

Processing of polymers: Additive Manufacturing

Jean-Baptiste Desbrest (MXG 138)

jean-baptiste.desbrest@epfl.ch

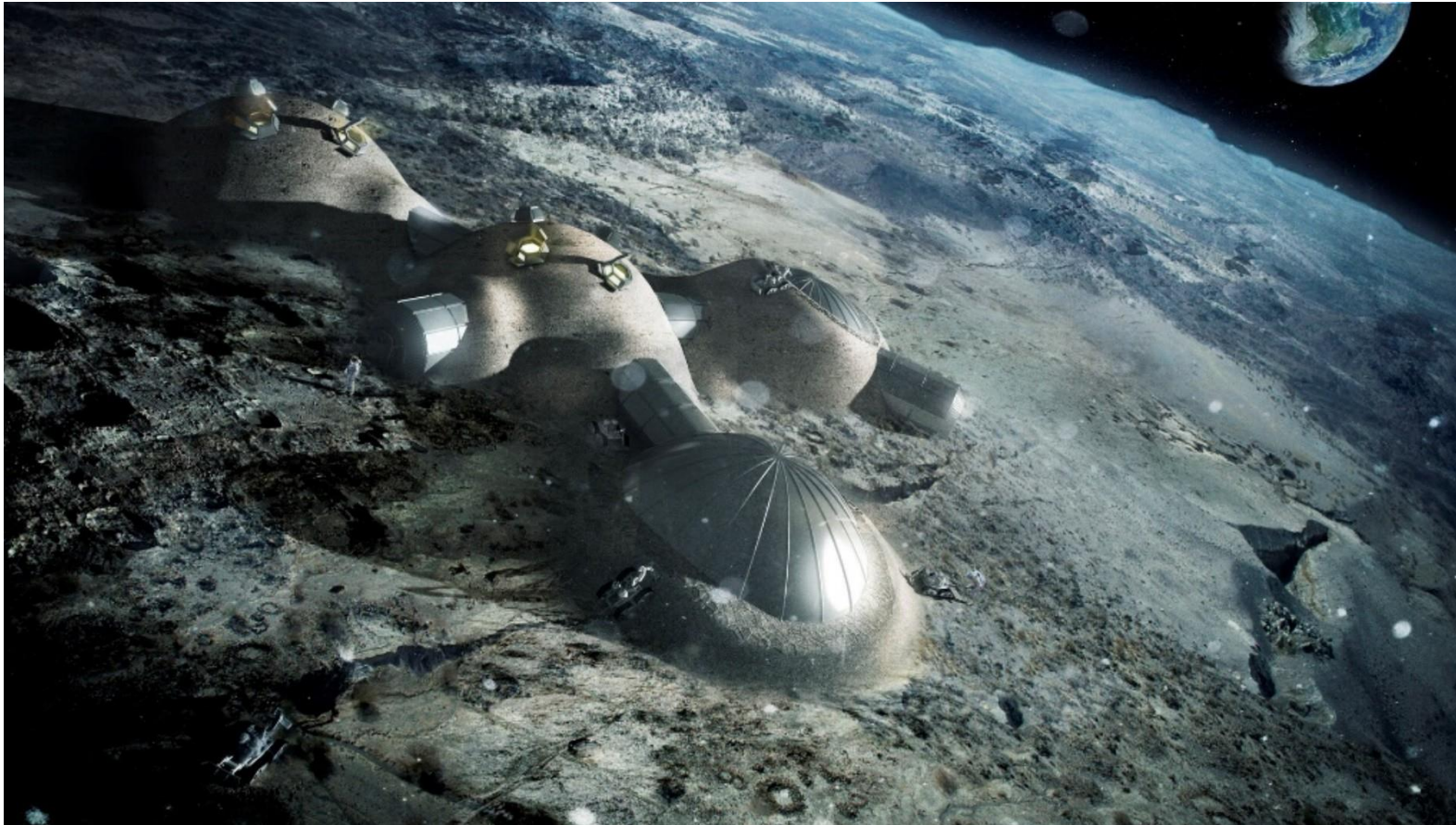


Figure 1: Concept art of a lunar base where the inflated domes are covered with a layer of 3D-printed lunar regolith by robots to help protect the occupants against space radiation and micrometeoroids [1]

Le TP

Objectifs

- Acquérir une vue d'ensemble des procédés d'impression 3D
- Se familiariser avec la technique de FDM : en comprendre le fonctionnement, ses paramètres et leur influence sur la qualité de la pièce
- Illustrer les propriétés physiques des polymères thermoplastiques

Déroulement

Le TP consiste en l'optimisation d'une poutre en flexion sur une durée approximative de 3 heures. Le temps restant vous permettra de commencer à préparer le rapport.

Votre objectif est de jouer sur paramètres d'impression et / ou sur la géométrie de la poutre pour optimiser son comportement en flexion. Les questions préliminaires au TP permettent de guider votre réflexion dans cette démarche. Lorsque vous réalisez une poutre, pensez à bien noter ses paramètres : géométrie, matière, filling pattern, etc..

L'objectif est d'optimiser une poutre soumise à un effort de flexion 3 points. Le critère évalué sera plus particulièrement le rapport entre la masse de votre poutre et la flèche maximale sous effort.

La littérature regorge de techniques d'optimisation. Vous pouvez vous en inspirer, utiliser la FEM, ... essayez d'amener

de nouvelles idées (l'impression 3D permet justement de les tester rapidement).

Remarque : l'impression d'une poutre nécessite 10 à 20 minutes en fonction des paramètres : vous pouvez faire de multiples itérations.

En fin de séance, nous testerons votre meilleure poutre sur une machine de traction.

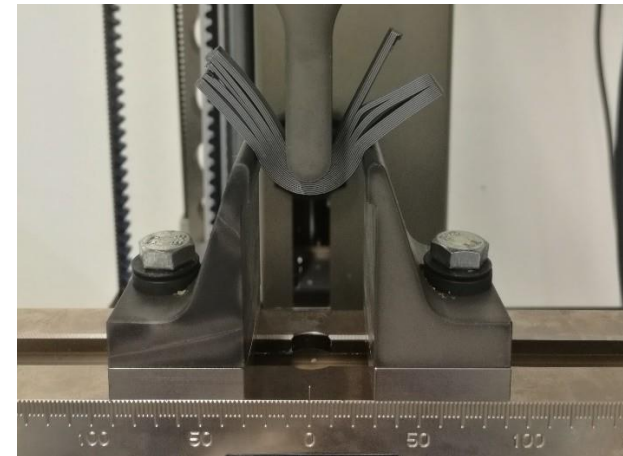


Figure 2: Rupture de la poutre en PLA lors d'un essai de flexion 3 points

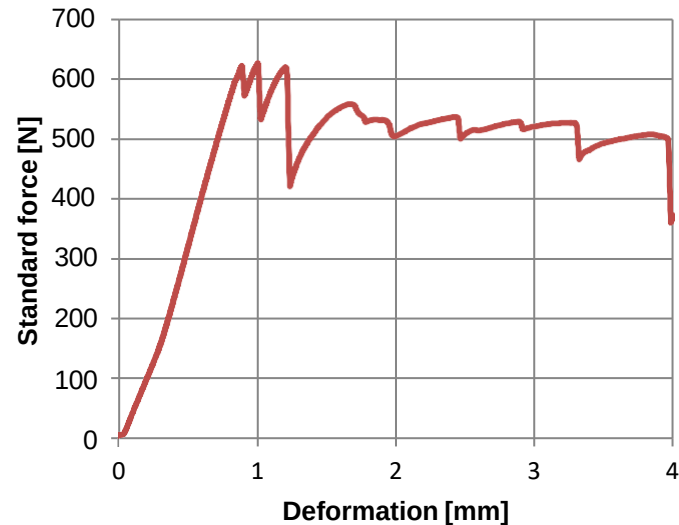


Figure 3: Courbe force déplacement correspondant à la figure précédente

Vous serez répartis en binômes. Le matériel mis à disposition consiste en :

- Imprimante FDM Prusa (1 par binôme).
- Setup de flexion 3 points manuel avec cellule de force et comparateur (voir mode d'emploi en annexe).
- Pieds à coulisse.
- Balance.

