

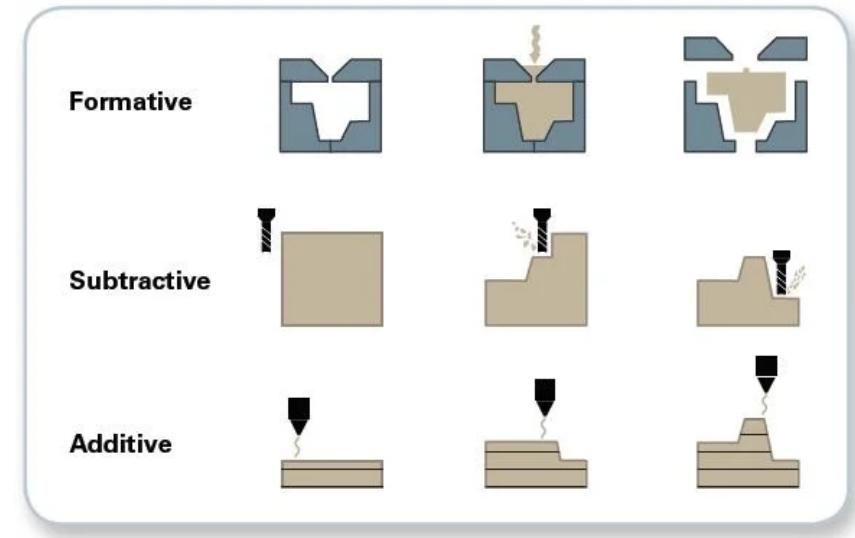
# *CAO pour l'impression 3D*

## Introduction à l'impression 3D

Kévin Hoarau - Septembre 2023

# La fabrication additive

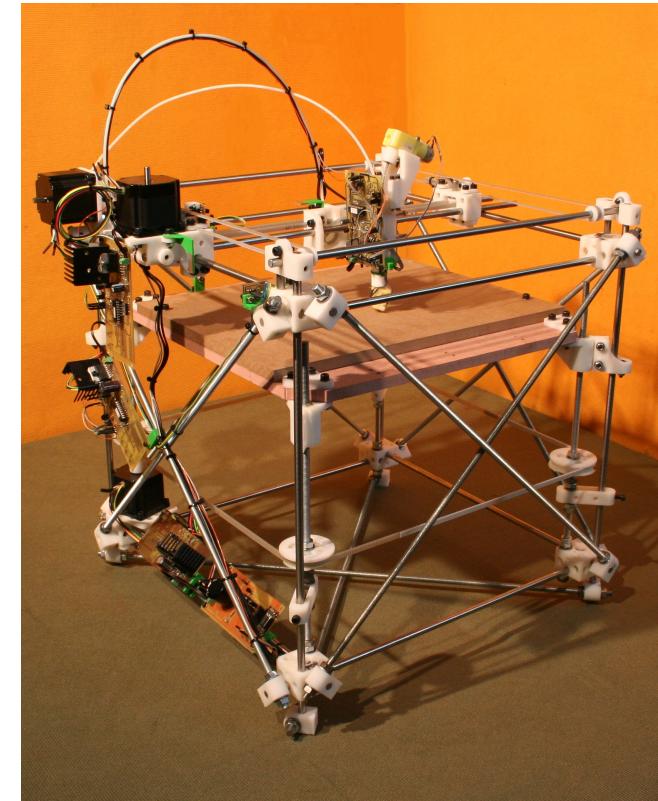
- L'impression 3D est une méthode de **fabrication additive**
- Elle s'oppose aux méthodes de fabrication soustractive ou de moulage, très largement employé dans l'industrie.
- Permet un prototypage rapide et à faible coût



*"How Can 3D Optical Profiling Optimize Additive Manufacturing Processes?", Azom.com*

# Histoire de l'impression 3D grand public

- 1988 : Brevetage de la technologie FDM  
(*Fused Deposition Modeling*)
- 2005 : Le projet RepRap est lancé par Adrian Bowyer (Université de Bath, Royaume-Uni)
- 2008 : La "Darwin" produit une réPLICATION complète d'elle-même (pièces imprimables)
- 2009 : Le brevet sur la technologie FDM expire



