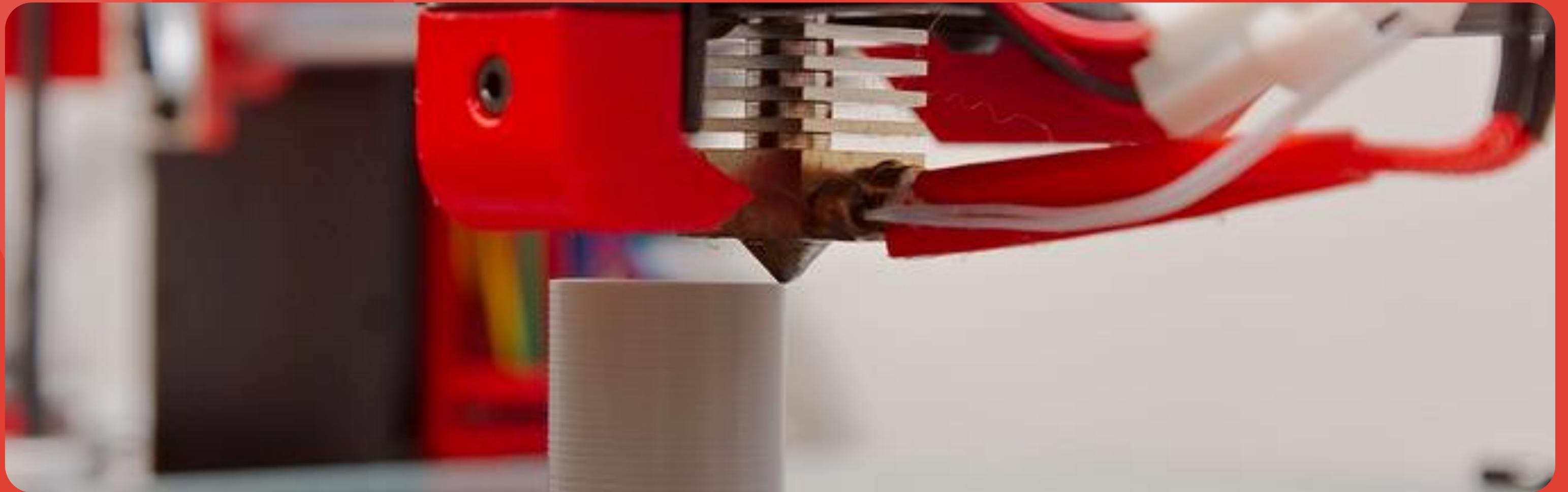




# Fabrication Additive



**UniLaSalle**  
Amiens

École d'ingénieurs  
Énergie  
& Numérique

# Index

## 1. Introduction à l'Impression 3D

- a. *Historique*
- b. *Brevets et Open-Source*
- c. *Popularisation*

## 2. Les Technologies

- a. *Aperçu des technologies*
- b. *Explication de techniques*
- c. *Différenciations*

## 3. Les Matériaux

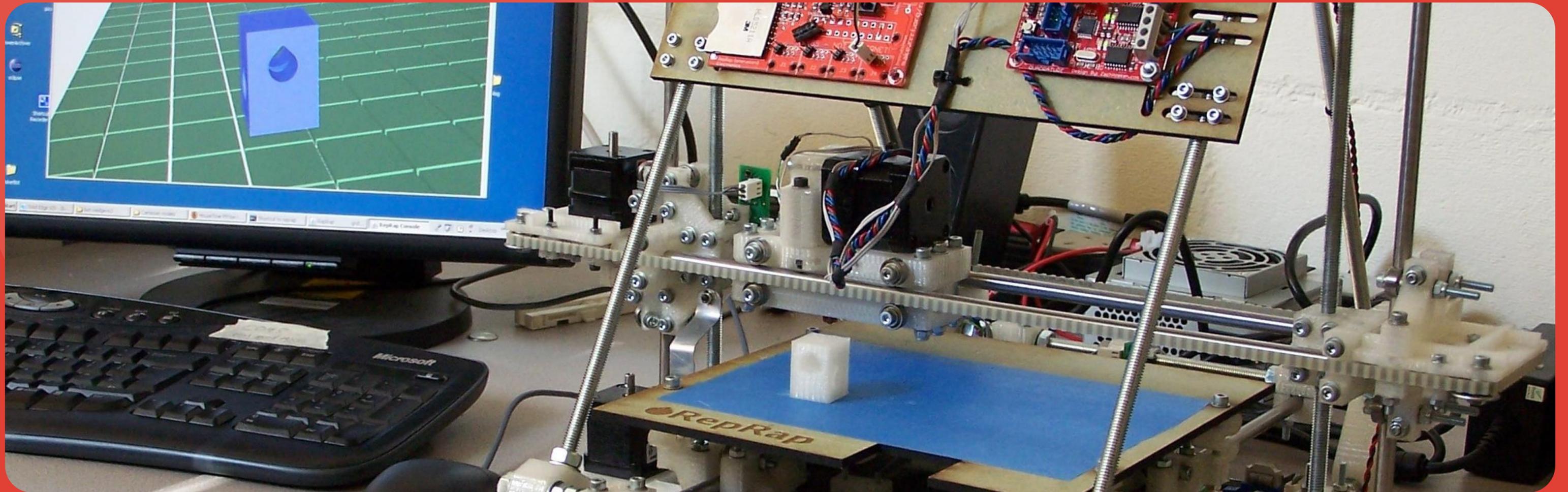
## 4. Le WorkFlow logiciel

- a. *La modélisation*
- b. *L'export*
- c. *Le Slicer*
- d. *Optimiser ses designs*



# I - Introduction

*Historique, applications et technologies*



# Définition "Impression 3D"

- Procédé de **fabrication additive** automatisé
- **Ajouter de la matière** couche par couche pour créer un objet tridimensionnel
- **Avantage** : Fabrication de pièces complexes avec une flexibilité de production plus importante que les méthodes traditionnelles
- Méthode à opposer à la **fabrication soustractive** (Fraisage par exemple)

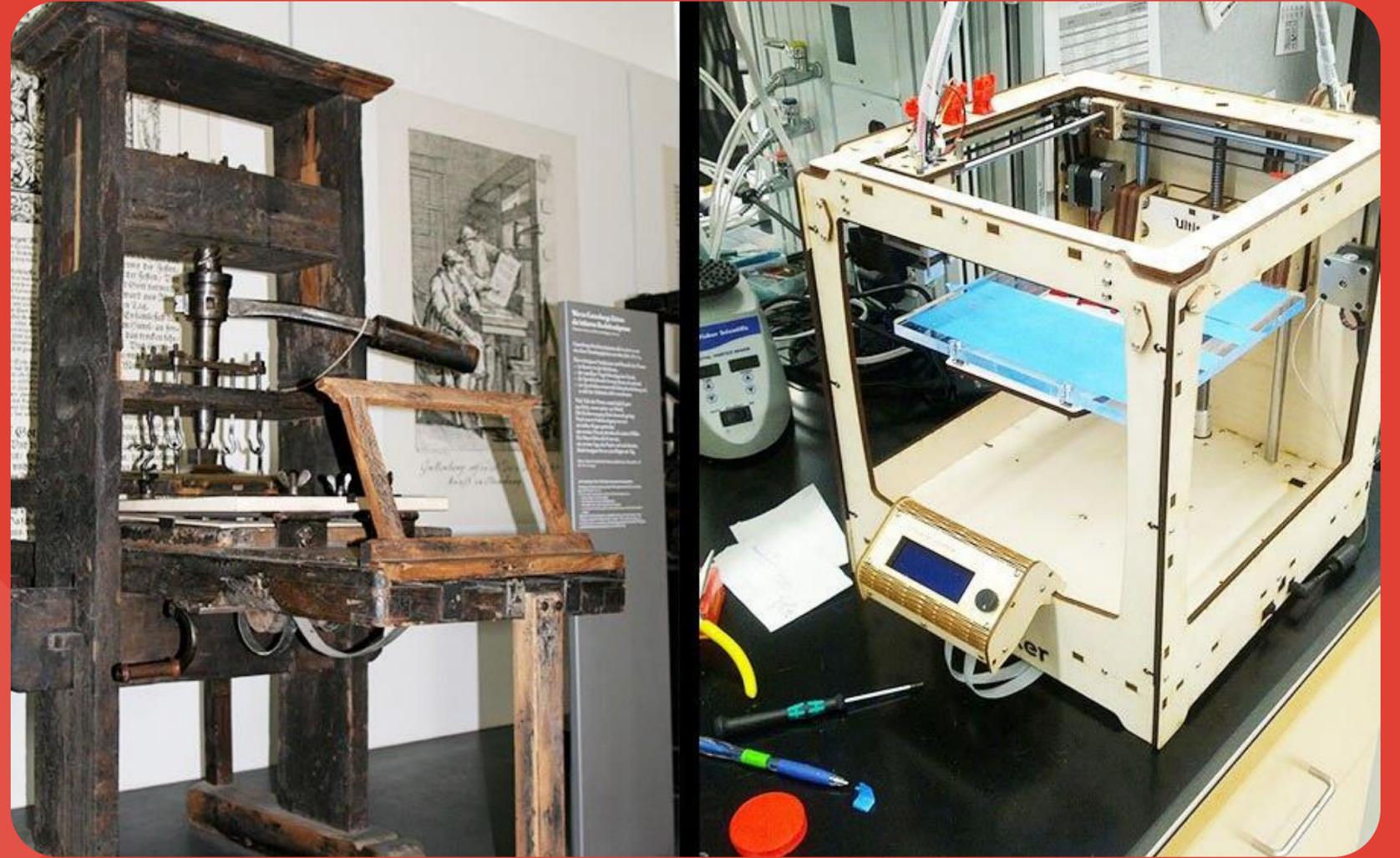
Au début de l'impression 3d, on va distinguer deux types de procédés principaux :

- Le FDM (Fused Deposition Modeling)
- Le SLA (Stereolithography Apparatus)



**3D Concrete Printing in 1930 by William E. Urschel**

# Historique



# ➤ Origines et Premiers Développements (1970-1980)

- **1974** : Concept d'impression 3D introduit par David E. H. Jones dans un article scientifique.
- **1981** : Hideo Kodama, un chercheur japonais, invente une méthode de prototypage rapide à base de résines photopolymères.
- **1984** :
  - Charles Hull dépose le premier brevet pour la **stéréolithographie (SLA)**, une méthode utilisant un laser pour solidifier des résines liquides.
  - Carl Deckard et son superviseur, le Dr Joe Beaman, commencent à travailler sur la technologie de frittage laser sélectif (SLS). L'objectif est d'utiliser un laser pour fusionner des particules de poudre afin de créer des objets couche par couche.

# Les oubliés de l'impression 3D

## Les pionniers français :

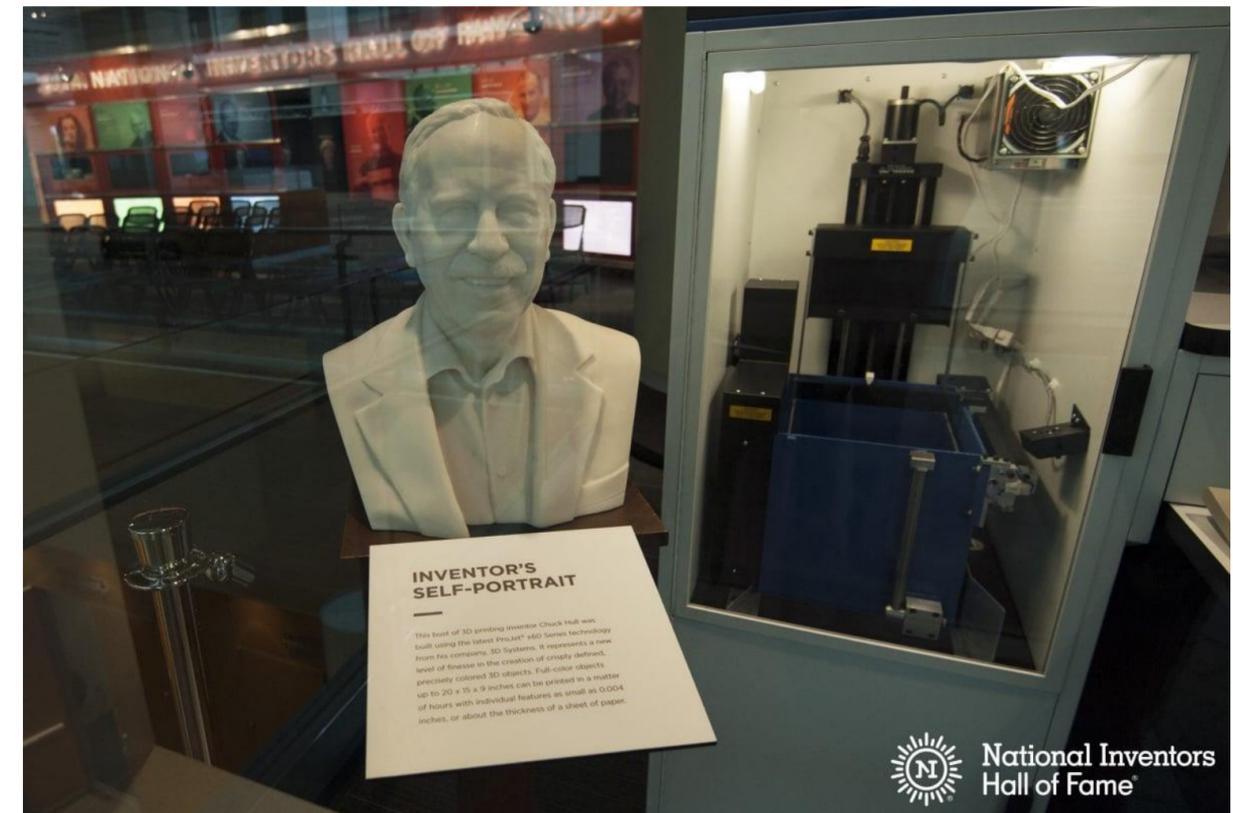
- Jean-Claude André, Alain le Méhauté, et Olivier de Witte.
- Développent en 1984 une méthode similaire à la stéréolithographie (SLA).
- Leur entreprise, **CILAS Alcatel**, juge l'invention sans potentiel commercial.
- Le brevet est abandonné.

## Conséquences :

- En 1986, Charles Hull (USA) dépose le brevet SLA et devient le "père de l'impression 3D".
- La France perd une opportunité stratégique majeure.

# ➔ Commercialisation et Progrès Techniques (1986-1990)

- **1986** : Charles Hull fonde **3D Systems**, qui commercialise la première imprimante 3D SLA.
- **1988** :
  - Développement de la technologie **FDM (Fused Deposition Modeling)** par Scott Crump, cofondateur de Stratasys.
  - Carl Deckard dépose un brevet pour le **SLS**. Le brevet porte sur l'utilisation d'un laser pour fusionner des matériaux en poudre, comme le nylon ou les métaux.
- **1989** : Stratasys dépose le brevet pour le procédé FDM.



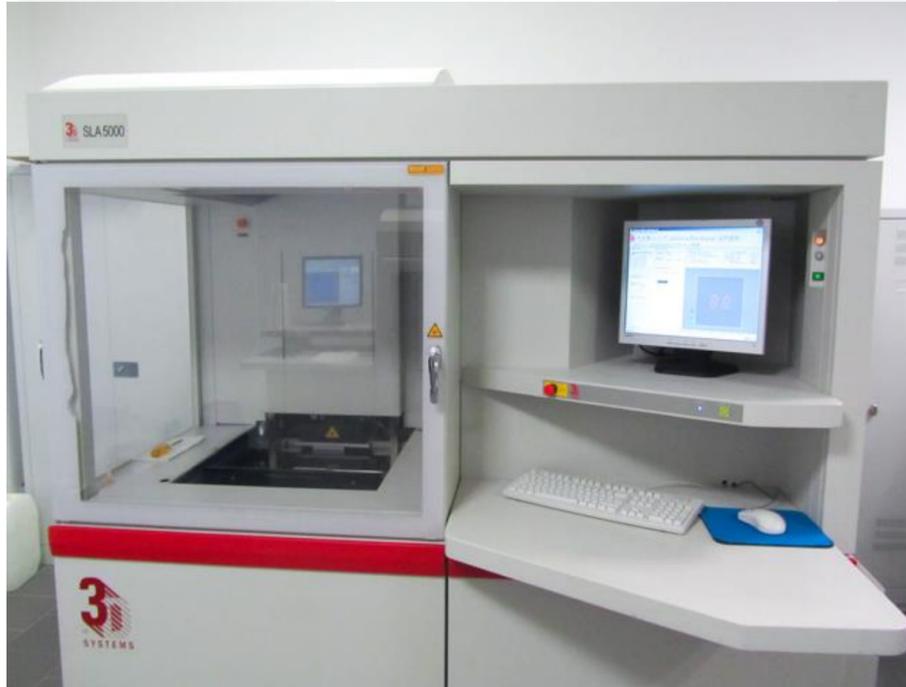
# ➤ Diversification des Technologies (1990-2000)

- **1992** : La société DTM Corporation, cofondée par Deckard, commercialise la première imprimante SLS industrielle (Principalement utilisée pour le prototypage rapide dans des secteurs comme l'automobile et l'aéronautique)
- **2001** : 3D Systems rachète DTM Corporation et intègre la technologie SLS dans son portefeuille. Cette acquisition popularise davantage le SLS dans l'industrie.

Apparition de nouvelles technologies comme le **PolyJet** par Objet Geometries, utilisant des jets d'encre pour déposer des matériaux photopolymères.

L'impression 3D reste principalement utilisée dans l'industrie pour le prototypage rapide.

# ➤ Exemples de machines



## 3D Systems SLA 5000

Introduite au début des années 2000, cette machine de stéréolithographie offrait une grande précision pour des applications industrielles.

Sortie en 2004, cette imprimante SLS (Selective Laser Sintering) permettait la production de pièces en polymère pour des usages variés.

## EOSINT P 700



# Brevets & Open Source



**UniLaSalle**  
Amiens

École d'ingénieurs  
Énergie  
& Numérique

# Le Brevet - Fonctionnement

## **Définition :**

Un brevet est un **droit de propriété intellectuelle** qui protège une invention. Il confère à son titulaire un **monopole d'exploitation temporaire**, empêchant d'autres personnes de fabriquer, utiliser ou vendre l'invention sans autorisation.

## **Critères pour déposer un brevet :**

- **Nouvelle** : L'invention doit être originale et ne pas avoir été divulguée auparavant.
- **Innovante** : Elle doit représenter une avancée technique.
- **Applicable** : Elle doit être industrialisable.

## **Durée de validité :**

- Généralement **20 ans** à partir de la date de dépôt, sous réserve du paiement des taxes annuelles.
- À l'expiration, l'invention tombe dans le **domaine public**, devenant utilisable par tous.

# ➤ L'Open-Source - fonctionnement

## Philosophie de l'Open Source :

- L'open source repose sur le **partage libre et gratuit** des connaissances, permettant à tous d'utiliser, modifier et améliorer une invention.
- Contrairement au brevet, l'open source favorise la collaboration et la diffusion rapide de technologies.

## Avantages de l'Open Source :

- Accélère l'innovation grâce à la collaboration.
- Réduit les coûts pour les utilisateurs finaux.
- Rend la technologie accessible au plus grand nombre.

## Coexistence possible ? :

Des entreprises combinent brevets et open source pour protéger leurs innovations tout en partageant certaines technologies avec la communauté (ex. Prusa Research).

# ➤ Expiration des Brevets (2000 – 2009)

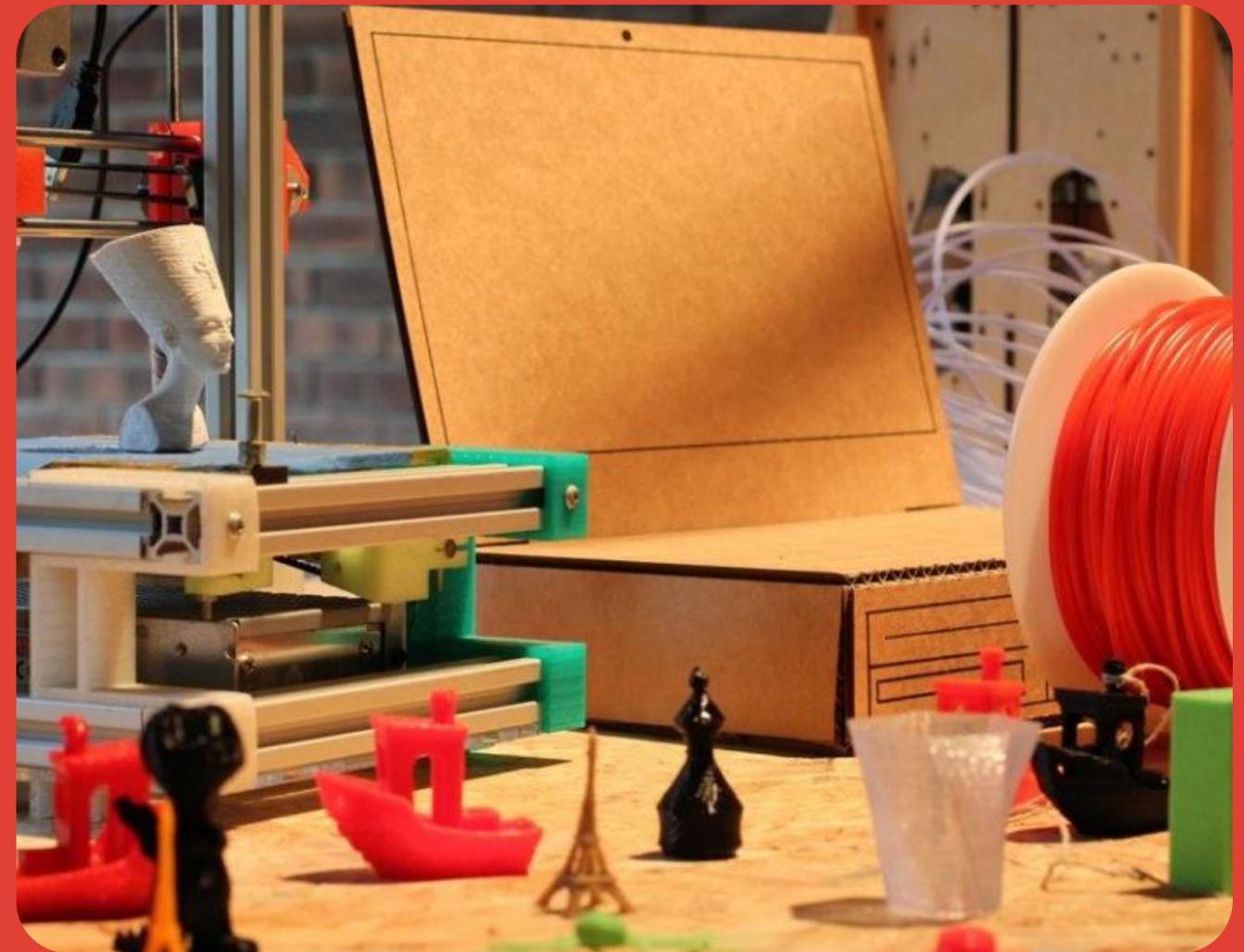
2000 : Expiration des premiers brevets sur la technologie FDM, permettant l'émergence d'imprimantes à bas coût.

2005 : Lancement du projet **RepRap**, une imprimante 3D open source capable de s'auto-répliquer partiellement.

2009 : Les brevets FDM expirent complètement

# L'ère de L'Open Source

## Le Projet Rep-Rap



**UniLaSalle**  
Amiens

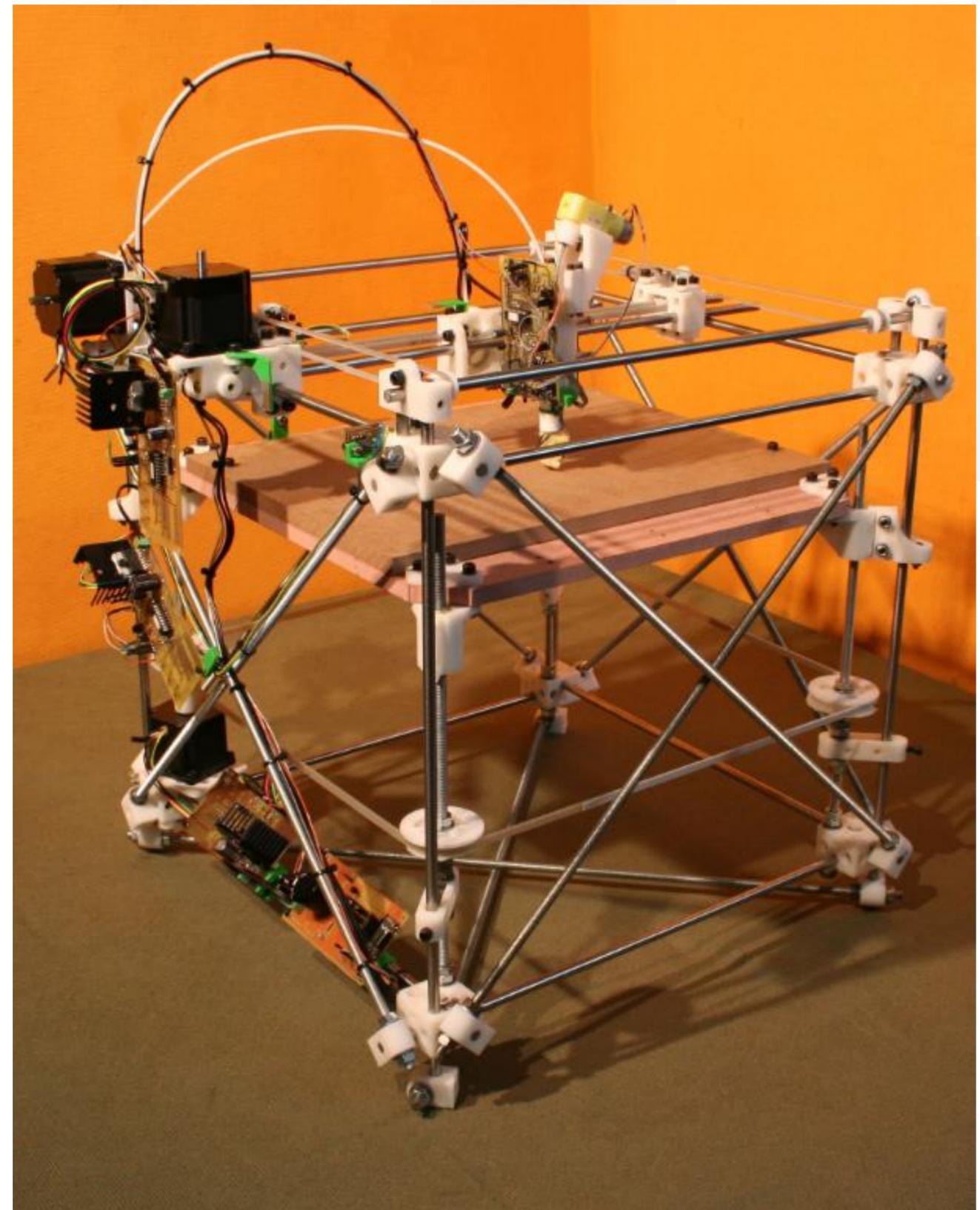
École d'ingénieurs  
Énergie  
& Numérique

# **Projet Rep Rap**

*Replicating Rapid Prototyper (RepRap)*

- Créé en 2005 par Adrian Bowyer, professeur à l'Université de Bath (Royaume-Uni).
- Premier modèle : Darwin (2007).
- Développer une imprimante 3D auto-répliquable, capable d'imprimer une partie de ses propres composants.
- Open Source : Le matériel et les logiciels sont librement accessibles pour modification et reproduction.

**Rendre l'impression 3D abordable et démocratisée.**

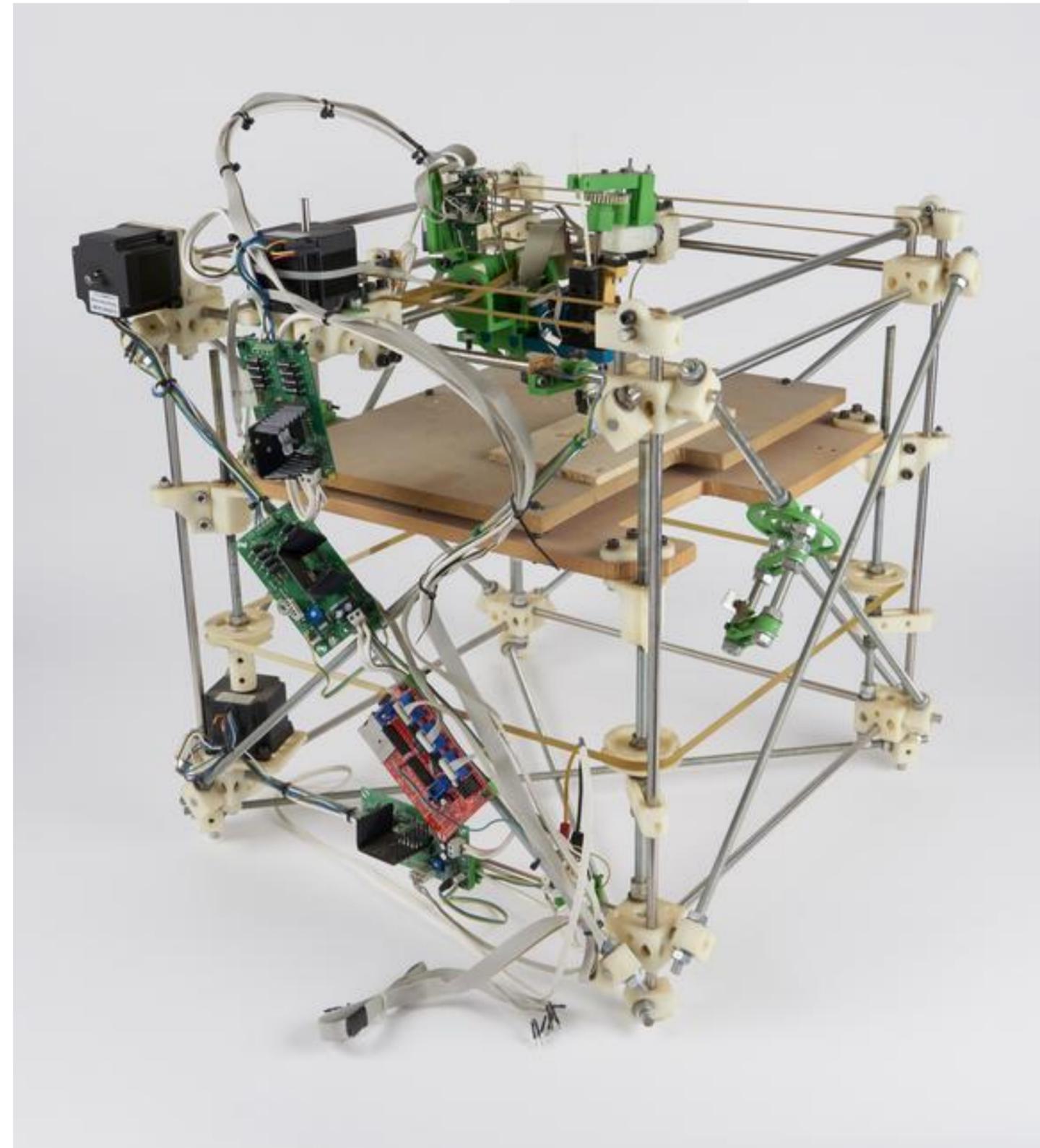


# ➤ Impact de Rep Rap

- Catalyseur de la démocratisation de l'impression 3D grand public.
- A donné naissance à des projets comme Prusa, un acteur majeur du marché des imprimantes 3D domestiques.
- Une imprimante RepRap peut reproduire environ 50 % de ses pièces.

*"RepRap est un moyen pour les humains d'apporter des machines à ceux qui en ont besoin."*

Adrian Bowyer.



# Rep Rap – Un message Politique

*« So the replicating rapid prototyping machine will allow the revolutionary ownership, by the proletariat, of the means of production. But it will do so without all that messy and dangerous revolution stuff, and even without all that messy and dangerous industrial stuff. Therefore I have decided to call this process Darwinian Marxism... » Adrian Bowyer, créateur du projet Rep Rap*

Traduction :

« Donc, la machine à prototypage rapide répliquante va permettre l'appropriation révolutionnaire des moyens de production par le prolétariat. Mais elle va le faire sans les dangereux et défailants aspects de la révolution, et même sans les aspects dangereux et défailants de l'industrie. J'ai donc décidé d'appeler ce processus Marxisme darwinien... »

# ➤ Rep Rap – Un message Politique

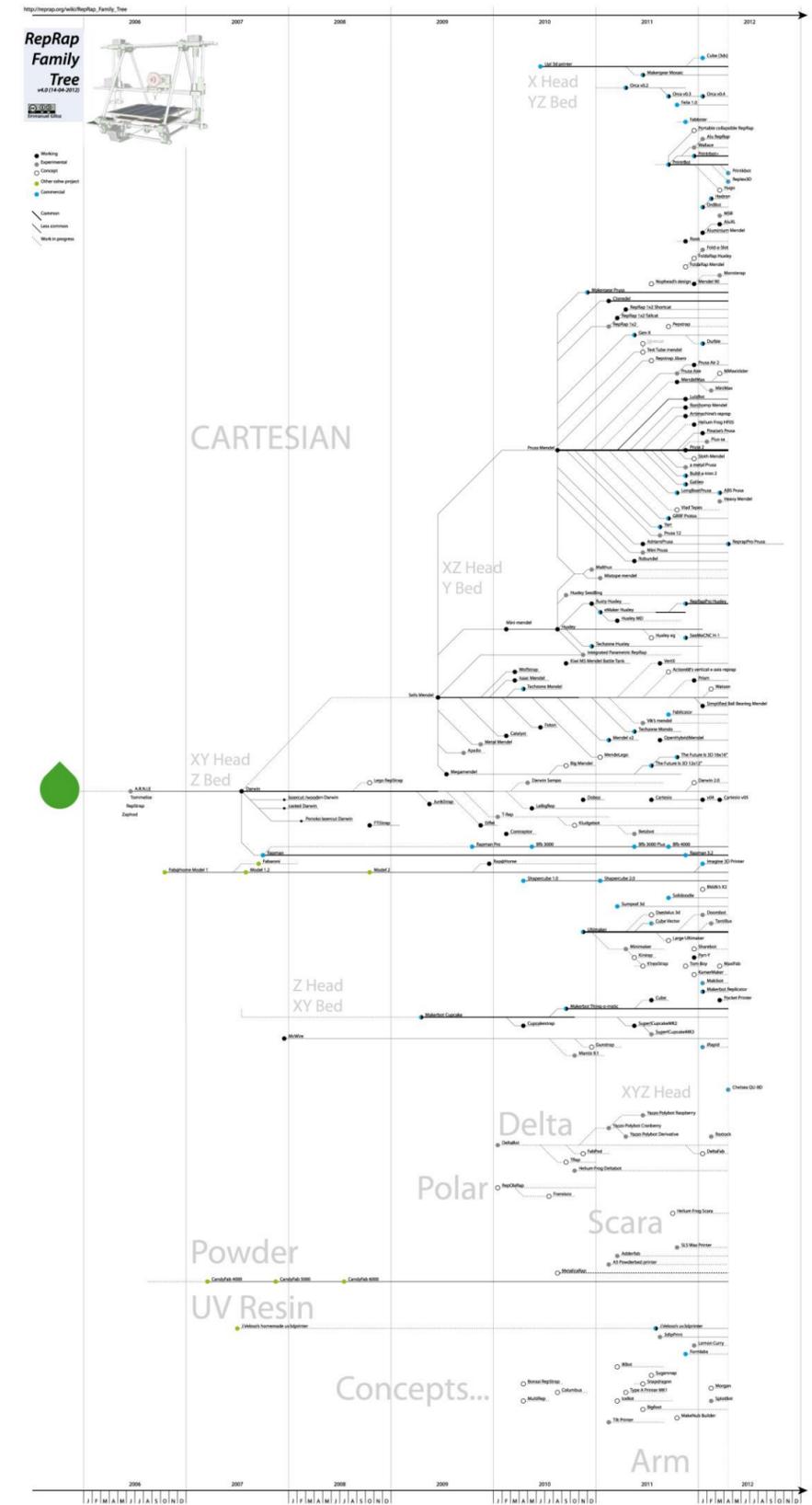
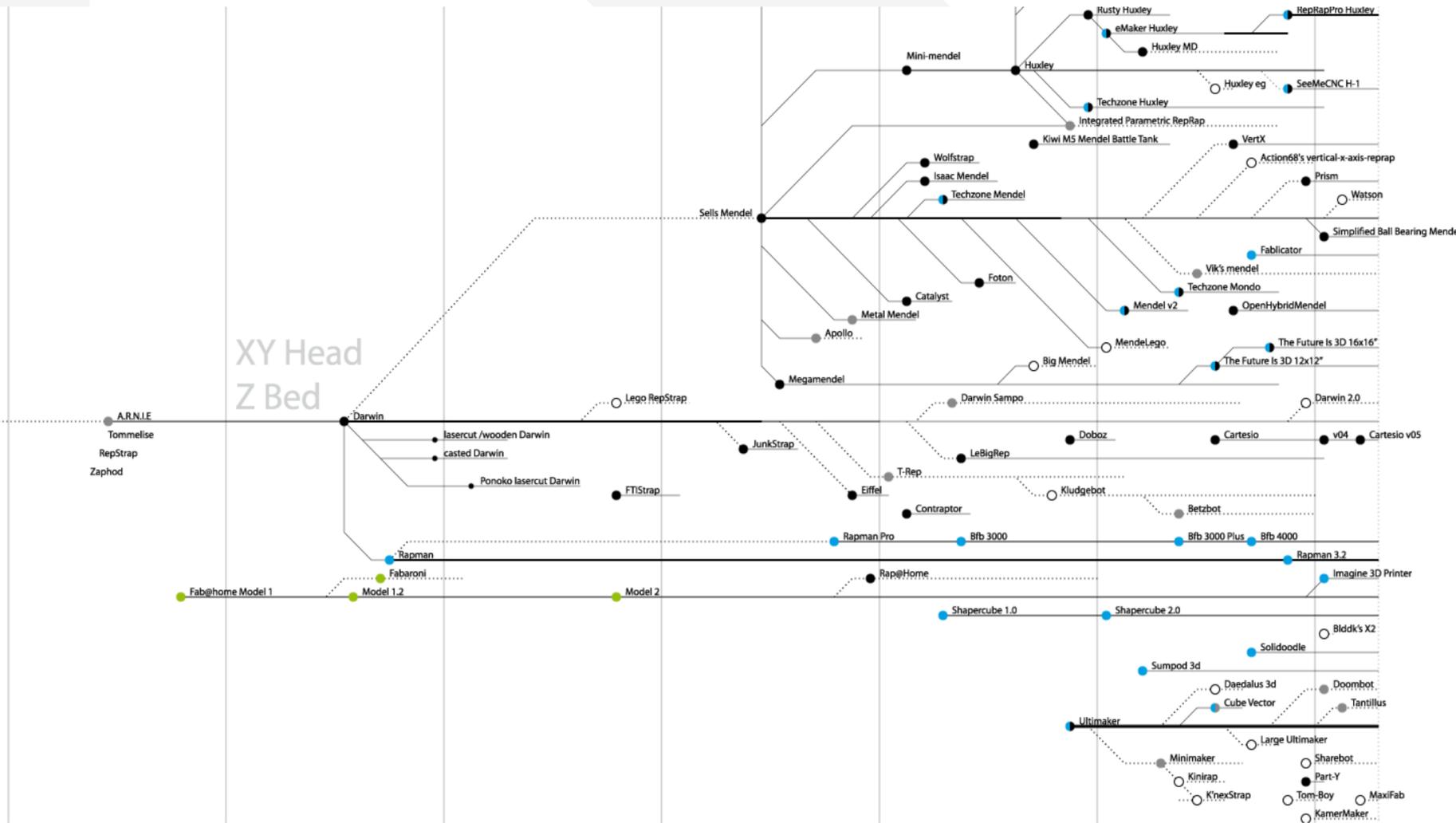
Le Message d'Adrian Bowyer peut être synthétisé par ces points :

- **Autonomisation** : Démocratiser les moyens de production pour permettre à chacun de fabriquer sans dépendre des grandes industries.
- **Critique des systèmes centralisés** : Contourner les monopoles industriels et redistribuer les moyens de production.
- **Vision idéologique** : Un "marxisme pacifique", prônant la collaboration et l'émancipation sans violence ni confrontation.
- **Objectif final** : Favoriser une économie circulaire et locale basée sur le partage des outils et des savoirs.
- **Nature des productions** : Créer des outils du quotidien et des objets utiles pour encourager la créativité et l'innovation.



