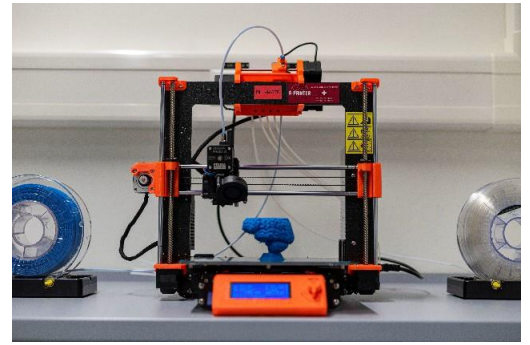


## 3D Printing of Thermoplastic Polymers

Maria Marcinek      maria.marcinek@epfl.ch  
Basile Fakhoury      basile.fakhoury@epfl.ch



### 1. Objective

- *Understanding the basics of the 3D printing process*
- *Learning how printing parameters affect the final mechanical properties of a printed object*
- *Getting acquainted with a 3D printing software*
- *Designing a beam that shows the best mechanical properties based on gained knowledge*

### 2. Preparation **before** TP session

The effective duration of the TP is very short (2 hours). To make the most use of your time, make sure to prepare ahead!

- Read this manuscript with the instructions
- Download the PRUSA software as described in **point 7. before** the TP session (tip: browse through the software to discover where printing parameters can be changed).
- Watch the video explaining the basics of 3D printing: <https://tube.switch.ch/videos/f8ac7f29>
- The objective is to print as many beams as possible. To do so, plan your time and consider that mechanical testing and printing can be done in parallel, as described in **point 4**.
- Think about parameters you want to change for optimizing the beam.

### 3. Introduction: Additive manufacturing

Additive manufacturing, as 3D printing is officially called, is a cost-competitive technique (see Table 1) that allows creating and prototyping customizable structures with very complex geometries that would be impossible to achieve with conventional processes e.g. forming or subtractive processes - or at a prohibitively high cost. Tens of different technologies fall under the additive manufacturing label differentiating with the kind of material processes and the deposition technology adopted: fused deposition modelling (FDM), stereolithography (SLA), selective laser melting (SLM), selective laser sintering (SLS), inkjet printing, etc.

Table 1: 3D printing costs<sup>1</sup>

	FDM	SLA	SLS
<b>Equipment Costs</b>	Budget printers and 3D printer kits start at a few hundred dollars. Higher quality mid-range desktop printers start around \$2,000, and industrial systems are available from \$15,000.	Professional desktop printers start at \$3,500, large-format benchtop printers at \$10,000, and large-scale industrial machines are available from \$80,000.	Benchtop systems start at \$10,000, and industrial printers are available from \$100,000.
<b>Material Costs</b>	\$50-\$150/kg for most standard and engineering filaments, and \$100-200/kg for support materials.	\$149-\$200/L for most standard and engineering resins.	\$100/kg for nylon. SLS requires no support structures, and unfused powder can be reused, which lowers material costs.
<b>Labor Needs</b>	Manual support removal (can be mostly automated for industrial systems with soluble supports). Lengthy post-processing is required for a high-quality finish.	Washing and post-curing (both can be mostly automated). Simple post-processing to remove support marks.	Simple cleaning to remove excess powder.

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. It has been used in fashion to produce clothes, shoes, jewellery (either printed and sold, or as a step to produce green prototypes or moulds), in architecture, engineering, medicine to produce prototypes with outstanding short lead times and low costs (see Table 2) and, with the constant introduction of novel materials, mechanical working pieces.