À faire avant le TP

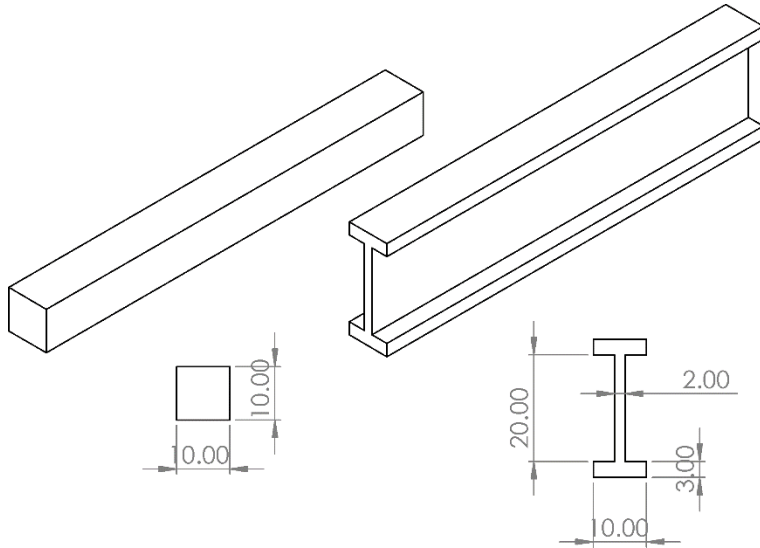
1. Assurez-vous d'avoir 1 PC par binôme
2. Téléchargez et installez PrusaSlicer (gratuit) : <https://www.prusa3d.com/prusaslicer/>

3. À l'aide des annexes et de la littérature, répondez aux questions suivantes :

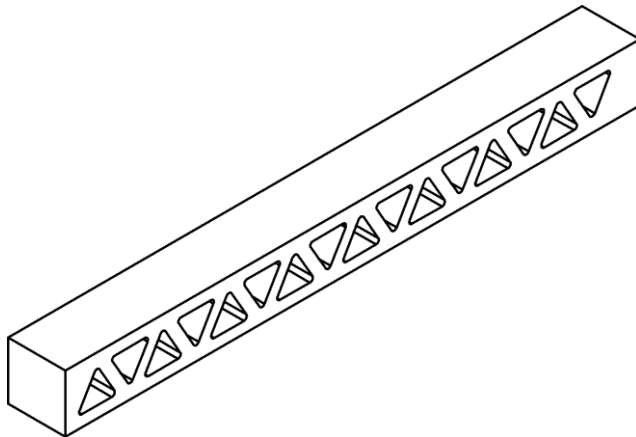
- a. Comparez rapidement les avantages et inconvénients de l'impression FDM avec quelques (4) technologies concurrentes en complétant le tableau suivant :

Technologie	Matériaux typiques et forme	Principe de fonctionnement	Résolution (μm)	Avantages	Désavantages
...	...	...	...	...	...

- b. Parmi les grandes familles de polymères, laquelle peut être utilisée en FDM et laquelle ne le peut pas ? Expliquez pourquoi.
- c. À votre avis, les propriétés physiques d'une pièce imprimée par FDM sont-elles isotropes ? Pourquoi ?
- d. Discutez des effets de ces paramètres sur les propriétés physiques :
- Material
 - Filling pattern
 - Filling percentage
 - Raster angle (or filament orientation)
 - Printing temperature, bed temperature
 - Printing speed
- e. Calculez le moment quadratique et l'aire des deux sections de poutre ci-dessous. Commentez : quelle géométrie est la plus résistante en flexion ?



- f. Que pensez-vous de la géométrie ci-dessous ?
Est-ce une bonne idée de la fabriquer en FDM ?



- g. Quelles stratégies proposez-vous pour optimiser le comportement en flexion de la poutre ?

- h. A votre avis que représentent les lignes suivantes ?

G1 F1200.000
 G1 X121.664 Y105.707 E0.01852
 G1 X121.886 Y105.551 E0.01202
 G1 X122.279 Y105.409 E0.01852

Remarque : les géométries des 3 poutres précédentes sont disponibles en STL sur Moodle.

Rédaction du rapport

1 rapport par binôme, à rendre en J+7 par email et à rédiger au choix en Français ou en Anglais.

- 1. Introduction :** mise en contexte et présentation rapide de la technologie FDM, des enjeux du TP et des points que vous allez discuter.
- 2. Éléments théoriques :** synthèse et restitution de votre compréhension de la technologie FDM, de ses enjeux et avantages. Commenter les effets de cette technologie sur les propriétés de la matière et les performances mécaniques de la pièce. Rapide comparaison avec les autres technologies d'impression 3D. Discuter les avantages de l'impression 3D comparativement aux techniques de production classiques et comment cela pourrait vous être utile dans vos projets scolaires et / ou personnels.
- 3. Méthodologie :** présenter la préparation du TP puis description du protocole expérimental du TP en précisant au besoin les choses à ne pas oublier, à ne pas faire, les spécificités de certaines matières, méthodes etc. Cette section ou la précédente doivent

contenir les réponses à la préparation du TP, avec le numéro de question clairement indiqué de cette manière dans le texte : **(question 1)**.

4. **Résultats et discussion** : présenter les résultats expérimentaux. Les critiquer au regard de la précision des mesures et des sources d'erreur potentielles pendant le TP. Les analyser : quels paramètres avez-vous choisis de faire varier, pourquoi, quels étaient vos attentes et quels résultats avez-vous obtenus ? Quel paramètre vous semble le plus important ?
5. **Réponses aux questions de conclusion**
6. **Conclusion**
7. **Références (si nécessaire)**

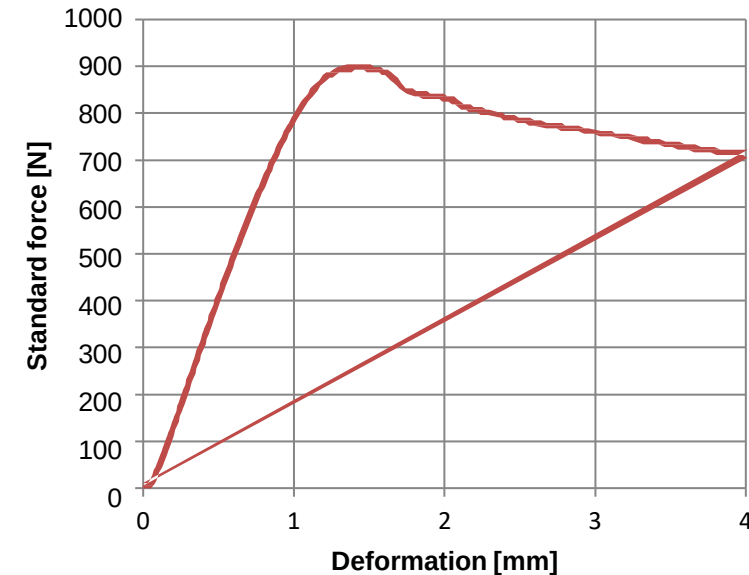
Remarque : le rapport ne sera pas évalué en contrôlant la justesse des résultats numériques que vous pourriez présenter. En revanche, j'évaluerai votre capacité à analyser et critiquer les informations que vous avez obtenues pendant le TP et/ou en lisant cet énoncé et les sources, à les synthétiser et à les resituer avec fluidité.

Autrement dit, la juxtaposition de tableaux de résultats est à éviter et le rapport doit pouvoir se lire comme une histoire d'un seul tenant, de l'introduction à la conclusion.

En cas de question, ne pas hésiter à m'envoyer un email ou à passer à mon bureau.

Questions de conclusion

1. Comparez dans un tableau les principaux polymères utilisés en FDM en fonction de leur facilité d'impression et de leurs propriétés mécaniques.
2. Pourquoi est-il nécessaire de sécher certains polymères avant impression. Lesquels ?
3. Quelle propriété physique permet d'expliquer que l'ABS est un matériau difficile à imprimer ? Comment mitiger ce problème ?
4. Quels types de composites est-il possible d'imprimer par FDM ?
5. Expliquez les phénomènes physiques subis par le polymère pendant l'impression. Commentez leurs effets sur les propriétés mécaniques de la pièce.
6. Revenez aux Figure 2 et Figure 3. Analysez ce qu'il s'est passé. Quel rapprochement pouvez-vous faire avec la microstructure des pièces obtenues par FDM ? À quelle propriété d'interface ce test donne-t-il accès ? En calculer la valeur en sachant que la poutre a une hauteur de 7.74 mm et une largeur de 7.52 mm.
7. La même poutre imprimée avec le PLA d'un fournisseur différent (grade inconnu) donne les résultats ci-contre. Qu'en conclure ? Calculez la flexural strength de ce specimen.



Additive Manufacturing (AM)

AM, also called 3D printing, refers to the wide range of technologies where a part is obtained by sequential addition of material, as opposed to (more traditional) subtractive and forming technics such as milling (see Figure 4).

