

Conférence 2100 N° 185, Paris, 21 mai 2015

# Impact industriel de l'impression 3D – en particulier dans l'aérospatial

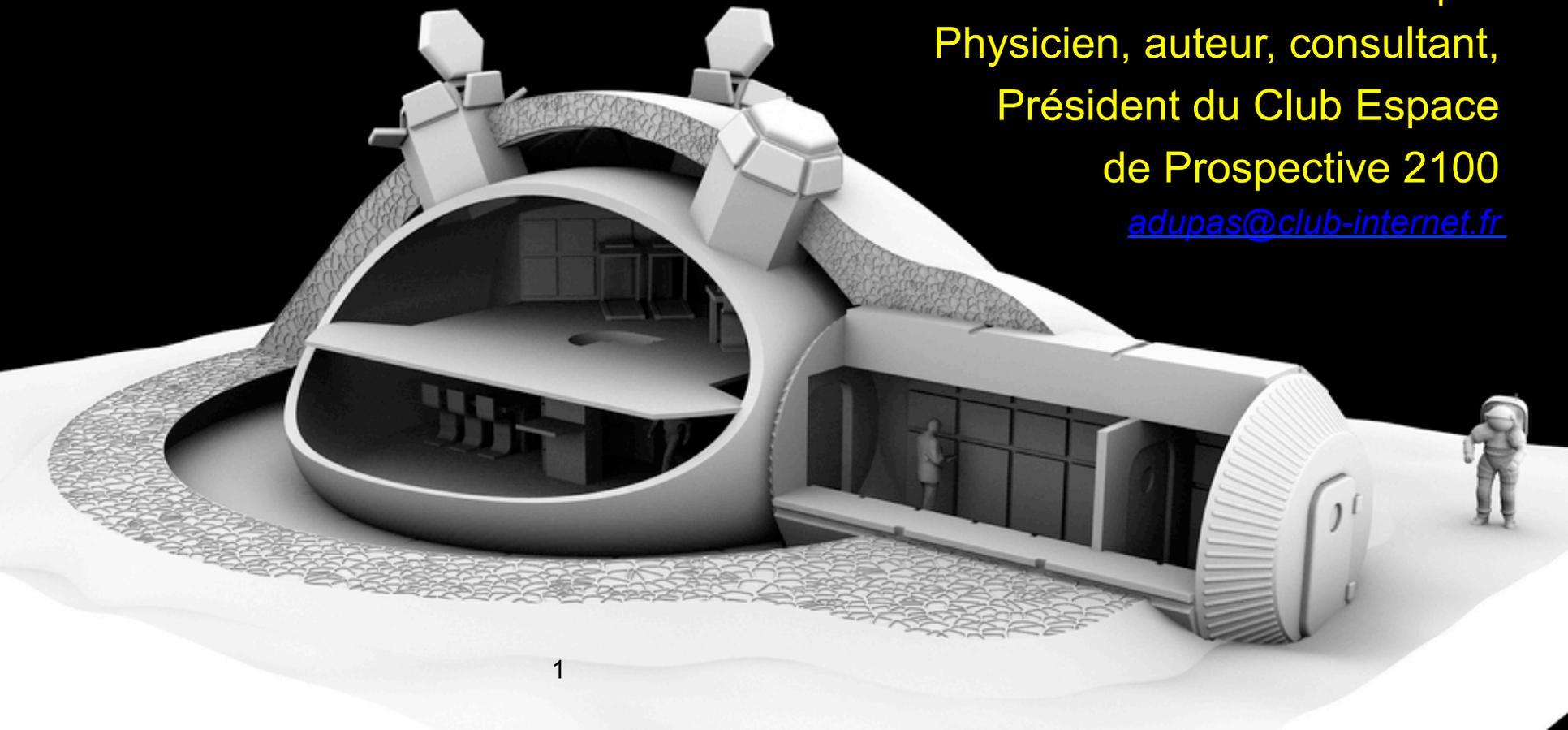
Alain Dupas

Physicien, auteur, consultant,

Président du Club Espace

de Prospective 2100

[adupas@club-internet.fr](mailto:adupas@club-internet.fr)



# Quelques citations

**“The third industrial revolution : The digitization of manufacturing will transform the way goods are made—and change the politics of jobs too”**

*The Economist*  
*April 21, 2012*

**“The Boeing Company has been using SLS (Selective Laser Sintering) for flight hardware in regular production since 2002, for both military and commercial programs (787 was the first program : Weight and Assembly benefits)”**

*National Academy of Engineering US Frontiers of Engineering Symposium*  
*September 19-21, 2011*  
*Brett Lyons, The Boeing Company*

**....Additive Manufacturing “has the potential to revolutionize the way we make almost everything”.....**

**.....Congress should “create a network of 15 of these hubs and guarantee that the next revolution in manufacturing is made in America”**

*Obama’s Speech*  
*February 13, 2013*  
*State of the Union Address*

# Two Ways for Fabrication:

## Additive Manufacturing

## Subtractive manufacturing

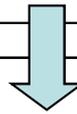
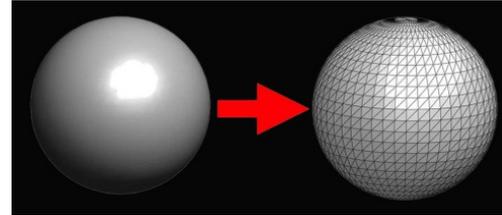


# Principe général

- A partir d'un fichier numérique décrivant très précisément les dimensions de la pièce, une machine fabrique celle-ci par empilement successif de très minces couches de matière parfaitement calibrées
- On parle de fabrication additive par opposition aux techniques « soustractives » qui façonnent les pièces en les sculptant dans la masse d'un matériau par usinage
- Le plus souvent les matériaux sont introduits sous forme de poudres, de résines ou de filaments que vient solidifier une source d'énergie, comme une résistance électrique ou un faisceau laser
- Le processus par empilement de couches permet d'obtenir, en une seule fois et sans besoin d'assemblage ultérieur, des objets à géométrie particulièrement complexe, comme par exemple certaines pièces utilisées en aéronautique.
- On peut parler de « liberté géométrique illimitée ».

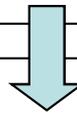
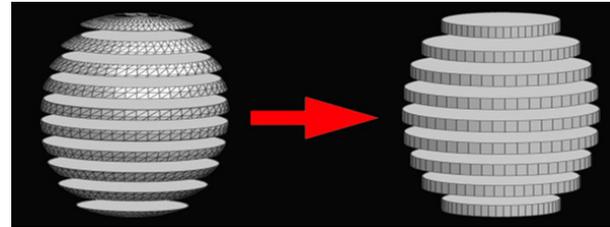
## Données numériques

Fichier CAO 3D - STL

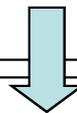
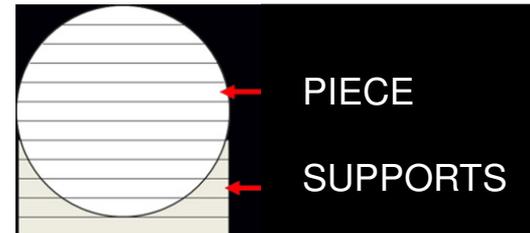


## Préparation des fichiers

Correction fichiers, orientation, placement pièces, support, tranchage

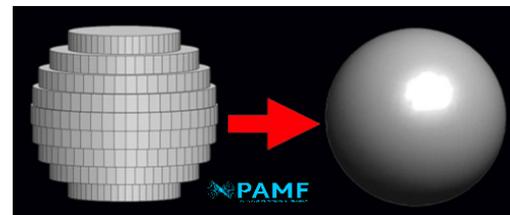


## Fabrication



## Finitions

Nettoyage, enlèvement des supports, sablage, usinage,..



# Quelques dates clés

- 1986 –3DSystem company
- 1988 First additive manufacturing technologie. Use a stereolithography process (60 patents)
- DTM corporation -> process SLS - Selective Laser Sintering
- STL format - 3D System company ( Standard Tessellation Language) or (STereoLithography)
- 1988 : Stratasys -> process FDM - Fused Deposition Modeling
- 1993 : MIT-> process powder and inkjet printing.
- 1995 : Z corporation buy patents to process powder
- 1996 : use of the term : printer 3D
- 1999 : PolyJet by Objet Ltd.
- 2005 : beginning RepRap project ( Adrian Bowyer)
- 2009 : MakerBot : Bre Pettis, Adam Mayer et Zachary Smith
- 2011 : 15000 marketed printer3D
- 2012: 38000 marketed new printer 3D
- 2013: 56000 printer3D
- 2014 : 98000 printer3D (estimate !)
- 1990 - Binded selective laser sintering (SLS)
- 2000 - Direct Metal Lase sintering (DMLS)
- 2000 - Laser selective melting (SLM)
- 2006 - Electron beam melting (EBM)
- Direct metallic deposition (DMD/CLAD)
- 2014 DMG Mory Seiki...

# Historique de l'impression 3D

Historique

1984



- **Invention de la première imprimante 3D** par Charles Hull qui créa par la suite 3D Systems, un des leaders de l'impression 3D. La machine permet de réaliser un objet par superposition de tranches fines de matière.

1992



- **Première imprimante produite en série** par 3D Systems. Le procédé de la machine comprend un laser qui solidifie un liquide ayant la viscosité et la couleur du miel.

2005



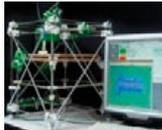
- **Première initiative open source** « RepRap » lancée par Adrian Bowyer pour développer une imprimante capable de produire ses propres pièces.

2006



- **Nouvelle technologie** qui utilise un laser pour fondre les poudres de métal afin de produire un objet. Cette nouvelle imprimante ouvre la voie à la **customisation de masse**.
- La société **Objet** lance une imprimante capable de fabriquer des produits **multimatériaux**.

2008



- **Darwin** : l'initiative « RepRap » lance une imprimante capable de produire ses propres pièces.
- **Shapeways** : plate-forme communautaire de cocréation d'objets en 3D.

2009 - 2012



- **MarketBot** : lancement de la première imprimante pour les particuliers à moins de 2 000 euros.
- **Nouveaux matériaux** : la société **i.materialise** utilise l'or **et** l'argent pour imprimer des bijoux sur mesure.

# Evolution du domaine

- Les premières machines basées sur ce principe sont apparues il y a une vingtaine d'années.
- Au départ elles étaient chères, lentes et ne produisaient que des pièces en matière plastique de petite taille, pièces uniques ou en très petit nombre.
- Elles constituaient essentiellement une aide à la conception des produits pour les bureaux d'étude et on parlait alors de « prototypage rapide ».
- Depuis lors, les prix sont tombés alors que les machines sont devenues beaucoup plus performantes et leurs applications plus nombreuses, bien au-delà de la seule fabrication de prototypes.
- A côté des pièces en matières plastiques, on peut maintenant produire des pièces en métal ou en céramique et on expérimente actuellement la fabrication en un seul processus de pièces hybrides, composées de plusieurs matériaux

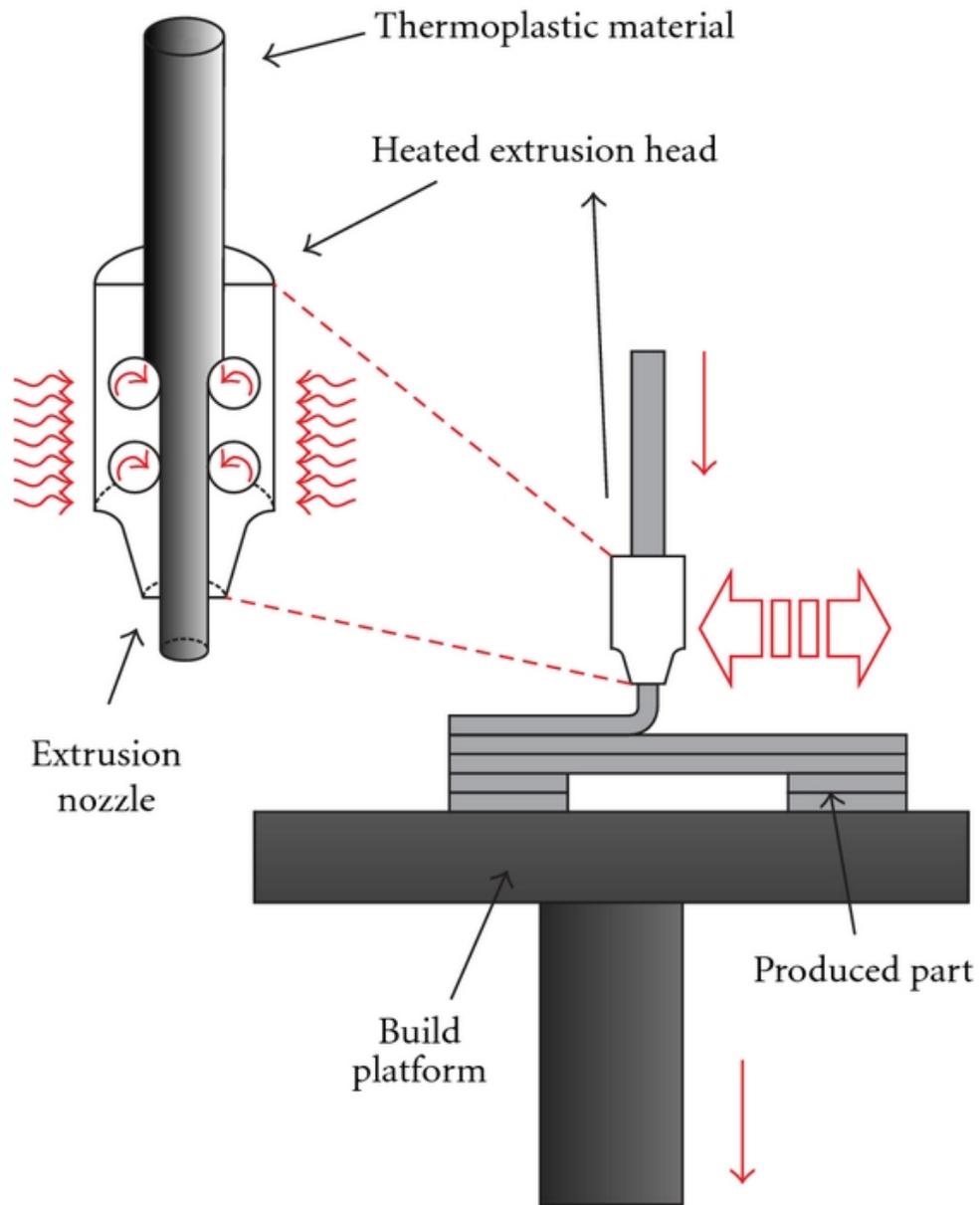
# L'extension du domaine de l'impression 3D

- Tout d'abord utilisée pour faciliter le prototypage, l'impression 3D s'est développée sur le plan industriel et s'est étendue aux usages individuels
- Sur le plan industriel elle apporte la capacité :
  - de réaliser des pièces imbriquées
  - de consommer moins de matériau coûteux en supprimant le gaspillage et en allégeant les objets
  - de fabriquer des pièces personnalisées en très petites quantités,
- Les imprimantes personnelles atteignent le grand public grâce à des prix abordables et sont donc de plus en plus utilisées
- La fabrication additive ne remplacera pas dans le moyen terme la production de masse, notamment à cause du coût des matériaux et du temps d'impression, mais elle pourrait faciliter le développement de petites industries innovantes et l'émergence d'un « artisanat 2.0 »
- L'impression 3D permet l'émergence de nouveaux *business model* et peut donner lieu à des démarches d'innovation ouverte.
- Elle pose aussi de nouvelles questions liées aux réglementations et à la sécurité, ainsi qu'à la menace qu'elle représente pour la propriété intellectuelle à partir du moment où un objet peut être scanné

# Les différentes technologies d'impression 3D

- Plusieurs procédés d'impression 3D ont été développés depuis les années 1970
- Ils diffèrent dans la manière dont les couches sont déposées et dans les matériaux utilisés pour créer des objets.
- On peut les classer en trois grands groupes :
  - le dépôt de matière
  - la solidification par illumination
  - l'agglomération par collage
- Pour chacun des procédés il faut :
  - une imprimante 3D
  - de la matière première sous forme de liquide, de fil ou de poudre
  - un fichier 3D de l'objet à réaliser (au format STL), un logiciel de modélisation ou un scanneur (avec l'objet à reproduire par rétroconception)
  - un logiciel de CAO pour préparer ce fichier (autoCAD, Inventor, Maya, etc.)
  - un ordinateur pour effectuer ces opérations et transmettre à l'imprimante toutes les indications du fichier 3D.