# RepRap Family tree

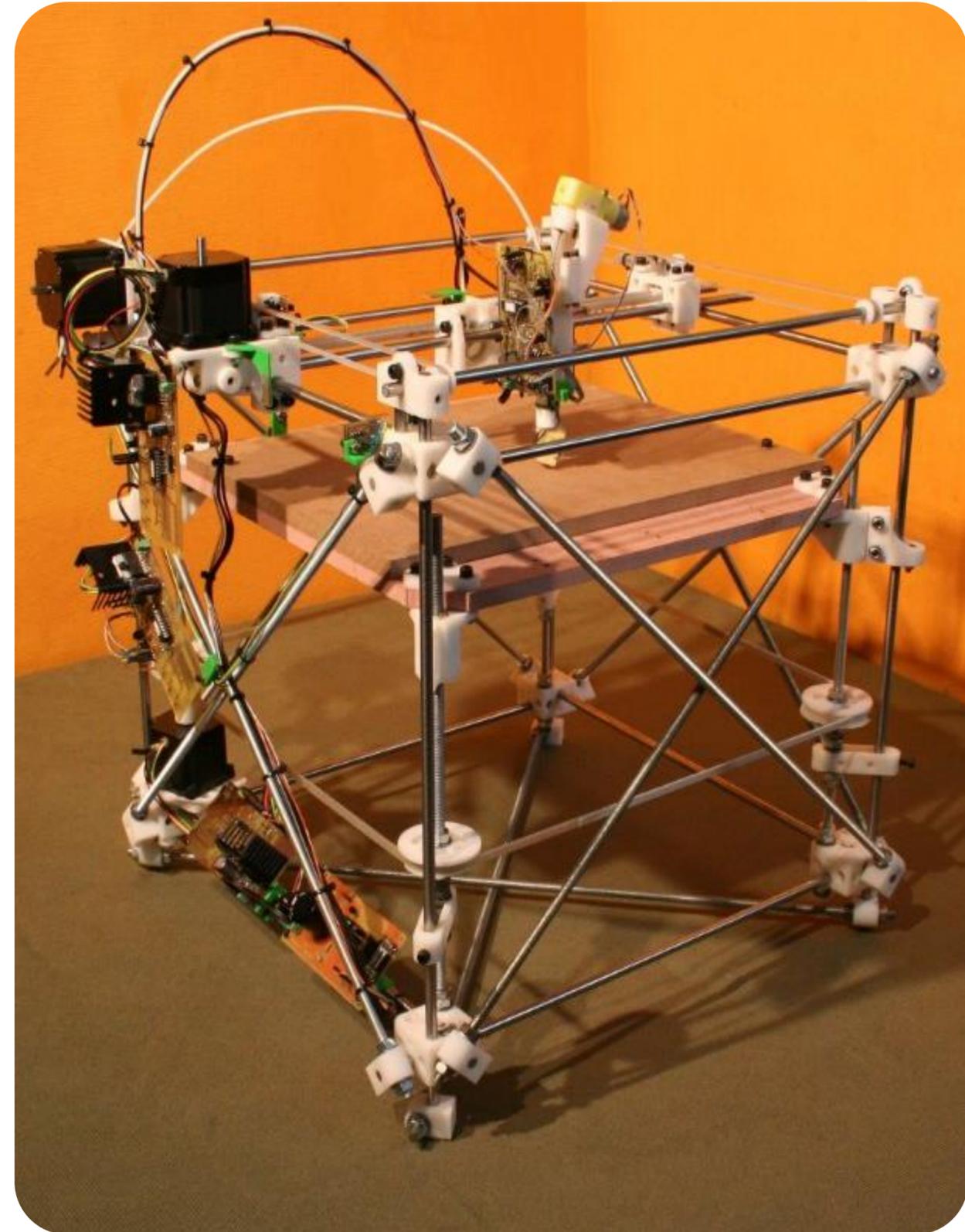
[https://reprap.org/wiki/RepRap\\_Family\\_Tree](https://reprap.org/wiki/RepRap_Family_Tree)



# Darwin

**2007**

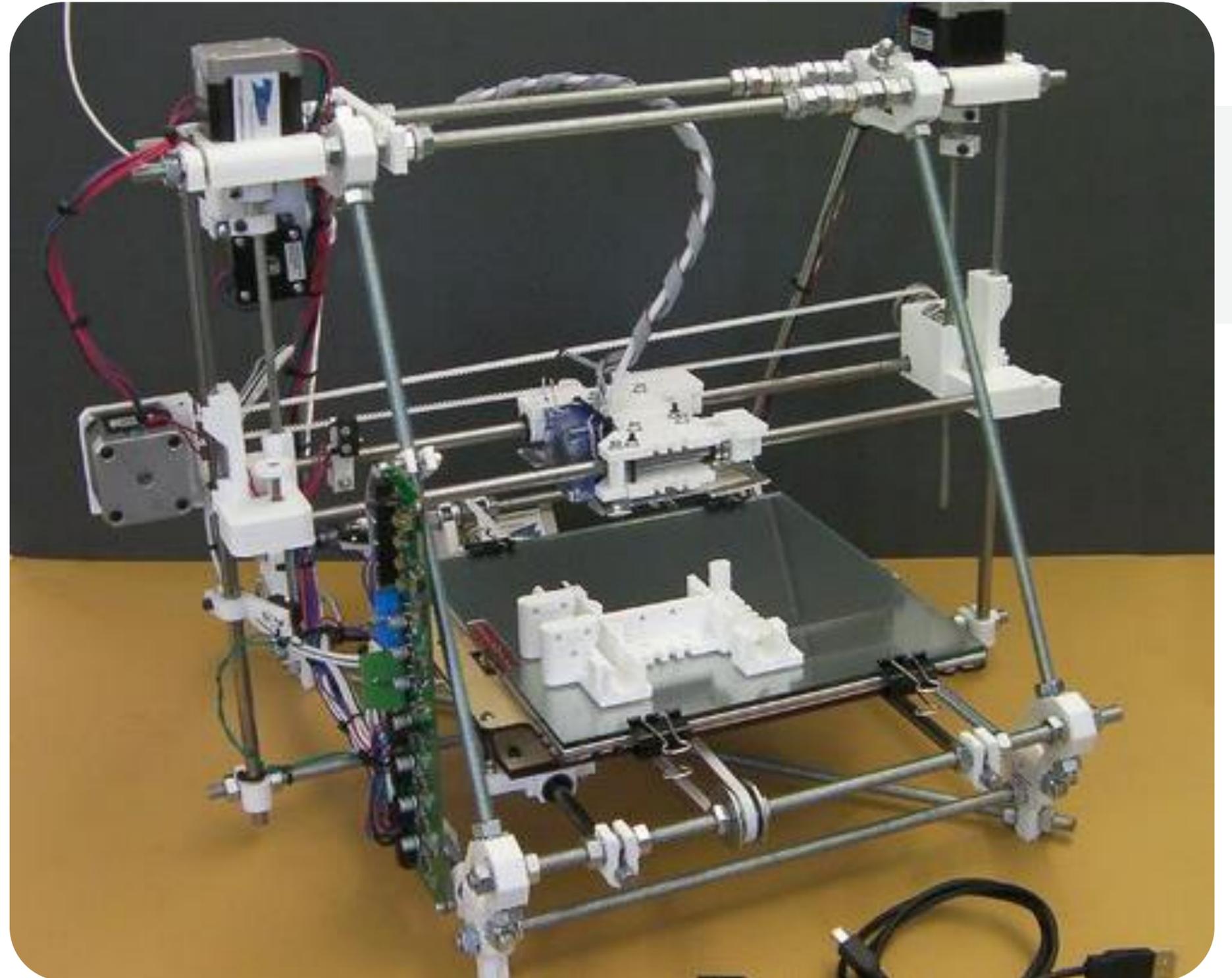
Première imprimante OpenSource et autoreplicable développé par Adrien Bowyer. Pionnier de l'impression 3D Open Source, elle ouvrira la voie à une multitude de "Fork".



# Mendel

**2009**

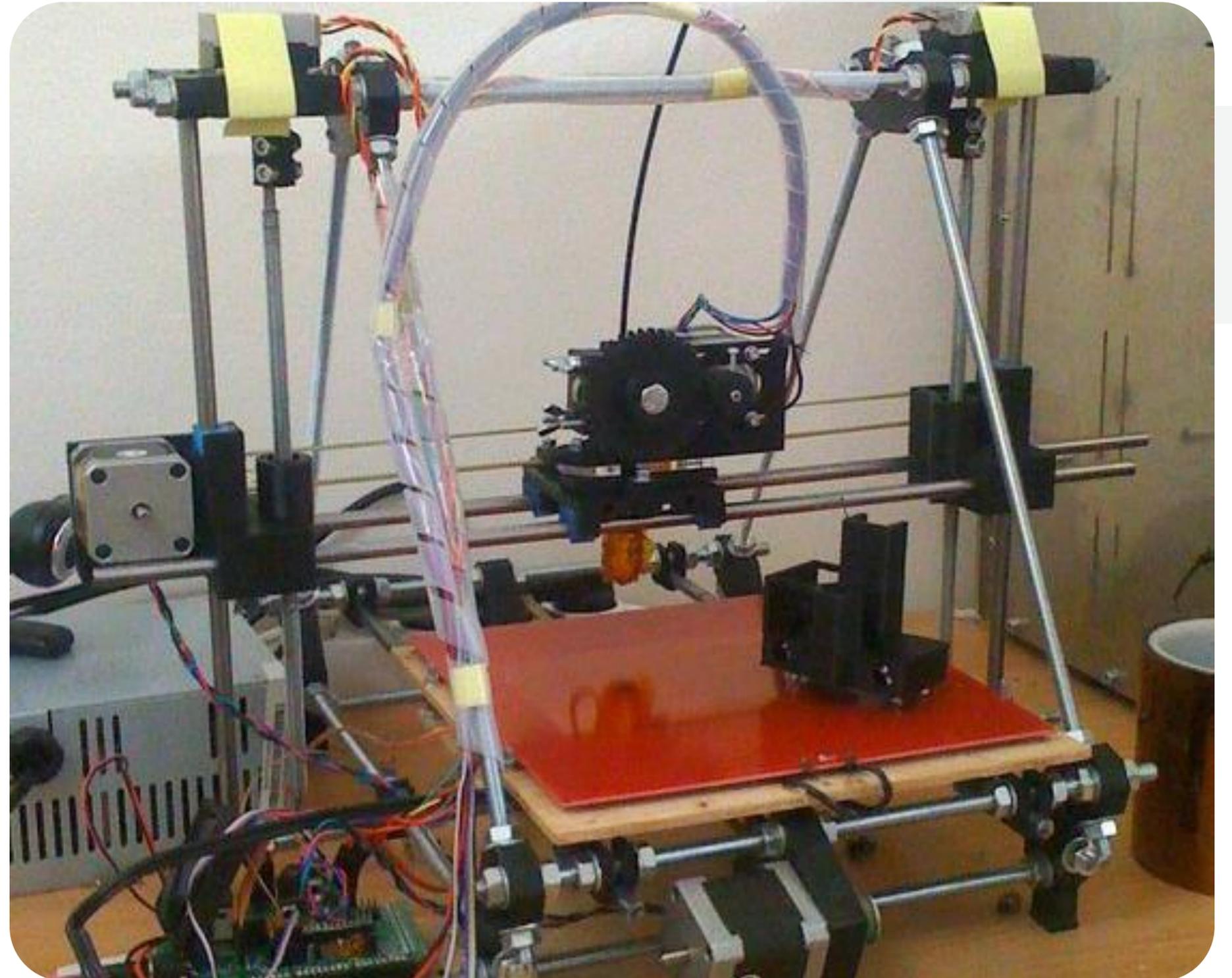
Cette version a introduit une structure plus compacte et stable, facilitant l'assemblage et améliorant la qualité d'impression.



# Prusa Mendel

**2011**

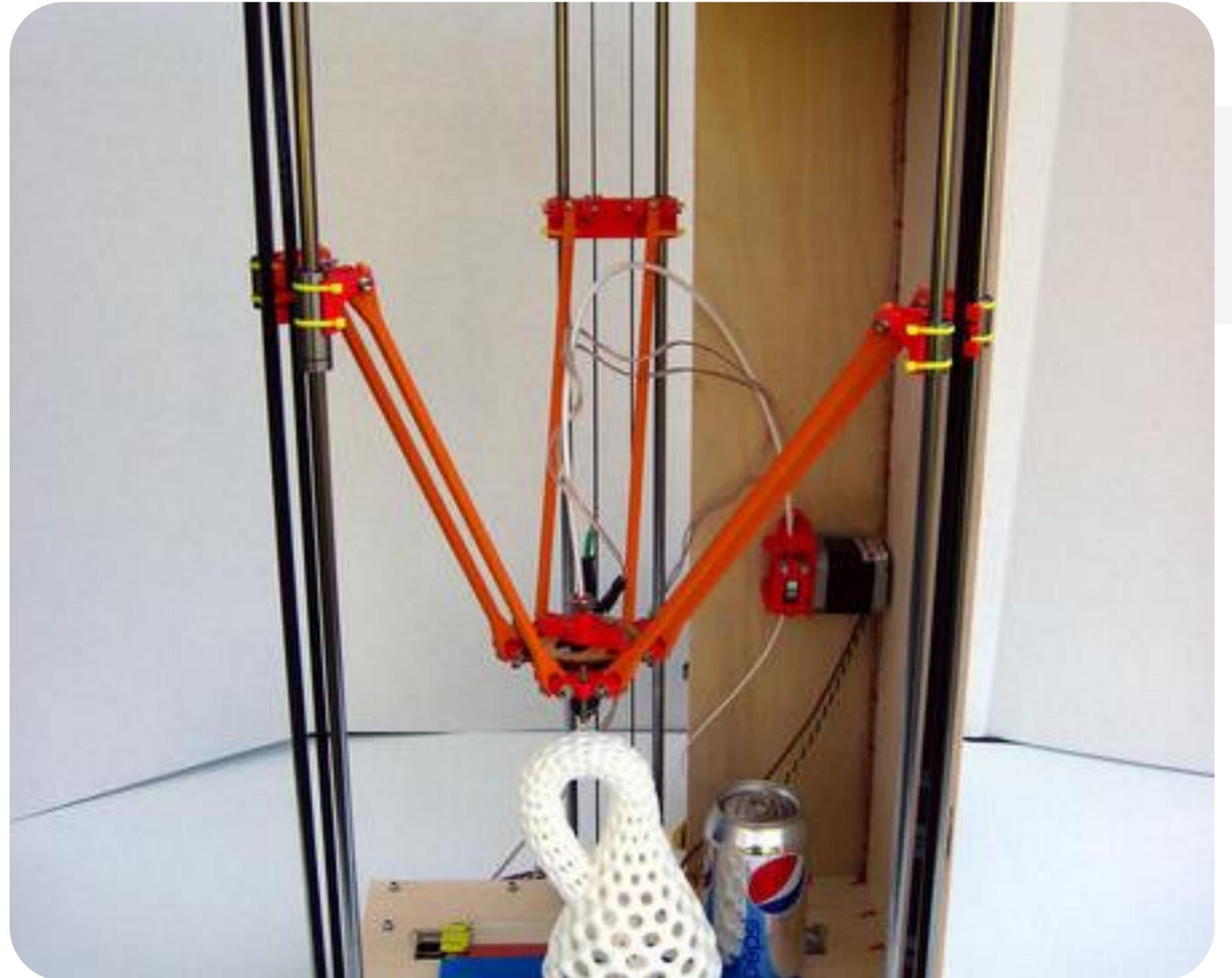
Développée par Josef Prusa, cette itération a simplifié davantage la conception, réduisant le nombre de pièces et le coût de fabrication.



# Rostock

**2012**

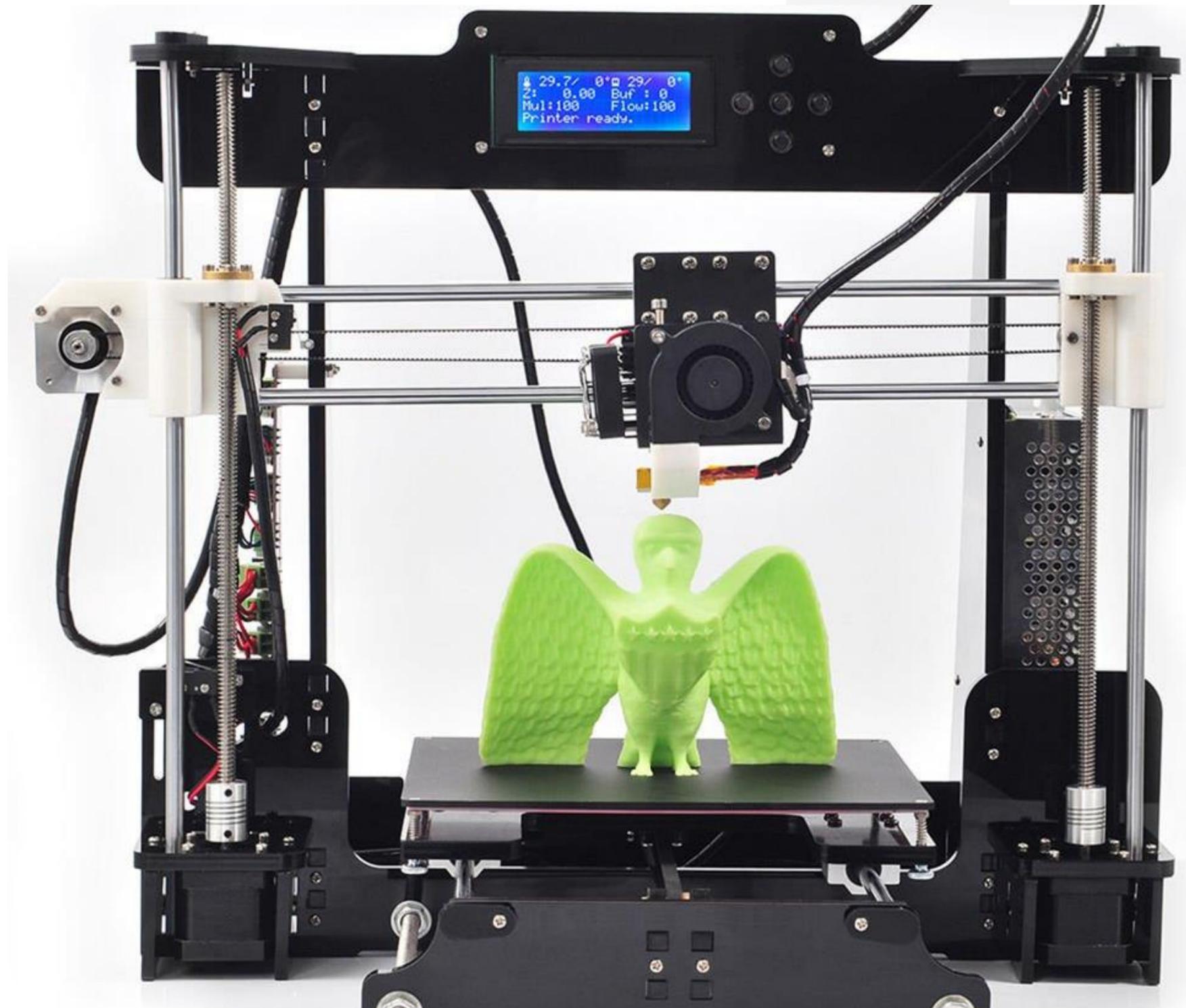
Première imprimante RepRap de type delta, utilisant trois bras pour déplacer la tête d'impression, offrant une grande vitesse et précision.



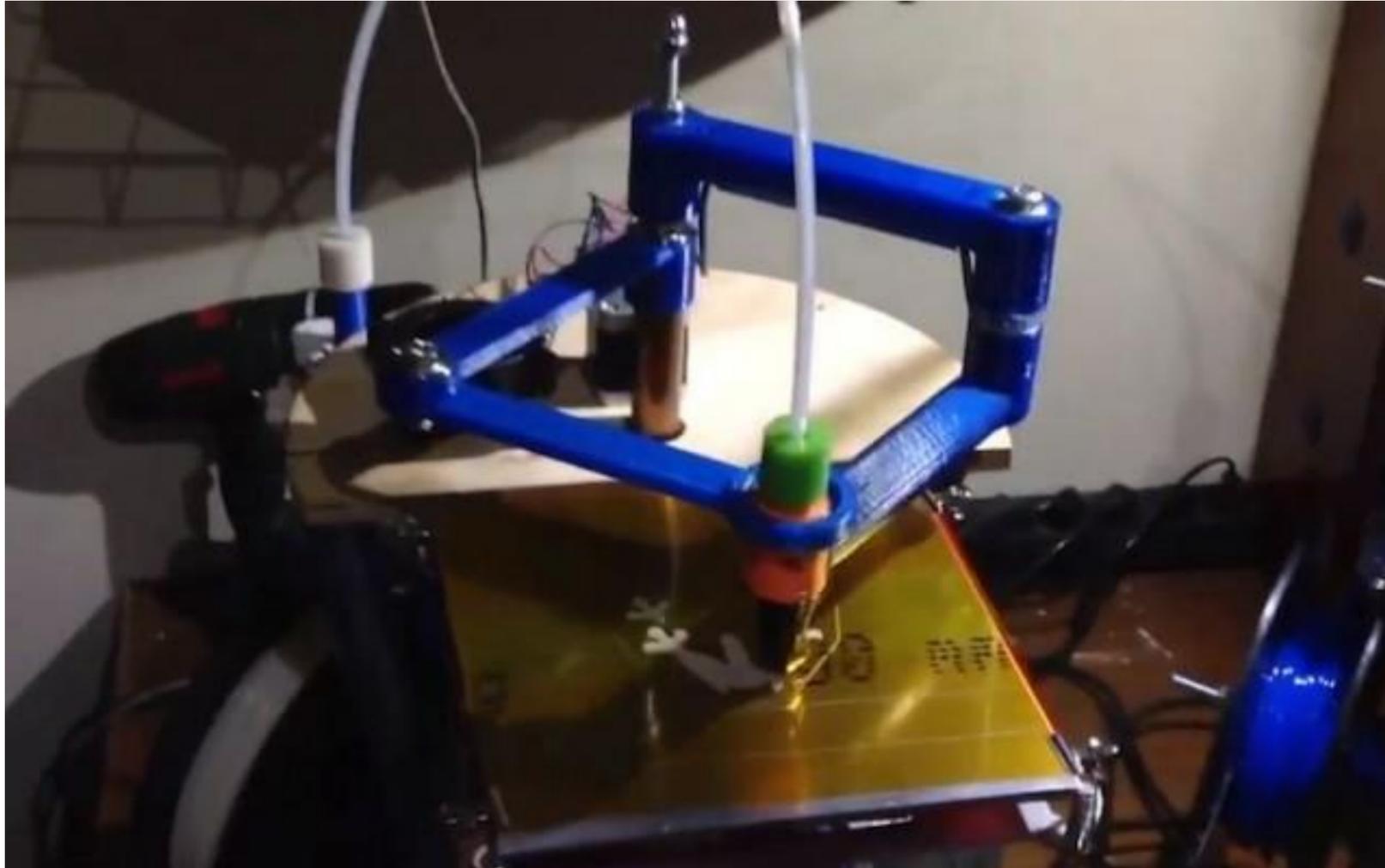
# Prusa I3

**2017**

Cette version a introduit un cadre en une seule pièce, augmentant la rigidité et la facilité d'assemblage, devenant l'un des modèles les plus populaires.



# ➤ Les imprimantes oubliées



**RepRap Morgan**



**RepRap Simpson**

# Popularisation

L'ère du grand public



**UniLaSalle**  
Amiens

École d'ingénieurs  
Énergie  
& Numérique

# **Évolution Grand Public et Popularisation (2010-2020)**

## **Expiration de brevets clés :**

L'expiration des brevets sur la technologie FDM en 2009 a permis à de nombreux fabricants de proposer des imprimantes 3D à des prix compétitifs.

**Résultat :** démocratisation rapide et explosion des modèles disponibles sur le marché.

## **Accessibilité accrue :**

- Simplification de l'interface utilisateur.
- Machines prêtes à l'emploi (plug-and-play) pour les non-initiés.

# **MakerBot**

Fondée en 2009 par Bre Pettis, Adam Mayer et Zach "Hoeken" Smith, basée sur le projet RepRap.



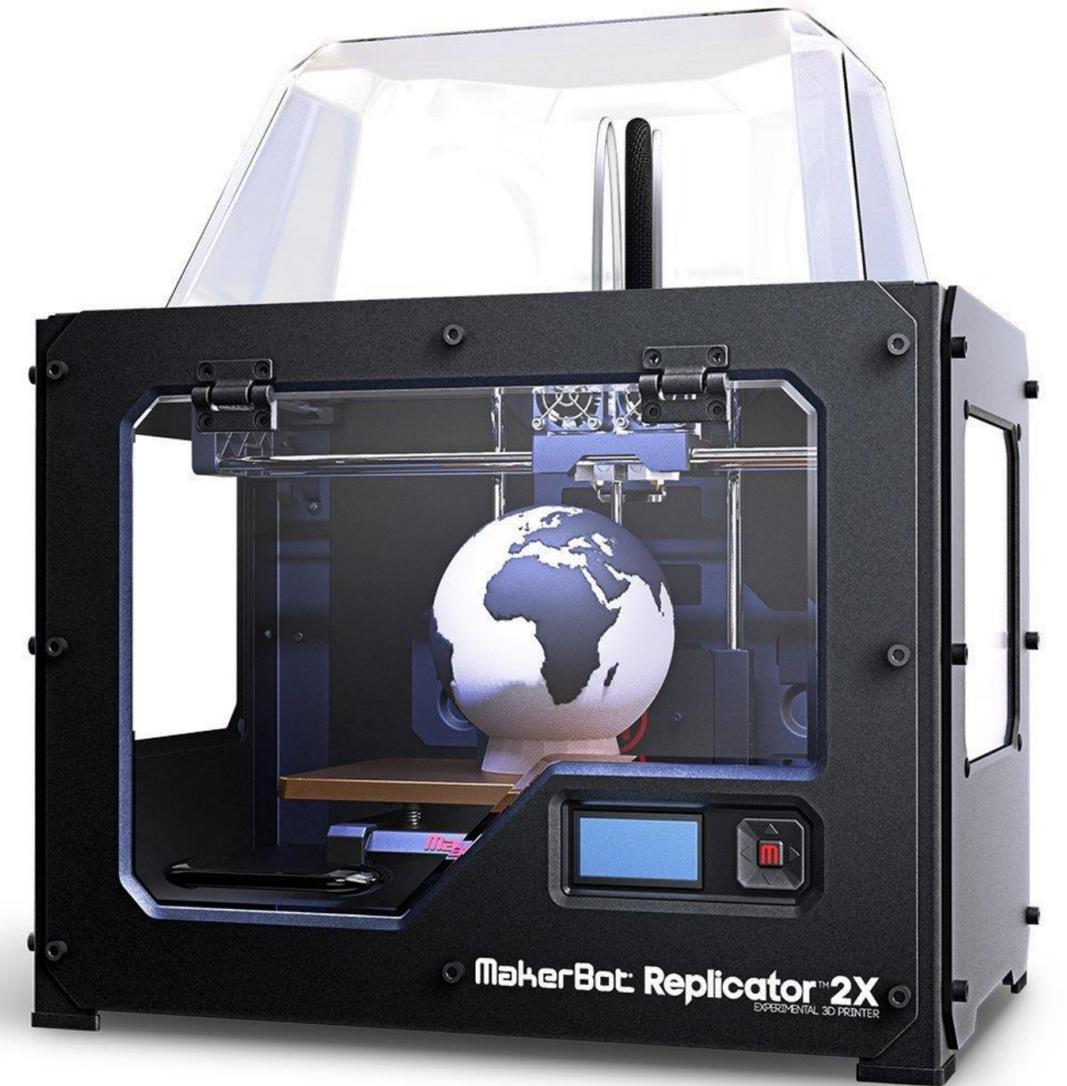
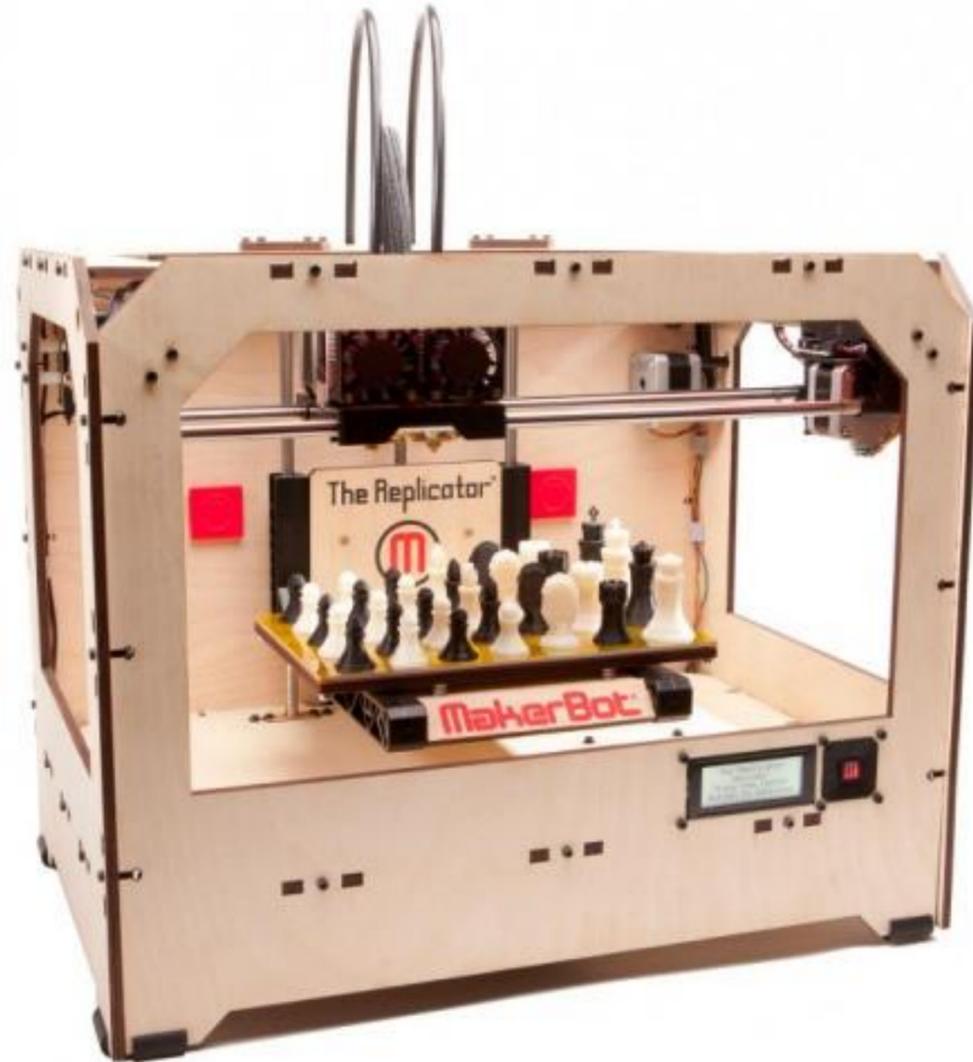
## Produits phares :

- **Thing-O-Matic (2010)** : Première machine abordable pour le grand public.
- **Replicator (2012)** : Machine plus fiable, intégrant un boîtier fermé et un écran LCD.

## Changement stratégique :

- Les co-fondateurs Adam Mayer et Zach "Hoeken" Smith, en désaccord avec l'orientation de la société, quitteront le projet
- En 2013, MakerBot adopte un modèle propriétaire en abandonnant l'open source.
- Rachetée par Stratasys la même année, elle cible le marché éducatif et professionnel.
- Bre Pettis sera écarté peu de temps après.

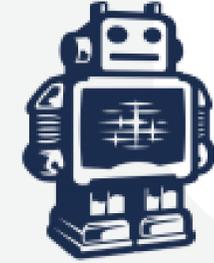
# MakerBot



# ➤ **MakerBot – Vendre la "révolution"**



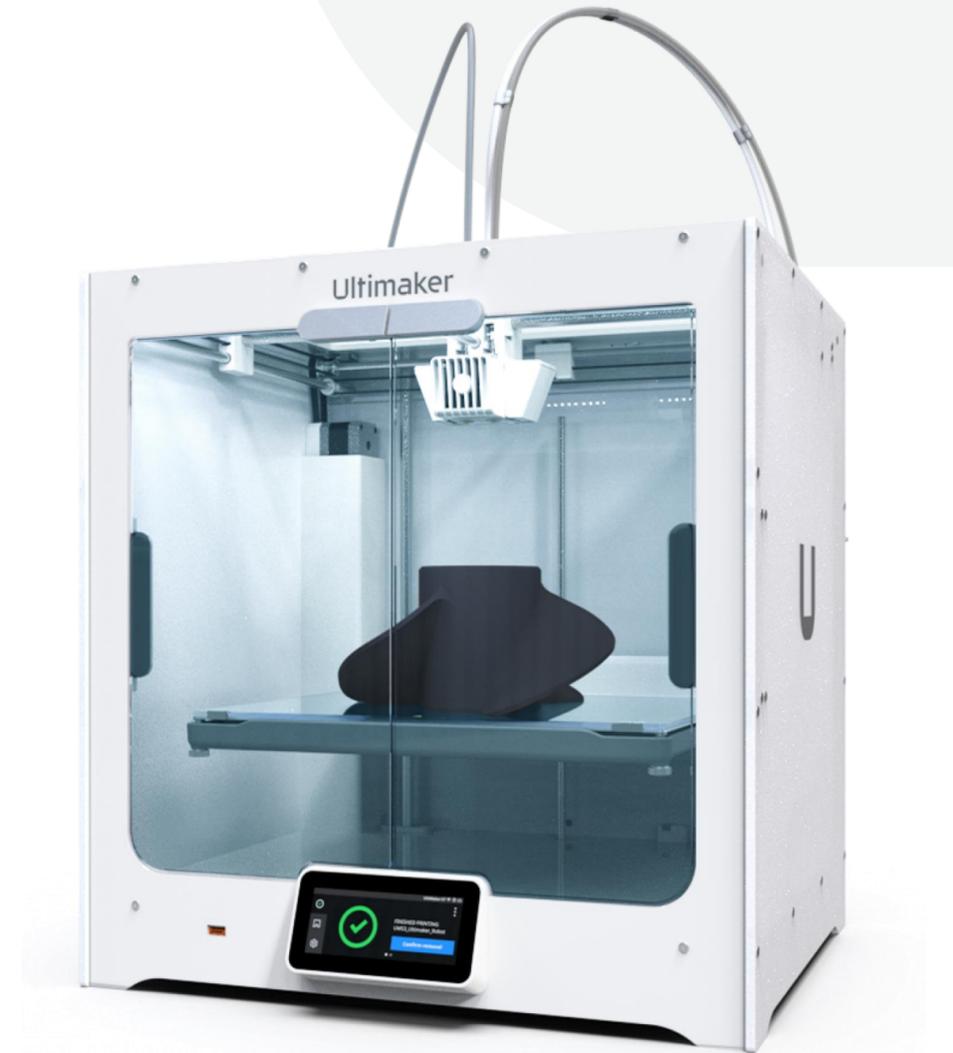
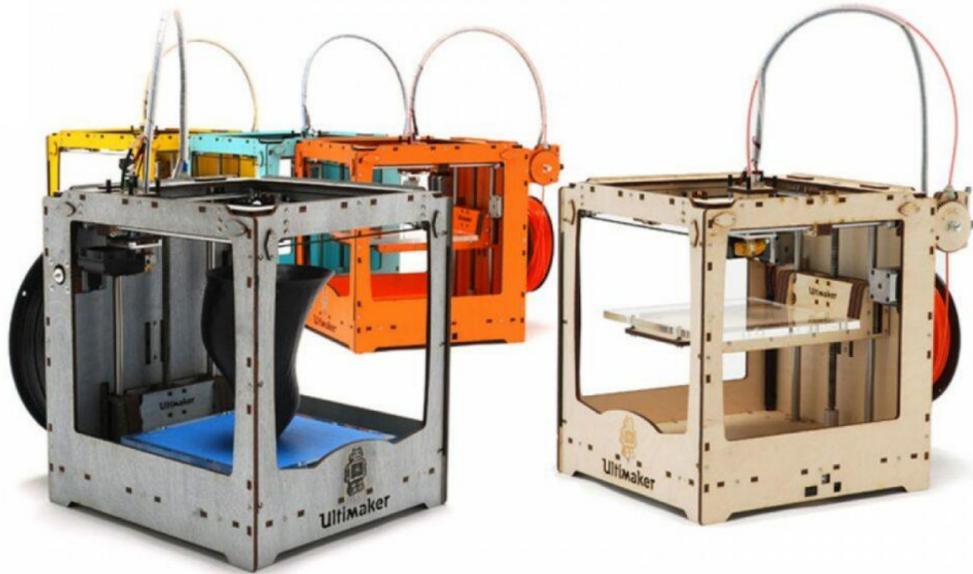
# Ultimaker



Ultimaker

- Fondée en 2011 aux Pays-Bas, axée sur l'open source.
- Produits phares :
  - **Ultimaker Original (2011)** : Kit open-source facile à assembler.
  - **Ultimaker 2 (2013)** : Machine préassemblée, hautement fiable et précise.
  - **Ultimaker S5 (2018)** : Orientation vers le marché professionnel avec double extrusion et volume d'impression étendu.
- Ultimaker devient une référence pour sa qualité et son écosystème de logiciels gratuits comme Cura.
- A partir de la sortie de son ultimaker 2, la société abandonne peu à peu l'Open Source et se tourne désormais vers les professionnels.

# **Ultimaker**



# Rapprochements des marques

- En mai 2022, MakerBot et Ultimaker, deux leaders de l'impression 3D de bureau, ont annoncé leur intention de fusionner pour accélérer l'adoption mondiale de la fabrication additive.
- Cette fusion a été finalisée en septembre 2022, donnant naissance à une nouvelle entité appelée UltiMaker.
- Dans cette nouvelle structure, Stratasys détient une participation minoritaire, tandis que NPM Capital, un investisseur néerlandais, est le principal actionnaire.



# ➤ Print The Legend

Documentaire Netflix

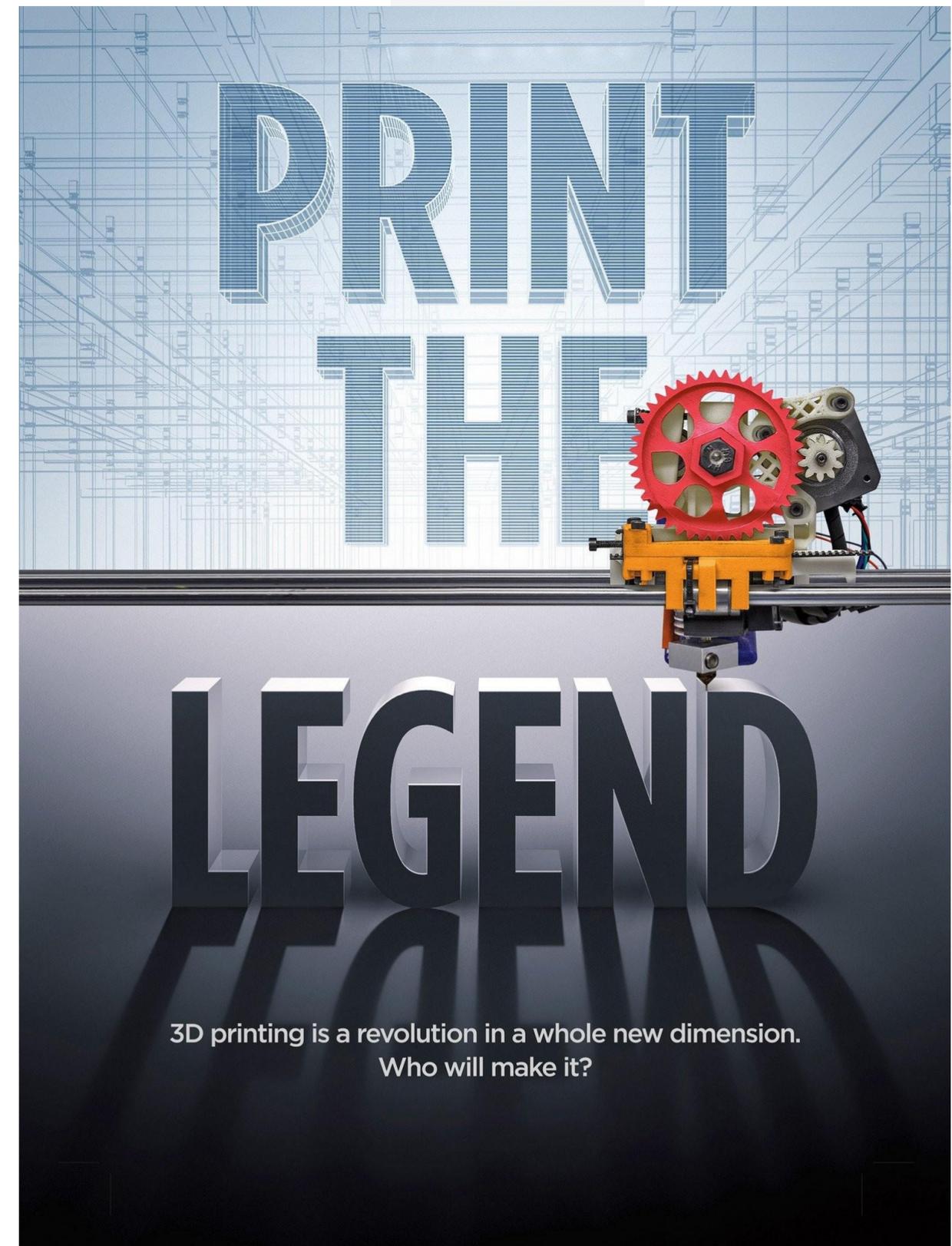
## Focus :

- Startups pionnières : MakerBot, Formlabs.
- Acteurs établis : Stratasys, 3D Systems.

## Thèmes principaux :

- Innovation technologique.
- Rivalités entrepreneuriales.
- Impact sociétal et éthique.

