

# Quand la fabrication additive peut apporter une nouvelle dimension aux objets...

**Samuel Kenzari**

[samuel.kenzari@univ-lorraine.fr](mailto:samuel.kenzari@univ-lorraine.fr)

Equipe de Recherche Technologique 'Matériaux et Procédés Additifs'

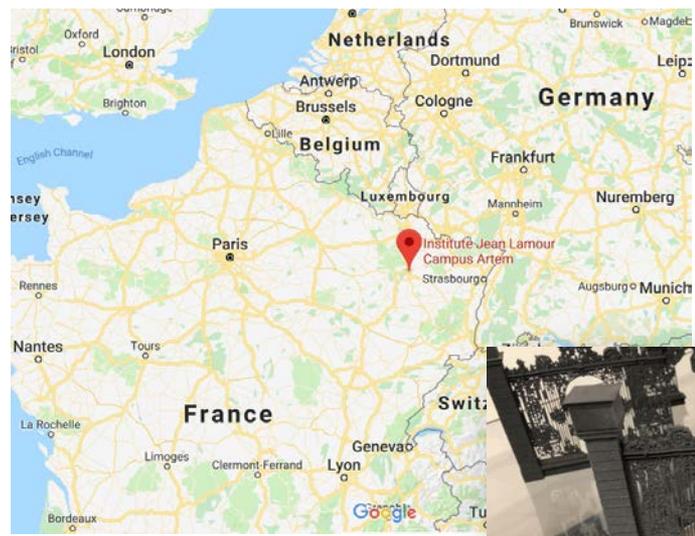
Institut Jean Lamour, Campus ARTEM, Nancy



**AEI 2022**  
MONTPELLIER

# Institut Jean Lamour

CNRS – Université de Lorraine



IJL - Institut Jean Lamour - UMR 7198  
Matériaux-Métallurgie-Nanosciences-Plasmas-Surfaces

## Campus ARTEM NANCY



## UNE PLATEFORME AU SERVICE DE L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE :

La Plateforme d'Elaboration Additive (PEA) a été finalisée fin 2020 par l'équipe de recherche technologique Matériaux et Procédés additifs de l'IJL. Elle offre la possibilité d'élaborer et mettre en forme une grande variété de matériaux par ajout successif de matière (procédés additifs).

Elle comporte 4 salles : (1) Préparation, (2) Fusion laser polymère, (3) Fusion laser métallique, (4) Extrusion/dépôt de matière. Chaque zone est totalement sécurisée, avec des sas, où l'ensemble est placé en dépression contrôlée, climatisée et filtrée.

PEA permet aujourd'hui d'être au plus proche des niveaux de maturités technologiques requis pour faciliter la valorisation et le transfert vers les applications industrielles.

## THÉMATIQUES DE RECHERCHE :



### MATÉRIAUX BASE POLYMÈRE POUR L'IMPRESSIION 3D / 4D

L'impression 3D/4D de matériaux évolutifs/actifs au cours du temps (ou dans l'espace) est une thématique extrêmement porteuse d'innovations technologiques.

Depuis quelques années l'équipe développe cette activité d'impression 3D/4D en collaboration avec de nombreux acteurs académiques et industriels. Les objectifs visés concernent l'obtention d'objets magnéto-actifs, photo-actifs, électro-actifs pouvant être intégrés directement à la fabrication 3D de dispositifs 4D fonctionnels.

L'équipe s'implique dans une importante dynamique régionale dans le Grand Est pour mettre au point des matériaux adaptés aux besoins technologiques du futur.



### MATÉRIAUX BASE MÉTALLIQUE POUR L'IMPRESSIION 3D / 4D

Les axes de recherche développés sont :

- La fabrication additive de nouveaux matériaux métalliques, composites ou méso-structurés
- La mise au point de matériaux poreux architecturés en 3D (optimisés pour subir des post-traitements d'infiltration métallique ou polymère).

L'objectif final est de créer des matériaux modulables (possédant des caractéristiques physiques ou géométriques qui évoluent dans le temps et/ou possédant des gradients de propriétés fonctionnelles). Il s'agit là d'un domaine exploratoire.



### MATÉRIAUX ANTI CONTRE-FAÇON POUR L'IMPRESSIION 2D, 3D, ETC.

Les technologies additives et toute la chaîne numérique amont sont aujourd'hui aptes à reproduire très précisément des composants dans leur forme et finition. Ceci ouvre une nouvelle porte à la contrefaçon par des équipements de plus en plus accessibles. L'impact économique, la dégradation de l'image de marque des entreprises, la non-maîtrise des propriétés physico-chimiques des matériaux employés dans la contrefaçon (risques de non-conformités et des défaillances potentiellement lourdes de conséquences) sont alarmants.

L'équipe lutte contre ce phénomène en mettant au point certain matériaux (adaptés et mis en forme par toutes les technologies polymères). Ils contiennent des signatures cristallographiques uniques non déchiffrables après leur élaboration.

Ainsi, chaque matériau peut être utilisé comme une empreinte unique dans un objet considéré. Finalement, l'utilisation de ces matériaux peut aussi être envisagée dans tous les secteurs applicatifs victimes de la contrefaçon.



SALLE 1 : PRÉPARATION



SALLE 2 : FUSION LASER POLYMÈRE

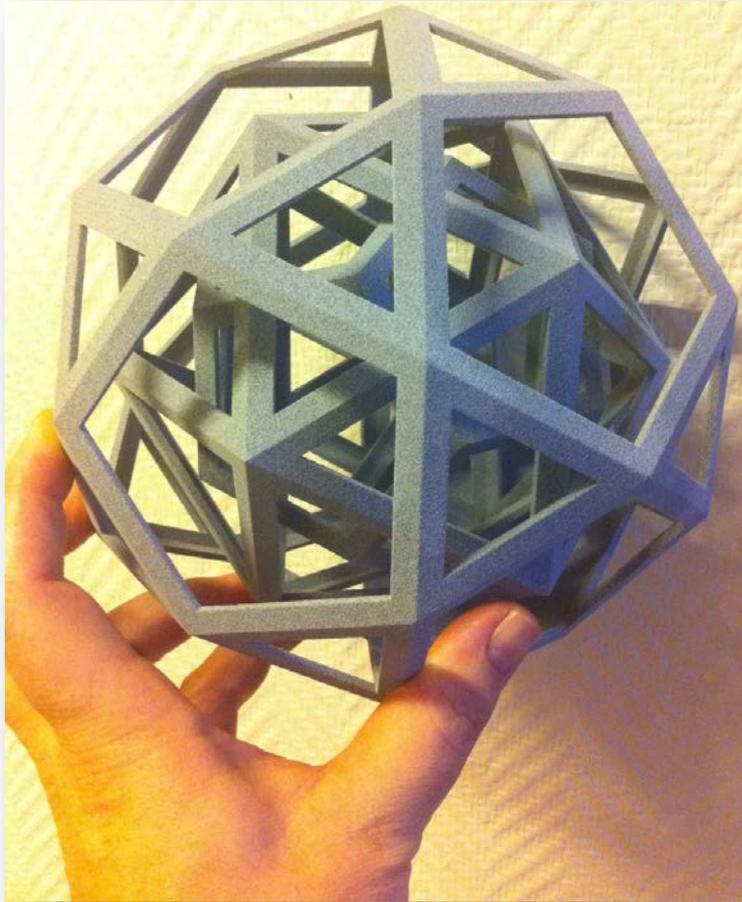


SALLE 3 : FUSION LASER MÉTALLIQUE



SALLE 4 : EXTRUSION / DÉPÔT DE MATIÈRE

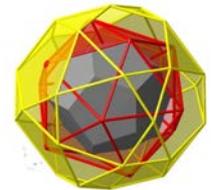
# Comment fabriquer cet objet ?



