

SUPPORT DE FORMATION

PROTOTYPAGE



PARIS PANTHÉON-ASSAS UNIVERSITÉ



Innovation Lab



**OPEN
BADGE**

**La formation est obligatoire. L'utilisation se fait également nécessairement sous la supervision d'un étudiant encadrant.
Tous les contacts se trouvent à l'entrée de l'I-Lab.**



SOMMAIRE



1. GÉNÉRALITÉS		2. LES MACHINES CNC	
Définition Histoire	p. 2 p. 3 à 4	Généralités La découpeuse laser Les imprimantes 3D La fraiseuse numérique	p. 5 à 6 p. 7 à 9 p. 10 à 16 p. 17 à 19
3. WORKFLOW		4. LA PHASE DE CONCEPTION	
Workflow général de la fabrication numérique Changement de paradigme	p. 20 à 22 p. 23	La découpeuse laser L'imprimante 3D FDM La fraiseuse numérique	p. 24 à 28 p. 29 à p. 34 p. 35
5. LA PHASE DE FABRICATION		6. MÉTHODOLOGIE	
Le .Gcode La découpeuse laser L'imprimante 3D FDM La fraiseuse numérique	p. 36 p. 37 à 39 p. 40 à 45 p. 46 à 49	Généralités Le prototypage	p. 50 p. 51



DÉFINITION

La **fabrication numérique** consiste à produire un **objet physique** à partir d'un **fichier numérique**. Pour se faire, le concepteur utilise des logiciels de **dessin 2D** et de **modélisation 3D** assistés par ordinateur (CAD pour «computer aided design»), puis fabrique les objets conçus à l'aide de **machines à commande numérique** (CAM pour «computed aided machines»).

Dans le processus de fabrication numérique, il existe une grande **interdépendance** entre la **conception assistée par ordinateur** et la **fabrication par machines à commande numérique**. En effet, la conception devra être réalisée en fonction de la matérialité et de la machine choisie. A l'inverse, la machine devra être réglée et programmée pour avoir la meilleure adéquation possible avec l'objet conçu à l'ordinateur.

Al'inverse des processus industriels, on vise, ici, à avoir une **approche plus artisanale de la fabrication**.