**Impact :** Exploration des débuts et du potentiel transformateur de l'impression 3D.



# Creality

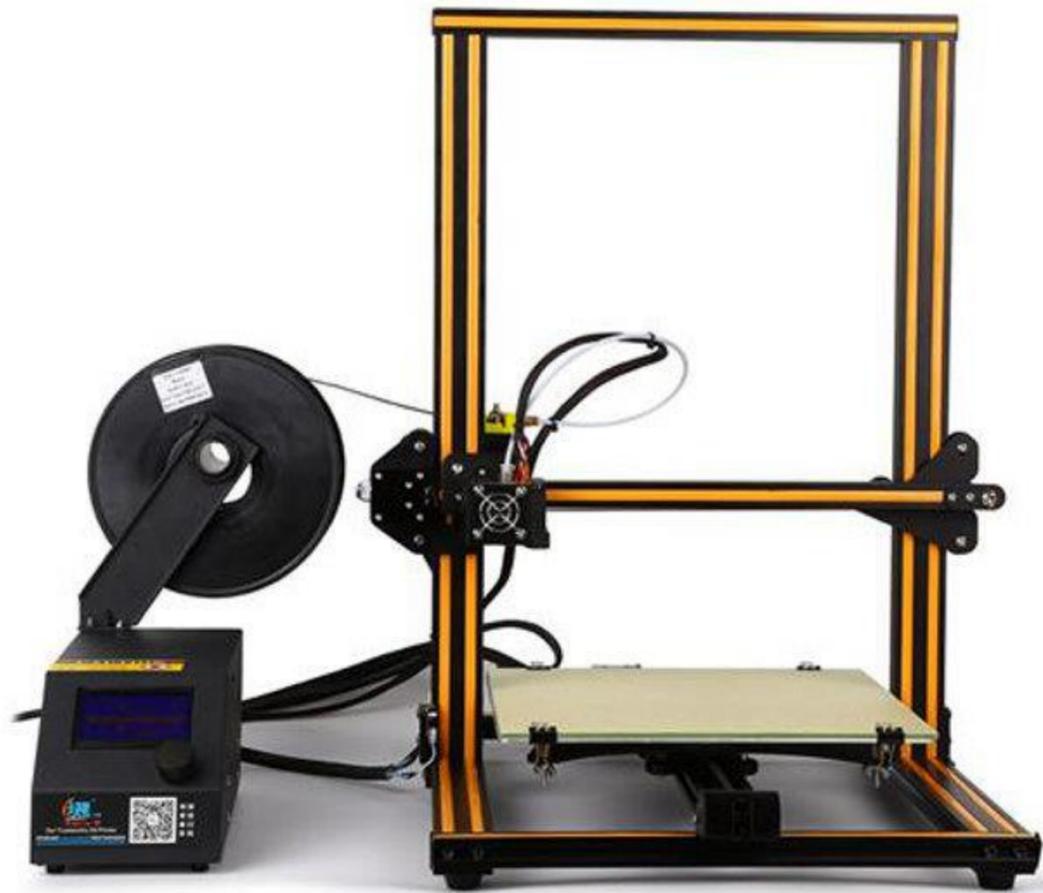


Fondée en 2014 en Chine, spécialisée dans les imprimantes FDM à bas coût.

Produits phares :

- **CR-10 (2016)** : Impression grand format à prix abordable.
- **Ender-3 (2018)** : Modèle extrêmement populaire, démocratisant l'impression 3D grâce à son prix compétitif et sa fiabilité.

Creality a favorisé l'accès à l'impression 3D DIY avec une large communauté de modders.





# Prusa

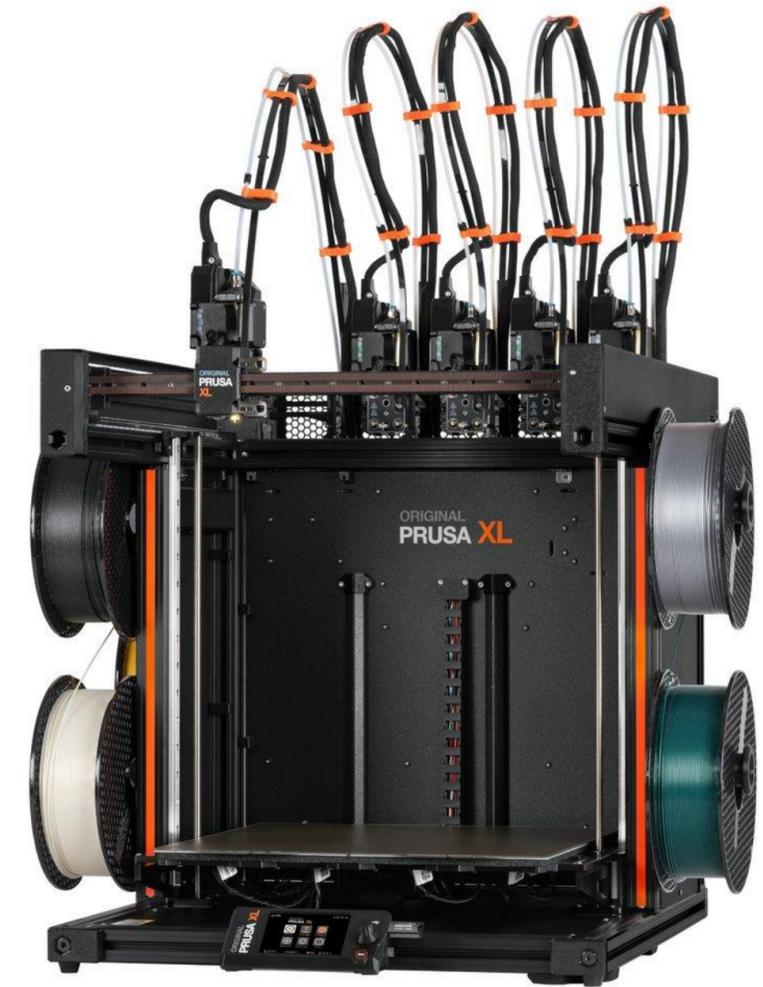
Fondée en 2012 par Josef Prusa en République tchèque.

Produits phares :

- **Prusa i3 (2012)** : Basée sur le projet RepRap, elle est devenue une référence en termes de qualité et de modularité.
- **Prusa MK2 (2016)** : Première imprimante 3D avec calibration automatique des axes et lit chauffant multi-zones.
- **Prusa XL (2022)** : Grande imprimante CoreXY avec calibration avancée, conçue pour des projets professionnels.

Modèles récents intégrant des fonctionnalités avancées comme l'auto-calibration et l'impression multi-matériaux.

**Spécificité** : les imprimantes sont, jusqu'à récemment en grande partie open source et auto répliquante.



# ➤ Prusa – ADN de Rep Rap

Prusa Research utilise une ferme d'imprimantes 3D pour produire des pièces destinées à ses propres machines.

En 2020, cette ferme comptait 585 imprimantes et a permis la fabrication de plus de 100000 imprimantes 3D au cours de l'année

En 2021, la ferme a été étendue à plus de 600 imprimantes, contribuant à l'expédition de 114000 imprimantes 3D Original Prusa aux clients.



# ➤ Prusa – Encore OpenSource ?

Engagement initial en 2012 : partage des plans, firmware et logiciels (*ex. PrusaSlicer*).

## Ouverture maintenue :

- Imprimantes comme la Prusa i3 MK3S+ restent largement open source.
- Contribution active à la communauté avec des outils comme PrusaSlicer.

## Tensions avec l'open source :

- Composants propriétaires : Ex. Prusa XL (*cartes électroniques, systèmes avancés*).
- Protection contre les contrefaçons et concurrence agressive.

Prusa tente de rester un leader de l'open source tout en conciliant innovation et contraintes commerciales.



2012, Josef Prusa se fait tatouer le logo "Open Hardware"

# ➤ Rétrospective Prusa 2024



# Evolution des coûts

## Années 2010 :

- Les premières imprimantes 3D personnelles étaient rares et coûteuses, souvent au-delà de 2 000 €.
- Introduction de modèles plus abordables, notamment grâce à des initiatives open source comme le projet RepRap.

**2012** : Lancement de la Prusa i3 et de la Replicator, des imprimantes influentes sur le marché.

**2014** : Apparition de modèles à moins de 1 000 €, facilitant l'accès au grand public.

**2020** : Des imprimantes de qualité disponibles entre 200 € et 500 €, comme la Creality Ender 3.

**2022** : Le marché des imprimantes 3D est évalué à 15,1 milliards de dollars, avec une croissance annuelle prévue de 15 % jusqu'en 2032.

- **Innovation Technologique** : Amélioration des procédés et des matériaux.
- **Concurrence** : Multiplication des fabricants, stimulant la baisse des prix.
- **Production de Masse** : Réduction des coûts unitaires grâce à des volumes de production plus élevés.

# Courbe de désillusion

**Dynamique Clef dans l'Essor des Imprimantes 3D**

# "Hype Cycle"

La courbe de désillusion, ou plus précisément le "Hype Cycle" de Gartner, est un modèle conceptuel qui décrit les étapes que traverse une technologie émergente depuis son introduction jusqu'à sa maturité et son adoption généralisée.

Elle a été conceptualisée par la société de conseil technologique **Gartner** dans les années 1990 et a été introduit pour aider les entreprises et décideurs à comprendre les cycles de vie des innovations technologiques et éviter des décisions basées sur des attentes irréalistes.

La courbe de désillusion illustre le décalage entre les attentes initiales et la réalité de la mise en œuvre technologique, offrant une vue réaliste de l'adoption et de la maturité d'une innovation.

# 5 étapes clef :

- 1. Lancement de l'innovation (Technology Trigger) :**  
Une nouvelle technologie apparaît, générant de l'intérêt mais peu de produits concrets.
- 2. Pic des attentes exagérées (Peak of Inflated Expectations) :**  
Les attentes autour de la technologie sont démesurées, souvent alimentées par des annonces médiatiques et des promesses irréalistes.
- 3. Gouffre de désillusion (Trough of Disillusionment) :**  
La technologie ne répond pas aux attentes initiales. Les défauts, les limites et les échecs de mise en œuvre génèrent une perte d'intérêt.  
Beaucoup d'entreprises abandonnent ou révisent leurs ambitions.
- 4. Pente de l'illumination (Slope of Enlightenment) :**  
Une compréhension réaliste de la technologie émerge. Les cas d'utilisation concrets se multiplient et les solutions s'améliorent.
- 5. Plateau de productivité (Plateau of Productivity) :**  
La technologie est adoptée à grande échelle, devenant mature et rentable.

# ➔ Pour l'impression 3D



Plateau will be reached:

- less than 2 years
- 2 to 5 years
- 5 to 10 years
- ▲ more than 10 years
- ⊗ obsolete before plateau

# Pour l'impression 3D

1. **Lancement** : Années 1980, introduction des technologies comme le SLA et le FDM.
2. **Pic des attentes (années 2010)** : Promesses exagérées (impression de tout à la maison, révolution industrielle immédiate).
3. **Gouffre de désillusion (mi-2010)** : Réalisation des limites (coût, complexité, vitesse, matériaux restreints).
4. **Pente de l'illumination (2020 et au-delà)** : Développement d'usages concrets et industriels.
5. **Plateau de productivité** : Aujourd'hui pour certains secteurs (prototypage, médecine, industrie), tandis que d'autres usages restent en développement.

# HackerSpace, MakerSpace, FabLab et internet

**Dynamique Clef dans l'Essor des Imprimantes 3D**



**UniLaSalle**  
Amiens

École d'ingénieurs  
Énergie  
& Numérique

# ➤ Apparition de nouveaux Tiers-lieux

*"Les tiers-lieux sont des espaces collaboratifs situés entre le domicile (1er lieu) et le travail (2e lieu), dédiés à la créativité, à l'échange et à l'innovation. Ils incluent des FabLabs, makerspaces, coworking ou cafés culturels, favorisant les rencontres et les projets collectifs."*

A partir des années 1990, des nouveaux lieux apparaissent dans la communauté Makers. On voit apparaître des HackerSpace, des FabLab puis des MakerSpace



# Hackerspace

**Origine** : Né dans les années 1990, dans les communautés de **hackers**.

**Objectif principal** :

- Lieu d'expérimentation autour de la **technologie** et des systèmes informatiques.
- Explorer les aspects logiciels, matériels et réseaux.

**Philosophie** :

- Forte culture de la **liberté** et de l'**open source**.
- Souvent axé sur la **sécurité informatique** et l'**électronique modifiée**.

**Équipements typiques** :

- Imprimantes 3D et outils électroniques, mais aussi ordinateurs, serveurs, et outils pour le hacking matériel.

# ➤ FabLab – Learn Make Share

Un **FabLab** (Fabrication Laboratory) est un **atelier de fabrication numérique**, ouvert au public, qui met à disposition des outils de fabrication comme des imprimantes 3D, des découpeuses laser, ou des fraiseuses CNC.

**Origine** : Créé en 2001 par Neil Gershenfeld (MIT).

**Objectif principal** :

- Démocratiser la **fabrication numérique**.
- Rendre les technologies comme l'impression 3D ou la découpe laser accessibles à tous.

**Philosophie** :

- Orienté **éducation et innovation**.
- Adhésion à la **charte des FabLabs**, qui insiste sur le partage et la collaboration.

**Équipements typiques** :

- Imprimantes 3D (tardif), découpeuses laser, fraiseuses CNC, outils électroniques.





# MakerSpace

**Origine** : Terme apparu au début des années 2010 avec la montée du mouvement des "makers".

**Objectif principal** :

- Un **espace collaboratif** pour concevoir, bricoler et innover.
- Accessible à des amateurs, étudiants ou professionnels pour tout type de projet.

**Philosophie** :

- Plus **flexible** que les FabLabs.
- Centré sur la créativité et le DIY (*Do It Yourself*).

**Équipements typiques** :

- Similaires aux FabLabs, mais peuvent inclure du matériel d'artisanat, couture, menuiserie, etc... moins centrés sur la production numérique



# Comparatif

Critères	FabLab	Makerspace	Hackerspace
Public cible	Éducation, innovation	Amateurs, étudiants, créateurs	Passionnés de technologie
Philosophie	Collaboration et pédagogie	DIY et créativité	Exploration et liberté
Technologies clés	Fabrication numérique	Fabrication artisanale et numérique	Hacking logiciel et matériel
Structure	Normée (charte FabLab)	Flexible, selon le lieu	Indépendant, souvent informel

# Impact sur l'Impression 3D

## Accessibilité à la technologie

- Avant les FabLabs, les imprimantes 3D étaient hors de portée pour le grand public en raison de leur coût.
- Ces espaces ont permis à des milliers de personnes de découvrir et d'expérimenter cette technologie.

## Innovation et Prototypage Rapide

- Les imprimantes 3D dans les FabLabs sont devenues des outils clés pour le prototypage rapide.
- Permet de tester des idées sans investissement lourd, favorisant l'entrepreneuriat.

## Communauté et Éducation

- Les FabLabs et makerspaces encouragent le partage de connaissances et de compétences.
- Organisation d'ateliers sur l'impression 3D pour tous les âges.

## Évolution des machines

- Les feedbacks des utilisateurs dans ces espaces ont influencé l'amélioration des imprimantes 3D (ex. : modularité, prix réduits).
- Les projets DIY et open source comme RepRap ont directement bénéficié de ces lieux.

# Internet

## Les bases technologiques

- 1980s : Naissance de l'ordinateur personnel, facilitant l'accès à la modélisation 3D.
- 1990s : Explosion d'Internet, permettant le partage global de savoirs et de projets.

## Évolution parallèle

- 1995 : Création des premiers hackerspaces (Allemagne), précurseurs des FabLabs.
- 2001 : Lancement du concept de FabLab au MIT par Neil Gershenfeld.
- 2005 : Début du projet open source Rep Rap reliant communautés numériques et makers.

## Impact global

- Internet accélère le partage de fichiers et de plans (ex. Thingiverse, GitHub).
- Les lieux physiques comme les FabLabs, makerspaces et hackerspaces se nourrissent de cet écosystème numérique.

**L'évolution d'Internet et des ordinateurs grand public a directement favorisé la démocratisation des FabLabs et de l'impression 3D, rendant l'innovation et la fabrication accessibles à tous.**

# Aujourd'hui

Impression personnelle et professionnelle



**UniLaSalle**  
Amiens

École d'ingénieurs  
Énergie  
& Numérique

# L'impression Personnelle - La Révolution DIY

## Accessibilité :

- Des imprimantes 3D abordables (ex. Ender-3, Prusa Mini).
- Plateformes comme Thingiverse et Cults pour trouver et partager des fichiers.

## Applications :

- Création d'objets du quotidien, réparation, personnalisation.
- Projets éducatifs dans les écoles et ateliers.

## Limites :

- Volume d'impression réduit.
- Matériaux souvent restreints aux plastiques (PLA, ABS, etc.).

# L'impression Professionnelle - Une Révolution Industrielle

## Performance et précision :

- Technologies avancées (SLS, SLA, FDM industriel, Binder Jetting).
- Utilisation de matériaux variés (métaux, composites, bio-matériaux).

## Applications :

- Prototypage rapide pour l'automobile et l'aérospatiale.
- Production sur mesure (implants médicaux, prothèses, pièces uniques).
- Fabrication additive dans la construction (ex. bâtiments imprimés).

## Limites :

- Coût élevé des machines et matériaux.
- Dépendance à des compétences techniques spécifiques.

# Vers un Futur Hybride

## Convergence :

La frontière entre impression personnelle et professionnelle s'estompe grâce à des imprimantes semi-professionnelles accessibles.

## Développement durable :

- Réduction des déchets grâce à une fabrication à la demande.
- Exploration de matériaux biodégradables et recyclés.

## Perspectives :

Expansion dans des domaines comme la médecine régénérative (bio-impression), l'exploration spatiale, et les objets connectés.

# Le Projet RepRap : Objectif atteint ?

Le projet devait démocratiser la fabrication en permettant à chacun de produire des objets du quotidien en développant des imprimantes 3D capables de se reproduire partiellement, favorisant l'autosuffisance.

## Aujourd'hui :

- Les imprimantes 3D sont désormais plus abordables et répandues.
- Des forums et groupes partagent des plans et des améliorations open source.
- Des entreprises proposent des solutions clés en main, parfois propriétaires.

## Réflexions :

- **Autonomie réelle** : Les utilisateurs peuvent-ils fabriquer des objets sans dépendre de fournisseurs externes ?
- **Évolution vers le propriétaire** : La commercialisation a-t-elle limité l'esprit open source initial ?
- **Impact sur la production** : La fabrication personnelle a-t-elle significativement réduit la dépendance aux grandes industries ?



# II - Les technologies

*Sources illustrations : « Les bases de l'impression 3D » - Prusa Research*



**UniLaSalle**  
Amiens

École d'ingénieurs  
Énergie  
& Numérique

# Les différentes technologies

## **FFF/FDM (Fused Filament Fabrication/Modeling) :**

- **Processus :** Filament plastique fondu et déposé par une buse.
- **Applications :** Prototypage rapide, objets du quotidien.
- **Avantages :** Abordable et facile à utiliser.

## **SLA (Stéréolithographie) :**

- **Processus :** Résine liquide solidifiée par lumière UV ou LED (laser ou DLP).
- **Applications :** Modèles détaillés, prothèses, bijoux.
- **Avantages :** Haute précision et finition.

## **SLS (Selective Laser Sintering) :**

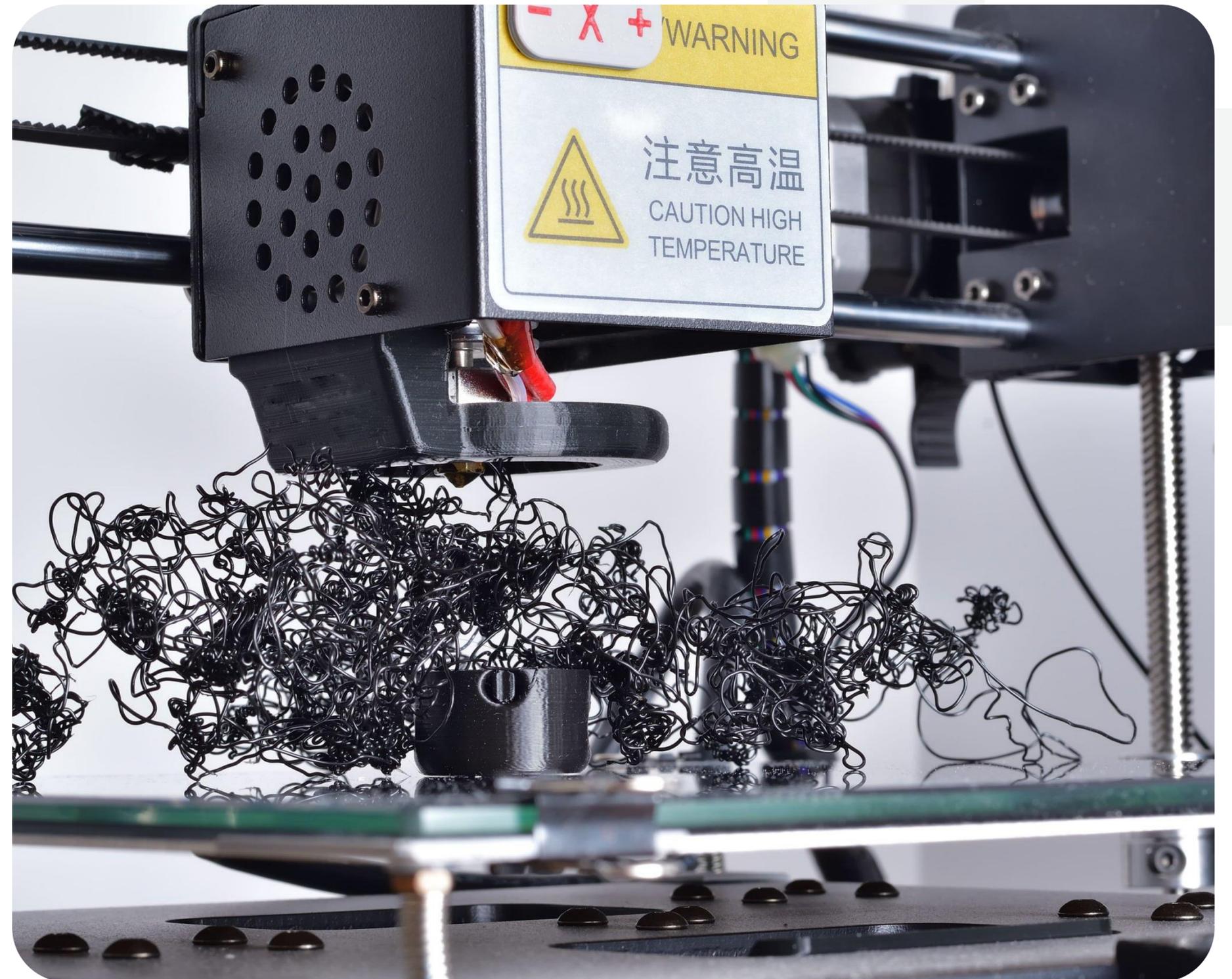
- **Processus :** Poudre fine compactée par laser.
- **Applications :** Pièces fonctionnelles, prototypes industriels.
- **Avantages :** Pas besoin de structures de support, matériaux variés.

# Les différentes technologies

Pas de technologie universelle.

Chaque méthode a ses avantages et limites.

Choisissez en fonction de vos besoins.



# **FDM / FFF**

**Fused Deposition Modeling / Fused Filament Fabrication**



# FFF / FDM

## Fused Deposition Modeling / Fused Filament Fabrication

### La plus répandue et abordable

Adaptée aux pièces fonctionnelles, mécaniques et aux prototypes.

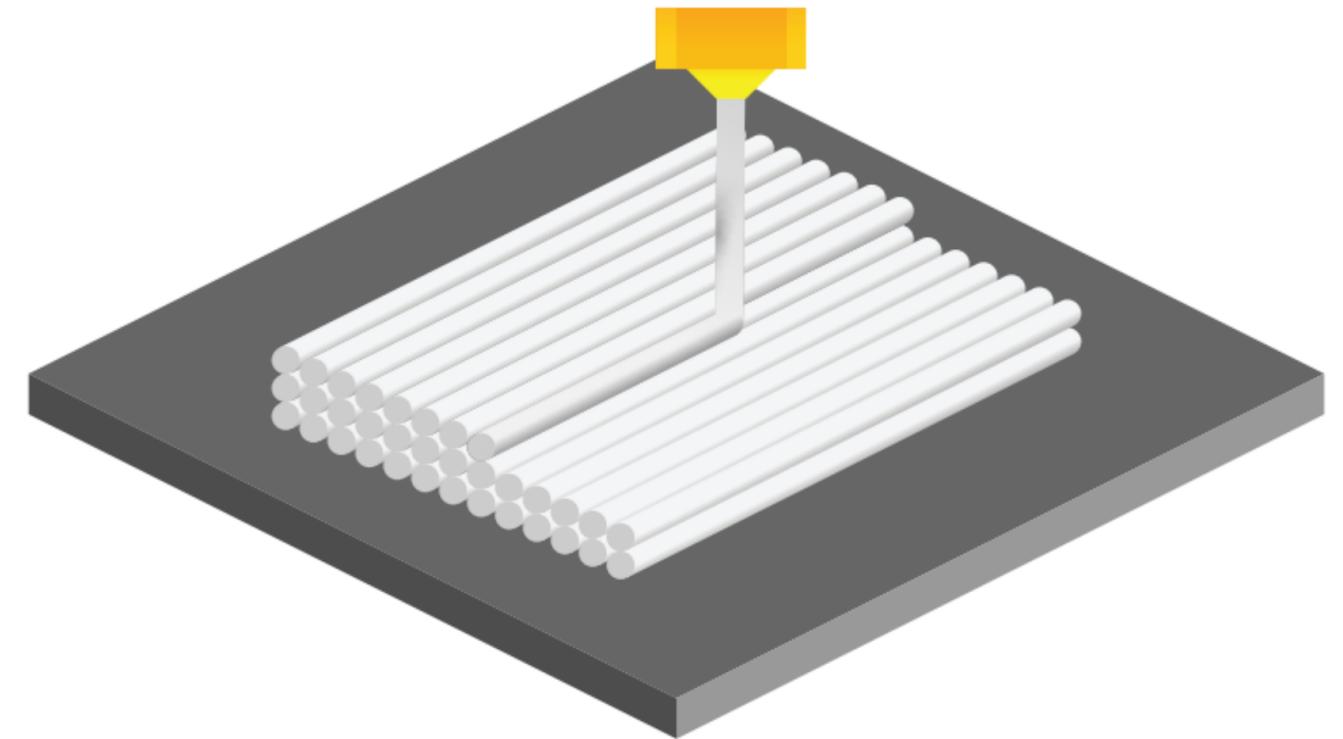
### Matériau utilisé :

- Filament plastique
- Diamètre standard : 1,75 mm.
- Facile à utiliser.
- Plus sûr que la résine liquide ou la poudre.

### Caractéristiques d'impression

- Hauteur de couche : 0,05 à 0,3 mm avec une buse de 0,4 mm.
- Limite : Couches visibles à l'œil nu.

Idéal pour des projets accessibles et pratiques, avec un excellent rapport qualité-prix.





# FFF / FDM – Types de machines

## Cartésienne – “Bed slinger”

### Principe de Fonctionnement

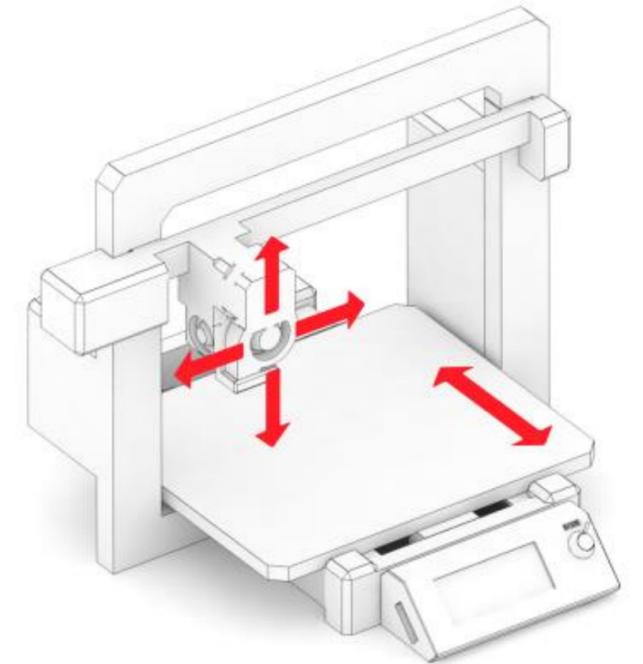
- Les imprimantes cartésiennes utilisent des axes orthogonaux (X, Y, Z) pour les déplacements.
- Dans une configuration bed slinger, le plateau (bed) se déplace.

### Avantages :

- Conception simple et économique.
- Idéal pour les imprimantes FDM grand public

### Limites :

- Déplacements rapides limités par l’inertie du plateau.
- Peut affecter la qualité d’impression sur de grands volumes.





# FFF / FDM – Types de machines

## Cartésienne – “Cantilever”

### Principe de Fonctionnement

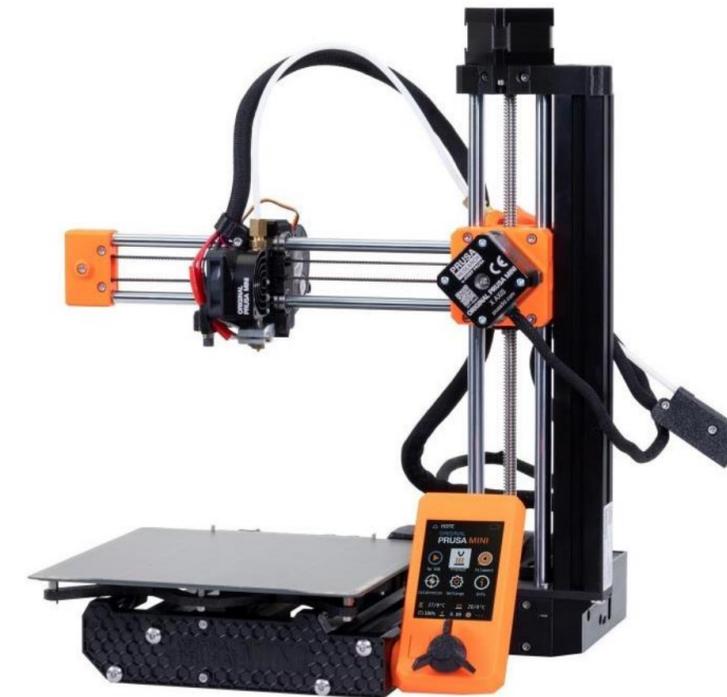
- Une imprimante cantilever utilise également une architecture cartésienne, mais avec une structure simplifiée.
- La tête d'impression se déplace sur un bras unique, sans support symétrique.

### Avantages :

- Conception légère et compacte.
- Idéale pour les imprimantes de petit format.
- Réduction des coûts de fabrication grâce à une structure minimaliste.

### Limites :

- Moins stable que d'autres architectures, surtout pour de grands volumes.
- Peut être affectée par des vibrations ou une flexion du bras.





# FFF / FDM – Types de machines

## Cartésienne – “Core XY”

### Principe de Fonctionnement

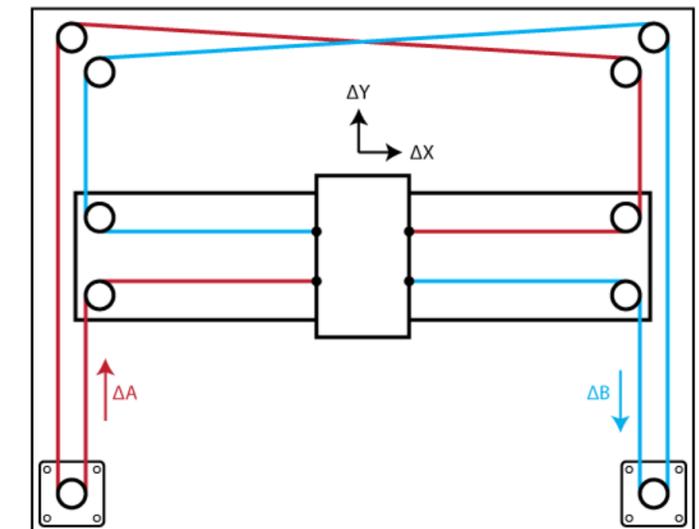
- Une architecture CoreXY utilise un système de poulies et courroies pour coordonner les déplacements sur les axes X et Y.
- La tête d'impression est suspendue et se déplace indépendamment du plateau.

### Avantages :

- Vitesse élevée : Mouvement plus léger et rapide, car seule la tête d'impression se déplace sur X et Y.
- Précision accrue : Réduction des vibrations par rapport aux architectures de type bed slinger.
- Idéal pour les grands volumes : Stabilité optimale sur de grandes dimension

### Limites :

- Nécessite un alignement précis des courroies.
- Coût plus élevé que les architectures simples comme les bed slingers ou cantilever.

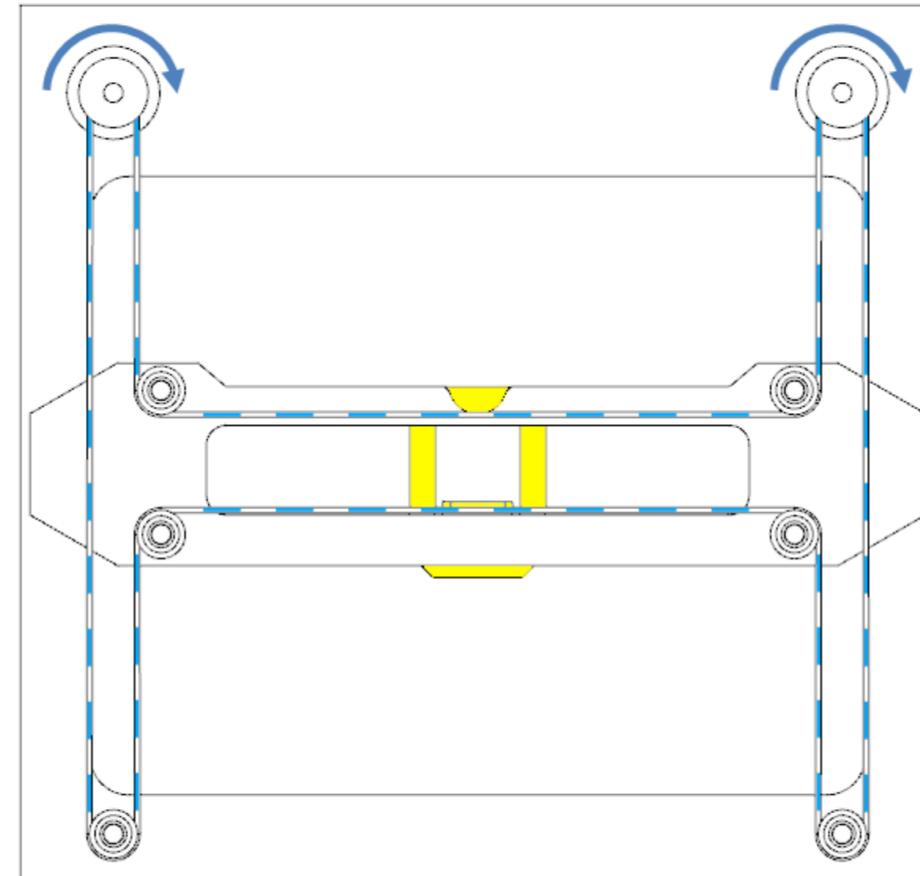
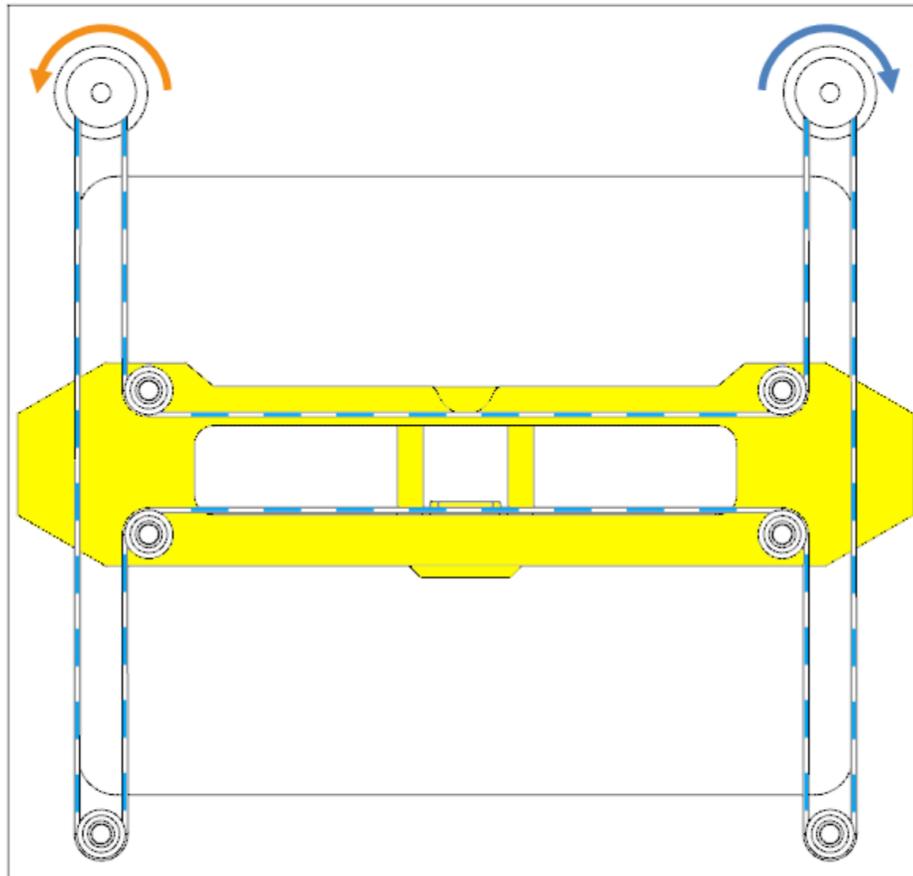


<https://corexy.com/theory.html>



# FFF / FDM – Types de machines

Cartésienne – “Core XY”





# FFF / FDM – Types de machines

## Delta

### Principe de Fonctionnement

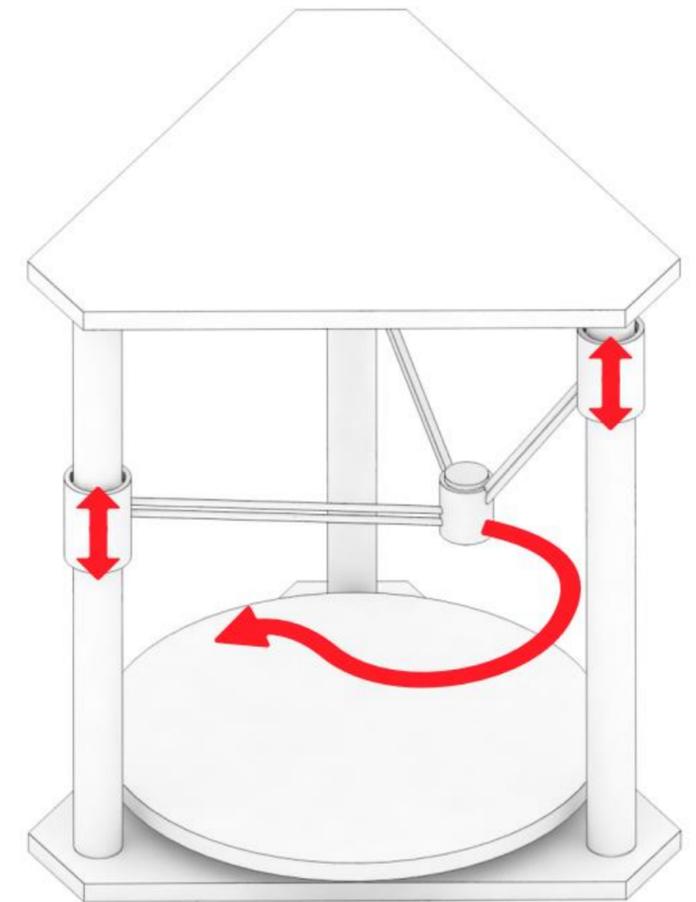
- Une imprimante Delta repose sur une structure composée de trois bras attachés à des colonnes verticales.
- La tête d'impression est déplacée par la coordination simultanée des trois bras.

### Avantages :

- Vitesse élevée : Déplacement rapide et fluide grâce à la légèreté de la tête.
- Structure compacte : Idéale pour des formes cylindriques ou circulaires.
- Grande hauteur d'impression : Permet de produire des objets allongés.

### Limites :

- Complexité de calibration : Nécessite une calibration précise pour éviter des erreurs de positionnement.
- Forme du plateau : Habituellement circulaire, limitant certains designs.
- Moins adapté pour les petites impressions : Risque de surcoût ou de surdimensionnement.





# FFF / FDM – Les composants

## L'ensemble d'extrusion

### Rôle de l'ensemble d'extrusion

- Acheminer et contrôler le filament plastique vers la buse d'impression.
- Responsable du dépôt précis de matière couche par couche.
- La qualité et la fiabilité de l'extrudeur impactent directement la précision et l'uniformité des impressions.

### Composants

- Moteur : Permet le déplacement précis du filament.
- Roues d'entraînement : Saisissent et poussent le filament dans le tube de guidage.
- Hotend (partie chaude) : Chauffe le filament pour le rendre liquide avant extrusion.