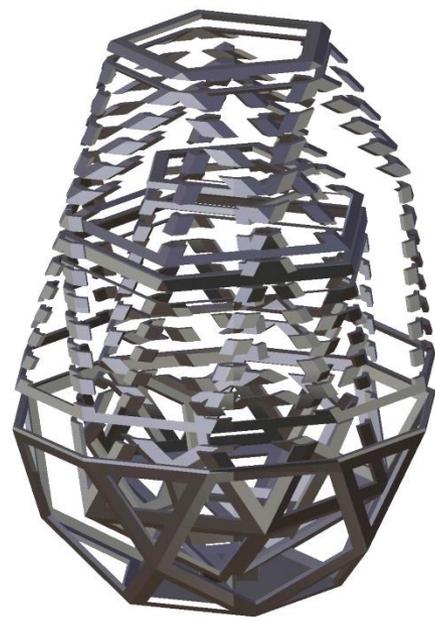
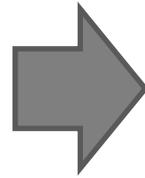
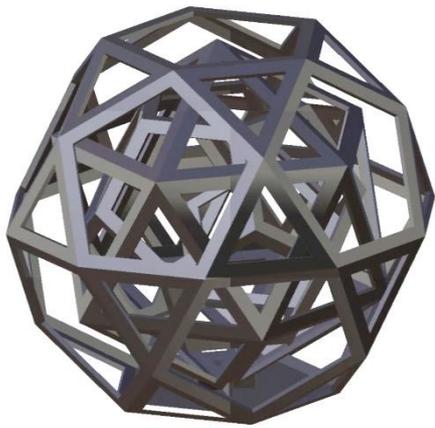
**IMPOSSIBLE**  
avec des procédés conventionnels

**POSSIBLE**  
par Fabrication Additive

**L'imagination devient une limite**

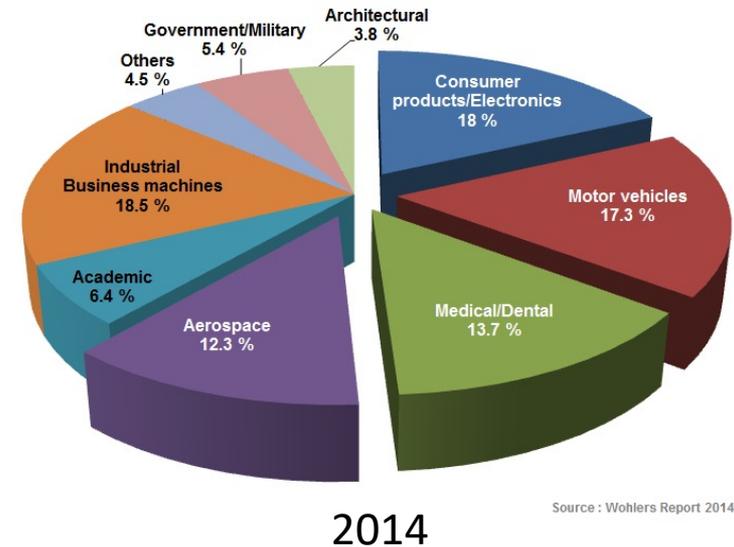
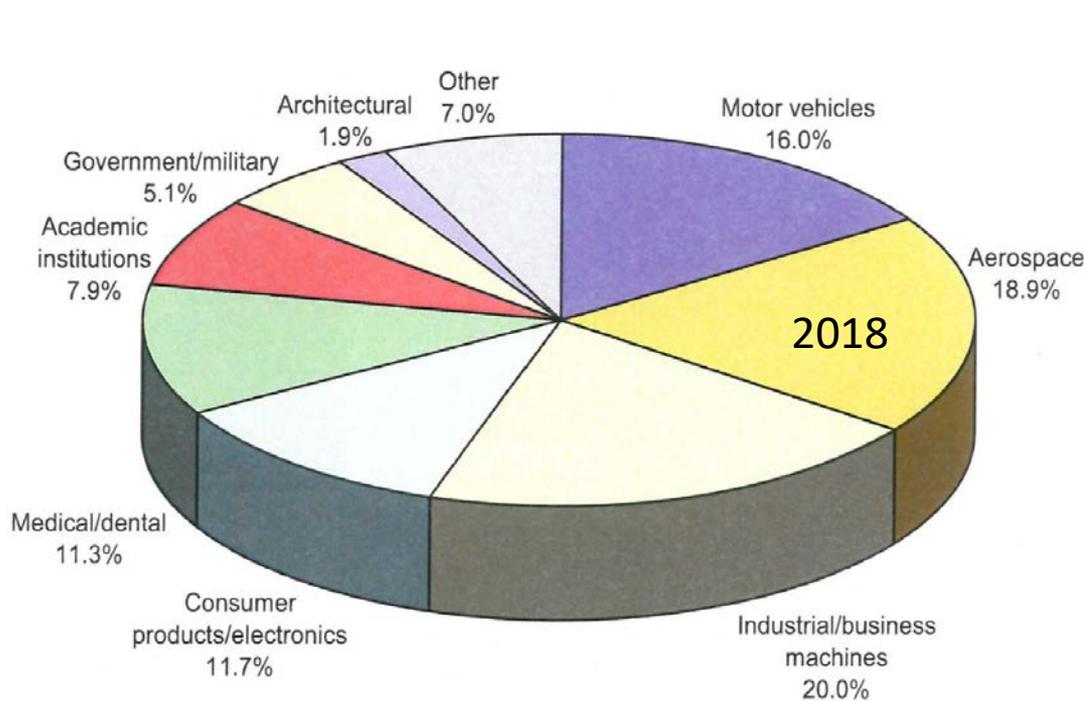