*RepRap 1.0 "Darwin"*

# Histoire de l'impression 3D grand public

- 2009 : Josef Prusa simplifie la RepRap Mendel et crée la Prusa Mendel "Le modèle Prusa est la Ford T des imprimantes 3D."(Reprap.org)
- 2015 : Commercialisation de la Prusa i3
- 2016 : K. Hoarau construit une imprimante 3D approximative avec des chutes de bois
- 2018 : Commercialisation de la Creality Ender 3 à moins de 200€

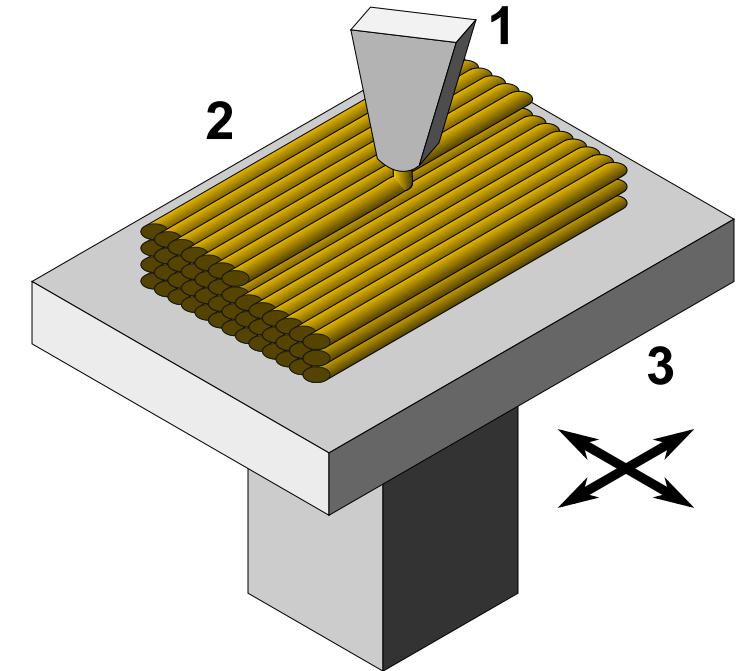


*Ferme d'impression Prusa*

# Technologies d'impression 3D

## Fused deposition modeling (FDM)

- La technologie FDM ou DFF (dépôt de fil fondu) est la plus répandue.
- Elle consiste à faire fondre un filament de matière polymère puis à déposer cette matière couche par couche.

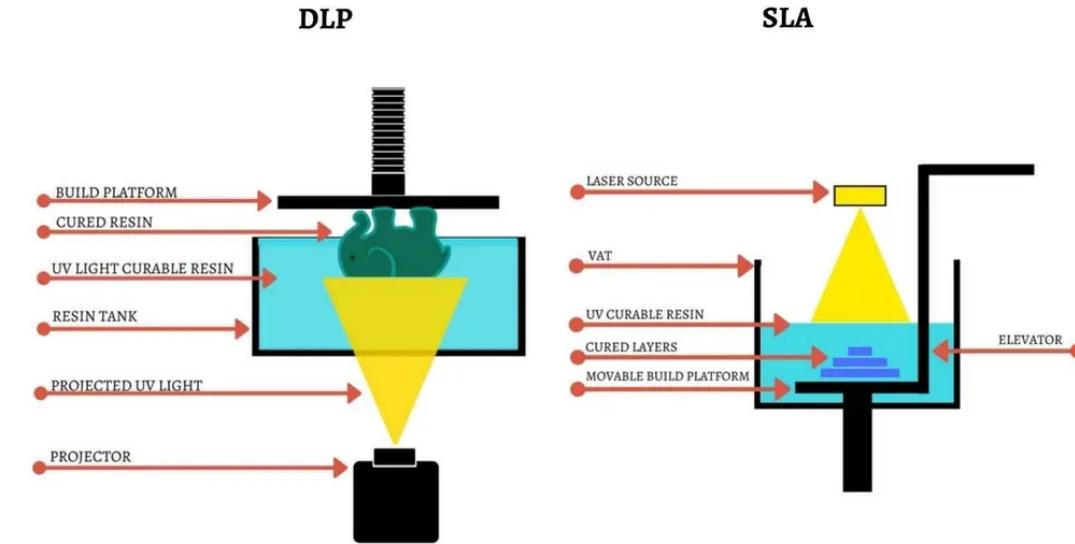


"Procédé Fused Deposition Modeling (FDM)", Wikipedia

# Technologies d'impression 3D

## La photopolymérisation

- Les imprimantes SLA (*Stereolithography Apparatus*) utilisent un balayage laser pour solidifier une résine sensible aux UV
- Les imprimantes DLP (*Digital Light Processing*) utilisent un projecteur permettant de solidifier une couche entière