Table 2: FDM offers outstanding performances for prototyping (plastic enclosure example).<sup>2</sup>

	CNC	General public FDM	SLS
<b>Cost</b>	€€	€	€€
<b>Common materials</b>	ABS, Nylon	PLA, ABS, Nylon	Nylon
<b>Lead time</b>	1 - 2 weeks	1 - 3 days	Less than a week
<b>Accuracy</b>	± 0.125 mm	± 0.500 mm	± 0.300 mm

FDM is - like many other trending new technologies - a rather old one. Indeed the FDM patent application was filled in 1989 by Stratasys<sup>3</sup>. 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 CHF<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> <https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>

<sup>2</sup> <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/3d-printing-vs-cnc-machining/>

<sup>3</sup> <https://patents.google.com/patent/US5121329A/en>

<sup>4</sup> <https://reprap.org/wiki/RepRap>

### How does it work?

The principle behind FDM is pretty straightforward: a thermoplastic material, generally produced by controlled extrusion to create a cylindrical continuous and homogeneous filament of 1.75 mm or 3 mm diameter, is molten and extruded through a nozzle of 0.45 mm (standard size) (see Figure 1). The virtual model, designed with a CAD software or organic modelling, is imported into a slicing software, which creates “slices” of the virtual structure which will be then printed by the machine layer-by-layer: this is also the reason why 3D Printing is called a “layer-by-layer deposition” technology. The combination of the printing speed ( $v$ ), layer height ( $h_L$ ) and nozzle size ( $d$ ) determines the amount of material extruded at each time and allows to precisely control the material deposition. Also, parameters as extruder temperature, printing speed, nozzle size and cooling influence material viscosity and therefore printing quality.

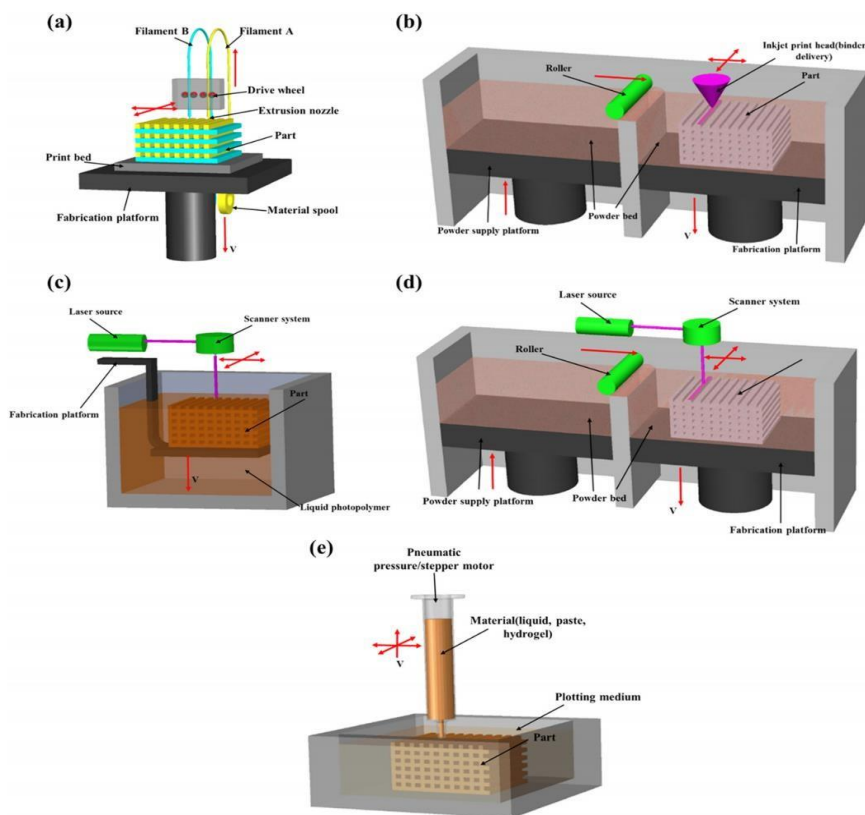


Figure 1: Schematic representation of a typical (a) FDM setup (b) 3DP setup (c) SLA setup (d) SLS setup (e) 3D plotting setup<sup>5</sup>.