# FFF / FDM – Les composants

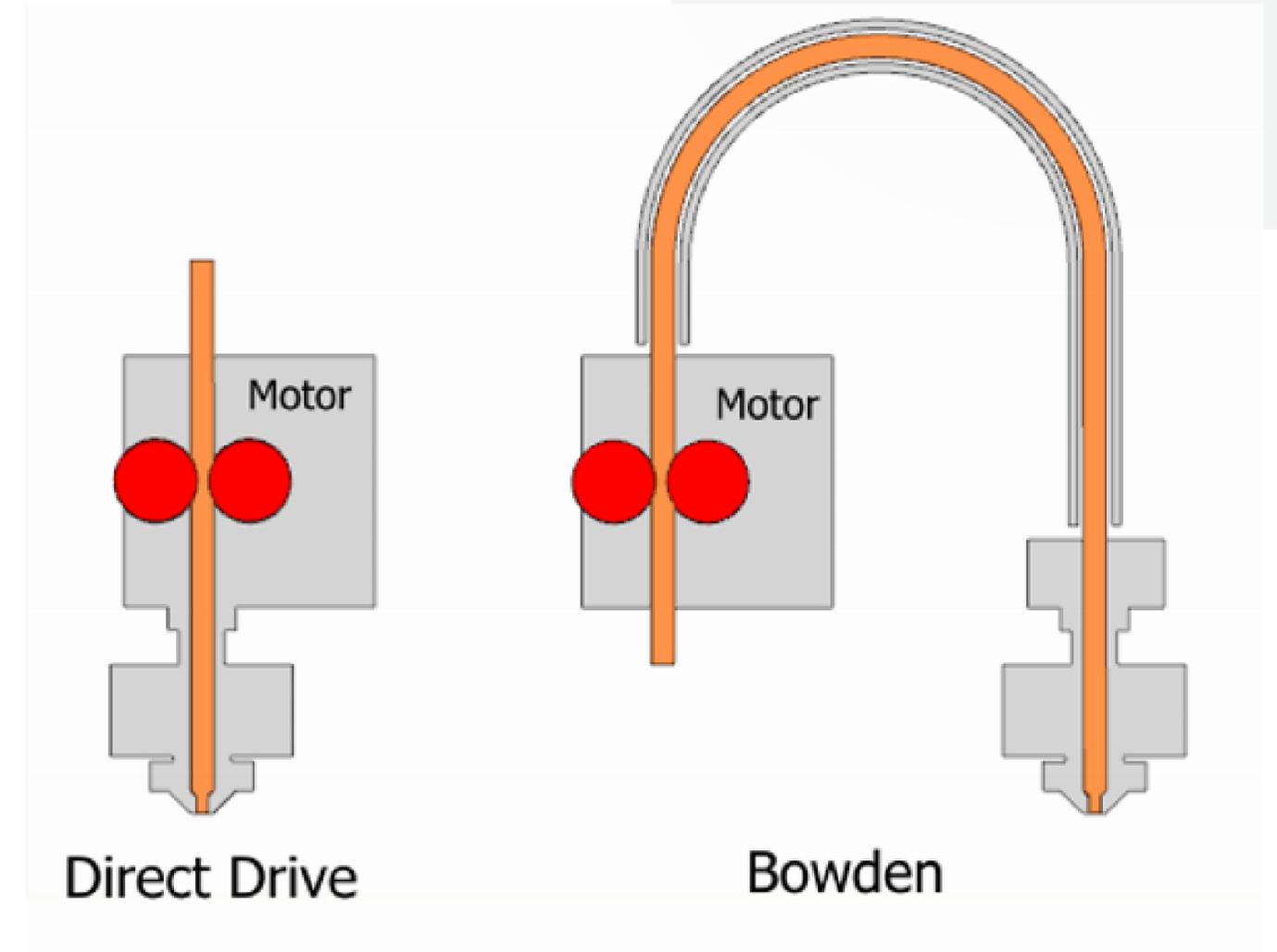
## Deux principaux types d'ensemble

### Direct Drive :

- L'extrudeur est directement monté sur la tête d'impression.
- Avantages : Meilleur contrôle pour les matériaux flexibles.
- Limites : Plus lourd, pouvant réduire la vitesse.

### Bowden :

- L'extrudeur est séparé de la tête et pousse le filament via un tube.
- Avantages : Structure plus légère, permettant des impressions rapides.
- Limites : Moins adapté aux matériaux flexibles.





# FFF / FDM – Les composants

## L'extrudeur

### Fonction principale : Mouvements du filament

- L'extrudeur pousse le filament plastique dans la buse d'impression pour qu'il soit fondu et extrudé.

### Il contrôle :

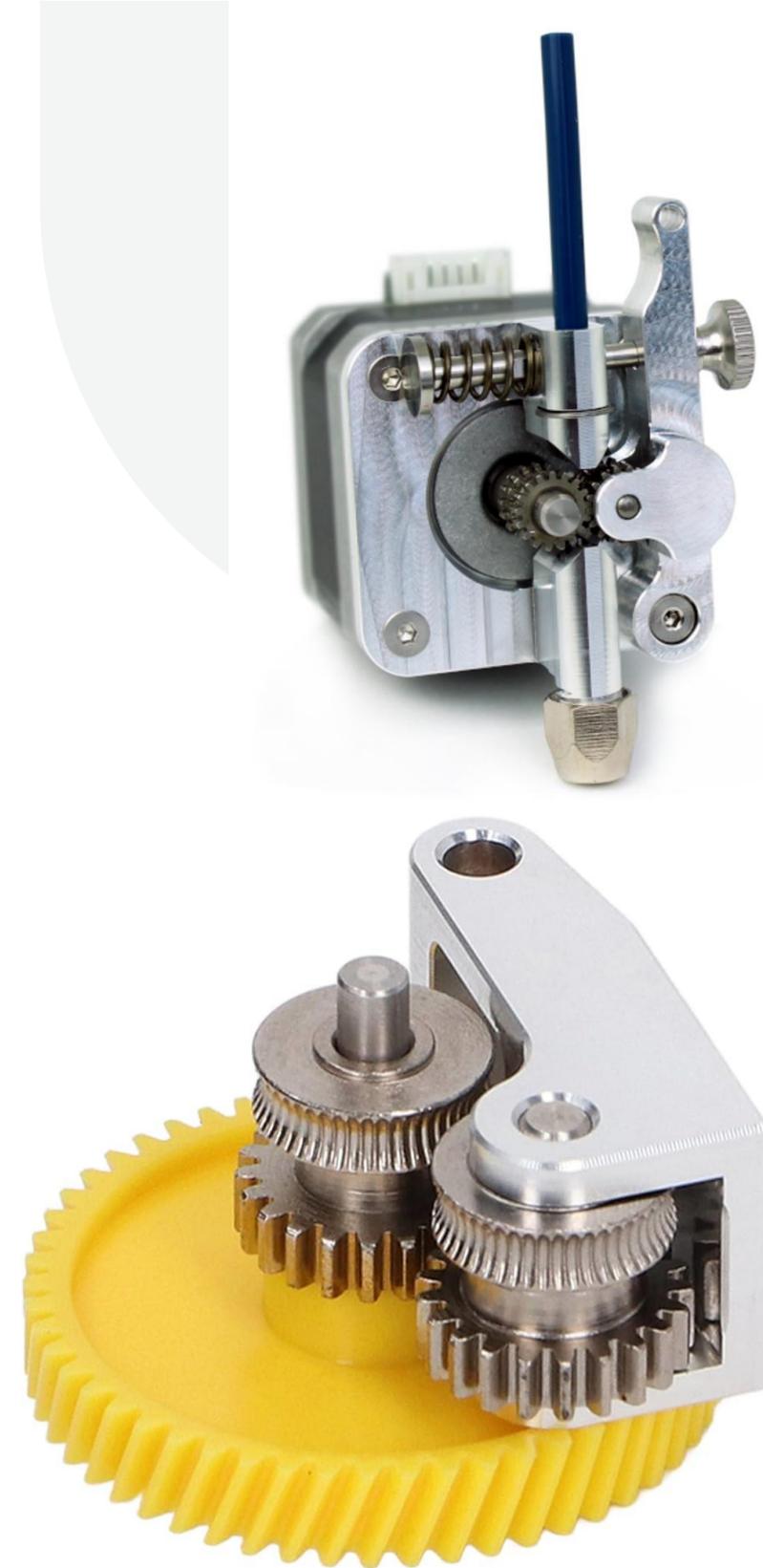
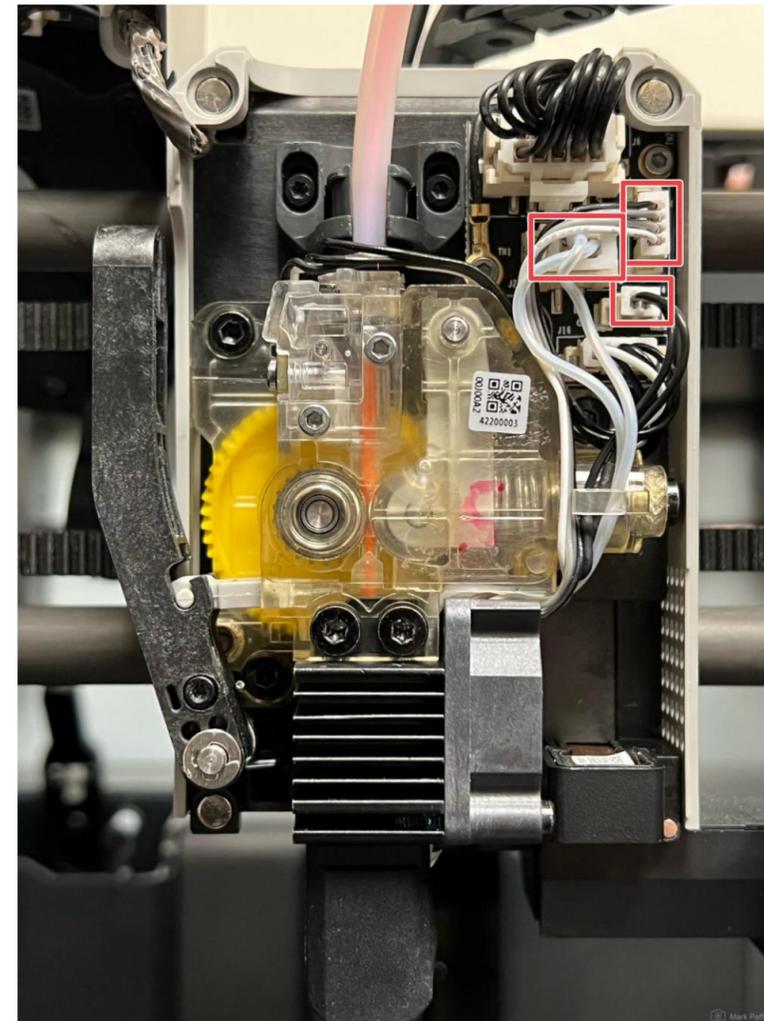
- La vitesse d'alimentation.
- La précision du débit de filament

### Importance pour les matériaux complexes

- Les matériaux comme les TPU ou TPE sont flexibles et difficiles à extruder sans un contrôle précis.

### Un extrudeur performant :

- Évite les bourrages.
- Maintient une extrusion fluide et homogène.
- Assure une qualité d'impression optimale, même avec des filaments exigeants.





# FFF / FDM – Les composants

## La Hotend

### Fonction principale : Chauffe et dépose du filament

- Chauffer le filament plastique pour le rendre liquide et extrudable.
- Solidifier rapidement le filament déposé pour former des couches précises.

### Bloc chauffant :

- Contient une cartouche chauffante et un thermistor.
- Températures courantes : 180°C à 260°C (selon le matériau).

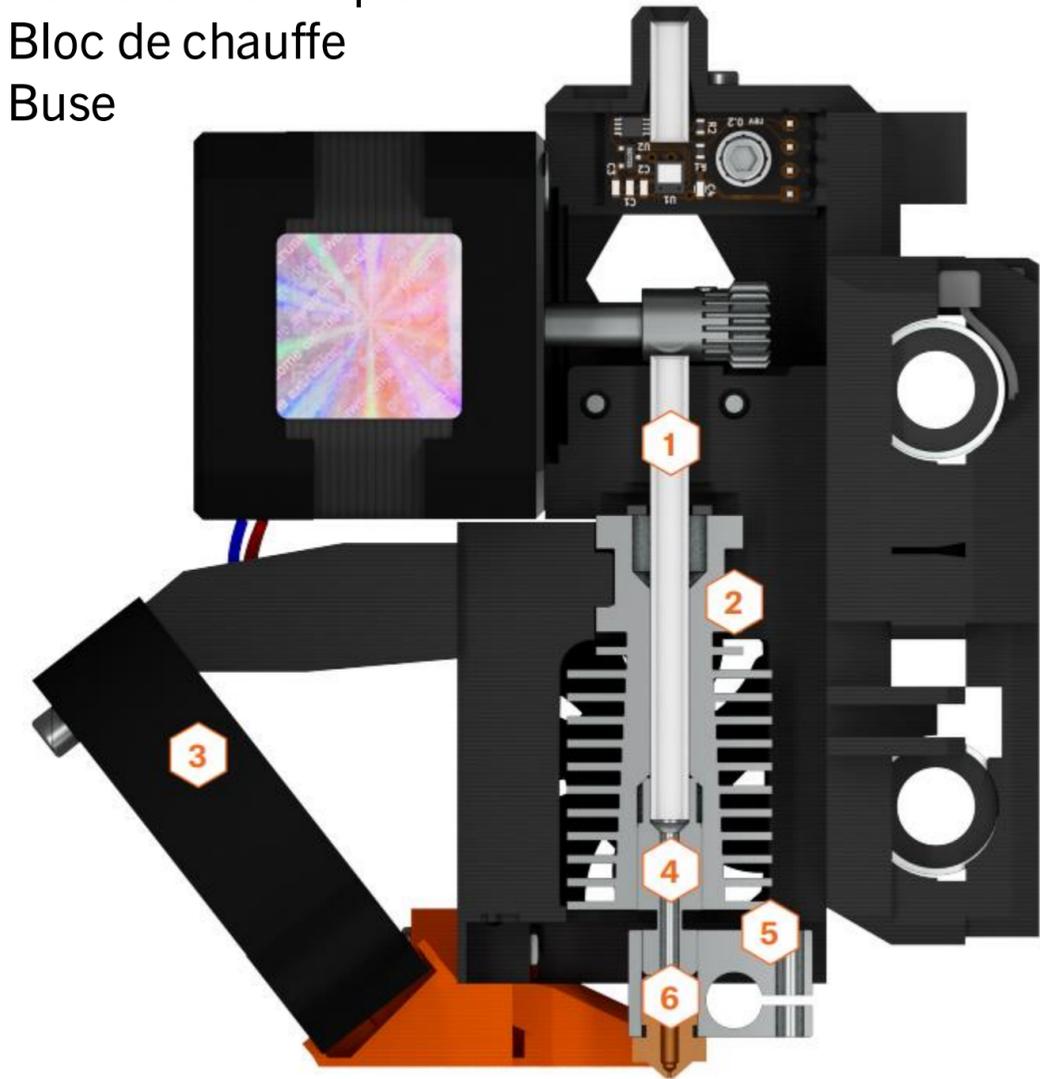
### Heat break (zone froide) :

- Transition entre la partie chauffante et le système de guidage.
- Réduit la conduction thermique pour éviter un ramollissement prématuré du filament.

### Dissipateur thermique (radiateur) :

- Aide à refroidir le filament au-dessus du heat break.
- Souvent accompagné d'un ventilateur dédié

- 1 - Tube PTFE
- 2 - Dissipateur thermique
- 3 - Ventilateur d'impression
- 4 - Barrière thermique
- 5 - Bloc de chauffe
- 6 - Buse



# FFF / FDM – Les composants

## La buse

### Rôle de la buse

- Extruder le filament fondu pour créer des couches d'impression.
- Déterminer la précision et la vitesse de l'impression en limitant le diamètre de sortie du matériau.

## Matériaux des buses

### Laiton (standard) :

- Idéal pour le PLA, ABS et PETG.
- Excellente conductivité thermique.
- S'use rapidement avec des filaments abrasifs (ex. carbone).

### Acier trempé :

- Conçu pour les filaments abrasifs comme le carbone ou le métal.
- Grande durabilité.
- Conductivité thermique inférieure au laiton.

### Revêtements spéciaux :

- Buses plaquées (nickel, cuivre) pour une meilleure résistance et moins d'adhérence.





# FFF / FDM – Les composants

## Taille des buses

### 0,4 mm (standard) :

- Équilibre entre précision et vitesse.
- Idéal pour la majorité des projets.

### Petites tailles (ex. 0,2 mm) :

- Avantages : Plus de détails pour des impressions précises.
- Limites : Impression plus lente.

### Grandes tailles (ex. 0,6 à 1,0 mm) :

- Avantages : Impression plus rapide pour les grandes pièces.
- Limites : Moins de finesse dans les détails.

### Le choix de la buse impacte :

- La résolution (précision des détails).
- La vitesse d'impression.
- La compatibilité avec les matériaux spécifiques.



# SLA

## Stéréolithographie

# ↗ SLA

## Stéréolithographie

### Principe de Fonctionnement

- Utilisation de résines liquides photosensibles, solidifiées par la lumière UV.
- Une plateforme descend après chaque couche solidifiée, permettant à une nouvelle couche d'adhérer.

### Caractéristiques

#### Précision élevée :

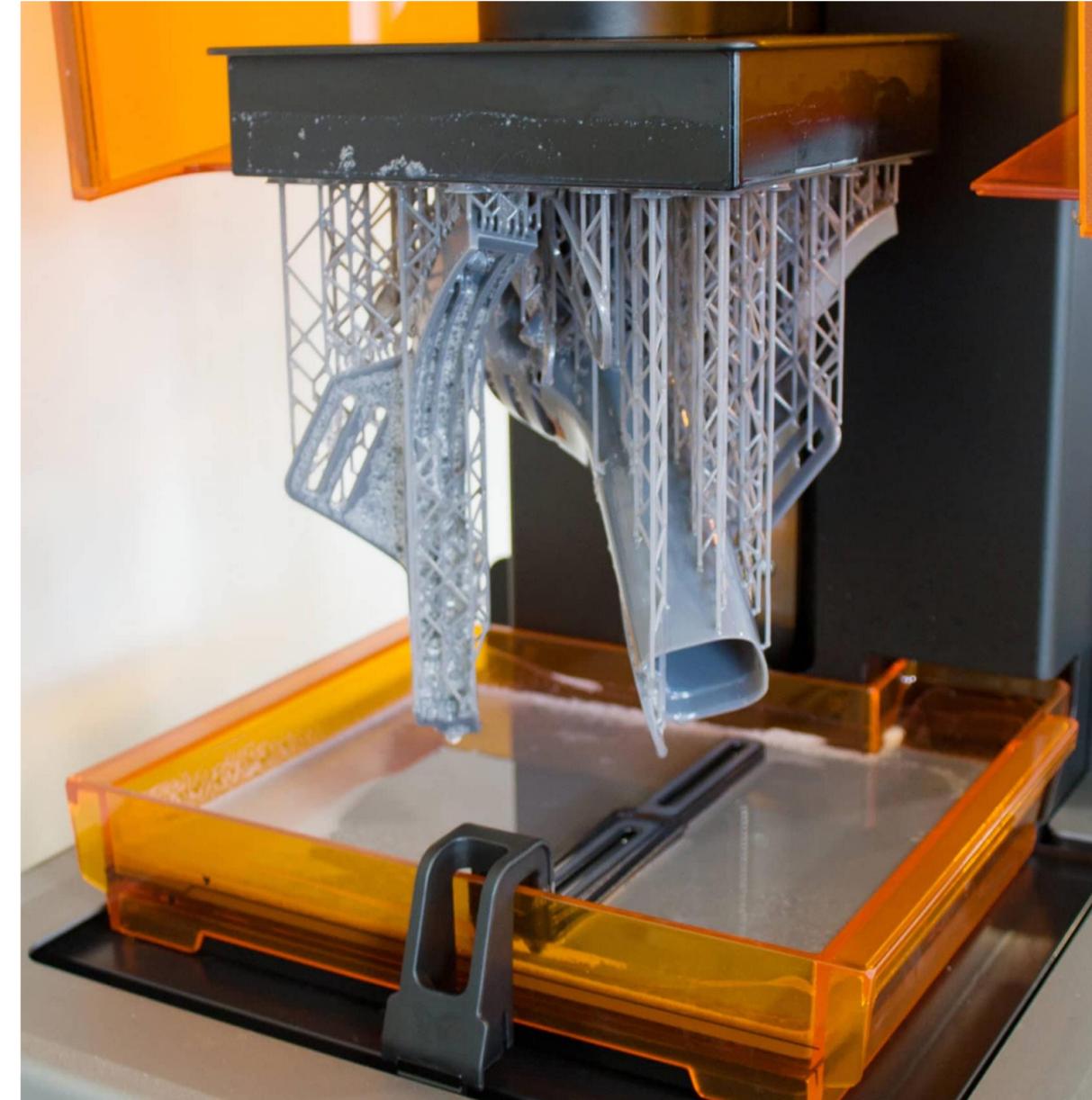
- Objets détaillés avec des couches quasiment invisibles.
- Finitions lisses, idéales pour les bijoux et les applications médicales.

#### Limitations :

- Surface d'impression réduite.
- Temps d'impression plus long que les imprimantes FFF.
- Résines liquides toxiques : manipulation et ventilation nécessaires.

#### Avantages

- Détails incroyables et surface lisse, impossible à atteindre avec les imprimantes FFF.
- Applications professionnelles : prototypes complexes, modélisation médicale, et bijoux.



# SLA

## Post-traitement

### Pourquoi le post-traitement est nécessaire ?

Les objets imprimés en SLA ne sont pas prêts à l'usage immédiatement. Ils peuvent être mous ou collants à cause de résidus de résine non solidifiée à leur surface.

### Étapes de post-traitement :

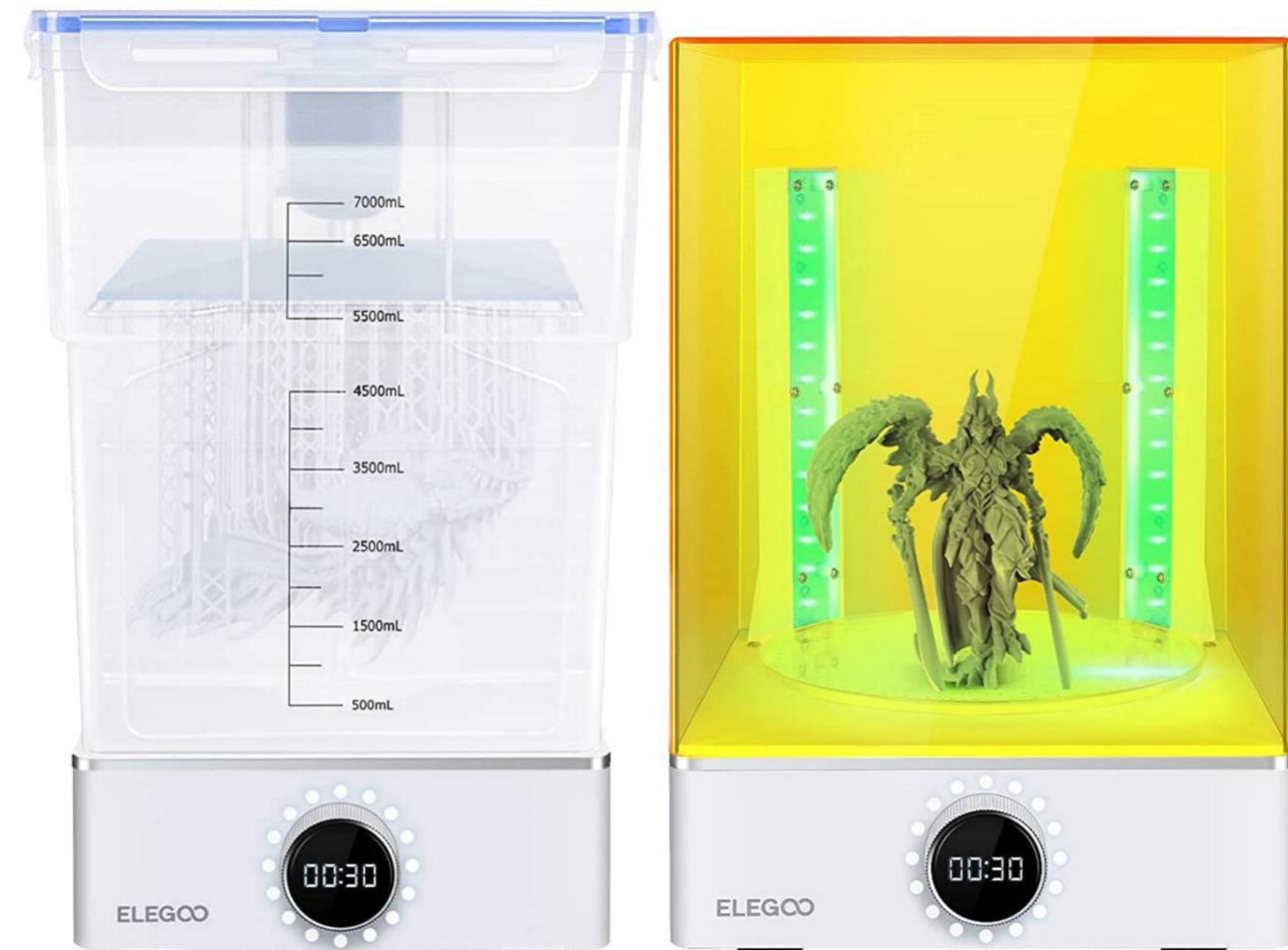
1. **Nettoyage** : Laver l'objet dans de l'alcool isopropylique pour enlever la résine restante.
2. **Durcissement UV** : Exposer l'objet à une lumière UV pour le solidifier davantage.

### Précautions :

- Toujours porter des gants pour manipuler les objets et éviter le contact avec la résine.
- Veiller à bien ventiler l'espace pour éviter l'inhalation des vapeurs.

### Outils complémentaires :

- Machines automatiques de lavage et de durcissement, simplifiant le processus et garantissant des résultats homogènes.



# SLA

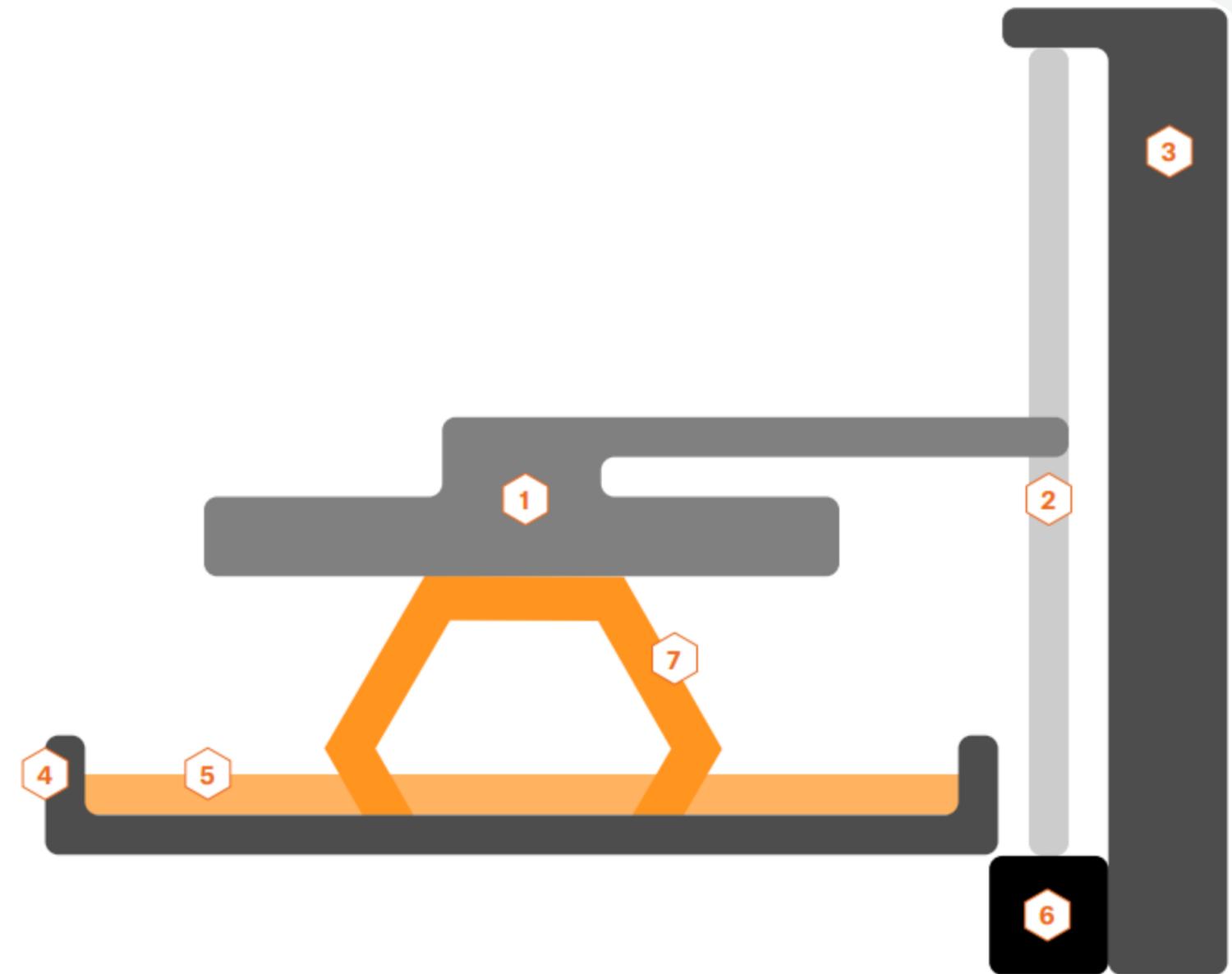
## Processus & fonctionnement général

### Éléments constitutifs :

- 1 - Plateforme d'impression
- 2 - Tige trapézoïdale
- 3 - Axe Z
- 4 - Réservoir de résine
- 5 - Photopolymère (résine liquide)
- 6 - Moteur pas à pas
- 7 - Objet imprimé

### Processus :

1. La plateforme d'impression descend dans la résine, laissant une fine couche entre l'objet et le fond du réservoir.
2. La lumière UV solidifie la résine selon la forme de la couche.
3. Une fois la couche terminée, la plateforme monte légèrement, permettant la formation de la couche suivante.
4. Ce processus se répète jusqu'à ce que l'objet soit terminé.



# SLA

## Laser

### Principe de Fonctionnement

- Un rayon laser UV solidifie la résine couche par couche.
- Deux miroirs (galvanomètres) dirigent le laser pour « dessiner » la forme de chaque couche.

### Caractéristiques

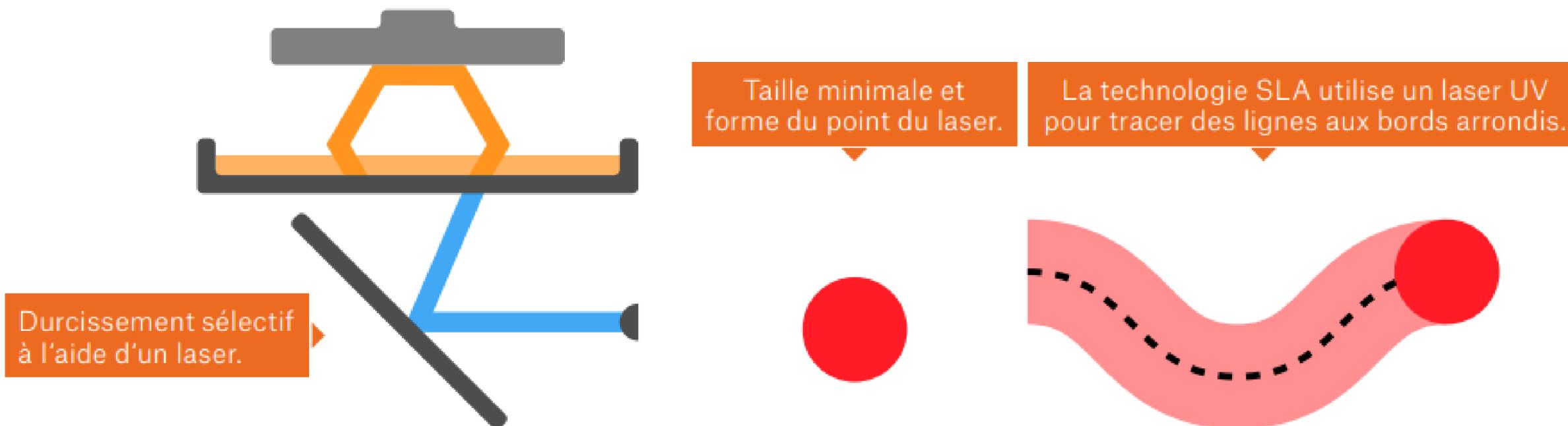
- Temps d'impression : Dépend de la surface à solidifier. Plus il y a d'objets, plus l'impression est longue.
- Précision : Très élevée grâce à la finesse du rayon laser.

### Avantages

- Idéal pour des objets très détaillés.
- Adapté aux applications nécessitant une précision extrême (ex. bijoux, dentaire).

### Limites

- Temps d'impression peut augmenter significativement avec la complexité ou la taille de la plateforme.



# SLA

## DLP (Digital Light Processing)

### Principe de Fonctionnement

- Utilise un projecteur numérique pour solidifier toute une couche à la fois.
- Les zones exposées par le projecteur durcissent simultanément.

### Caractéristiques

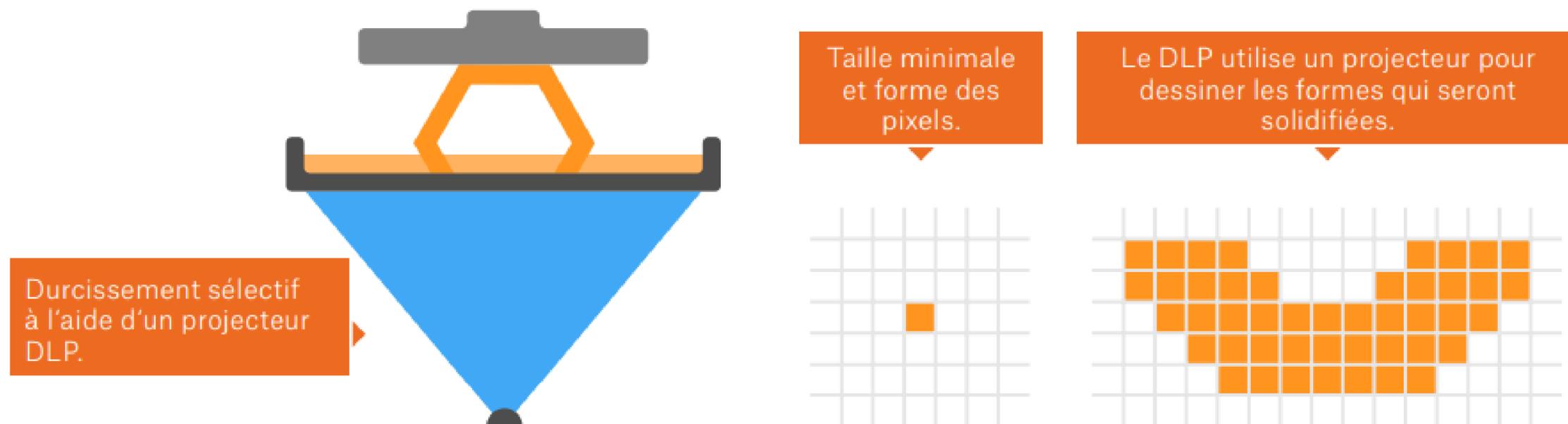
- Temps d'impression : Constant, quelle que soit la quantité d'objets sur la plateforme.
- Précision : Dépend de la résolution du projecteur.

### Avantages

- Rapidité accrue pour les impressions multi-objets.
- Répartition homogène de l'exposition sur toute la plateforme.

### Limites

- Résolution XY limitée par la qualité du projecteur.



# SLA

## MSLA (stéréolithographie masquée)

### Principe de Fonctionnement

- Une LED UV haute performance émet de la lumière.
- Un écran LCD agit comme un masque, ne laissant passer la lumière que sur les zones à solidifier.

### Caractéristiques

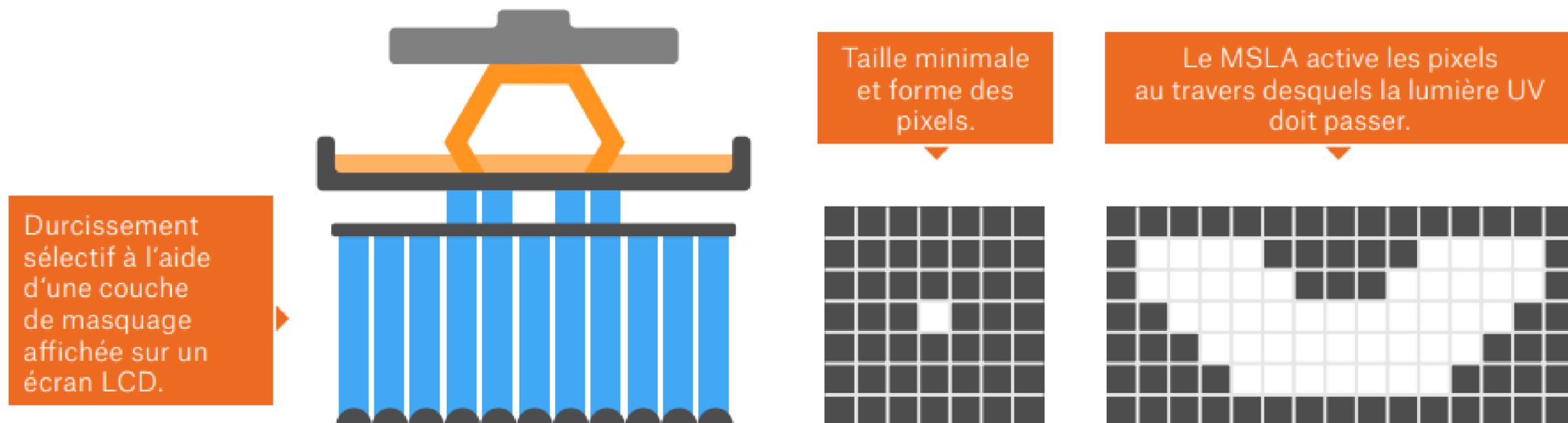
- Temps d'impression : Constant pour chaque couche, quelle que soit la quantité d'objets.
- Résolution fixe : Dépend de la résolution de l'écran LCD.

### Avantages

- Rapide et efficace pour des impressions multi-objets.
- Prix généralement plus abordable que le SLA laser.

### Limites

- La résolution dépend uniquement de l'écran LCD (XY).
- Durabilité limitée des écrans LCD avec le temps.



# SLS / DMLS

**Selective Laser Sintering - Frittage**



# SLS / DMLS

## Selective Laser Sintering - Frittage

### Principe de Fonctionnement

Le frittage consiste à solidifier une poudre fine avec un laser pour former chaque couche.

Étapes :

1. Un cylindre applique une fine couche de poudre sur la plateforme.
2. Le laser fritte la poudre en suivant la forme de la couche.
3. La plateforme descend pour accueillir une nouvelle couche de poudre.

### Caractéristiques

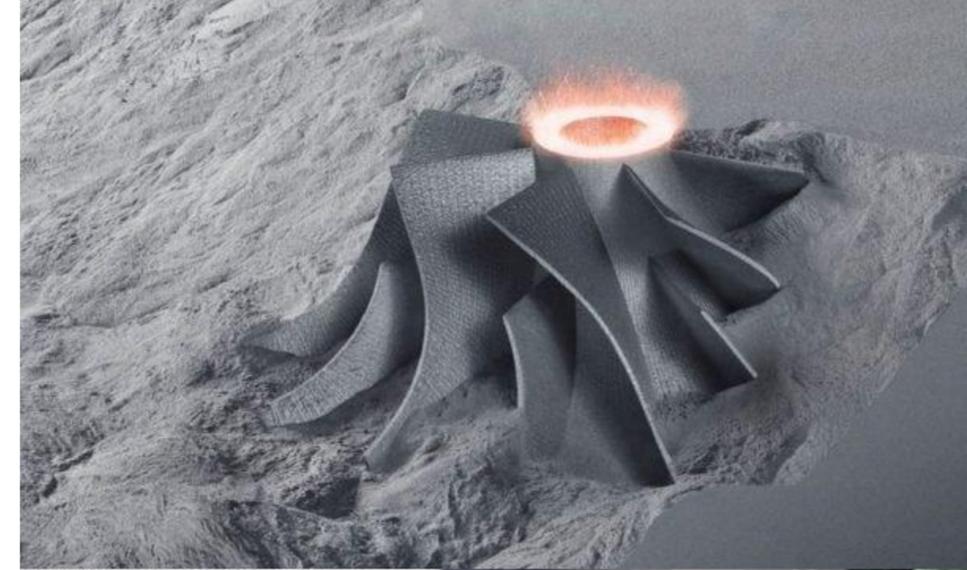
- **Précision** : Couches très fines, quasiment invisibles à l'œil nu.
- **Économie de matériau** : La poudre non frittée peut être réutilisée, limitant le gaspillage.
- **Flexibilité** : Pas besoin de supports, car la poudre environnante soutient les pièces pendant l'impression.

### Applications

- Utilisé principalement dans l'industrie pour des pièces fonctionnelles et des prototypes.
- Secteurs : automobile, aéronautique, médical, design.

### Limites

- Post-traitement : Nécessité de nettoyer les objets imprimés pour retirer la poudre excédentaire.
- Coût élevé : Machines à partir de 5500 €, principalement utilisées par les professionnels.