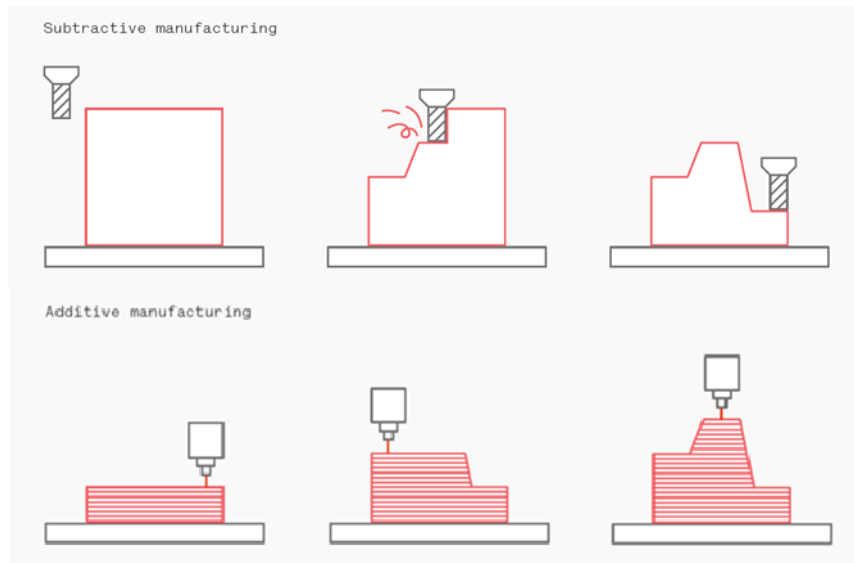


Figure 4: Milling vs. additive manufacturing[2]



Figure 5: AM is an evidence in projects where optimization is pushed to its limits, like these titanium brackets manufactured with SLM, from Formula Student Team TU Delft [2]

AM is especially appropriate to produce very complex geometries that would be impossible to achieve with conventional processes - or at a prohibitively high cost. 3D printing is however a rather slow manufacturing technology (see Figure 6), making it competitive only for prototyping or when producing small batches (for high-end applications for instance).

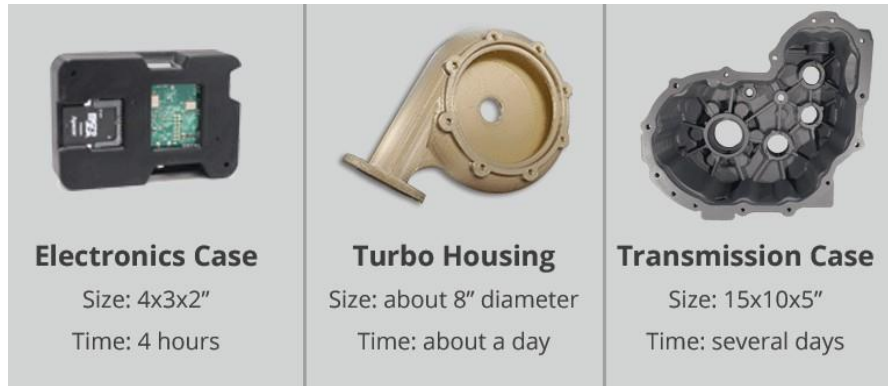


Figure 6: Indicative manufacturing time for common objects[3]

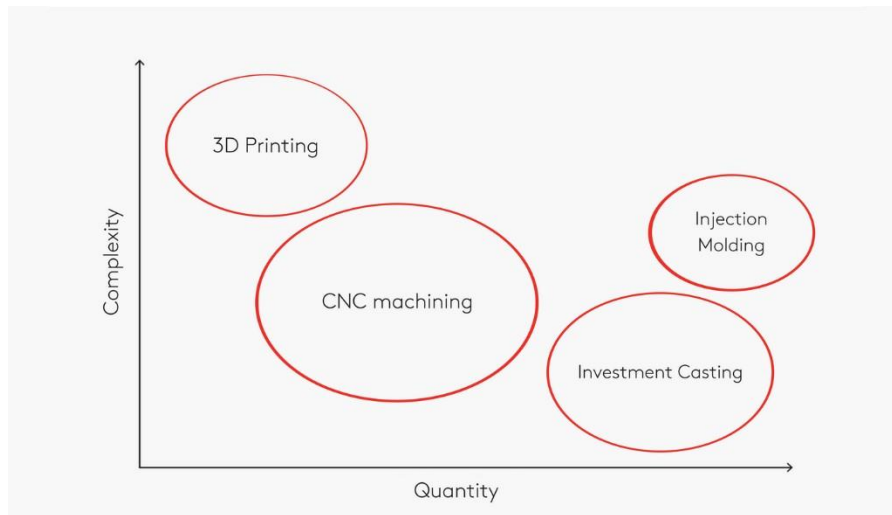


Figure 7: 3D printing is recommended for complex parts and small batches[2]

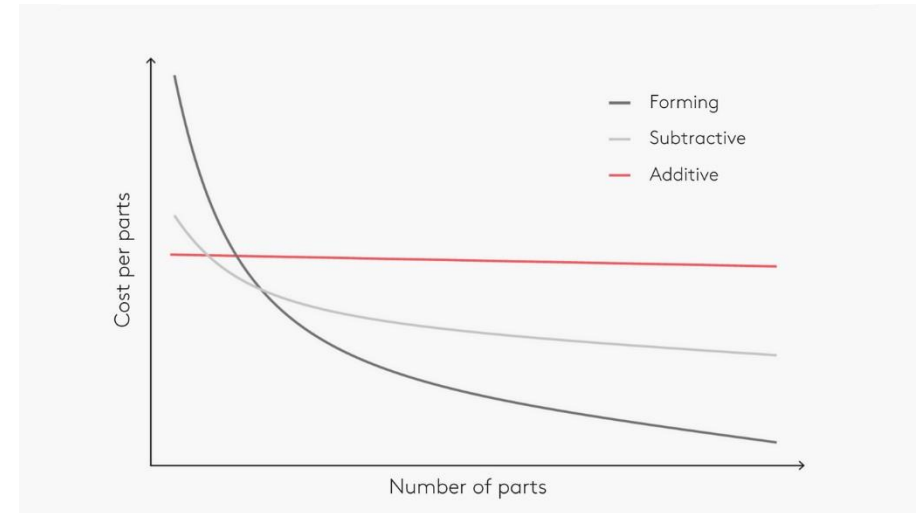
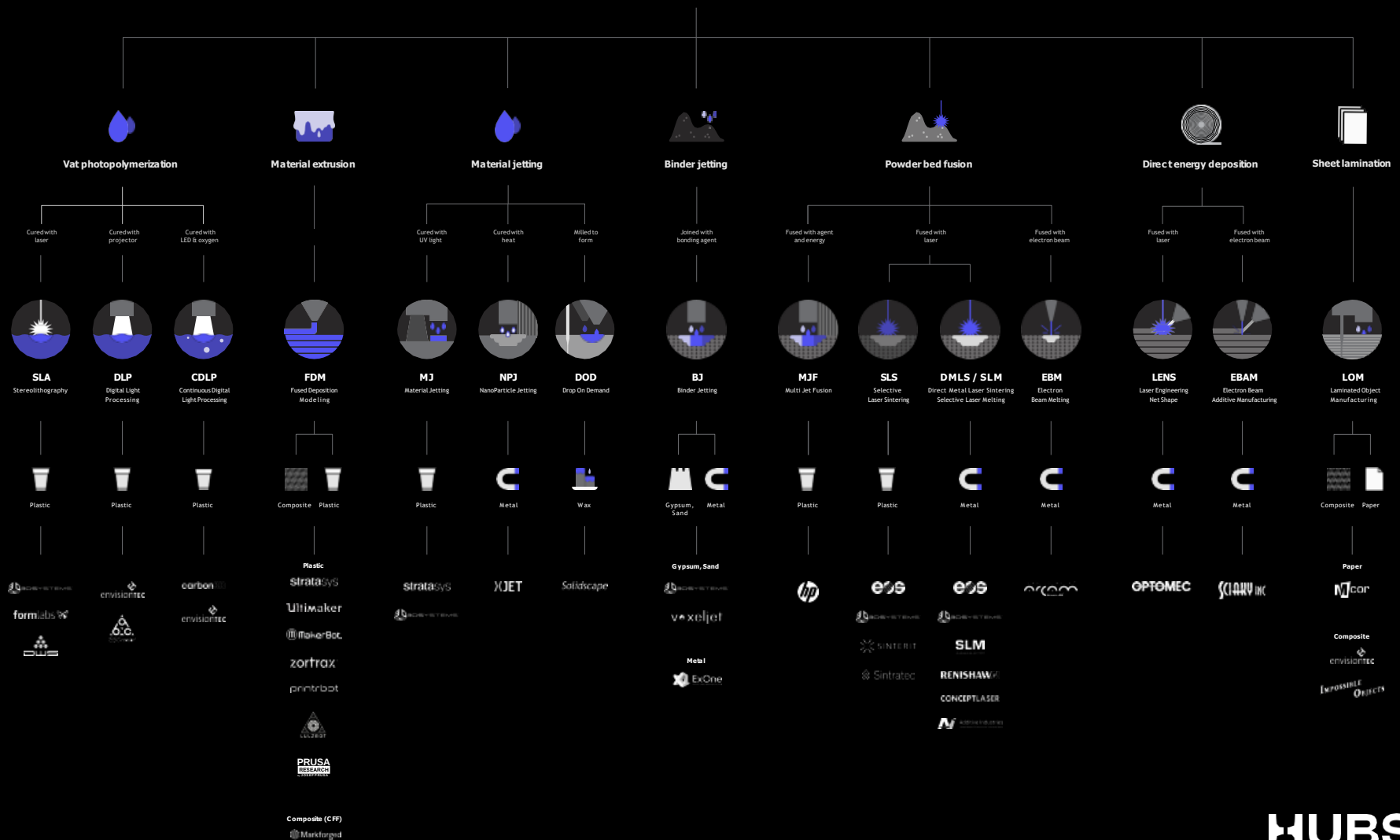