# Fabrication Additive



# Fabrication Additive

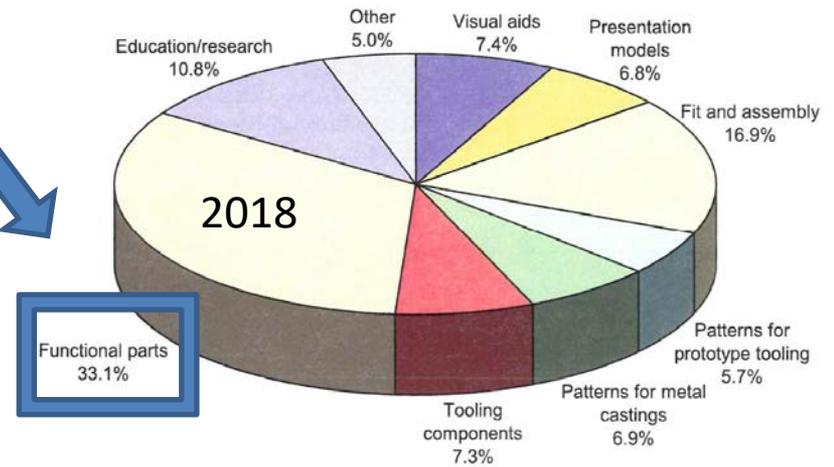
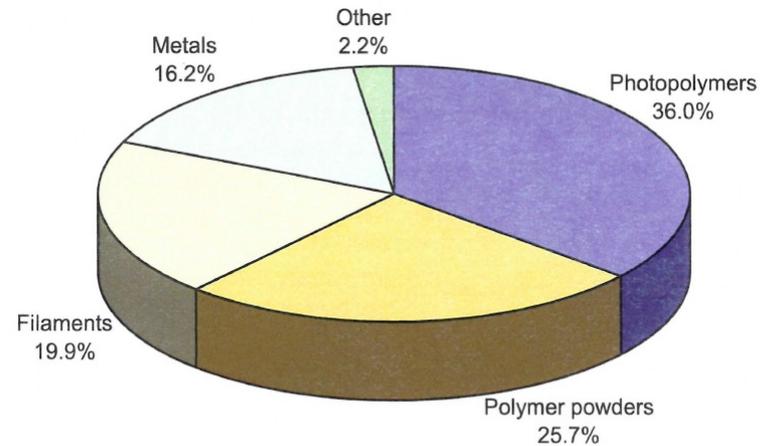
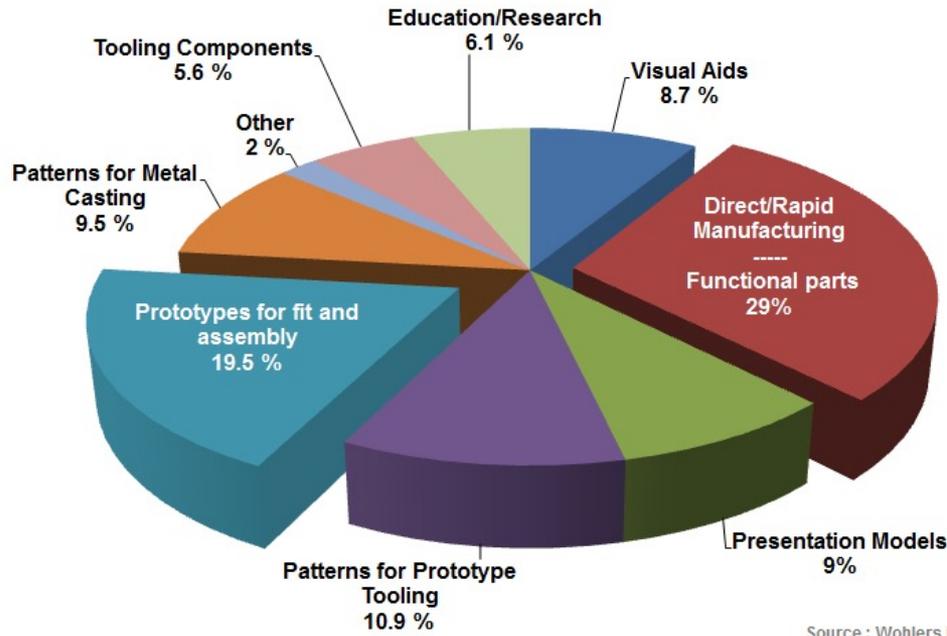
- **Fabrication automatique d'objets sans contrainte de forme en utilisant une technologie de construction additive**
- **Répartition mondiale par activité :**



Source : Wohlers Report 2014

# Fabrication Additive

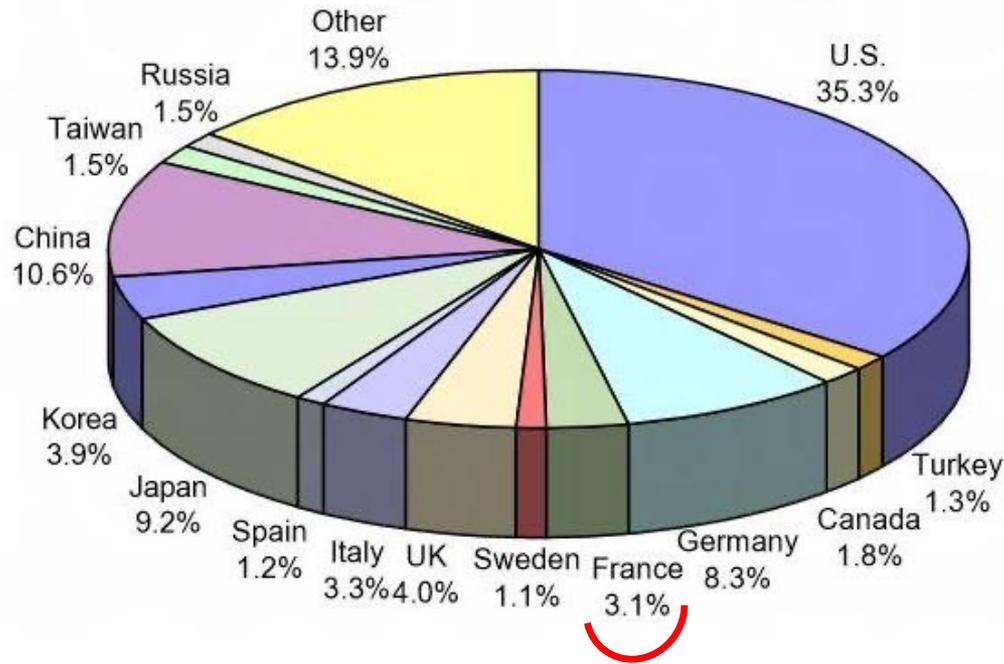
- Fabrication automatique d'objets sans contrainte de forme en utilisant une technologie de construction additive
- Répartition mondiale par activité
- Répartition mondiale par utilisation



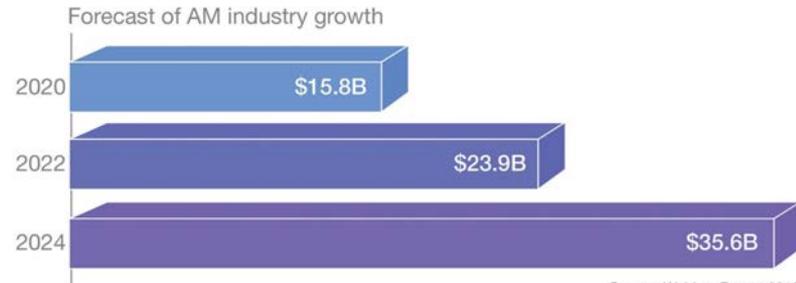
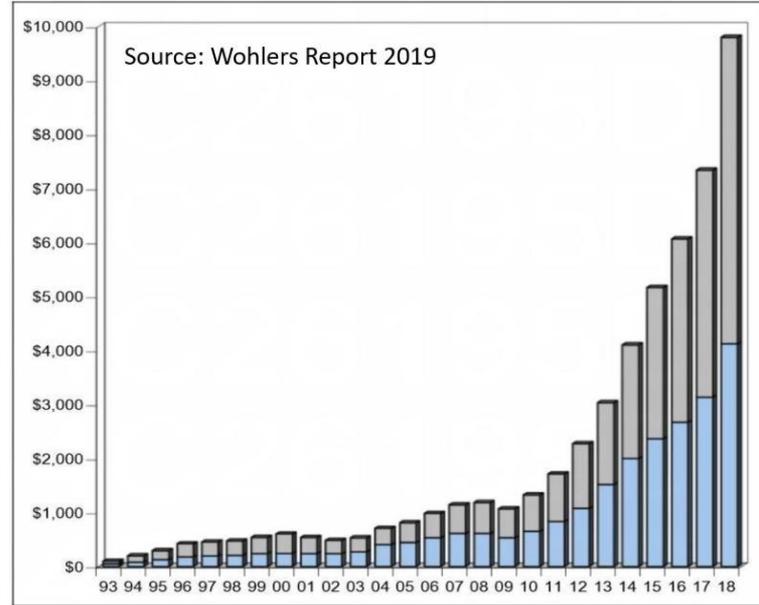
Source : Wohlers Report 2014