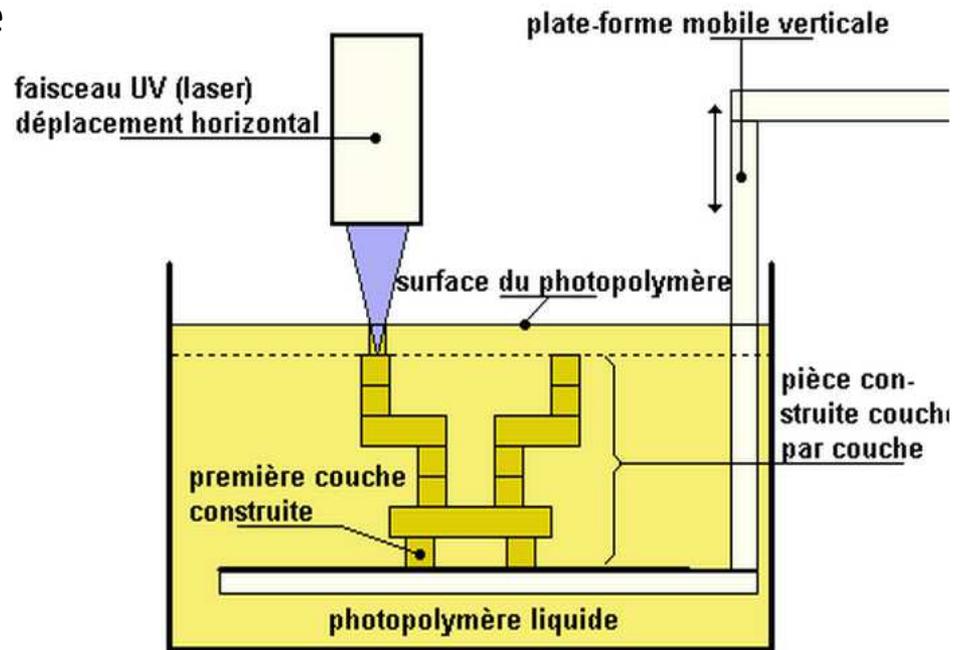


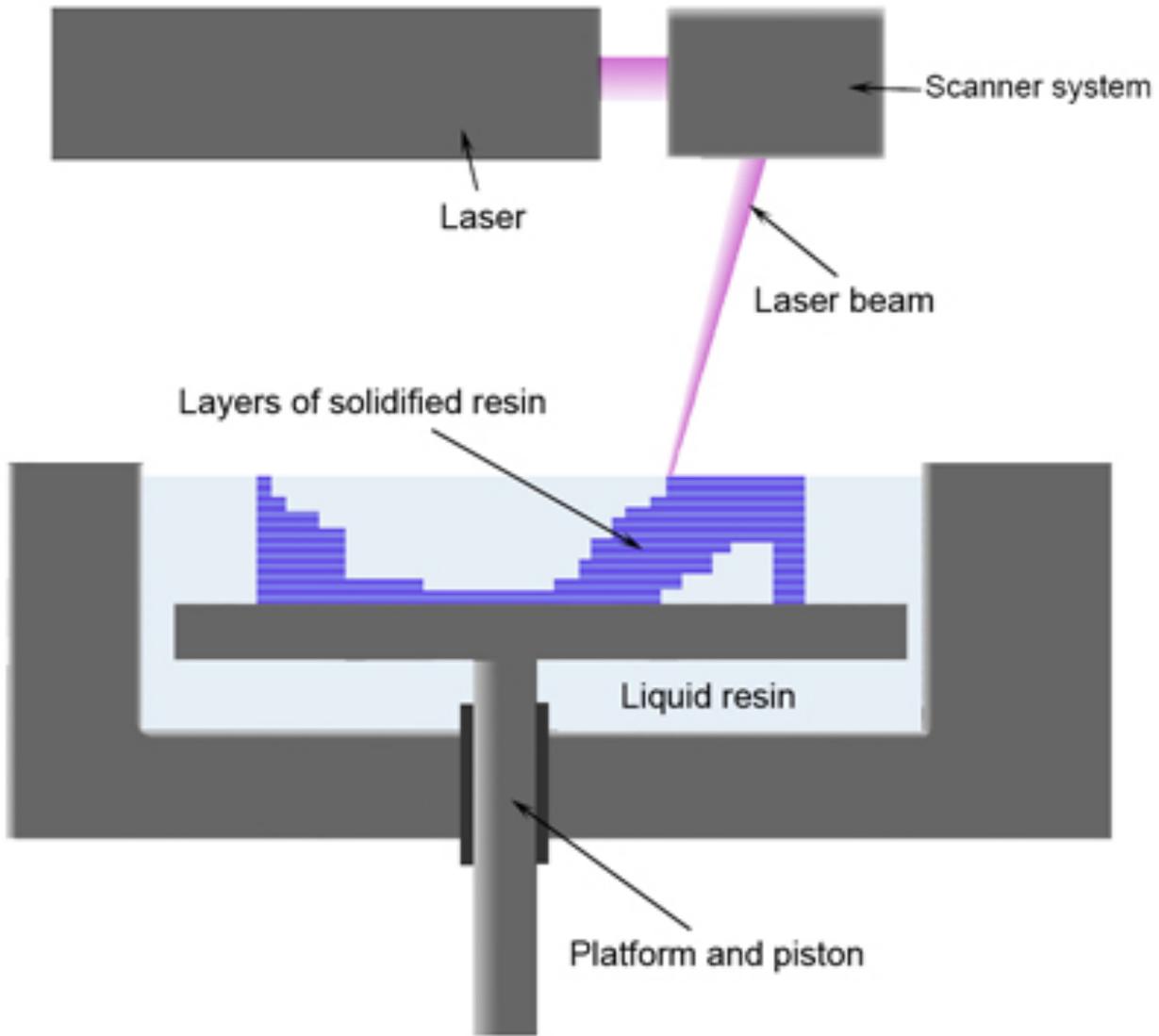


Fused Deposition Modeling (FDM)

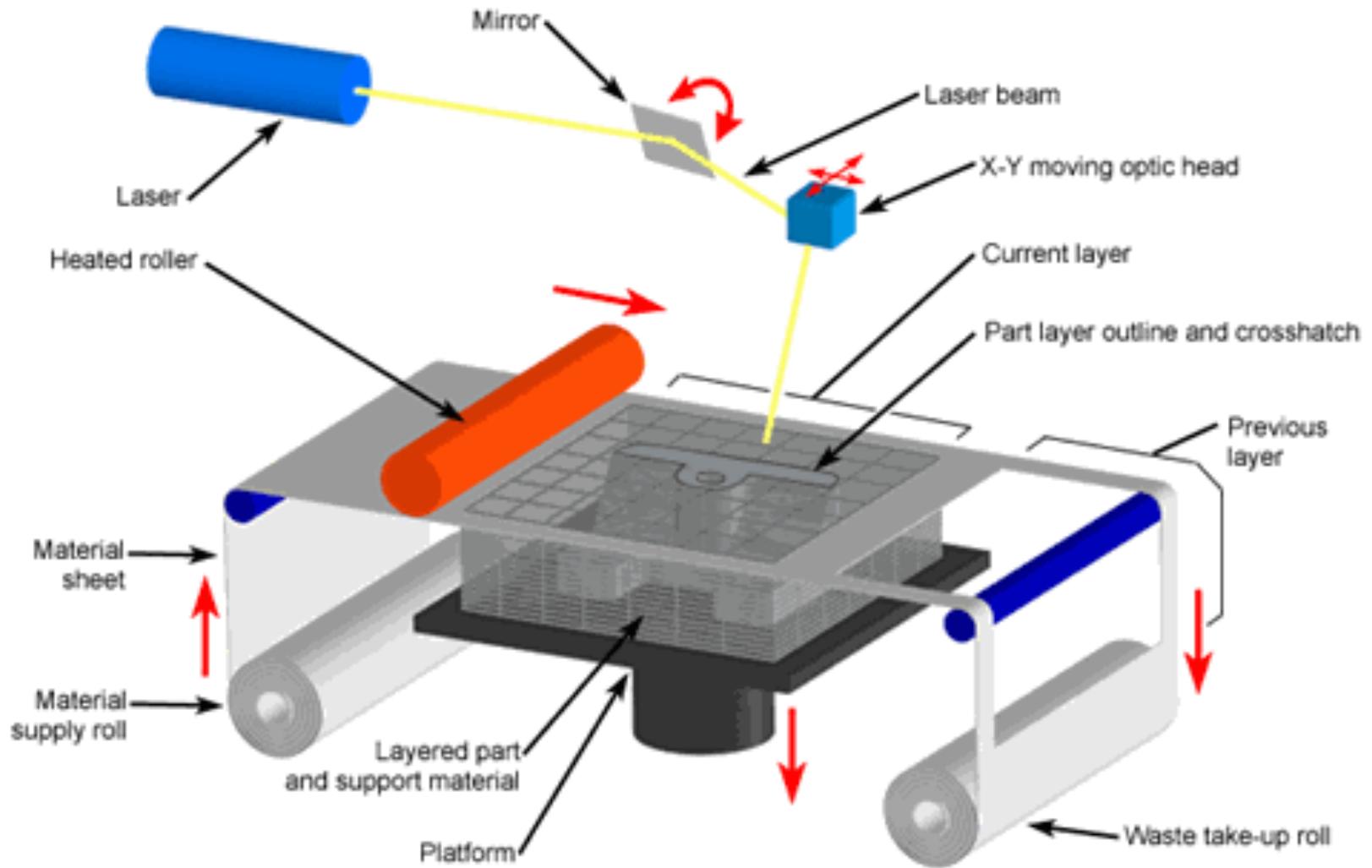
# Impression par solidification par illumination

- La technique de la stéréolithographie (SLA) a été brevetée en 1986 par Charles Hull, co-fondateur de la société américaine *3D Systems*
- Elle consiste à solidifier un liquide photosensible à l'aide d'un laser ultra-violet.
- Une fois que la couche initiale de l'objet a durci, la plate-forme est abaissée et une nouvelle couche de surface de polymère liquide est exposée.
- Le procédé est répété jusqu'à ce que la totalité de l'objet soit formé
- Les objets ont une bonne finition mais le coût est élevé.





Stereolithography (SLA)

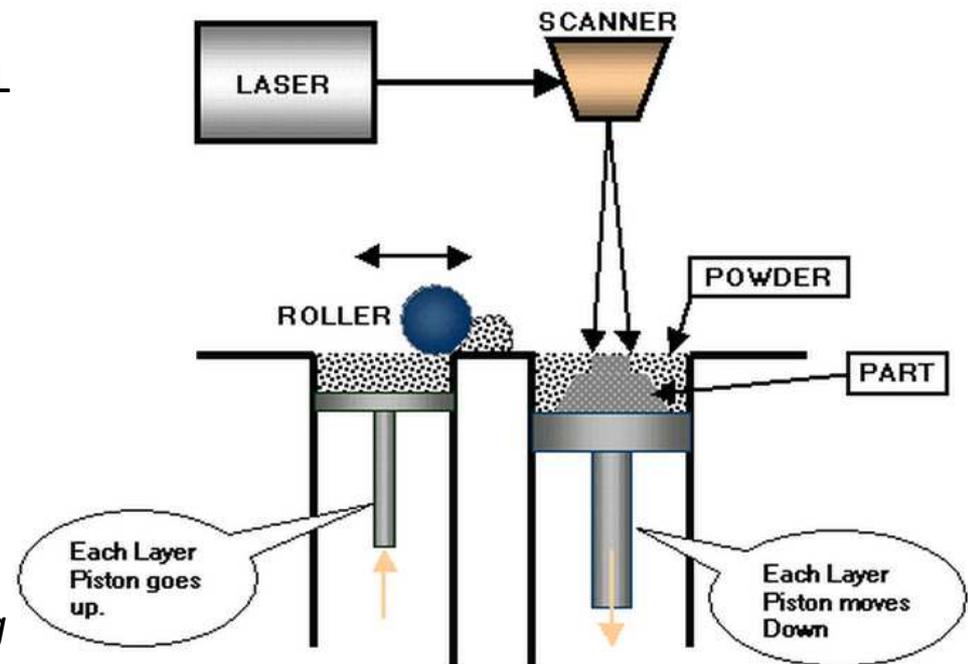


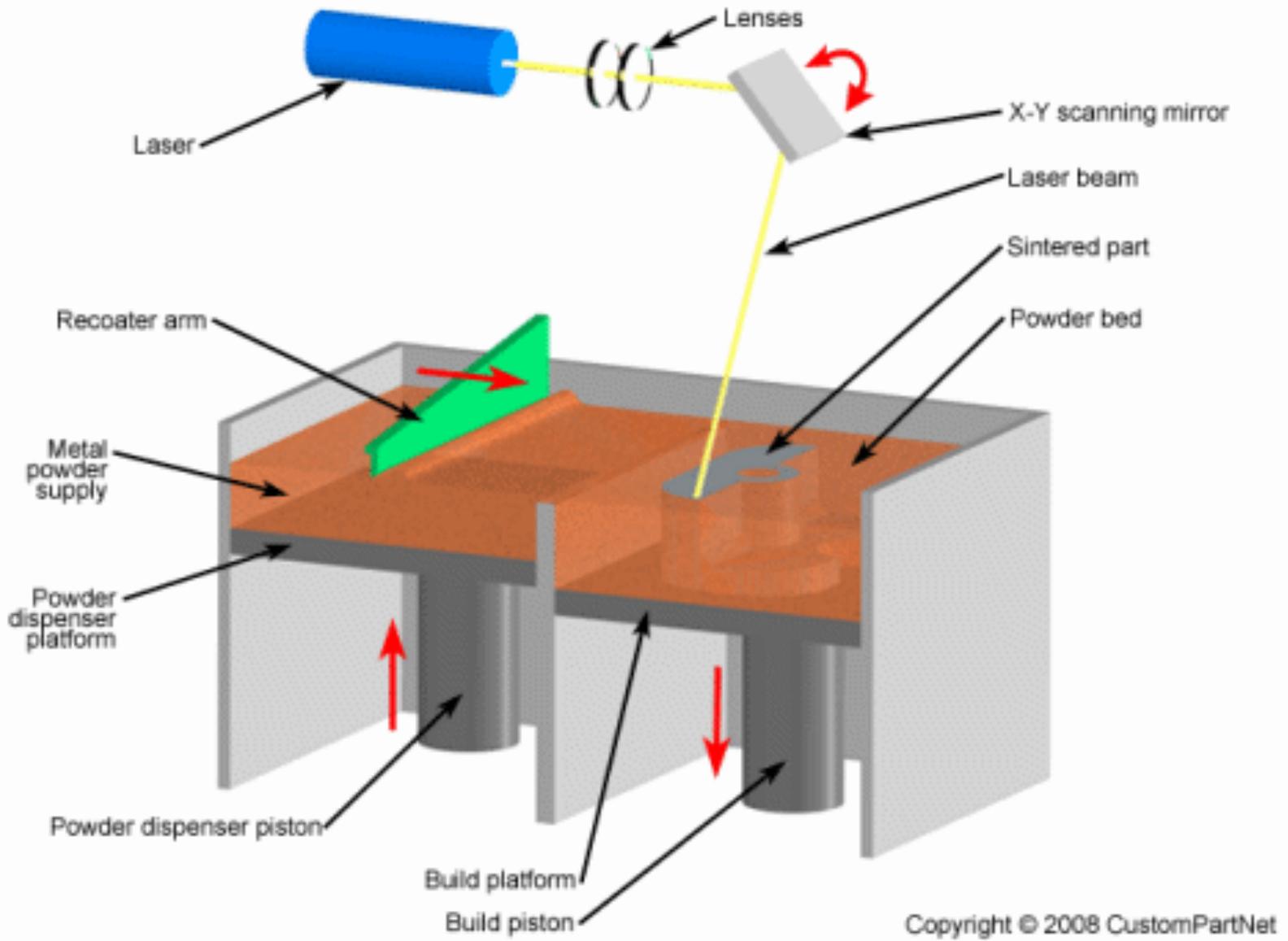
Copyright © 2008 CustomPartNet

## Laminated Object Manufacturing (LOM)

# La technique de frittage sélectif au laser

- La technique de frittage sélectif au laser (*Selective Laser Sintering, SLS*) a été inventée en 1980 à l'Université du Texas et a été développée en 2003 par la société allemande EOS.
- Un laser très puissant provoque la fusion d'une poudre sur des zones très précises définies par le fichier STL
- Une nouvelle couche de poudre est ensuite introduite, durcie par le laser et fusionnée avec la précédente.
- L'objet est finalement dégagé de la poudre libre, pour être brossé et poncé.
- Les poudres peuvent être constituées de particules de nylon, de verre, de céramique, de plastique.
- La technique du frittage laser direct de métal (*Direct Metal Laser Sintering - DMLS*) repose sur le même principe que la SLS et fonctionne avec pratiquement tous les alliages métalliques.

