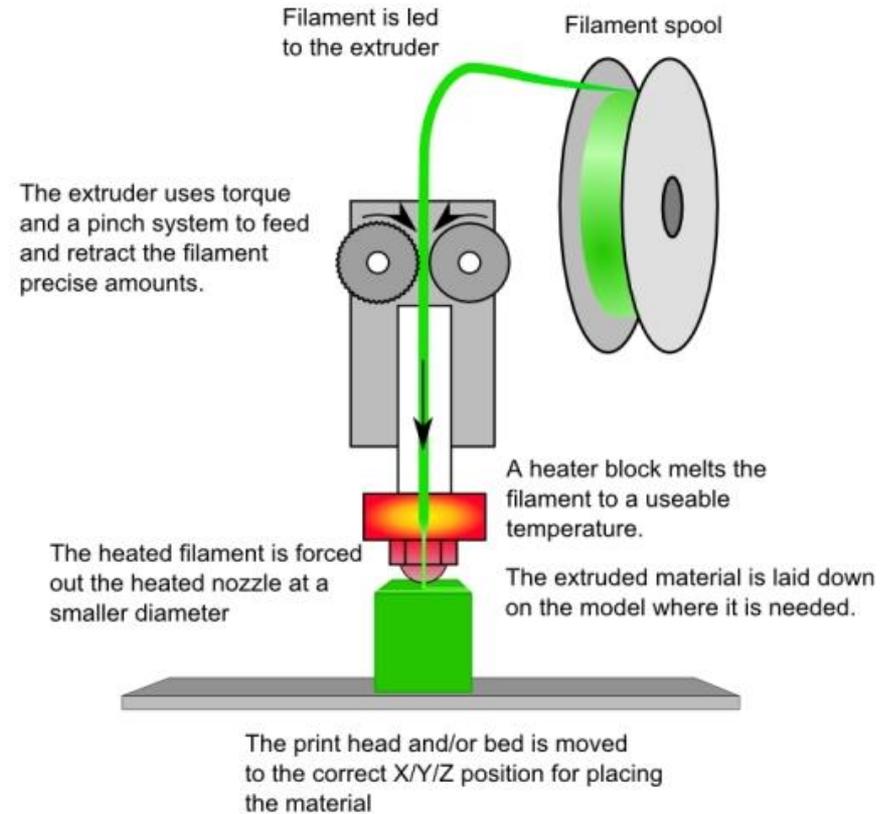
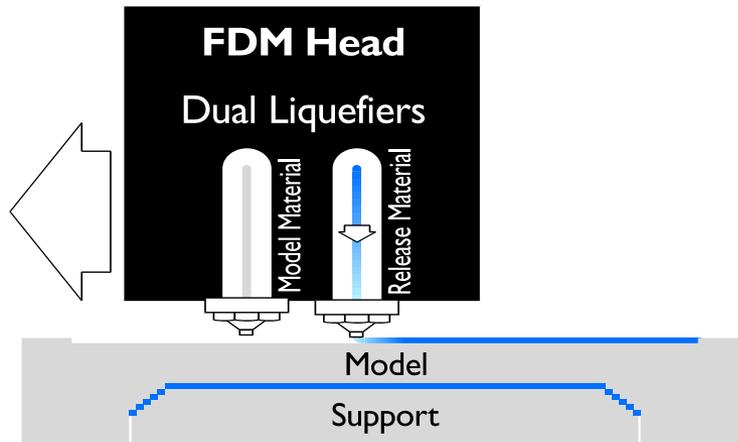
<i>Raster Orientation</i>	<i>Mean Ultimate Strength (MPa), Std Dev</i>
Longitudinal (0°)	25.72, 0.91
Diagonal (45°)	16.22, 0.27
Transverse (90°)	14.56, 0.05
Default (+45°/-45°)	19.36, 0.39

Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

FDM pour Fusion Deposite Modeling



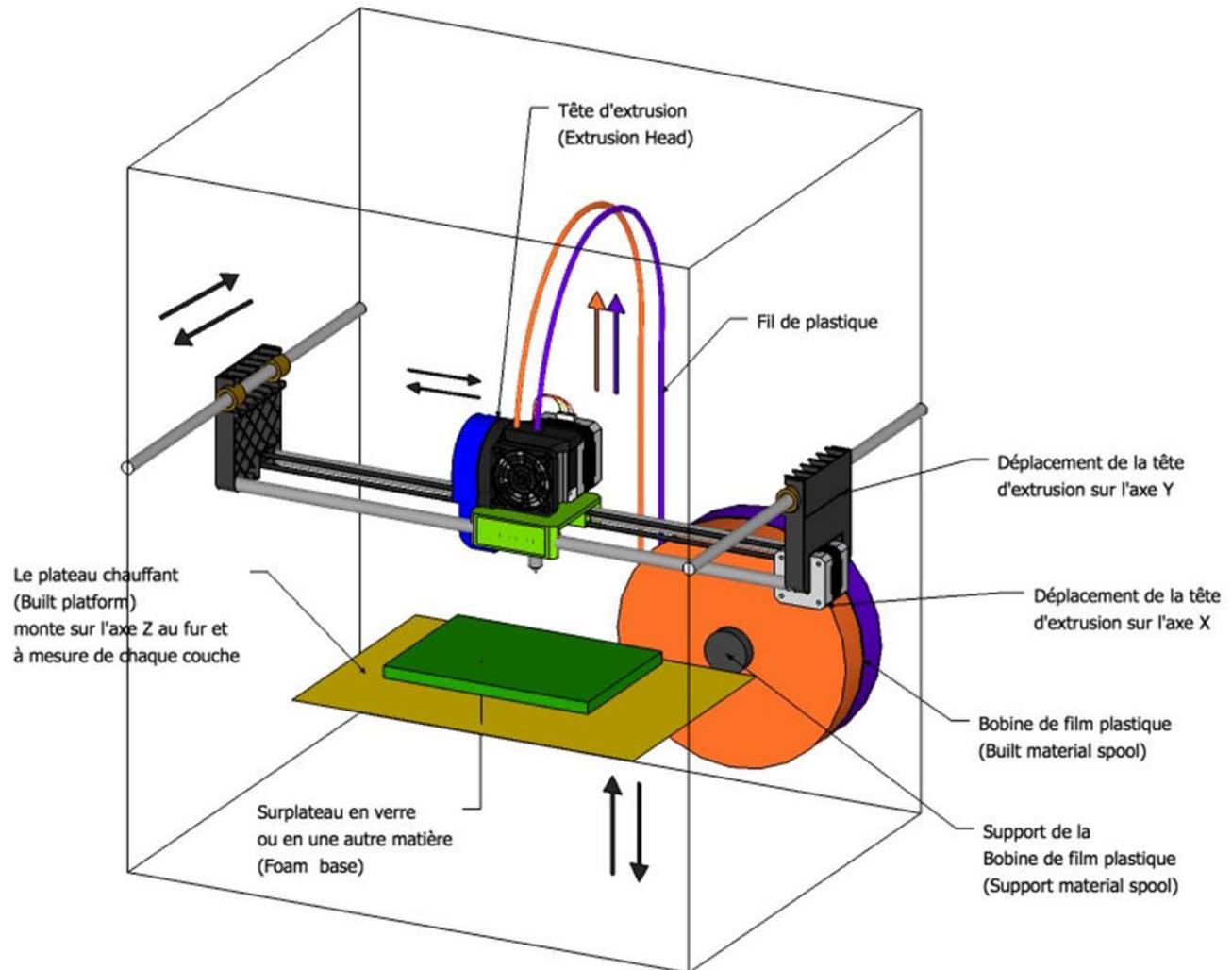
Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

[FDM process.mp4](#)

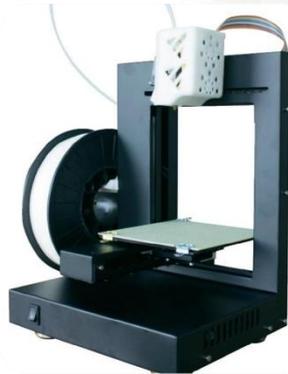
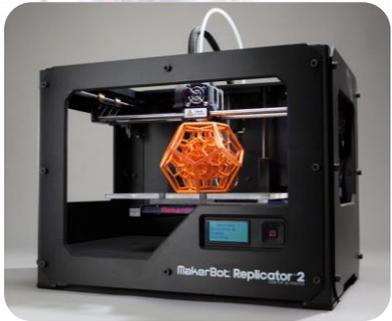
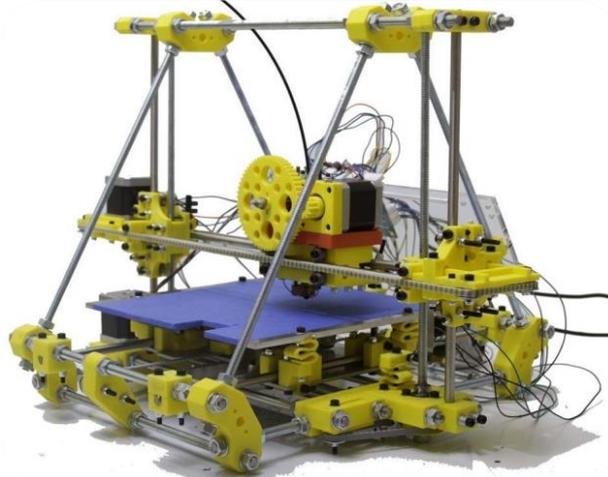


Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

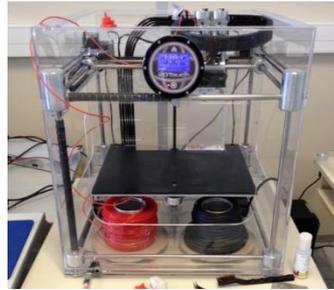
Technologie machine



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM



	3Dtouch	UP mini	Fortus
	Mixte matériaux possibles	Réservée enseignement	
Précision	--	--	+
résistance	-	-	+
coût	+	+	-
Epaisseur des couches (µm)	250	150	178, 254,333
Cote X Y Z max (mm)		120*120*120	254x254x333
Précision pour 100mm	0,2 mm	0.2mm	0, 1mm en x , y en x , y et l'ep d'une couche en z
Matériau de base	PLA ou ABS	ABS	ABS
E (Mpa)	Non fournis par les fabricants		2320
σr (Mpa)			37
A%			3
support	Enlèvement mécanique	Enlèvement mécanique	Soluble dans la soude

- Procédés nécessitant du support
- Enlèvement mécanique courant mais limité
- Enlèvement par eau, soude...performant (matériau support spécifique)



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

Paramètres procédé

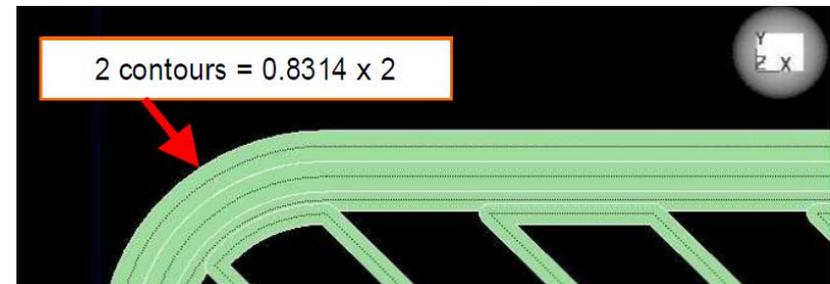
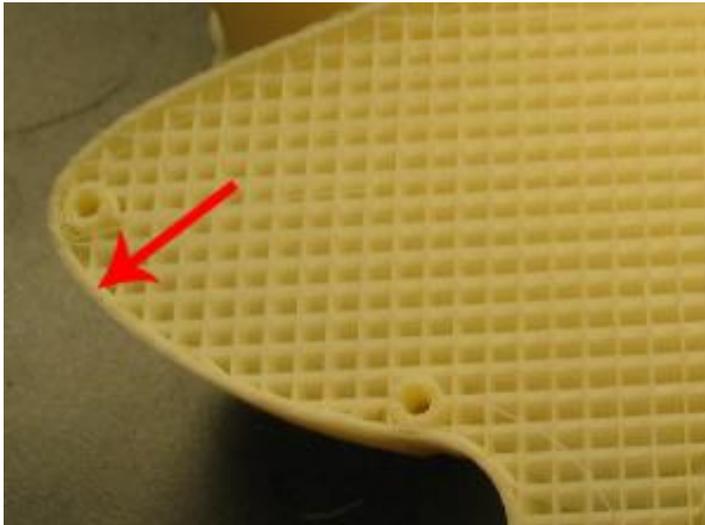
- Epaisseur de couches réglables
- de l'ordre de 0,1 mm
- État de surface pièce mauvais
- Post traitement (vapeur d'acétone)



Fusion fil à travers une buse chauffante ou FDM

Paramètres procédé

- Remplissage réglable (suivant les machines)
- structure en nid d'abeille
- Rapport résistance/poids



- Principal défaut : warpage
- retrait volumique au refroidissement
- Plateau ou enceinte thermo régulés
- Encollage plateau
- Dépôt de couches « radeau »



- **Épaisseur de paroi = 2* épaisseur de couche**
- **jeu radial = 2* largeur du dépôt**

Largeur de dépôt fonction du diamètre de buse principalement

- **Penser à l'enlèvement des supports**
- **Surface de révolution a orientée suivant l'axe z**