# SLS / DMLS

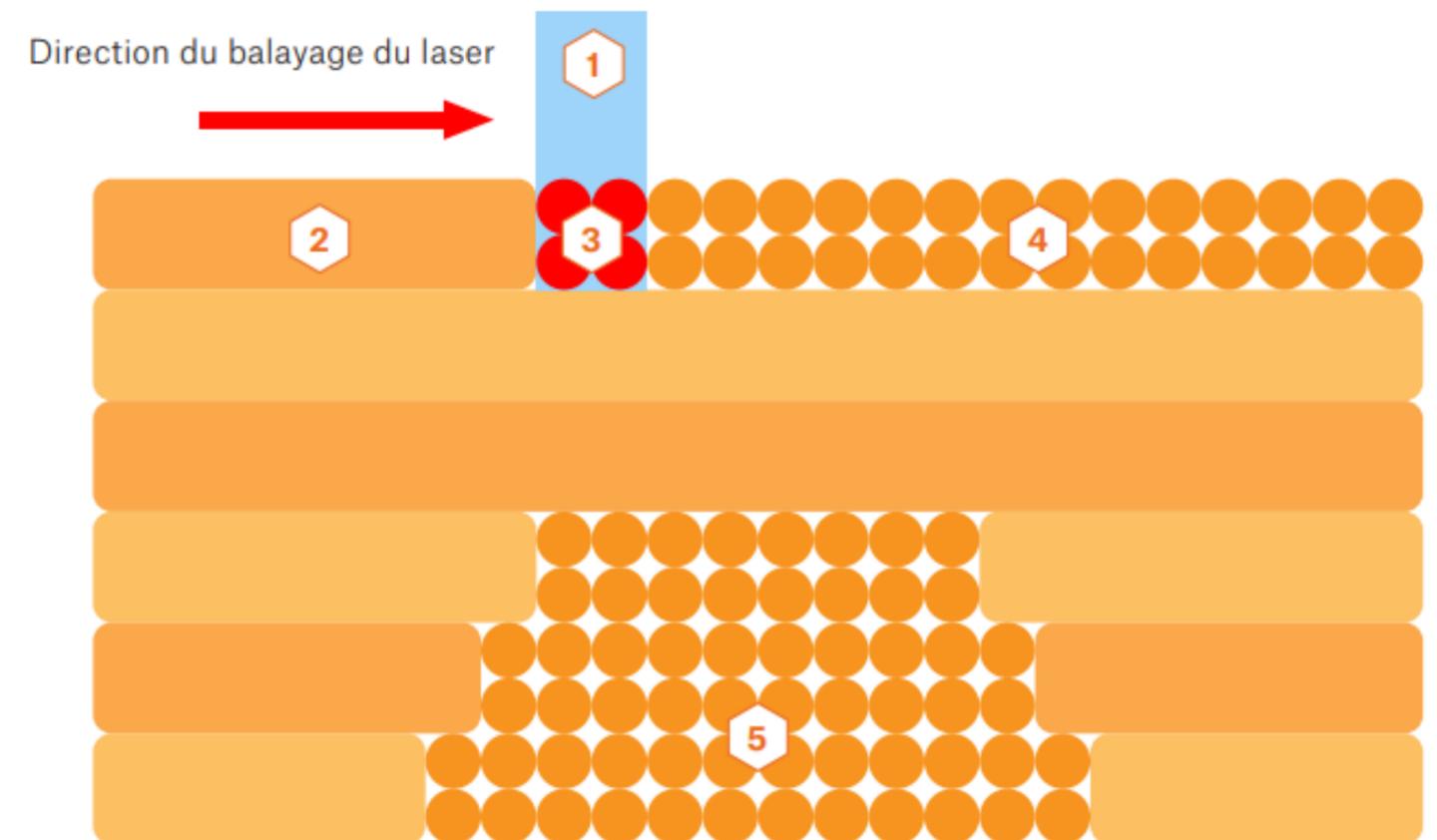
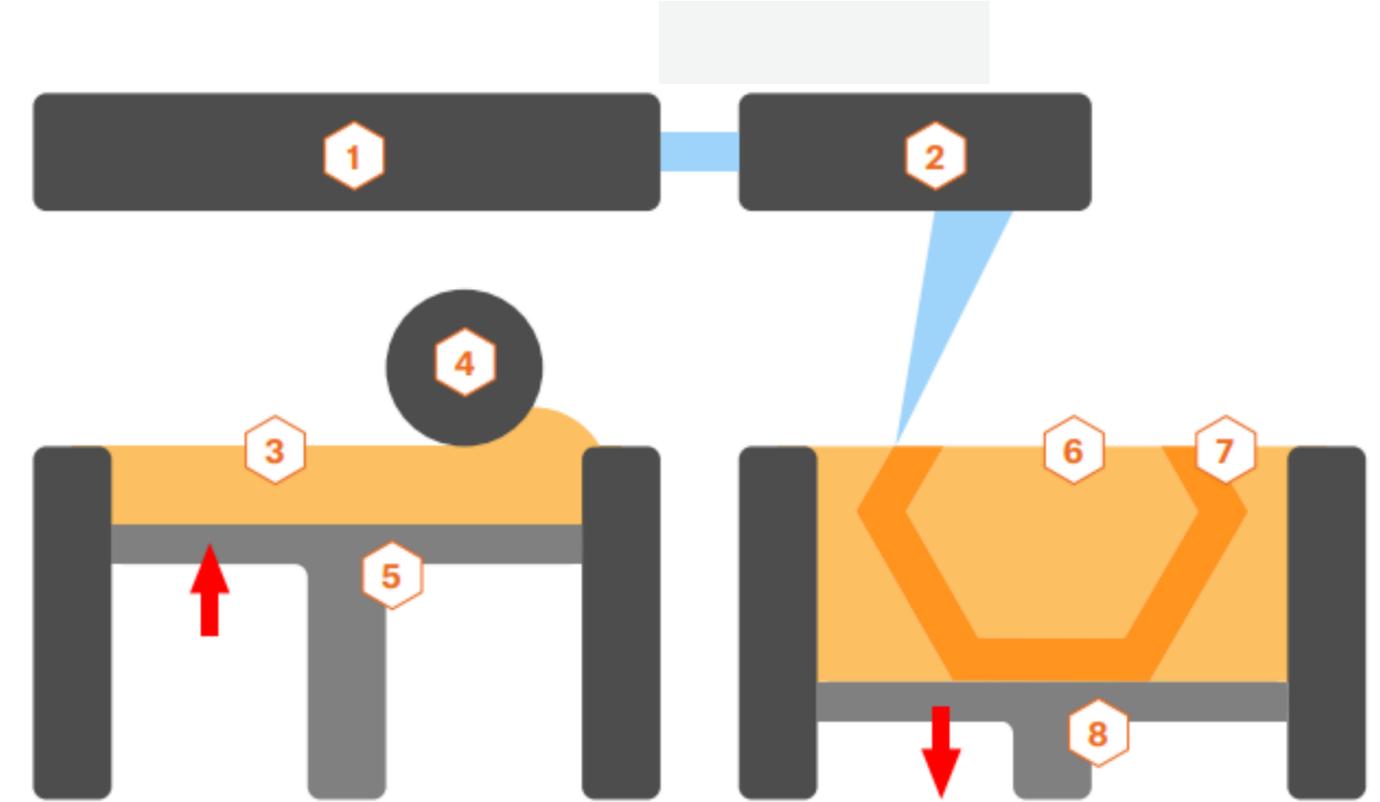
## Selective Laser Sintering - Frittage

### Éléments constitutifs :

- 1 - Laser
- 2 - Système de balayage
- 3 - Récipient de poudre
- 4 - Cylindre
- 5 - Mécanisme de chargement de poudre
- 6 - Lit de poudre
- 7 - Objet imprimé
- 8 - Plateforme motorisée

### Principe de fonctionnement :

- 1 - Faisceau laser
- 2 - Particule de poudre frittée
- 3 - Frittage laser
- 4 - Lit de poudre
- 5 - Matériau non fritté dans les couches précédentes



# Les autres technologies

**Binder Jetting, Polyjet**

# Binder Jetting

## Principe et Applications

### Définition

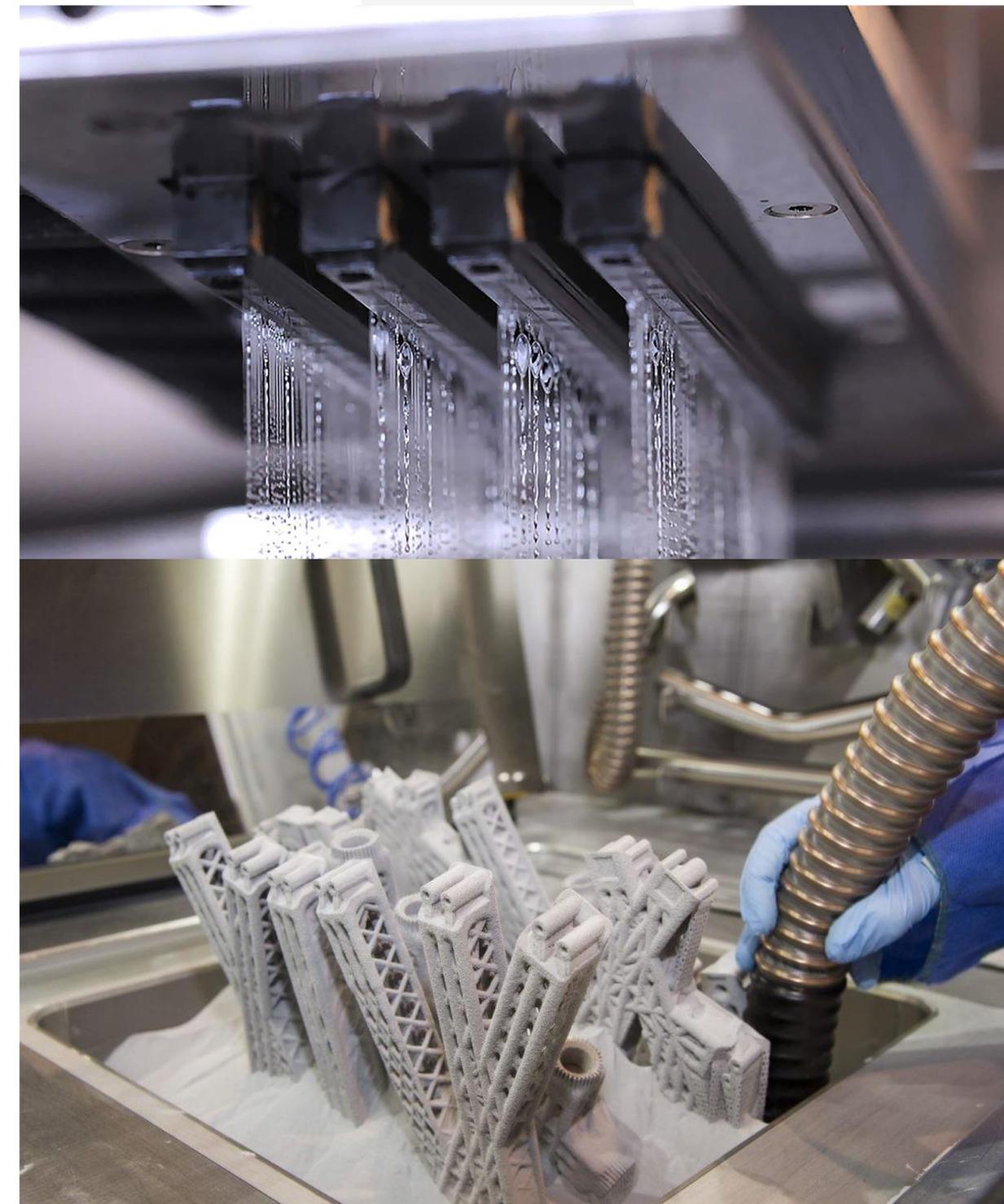
Le **Binder Jetting** est une technologie d'impression 3D qui utilise un liant liquide pour agglomérer une poudre fine et former un objet couche par couche. Contrairement au SLS, la poudre n'est pas fondue mais collée par le liant.

### Principe de Fonctionnement

- **Application de la poudre** : Une fine couche de poudre (métal, sable, céramique).
- **Projection de liant** : Une tête d'impression dépose un liant liquide sur les zones définies.
- **Formation couche par couche** : La plateforme descend pour accueillir de nouvelles couches.
- **Post-traitement** : Nécessaire pour renforcer les pièces (sintering, infiltration).

### Caractéristiques

- **Matériaux** : Métaux, sable, céramiques.
- **Vitesse** : Rapide, couche entière solidifiée en une fois.
- **Précision** : Surfaces lisses et détails fins.



# PolyJet

## Principe et Applications

### Définition

Le PolyJet est une technologie d'impression 3D par jet de matériau, qui projette des gouttelettes de résine photopolymère liquide sur une plateforme d'impression, couche par couche. Chaque couche est immédiatement solidifiée par une lumière UV, permettant une grande précision et des détails fins.

### Principe de Fonctionnement

- **Projection de matériau** : Des gouttelettes de résine photopolymère liquide sont projetées sur la plateforme.
- **Solidification par lumière UV** : Chaque couche est durcie instantanément par une lumière UV.
- **Formation couche par couche** : La tête d'impression dépose et durcit le matériau simultanément, avec une précision élevée.

### Caractéristiques

- **Matériaux** : Résines photopolymères, avec possibilité de combiner plusieurs couleurs ou textures.
- **Précision** : Très élevée, avec des couches fines (jusqu'à 16 microns).
- **Supports** : Structures solubles pour faciliter le post-traitement.





# Les matériaux





# Les matériaux

## Les familles de matériaux selon les technologies

### Filaments (FDM/FFF) :

- Exemples : PLA, ABS, PETG, TPU.
- Applications : Prototypes, pièces fonctionnelles.

### Résines (SLA/DLP/MSLA) :

- Exemples : Résines standard, flexibles, haute résistance.
- Applications : Bijoux, médical, maquettes détaillées.

### Poudres (SLS/Binder Jetting) :

- Exemples : Nylon, métaux, céramiques.
- Applications : Pièces fonctionnelles, prototypage industriel.

### Photopolymères (PolyJet) :

- Exemples : Résines multi-matériaux et couleurs.
- Applications : Prototypes réalistes, design, médical.



Pour la suite, on se concentrera sur les filaments pour les technologies  
FDM/FF

# Les filaments

**PLA, PETG, TPU, ABS, PVA**



# PLA

## Acide Polylactique

### Caractéristiques:

- Biodégradable, facile à imprimer. Faible résistance à la chaleur et aux chocs.

### Température d'impression:

- 190-220°C.

### Applications:

- Objets décoratifs, prototypes non fonctionnels.

### Avantages:

- Peu de déformation, compatible avec les imprimantes débutantes.

### Limites:

- Fragilité, sensibilité à la chaleur.



# PETG

## Polyéthylène Téréphtalate Glycol

### Caractéristiques:

- Résistant, flexible, bonne adhérence entre les couches.  
Léger effet brillant.

### Température d'impression:

- 220-250°C.

### Applications:

- Pièces fonctionnelles, contenants alimentaires (sous conditions).

### Avantages:

- Résistant à l'humidité et aux produits chimiques.

### Limites:

- Sensible à l'humidité pendant l'impression, risque de fils ('stringing').



# TPU

## Polyuréthane Thermoplastique

### Caractéristiques:

- Flexible et élastique, très résistant.

### Température d'impression:

- 200-250°C.

### Applications:

- Joints, semelles, objets nécessitant de la souplesse.

### Avantages:

- Grande résistance mécanique, flexible.

### Limites:

- Plus difficile à imprimer, nécessite un extrudeur adapté.



# **ABS**

## **Acrylonitrile Butadiène Styrène**

### **Caractéristiques:**

- Résistant à la chaleur et aux chocs. Nécessite un plateau chauffant et une enceinte fermée pour éviter le warping.

### **Température d'impression:**

- 220-250°C.

### **Applications:**

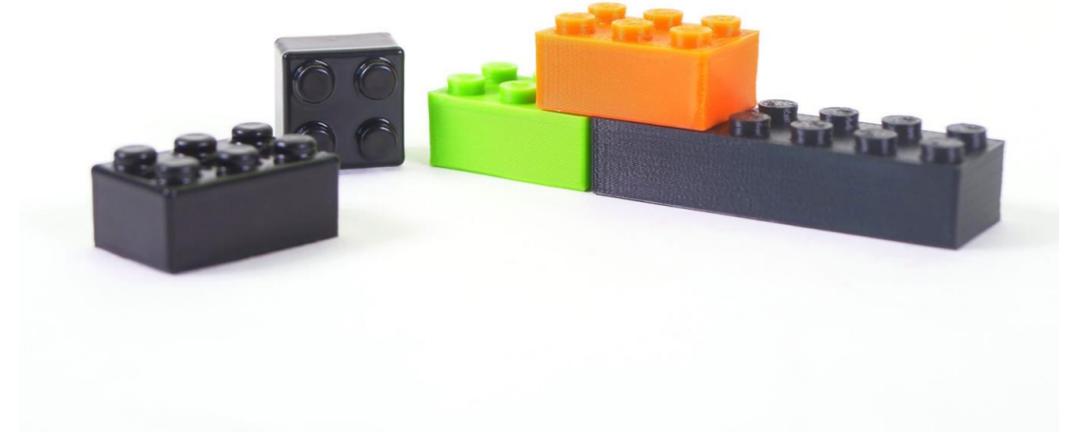
- Pièces mécaniques, prototypes industriels.

### **Avantages:**

- Durable et robuste.

### **Limites:**

- Émissions de vapeurs, nécessite une bonne ventilation.



# PVA

## Alcool Polyvinylique

### Caractéristiques:

- Soluble dans l'eau, utilisé comme support d'impression.

### Température d'impression:

- 180-210°C.

### Applications:

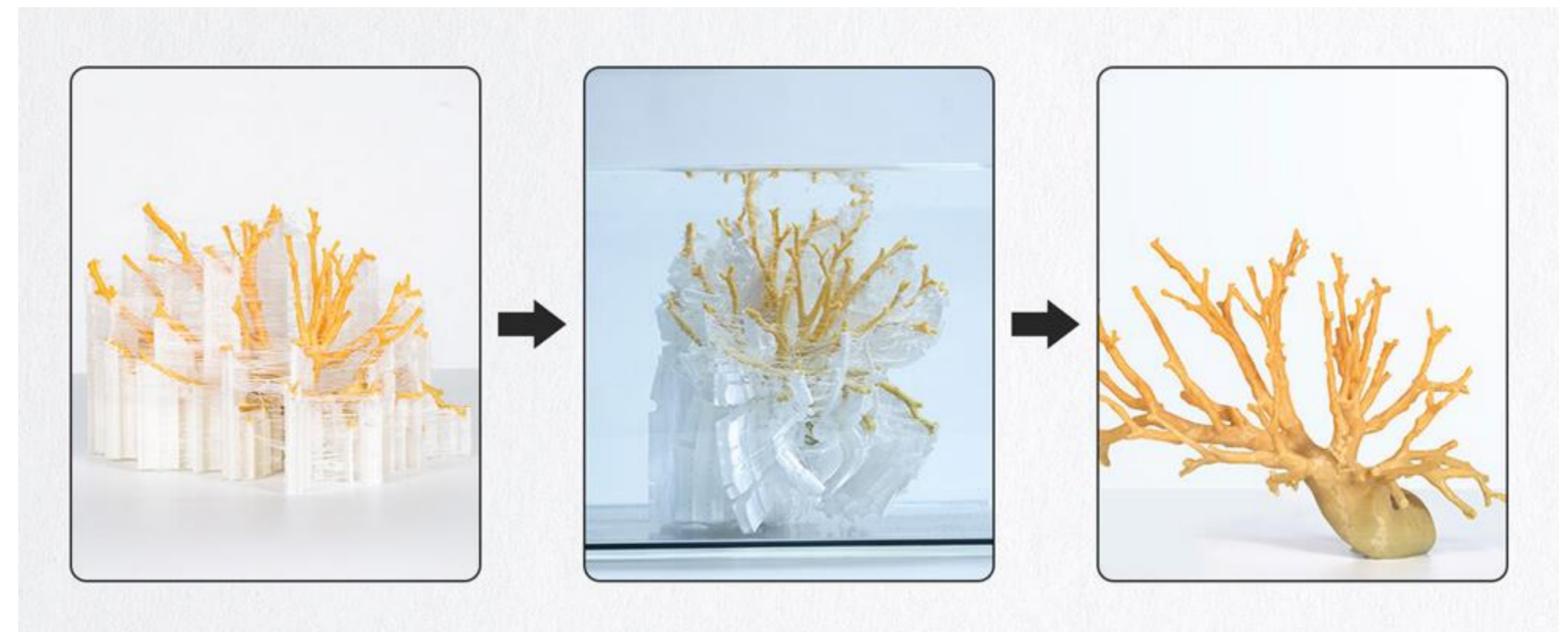
- Supports pour pièces complexes en double extrusion.

### Avantages:

- Facile à retirer, idéal pour des géométries complexes.

### Limites:

- Sensible à l'humidité, stockage délicat.



# Les filaments

Les filaments spécifiques



# HIPS

## Polystyrène à impact élevé

### Caractéristiques:

- Léger et facile à imprimer. Utilisé comme matériau de support soluble (dissout dans le limonène).

### Applications:

- Support pour ABS, prototypage.

# PC

## Polycarbonate

### Caractéristiques:

- Très résistant à la chaleur et aux chocs, mais nécessite des températures élevées.

### Applications:

- Pièces nécessitant une résistance mécanique et thermique.

# NYLON

## Polyamide

### Caractéristiques:

- Résistant, flexible, durable, mais nécessite un environnement contrôlé.

### Applications:

- Pièces fonctionnelles, engrenages, prototypes mécaniques. Note : Sensible à l'humidité.

# PP

## Polypropylène

### Caractéristiques:

- Flexible, résistant aux produits chimiques et aux impacts.

### Applications:

- Contenants alimentaires, pièces nécessitant flexibilité et durabilité.

# Composites

## Filaments mélangés

### Caractéristiques:

- PLA ou ABS mélangés avec du bois, du métal ou de la fibre de carbone.

### Applications:

- Design, prototypage, pièces nécessitant résistance.

# ASA

## Acrylonitrile Styrène Acrylate

### Caractéristiques:

- Alternative à l'ABS, résistant aux UV et intempéries.

### Applications:

- Pièces extérieures ou d'usage prolongé en extérieur.

# PEEK/PEI

## Polyétheréthercétone/Ultem

### Caractéristiques:

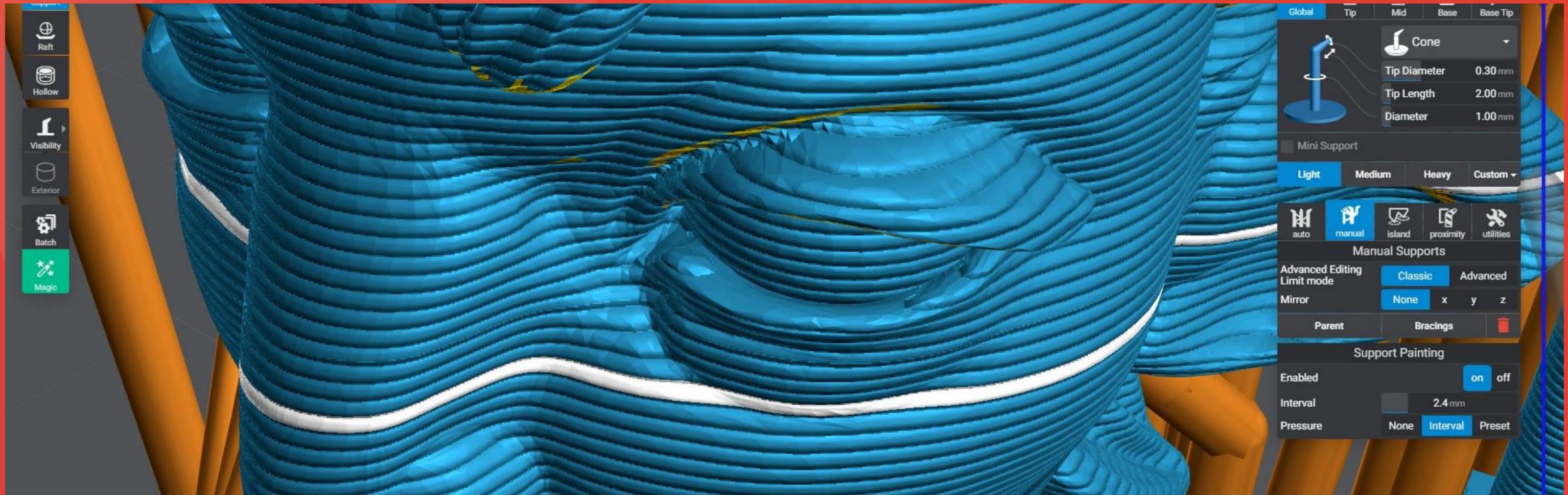
- Haute résistance mécanique, thermique et chimique. Utilisé pour des applications industrielles et médicales

### Applications:

- Aéronautique, médical, automobile. Nécessite des imprimantes haut de gamme.

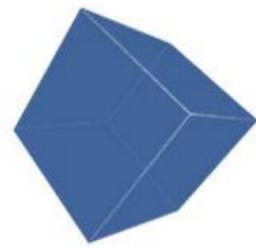


# Workflow Logiciel

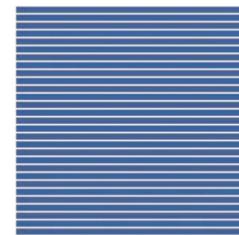


# ➤ Principe général

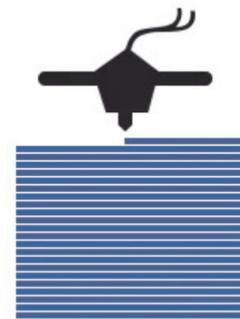
## Le workflow Logiciel



**Logiciel de  
modélisation**



**Slicer**



**Machine 3D**

# La Modélisation

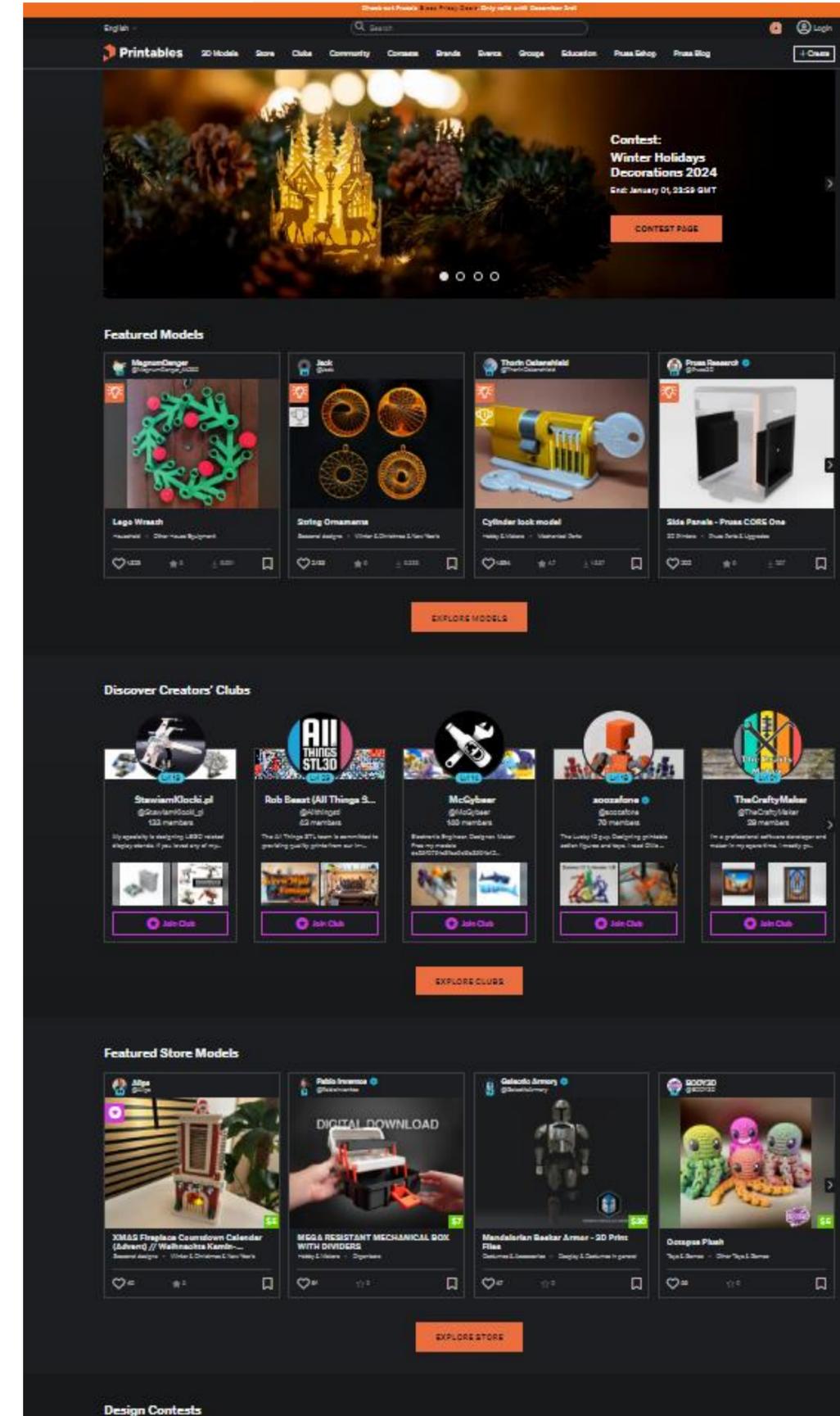
Les logiciels de conception, de modélisation, Scan 3D, ...

# ➔ Récupérer son fichier 3D

## Les bibliothèques 3D

- **PrusaPrinters** : <https://www.printables.com/>  
Plateforme de partage de fichiers 3D optimisée pour les imprimantes Prusa, mais compatible avec toutes les machines.
- **Thingiverse** : <https://www.thingiverse.com/>  
L'une des plus grandes communautés de modèles 3D gratuits, idéale pour les amateurs et les makers.
- **YouMagine** : <https://www.youmagine.com/>  
Plateforme open source mettant l'accent sur le partage et la collaboration autour de modèles 3D.
- **Cults** : <https://cults3d.com/>  
Bibliothèque en ligne proposant des fichiers 3D gratuits et payants, avec un focus sur le design artistique.
- **GrabCAD** : <https://grabcad.com/>  
Plateforme orientée ingénierie, spécialisée dans les modèles 3D industriels et les fichiers techniques.

Et bien d'autres...



# ➤ Récupérer son fichier 3D

## Scanner son objet

### Principe :

- Utilisation d'un scanner 3D pour capturer la forme, les dimensions et les détails d'un objet physique.

### Avantages :

- Permet de recréer des objets existants en version numérique.
- Idéal pour la rétro-conception ou la duplication.

### Exemples d'applications :

- Fabrication de pièces sur mesure.
- Création de modèles pour l'impression 3D.
- Scan corporel pour la médecine ou la mode.



# ➤ Récupérer son fichier 3D

## Scanner son objet

### Précision limitée :

- Les scanners grand public offrent souvent une résolution inférieure à celle requise pour des pièces complexes ou techniques.

### Problèmes avec certaines surfaces :

Difficulté à scanner des objets :

- Transparents (ex. verre).
- Réfléchissants (ex. métal poli).
- Trop sombres ou avec peu de contraste.

### Post-traitement nécessaire :

- Les modèles scannés nécessitent souvent une retouche pour corriger les erreurs ou combler les zones manquantes.

### Coût et accessibilité :

- Les scanners professionnels sont coûteux et nécessitent une expertise pour une utilisation optimale.





# Modélisation 3D

## Les logiciels de modélisation

### Principe :

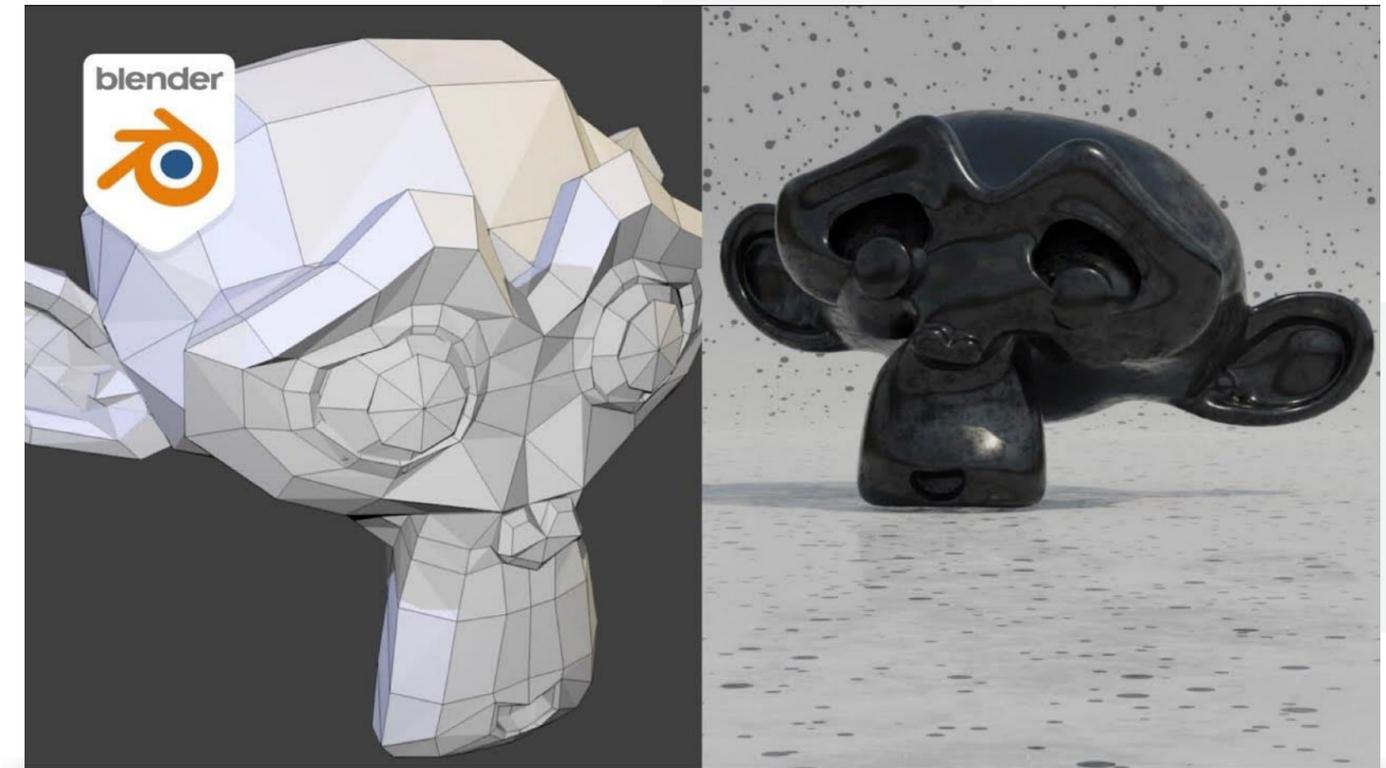
- Les logiciels de modélisation comme Blender permettent de créer des modèles artistiques ou organiques pour divers usages, y compris l'impression 3D.

### Avantages :

- **Flexibilité** : Permet de créer des formes complexes et organiques (personnages, sculptures).
- **Compatibilité** : Export facile en formats courants (STL, OBJ).
- **Gratuité** : Certains logiciels comme Blender sont open source.

### Inconvénients :

- **Courbe d'apprentissage élevée** : Interface complexe pour les débutants.
- **Précision limitée** : Moins adapté pour des pièces mécaniques ou techniques précises.





# Conception Assistée

## Les logiciels de CAO

### Principe :

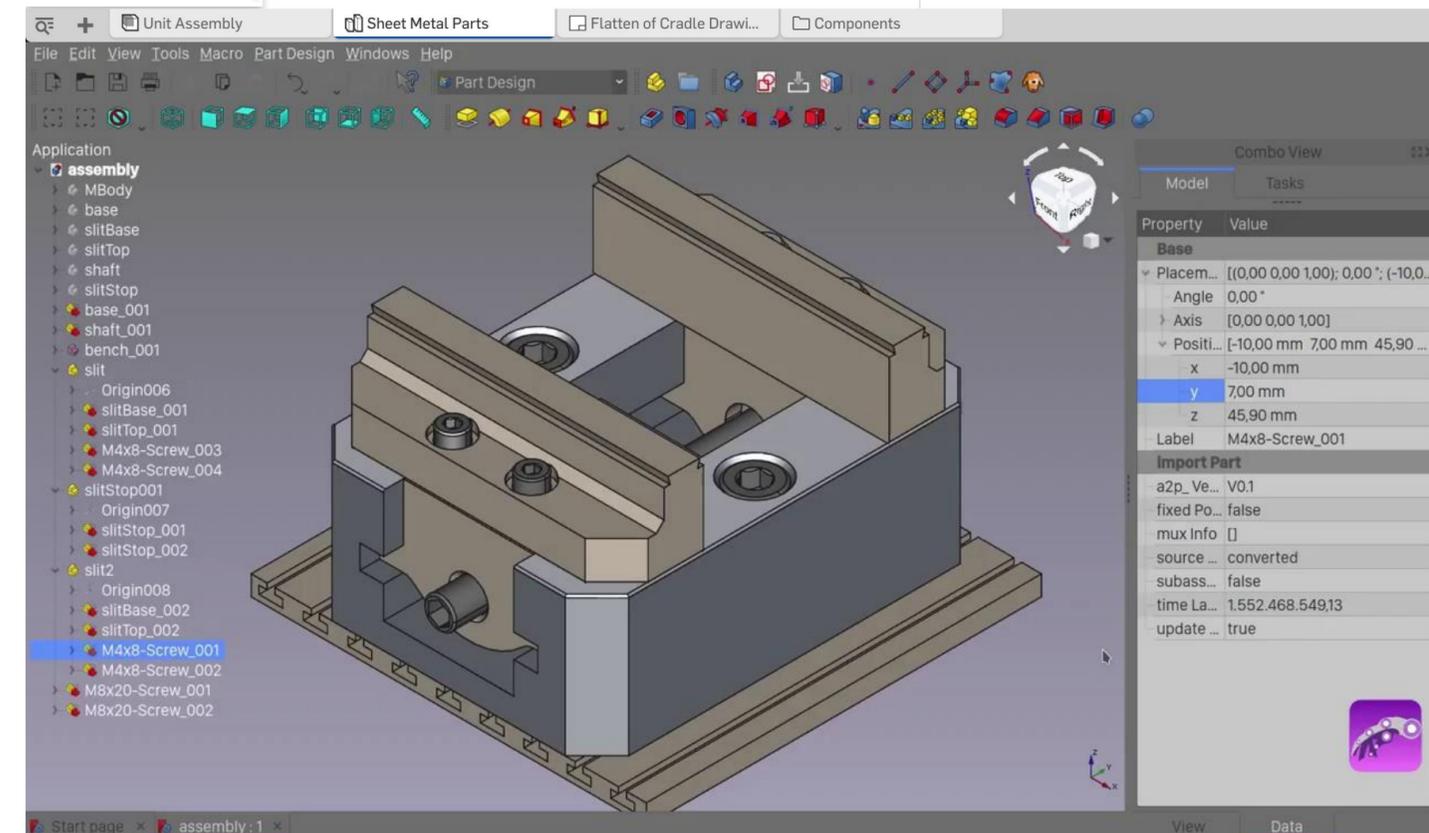
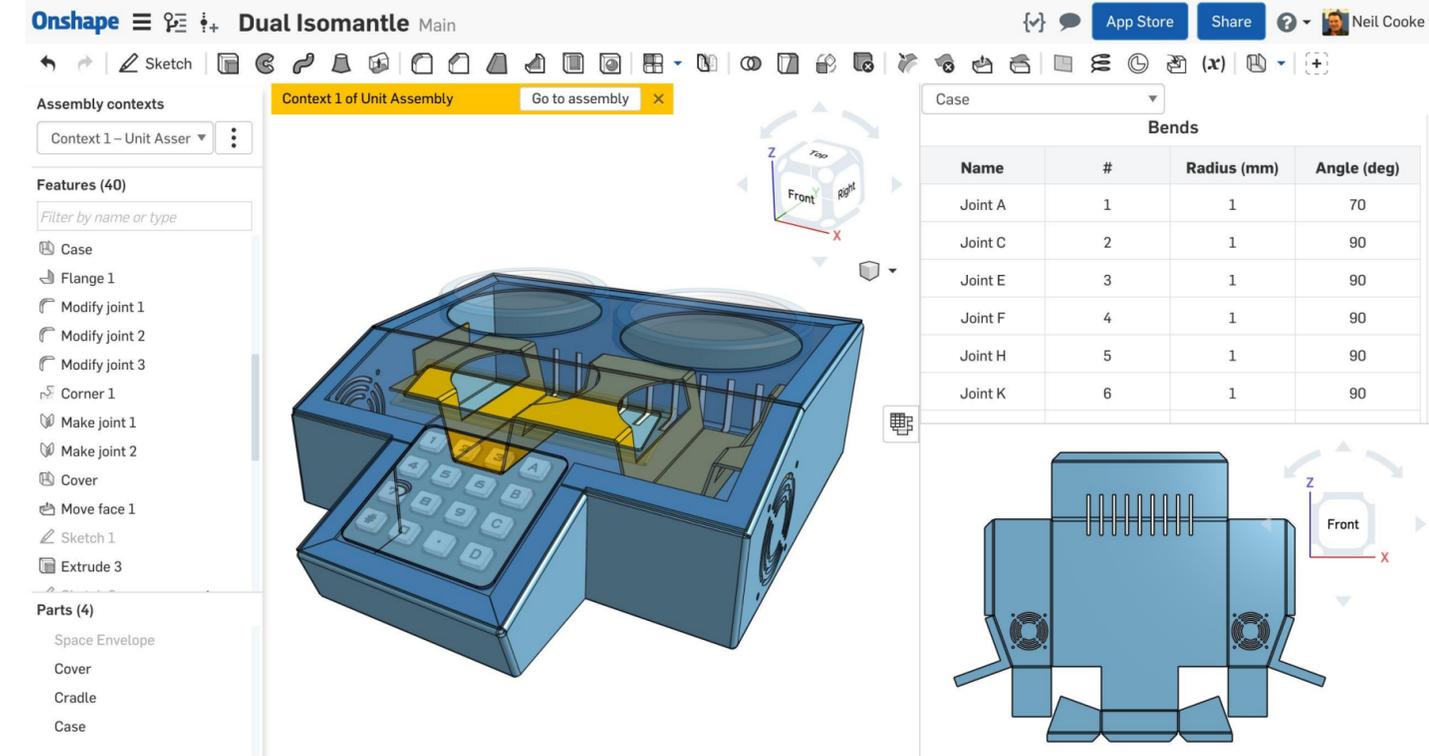
- Les logiciels de CAO permettent de concevoir des objets techniques et précis grâce à une approche paramétrique, où chaque élément est défini par des dimensions et des contraintes ajustables.