**COMPUTED
AIDED
DESIGN**



**COMPUTED
AIDED
MANUFACTURING**



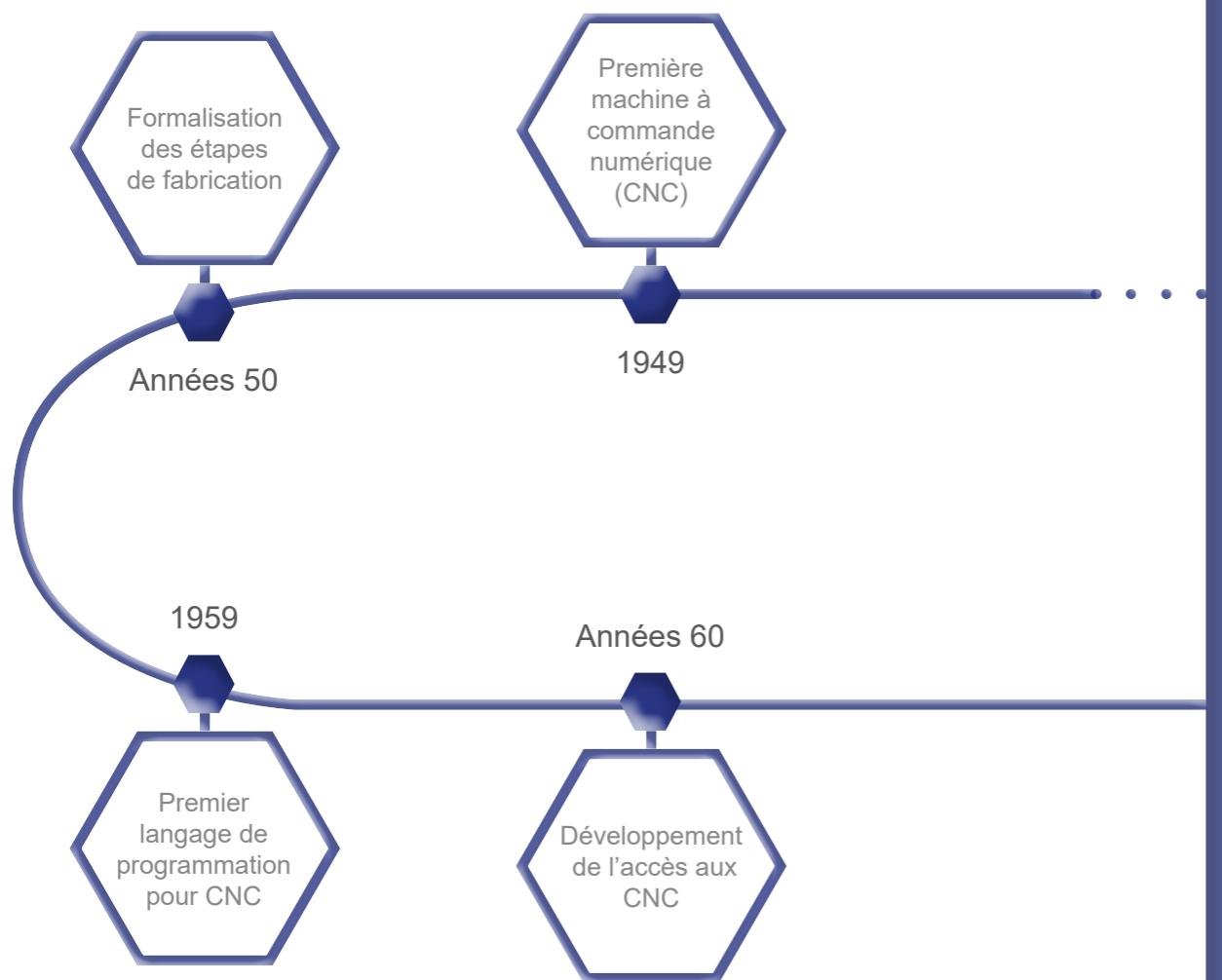
HISTOIRE

Les premières machines d'usinage à commande numérique apparaissent en **1949**. Elles étaient programmées manuellement grâce à des rubans perforés leur indiquant les instructions. Le plus ancien prototype a été construit au MIT.

Dans les **années 50**, on développe des **techniques pour formaliser les étapes de production d'un objet**. On commence à ce moment là à rechercher des **formes complexes et uniques**, notamment dans le secteur de l'aviation.

En **1959**, le MIT, la Aircraft Industries Association et l'US Air Force créent le **premier langage de programmation de commande numérique «automatically programmed tools»**, afin de simplifier la programmation des parcours d'outils.

Dans les **années 60**, l'accès aux machines à commande numérique commence à s'étendre avec l'apparition des problématiques des **techniques de représentation de courbes et de surfaces complexes**, notamment dans le secteur de l'aéronautique.