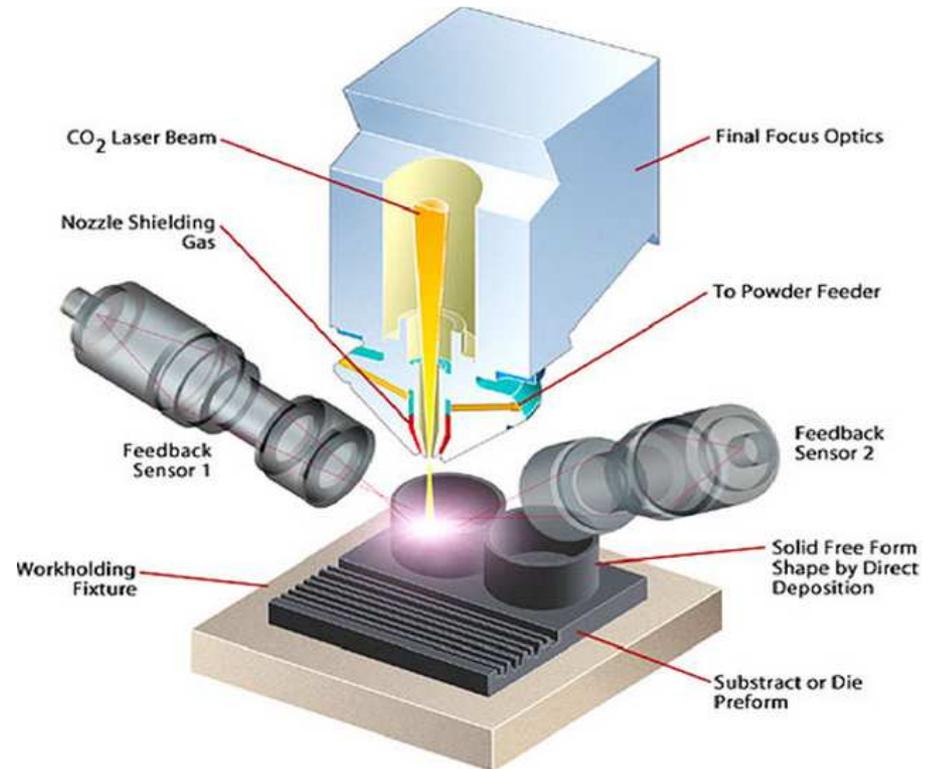




Selective Laser Sintering (SLS)

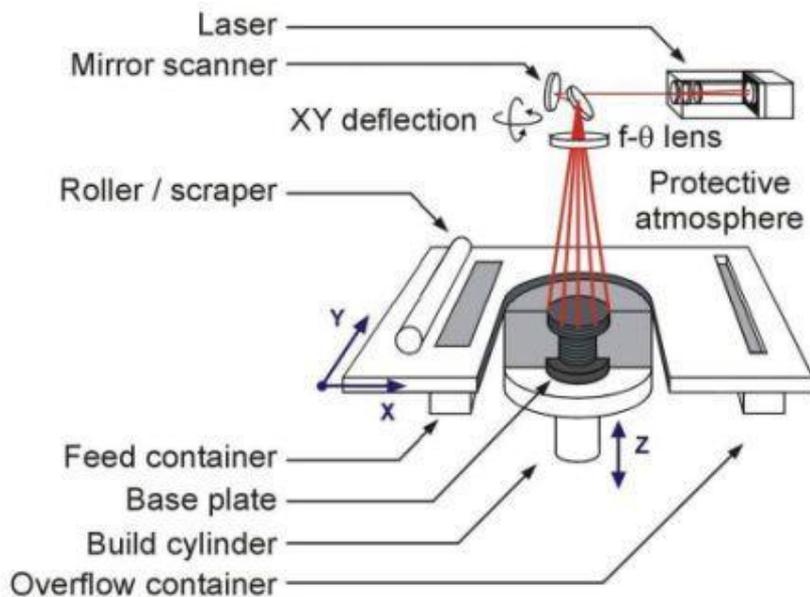
# La méthode de fabrication directe par laser

- La technique de fabrication directe par laser (*Direct Metal Deposition*, DMD) consiste à fondre des poudres métalliques à l'aide d'un laser.
- Une buse coaxiale permet de réaliser l'injection de poudres métalliques au travers d'un faisceau laser dont la puissance moyenne peut varier de 50 watts à 6000 watts. Les poudres sont fondues pour former un dépôt homogène et dense sur la surface elle aussi fondue. Ces dépôts ou empilements successifs sont protégés tout au long de la construction par un gaz neutre pour parer aux problèmes d'oxydation
- Le rendement de dépôt peut dépasser 90 % de la masse de matière injectée. Cette technique permet de réaliser des dépôts fins de 300  $\mu\text{m}$ .
- Les structures métallurgiques obtenues sont saines et exemptes de défauts métallurgiques.
- La matière tant acheminée vers le substrat sous forme de poudre métallique, il est évidemment possible, dans la limite où les matériaux mis en œuvre sont compatibles, de réaliser des constructions multimatériaux
- En plus de réaliser des pièces fonctionnelles, cette technique permet de réaliser des réparations sur des pièces usées ou cassées.

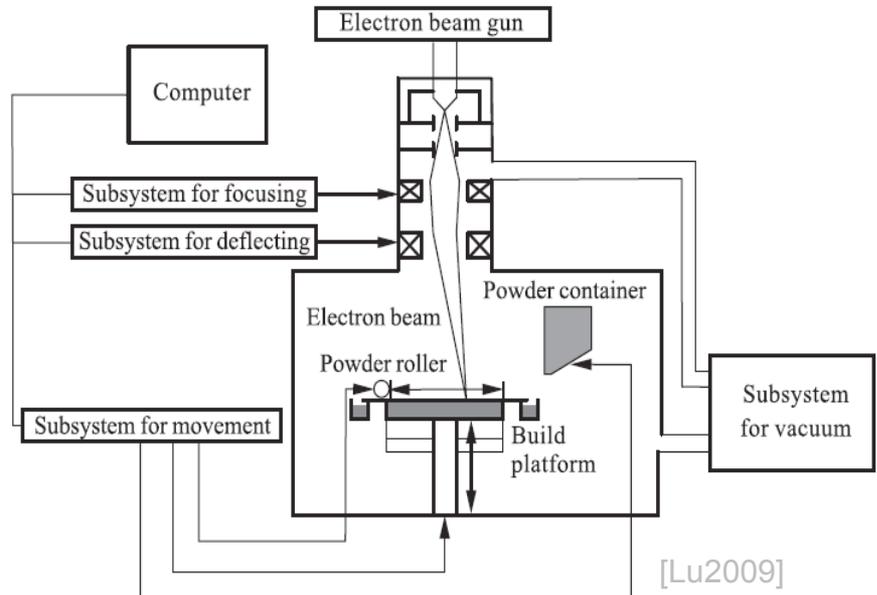


# Techniques laser et faisceaux électroniques

- **Laser beam**
  - Selective Laser Sintering (SLS)
  - Direct Metal Laser Sintering (DMLS)
  - Selective Laser Melting (SLM)

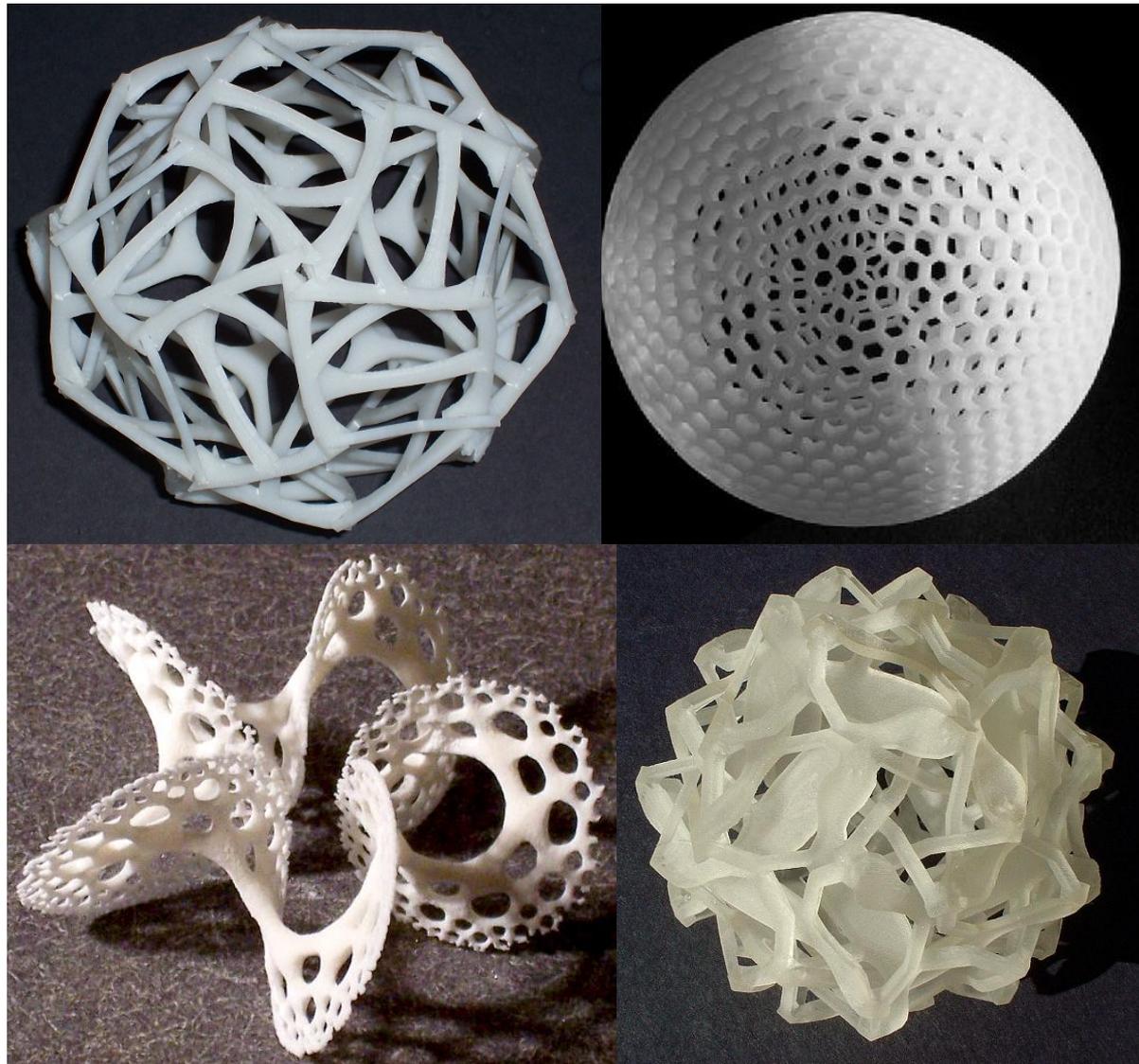


- **Electron beam**
  - Electron Beam Melting (EBM)



# Intérêt de la fabrication additive

- Réaliser un objet sans perdre de matière première.
- Réparer les pièces cassées d'un appareil sans faire appel au circuit des pièces détachées.
- Fabriquer des pièces à géométries internes complexes irréalisables par moulage. (l'industrie aéronautique produit des pièces dont la géométrie est les plus complexes).
- Réaliser en une seule fois des objets complexes comprenant plusieurs pièces en évitant les étapes de montage.
- Réduire le temps de développement d'un produit en produisant directement un prototype 3D à la demande
- Produire en petites séries
- Réduire considérablement les couts des phases de pré-industrialisation
- S'exempter du matériel, des machines et des compétences pointues que requiert le métier de machiniste-mouliste pour produire des prototypes et de petites séries
- Réaliser un objet à partir d'un fichier 3D sans disposer d'un modèle physique.
- L'utilisation d'un scanner peut inversement palier l'absence d'un fichier. Si l'utilisateur dispose de la pièce à réaliser, il peut procéder à la rétro-conception de celle-ci.



Geometric complexity is not a limitation in 3D Printing

## Intérêt de la fabrication additive (2)

- La production additive permet d'obtenir des formes nouvelles (matériaux architecturés associant des propriétés mécaniques, acoustiques, thermiques, électromagnétiques)
- Elle permet également de fabriquer très rapidement des produits personnalisés, à l'instar des laboratoires dentaires qui peuvent imprimer rapidement des prothèses en grandes quantités avec beaucoup de précision et à moindre coût (en s'affranchissant d'une prise d'empreinte par moulage plâtre de la dentition du patient).
- Elle rend la production de courtes séries rentables. Autrefois, les contraintes de production en série faisaient exploser le coût de production de séries très limitées.
- Elle conduit à repenser la manière dont les entreprises innovent et à transformer le cycle d'innovation, en permettant :
  - d'apporter en permanence des changements incrémentaux aux produits
  - de réaliser du prototypage rapide, en changeant radicalement la manière dont les équipes projets travaillent
  - de réduire le *time-to-market* en concevant et en développant des produits de façon plus rapide.

# Inconvénients des imprimantes 3D

- Proposer une gamme de couleurs et de matériaux plastiques limitées pour les imprimantes 3D grand public.
- Pour la fabrication de pièces métalliques tous les métaux ne sont pas encore utilisables.
- Les imprimantes laser nécessitent de disposer d'un atelier et d'un opérateur spécialisé.
- La surface des objets produits n'est pas parfaite. Elle laisse apparaître les couches d'impression. Cependant, la technique de polymérisation de résines par lumière visible ou ultraviolet offre une qualité de surface d'une précision de 15 µm. L'impression métallique peut offrir une précision de 25 à 30 µm - la qualité de la poudre jouant un rôle important dans la précision.
- La taille des objets fabriqués est limitée. Toutefois, cette limitation peut être contournée en fabriquant un objet en plusieurs fois. Avec le modèle Fortus 900mc de Stratasys (Israël), équipé d'un bac de 91,4 cm x 61 cm x 91,4 cm, il devient possible d'imprimer des pièces plastiques de grande taille. Le *State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University* (NPU), en Chine, a récemment démontré qu'il est possible de fabriquer une aile centrale d'avion de 5 mètres
- Si l'utilisateur souhaite créer un objet dont il n'a pas le fichier 3D, il devra maîtriser les logiciels de modélisation 3D
- Les prix d'une imprimante 3D commencent à mille euros et montent jusqu'à un million d'euros pour un équipement utilisant du frittage laser.
- La vitesse actuelle de fabrication de pièces ne permet pas en général d'envisager la production en grande série.

# Une multiplicité de techniques et d'applications

- Une des spécificités du marché de l'impression 3D est la multiplicité des technologies utilisées.
- Chaque technologie permet une impression avec un certain type de matériau. Les imprimantes les plus simples impriment des objets en plastique, d'autres plus sophistiquées produisent des pièces en métal et en polymère.
- Il est également envisageable d'imprimer de la peau ou des tissus vivants (régénération de la peau en cas de brûlure), voire des armes à feu et même... des imprimantes 3D ! Les débouchés de l'impression 3D semblent quasiment illimités pour des objets mono-matériaux
- Des imprimantes pouvant imprimer avec plusieurs matériaux se développent progressivement. Chez Stratasys, l'imprimante Objet Connex 3D permet maintenant de choisir parmi plus de cent vingt matériaux, d'en mélanger ou d'en superposer dans un même objet.
- L'industrie agroalimentaire pourrait également être révolutionnée par les technologies de l'impression 3D et l'arrivée des imprimantes culinaires. En parallèle de l'utilisation de matériaux durs tels que le métal, la résine ou le plastique, certaines imprimantes 3D sont conçues pour créer des produits comestibles, à partir de chocolat par exemple.