### Avantages :

- **Précision** : Idéal pour les pièces mécaniques, techniques ou fonctionnelles.
- **Conception paramétrique** : Modifications faciles et rapides en ajustant les paramètres définis.
- **Compatibilité industrielle** : Essentiel pour l'ingénierie, l'architecture, et l'industrie (ex. : aéronautique, automobile).

### Inconvénients :

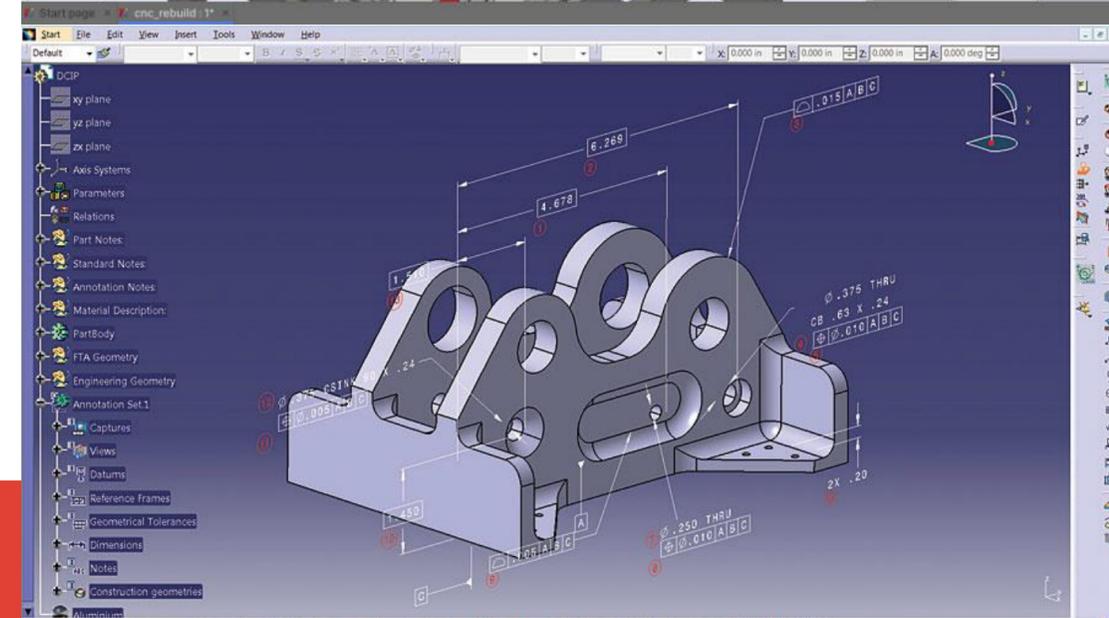
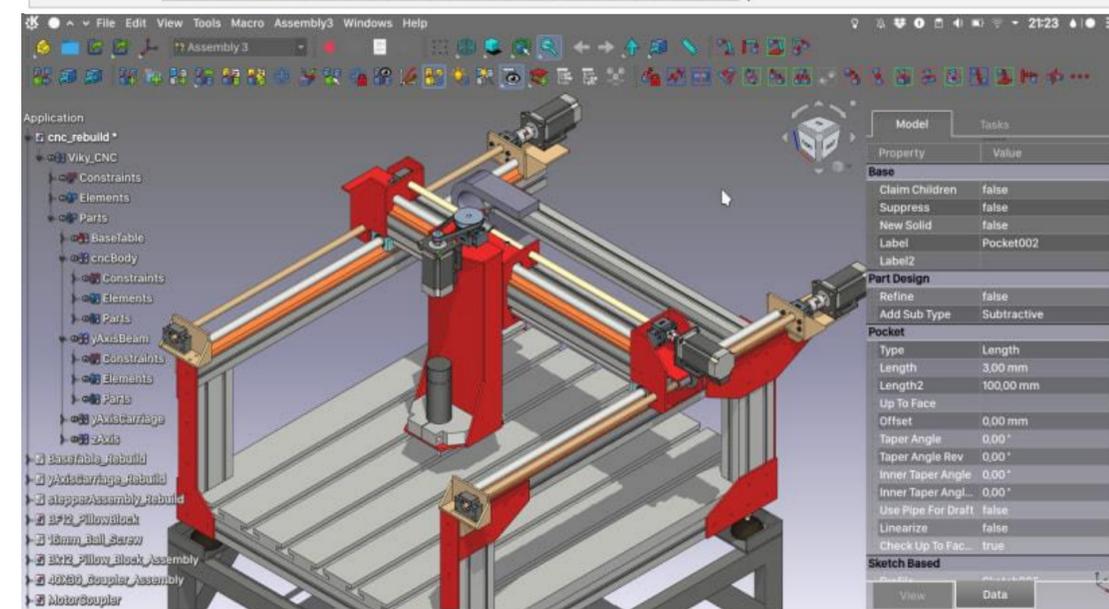
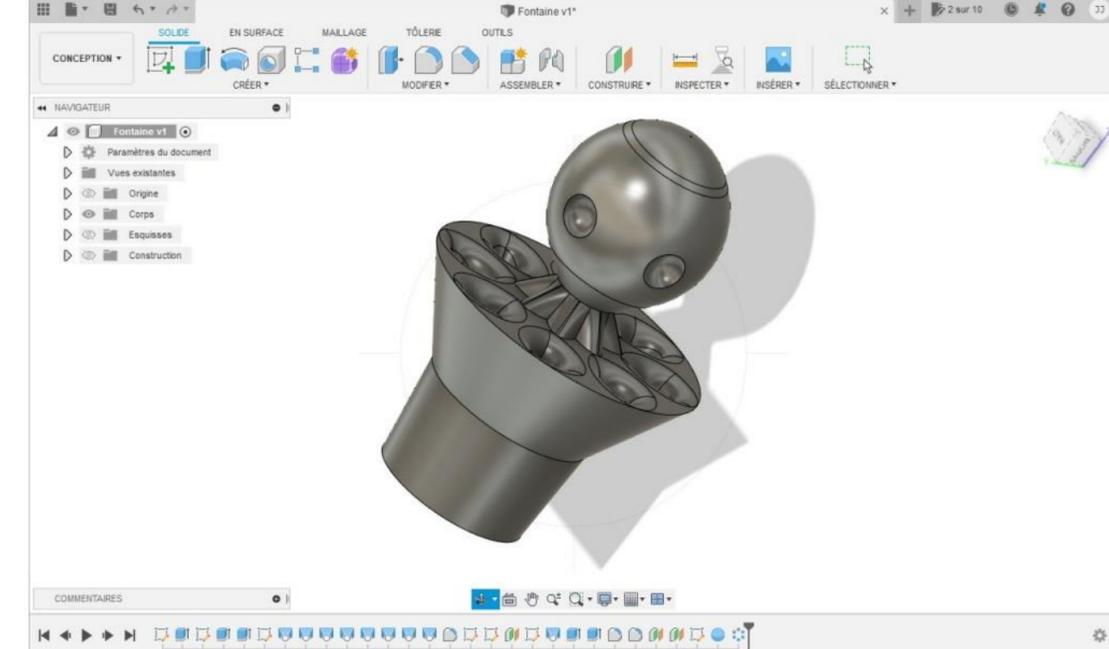
- **Complexité** : Courbe d'apprentissage importante, surtout pour les fonctionnalités avancées.
- **Coût** : Certains logiciels professionnels (ex. SolidWorks) sont onéreux.



# ➤ Conception Assistée

## Les logiciels de CAO

- **SolidWorks** : Logiciel professionnel de CAO paramétrique, utilisé pour la conception mécanique et l'ingénierie.
- **Fusion 360** : Solution tout-en-un de modélisation paramétrique et simulation, gratuite pour les étudiants et makers.
- **FreeCAD** : Logiciel open source pour la conception paramétrique 3D, idéal pour les débutants et les projets personnels.
- **Onshape** : Plateforme de CAO basée sur le cloud, conçue pour la collaboration en temps réel.
- **Catia** : Logiciel avancé de Dassault Systèmes, utilisé dans l'aéronautique, l'automobile et l'architecture.
- **Creo (Pro/ENGINEER)** : Logiciel puissant pour la modélisation 3D et la conception paramétrique, souvent utilisé dans l'industrie manufacturière.
- **Autodesk Inventor** : Logiciel de conception mécanique pour la création de modèles complexes en 3D.
- **Siemens NX** : Outil intégré pour la conception, la simulation et la fabrication, largement utilisé dans l'industrie.
- **Alibre Design** : Logiciel accessible et polyvalent pour la modélisation paramétrique de projets mécaniques et industriels.





# Modélisation par code

## OpenSCAD

### Qu'est-ce que OpenSCAD ?

- Logiciel open source de modélisation 3D basé sur la programmation.
- Permet de créer des modèles à partir de scripts codés, sans interface graphique complexe.

### Avantages :

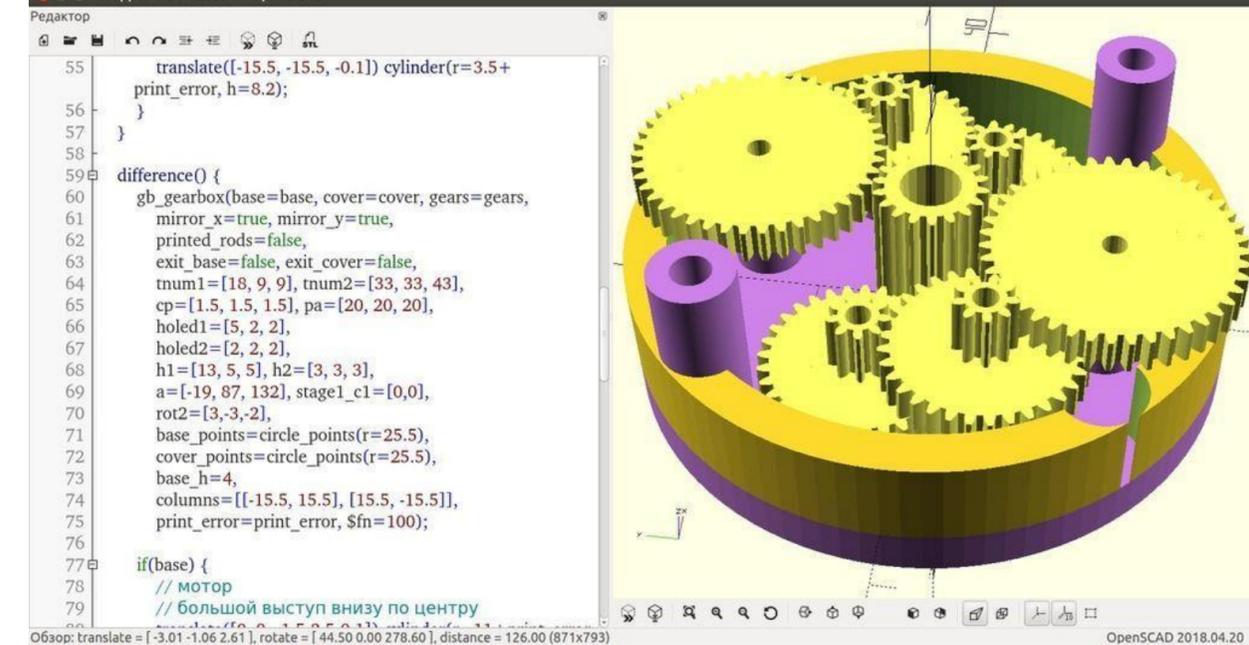
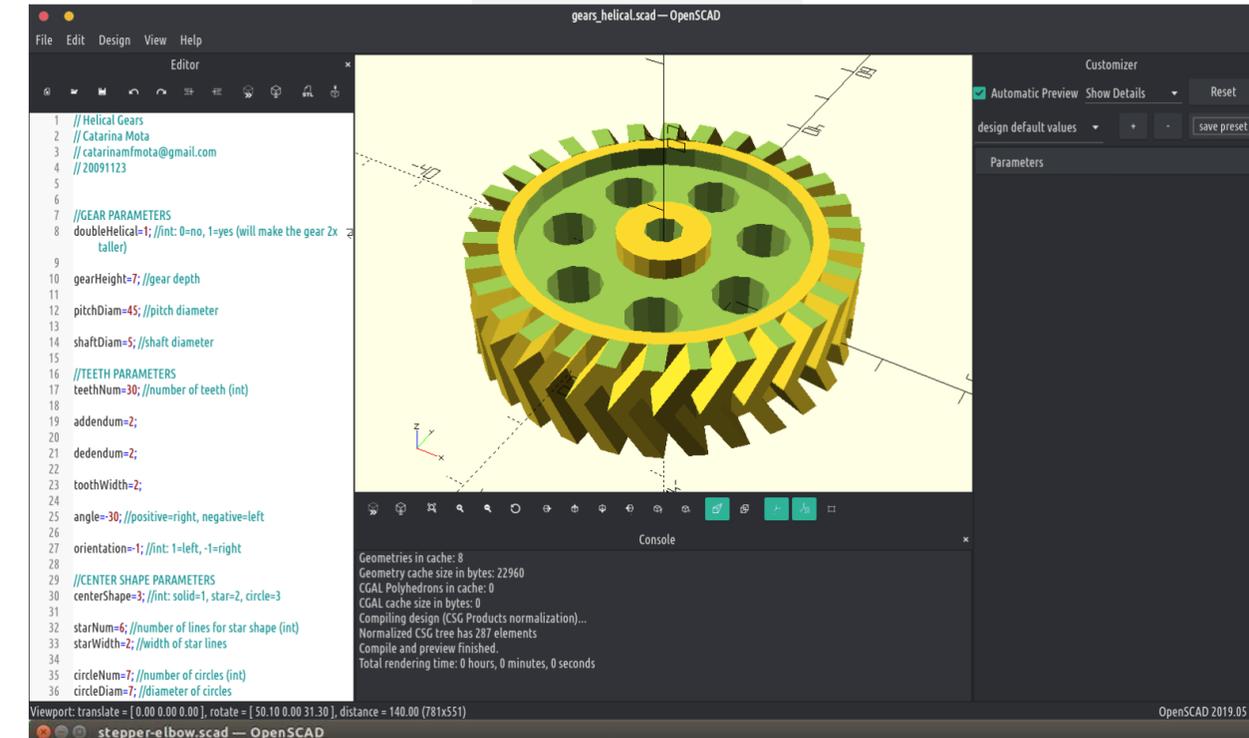
- **Conception paramétrique** : Modifier facilement les modèles en ajustant les variables.
- **Précision** : Idéal pour des pièces techniques ou répétitives.
- **Gratuit et léger** : Accessible à tous les utilisateurs, même avec du matériel modeste.

### Inconvénients :

- **Basé sur le code** : Nécessite des notions de programmation, moins intuitif pour les débutants.
- **Limité pour les formes organiques** : Pas idéal pour les designs artistiques ou complexes.

### Applications :

- Fabrication de pièces techniques.
- Prototypes avec géométries simples et paramétriques.
- Automatisation de modèles répétitifs.



# ➤ Modélisation par IA

## Rodin

### Qu'est-ce que Rodin ?

- Rodin est un outil basé sur l'IA qui permet de créer des modèles 3D directement à partir de descriptions textuelles ou d'autres données d'entrée.

### Caractéristiques :

- **Création rapide et intuitive** : Pas besoin de compétences en modélisation, l'IA génère des modèles complexes en quelques étapes.
- **Adapté aux débutants et experts** : Idéal pour des concepts artistiques ou des prototypes fonctionnels.
- **Compatibilité** : Export des modèles dans des formats courants (STL, OBJ) pour l'impression 3D ou d'autres applications.

### Limites :

- Les détails complexes peuvent être imparfaits (coiffures, expressions).
- Les modèles générés doivent souvent être retravaillés pour un usage optimal.
- La qualité du modèle dépend de la clarté de l'entrée textuelle.



# L'Export

Les fichiers d'export



# Les fichiers d'export

## Les plus anciens

### STL (Standard Tessellation Language)

- **Description** : Format le plus courant, décrit la géométrie 3D en triangles.
- **Avantages** : Simple, universel, compatible avec la plupart des logiciels et imprimantes.
- **Limites** : Pas d'informations sur la couleur, les textures ou les matériaux.

### OBJ (Object File)

- **Description** : Format polyvalent incluant les géométries, couleurs et textures.
- **Avantages** : Idéal pour les modèles multicolores ou complexes.
- **Limites** : Fichiers souvent plus volumineux.

# Le 3MF (3D Manufacturing Format)

## Un format qui gagne en popularité

### Stockage d'informations complètes :

Contrairement au STL, qui ne contient que la géométrie, le 3MF peut inclure :

- Couleurs et textures.
- Propriétés des matériaux (densité, élasticité, etc.).
- Paramètres d'impression (ex. : orientation, épaisseur de couche, supports).

### Format compact :

Le 3MF est plus léger que les fichiers OBJ ou STL + fichiers annexes (textures, etc.).

### Standard ouvert et universel :

- Développé par le 3MF Consortium, soutenu par des acteurs majeurs (Microsoft, Autodesk, Stratasys, Ultimaker, etc.).
- Adopté par des logiciels comme Cura, PrusaSlicer, et des plateformes comme Thingiverse.

### Interopérabilité accrue :

Permet de transférer facilement un projet complet entre différents logiciels ou imprimantes sans perdre d'informations.

# Le Slicer

Les logiciels

# Le Slicer

## Présentation

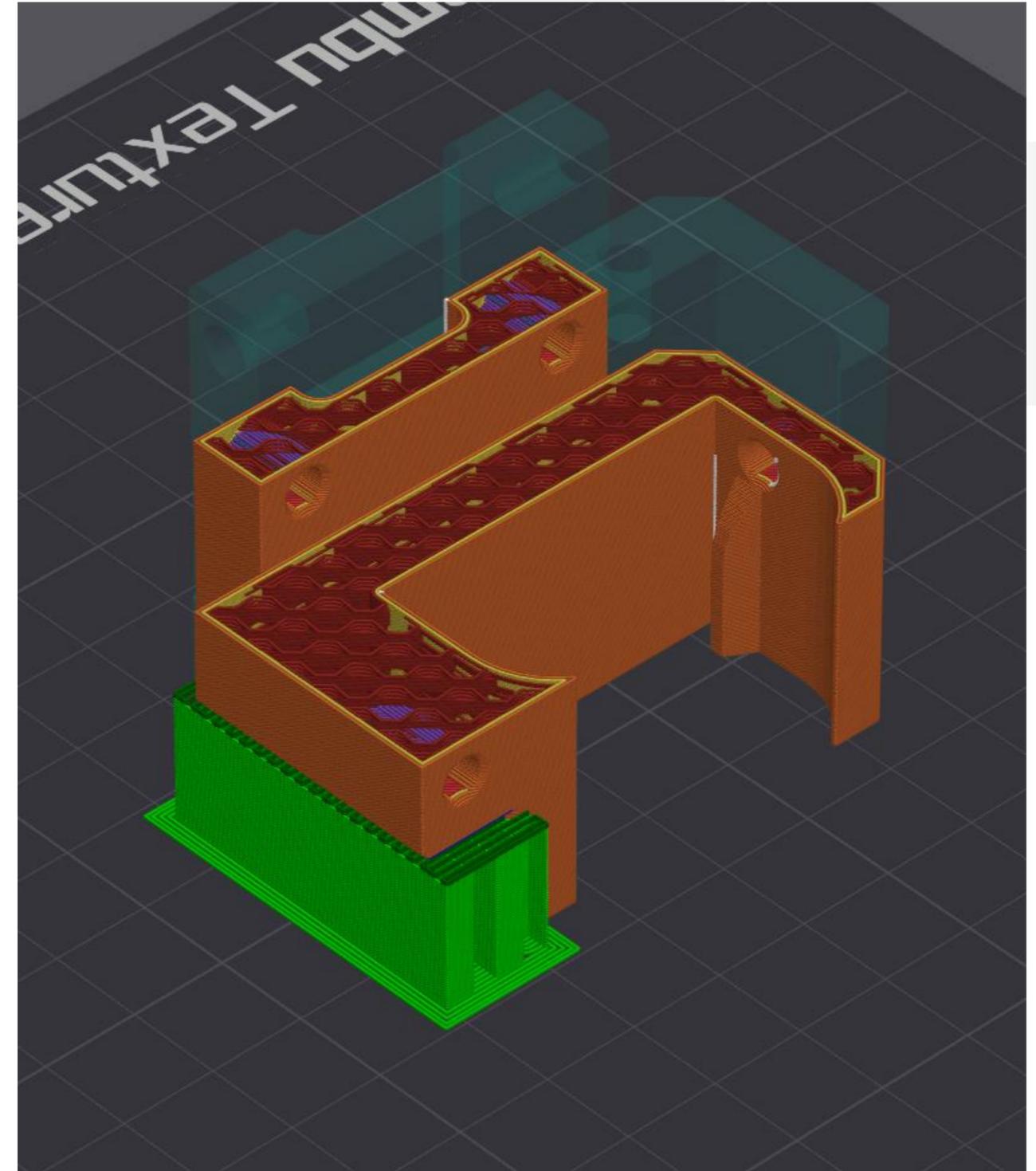
### Définition :

Un slicer est un logiciel qui convertit un modèle 3D (ex. STL, OBJ) en G-code, un ensemble d'instructions que l'imprimante 3D utilise pour fabriquer l'objet.

### Fonctionnement :

1. **Chargement du modèle 3D :** Importe un fichier comme STL ou 3MF dans le slicer.
2. **Découpe en couches :** Le slicer divise le modèle en couches horizontales.
3. **Génération des instructions :** Il crée le G-code, contenant :
  - Trajectoires de la tête d'impression.
  - Paramètres d'impression (température, vitesse, supports, etc.).

Le slicer est un outil essentiel pour préparer vos impressions 3D, reliant le modèle numérique à l'imprimante.





# Le Slicer

## Les différents logiciels

### Par Compatibilité avec des imprimantes spécifiques

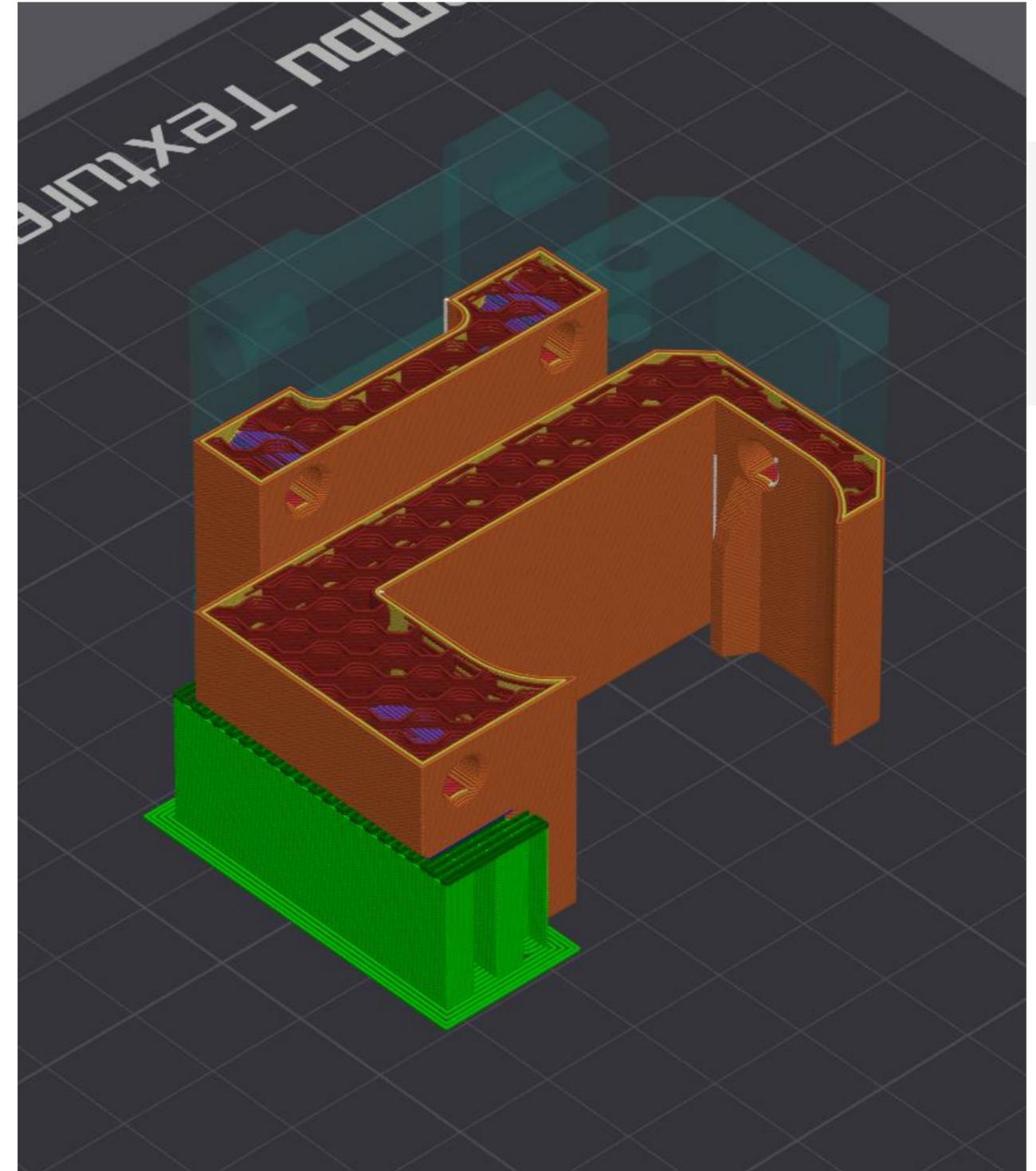
- Multimarques/Open Source : Cura, PrusaSlicer, SuperSlicer, OrcaSlicer.

### Marques spécifiques :

- **BambuLab** : Bambu Studio, OrcaSlicer.
- **Creality** : Creality Slicer (modifié à partir de Cura).
- **Raise3D** : IdeaMaker.
- **MakerBot** : MakerBot Print.
- **FlashForge** : FlashPrint.
- (...)

### Par Types d'Impression :

- **FDM (Filament)** : Cura, PrusaSlicer, Simplify3D, IdeaMaker, OrcaSlicer, SuperSlicer.
- **SLA/DLP (Résine)** : ChiTuBox, Lychee Slicer.
- (...)





### Qu'est-ce que Cura ?:

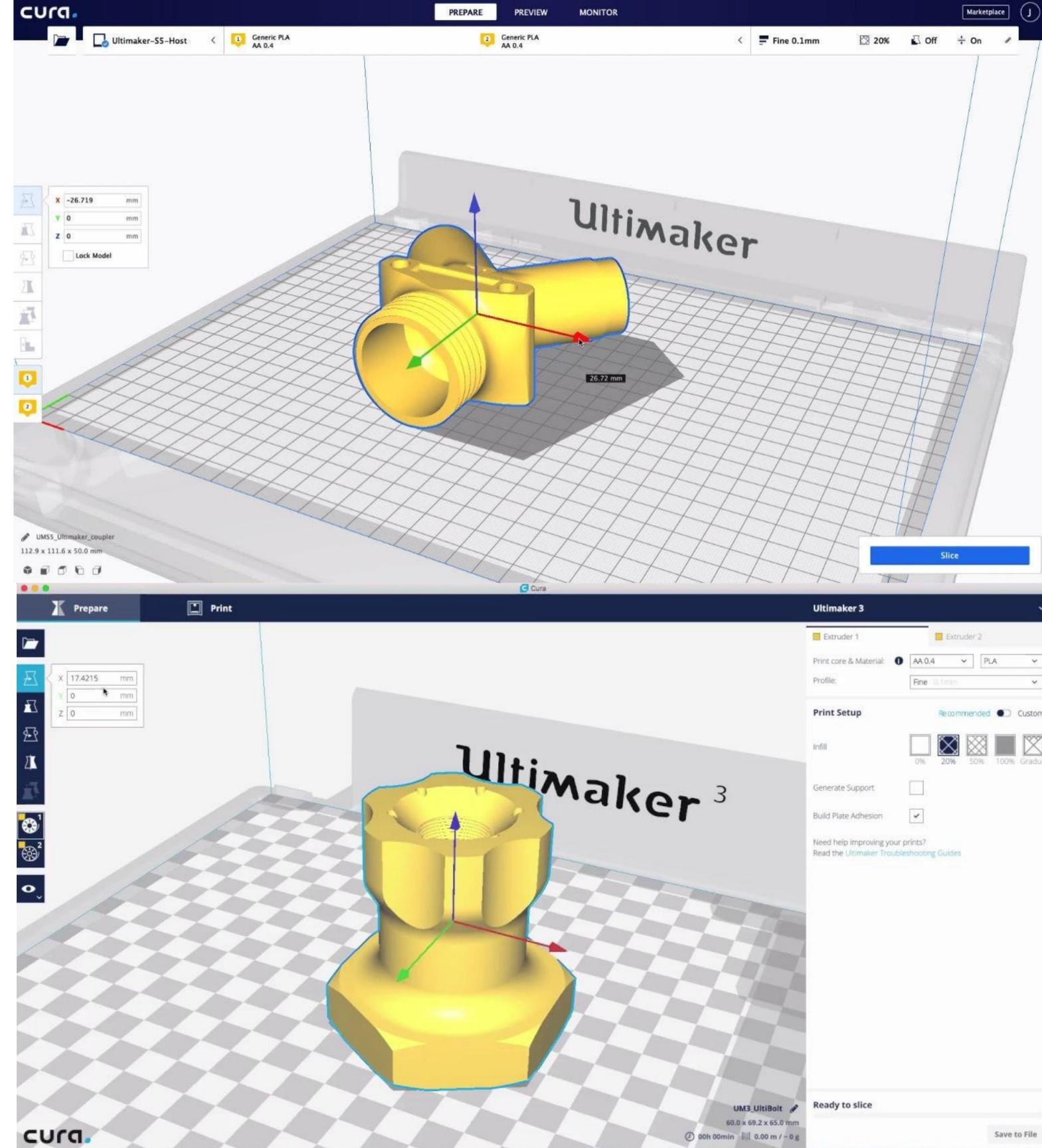
- Slicer open source développé par Ultimaker, compatible avec de nombreuses imprimantes 3D.

### Avantages:

- Gratuit, facile à utiliser, supporte de nombreux paramètres avancés et plugins.

### Inconvénients:

- Peut être gourmand en ressources, interface simple pour les débutants.



# Prusa Slicer

Prusa research

## Qu'est-ce que PrusaSlicer ?:

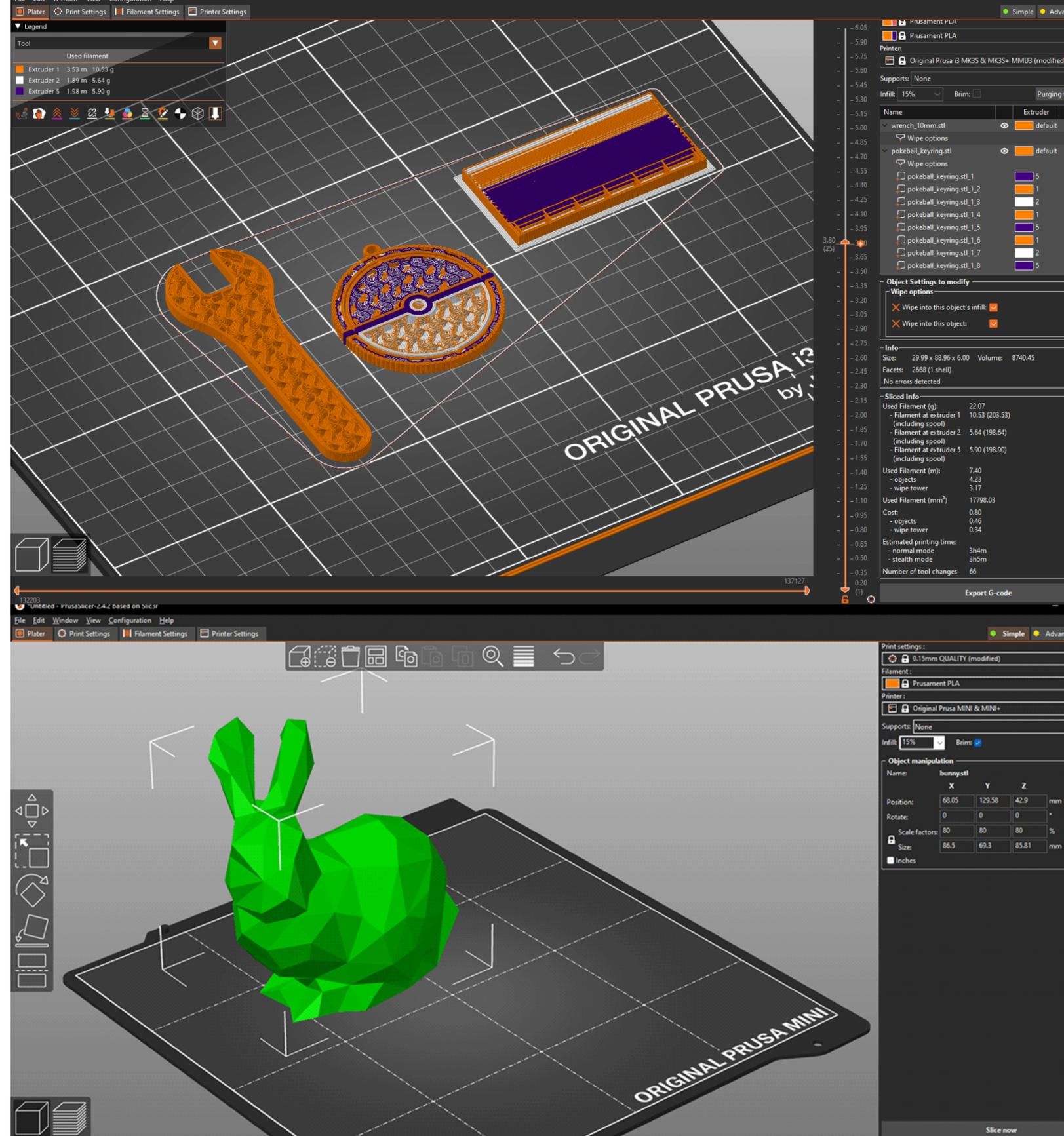
- Slicer basé sur Slic3r, optimisé pour les imprimantes Prusa mais compatible avec d'autres marques.

## Avantages:

- Open source, interface intuitive, paramètres avancés pour des impressions optimisées.

## Inconvénients:

- Interface légèrement différente des standards, peut nécessiter un temps d'adaptation.



# Bambu Slicer

## BambuLab

### Qu'est-ce que Bambu Studio ?:

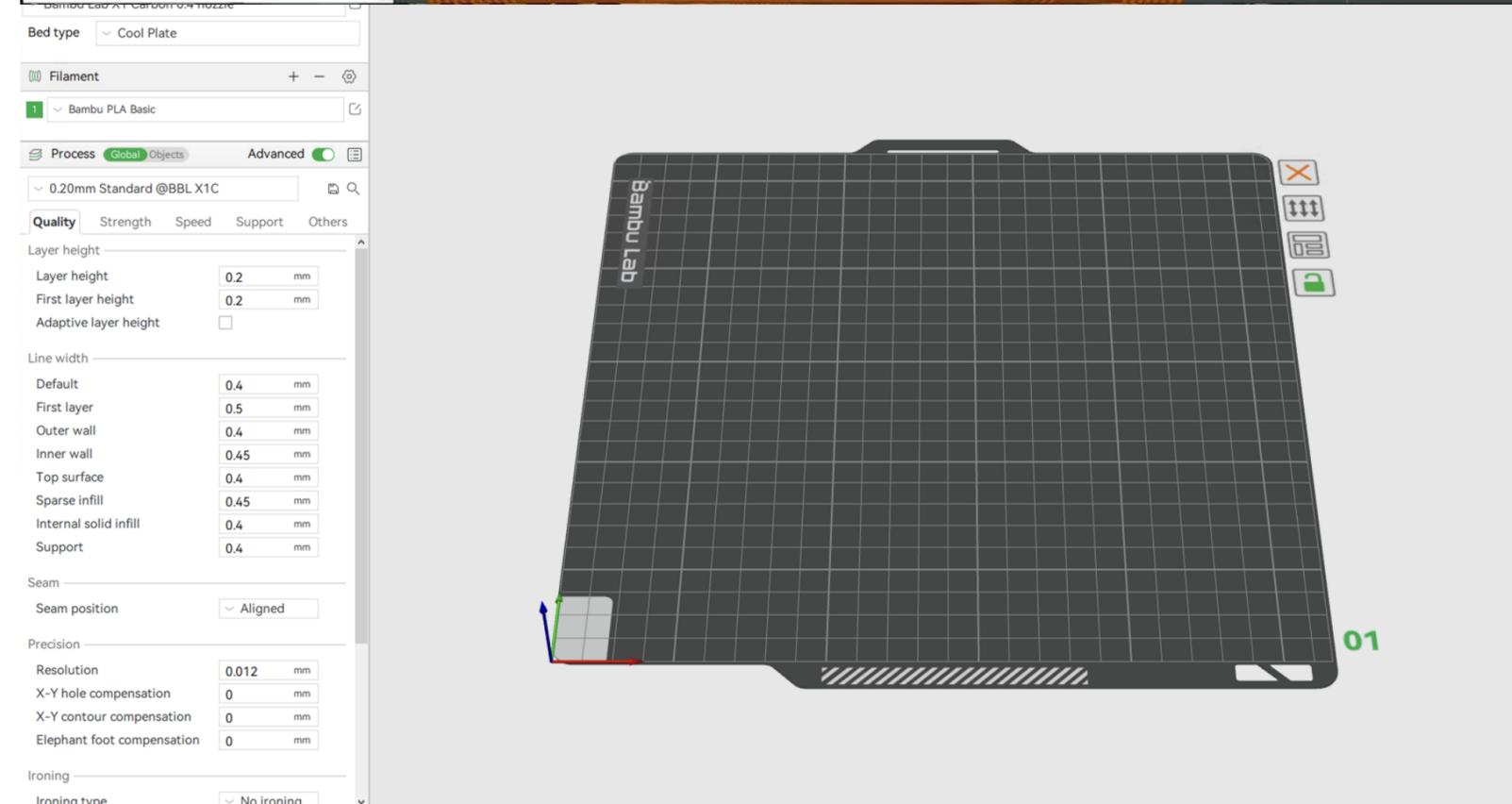
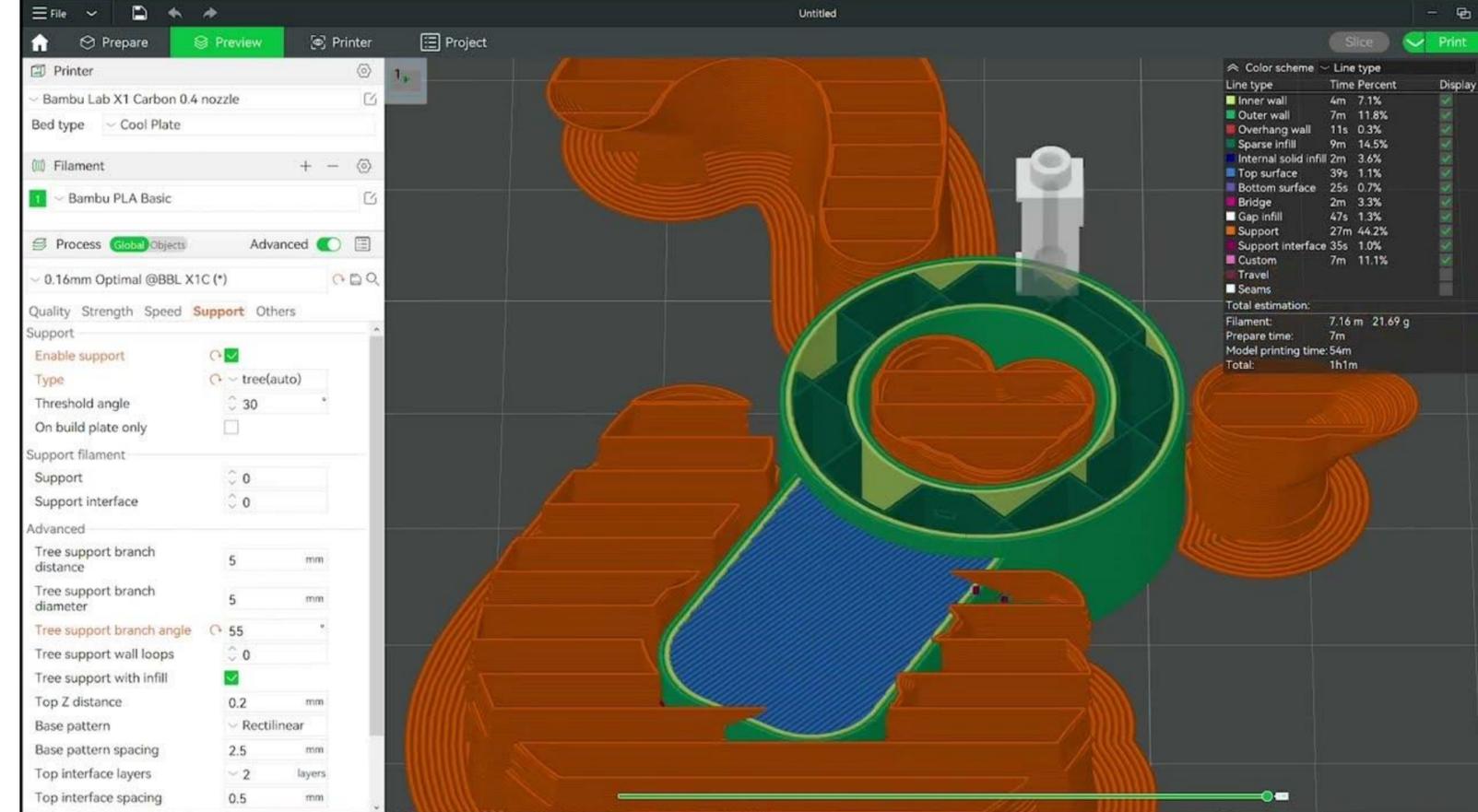
- Slicer développé pour les imprimantes Bambu Lab, offrant des fonctionnalités spécifiques pour ces machines.