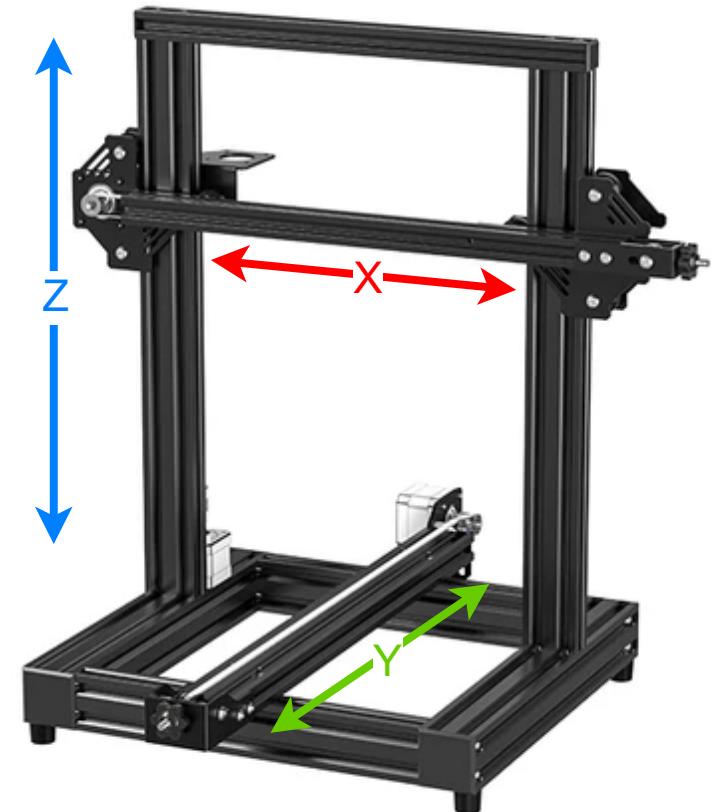


"The Difference between DLP and SLA 3D Printing Technology", MANUFACTUR3D

# Anatomie d'une imprimante FDM

## Châssis (*Frame*)

- La structure la plus répandue est l'imprimante cartésienne
- Le châssis est généralement formé à partir d'extrusions métalliques
- Les axes X et Y sont actionné par un système de courroies (meilleure vitesse et accélération)
- L'axe des Z est actionné par une vis sans fin (meilleur couple)



# Anatomie d'une imprimante FDM

## Moteur pas à pas (*stepper motor*)

- Les moteurs pas à pas (Nema 17), sont utilisés pour déplacer les différents axes (et l'extrudeur)
- Ce type de moteur permet de contrôler précisément leurs vitesses et positions
- Pour cela, seul un capteur de fin de course est nécessaire sur chaque axe pour initialiser la position  $X = 0; Y = 0; Z = 0$  (*home position*)