### Objectifs

Les polymères thermoplastiques tels les PLA, ABS, PA, PET... peuvent être fondus, déposés et re-solidifiés. Leur composition détermine leurs propriétés thermophysiques comme leur température de fusion, leur viscosité ou leurs propriétés mécaniques. La qualité et le type de la mise en œuvre ainsi que la géométrie influencent les propriétés finales de la pièce.

Étudier les effets de ces paramètres permet d’une part de développer une compréhension globale du procédé de FDM et d’autre part d’illustrer les propriétés physiques des polymères. Pour ce faire, les étudiants doivent optimiser et imprimer une poutre avec les meilleures propriétés possibles.

<sup>5</sup> Wang et al. *Composites Part B: Engineering* **2017**, 110, 442-458

#### 4. Tasks: design beam with optimized mechanical properties

1. A kit of 6 beams (printed with PLA using defined parameters) will be provided.
  - i. measure the deflection (flèche) of all beams (consider the direction of printing with respect to the direction of the applied load)
  - ii. determine the rupture force (résistance maximale)

##### Description of the provided beams :

Les poutres font 100 x 5 x 5mm, et pèsent environ entre 1.95 et 2.3g chacune. Elles sont imprimées avec les paramètres de base de PrusaSlicer (2 couches pour les périmètres, 4 couches pleines pour le dessus de la pièce, 5 couches pleines pour le dessous), et un remplissage rectilinéaire à 15%

- 2 imprimées à plat avec les couches inférieures et supérieures à +/-45°
  - 2 imprimées à plat avec les couches inférieures et supérieures à 0/90°
  - 2 imprimées verticalement
2. Wipe the printing bed with isopropanol before you start. Print an optimised beam with PLA (file name: POUTRE\_BASE\_10\_10.stl), considering the following constraints:
    - Length: 100 mm (width and height can be changed)
    - Max. mass: 2.5 g
    - Objectives of optimization:
      - deflection (Rigidité maximale, flèche mesurée minimisée pour la première mesure)
      - rupture force (Résistance maximale, force mesurée maximisée pour la seconde mesure)

Explain and discuss your optimization process of the beam. (Which parameters did you vary and why? How do you think will they affect the mechanical properties?)

3. Print a beam with a different material using your optimized parameters and compare its mechanical performance to the beam printed in PLA.

## 5. Theoretical Questions

- i. Which materials can be printed in FDM and which cannot? Explain why and give examples for each category.
- ii. Which are the main advantages and drawbacks of FDM? Compare with other additive manufacturing technologies (considering typical processable materials, the physical state during processing, resolution /  $\mu\text{m}$ ).
- iii. How would you quantify the adhesion strength between the printed layers?
- iv. How can you speed up the printing process? Which parameters can you change and how will this affect the quality of the beam?
- v. What do you need to take into account when printing with a different material (polymer)?
- vi. How would you modify the material to increase its mechanical properties further?

## 6. Mechanical Test

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... ).

Les propriétés mécaniques sont déterminées en mesurant les déformations et les contraintes supportées par une structure.

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

Les poutres imprimées horizontalement peuvent être testés de 2 manières :

- Selon la direction d'impression
- Perpendiculairement à la direction d'impression