### Avantages:

- Intégré avec les imprimantes Bambu, gestion avancée des couleurs et des matériaux.

### Inconvénients:

- Principalement conçu pour l'écosystème Bambu, support limité pour d'autres imprimantes.



# Orca Slicer

## Slicer multi-marque OpenSource

### Qu'est-ce qu'OrcaSlicer ?:

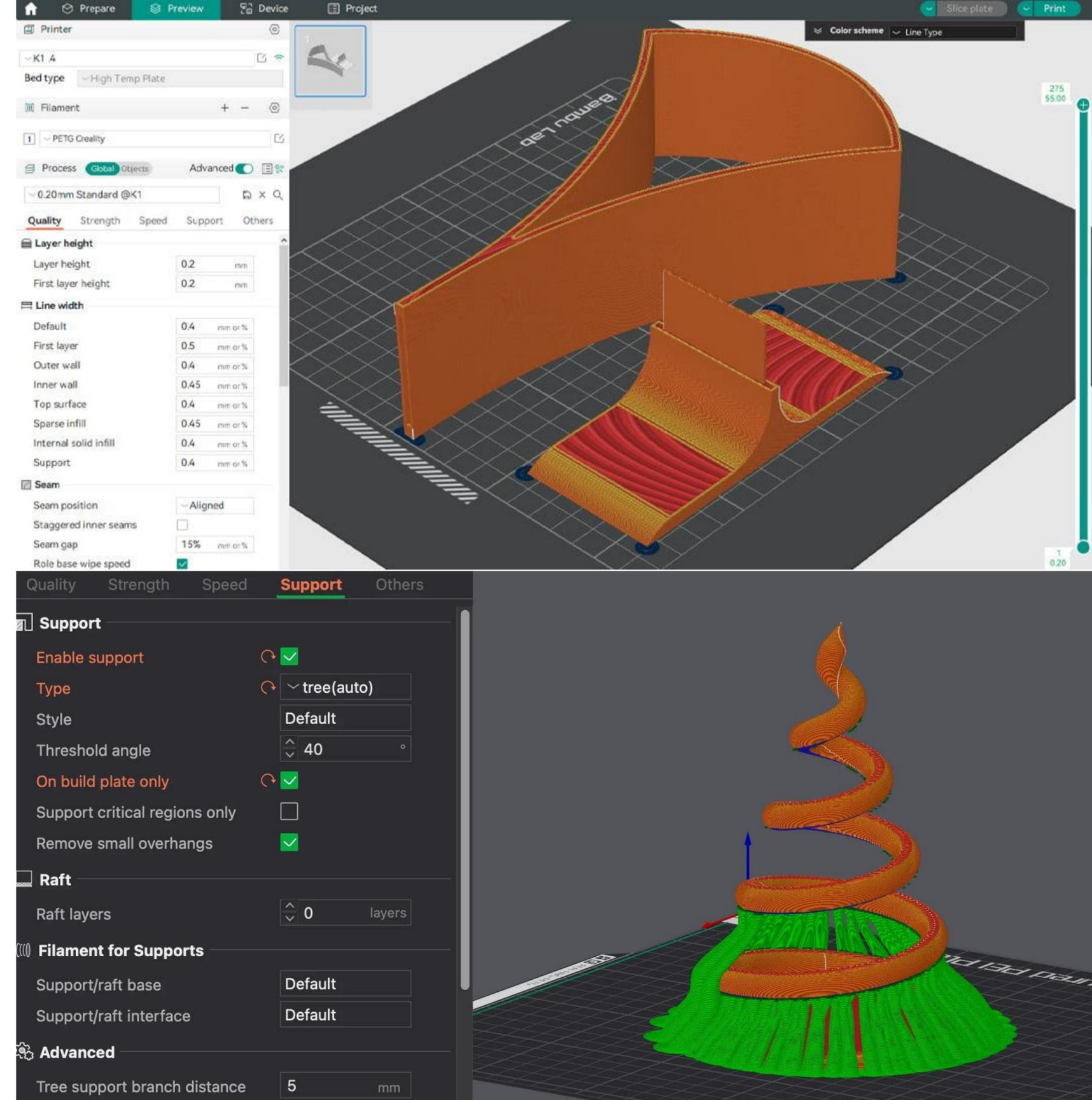
- Fork de Bambu Studio, apportant des fonctionnalités supplémentaires et une compatibilité élargie.

### Avantages:

- Support multi-marques, communauté active, amélioration continue des fonctionnalités.

### Inconvénients:

- Moins connu, peut manquer de support officiel.

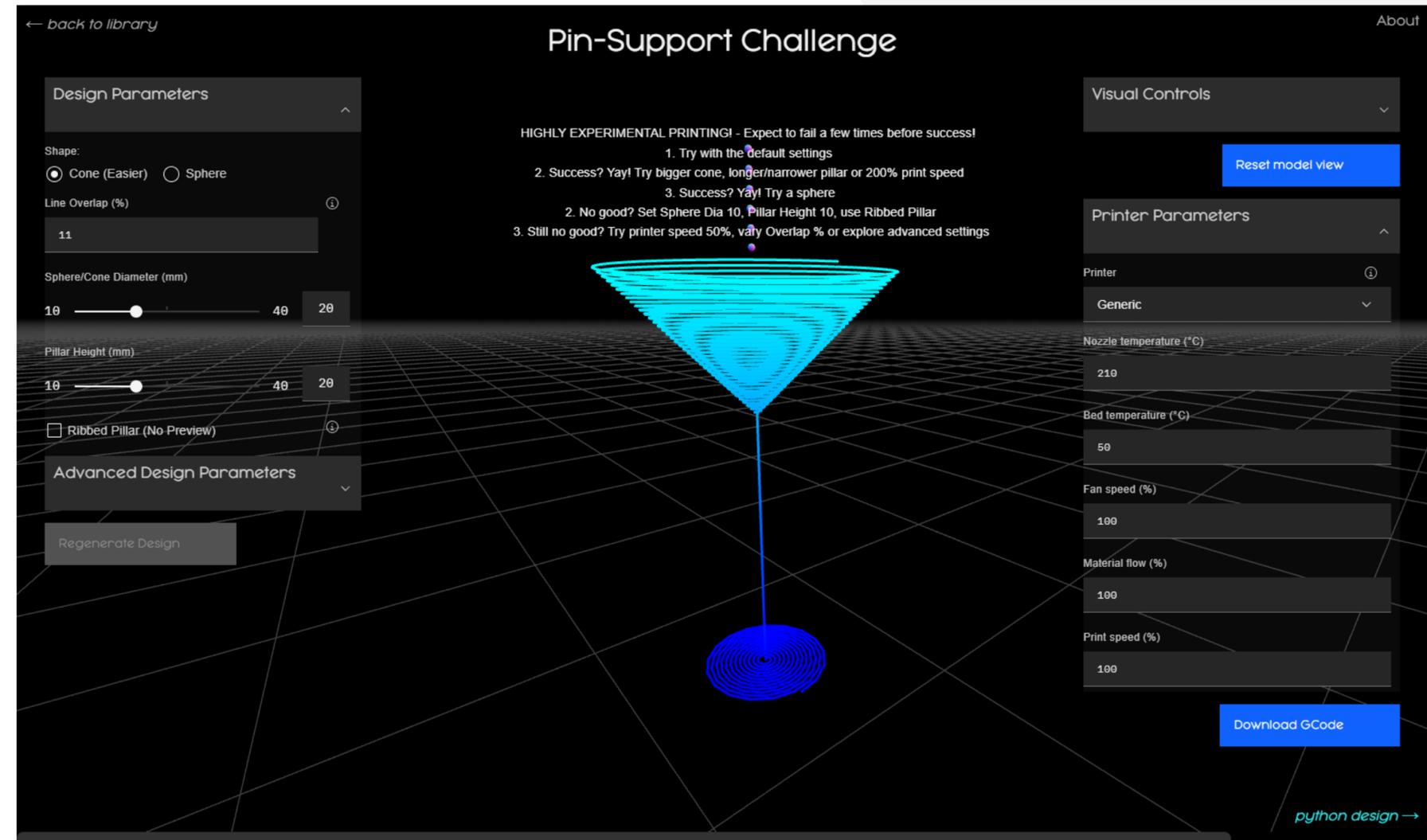




# Full Control XYZ

L'anomalie... <https://fullcontrol.xyz>

- **Open source** : Projet disponible sur GitHub, conçu pour repousser les limites des slicers traditionnels.
- **Fonctionnalité clé** : Permet la génération manuelle et avancée de structures directement en G-code, sans nécessiter un modèle 3D intermédiaire.
- **Contrôle total sur l'impression** : Les utilisateurs peuvent créer des structures paramétriques complexes, comme des treillis, des objets mathématiques ou des géométries sur mesure.

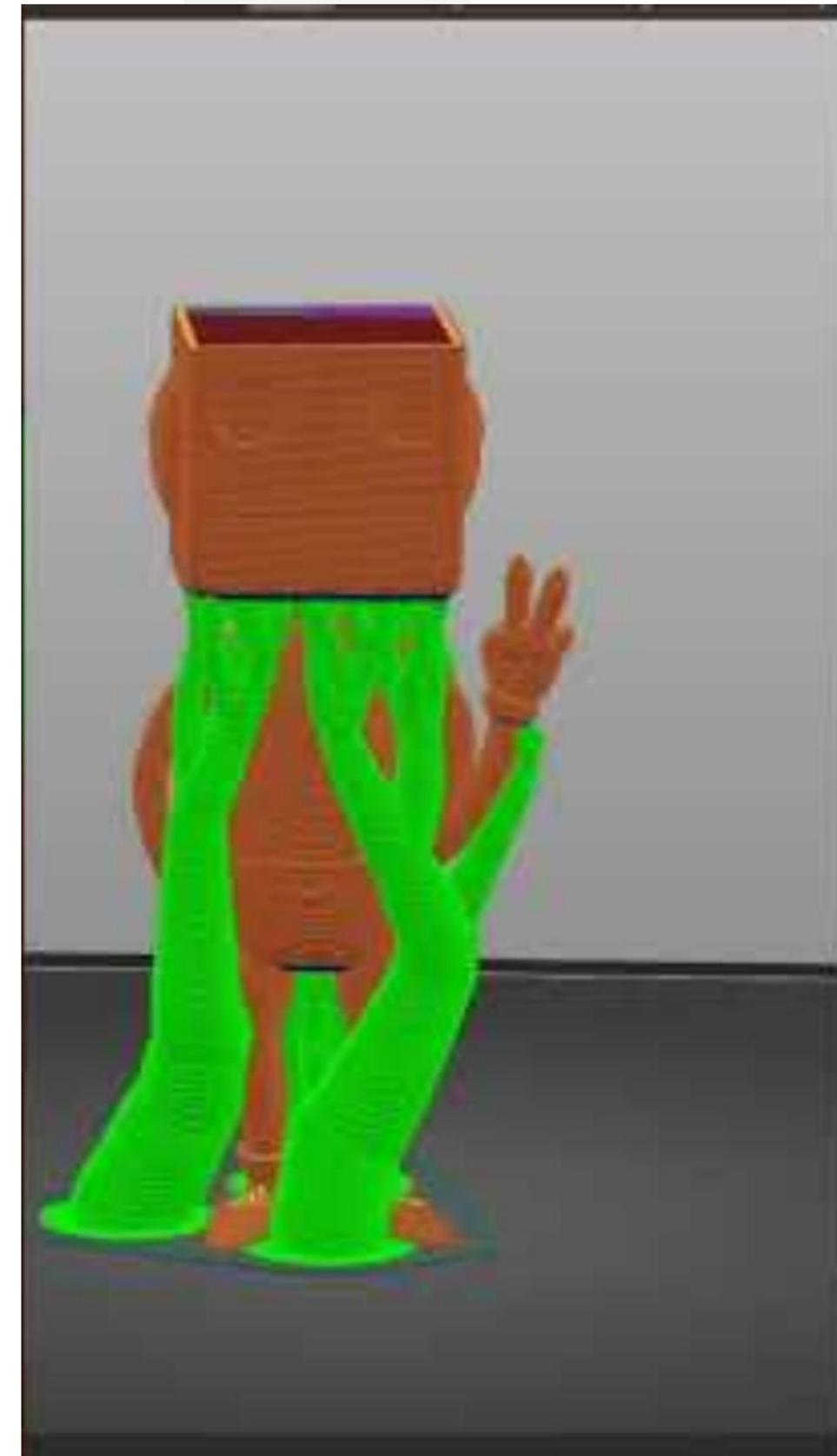




# Full Control XYZ

L'anomalie... <https://fullcontrol.xyz>

- **Exploration de nouveaux usages** : Idéal pour la recherche, le prototypage, ou les applications nécessitant une précision extrême (bio-impression, structures légères).
- **Indépendance vis-à-vis des formats traditionnels** : Plus besoin de fichiers STL ou OBJ, tout est défini directement dans le slicer.
- **Évolution des slicers** : Introduit une approche programmatique et personnalisable, s'éloignant des slicers conventionnels qui s'appuient sur des modèles figés.
- FullControl.xyz ouvre de nouvelles perspectives pour les makers et chercheurs en permettant une maîtrise inédite de la fabrication additive.



# Le Slicer

Les réglages de base

# Le Slicer

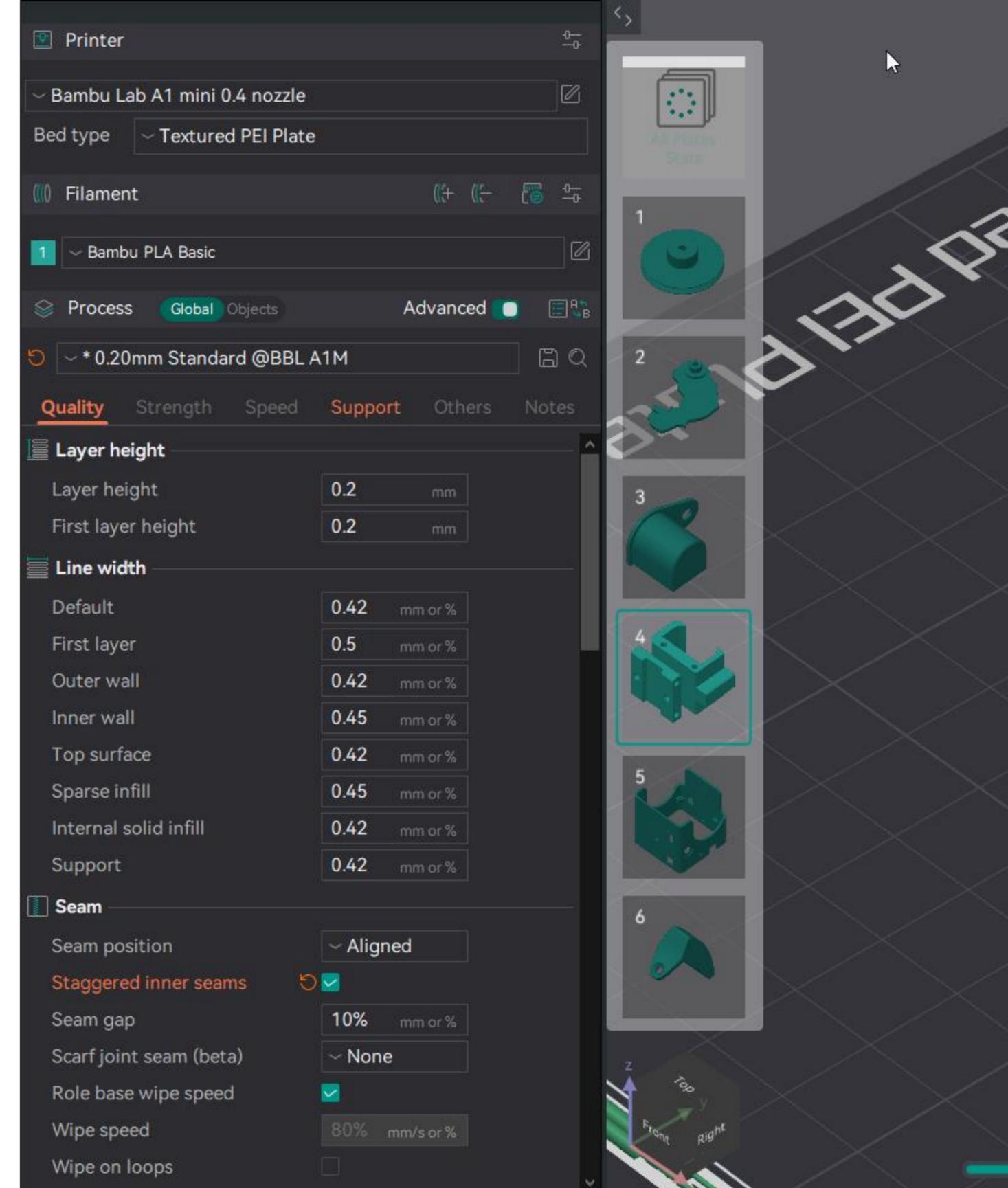
## Les réglages de base

### Pourquoi les réglages de base sont importants ?

- **Qualité d'impression** : Optimiser la précision, la solidité, et les finitions des objets imprimés.
- **Efficacité** : Réduire les temps d'impression tout en économisant du filament.
- **Adhérence et stabilité** : Garantir que l'objet reste bien fixé au plateau et ne se déforme pas.

### Principaux réglages abordés :

- Température de la buse et du plateau.
- Hauteur de couche (résolution).
- Remplissage et motifs.
- Supports pour les surplombs.
- Adhérence au plateau (bordures, jupe, radeau).



# Températures d'impression

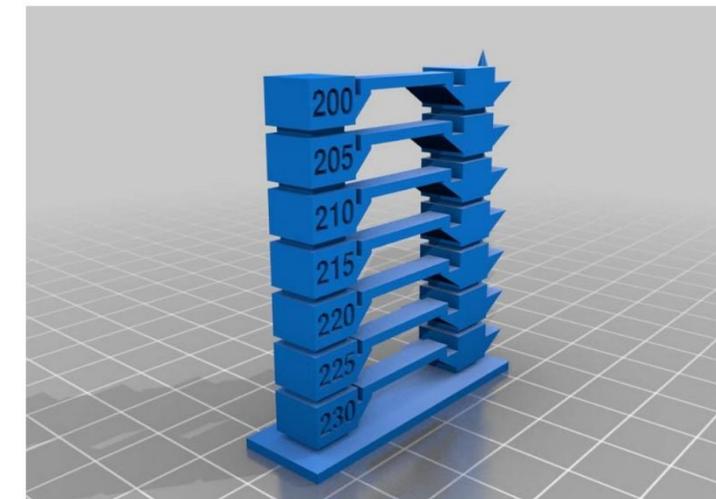
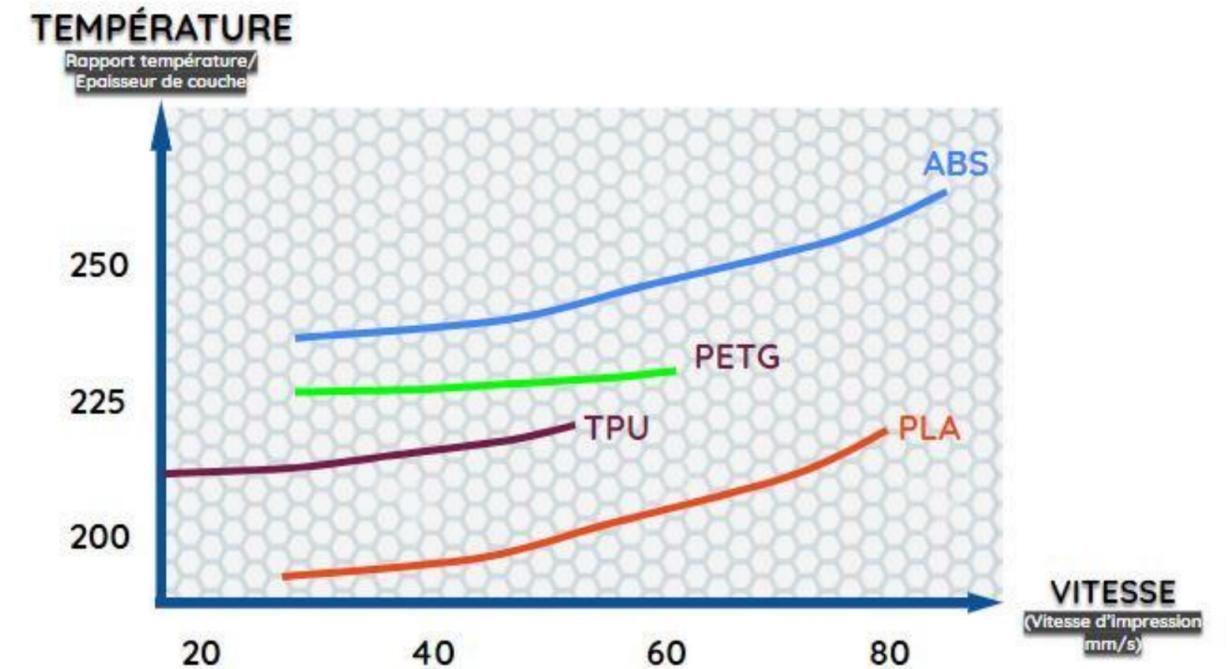
## Les réglages de base

### Température du filament:

- Chaque fabricant indique une plage optimale (200-240°C pour la buse).

### Température du plateau:

- Recommandée entre 60 et 100°C selon le filament. Respectez les valeurs pour éviter les déformations





# Hauteur de couche

## Les réglages de base

### Impact sur la qualité:

- Hauteurs basses (0,1 mm) = plus de détails, mais impression lente.
- Hauteurs élevées (0,2 mm) = impression rapide, mais moins précise.

### Configuration variable:

- Certains slicers permettent d'ajuster la hauteur selon les zones pour optimiser le temps et la qualité.



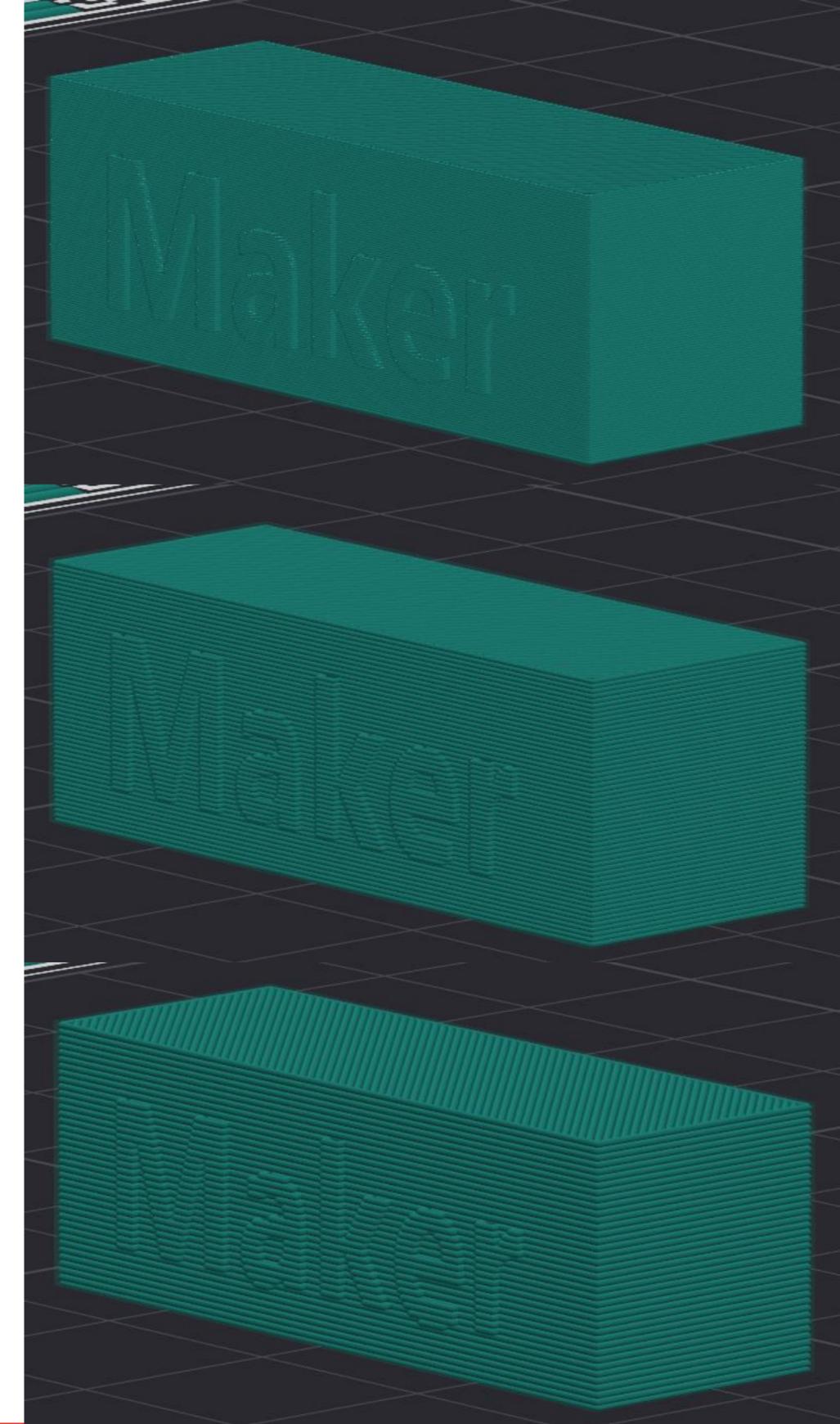
 0,2 mm  
 18 minutes



 0,1 mm  
 33 minutes



 0,05 mm  
 75 minutes



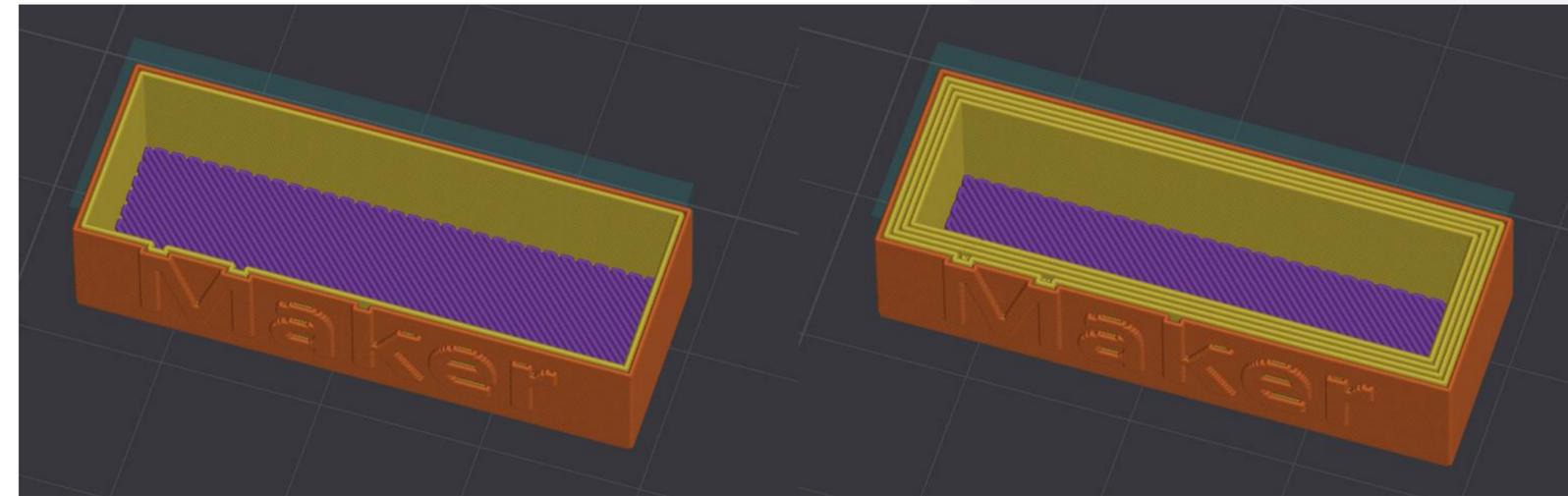


# Parois et couches solides

## Les réglages de base

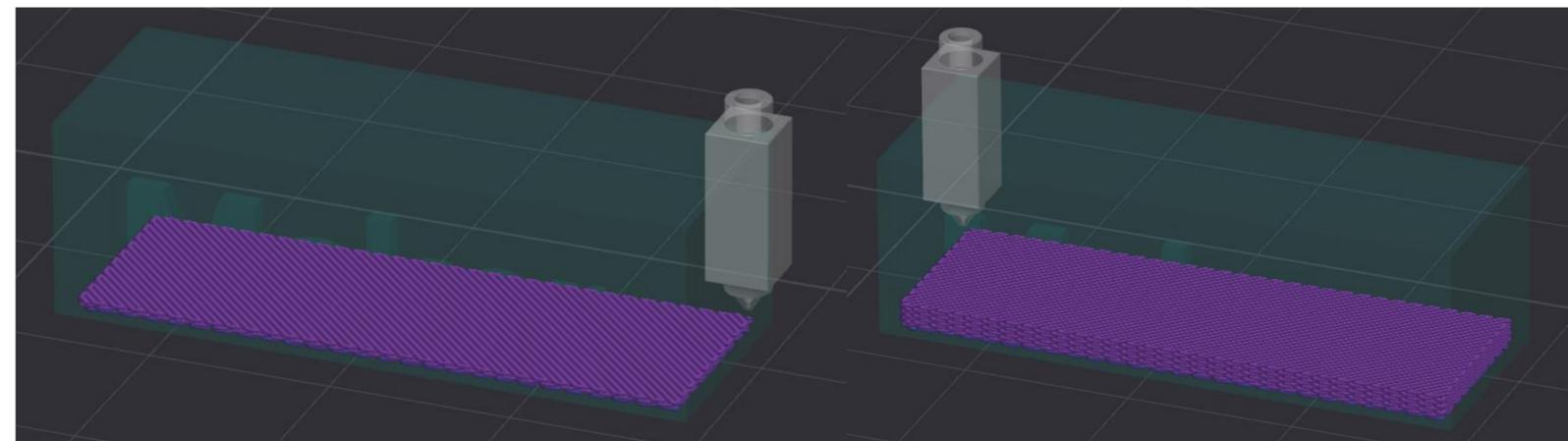
### Parois verticales (Périmètres):

- Nombre de périmètres x diamètre de la buse = épaisseur des murs.



### Couches solides:

- Déterminez le nombre de couches solides en haut et en bas (généralement 3-5). Plus de couches = meilleure résistance



# ➤ Remplissage et motifs

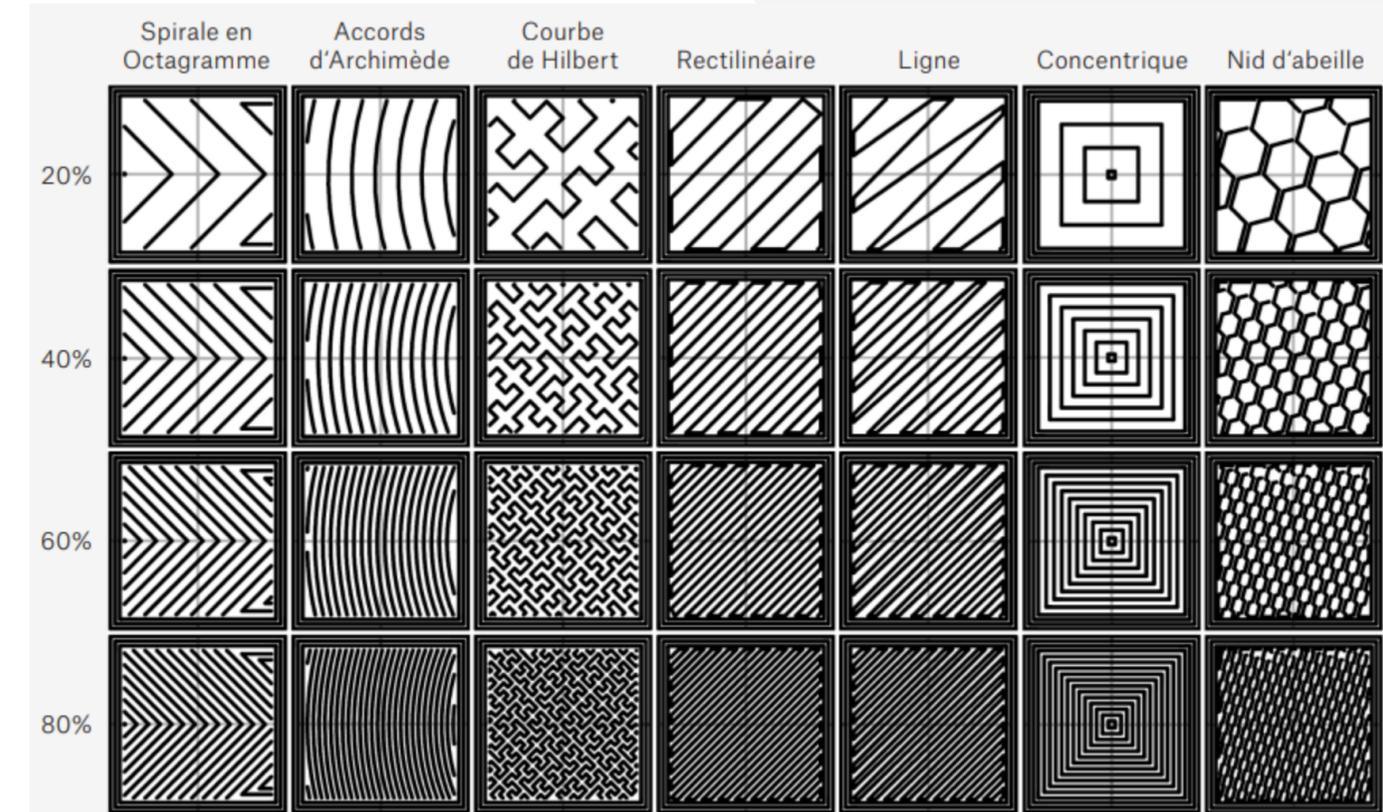
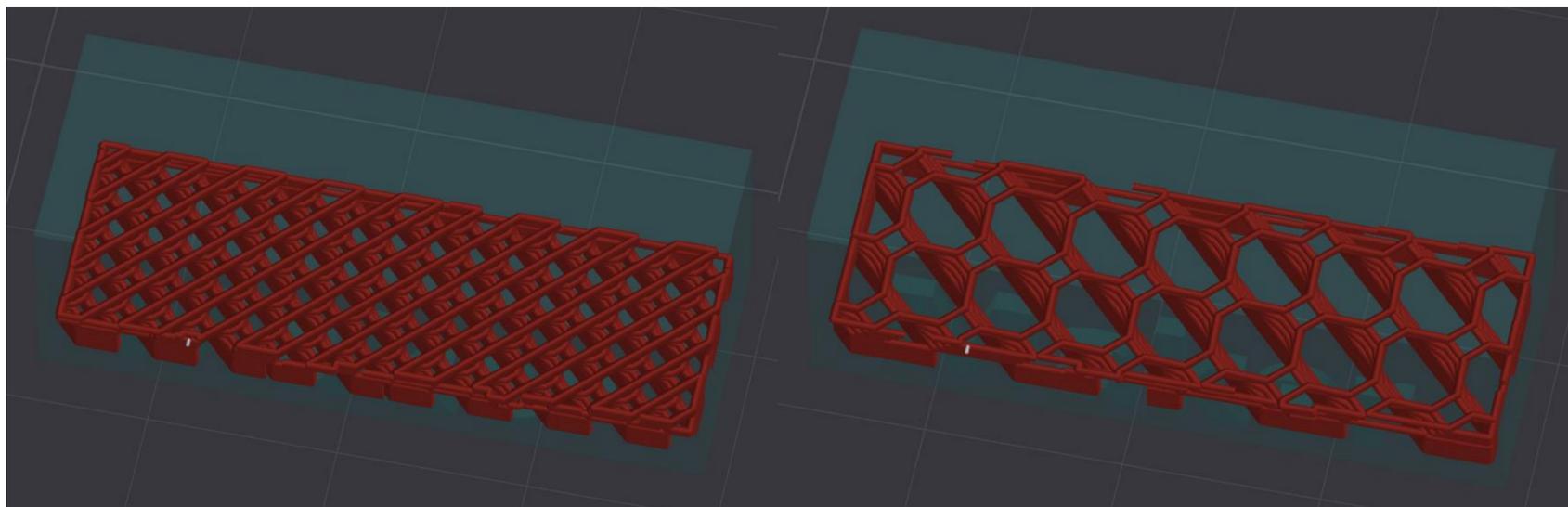
## Les réglages de base

### Pourcentage de remplissage:

10-20% pour la plupart des impressions. Augmentez pour des objets plus résistants.

### Motifs de remplissage:

Choisissez des motifs comme nid d'abeille ou lignes pour ajuster solidité et temps d'impression.



# ➤ Supports

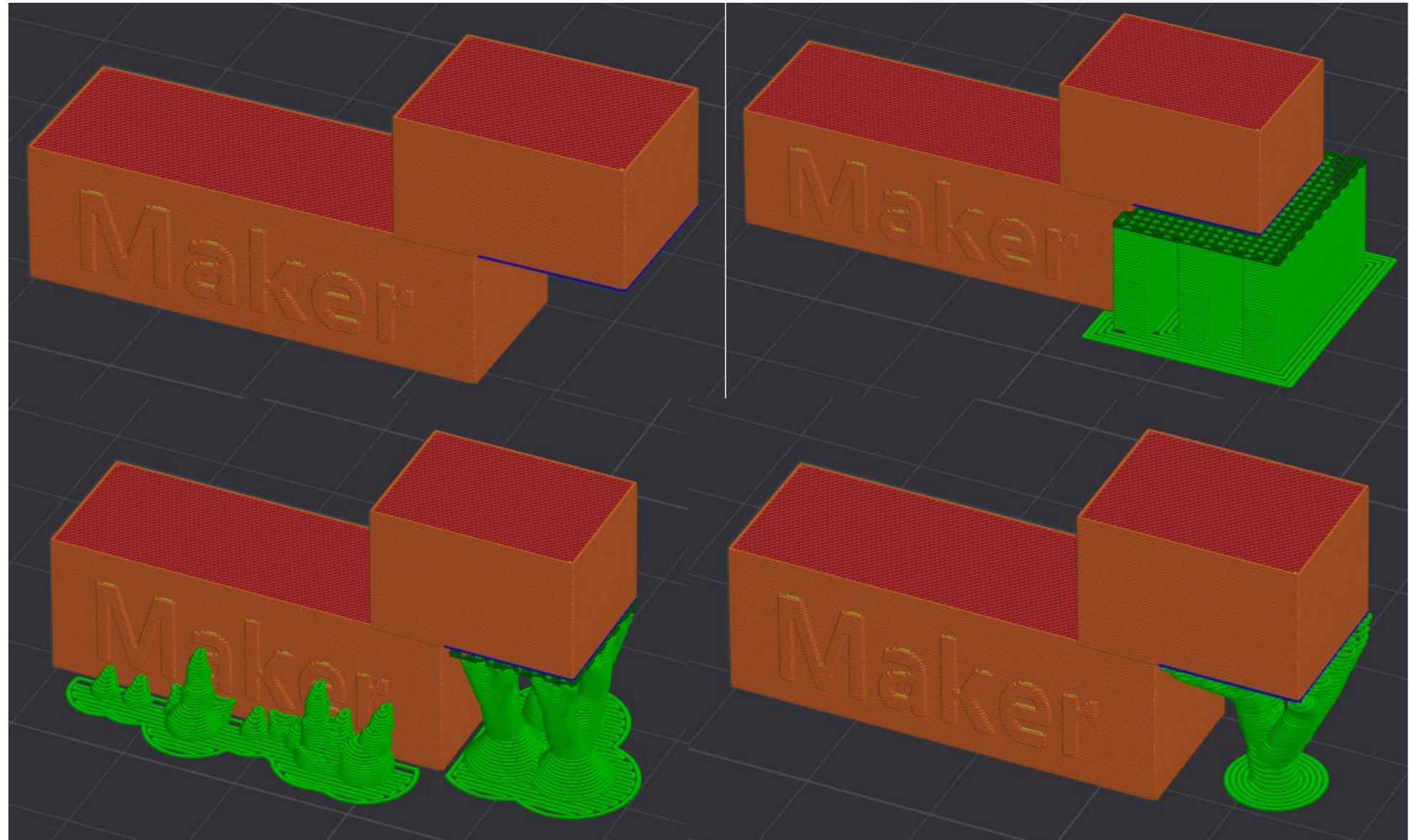
## Les réglages de base

### Rôle des supports:

- Structures temporaires pour soutenir les parties en surplomb. Minimise les échecs.

### Optimisation:

- Réduisez les supports en orientant mieux l'objet ou en adaptant la conception.