# Fabrication Additive

## ➤ Répartition par pays



## ➤ Croissance





# ADDITIVE MANUFACTURING FOR POLYMER



[4.2]  
Powder Bed Fusion

Fused with  
agent + energy

**MJF**

Multi Jet Fusion

Fused with  
laser

**SLS**

Selective Laser  
Sintering



[4.4]  
Material Extrusion

Material extrusion  
Filament

**FDM**

Fused Deposition  
Modeling

Material extrusion  
Granulate

**AKF**

Arburg Kunststoff  
Freiformen



[4.6]  
Material Jetting

Cured with  
UV light

**MJ**

Material Jetting



[4.7]  
Photopolymerization

Cured with  
laser

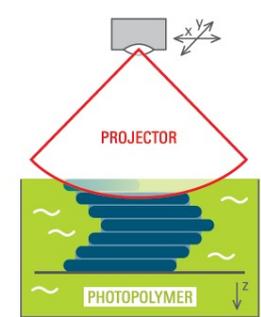
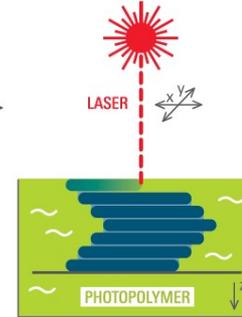
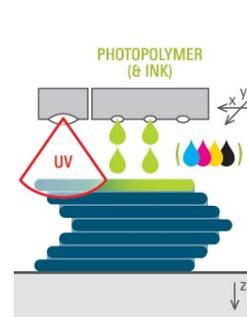
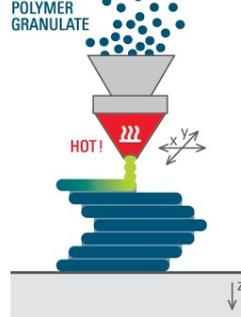
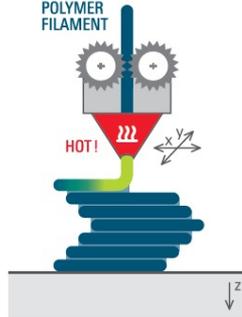
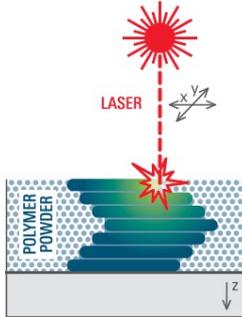
**SLA**

Stereo Lithography

Cured with  
projector

**DLP**

Direct Light Processing



Kleinste Bindertropfen werden lokal und schichtweise auf ein Polymerpulver aufgebracht. Sie erhöhen die Wärmeabsorption des Materials. Eine integral wirkende Infrarotquelle schmilzt das pulverförmige Ausgangsmaterial dort lokal auf.

*Tiny binder droplets are applied locally and in layers to a polymer powder. They increase the heat absorption of the material. An integral infrared source melts the powder material locally there.*

Mittels eines beweglichen Laserstrahles wird ein Polymerpulver schichtweise selektiv lokal gesintert und verfestigt damit einen Querschnitt des Bauteils.

*By means of a movable laser beam, polymer powder is selectively sintered locally in layers, thereby solidifying a cross-section of the component.*

Drahtförmiger Kunststoff, sogenanntes Filament, wird in einer Düseneinheit plastifiziert und schichtweise selektiv lokal dosiert.

*Wire-shaped plastic, so-called filament, is plasticized in a nozzle unit and selectively dosed locally in layers.*

Kunststoffgranulat wird in einer Düseneinheit plastifiziert und schichtweise selektiv lokal dosiert.

*Plastic granulate is plasticized in a nozzle unit and selectively dosed locally in layers.*

Durch viele Düsen werden kleinste Photopolymertröpfchen lokal und schichtweise ausgebracht. Direkt im Anschluss wird das Photopolymer durch UV Licht ausgehärtet.

*Small droplets of photopolymer are applied locally and in layers through many nozzles. The photopolymer is then cured by UV light.*

Mittels eines beweglichen Laserstrahles wird ein Photopolymer schichtweise selektiv lokal auspolymerisiert und verfestigt sich dort.

*By means of a movable laser beam, a photopolymer is selectively locally polymerized in layers and solidifies there.*

Mittels eines Projektors wird ein Photopolymer schichtweise belichtet. Wo Licht hinkommt, polymerisiert das Material lokal aus und verfestigt sich dort.

*A photopolymer is exposed in layers using a projector. Where light is applied, the material polymerises locally and solidifies there.*

# ADDITIVE MANUFACTURING FOR METAL

AEI 2022  
MONTPELLIER



[4.2]

Powder Bed Fusion

Fused with laser

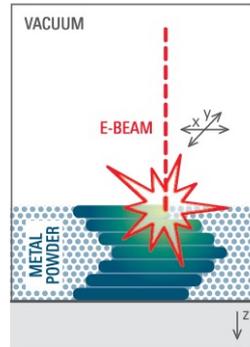
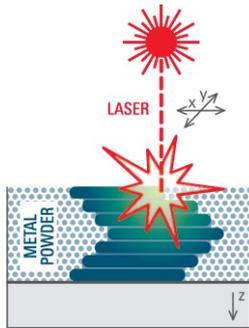
Fused with electron beam

**SLM**

Selective Laser Melting

**EBM**

Electron Beam Melting



Mittels eines beweglichen Laserstrahles wird ein Metallpulver schichtweise selektiv lokal gesintert und verfestigt damit einen Querschnitt des Bauteils.

*By means of a movable laser beam, metal powder is selectively sintered locally in layers, thereby solidifying a cross-section of the component.*

Mittels eines beweglichen Elektronenstrahles wird Metallpulver selektiv lokal aufgeschmolzen und es verfestigt sich damit ein Querschnitt des Bauteils.

*By means of a moving electron beam, metal powder is selectively melted locally and a cross-section of the component solidifies.*



[4.3]

Direct Energy Deposition

Fused with laser

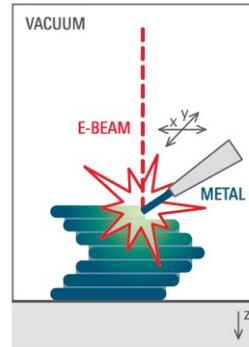
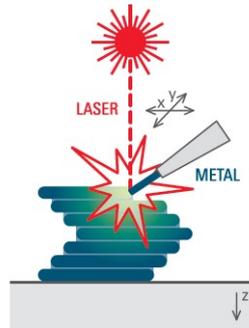
Fused with electron beam

**LENS**

Laser Engineering Net Shape

**EBAM**

Electron Beam Additive Manufacturing



Mittels eines energiereichen Laserstrahles wird Metalldraht oder aufgeblasenes Metallpulver aufgeschmolzen und selektiv lokal aufgetragen.

*Metal wire or overblown metal powder is melted by means of an energetic laser beam and selectively applied locally.*

Mittels eines beweglichen energiereichen Elektronenstrahles wird Metalldraht aufgeschmolzen und selektiv lokal aufgetragen.

*Metal wire is melted by means of a movable high-energy electron beam and selectively applied locally.*



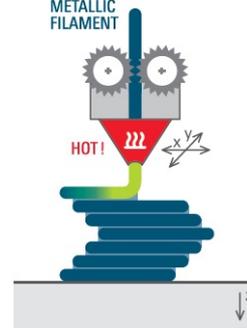
[4.4]

Material Extrusion

Green part is printed to be sintered afterwards

**FDM**

Fused Deposition Modeling



Drahtförmiger metallhaltiger Kunststoff, sogenanntes Filament, wird in einer Düsen Einheit plastifiziert und schichtweise selektiv lokal dosiert.