## 7. 3D Printing Software

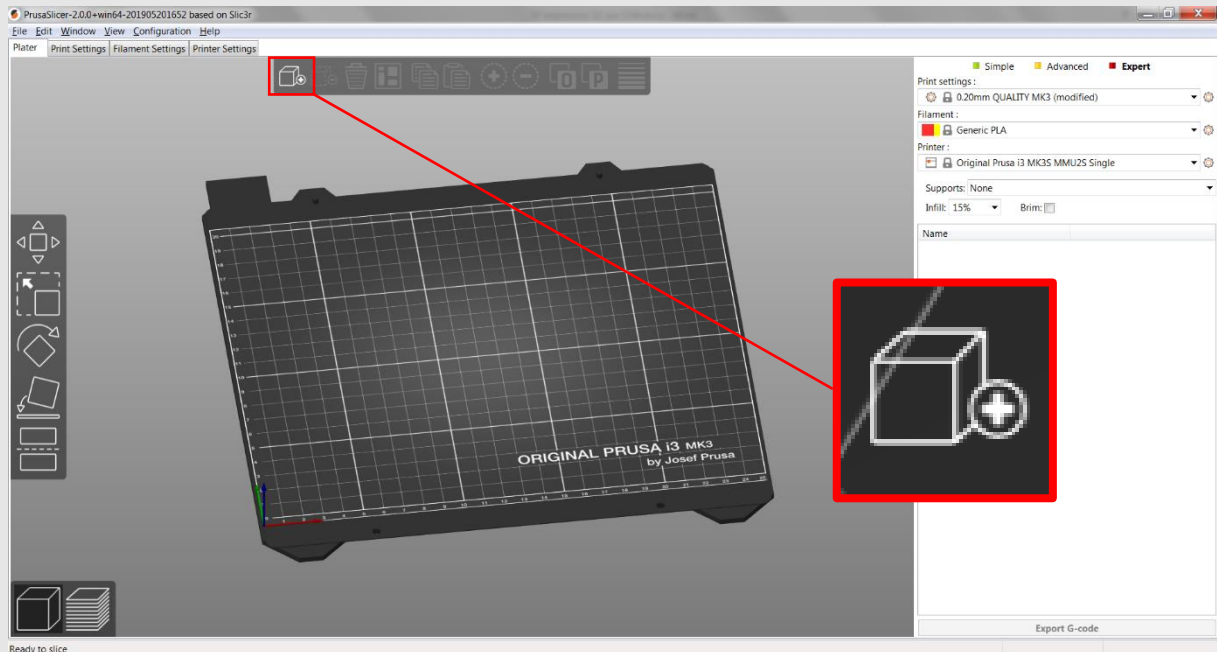
### A. Télécharger et installer PrusaSlicer

<https://www.prusa3d.com/drivers/>

Le modèle d'imprimante est