# Exemple d'usages

## Les imprimantes 3D sont utilisées pour :

- Visualiser un projet en ayant recours au prototypage rapide : l'impression 3D permet aux industriels, architectes et agences de design de créer un prototype afin de faire un test ou une démonstration. Le prototypage est la fonction historique de l'impression 3D : elle était initialement réservée aux industriels pour dessiner leurs maquettes. Le prototypage représente toujours 54 % des utilisations.
  - Exemple : Reebok et Timberlake créent des prototypes de leurs chaussures grâce à l'imprimante 3D ZPrinter. Cette imprimante utilise la technologie *Laminated Object Manufacturing* développée par le MIT qui consiste à déposer un liant sur une poudre composite. Les prototypes sont ensuite envoyés à leurs sous-traitants asiatiques afin que ceux-ci visualisent le produit fini sur lequel ils vont travailler.
- Fabriquer un produit fini : cet usage représente 19 % des cas aujourd'hui, mais est en forte croissance. En 2020, 80 % de la capacité de production du parc d'imprimantes 3D dans le monde devrait être dédiée à la fabrication de produits finis. L'application typique est la fabrication de pièces uniques, ou de pièces techniques pour des objets à grande valeur ajoutée, pour lesquels des pièces plus légères ou avec des formes plus complexes apportent une réelle amélioration : c'est le cas de certaines voitures de courses, d'avions... La fabrication additive permet aussi de fabriquer des objets comprenant plusieurs pièces déjà assemblées
  - Exemple : des produits de grande consommation, comme les lentilles de contact Novartis, ou des pièces automobiles, comme les moteurs de Ducati fabriqués par Stratasys, peuvent d'ores et déjà être produits grâce à une imprimante 3D. GE s'en sert également pour produire des composants pour ses moteurs d'avions.
  - Exemple : pour la fabrication de pièces en titane, notamment utilisées dans l'aéronautique, la fabrication additive est très compétitive par rapport aux procédés traditionnels qui engendrent beaucoup de gâchis : d'après des chercheurs d'Airbus, dans certains cas l'impression 3D n'utilise que 10 % de la quantité de produit pour l'instant nécessaire, en utilisant moins d'énergie et parfois plus rapidement. Certaines pièces peuvent être jusqu'à 60 % plus légères, tout en restant aussi solides

# Des problèmes encore à résoudre

- Le recours à la production additive s'explique par une volonté de gagner en flexibilité en réduisant les délais de prototypage et de développement, de faciliter le processus de production (une imprimante et un logiciel de CAO permettent en principe de remplacer toute une chaîne de production) et de créer des formes complexes impossibles à obtenir avec des techniques de production plus traditionnelles.
- Cependant, malgré certains efforts de démocratisation de la part des fabricants, l'impression 3D est encore majoritairement utilisée pour du prototypage rapide par les grands groupes industriels. On constate un certain nombre de freins à une adoption plus massive :
- Le marché peut paraître peu lisible en raison de la multiplicité des technologies, des matériaux et des usages correspondants.
- L'absence d'économie d'échelle : une imprimante 3D ne peut produire qu'un objet à la fois et le recours à cette technologie est limité pour des produits de masse standardisés
- Le coût tant au niveau de l'investissement initial que de la production car les « encres » des imprimantes 3D sont bien plus chères que les matériaux bruts de l'industrie classique. Un kilo de polymère coûte entre 130 et 200 euros. Le prix des poudres métalliques utilisées dans l'impression 3D peut atteindre deux cents fois le coût d'une feuille de métal. Dans un tel contexte, le recours à l'impression 3D pour de gros volumes de production n'est souvent pas rentable.
- La persistance de défis techniques : le nombre de matériaux aujourd'hui disponibles est encore relativement faible. Ces matériaux nécessitent toujours un conditionnement spécifique, auquel certains matériaux se prêtent mal.
- Par ailleurs, imprimer des objets de grande taille reste problématique, aussi bien au niveau technique – même si des industriels s'attellent à trouver des solutions – qu'au niveau financier : le prix des imprimantes dépend principalement du volume maximal imprimable.
- Le temps d'impression reste pour l'instant assez long.

# Impression 3D et/ou fabrication additive ?



## 3D Printing

- Rapid Prototyping
- Machines less than £5K



## Additive Manufacturing

- Production components
- Machines more than £500K

# Quelques domaines d'applications

## Motor sport



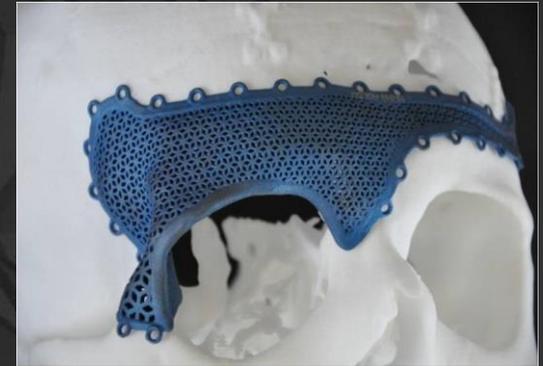
- Small series production
- Very complexe geometry
- Ligth weigth parts, integration of functions,...
- Short delivery time

## Aerospace



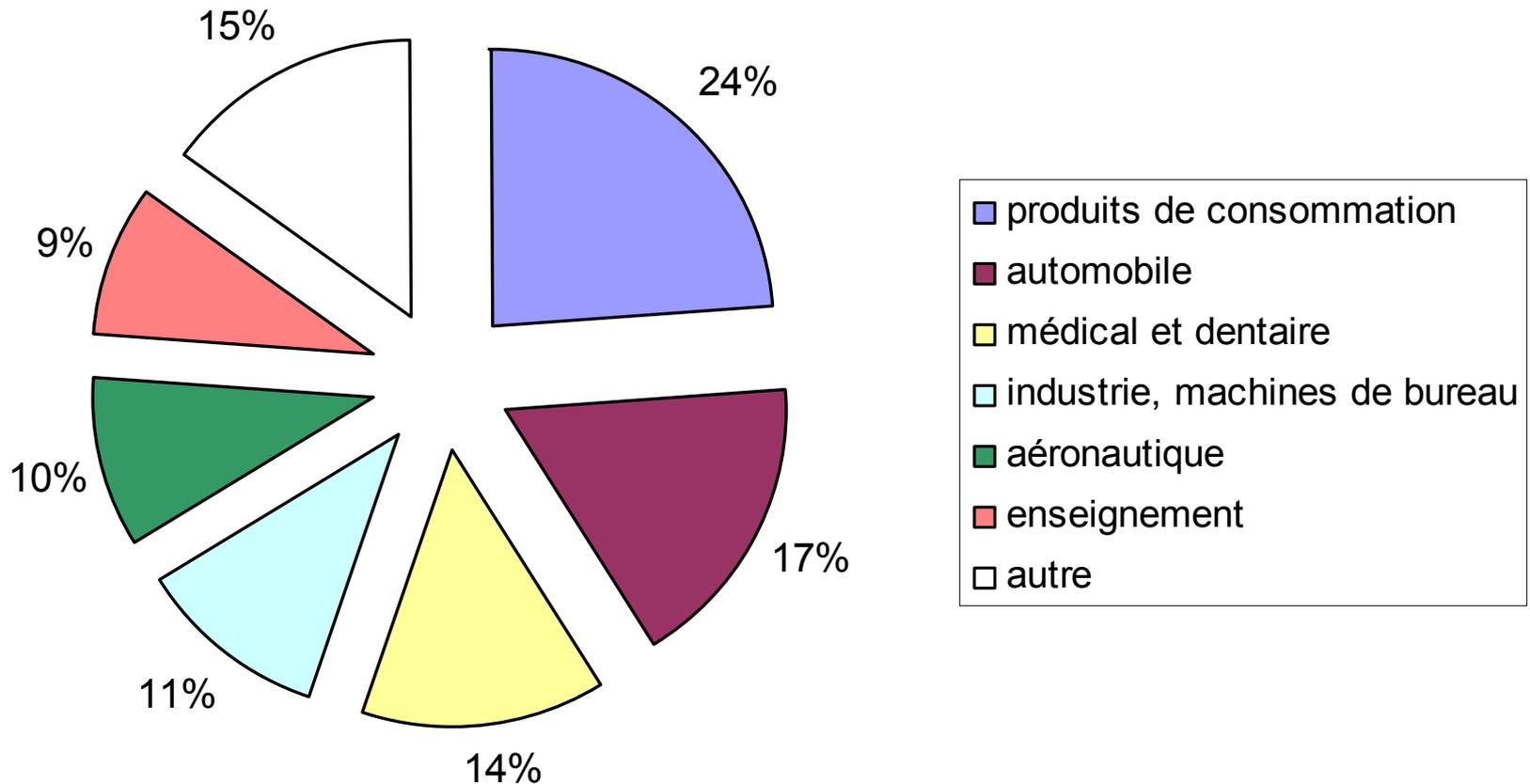
- Manufacturing of complex geometries
- Manufacturing costs independent from shape complexity
- Ligth weigth parts, integration of functions,...

## Medical



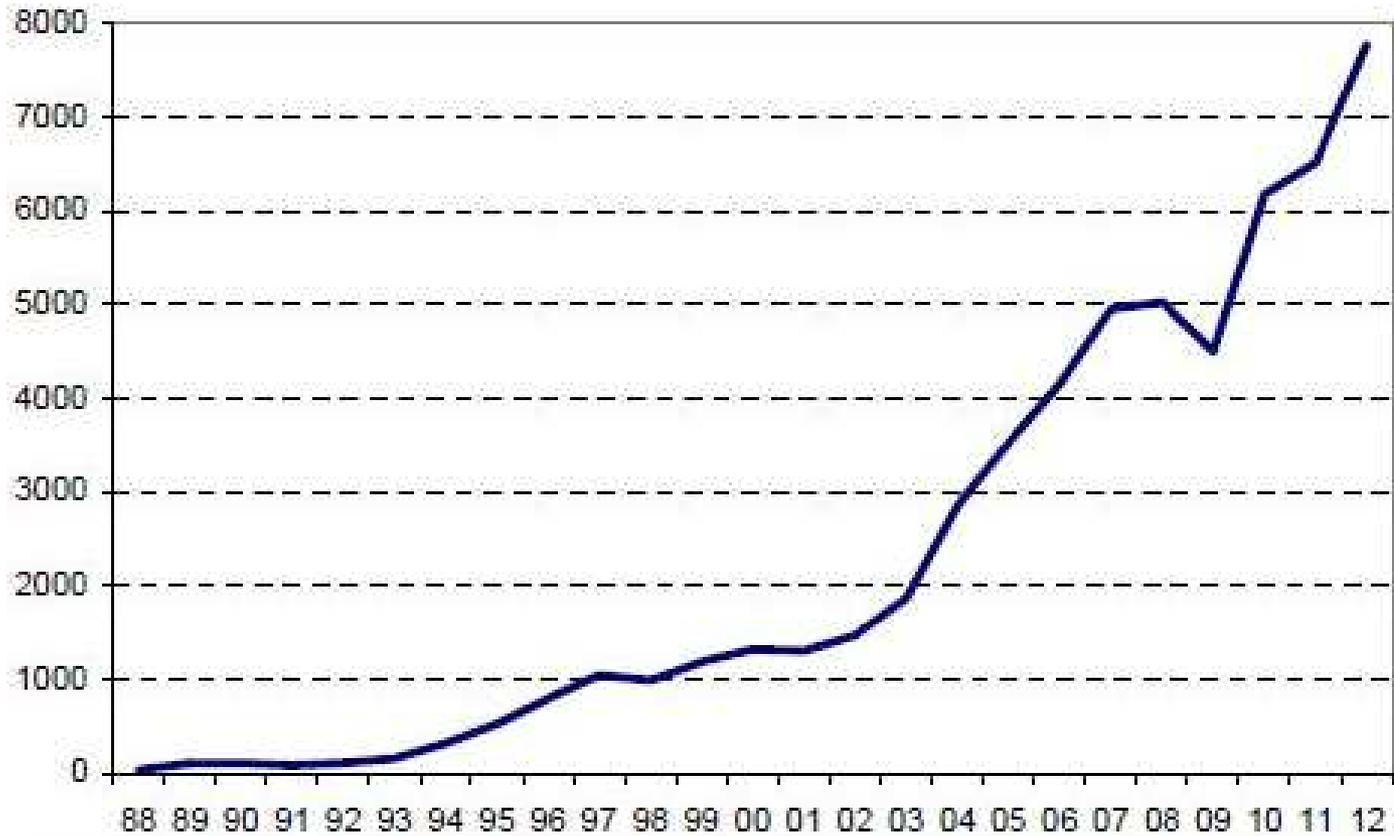
- Manufacturing of individual implants directly from CAD-data
- Reduction of manufacturing times and improvement of medical characteristics