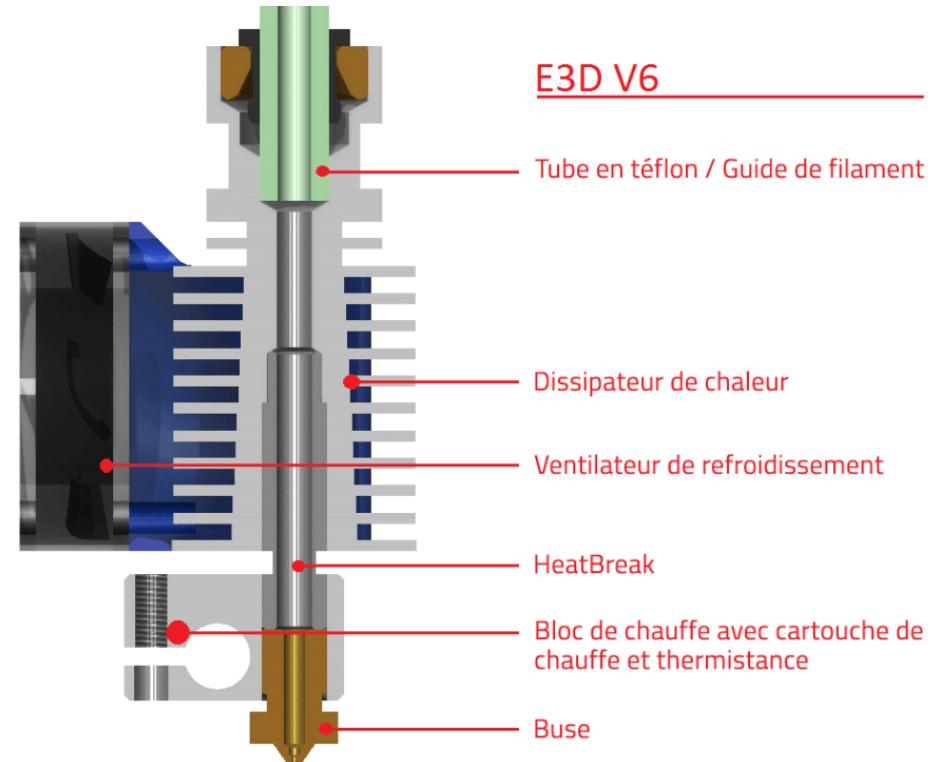


*Exemple de moteur NEMA 17  
200 pas/révolutions*

# Anatomie d'une imprimante FDM

## La tête d'impression (*hotend*)

- C'est la pièce centrale qui est chargée de faire fondre le filament
- En fonction de la buse installée, le diamètre de sortie du fil fondu varie (généralement 0.4mm)
- C'est le bloc de chauffe, équipé d'une cartouche de chauffe et d'une thermistance qui permet de controller la température de la buse

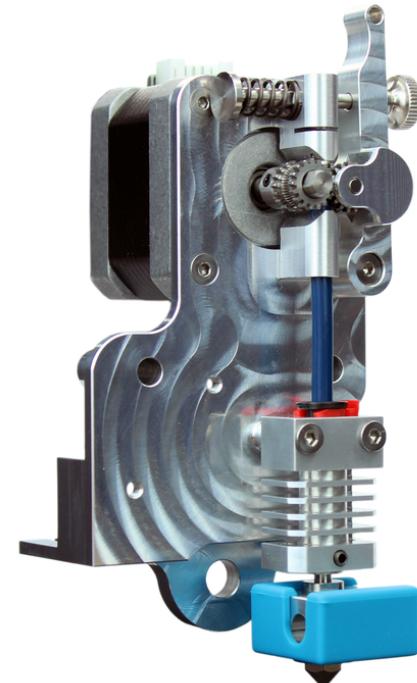


<http://wikifab.hatlab.fr>

# Anatomie d'une imprimante FDM

## Extrudeur (*extruder*)

- L'extrudeur a pour rôle de pousser le filament vers la tête d'impression
- Une roue dentée montée sur un moteur pas à pas permet d'agripper le filament et de contrôler la vitesse d'extrusion
- Un extrudeur est dit *direct drive* lorsque qu'il est monté très proche de la tête d'impression