Original Prusa i3 MK3S/MK2.5S Multi Material 2S

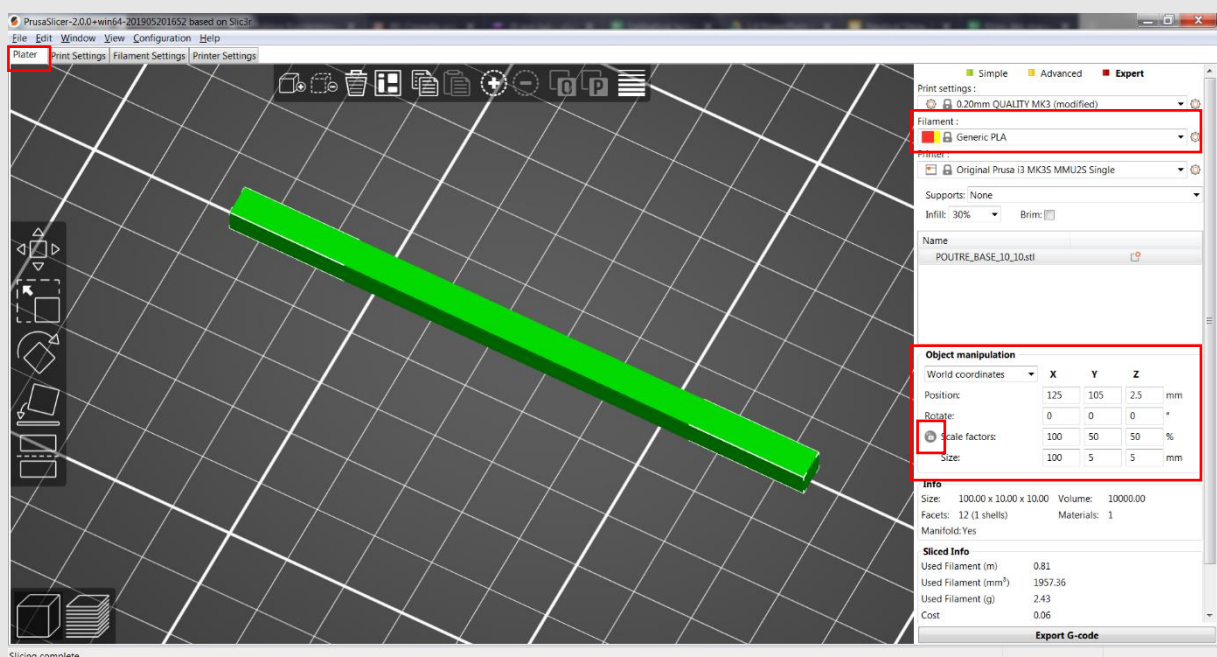
### B. Copiez sur votre ordinateur le fichier « POUTRE\_BASE\_10\_10.stl » depuis le Moodle