Figure 8: Alternative technologies are more competitive for big batches[2]

As illustrated on next page, AM regroups tens of different processes. In this TP, we will focus on FDM.

Remark: The references are available at the end of the documents for more details.

ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES



HUBS

Fused Deposition Modeling (FDM)

FDM is perhaps the most known technology to the general public thanks to the low materials and machines costs, the ease of use and the media coverage.

FDM is a rather old technology - like many other trending “new” ones such as machine learning to name but one. The patent application was filled in 1989 by Stratasys[4]. Its expiration in 2009 along with the democratization of microcontrollers (e.g. Arduino boards) reduced significantly FDM 3D printer cost. For instance, one may build an open-source and low-cost 3D printer for few hundreds of Swiss francs[5].

How does it work?

FDM's principle is pretty straightforward as illustrated in Figure 9 : a thermoplastic filament is molten and extruded through a nozzle of 0.45mm (standard size) and deposited as a layer, gradually building the final part, layer by layer.

Filament are generally produced by controlled extrusion to create a continuous and homogeneous cylindrical of 1.75mm or 3mm diameter,

To print a part, one needs a STL file that represents the geometry (designed with a CAD software for instance) that will be slice it to obtain G-code, that is to say printing instructions that are interpreted by the printer.

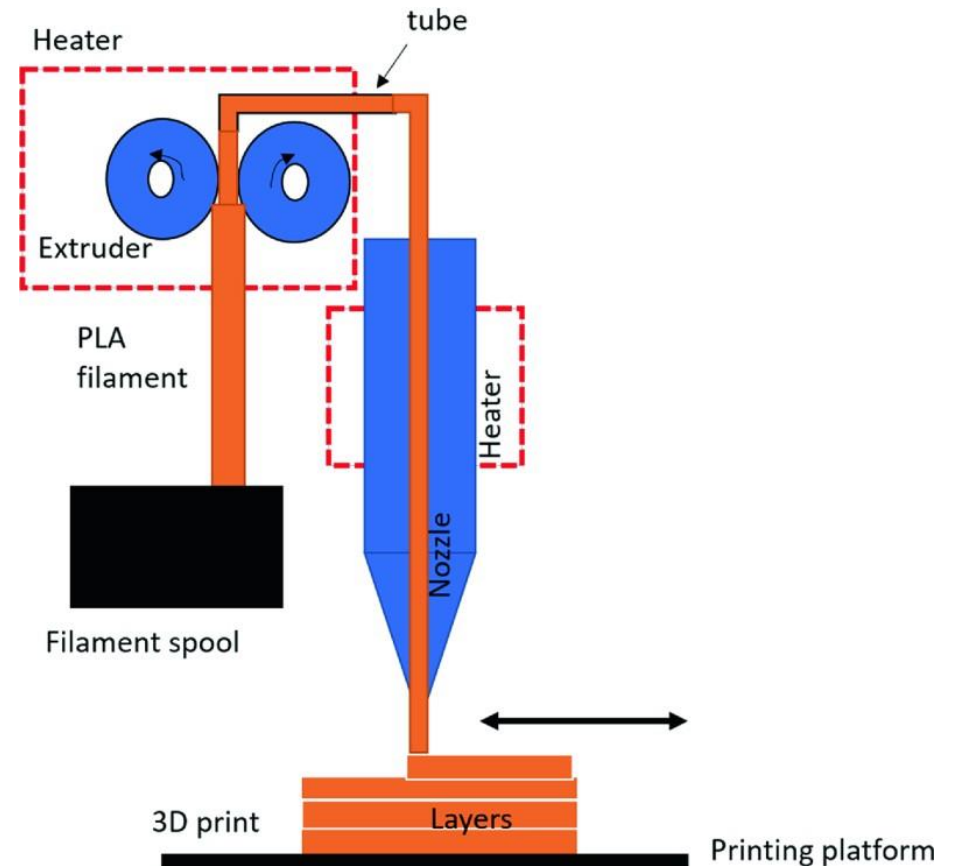


Figure 9: Principle of fused deposition modelling[6]

STL files

STL is often referred as “Standard Triangle Language” or “Standard Tessellation Language”. In a nutshell, a STL file describes a geometry surface with triangles in a three-dimensional Cartesian coordinate system as shown in Figure 10.

STL files have arbitrary units and the user has to define it when importing a geometry. Millimeter is usually assumed, but this is not always the case (imperial units may be used for instance).

STL files do not contain any information about the geometrical shapes of the model and expand quickly in size when increasing the accuracy. As such, it is advised to only use them as temporary files before slicing.

Remark: when using CATIA, the STL accuracy depends on the display accuracy (under Tools> Options> General > Display > Performance > 3D accuracy)

Slicing

Slicing refers to the process illustrated in Figure 11 : the STL file of the CAD is cut into layers that will be printed. Specific software called slicers are used to this end. They generate G-code to communicate with the printer. In this TP, we will use PrusaSlicer.

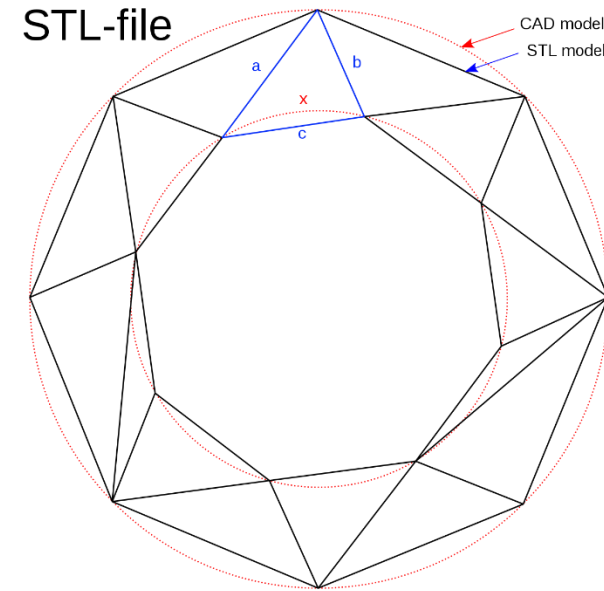


Figure 10: A CAD representation of a torus (shown as two concentric red circles) and an STL approximation of the same shape (composed of triangular planes). Source: wikipedia.org



Figure 11: Slicing of a CAD model into layers

G-code

G-code stands for “Geometric code”. We use it to instruct the printer where to move, how fast to move and what path to follow. A G-code file consists of text lines that you can open and even edit manually (this may come handy in a research context).

G-code example[7] :

```
G01 X247.951560 Y11.817060 Z-1.000000 F400.000000
```

The line has the following structure:

G## X## Y## Z## F##

- First is the **G-code command** and in this case that's the G01 which means “move in straight line to a specific position”.
- We declare the position or the Cartesian coordinates with the **X**, **Y** and **Z** values.
- Lastly, with the **F** value we set the feed rate, or the speed at which the move will be executed.

FDM parameters

As illustrated below, FDM parameters are numerous. They all have an effect on the mechanical properties.