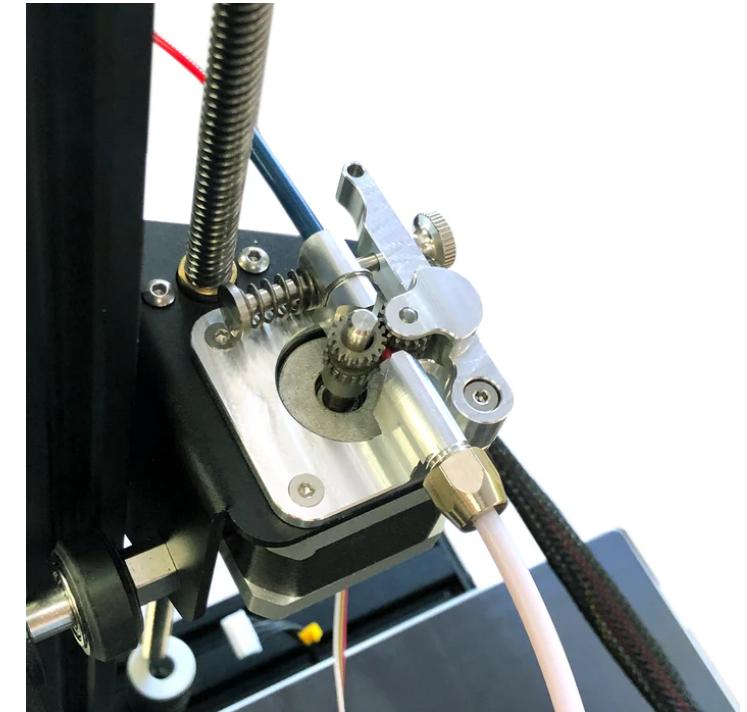


Extrudeur *direct drive*

# Anatomie d'une imprimante FDM

## Extrudeur Bowden

- Ce type d'extrudeur très répandu dans les imprimantes d'entrée de gamme
- Le moteur de l'extrudeur y est déporté sur le chassis et un tube PTFE guide le filament jusqu'à la tête d'impression
- Il permet de réduire la masse en mouvement
- Cependant, il est peu adapté aux filaments flexibles

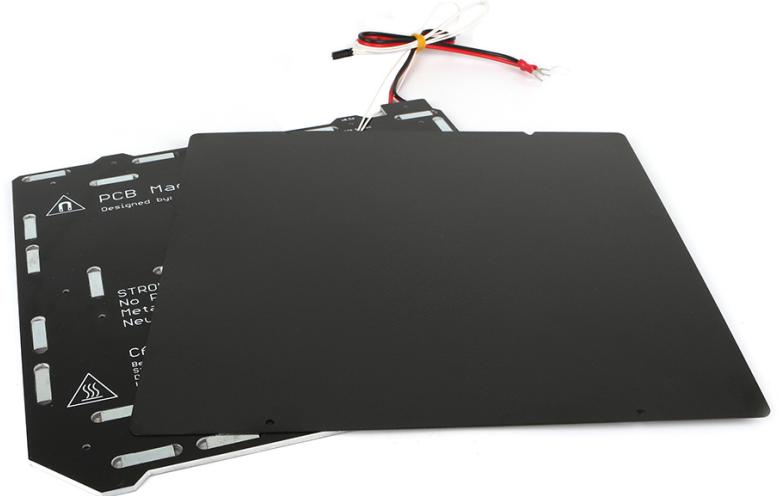


*Extrudeur Bowden*

# Anatomie d'une imprimante FDM

## Plateau chauffant (Heated Bed)

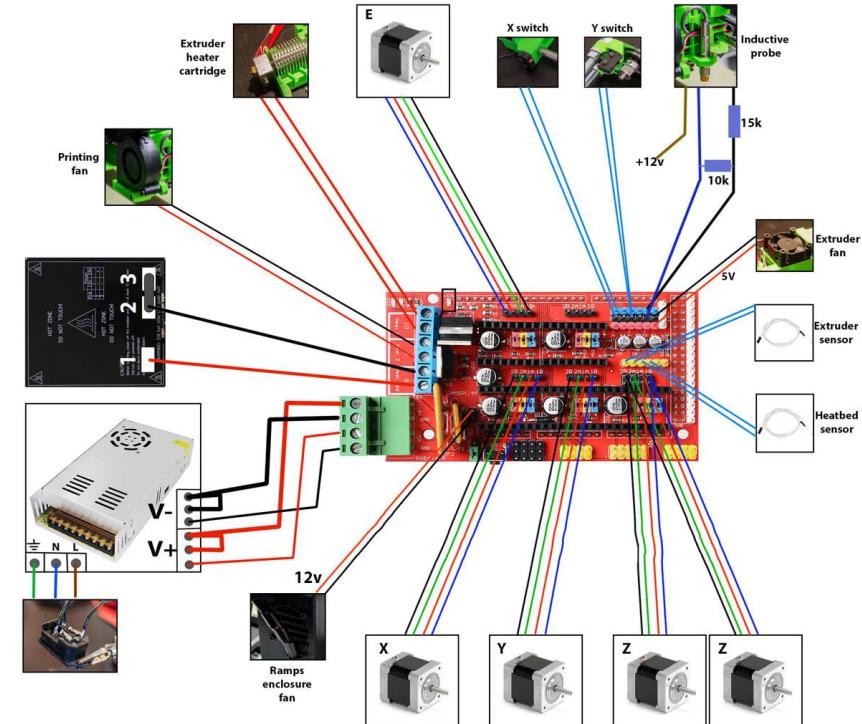
- Le plateau est la surface sur laquelle la pièce va être imprimée
- La partie chauffante permet de contrôler la température du plateau afin d'éviter le décollement de la pièce durant l'impression
- Un support est généralement utilisé, son rôle est notamment d'améliorer d'adhérence durant l'impression et de faciliter le retrait de la pièce post-impression.