# Secteurs d'application



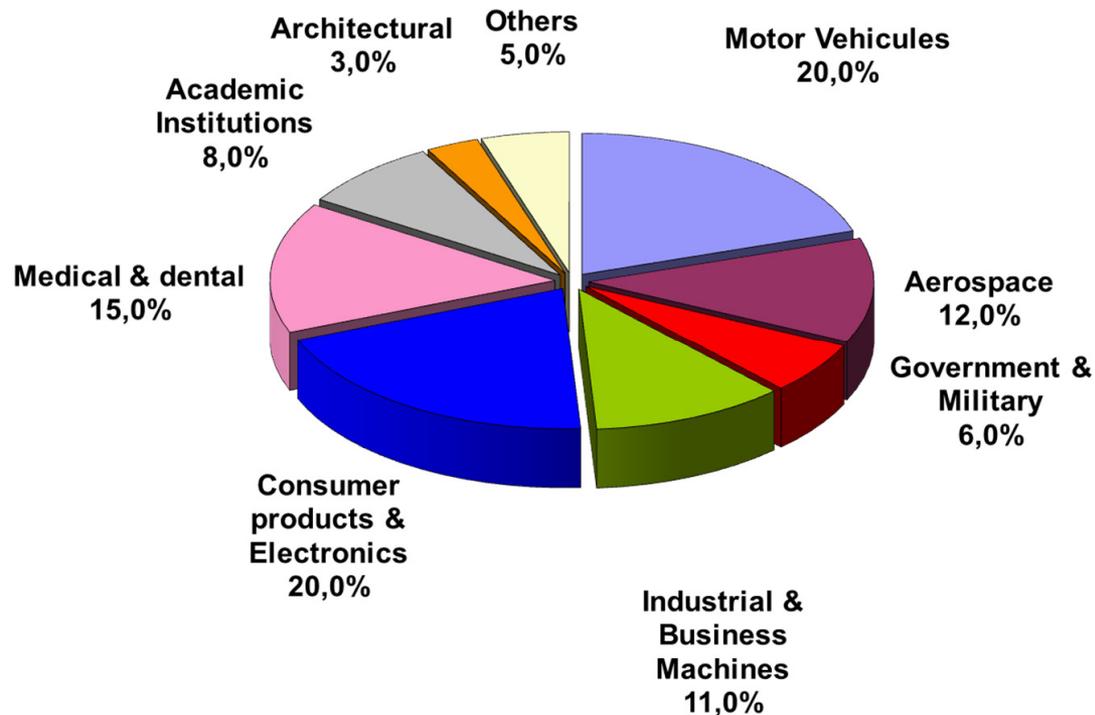
Source : Wohlers Report 2010

# Ventes d'imprimantes 3D professionnelles dans le monde



Source: Wohlers Report 2013

# Le marché de la fabrication additive



## CA Fab. additive :

**2001 : 538 M\$**

**2012 : 2 204 M\$**

**2017 : 6 000 M\$**

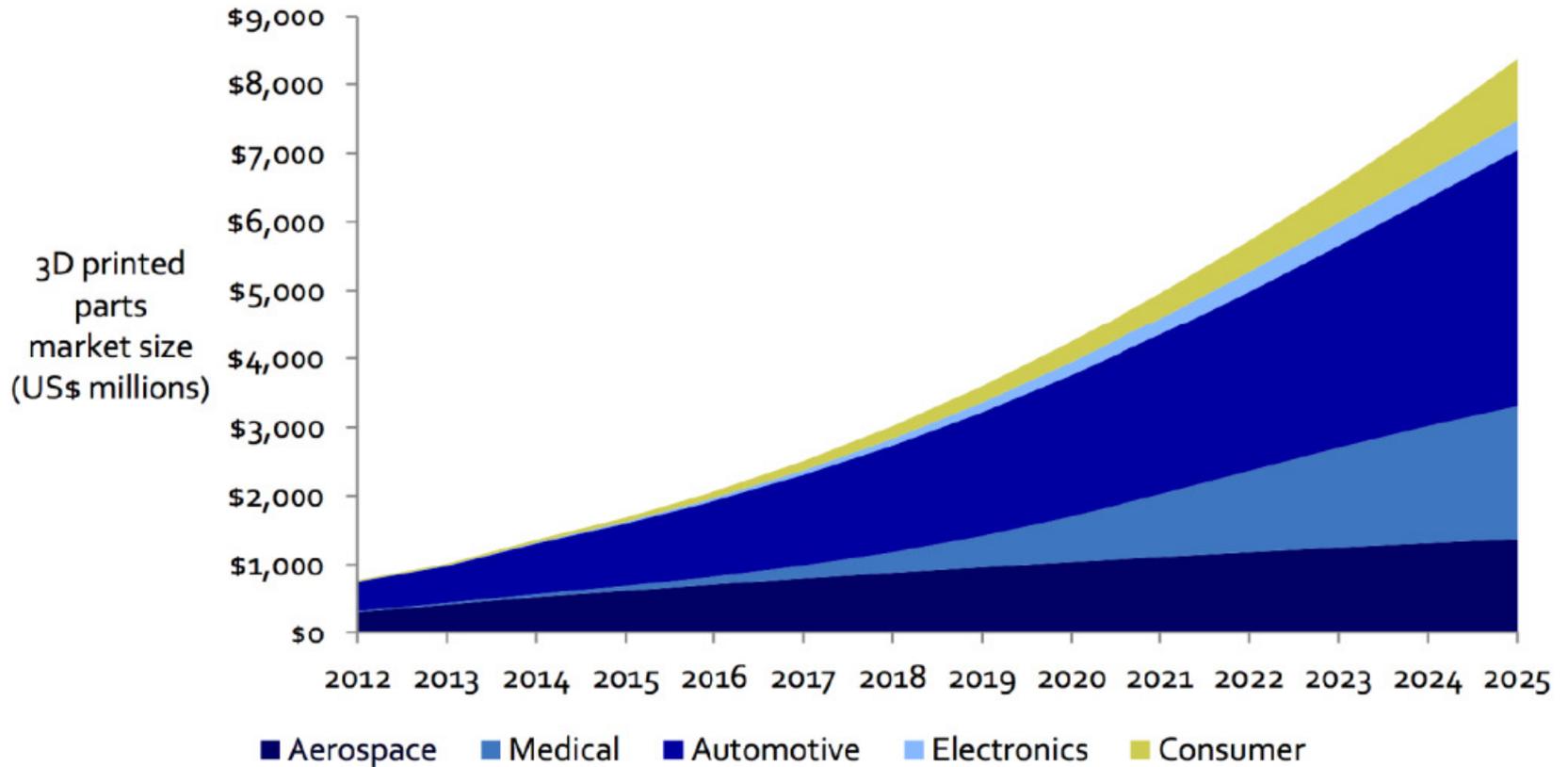
**2020 : 10 800 M\$**



■ + 27,4%/an sur les 3 dernières années

■ X 4,9 d'ici 2020

# Evolution du marché

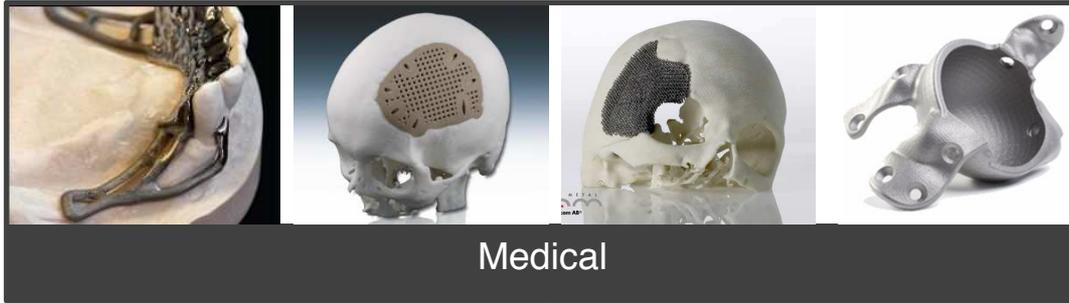


Source : Lux Research

# Des répercussions économiques et sociales majeures

- L'impression 3D pourrait avoir des répercussions économiques et sociales majeures qui concernent à la fois les activités B2B et B2C, puisqu'il s'agit d'une technologie qui touche grand public.
- La capacité de fabriquer facilement à domicile des objets de la vie courante revient à mettre en concurrence le consommateur et l'industriel.
- Ces phénomènes ont par le passé contribué à bouleverser considérablement des industries comme celle du développement photo (avec l'apparition du numérique et des imprimantes personnelles) ou du CD (avec l'échange entre pairs de fichiers musicaux par Internet). Ils s'appliqueront désormais aux objets en 3D.
- Davantage que remplacer une technologie, l'impression 3D apporte un niveau de service différent et justifie ainsi un coût supérieur.
- Une trentaine d'acteurs se partagent le marché, dont les leaders sont Stratasys Ltd, 3D System Corporation et EOS.

## Tooling



## Medical

## Automotive



LaserCUSING®  
Quelle: Concept Laser GmbH

LaserCUSING®  
Quelle: Concept Laser GmbH

# Additive Manufacturing Applications

## Aerospace



# Les principaux constructeurs pour la fabrication additive métallique

| Technology                   | Manufacturer   | Country  |
|------------------------------|--|--|
| Selective Laser Sintering    | 3D Systems<br>EOS<br>Trumpf  | USA<br>Germany<br>China                                |
| Direct Metal Laser Sintering | EOS  | Germany  |
| Selective Laser Melting      | MTT (now 3D systems)<br>Phenix System<br>Concept Laser<br>Realizer<br>SLM Solutions<br>Wuhan Binhu | UK<br>France<br>Germany<br>Germany<br>Germany<br>China |
| Electron Beam Melting        | Arcam  | Sweden   |
| Direct Metal Deposition      | Optomec<br>POM<br>IREPA Laser<br>Accufusion  | USA<br>USA<br>France<br>Canada                         |

# Exemple dans l'aérospatial (1)

Aerospace

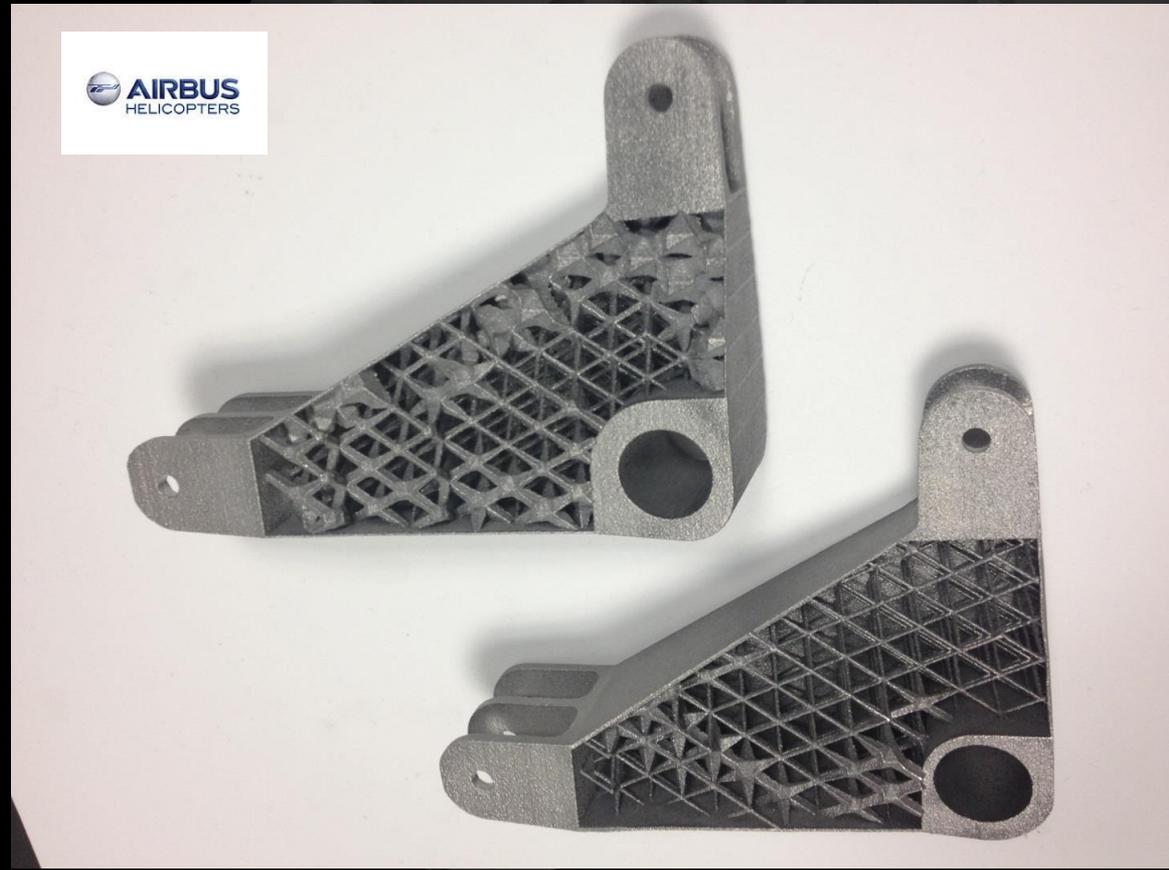


**53 flying metal parts in the nEUROn since  
December 2012**

# Exemple dans l'aérospatial (2)

Aerospace

Weight reduction in an Helicopter part



**Different designs for different loading cases**

# A 3D-Printed Jet Engine



*The 3D printed proof-of-concept jet engine on display at the International Air Show in Avalon, Victoria*

- A group of researchers at an Australian university, along with its spinoff company, have used 3D printing to make two metal jet engines that, while only proof-of-concept designs, have all the working parts of a functioning gas turbine engine.
- The two engines, created by Monash University and its spinoff Amaero Engineering, are garnering a lot of attention from leading aeronautics companies, including Airbus, Boeing and defense contractor Raytheon, which are lining up at the Monash Centre for Additive Manufacturing in Melbourne to develop new components with 3D printing.
- One of the proof-of-concept jet engines was on display this week at the International Air Show in Avalon, Victoria. The second is being displayed at the French aerospace company Microturbo, which originally challenged the university two years ago to build the engines

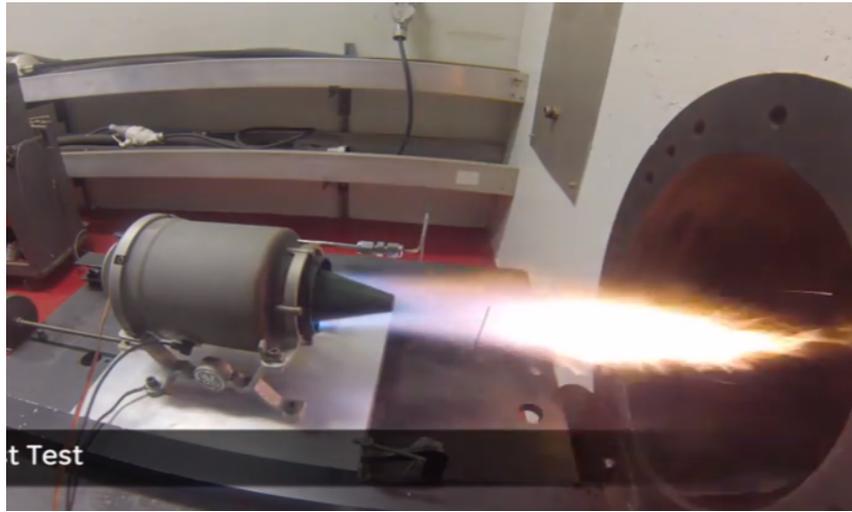
# Additive Manufacturing of the Jet Engine



- The 3D-Printed components of the Jet Engine.
- Their manufacturing demonstrates that engineers can produce jet engine test parts in days instead of the months
- The jet engines were printed using an additive manufacturing (3D printing) technique known as selective laser sintering or melting, where a high-powered laser on a robotic head melts metal powder layer by wafer-thin layer.
- The engines were printed using the X-Line 1000R 3D printer from Concept Laser, a machine that Amaero calls the largest selective laser-melting (SLM) machine available. The machine is capable of sintering together metal layers anywhere from 30 to 200 microns thick.
- The 1,800-lbs machine is about 14-ft. x 10-ft. x 14-ft in size. It can build parts with dimensions as large as 25-in. x 16-in. x 20-in. in size.



# GE is working on developing next-generation turbines using 3D printing



*The first test of the GE 3D printed jet engine*

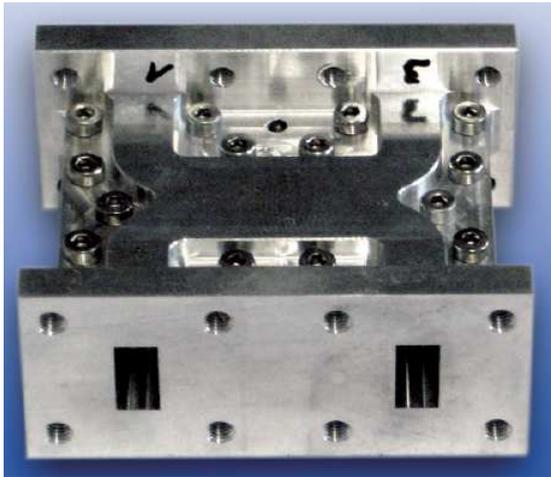


*The many parts of the 3D printed jet engine*

- General Electric has completed in May 2015 a multi-year project to print a working jet engine. The engine, small enough to fit in a backpack, was built by a team of technicians, machinists and engineers at GE Aviation's Additive Development Center outside Cincinnati.
- The lab is working with additive manufacturing as a way to produce next-generation jet parts using a technique known as (DMLM). The engine also required some post-printing machining and polishing of parts.
- The engine, which consisted of more than a dozen parts, was printed on an M270 industrial 3D printer from EOS. The machine can melt a variety of alloys, including cobalt chrome, nickel alloy, titanium and stainless steel.
- The M270 3D printer allowed the GE engineers to use high-temperature alloys not typically available to the radio-controlled engine industry. The resulting engine from GE's 3D printing process endured numerous tests and the turbine achieved a speed of 33,000 rpm.