*Wire-shaped metal-containing plastic, so-called filament, is plasticized in a nozzle unit and selectively dosed locally in layers.*



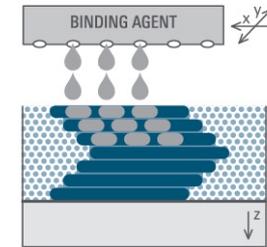
[4.5]

Binder Jetting

Joined with bonding agent to be sintered afterwards

**BJ**

Binder Jetting



Durch viele Düsen werden kleinste Bindertropfen selektiv lokal und schichtweise auf das Metallpulver aufgebracht. Diese verkleben das pulverförmige Material.

*The tiny binder droplets are selectively applied locally through many nozzles and in layers onto the metal powder. They stick the powder material together.*



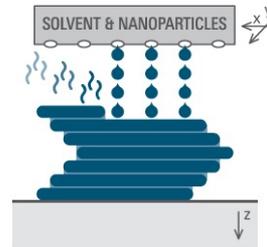
[4.6]

Material Jetting

Cured with heat to be sintered afterwards

**NPJ**

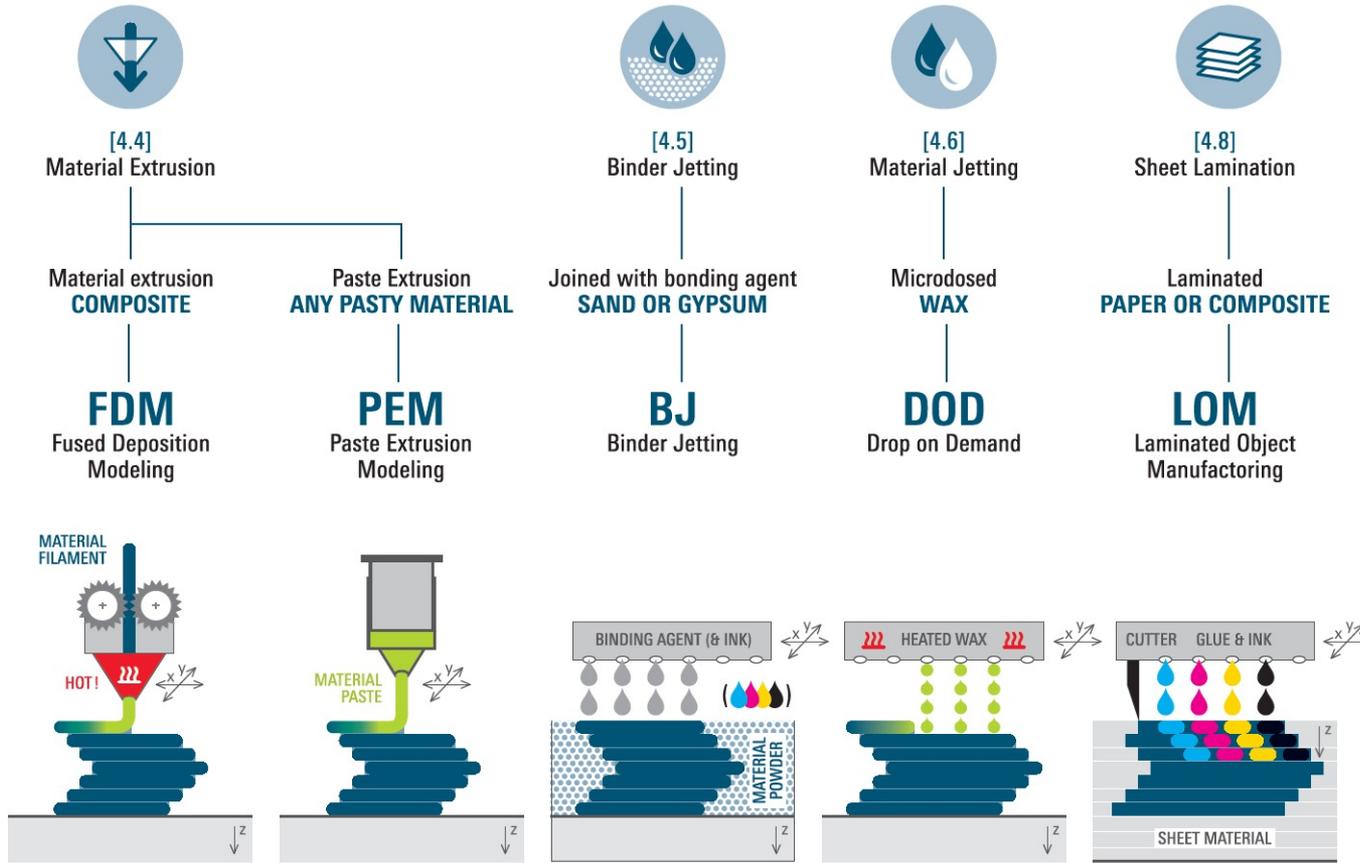
Nano Particle Jetting



Eine Metallpartikel-Lösemittel-flüssigkeit wird in einer Düsen-einheit selektiv lokal dosiert. Das Lösemittel verdampft sofort.

*A metal particle solvent liquid is selectively dosed locally by a nozzle unit. The solvent evaporates immediately.*

# ADDITIVE MANUFACTURING FOR OTHER MATERIALS



Drahtförmiges Material, sogenanntes Filament, wird in einer Düseneinheit plastifiziert und schichtweise selektiv lokal dosiert.

*Wire-shaped material, so-called filament, is plasticized in a nozzle unit and selectively dosed locally in layers.*

Material wird schichtweise selektiv lokal durch eine Kolben-Düsen-Einheit dosiert.

*Material is dosed layer by layer selectively locally through a piston-nozzle unit.*

Durch viele Düsen werden kleinste Bindertropfchen schichtweise lokal auf das Pulverbett aufgebracht. Diese verkleben das pulverförmige Material.

*The very small droplets of binder are applied locally to the powder bed in layers through many nozzles. They stick together the powder material.*

Durch viele Düsen werden erhitzte Wachströpfchen lokal selektiv und schichtweise aufgebracht. Durch Abkühlung verfestigt sich das Wachs.

*Heated wax droplets are applied selectively locally and layer by layer through many nozzles. The wax solidifies through cooling.*

Durch Düsen wird lokal Klebstoff/ Farbe auf die jeweilige Materialschicht aufgebracht. Jede neue Schicht wird auf die vorhandene Schicht laminiert und dann die Kontur mittels Messer, Laser oder Heißdraht ausgeschnitten.

*Nozzles are used to locally apply adhesive / paint to the respective material layer. Each new layer is laminated onto the existing layer and then the contour is cut out using a knife, laser or hot wire.*

# Retour en arrière

# Une belle idée...

## Tintin et le Lac aux requins - 1972



## Franquin / Spirou - 1975



# La premier brevet : 16 juillet 1984

19 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

21 N° de publication : 2 567 668  
à utiliser pour les  
commandes de reproduction

21 N° d'enregistrement national : 84 11241

51 Int Cl\* : G 09 B 25/02; C 08 F 2/46; G 05 B 15/00  
B 22 C 7/00.

12 **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION** A1

22 Date de dépôt : 16 juillet 1984.

30 Priorité :

43 Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 3 du 17 janvier 1986.

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS CILAS ALCATEL, société anonyme. — FR.

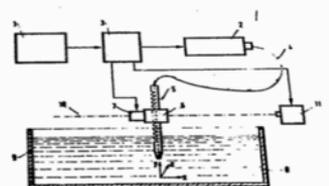
72 Inventeur(s) : Jean-Claude André, Alain Le Mehauté et Olivier De Witte.