# Anatomie d'une imprimante FDM

## Carte mère (*controller board*)

- Elle est chargée de piloter l'ensemble des composants de l'imprimante
- Elle interprète les instructions envoyées par un ordinateur ou contenu dans un fichier
- Parfois il est possible de changer les contrôleurs des moteurs pas à pas

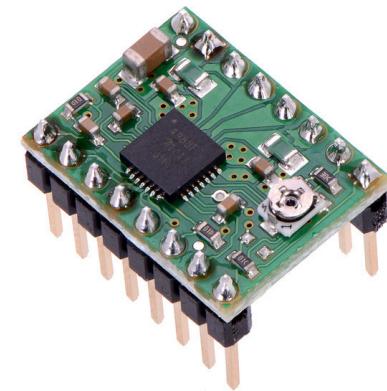


Ramps 1.4  
(Reprap Arduino Mega Pololu Shield)

# Anatomie d'une imprimante FDM

## Contrôleur pas à pas (*stepper driver*)

- Ce circuit est dédié au pilotage d'un moteur à pas.
- Le A4988 était le plus utilisé dans les premières imprimantes 3D grand public. Il permet un microstepping de 1/16.
- Le TMC2208 permet un microstepping de 1/256 rendant l'opération du moteur beaucoup plus silencieuse.



Contrôleur A4988

# Quelques mots sur Marlin firmware

- Marlin est un micrologiciel (*firmware*) open source dont le développement a commencé en 2011 pour le projet RepRap.
- Il est utilisé par la plupart des imprimantes 3D grand public.
- Grâce à ce firmware commun, il est facile de passer d'une marque d'imprimante à une autre. De plus, les manufacturiers d'imprimantes 3D utilisant Marlin comme base pour construire leur firmware doivent le faire en open-source.
- Une alternative à Marlin est Klipper, lancé en 2016, ce firmware permet de déporter les calculs complexes sur un ordinateur hôte et ainsi d'atteindre des vitesses d'impression et un niveau de qualité élevé.



Logo de Marlin  
firmware

# Autres imprimantes FDM

## Imprimantes Core XY

- Les imprimantes core XY ont une mécanique un peu plus complexe où la tête d'impression se déplace en X et Y et le plateau en Z
- Cette technologie permet d'atteindre des vitesses d'impression plus élevées et équipe principalement des imprimantes haute-gamme



Bambu Lab X1-Carbon

# Autres imprimantes FDM

## Imprimantes Delta

- La tête d'impression des imprimantes delta est maintenue par trois bras disposés dans une configuration triangulaire.
- Chaque bras peut être déplacé verticalement afin ainsi d'atteindre n'importe quelles positions.
- Elles permettent d'atteindre des vitesses d'impression élevées mais offrent un volume d'impression plus réduit



FLSUN V400

# Impression multi-matériaux

On rencontre généralement trois approches pour réaliser des impressions multi-matériaux et/ou multicolores :

- Les imprimantes équipées de plusieurs extrudeurs
- Les systèmes de changements de matériaux automatiques
- Découpage et soudage de filament (e.g. Mosaic Palette)



*Creality CR-X*



*Bambulab AMS*  
*(Automatic Material System)*

# Les matériaux

## Le PLA

- C'est la star des matériaux, il est facile à imprimer, peu honereux et biodégradable
- Cependant, il n'est pas très résistant à l'humidité et à la chaleur



### PLA

PLA is the go-to material for most users due to its ease-of-use, dimensional accuracy, and low cost.