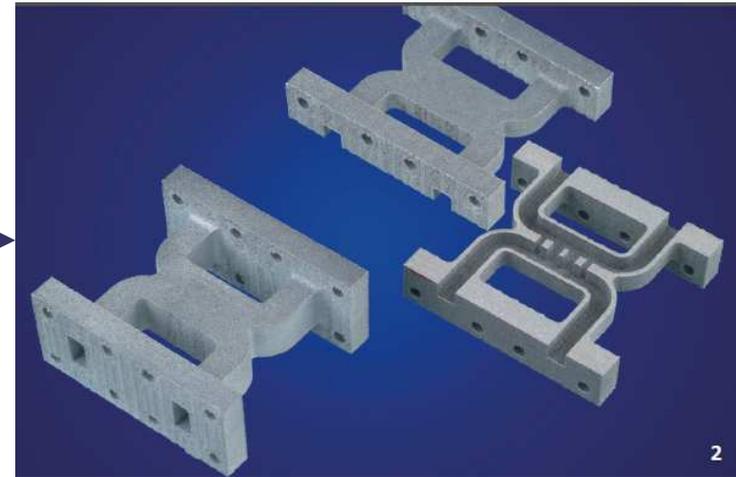
# Fabrication additive de composants pour satellites

- Example of application from the Fraunhofer Institute for Laser Technology (ILT) on Aluminum antenna components (Source : ILT annual report 2009)



*Coupler manufactured with conventional techniques (machining)*

Weight Reduction by ~ 40%

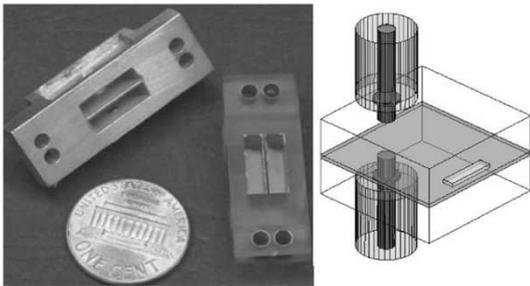


*Coupler manufactured Selective Laser Melting (SLM)*

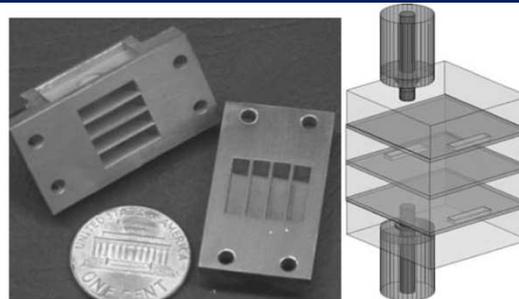
# Non-planar antenna and multipole filters (polymer)

- Flexibility of Additive Manufacturing enables to design filters vertically,
- Polymer antenna structure is then coated with a conductive ink layer and electroplated to form a  $40\mu\text{m}$  copper layer on all surfaces,

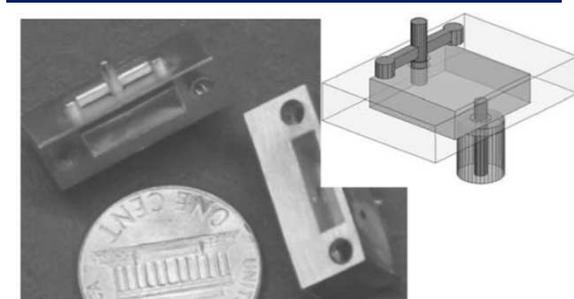
Vertically Integrated two-pole filter



Vertically Integrated four-pole filter



Integrated monopole antenna



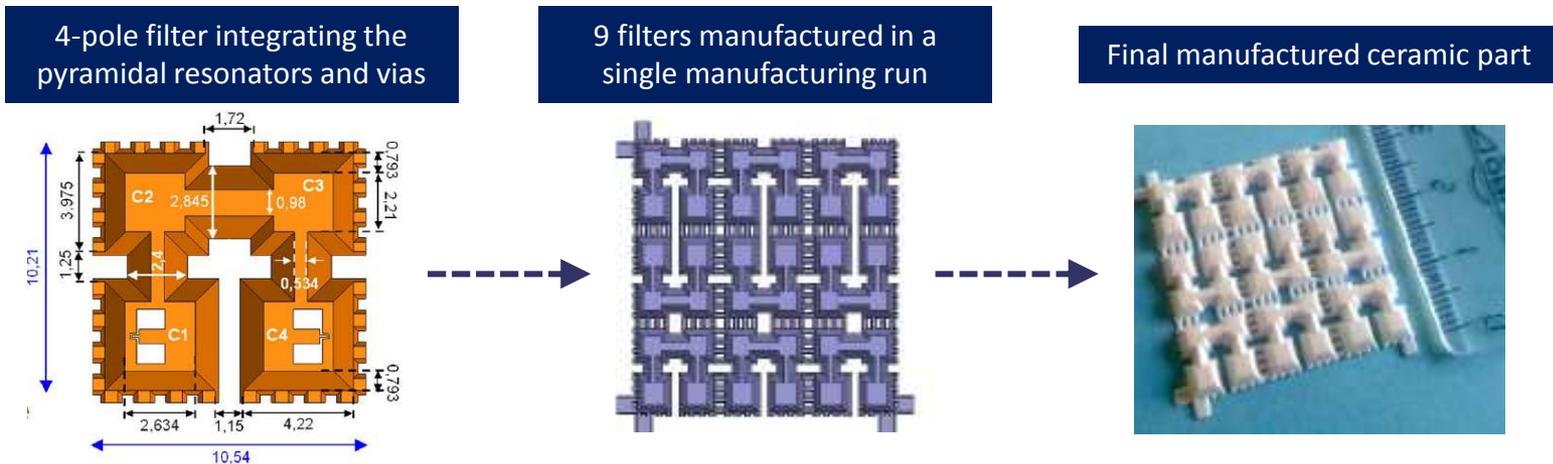
*Applications of Layer-by-Layer Polymer Stereolithography for Three-Dimensional High-Frequency Components*  
*IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 52, NO. 11, NOVEMBER 2004 2567*  
*Bosui Liu, Member, IEEE, Xun Gong, Student Member, IEEE, and William J. Chappell, Member, IEEE*

Additive Manufacturing enables the realization of more complex structures and a higher level of integration for high-performance RF component.

This process is suitable for the integration of high-frequency and high-Q truly 3D structures within a package

# 3D pyramidal and collective Ku band pass filters (ceramic)

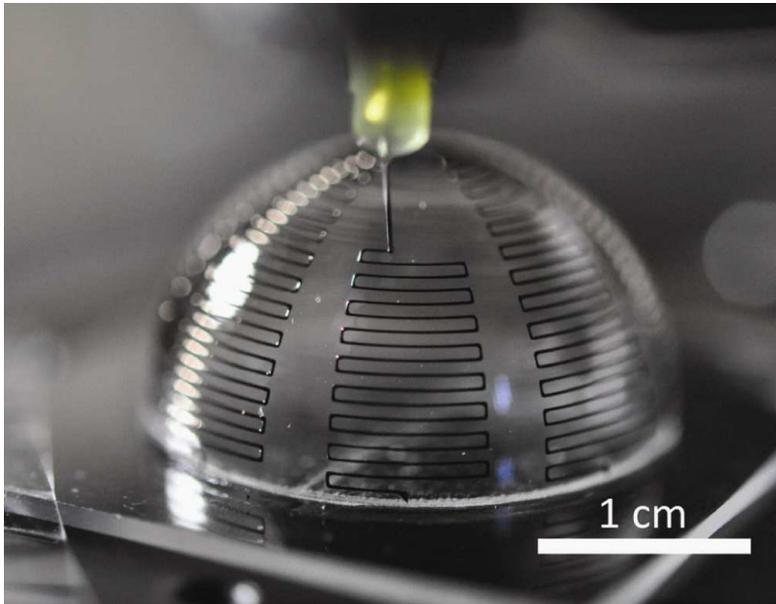
- Ceramic material presents the advantage of having very low loss at microwave frequency and a relatively high permittivity which could help to decrease the volume of resonators and filters.
- Additive Manufacturing allows to produce compact and low loss alumina resonators for space applications (footprint less than 15mm by 15mm in the upper Ku band (17.5GHz) with a thickness lower than 2.5mm).



3-D pyramidal and collective Ku band pass filters made in Alumina by ceramic stereolithography  
IEEE/MTT-S International Microwave Symposium , Baltimore, USA, 2011  
A. H. Khalil, N. Delhote, S. Pacchini, J. Claus, D. Baillargeat, S. Verdeyme, H. Leblond

3D 4-pole compact and low loss filter has been proven with additive manufacturing  
→ Up to 4000 filters could be manufactured in one single step

# 3D printed antenna on curvilinear surfaces



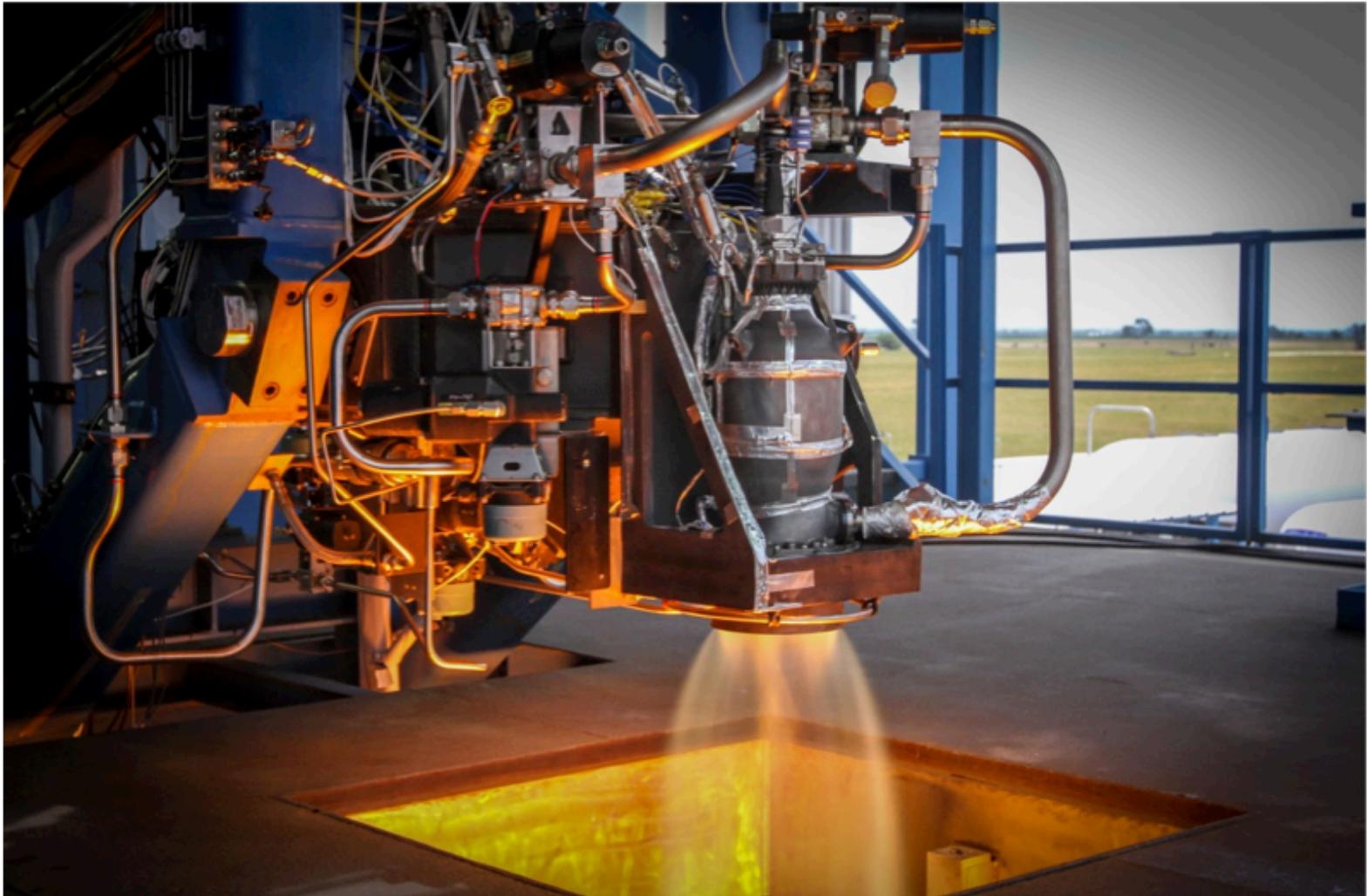
Omnidirectional printing of metallic nanoparticle inks (silver) offers an attractive alternative for meeting the demanding form factors of 3D Electrically Small Antennas (ESAs)

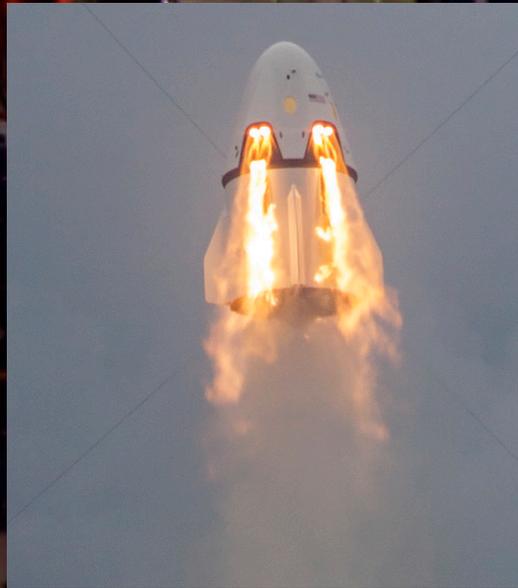
*Adams, J. J., Duoss, E. B., Malkowski, T. F., Motala, M. J., Ahn, B. Y., Nuzzo, R. G., Bernhard, J. T. and Lewis, J. A. (2011), Conformal Printing of Electrically Small Antennas on Three-Dimensional Surfaces., Adv. Mater., 23: 1335–1340. doi: 10.1002/adma.201003734*

Conformal printing of electrically small antennas onto the convex and concave surfaces of hemispherical glass substrates has been demonstrated

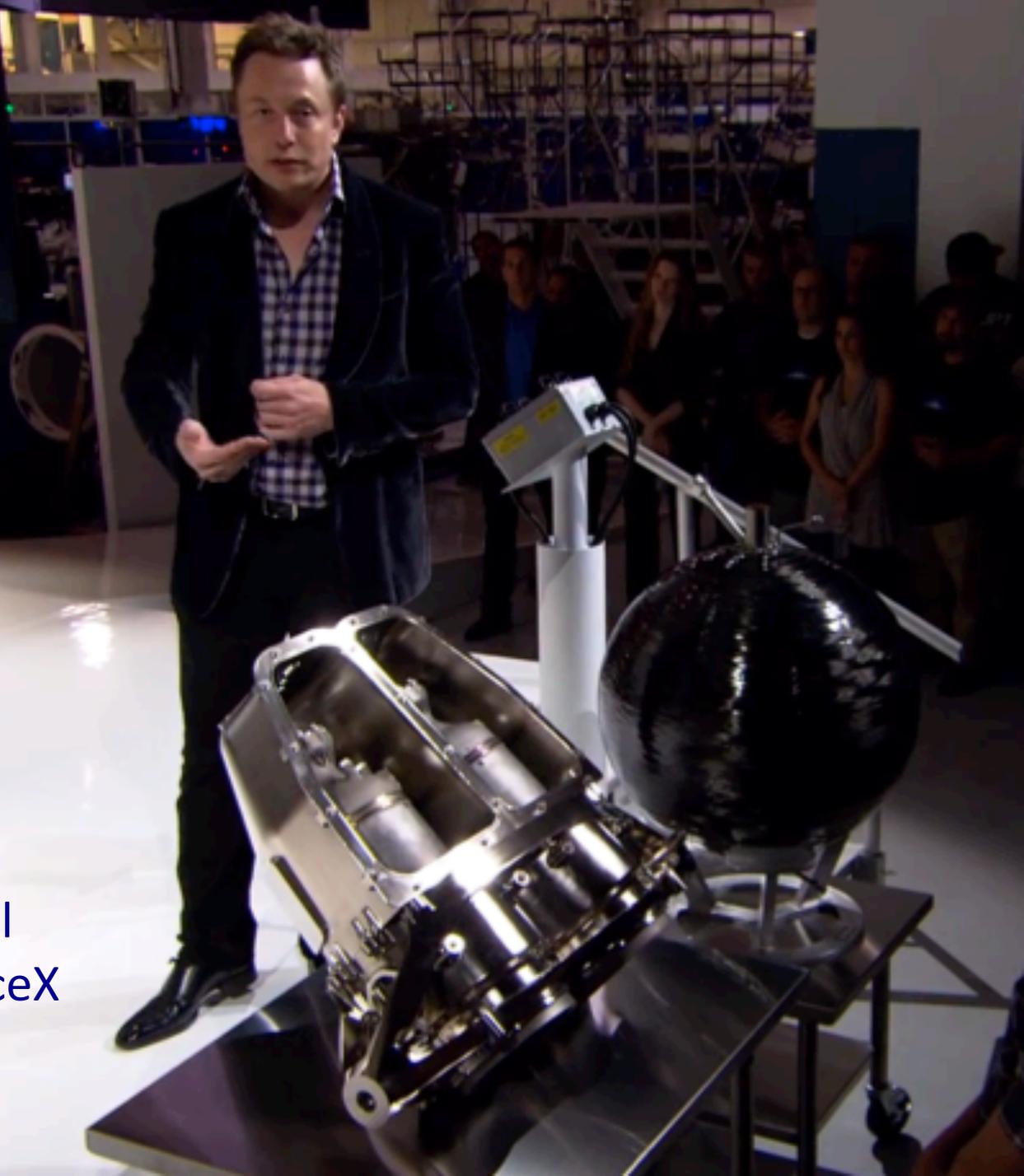
→ Offers nearly an order of magnitude improvement in bandwidth over rudimentary monopole designs