73 Titulaire(s) :

74 Mandataire(s) : Christian Lheureux.

54 Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle.

57 Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle.  
Le dispositif comporte un système de mémoires 1 contenant des informations sur la forme de la pièce, un générateur laser 2 relié au système de mémoires 1 par un circuit de traitement 3, une fibre optique 4 couplée à la sortie du générateur laser 2, et des moyens 6, 7, 11 pour déplacer l'extrémité libre de la fibre 4 dans une cuve 9 remplie d'un liquide monomère polymérisable 8, ces moyens étant commandés par les signaux de sortie de circuit de traitement 3.  
Application à la réalisation d'un modèle de bielle.



FR 2 567 668 - A1

Vente des fascicules à l'IMPRIMERIE NATIONALE, 27, rue de la Convention — 75732 PARIS CEDEX 15

## Stéréolithographie



JC André, DR CNRS, Nancy

# Retour en arrière : le point de départ

## La premier brevet : 16 juillet 1984

10 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

11 N° de publication : **2 567 668**  
N° de publication pour les  
inventeurs de l'étranger

12 N° d'enregistrement national : **84 11241**

13 Int. Cl. : G 09 B 25/02; C 06 F 2/46; G 05 B 15/00  
B 22 C 7/00.

14 **DEMANDE DE BREVET D'INVENTION** A1

15 Date de dépôt : 16 juillet 1984.

16 Priorité :

17 Date de la mise à disposition du public de la demande (BOP « Brevets » n° 3 du 17 janvier 1985).

18 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

19 Demandeur(s) : **COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS CLAS ALGATEL, société anonyme, — FR.**

20 Inventeur(s) : **Jean-Claude André, Alain Le Mahout et Olivier De Witte.**

21 Titulaire(s) :

22 Mandataire(s) : **Christian Lheureux.**

23 Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle.

24 Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle.  
Le dispositif comporte un système de miroirs 1 contenant des informations sur la forme de la pièce, un générateur laser 2 relié au système de miroirs 1 par un circuit de traitement 3, une fibre optique 4 couplée à la sortie du générateur laser 2, et des moyens 6, 7, 11 pour déplacer l'extrémité libre de la fibre 4 dans une cuve 8 remplie d'un liquide monomère polymérisable 8, ces moyens étant commandés par les signaux de sortie de circuit de traitement 3.  
Application à la réalisation d'un modèle de balle.

FR 2 567 668 - A1

Membre des Associations à l'Initiative Nationale 97 sous de la Commission — 7573 PARIS CEDEX 15

## Et le deuxième : 8 août 1984

**UNITED STATES PATENT** [19] Patent Number: **4,575,330**

**Hull** [45] Date of Patent: **Mar. 11, 1986**

[54] APPARATUS FOR PRODUCTION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS BY STEREOLITHOGRAPHY

[75] Inventor: Charles W. Hull, Arcadia, Calif.

[73] Assignee: UVF, Inc., San Gabriel, Calif.

[21] Appl. No. 638,905

[22] Filed: Aug. 8, 1984

[51] Int. Cl. B29D 11/00; G03C 00/00

[52] U.S. Cl. 428, 714.4; 425/176; 425/162, 264/22; 430/269; 156/38; 365/119; 365/120

[58] Field of Search 425/162, 174, 174.4, 425/425, 264/22, 183, 401, 430/269, 156/38, 38, 273.5, 365/107, 119, 127

[59] References Cited

U.S. PATENT DOCUMENTS

3,708,417	5/1955	Magar et al.	364/183 X
2,308,243	10/1928	Tipp	264/22 X
3,306,435	2/1965	Magnus	425/174 X
3,615,652	1/1972	Voss	425/162 X
3,770,006	11/1972	Walling	425/174 X
3,974,248	8/1976	Atkinson	425/162 X
4,281,476	5/1977	Swanson et al.	365/119
4,078,229	3/1978	Swanson et al.	365/107
4,081,276	3/1978	Crovello	430/269
4,238,840	12/1980	Swanson	365/119

Primary Examiner—Howard Pflim, Jr.  
Attorney, Agent, or Firm—Fulwider, Patton, Rieber, Lee & Urech

**ABSTRACT**

A system for generating three-dimensional objects by creating a cross-sectional pattern of the object to be formed at a selected surface of a fluid medium capable of absorbing its physical state in response to appropriate synergistic stimulation by impinging radiation, particle bombardment or chemical reaction, successive adjacent laminae, representing corresponding successive adjacent cross-sections of the object, being automatically formed and integrated together to provide a step-wise laminar building of the desired object, whereby a three-dimensional object is formed and drawn from a substantially planar surface of the fluid medium during the forming process.

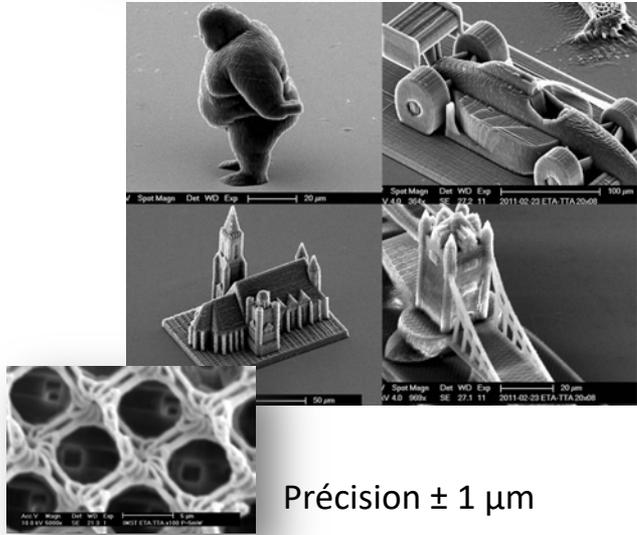
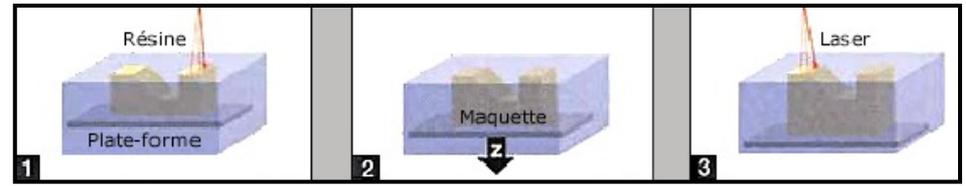
47 Claims, 8 Drawing Figures

# Retour en arrière : le point de départ

## Stéréolithographie



1988



Précision  $\pm 1 \mu\text{m}$





800 €



2900 €



1700 €



4000 €

# Vers l'impression 4D...

Matériau inactif  
**1984**



[monsieurbowman.com](http://monsieurbowman.com)

Matériau actif  
**2013**



MIT

Stratasys  
FOR A 3D WORLD

**Naissance de l'impression 4D**

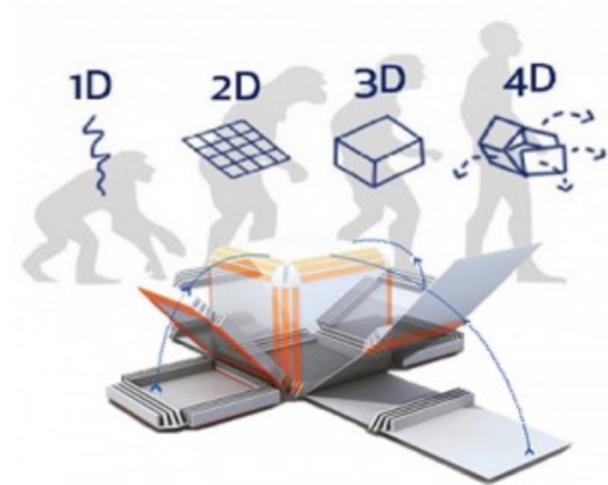
Changement de forme, de fonction, de propriété...