Heated Bed Not Required

Rigid

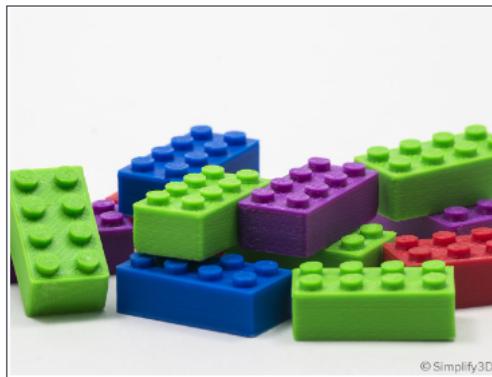


<https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide>

# Les matériaux

## L'ABS

- L'ABS a été très populaire avant de se faire voler la vedette par le PLA.
- Il est plus compliqué à imprimer, cependant il offre des propriétés mécaniques et une robustesse face aux conditions climatiques bien meilleures



### ABS

ABS is a low-cost material, great for printing tough and durable parts that can withstand high temperatures.

Heat Resistant

Impact Resistant

Rigid



<https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide>

# Les matériaux

## Le PETG et l'ASA

- Le PETG et l'ASA offrent tous deux un bon compromis entre le PLA et L'ABS.
- Ils sont plus simples à imprimer que l'ABS tout en offrant de bonnes propriétés mécaniques



### PETG

PET and PETG filaments are known for their ease of printability, smooth surface finish, and water resistance.

Chemically Resistant

Fatigue Resistant

Rigid

Water Resistant



<https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide>

# Les matériaux

## Les filaments techniques

- Dans cette catégorie, on retrouve des matériaux aux propriétés mécaniques très intéressantes, mais qui nécessite des imprimantes haute-gamme pour pouvoir être imprimé (température d'impression, filaments abrasifs, etc)
- Quelques exemples : filaments renforcés en carbone, nylon, polycarbonate ...



### Carbon Fiber Filled

Carbon fiber filaments contain short fibers that are infused into a PLA or ABS base material to help increase strength and stiffness.

Composite

Heated Bed Not Required

Rigid



# Les matériaux

## Les filaments flexibles

- Il existe une variété de filaments flexibles telle que le TPU qui offrent différentes propriétés d'élasticité.
- Une imprimante *direct drive* est généralement nécessaire pour leur impression



### Flexible

Flexible filaments, commonly referred to as TPE or TPU, are known for their elasticity allowing the material to easily stretch and bend.

Elastic   Fatigue Resistant   Flexible   Heated Bed Not Required  
Soft



<https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide>

# Les matériaux

## Les filaments solubles

- Les matériaux solubles tels que le PVA sont parfois utilisés comme support pour des impressions dans un autre matériau
- Une imprimante multi-matériaux est nécessaire



### PVA

PVA is commonly known for its ability to be dissolved in water and is often used as a support material for complex prints.