*“Through 3D printing, robust and high-performing engine parts can be created at a fraction of the cost and time of traditional manufacturing methods,” said Elon Musk, Chief Designer and CEO. “SpaceX is pushing the boundaries of what additive manufacturing can do in the 21st century, ultimately making our vehicles more efficient, reliable and robust than ever before.” (SpaceX, 2014)*





Elon Musk présentant le  
moteur Super Draco qui  
équipe le vaisseau spatial  
piloté Dragon V2 de SpaceX



*L'impression 3D ouvre des perspectives extrêmement intéressantes pour les activités humaines dans l'espace, avec des premières applications dans l'ISS*

# 3D PRINTING IN SPACE

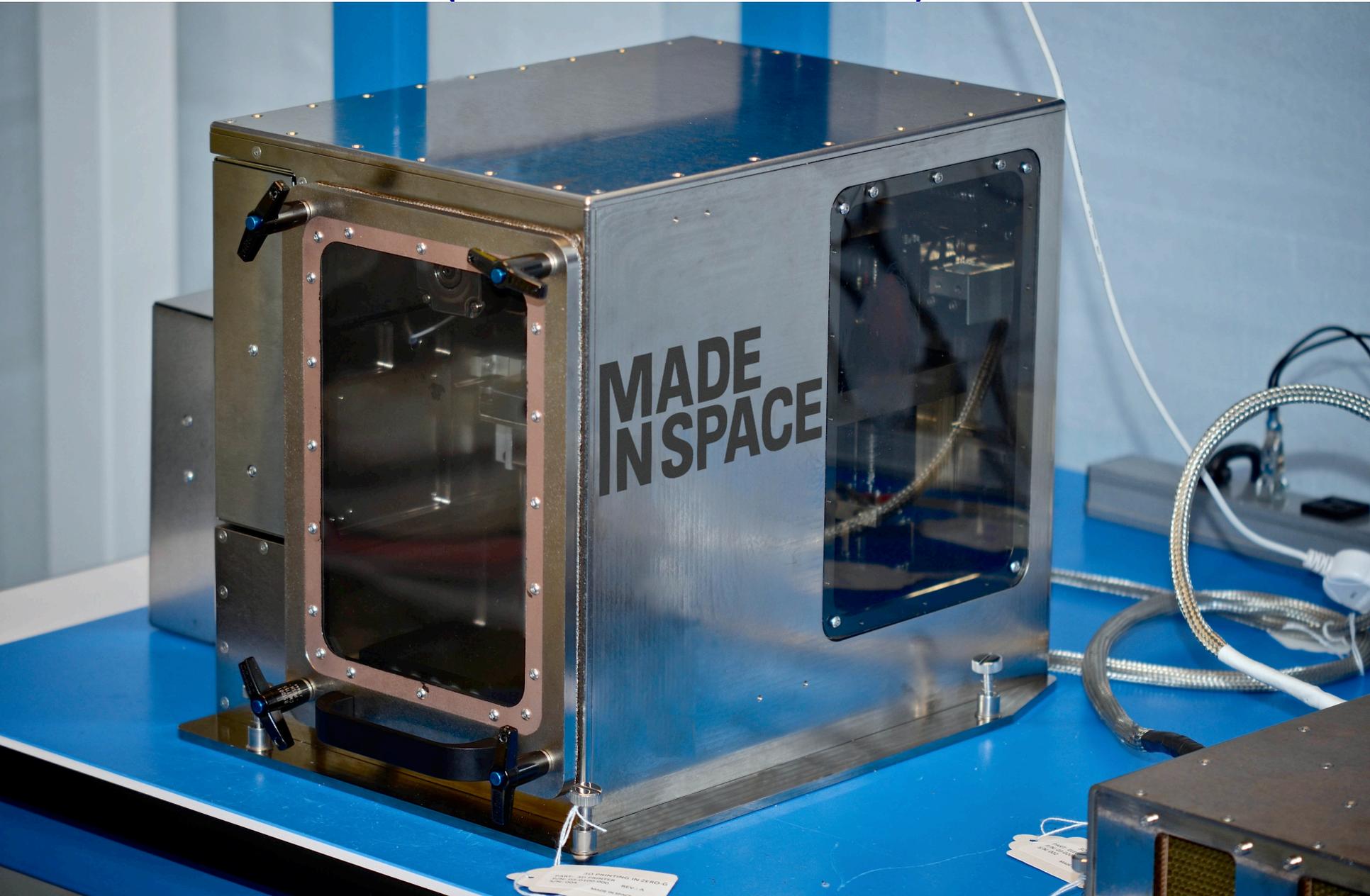
**1. Printing instructions are beamed from Earth**

**2. The Zero-G 3D Printer begins printing aboard the International Space Station**



**3. The printed object is removed from the printer, ready for use.**

# La première imprimante 3D dans l'espace (lancée en août 2014)



# Les éléments d'une base lunaire pourraient être fabriqués en impression 3D (concept ESA)



*Setting up a lunar base could be made much simpler by using a 3D printer to build it from local materials. Industrial partners including renowned architects Foster + Partners have joined with ESA to test the feasibility of 3D printing using lunar soil*

# L'impression 3D pourrait être encore plus importante pour la conquête de Mars



Fabrication d'habitats, d'appareils divers et de pièces de rechange, de robots, d'instruments chirurgicaux, de médicaments, d'aliments et... d'autres imprimantes 3D, le tout à partir des matériaux martiens

# Applications médicales



Hip socket, Ala Ortho, Italy, made on Arcam machine



Laser Sintered Hearing Aids, EOS/  
Materialise

# Implants médicaux réalisés par impression 3D



(a)



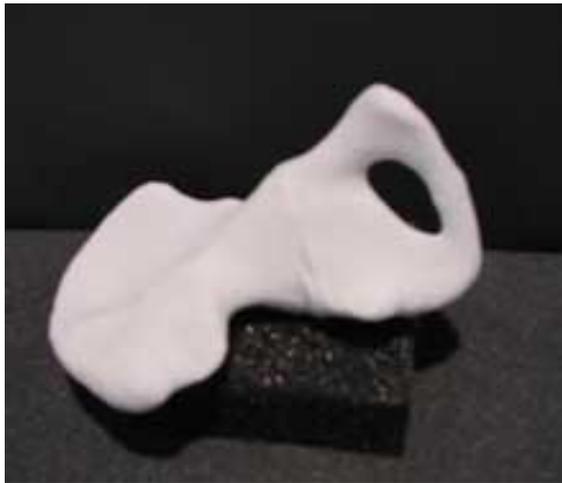
(b)



(c)



(d)



Prototypes pour applications médicales

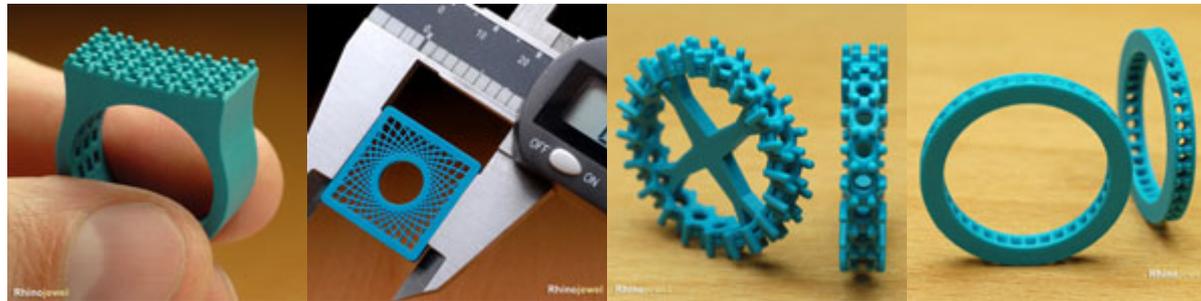
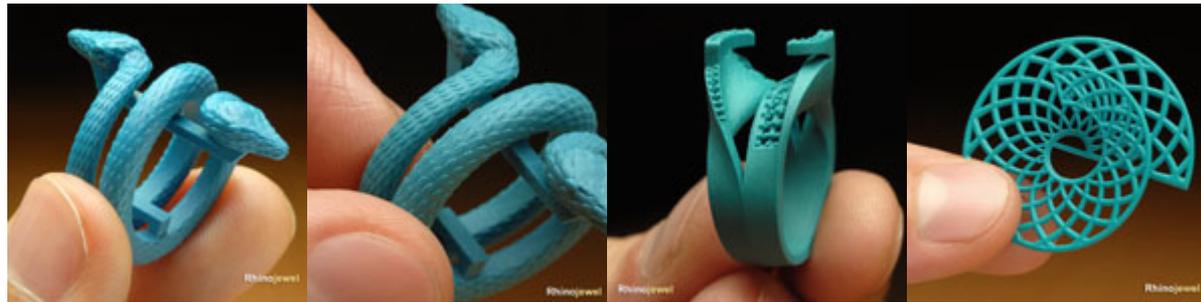


Couronnes et bridges dentaires fabriqués sur des machines EOS

## Application à la fabrication de bijoux



Patterns for Casting



## Design de bijoux



## Usages artistiques



# L'exemple de Sculpteo

## **Sculpteo : quand le consommateur devient créateur-producteur-distributeur**

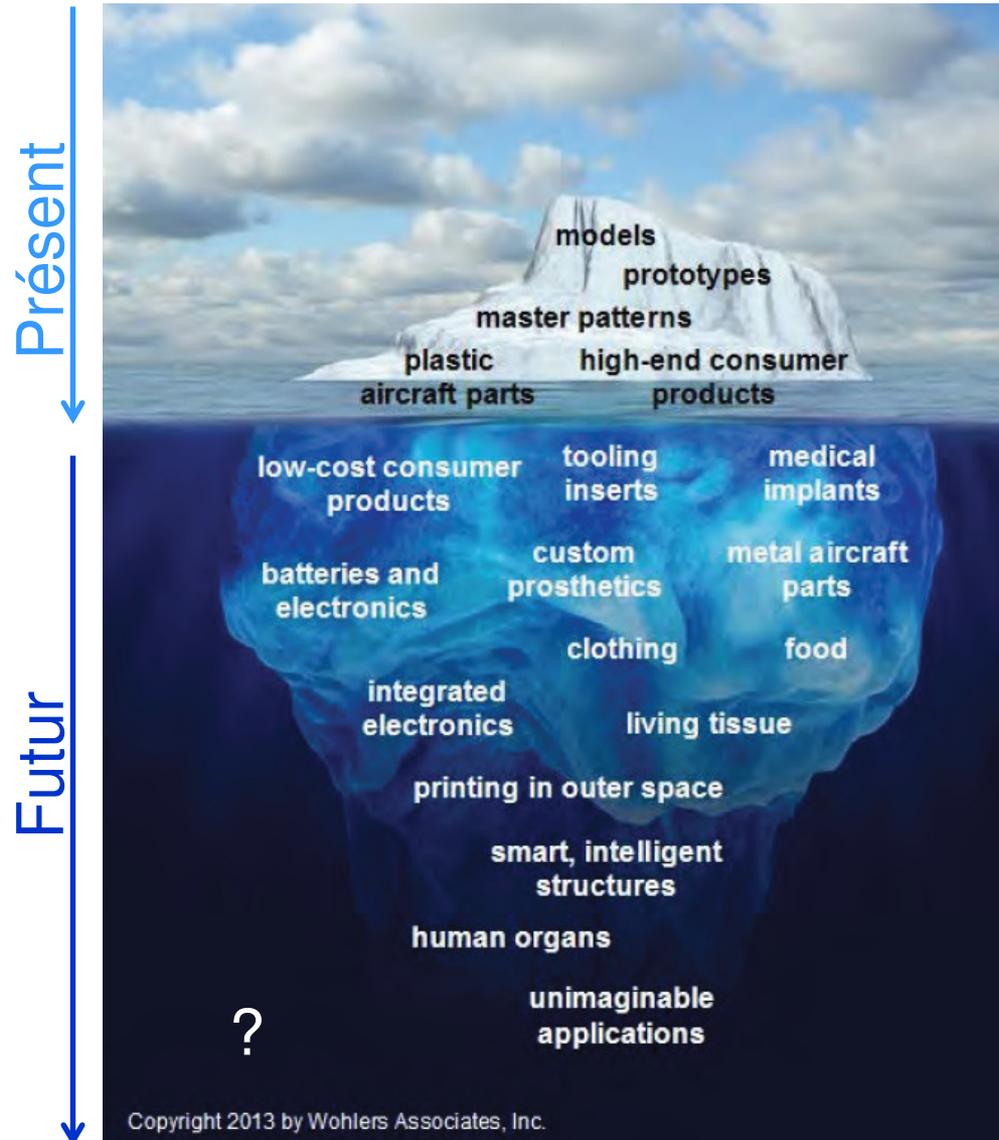
- Sculpteo permet au client de télécharger un fichier 3D et d'imprimer l'objet en question à partir d'une quarantaine de matériaux.
- La spécificité de Sculpteo est d'avoir créé un moteur logiciel dans le *cloud* permettant à chacun, particulier ou entreprise, de transmettre le dessin d'un objet à réaliser sur un serveur qui va le corriger, lui affecter un prix et le commander en ligne en fournissant un délai de livraison.
- Au départ, Sculpteo pensait que chacun souhaiterait dessiner son propre objet, le temps libre aidant à faire du consommateur un véritable créateur. Mais, paresse ou absence de don créatif, il semble que la plupart des clients préfèrent choisir un objet dans un catalogue ou se tourner vers la plate-forme participative facilitant l'échange et le partage de fichiers de design 3D et de bénéficier des conseils de designers 3D.
- Sculpteo tente de développer le marché de l'objet personnalisé : accessoires de *smartphone* (un marché de plusieurs milliards de dollars cette année), bijouterie-joaillerie (à partir des croquis de leurs bijoux, certains grands joailliers utilisent des imprimantes 3D pour produire un moule utilisé ensuite selon la méthode de la cire perdue) et art de la table (marché encore confidentiel car les pièces sont grandes, donc chères)...



# Fabrication de prototypes



# L'avenir de la fabrication additive





# Un FabLab, des FabLabs... Une charte



## Charte des Fab Labs

**Mission** : les fab labs sont un réseau mondial de laboratoires locaux, qui rendent possible l'invention en ouvrant aux individus l'accès à des outils de fabrication numérique.

**Accès** : vous pouvez utiliser le fab lab pour fabriquer à peu près n'importe quoi (dès lors que cela ne nuit à personne) ; vous devez apprendre à le fabriquer vous-même, et vous devez partager l'usage du lab avec d'autres usages et utilisateurs.

**Education** : la formation dans le fab lab s'appuie sur des projets et l'apprentissage par les pairs ; vous devez prendre part à la capitalisation des connaissances à et à l'instruction des autres utilisateurs.