# Vers l'impression 4D...

Skylar Tibbits  
TED 2013



4D Printing: Self-Folding Surface Cube  
Self-Assembly Lab, MIT & Stratasys



4D printing - 3D printed structures  
transform in response to stimuli

# Vers l'impression 4D...



Christopher Barnatt  
<http://www.explainingthefuture.com>



## Impression 3D

- Technologies additives industrielles
- Production d'objets passifs
- Petites séries
- Personnalisation de masse

=> **Domaine très avancé**

=> **Attention à la contrefaçon pour les pièces critiques**

## Impression 4D

- Technologie en développement
- Objets actifs, évolutifs
- Changement de fonction
- Auto-adaptabilité

**=> Nombreuses perspectives pour le futur...**

⇒ **Méthode de conception spécifique pour chaque procédé**

⇒ **Tous les matériaux ne sont pas disponibles**

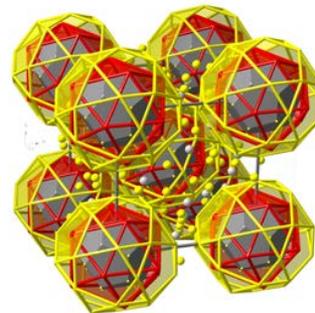
# Quelques exemples...

# Frittage Laser (Polymères & Composites)



## Applications :

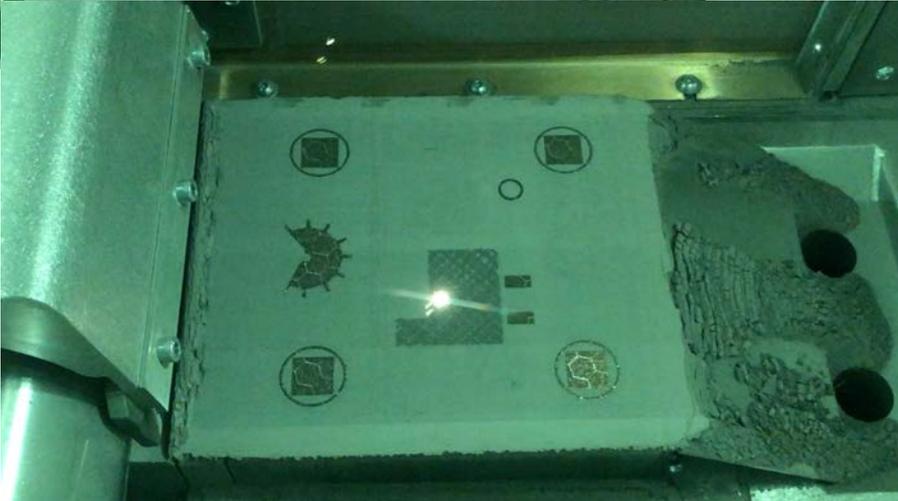
- Automobile
- Aéronautique, spatial



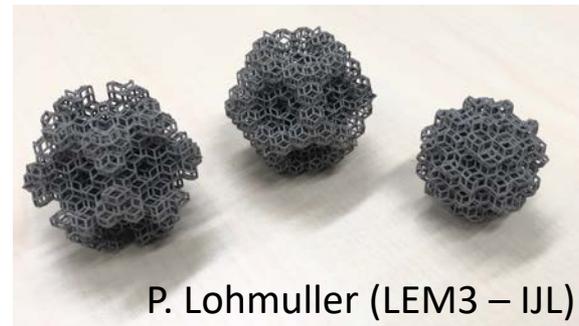
Composite Polymère/Quasicristal



# Fusion Laser (Alliages métalliques)



Pièces en alliage d'aluminium



P. Lohmuller (LEM3 – IJL)  
Pièces en alliage de titane

# Fusion Laser (Alliages métalliques)

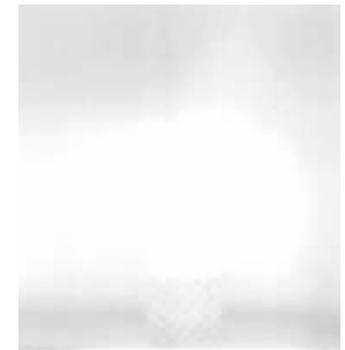
## Matériaux mésostructurés et Infiltration Métallique avec Optimisation du Squelette Architecturé



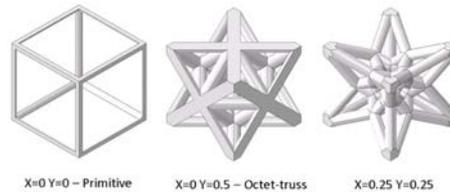
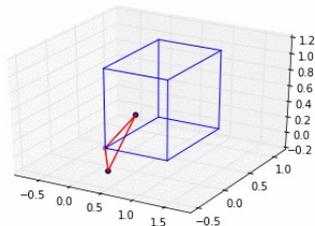
- Fabrication additive de **structures allégées** par **SLM** (métalliques)
- **Infiltration** des matériaux poreux/architecturés



Squelettes architecturés métalliques



Infiltration capillaire



P. Lohmuller *et al.*, *Materials & Design* 182, 108059, 2019

P. Lohmuller *et al.*, *Materials* 11(7), 1146, 2018

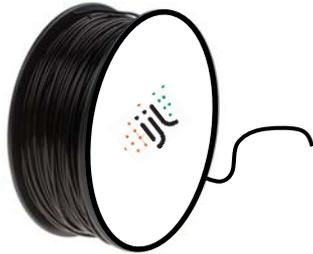
J. Favre *et al.*, *Additive Manufacturing* 21, 359-368, 2018

# Exemples d'impression 4D de matériaux informés programmables

**=> Objets 3D/4D Magneto-actifs**

# Extrusion/dépôt

## Premiers aimants 3D



"Dimensionnez vos idées"

Commercialisation prévue en 2022

**\*Impression 4D Magnéto-active\***

- ⇒ Nouveau filament
- ⇒ Nouvelle imprimante
- ⇒ Premier pas vers la 4D accessible  
**de matériaux magnéto-actifs**

# 4D magnéto-active déjà d'actualité...



**Interrupteur sans contact**  
*Electro-magnéto-actif*



**Formes magneto-actives programmables**

# Objet magnéto-actif multi-orienté



ijl INSTITUT  
JEAN LAMOUR  
CNRS UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE

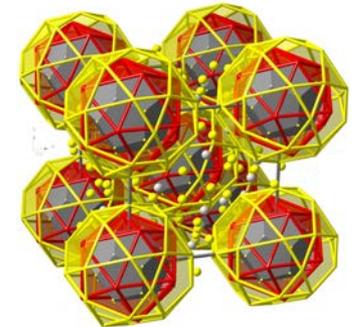
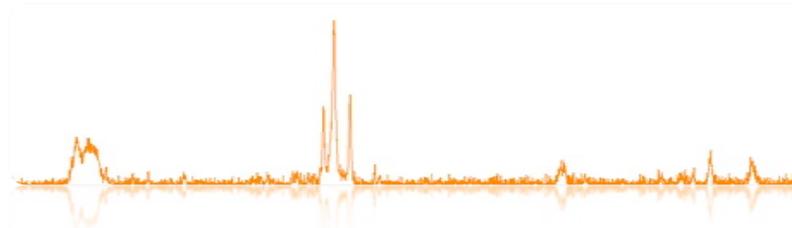
# Nouveaux matériaux imprimables pour lutter contre la contrefaçon...