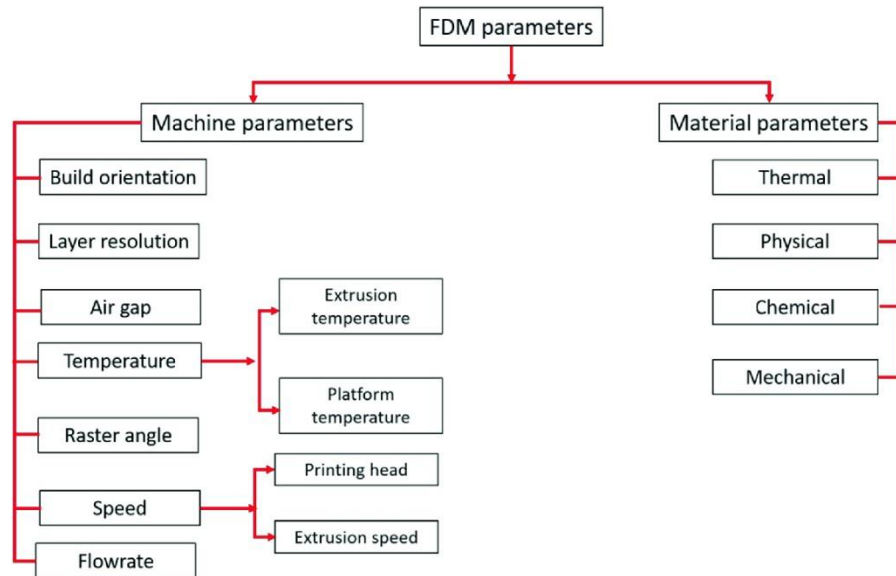


Figure 12: FDM parameters[6]

Material parameters

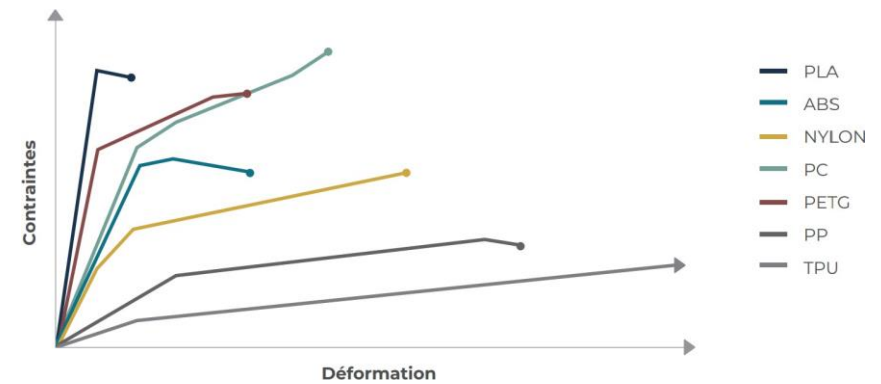


Figure 13: Mechanical properties of thermoplastics usually used in FDM

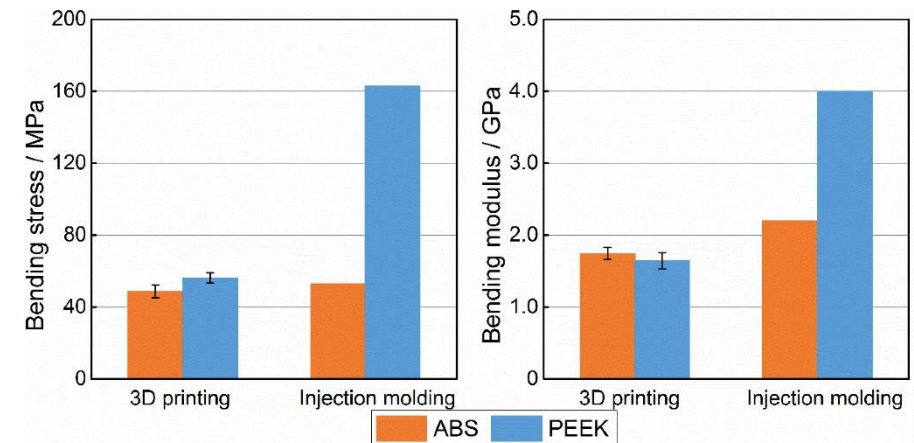
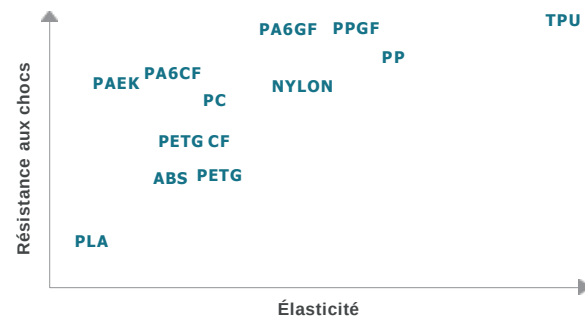
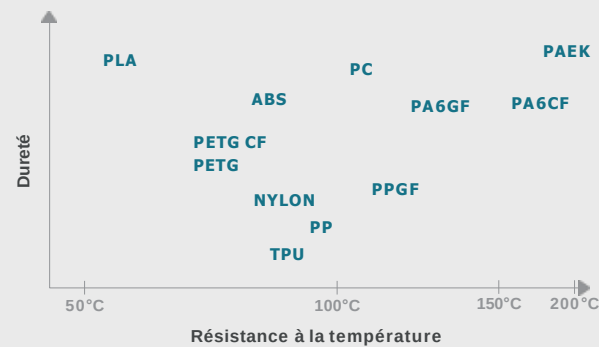
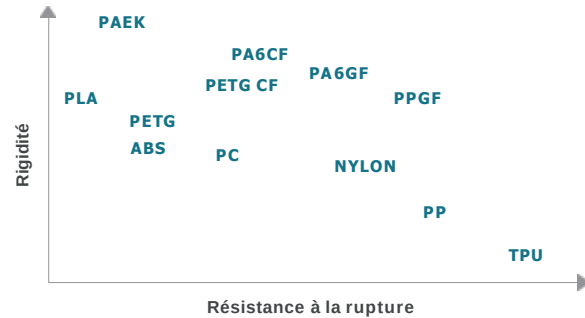


Figure 14 Comparison on bending property between acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and polyether-ether-ketone (PEEK).[8]

Comparatifs des Matériaux FDM



GLOSSAIRE DES TERMES TECHNIQUES



Module d'élasticité = Module de Young
Représente la résistance du matériau à une déformation élastique sous contrainte. Il mesure la rigidité du matériau ou sa tendance à se plier.



Allongement à la rupture
Caractéristiques de l'étirement d'une pièce avant de se rompre ou de se craqueler (résultat en pourcentage de la pièce).



Résistance aux chocs
La résistance aux chocs, appelée parfois robustesse est la capacité du matériau à absorber les chocs et l'énergie d'impact sans se rompre.



Résistance à la traction
La résistance à la traction est la résistance du matériau à la rupture lorsqu'il est soumis à une force de traction (résultat en MPa).



Temp. de fléchissement sous charge
La température de fléchissement sous charge (TFC) est la température à laquelle le matériau se déforme sous une charge donnée.

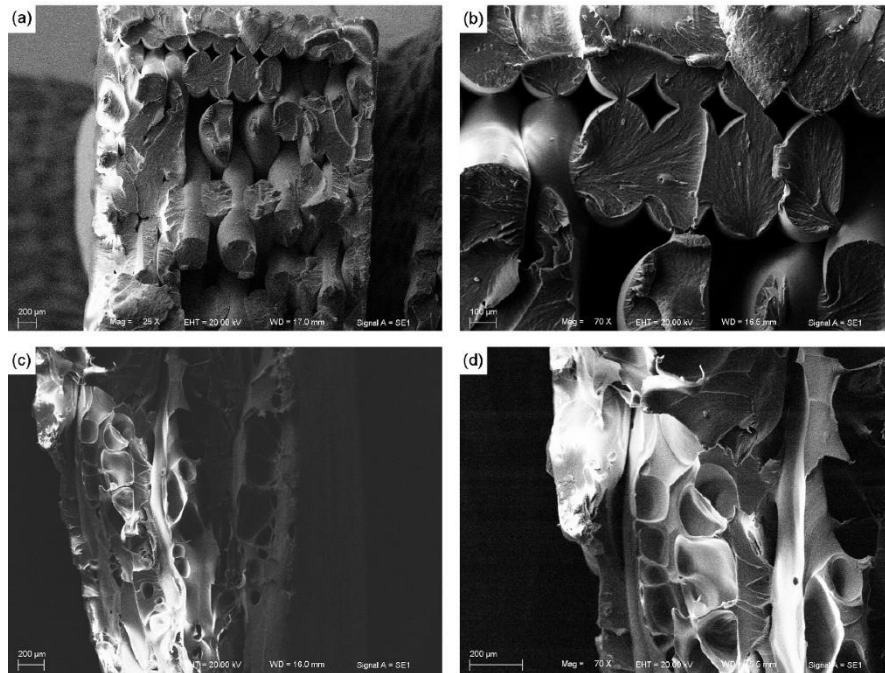


Figure 15: SEM images of fracture cross sections of polyether-ether-ketone (PEEK) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS). (a) ABS, 25x; (b) ABS, 70x; (c) PEEK, 25x; (d) PEEK, 70x.[8]