Sources bibliographiques

- **Fabrication additive, du prototypage rapide à l'impression 3D. C. Barlier, A. Bernard, 2015, DUNOD**
- **Slides A. Bernard, Ecole centrale de Nantes, Congrès SF2M, 2015**
- **Slides T. Thomas, SAFRAN, Congrès SF2M, 2015**
- **Slides M. Thomas, ONERA, Congrès SF2M, 2015**
- **Slides B. Verquin, CETIM, Cours INSA 5GMC CI EMP, 2017**
- ***Colin & al, Congrès SF2M «La métallurgie en fabrication additive », 2015***
- **Nima Shamsaei et al., “An Overview of Direct Laser Deposition for Additive Manufacturing; Part II: Mechanical Behavior, Process Parameter Optimization and Control,” *Additive Manufacturing* 8 (2015): 12–35.**
- **Slides R. Giraud, Erasteel, Congrès SF2M 2015**
- **Slides A. Di Donato, Grenoble INP, la fabrication additive métallique**

Sources bibliographiques

- Calignano, F. (2014). Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials & Design*, 64, 203-213.
- <https://prezi.com/qgiujvngqxj0/copy-of-dmls-design-guide-v4/>
- Slides E Rocca, Institut Jean Lamour, Congrès SF2M, 2015
- Slides C. Colin, Centre des matériaux, Congrès SF2M, 2015
- Anisotropic Mechanical Properties of ABS parts Fabricated by Fused Deposition Modelling, C Ziemian, USA

Sources des figures (autres que sources bibliographiques)

- http://www.stratoconception.com/images/03_Produits/Clients/injection_soufflage.jpg
- <http://www.gm-prod.eu/fabrication-additive-dentaire.php>
- http://p1.storage.canalblog.com/12/35/447324/111806925_o.jpg
- http://blog.easycartouche.fr/wp-content/uploads/2016/05/panerai-lo-scientiatio-lo-scientiatio-luminor-1950-tourbillon-gmt-titanio_0_l.jpg
- <http://www.3ders.org/images2014/metalsmith-uow-3d-printed-jewelry-2.jpg>
- http://images.lesechos.fr/archives/2013/LesEchos/21364/ECH21364052_1.jpg
- <http://quoidansmonassiette.fr/wp-content/uploads/2016/04/impressoin-3d-alimentaire-400x225.jpg?x38713>
- <http://www.vcharkarn.com/uploads/sites/6/2013/10/lom.png>
- <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/sla.png>
- <http://www.a3dm-magazine.fr/wp-content/uploads/2015/02/Schema-impression-3D-polyjet-A3DM-Magazine.jpg>

Sources des figures (autres que sources bibliographiques)

- <http://velocirepraptor.com/wp-content/uploads/2015/09/inkjet-binder.png>
- https://www.wittystore.com/image/cache//data/products_imgs/ProJet3510HD_Wittystore2-650x650.jpg
- <https://www.3dsystems.com/vsp/jaw-day>
- <https://www.sculpteo.com/fr/glossaire/lom-definition-fr/>
- <https://3dl.aut.ac.nz/wp-content/uploads/2014/09/1K4C3832.jpg>
- <http://www.metlflo.com/wp-content/uploads/2015/10/sls2.jpg>
- <http://i.ytimg.com/vi/NxwrJNWIT3E/maxresdefault.jpg>
- http://www.rpm-innovations.com/images/ldt_how_it_works.jpg
- <http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/uploads/7/4/4/0/7440869/1437120165.png>

Sources des figures (autres que sources bibliographiques)

- <http://www.volum-e.com>
- <http://micro-fusion-laser.fr/index.php/la-micro-fusion-laser/metallurgie-et-interaction-laser-matiere>
- <http://www.3dnatives.com/optimisation-topologique-3d-07032016/>
- http://www.amis-extrusion.fr/files/traitement_thermique/20141119114741traitement_thermique2.jpg
- <https://image.slidesharecdn.com/abrasiveflowmachiningafm-131205140320-phpapp02/95/abrasive-flow-machining-afm-6-638.jpg?cb=1386252351>
- <http://www.usineur.fr/files/logos/d172c60034f4c43813d082c1fd81de90.jpg>
- http://www-list.cea.fr/images/stories/recherche_technologique/programmes_de_recherche/manufacturing_avance/controlé_non_destructif/cnd_01.png

Sources des figures (autres que sources bibliographiques)

- http://www.hrsflow.com/backend/prodotti/img_upload/img_dett/130624145190_tassello_i_brido_cooling.jpg
- <http://www.3ders.org/images/concept-laser-new-mlab-cusing-r-metal-additive-manufacturing-machine-2.jpg>
- http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/data/journals/jmsefk/931017/manu_136_06_061004_f001.png