### C. Ouvrir PrusaSlicer, et importer « POUTRE\_BASE\_10\_10.stl »

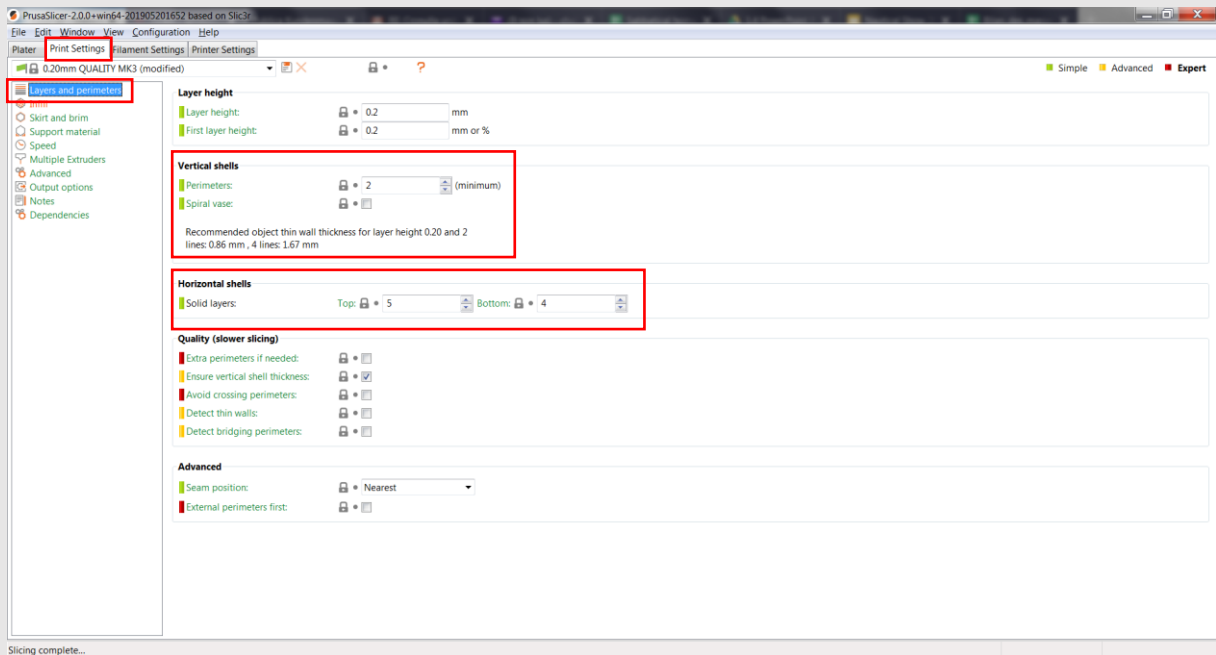


### D. Ajustez les différents paramètres pour optimiser la poutre :

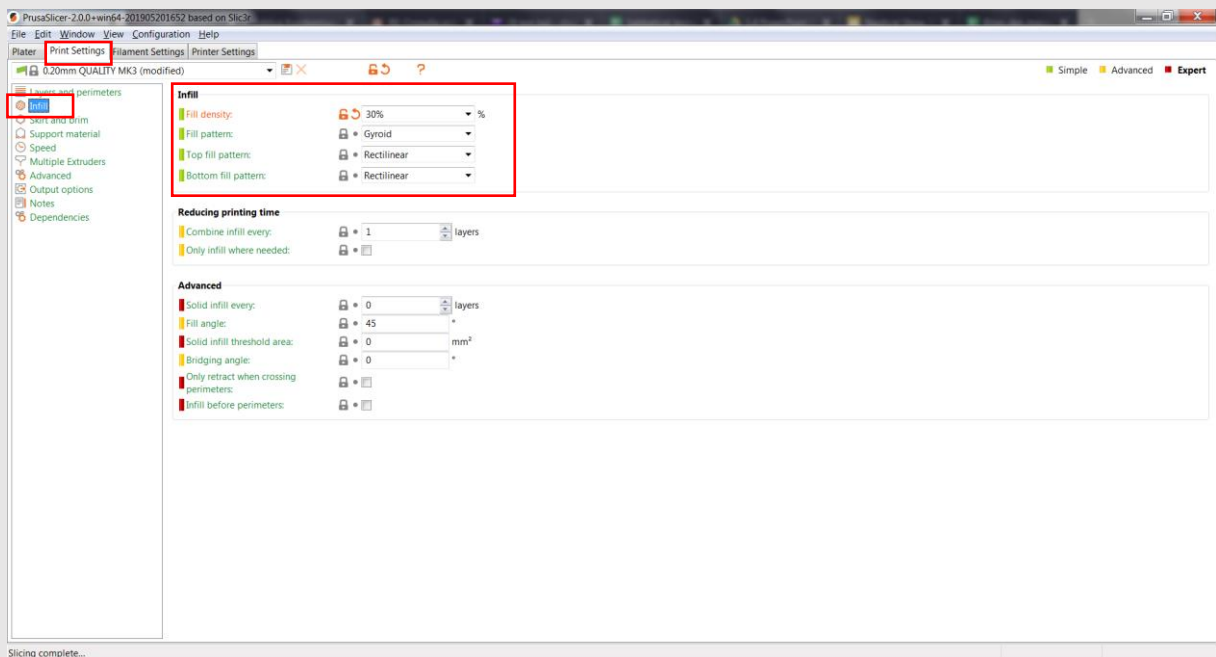
- Matière, section et orientation de la poutre dans l'onglet « Plater »  
(attention à déverrouiller les « scale factors » pour pouvoir modifier la section sans changer la longueur)