# Matériaux-SAM<sup>©</sup>

## Signature et Authentification des Matériaux

Matériau unique intégrée dans l'objet imprimé  
=> Une **signature unique anticontrefaçon**



Ex : Alliage complexe

### Avantages :

- Niveau de protection très élevé d'un objet (ou série)
- Ingénierie inverse impossible

# Intégration 3D => Code-SAM<sup>©</sup>

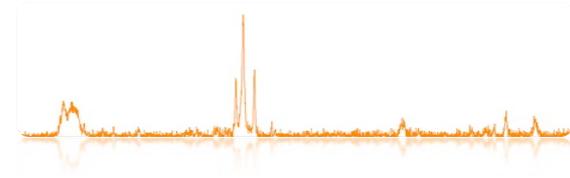
Code SAM 3D => Lecture d'identification (QR Code, etc.)  
=> + **Réalité augmentée** possible (Bleam Code)



Téléchargez l'application Ubleam



**Une signature anticontrefaçon imprimée en 3D, intégrée et unique**



**IceSL**

S. Lefebvre  
(INRIA)



**1<sup>er</sup> niveau d'identification** par lecture/Scan du Code  
**2<sup>ème</sup> niveau : Authentification des matériaux SAM**

# Œuvre de Stéphane Simon 'In Memory of Us, la beauté du geste'

Projet labellisé Olympiade culturelle – Paris 2024



# Le futur ?



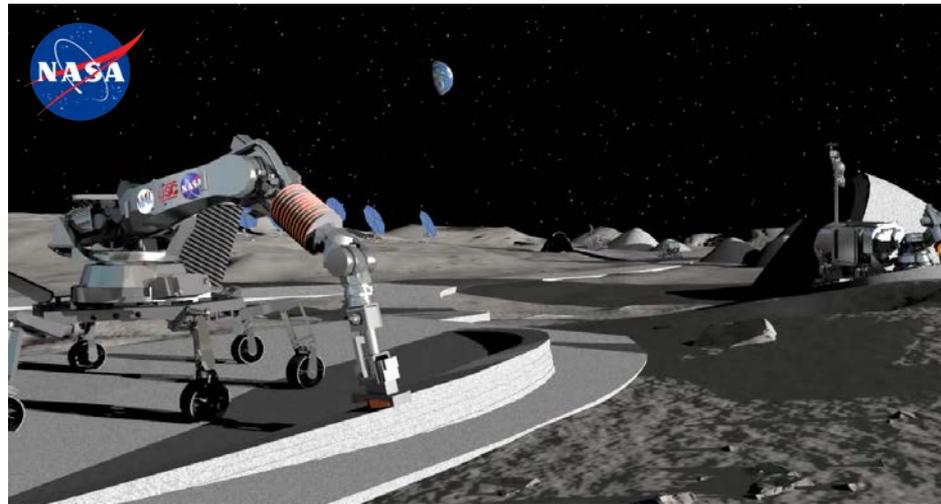
Maquette en coupe d'une base lunaire possible



Morceau de mur à structure alvéolaire pour le projet de base lunaire

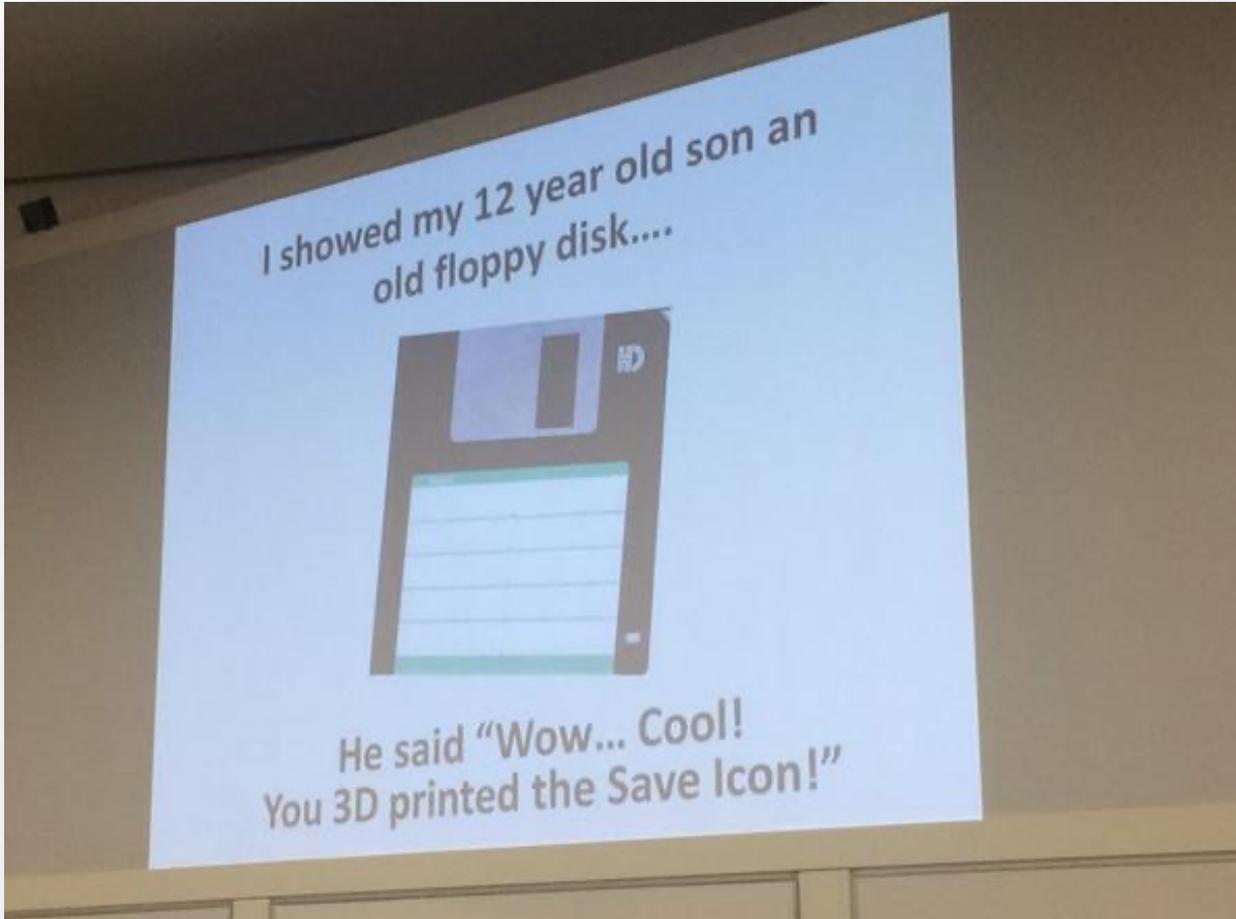
A NASA Innovative Advanced Concept (NIAC) project.  
USC Center for Rapid Automated Fabrication Technologies.

NIAC Contour Crafting, Robotic construction of Lunar and Martian infrastructure.



Robert P. Mueller *et al.*,  
Additive Construction using  
Basalt Regolith Fines (2014).  
NASA Technical Reports Server

# Un jour peut être, tout sera imprimable...



Source web

# Quand la fabrication additive peut apporter une nouvelle dimension aux objets...

**Samuel Kenzari**

[samuel.kenzari@univ-lorraine.fr](mailto:samuel.kenzari@univ-lorraine.fr)



Réalité augmentée avec l'application UBleam



**AEI 2022**  
MONTPELLIER

 **FRANCE  
ADDITIVE**  
FILIÈRE IMPRESSION 3D