Machine parameters

Filling pattern and filling percentage

Fill Pattern	first mode	second mode	third mode	Fill Pattern	first mode	second mode	third mode
Line				Concentric			
Rectilinear				Honeycomb			
Grid				3D Honeycomb			
Triangle				Hilbert curve			
Star				Archimedean Chords			
Cubic				Octagram spiral			

Figure 16: Different configurations of filling pattern [9]

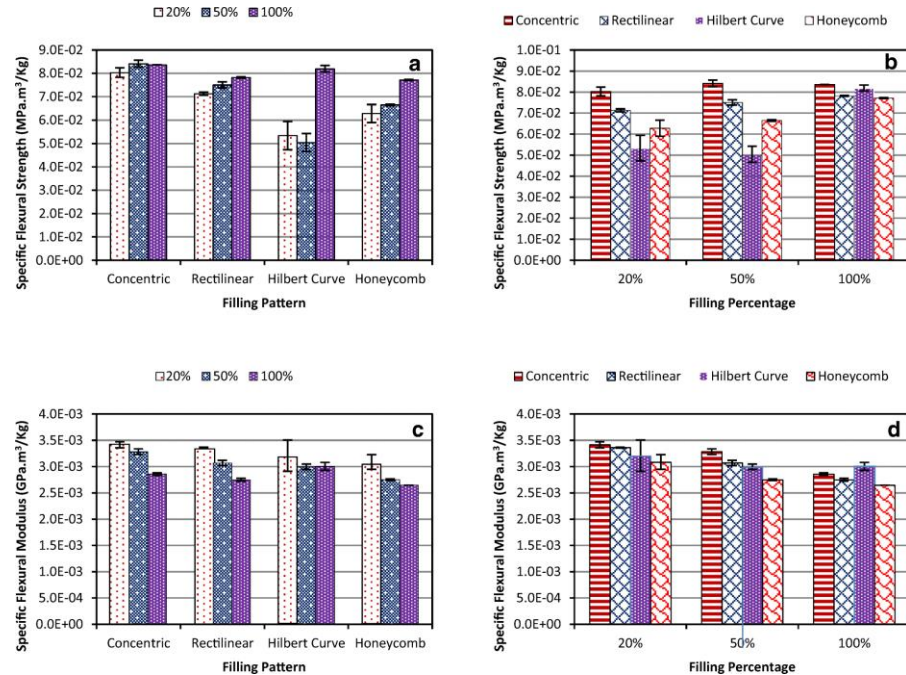


Figure 17: Specific flexural strength of the printed specimens vs. (a) filling pattern and (b) filling percentage and Specific flexural modulus of the printed specimens vs. (c) filling pattern and (d) filling percentage [9]

Orientation and thickness

To explore the influence of process parameters on the mechanical properties of parts, an experimental research was conducted following Taguchi method. The selected factors and their levels are shown in Table 1 and the specific implications of these factors are described as follows:

- Deposition orientation.** It is the position where the part is built. Different position orientations will lead to different cross sections curing structure at the same location of molding parts. Θ represents the deposition orientation angle displayed in Figure 19.
- Layer thickness.** It is the thickness of layer deposited by nozzle and depends upon the type of nozzle used.
- Deposition style.** It is the pattern of raster used to fill the interior regions of the PLA part in accordance with the outline information of the cross section. The schematic diagram of three typical filling styles, including long-raster (0°), long-short-raster ($+90^\circ/0^\circ$), and staggered-raster ($+45^\circ/-45^\circ$), are exhibited in Figure 18. The angle value is the included angle between the filling line and ox axis.
- Raster width.** It is the width of raster pattern used to fill interior regions of part.
- Raster gap.** It is the gap between two adjacent rasters on the same layer.

Table 1: Factors and their levels[10]

Factors	Symbol	Measuring unit	Levels		
			1	2	3
Deposition orientation	A	°	0	30	60
Layer thickness	B	mm	0.1	0.2	0.3
Deposition style	C	—	0	0/90	+45/-45
Raster width	D	mm	0.4	0.45	0.5
Raster gap	E	mm	-0.1	0	0.1

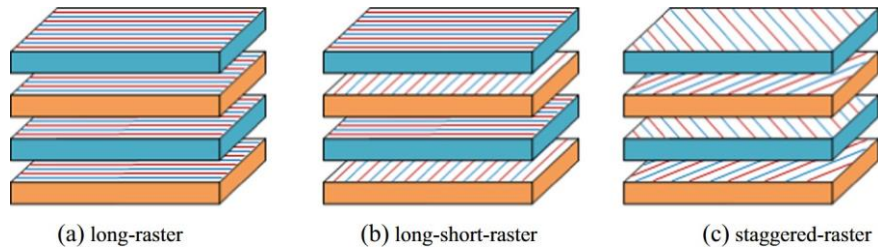


Figure 18: Schematic diagram of deposition style[10]

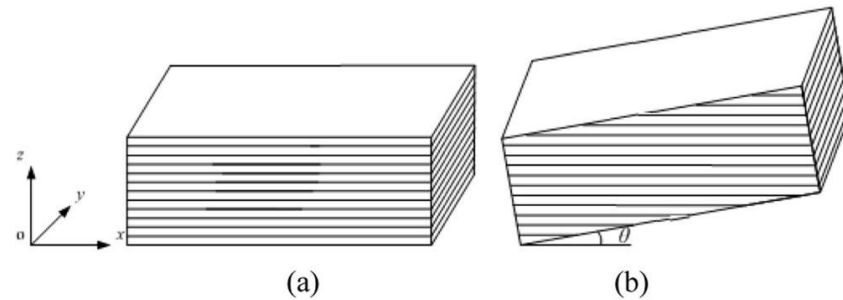


Figure 19: The cross section (a) and (b)[10]

Table 2: Results of flexural experiments: maximum load and flexural strength

Exp. no	Factors					P (N)	σ_f (MPa)
	A	B	C	D	E		
1	1	1	1	1	1	308.06	86.64
2	1	1	2	2	2	303.04	85.23
3	1	1	3	3	3	320.47	90.13
4	1	2	1	2	3	303.33	85.31
5	1	2	2	3	1	306.31	86.15
6	1	2	3	1	2	282.07	79.33
7	1	3	1	3	2	295.04	82.98
8	1	3	2	1	3	257.35	72.38
9	1	3	3	2	1	263.15	74.01
10	2	1	1	1	1	282.17	79.36
11	2	1	2	2	2	255.90	71.97
12	2	1	3	3	3	248.36	69.85
13	2	2	1	2	3	257.03	72.29
14	2	2	2	3	1	264.11	74.28
15	2	2	3	1	2	245.37	69.01
16	2	3	1	3	2	261.76	73.62
17	2	3	2	1	3	241.50	67.92
18	2	3	3	2	1	237.98	66.93
19	3	1	1	1	1	218.46	61.44
20	3	1	2	2	2	205.90	57.91
21	3	1	3	3	3	228.73	64.33
22	3	2	1	2	3	210.74	59.27
23	3	2	2	3	1	198.26	55.76
24	3	2	3	1	2	192.11	54.03
25	3	3	1	3	2	201.50	56.67
26	3	3	2	1	3	182.44	51.31
27	3	3	3	2	1	188.02	52.88

Printing temperature and speed

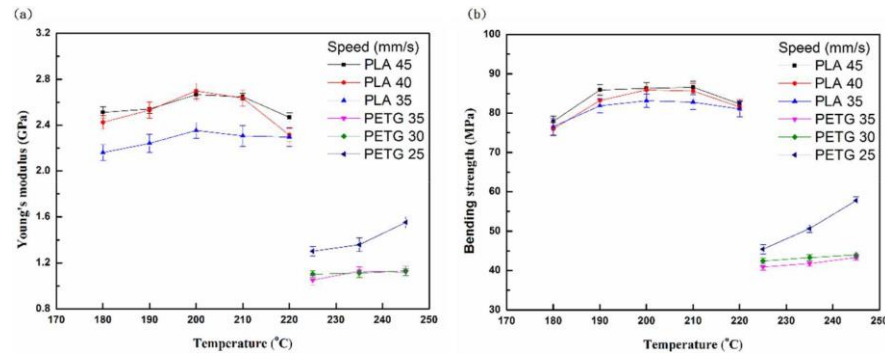


Figure 20: (a) Young's modulus and (b) bending strength of PLA and PETG specimens after bending tests at different temperatures and printing speeds. The fixed parameter conditions included an infill density of 20%, a raster angle of 45°, a layer thickness of 0.2 mm, and a platform temperature of 25 °C. [11]