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

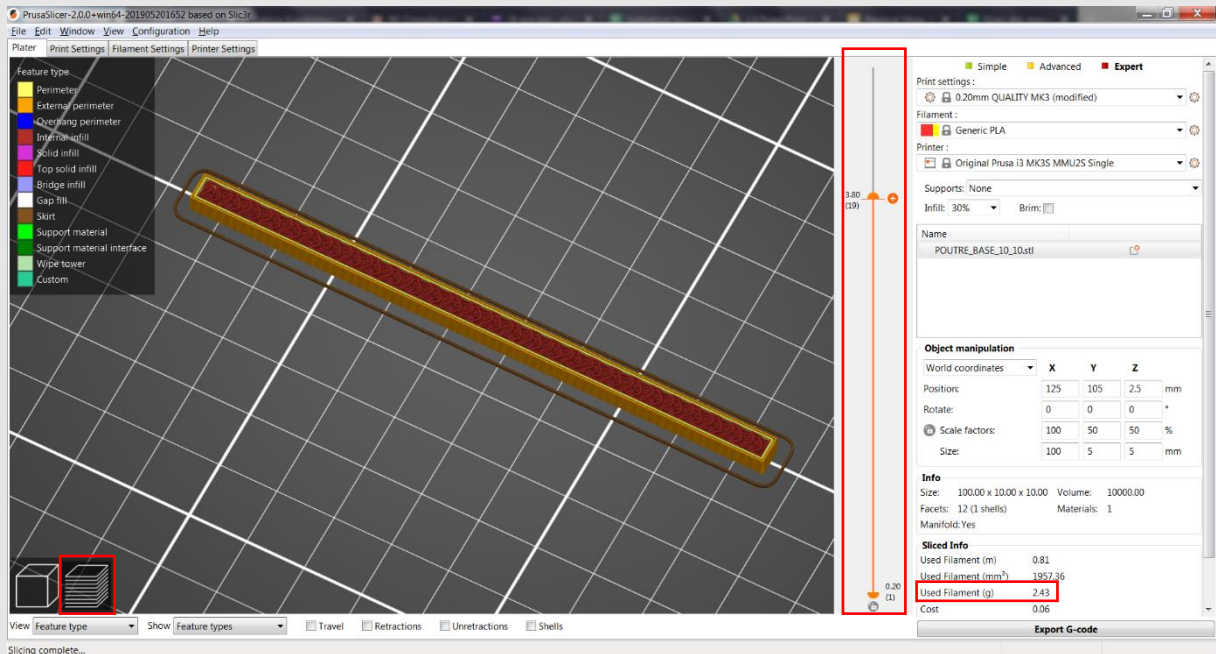


- Remplissage dans l'onglet « Print settings » > « Infill »





- E. 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).



- F. 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.
- G. Imprimez la poutre et testez-la !

### Nomenclature

Afin de pouvoir retrouver tous les paramètres utilisés pour imprimer une poutre, le nom de chaque poutre est structuré de la manière suivante :

#### PLA\_50x50\_RL15\_P2T5B4\_Rot0-0-0

Matière :	Section :	Remplissage :	Epaisseur de parois :	Rotations autour de :
- PLA	- Y x Z	- RL = rectilinear	- P = périmètre	- X
- ABS	- En 10èmes	- GD = grid	- T = top	- Y
- ...	- de mm	- TR = triangles	- B = bottom	- Z
		- ST = stars	- Le chiffre représente	
		- CB = cubic	le nombre des couches	
		- LN = line		
		- CC = concentric		
		- HB = honeycomb		
		- 3H = 3D honeycomb		
		- GD = gyroid		
		- HC = Hilbert curve		
		- AC = Archimedean chords		
		- OS = octagram spiral		
		- Le nombre représente les %		

Exemple : poutre de base =

- PLA\_50x50\_RL15\_P2T4B5\_Rot0-0-0
- PLA\_50x50\_RL15\_P2T4B5\_Rot0-0-45 (la rotation de 45° donne des couches supérieures et inférieures à 0/90° puisque par défaut le programme met ces couches à 45° par rapport à son repère)
- PLA\_50x50\_RL15\_P2T4B5\_Rot0-90-0 (la rotation de 90° autour de Y rend la poutre verticale)



## **8. Supplementary sources (Youtube videos):**

- i. Comparison of different printed polymeric materials:  
<https://www.youtube.com/watch?v=ycGDR752fT0>
- ii. Influence of infill pattern and shell:  
<https://www.youtube.com/watch?v=AmEaNAwFSfI>
- iii. Influence of extrusion width:  
<https://www.youtube.com/watch?v=9Yaj0wSKKHA>

## **9. Bibliography**

- <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#03-technology>
- <https://link.springer.com/article/10.1007/s40436-014-0097-7>
- Guide Ultime des matériaux d'impression 3D FDM