Dissolvable

Fatigue Resistant

Flexible

Soft



<https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide>

# Tableau comparatif des matériaux

	 ABS	 Flexible	 PLA	 HIPS	 PETG	 Nylon	 Carbon Fiber Filled	 ASA	 Polycarbonate	 Polypropylene	 Metal Filled	 Wood Filled	 PVA
	<a href="#">Learn More</a>	<a href="#">Learn More</a>	<a href="#">Learn More</a>	<a href="#">Learn More</a>	<a href="#">Learn More</a>	<a href="#">Learn More</a>	<a href="#">Learn More</a>	<a href="#">Learn More</a>	<a href="#">Learn More</a>	<a href="#">Learn More</a>	<a href="#">Learn More</a>	<a href="#">Learn More</a>	<a href="#">Learn More</a>
	<a href="#">Compare Selected</a>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ultimate Strength	 40 MPa	 26 - 43 MPa	 65 MPa	 32 MPa	 53 MPa	 40 - 85 MPa	 45 - 48 MPa	 55 MPa	 72 MPa	 32 MPa	 20 - 30 MPa	 46 MPa	 78 MPa
Stiffness	 5 / 10	 1 / 10	 7.5 / 10	 10 / 10	 5 / 10	 5 / 10	 10 / 10	 5 / 10	 6 / 10	 4 / 10	 10 / 10	 8 / 10	 3 / 10
Durability	 8 / 10	 9 / 10	 4 / 10	 7 / 10	 8 / 10	 10 / 10	 3 / 10	 10 / 10	 10 / 10	 9 / 10	 4 / 10	 3 / 10	 7 / 10
Maximum Service Temperature	 98 °C	 60 - 74 °C	 52 °C	 100 °C	 73 °C	 80 - 95 °C	 52 °C	 95 °C	 121 °C	 100 °C	 52 °C	 52 °C	 75 °C
Coefficient of Thermal Expansion	 90 µm/m·°C	 157 µm/m·°C	 68 µm/m·°C	 80 µm/m·°C	 60 µm/m·°C	 95 µm/m·°C	 57.5 µm/m·°C	 98 µm/m·°C	 69 µm/m·°C	 150 µm/m·°C	 33.75 µm/m·°C	 30.5 µm/m·°C	 85 µm/m·°C
Density	 1.04 g/cm³	 1.19 - 1.23 g/cm³	 1.24 g/cm³	 1.03 - 1.04 g/cm³	 1.23 g/cm³	 1.06 - 1.14 g/cm³	 1.3 g/cm³	 1.07 g/cm³	 1.2 g/cm³	 0.9 g/cm³	 2 - 4 g/cm³	 1.15 - 1.25 g/cm³	 1.23 g/cm³
Price (per kg)	 \$10 - \$40	 \$30 - \$70	 \$10 - \$40	 \$24 - \$32	 \$20 - \$60	 \$25 - \$65	 \$30 - \$80	 \$38 - \$40	 \$40 - \$75	 \$60 - \$120	 \$50 - \$120	 \$25 - \$55	 \$40 - \$110
Printability	 8 / 10	 6 / 10	 9 / 10	 6 / 10	 9 / 10	 8 / 10	 8 / 10	 7 / 10	 6 / 10	 4 / 10	 7 / 10	 8 / 10	 5 / 10
Extruder Temperature	 220 - 250 °C	 225 - 245 °C	 190 - 220 °C	 230 - 245 °C	 230 - 250 °C	 220 - 270 °C	 200 - 230 °C	 235 - 255 °C	 260 - 310 °C	 220 - 250 °C	 190 - 220 °C	 190 - 220 °C	 185 - 200 °C
Bed temperature	 95 - 110 °C	 45 - 60 °C	 45 - 60 °C	 100 - 115 °C	 75 - 90 °C	 70 - 90 °C	 45 - 60 °C	 90 - 110 °C	 80 - 120 °C	 85 - 100 °C	 45 - 60 °C	 45 - 60 °C	 45 - 60 °C
Heated Bed	 Required	 Optional	 Optional	 Required	 Required	 Required	 Optional	 Required	 Required	 Optional	 Optional	 Required	
Recommended Build Surfaces	 Kapton Tape, ABS Slurry	 PEI, Painter's Tape	 Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	 Glass Plate, Glue Stick, Painter's Tape	 Glue Stick, Painter's Tape	 Glue Stick, PEI	 Painter's Tape, Glue Stick, Glass Plate, PEI	 Glue Stick, PEI	 PEI, Commercial Adhesive, Glue Stick	 Packing Tape, Polypropylene Sheet	 Painter's Tape, Glue Stick, PEI	 Painter's Tape, Glue Stick, PEI	 PEI, Painter's Tape
Other Hardware Requirements	 Heated Bed, Enclosure Recommended	 Part Cooling Fan	 Part Cooling Fan	 Heated Bed, Enclosure Recommended	 Heated Bed, Part Cooling Fan	 Heated Bed, Enclosure Recommended, May Require All Metal Hotend	 Part Cooling Fan	 Heated Bed	 Heated Bed, Enclosure Recommended, All Metal Hotend	 Heated Bed, Enclosure Recommended, All Metal Hotend	 Wear Resistant or Stainless Steel Nozzle, Part Cooling Fan	 Part Cooling Fan	 Heated Bed, Part Cooling Fan

<https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/>