FDM application examples



Figure 21: Bionic design and 3D printed item[12]



<https://www.youtube.com/watch?v=GIWqKIJ6wco&t=6s>

Figure 22: Home construction (MIT) [16]

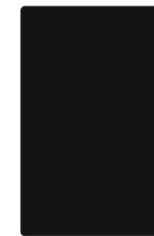


Costs / Part



↓ -16 %

Part Weight



↓ -67 %

■ Titanium (Milled)

■ 9T Labs' CF/PA12

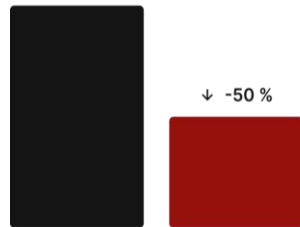
Figure 23: Automotive Bracket For Motorsports from project EPITHER [13]



Figure 24: art restoration [17]



Costs / Part



Part Weight



■ Aerospace-grade steel ■ 9T Labs' CF/PEKK

Figure 25: Helicopter Door Hinge Bracket [14]



Figure 26: Using 3D printing to make prosthetics for Colombia war victims [15]



<https://www.youtube.com/watch?v=PKW2XIQ6Er0>

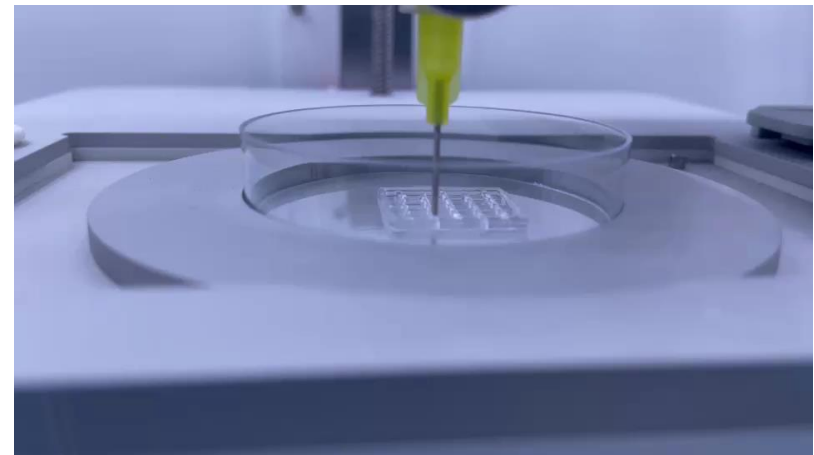


Figure 27: 3D printing of elastomers for bio-medical applications – SMaL EPFL

Évaluer la qualité et la performance des poutres

La présence de défauts de surfaces et à l'intérieur des structures, les inhomogénéités de microstructures, les variations de dimensions... sont les premiers indices justifiant une amélioration des paramètres de mise en œuvre (température, pression, vitesse de dépose, vitesse de refroidissement, etc.).

Les propriétés mécaniques sont déterminées par un essai de flexion 3 points permettant de mesurer la flèche en fonction de la force appliquée, ainsi que la force à la rupture.

Pour chaque poutre il faut procéder de la manière suivante :

- Mesure de la flèche pour une charge donnée
 - i. La première fois : allumer le dynamomètre, et faire un zéro sur la force
 - ii. Soulever le module de chargement, mettre la poutre en place, et ajuster la hauteur du comparateur de manière à ce que la touche effleure le bas de la poutre
 - iii. Poser délicatement le module de chargement sur la poutre, noter la force et le déplacement
- Mesure de la force de rupture
 - i. **Descendre le comparateur au maximum pour éviter tout risque d'endommagement**
 - ii. Mettre le dynamomètre en mode « PEAK » (presser **avant chaque test** la touche plusieurs secondes jusqu'à ce que la mention « max » apparaisse)

- iii. Saisir fermement la poignée et appuyer progressivement sur la poutre jusqu'à rupture
- iv. Noter la valeur maximale de la charge

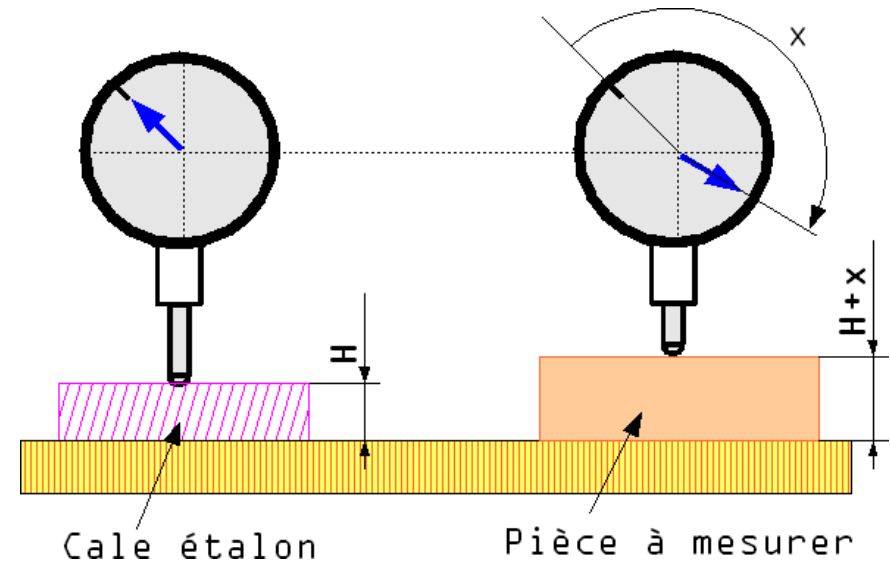


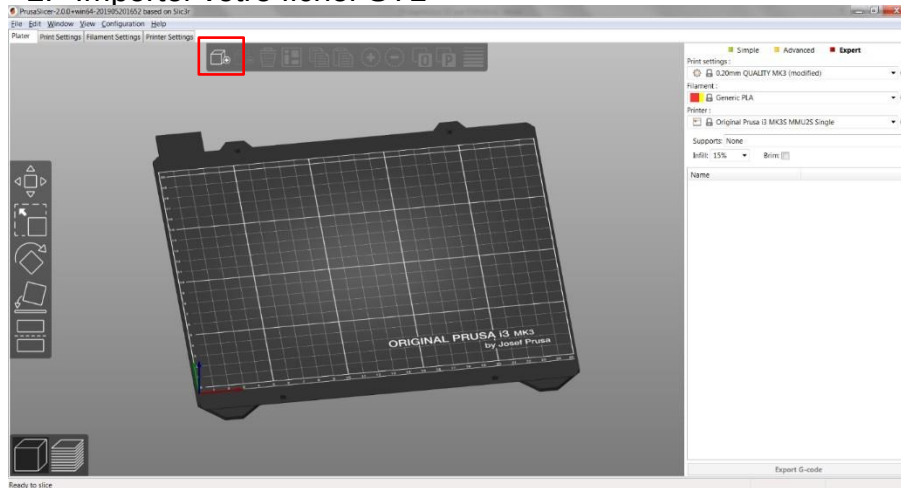
Figure 28: Principe de mesure avec un comparateur à cadran. Le point zéro est effectué à l'aide d'une cale étalon. Source: Wikipedia

Utilisation de PrusaSlicer

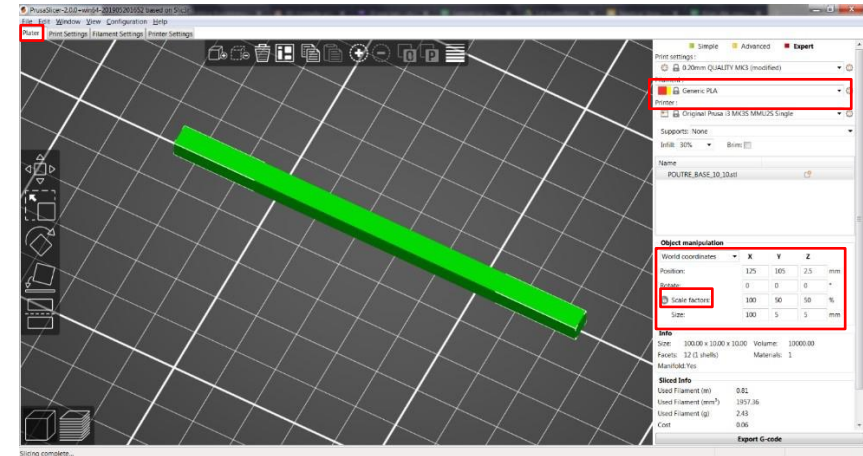
Pour modifier les poutres et les imprimer :