# ➤ Adhérence au plateau

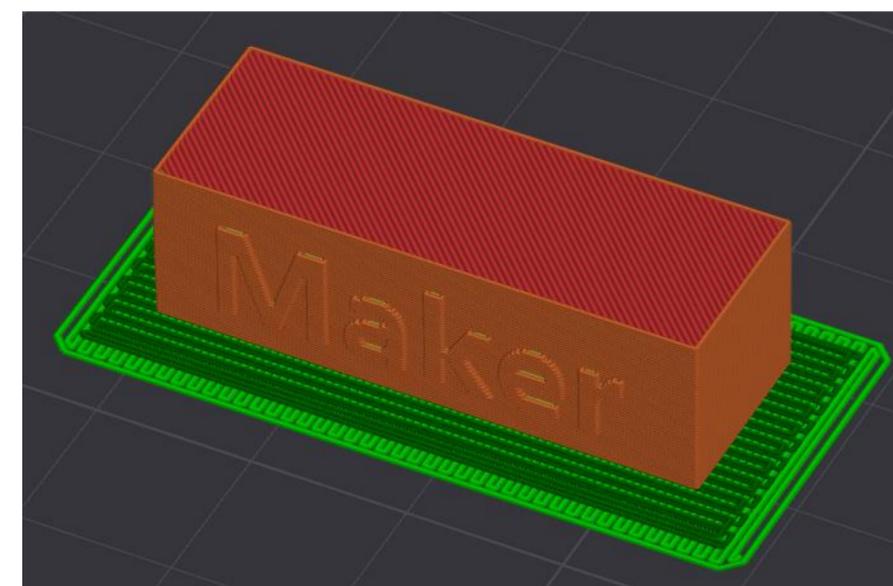
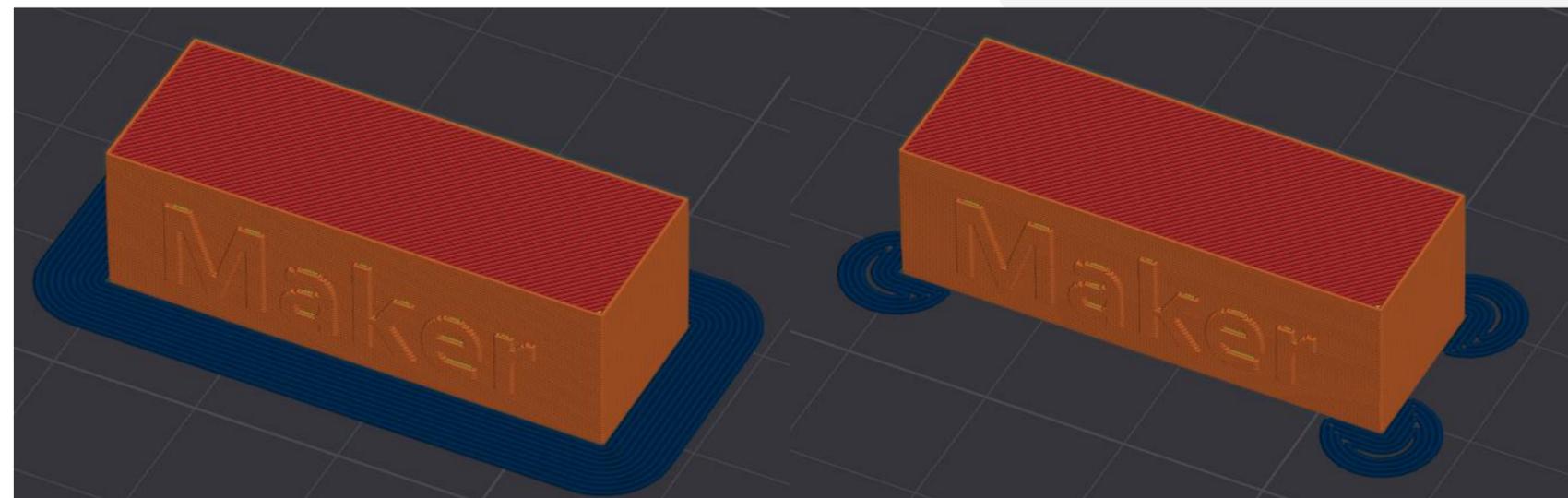
## Les réglages de base

### Bordure:

- Augmente l'adhérence, utile pour des objets petits ou fins.

### Radeau:

- Structure de base sous l'objet, idéale pour prévenir le warping sur certains matériaux comme l'ABS ou le PETG.





# Pontage et refroidissement

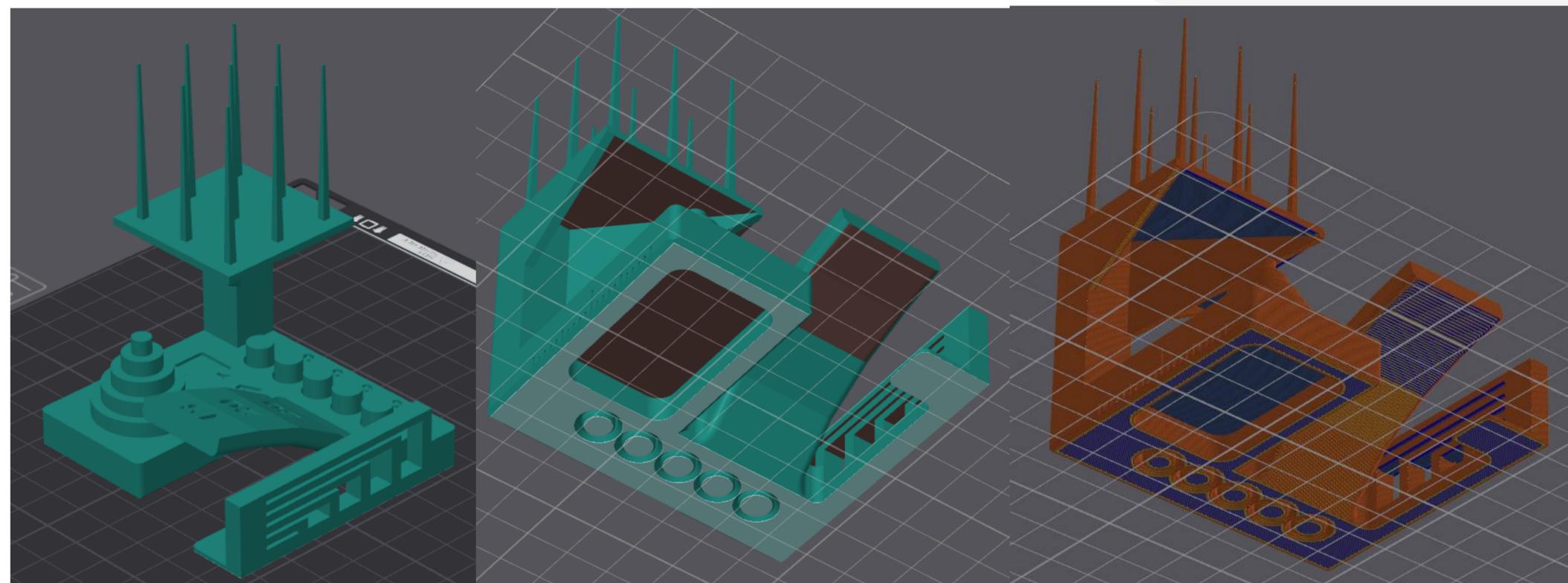
## Les réglages de base

### Pontage:

- Impression dans le vide en tirant une ligne entre deux points.
- Dépend du refroidissement.

### Refroidissement:

- Ventilation active pour solidifier rapidement les couches fines ou en porte-à-faux.



# Optimiser ses designs

Les astuces à avoir en tête



# Minimiser les supports

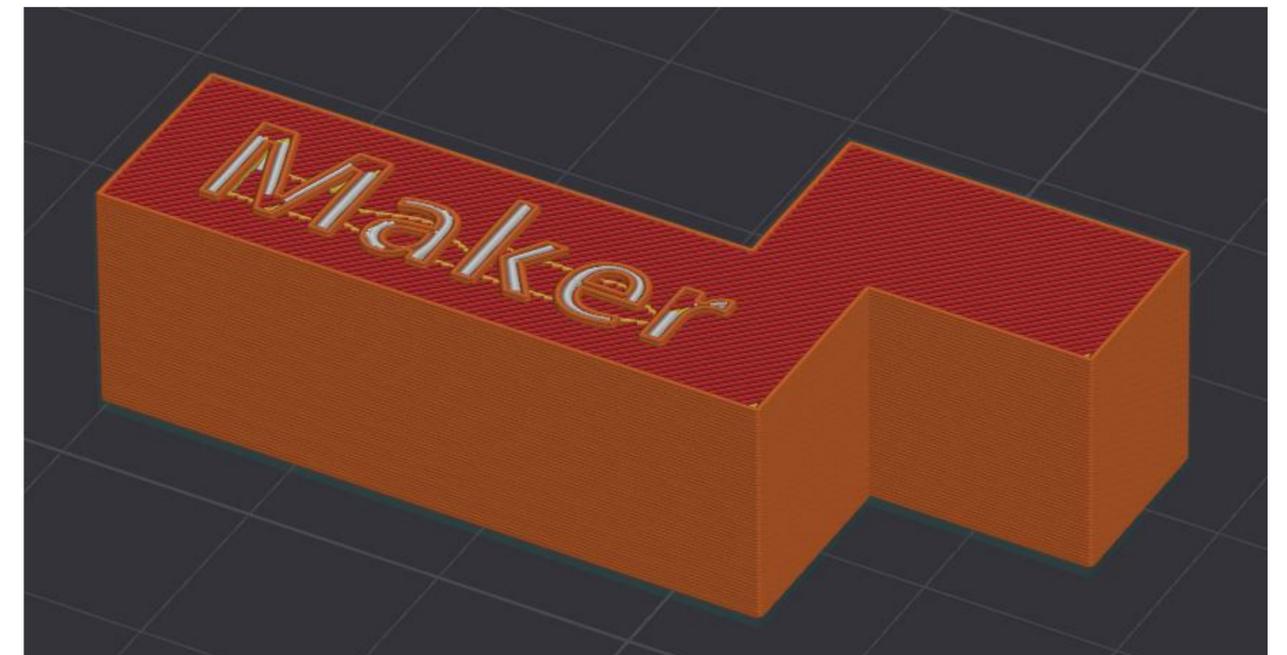
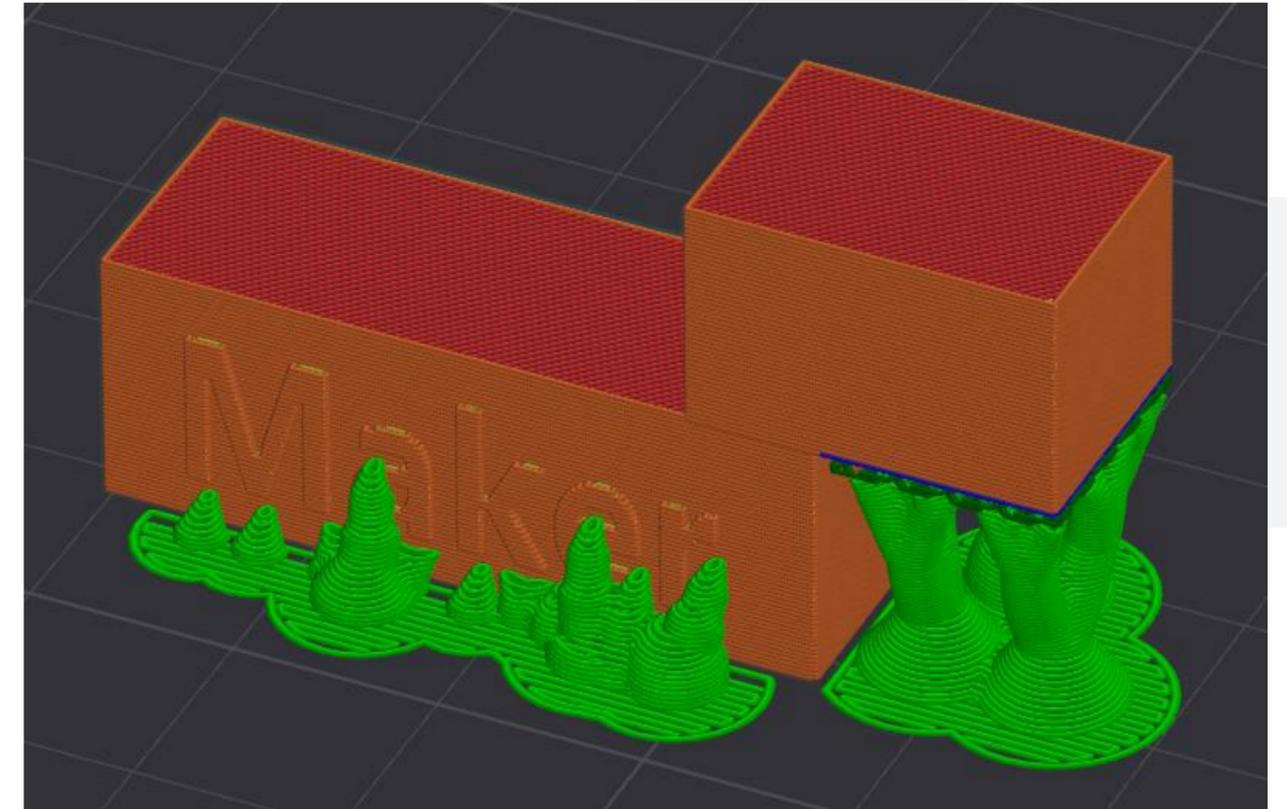
## Optimiser ses designs

### Pourquoi ?

- Les imprimantes ne peuvent pas imprimer dans le vide. Les supports augmentent le temps, le matériau utilisé et peuvent affecter la qualité des surfaces.

### Solution

- Concevez les objets pour réduire au maximum les surplombs nécessitant des supports.





# Positionnement sur le plateau

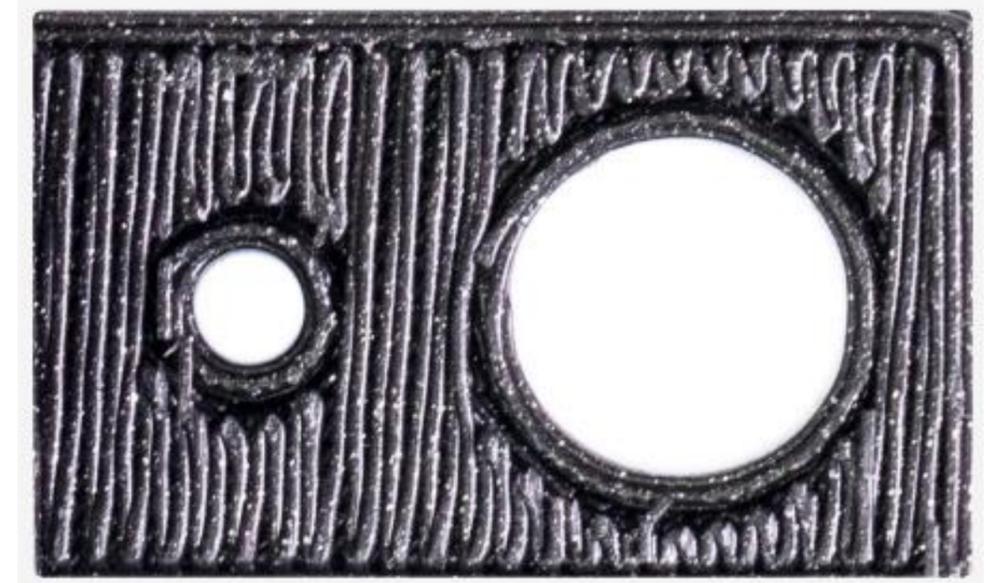
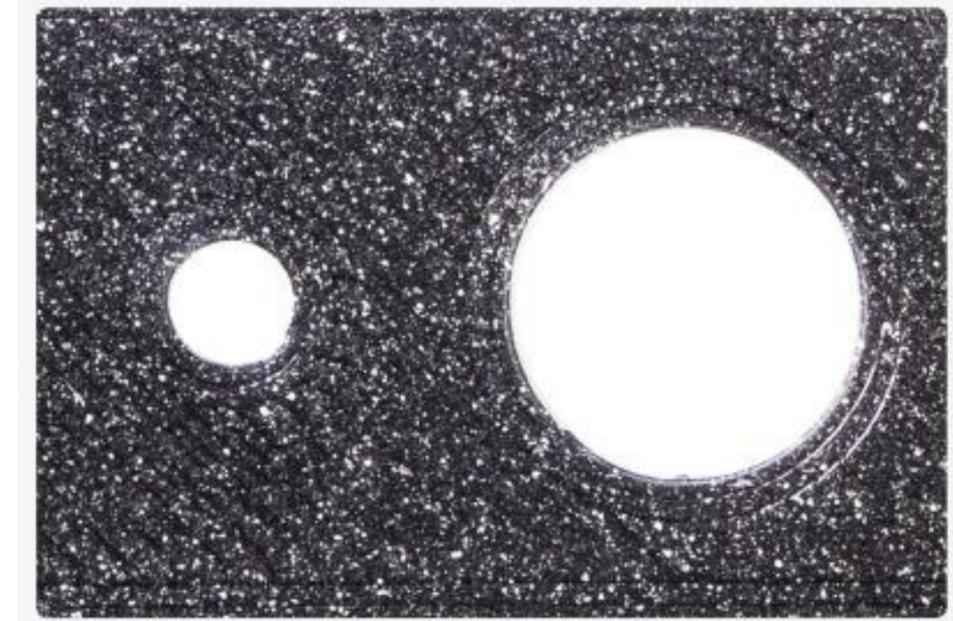
## Optimiser ses designs

### Surface directe:

- Les surfaces en contact direct avec le plateau sont lisses et régulières.

### Surfaces sur supports:

- Elles sont souvent irrégulières et moins esthétiques. Orientez les modèles pour minimiser cette situation.



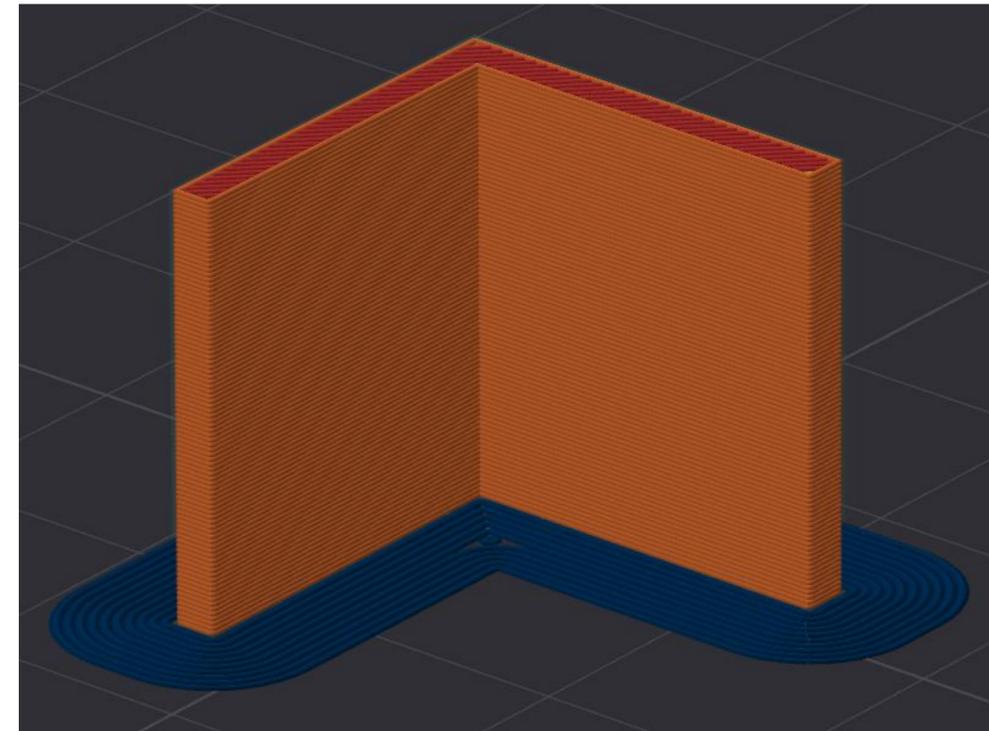
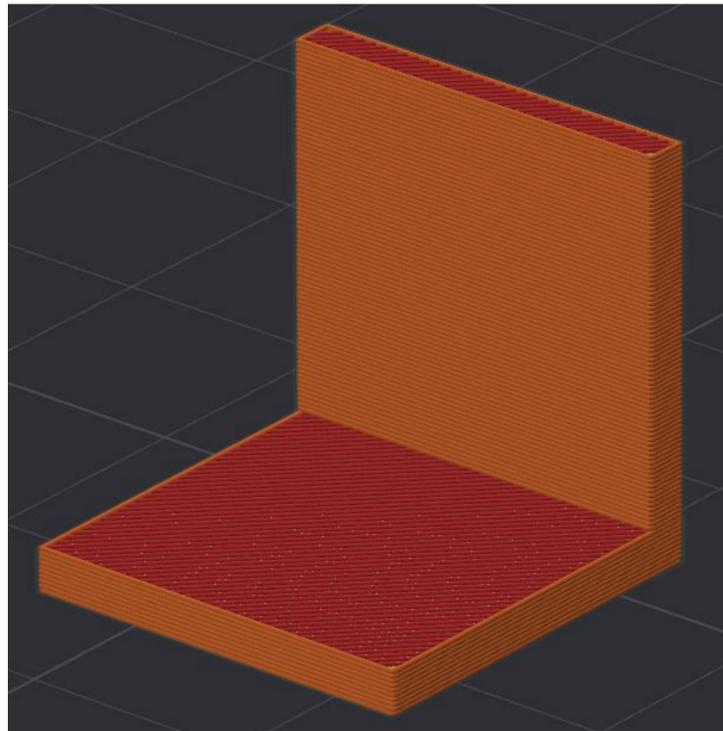


# Résistance des couches

## Optimiser ses designs

### Orientation des couches

- Les pièces sont plus fragiles dans la direction parallèle aux couches. Concevez en fonction des contraintes prévues.





# Découpe des modèles

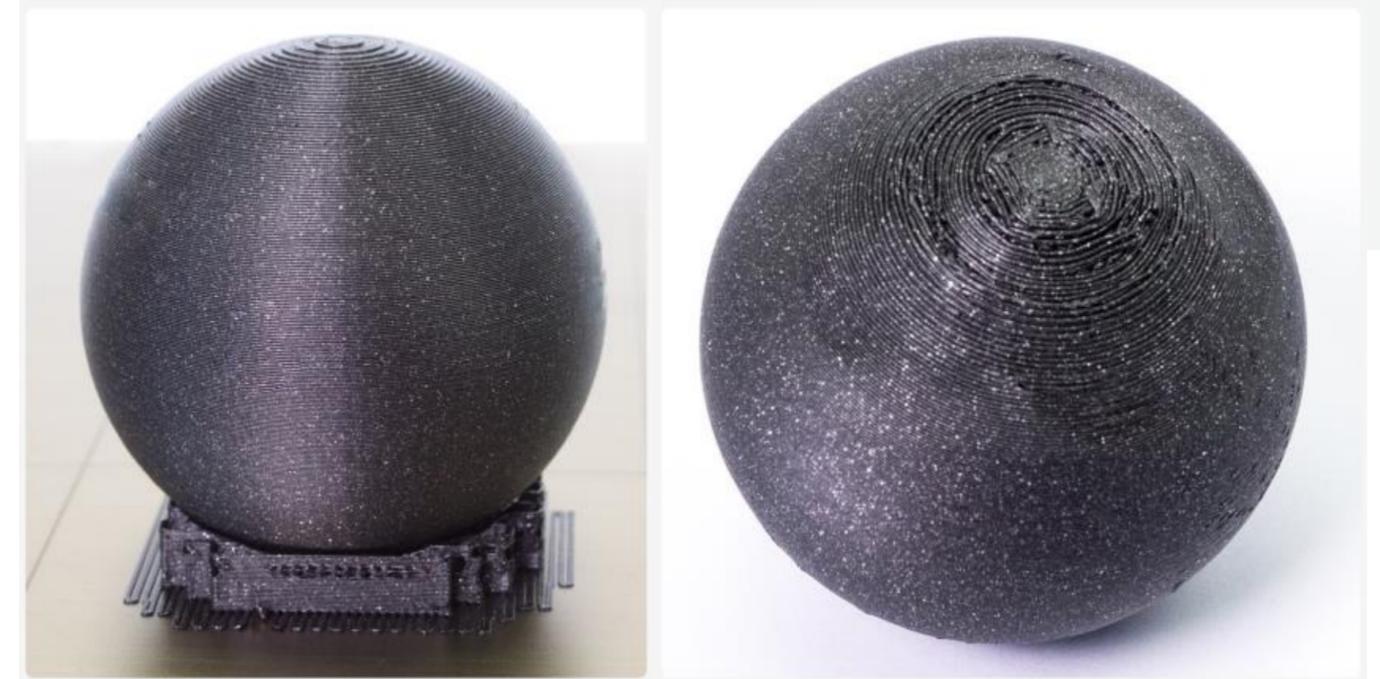
## Optimiser ses designs

### Pourquoi découper ?:

- Couper un modèle complexe (comme une sphère) en plusieurs parties peut faciliter l'impression et améliorer la qualité des surfaces.

### Assemblage:

- Les parties imprimées séparément peuvent être assemblées pour un meilleur rendu global.



# ➤ Tolérances dans les assemblages

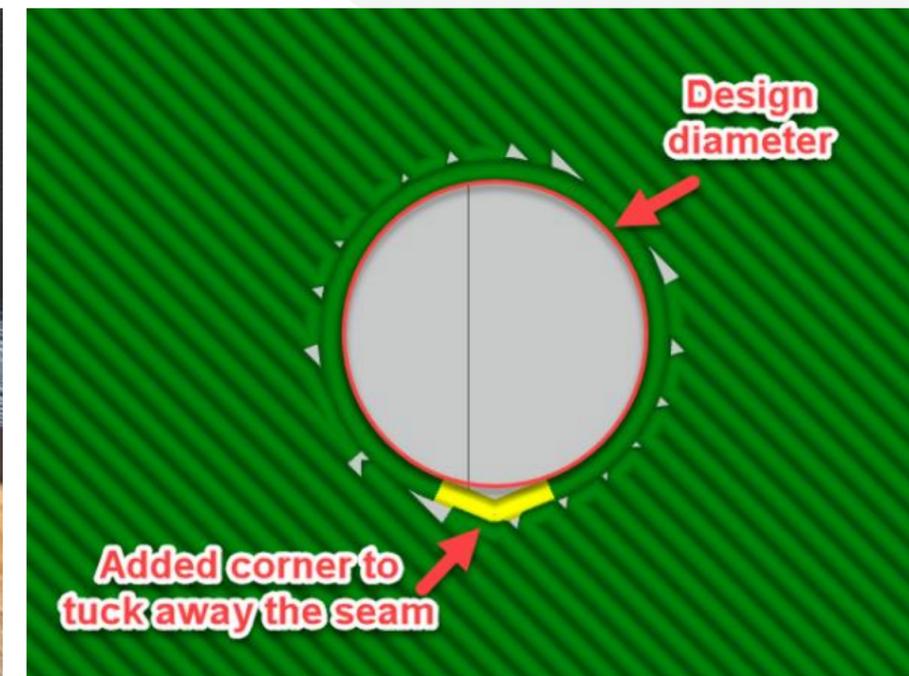
## Optimiser ses designs

### Importance des tolérances:

- Prévoir un espace de jeu (ex. : 0,15 mm pour une tige de 10 mm) est essentiel pour un assemblage réussi.
- Des astuces type « goutte d'eau » peuvent améliorer les tolérances de vos impressions

### Ajustements nécessaires:

- Chaque configuration d'imprimante et matériau peut nécessiter plusieurs essais pour optimiser les tolérances.





# Orientation des trous

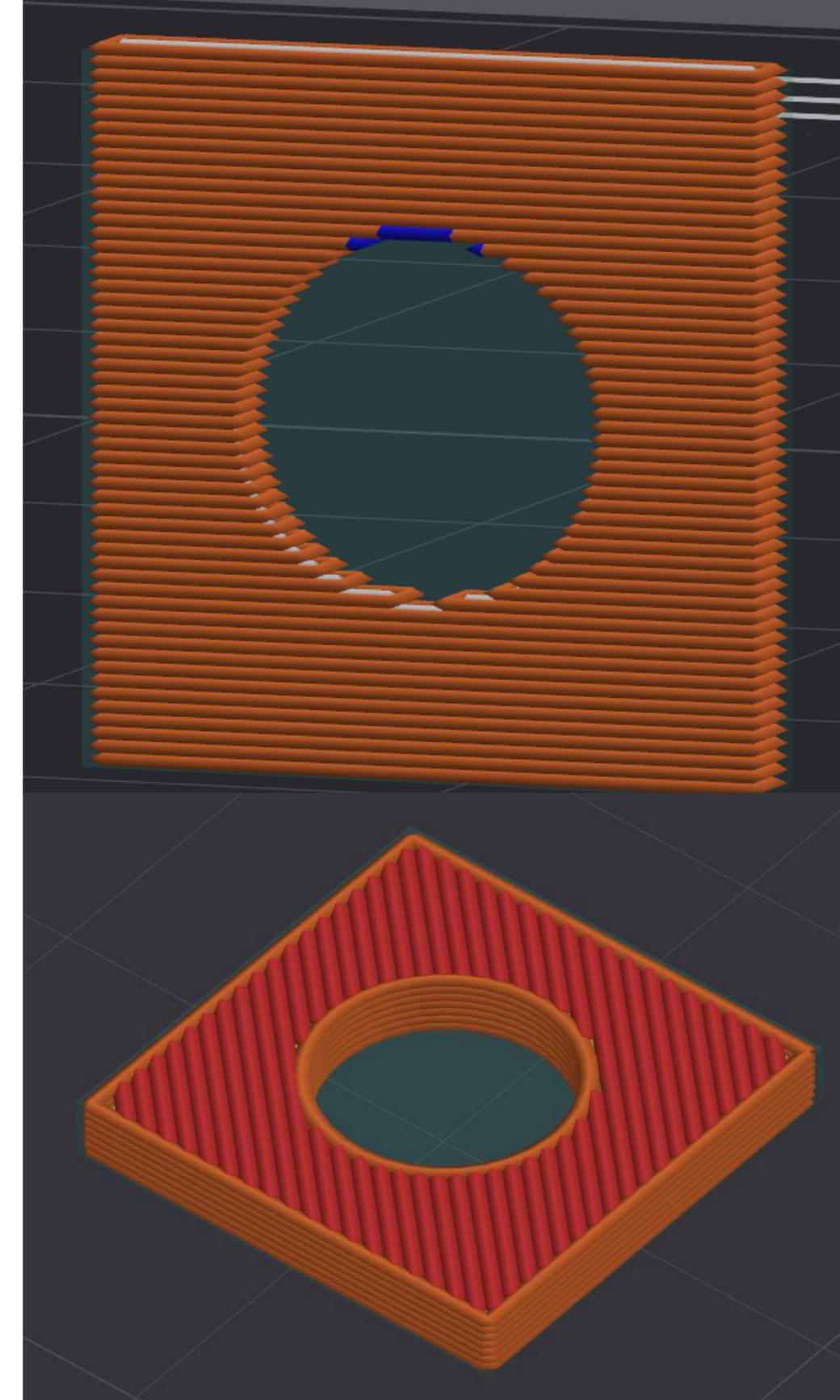
## Optimiser ses designs

### Trous imprimés verticalement :

- Un trou imprimé verticalement risque de ne pas être parfaitement circulaire.

### Orientation horizontale :

- Imprimez les trous horizontalement pour un meilleur rendu et une plus grande précision.





# Largeur des périmètres

## Optimiser ses designs

### Périmètre simple:

- Avec une buse standard de 0,4 mm, la largeur imprimée est d'environ 0,45 mm.

### Impact:

- Cela affecte directement l'épaisseur des parois et doit être pris en compte lors de la conception.



# Le GCode

Les instructions machine



# Le G-code

## Qu'est-ce que le G-code ?

### Définition:

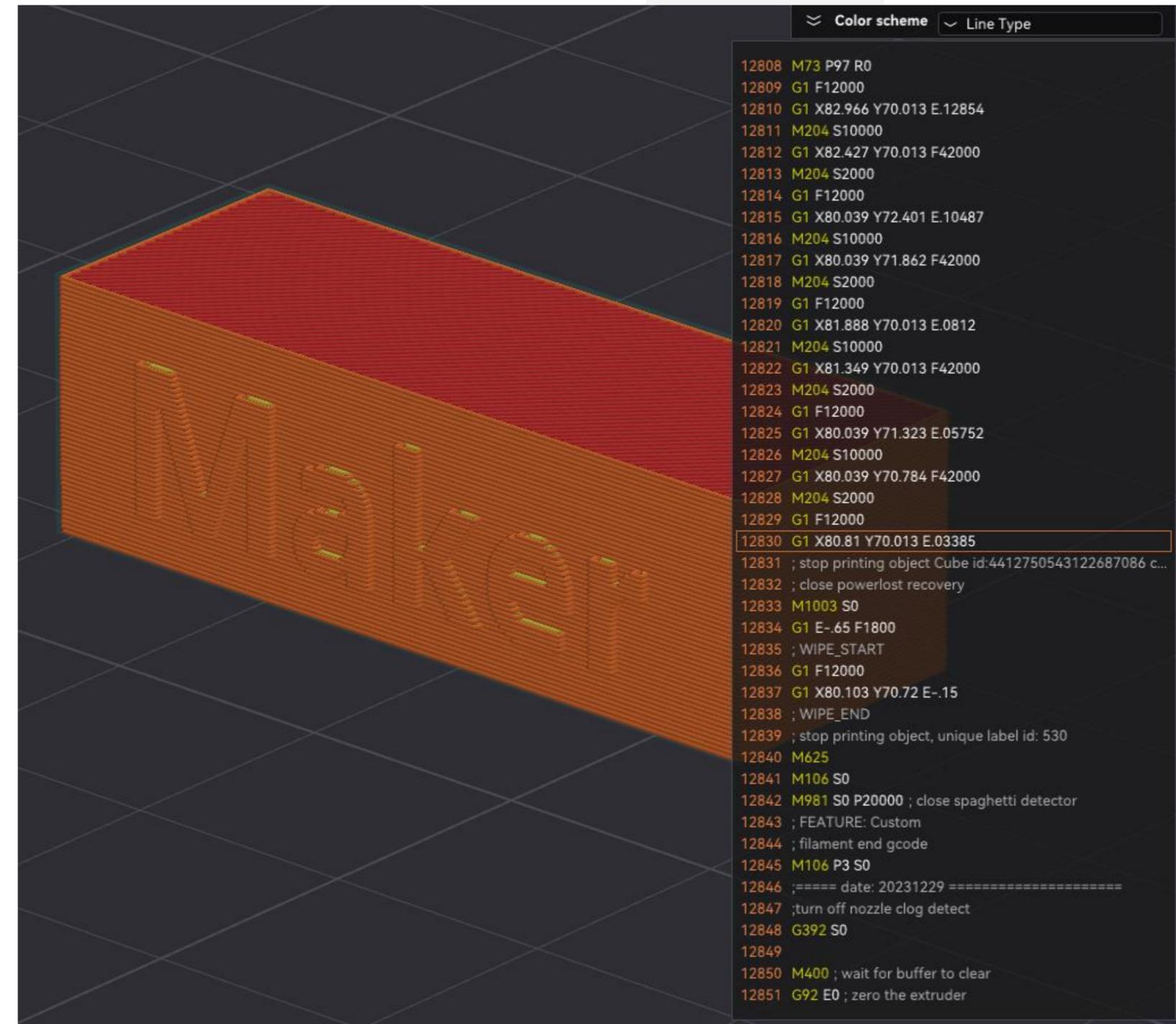
- Le G-code est un langage de commande utilisé pour contrôler les machines-outils, dont les imprimantes 3D.

### Origines:

- Créé dans les années 1950 pour les machines CNC, il est devenu un standard pour l'automatisation.

### Usage en impression 3D:

- Chaque commande du G-code définit des actions comme déplacer la tête d'impression, ajuster la température, ou contrôler la vitesse.





# Le G-code

## Principe de fonctionnement

### Structure des commandes:

- Chaque ligne commence par une lettre (ex. G pour mouvement, M pour contrôle) suivie de paramètres.

### Exemple:

- G1 X10 Y20 Z0.2 F1500 : Déplace la tête à X=10, Y=20, Z=0.2 à une vitesse de 1500 mm/min.

### Lien avec le slicer:

- Le G-code est généré par un slicer à partir d'un modèle 3D, traduisant le fichier en commandes machine.

```
12808 M73 P97 R0
12809 G1 F12000
12810 G1 X82.966 Y70.013 E.12854
12811 M204 S10000
12812 G1 X82.427 Y70.013 F42000
12813 M204 S2000
12814 G1 F12000
12815 G1 X80.039 Y72.401 E.10487
12816 M204 S10000
12817 G1 X80.039 Y71.862 F42000
12818 M204 S2000
12819 G1 F12000
12820 G1 X81.888 Y70.013 E.0812
12821 M204 S10000
12822 G1 X81.349 Y70.013 F42000
12823 M204 S2000
12824 G1 F12000
12825 G1 X80.039 Y71.323 E.05752
12826 M204 S10000
12827 G1 X80.039 Y70.784 F42000
12828 M204 S2000
12829 G1 F12000
12830 G1 X80.81 Y70.013 E.03385
12831 ; stop printing object Cube id:4412750543122687086 c...
12832 ; close powerlost recovery
12833 M1003 S0
12834 G1 E-.65 F1800
12835 ; WIPE_START
12836 G1 F12000
12837 G1 X80.103 Y70.72 E-.15
12838 ; WIPE_END
12839 ; stop printing object, unique label id: 530
12840 M625
12841 M106 S0
12842 M981 S0 P20000 ; close spaghetti detector
12843 ; FEATURE: Custom
12844 ; filament end gcode
12845 M106 P3 S0
12846 ;===== date: 20231229 =====
12847 ;turn off nozzle clog detect
12848 G392 S0
12849
12850 M400 ; wait for buffer to clear
12851 G92 E0 ; zero the extruder
```



# Le G-code

## Pourquoi comprendre le G-code ?

### Dépannage:

- Permet d'identifier et de corriger des problèmes d'impression directement dans le fichier.

### Optimisation:

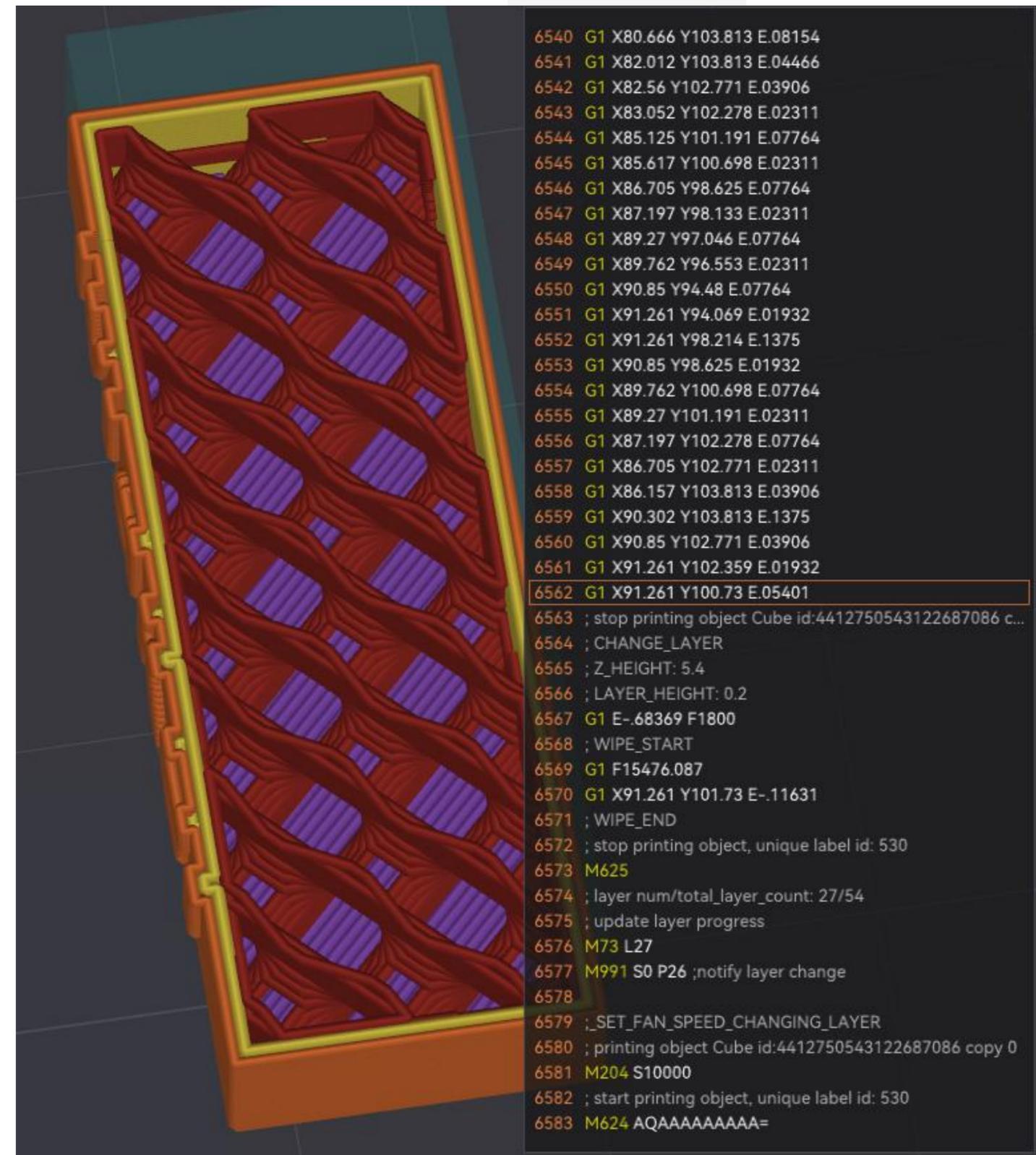
- Ajuster manuellement certaines commandes pour améliorer la qualité ou la vitesse.

### Personnalisation:

- Créer des routines spécifiques (ex. : nettoyage, calibration).

### Applications avancées:

- Utile pour automatiser des processus ou intégrer des fonctions non standardisées.



# Merci

**Avez-vous des questions ?**