**Responsabilité** : vous êtes responsable de :

- La sécurité : Savoir travailler sans abimer les machines et sans mettre en danger les autres utilisateurs ;
- La propreté : Laisser le lab plus propre que vous ne l'avez trouvé ;
- La continuité : Assurer la maintenance, les réparations, la quantité de stock des matériaux, et reporter les incidents ;

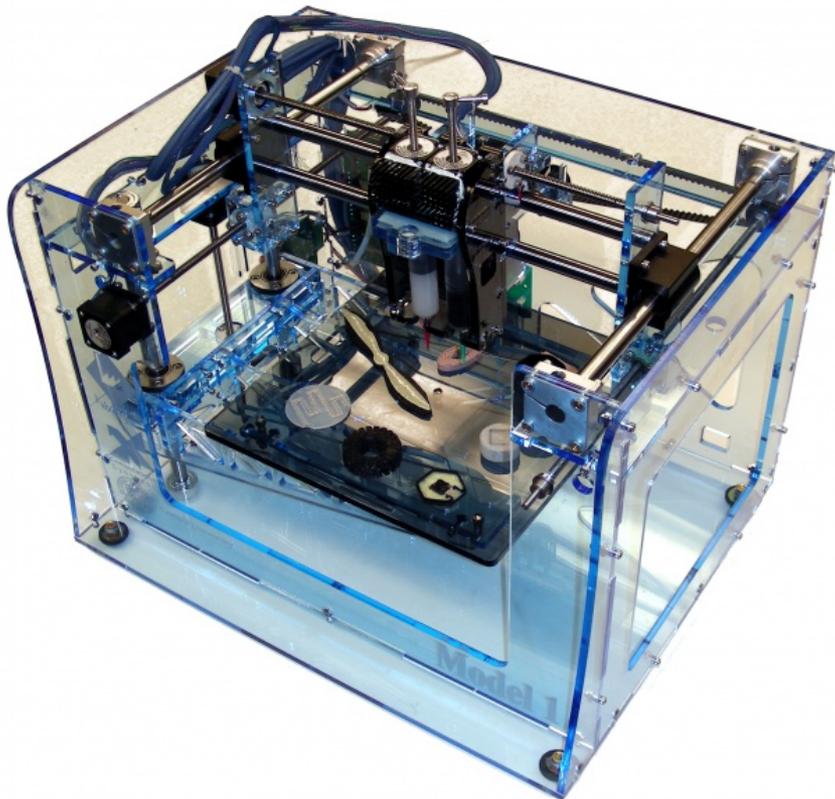
**Secret** : les concepts et les processus développés dans les fab labs doivent demeurer utilisables à titre individuel. En revanche, vous pouvez les protéger de la manière qui vous choisissez.

**Business** : des activités commerciales peuvent être incubées dans les fab labs, mais elles ne doivent pas faire obstacle à l'accès ouvert. Elles doivent se développer au-delà du lab plutôt qu'en son sein et de bénéficier à leur tour aux inventeurs, aux labs et aux réseaux qui ont contribué à leur succès.

# Do it Yourself FDM rapid prototyping (cost under \$5K)

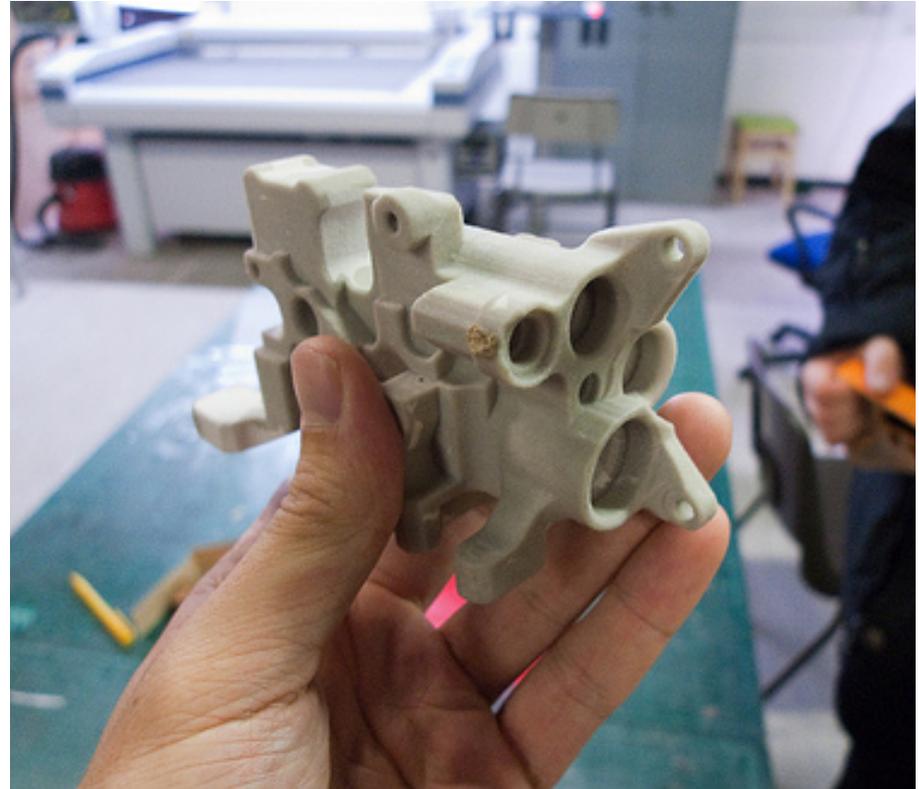
- FAB@Home

- RepRap



# 3-D Printing: A Factory in Every Home?

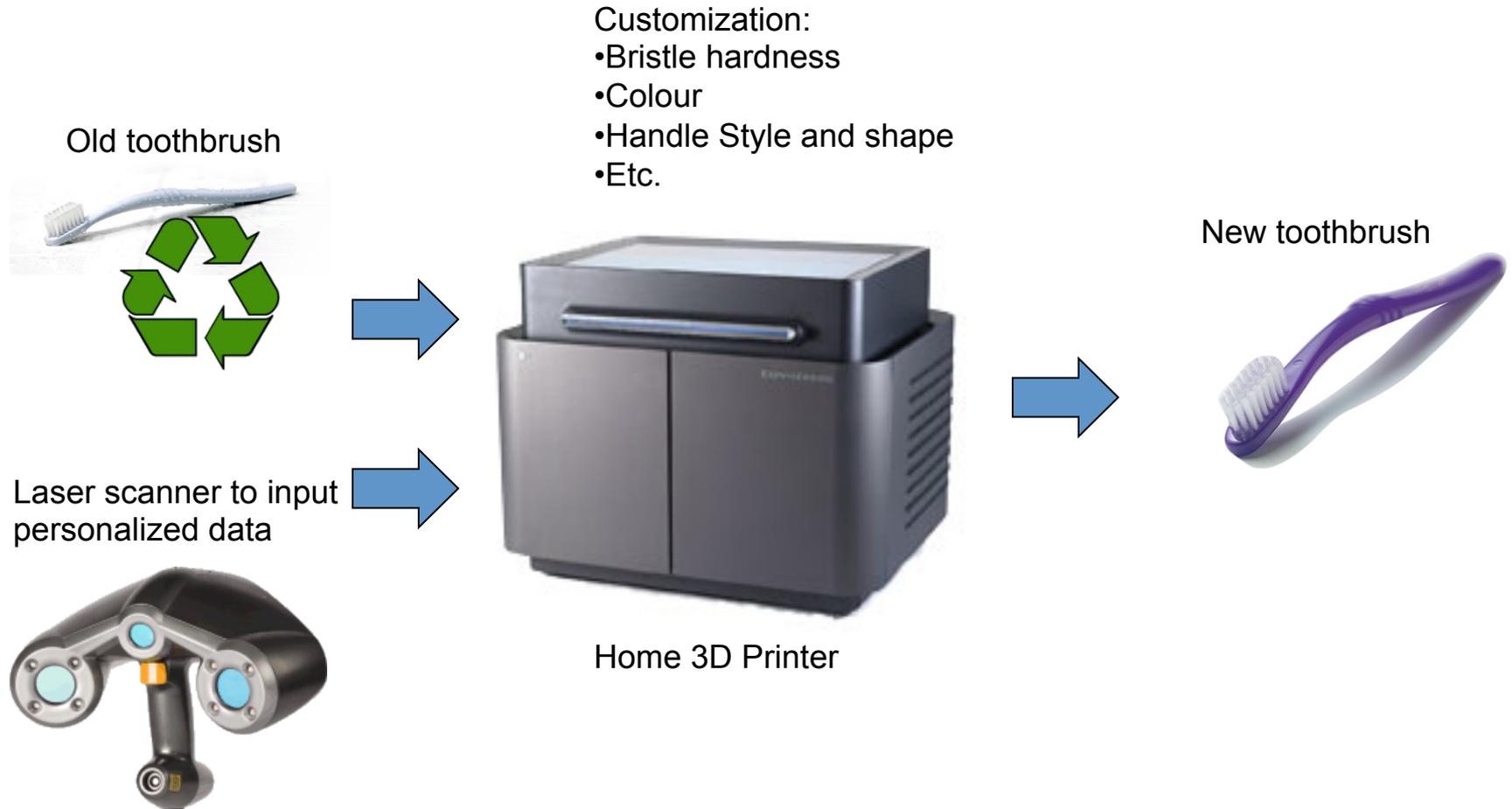
- Reversal of previous patterns?
  - Radical decentralization of production?
  - Integration of industrial and residential uses?



Source: [www.blog.programmableweb.com](http://www.blog.programmableweb.com)

Date accessed: 1/28/2014

# Home Manufacturing

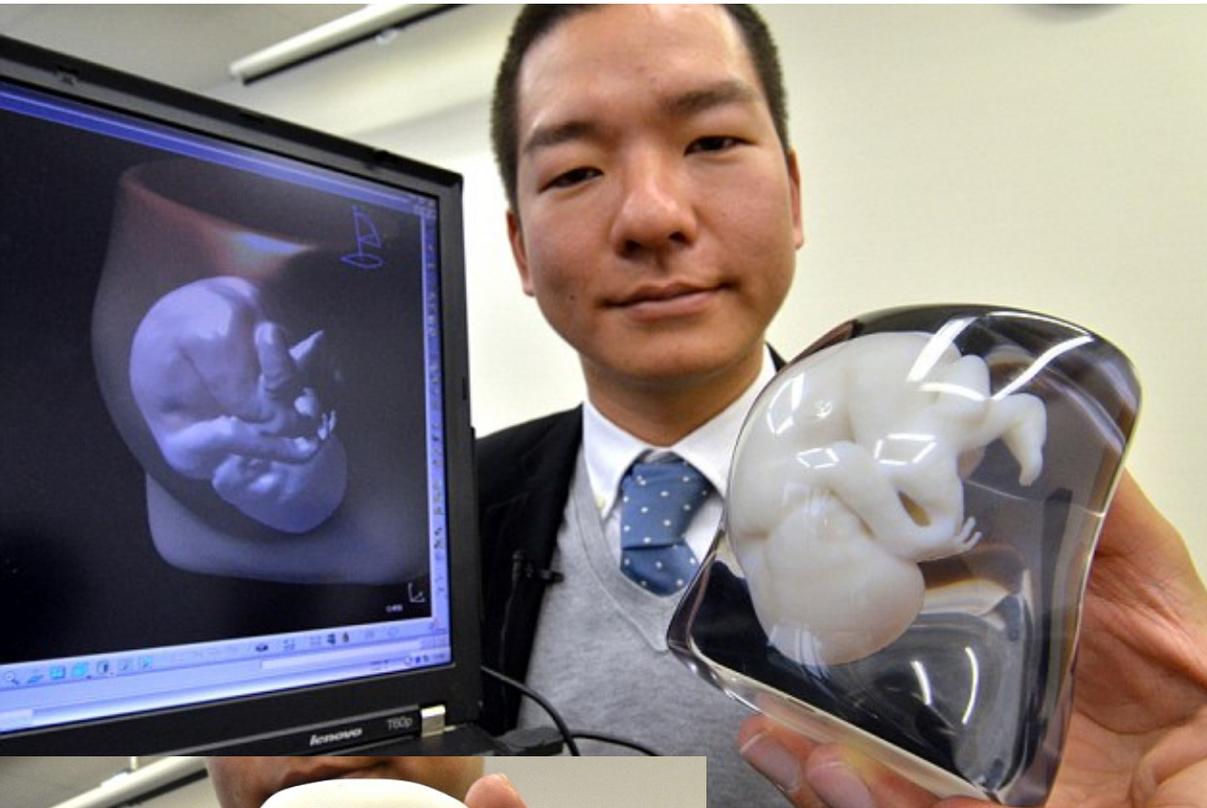


But will this just lead every Joe Bloggs producing badly designed products?

# Food Printers

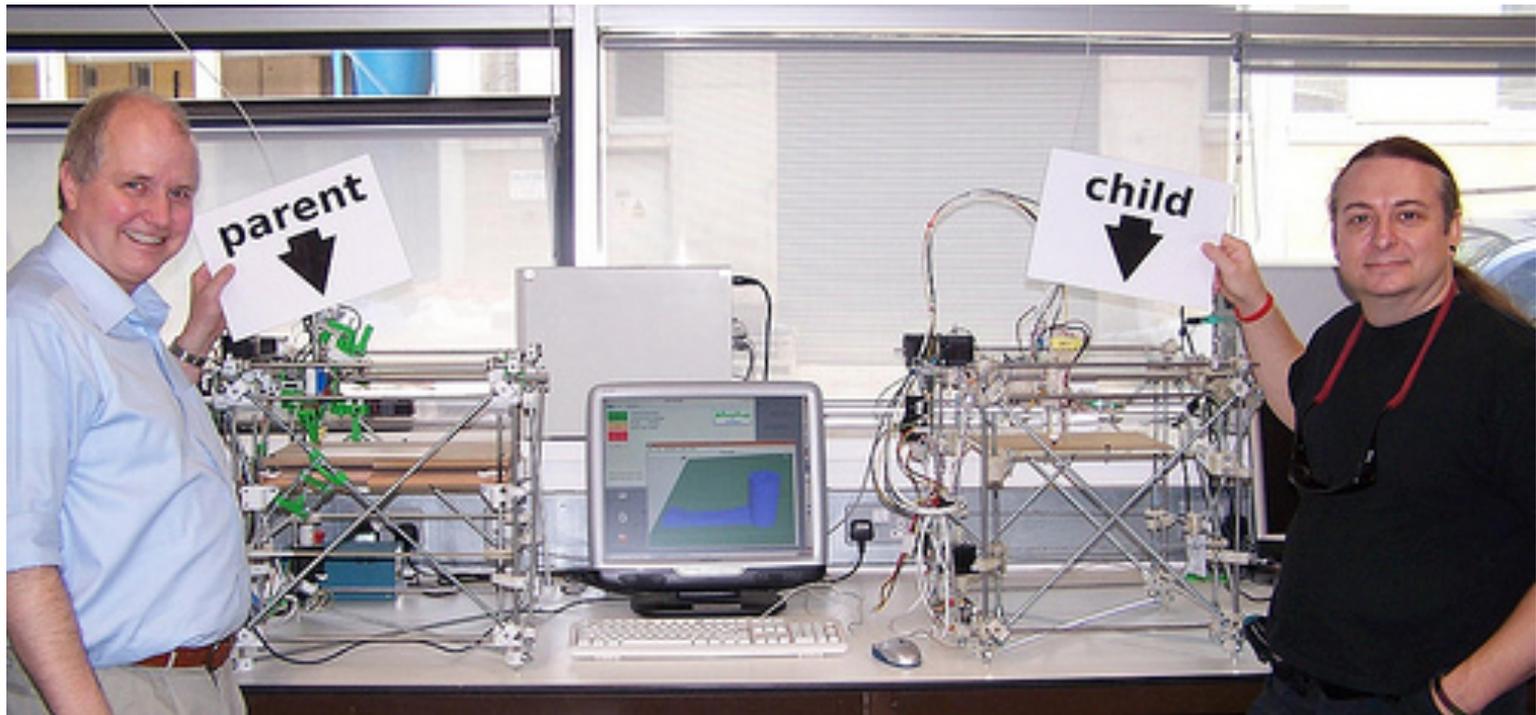


# Know your baby before its born...



Tomohiro Kinoshita , of FASOTEC, the company offering the 'Shape of an Angel' model, even offers parents a miniature version which could be a 'nice adornment to a mobile phone strap or key chain.'

# The Future ? Self-replication !



[RepRap](#) achieved self-replication at 14:00 hours UTC on 29 May 2008 at Bath University in the UK. The machine that did it - RepRap Version 1.0 “Darwin” - can be built now - see the [Make RepRap Darwin](#) link there or on the left, and for ways to get the bits and pieces you need, see the [Obtaining Parts link](#).

*Merci de votre attention. Questions ?*