1. Télécharger et installer PrusaSlicer (prusa3d.com - gratuit). Le modèle d'imprimante est MK3SMMU2S

2. Importer votre fichier STL



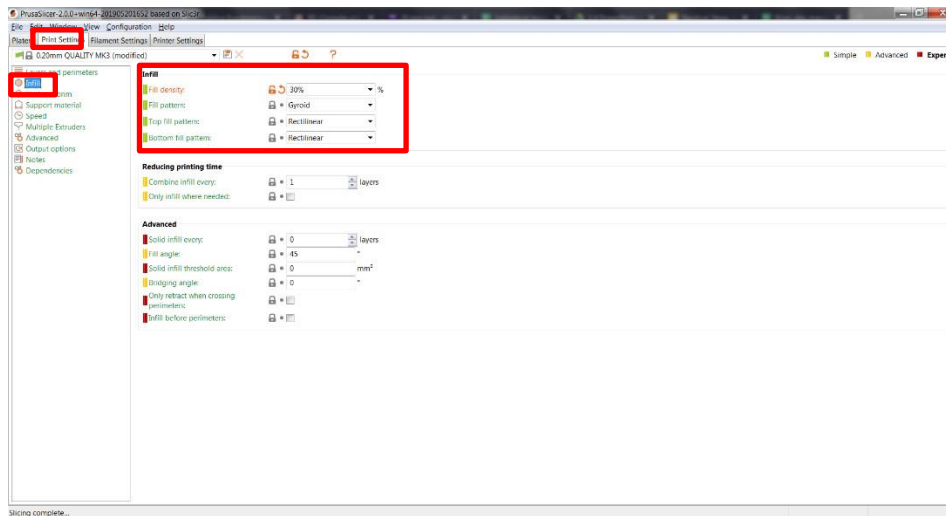
3. Ajustez les différents paramètres pour optimiser la poutre :
 - Matière, section et orientation de la poutre dans l'onglet « Plater » (attention à déverrouiller les « scale factors » pour pouvoir modifier la section sans changer la longueur)



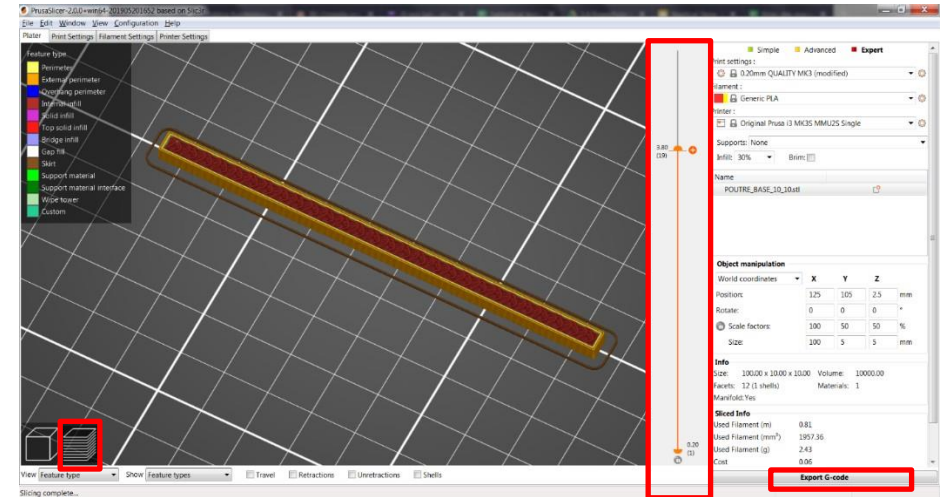
- Epaisseur des parois dans l'onglet « Print settings » > « Layers and perimeters »



- Remplissage dans l'onglet « Print settings » > « Infill »



4. A chaque modification, cliquer sur « Slice now » (en bas à droite) pour que le programme génère la gamme de dépose. Vous pouvez visualiser les différentes couches en cliquant sur « preview » (en bas à gauche) et en utilisant l'ascenseur à droite, et vérifier le poids en bas à droite sous « Used filament (g) » (le poids doit être inférieur à 2.5g).



5. Une fois satisfaits du résultat, cliquez sur « Export G-code » en bas à droite, puis copiez le fichier généré sur la carte SD de l'imprimante 3D.
6. Imprimez la poutre et testez-la !

Références

- 1 “Building a lunar base with 3D printing.” https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing (accessed Oct. 10, 2021).
- 2 “3D printing vs. CNC machining,” *Hubs*. <https://www.hubs.com/knowledge-base/3d-printing-vs-cnc-machining/> (accessed Oct. 10, 2021).
- 3 avinson, “How Long Does 3D Printing Take?,” *3 Space*, Sep. 20, 2018. <https://3space.com/blog/how-long-does-3d-printing-take/> (accessed Oct. 10, 2021).
- 4 S. S. Crump, “Apparatus and method for creating three-dimensional objects,” US5121329A, Jun. 09, 1992 Accessed: Oct. 10, 2021. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US5121329A/en>
- 5 “About - RepRap.” <https://reprap.org/wiki/About> (accessed Oct. 10, 2021).
- 6 F. M. Mwema and E. T. Akinlabi, “Basics of Fused Deposition Modelling (FDM),” in *Fused Deposition Modeling: Strategies for Quality Enhancement*, F. M. Mwema and E. T. Akinlabi, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 1–15. doi: 10.1007/978-3-030-48259-6_1.
- 7 “G-code Explained | List of Most Important G-code Commands,” *HowToMechatronics*, May 06, 2020. <https://howtomechatronics.com/tutorials/g-code-explained-list-of-most-important-g-code-commands/> (accessed Oct. 10, 2021).
- 8 W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, and J. Zhao, “Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS,” *Materials*, vol. 8, no. 9, pp. 5834–5846, Sep. 2015, doi: 10.3390/ma8095271.
- 9 B. Akhoundi and A. H. Behraves, “Effect of Filling Pattern on the Tensile and Flexural Mechanical Properties of FDM 3D Printed Products,” *Exp. Mech.*, vol. 59, no. 6, pp. 883–897, Jul. 2019, doi: 10.1007/s11340-018-00467-y.
- 10 X. Liu, M. Zhang, S. Li, L. Si, J. Peng, and Y. Hu, “Mechanical property parametric appraisal of fused deposition modeling parts based on the gray Taguchi method,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, no. 5–8, pp. 2387–2397, Mar. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9263-3.
- 11 M.-H. Hsueh et al., “Effect of Printing Parameters on the Thermal and Mechanical Properties of 3D-Printed PLA and PETG, Using Fused Deposition Modeling,” *Polymers*, vol. 13, no. 11, p. 1758, May 2021, doi: 10.3390/polym13111758.
- 12 “Bionic design.” https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/02/Bionic_design (accessed Oct. 10, 2021).
- 13 “Metal substitution for weight reduction in automotive brackets.” <https://www.9tlabs.com/case-studies/automotive-bracket-for-carbon-cars-luxury-and-motorsports> (accessed Oct. 10, 2021).
- 14 “Aerospace connector parts with 3 dimensional fiber orientation.” <https://www.9tlabs.com/case-studies/helicopter-door-hinge> (accessed Oct. 10, 2021).
- 15 S. Evangelista, “Using 3D printing to make prosthetics for Colombia war victims,” Aug. 2019, Accessed: Oct. 10, 2021. [Online]. Available: <https://actu.epfl.ch/news/using-3d-printing-to-make-prosthetics-for-colomb-8/>
- 16 3-D printing offers new approach to making buildings. <https://news.mit.edu/2017/3-d-printing-buildings-0426>
- 17 Let’s 3D print for museum conservation! <https://www.sculpteo.com/blog/2018/09/14/lets-3d-print-for-museum-conservation/>

Bibliographie complémentaire

- <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#03-technology>
- <https://impressions3d.wordpress.com/2015/01/20/lexique-de-limpression-3d/>

Quick 3D edits

To test new geometries...

- <https://www.blockscad3d.com/>
- Paint3D
- CATIA/SOLIDWORKS