1. GÉNÉRALITÉS



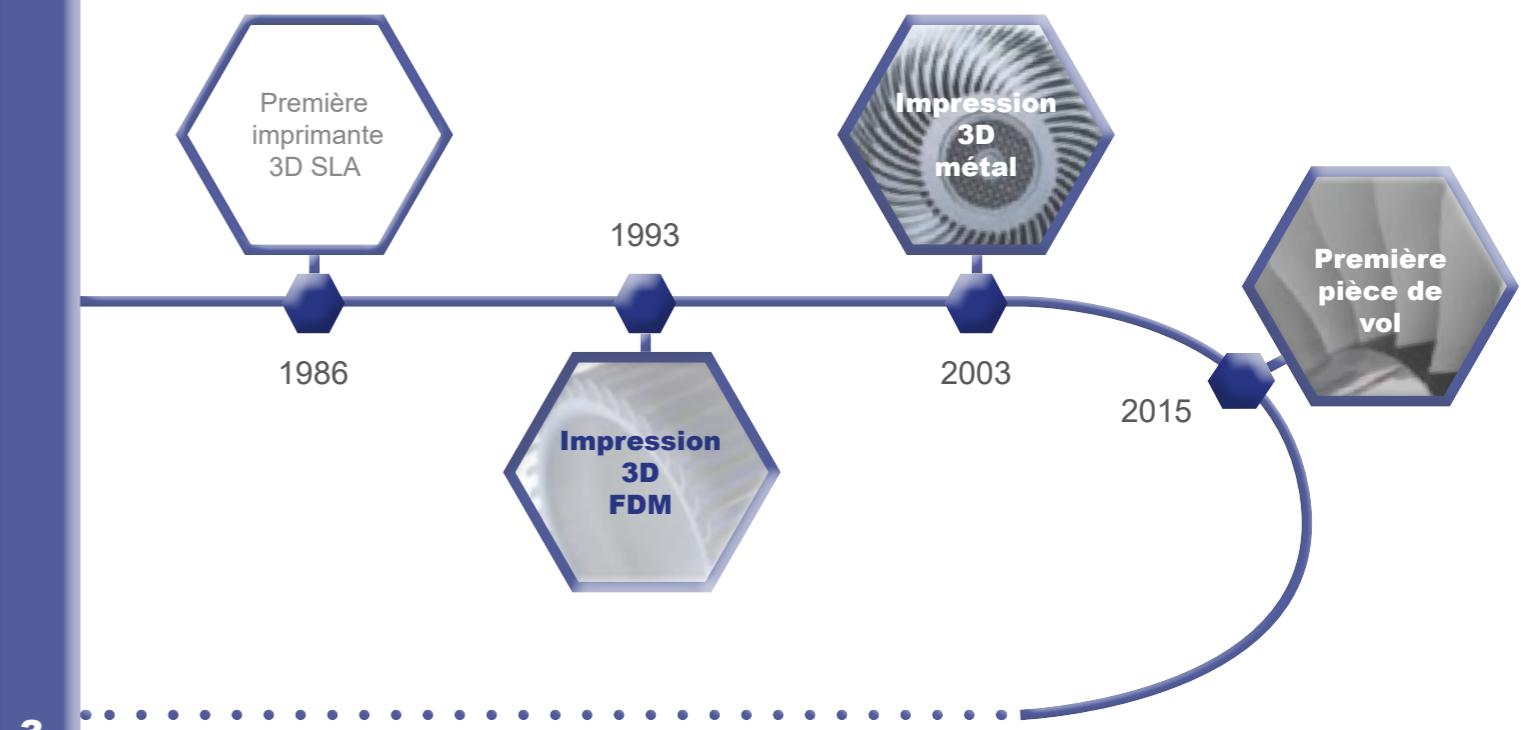
HISTOIRE

Après une première tentative de développement, par une équipe d'ingénieurs français (Le Méhauté, De Witte et André), non aboutie pour cause de non viabilité financière, l'américain Chales Hull développe la **première imprimante 3D**. En **1986**, il dépose le premier brevet pour une **imprimante 3D stéréo lithographique** commercialisée.

En **1993**, l'impression 3D par dépôt de matériel en fusion (FDM) apparaît.

En **2003**, on réalise la **première impression 3D avec de la poudre métallique**.

En **2015**, cette technologie est utilisée pour concevoir la **première pièce de vol** qui a été testée en conditions réelles.





GÉNÉRALITÉS

L'acronyme **CNC** signifie « **Computer Numerical Control** », en français « **commande numérique par ordinateur** ». Dans les fablabs, on trouve trois principales machines à commande numérique :

LA DÉCOUPEUSE LASER



- La découpeuse laser qui permet de **découper, graver ou marquer des matériaux** grâce à un laser répercute sur des miroirs et focalisé par une lentille.

L'IMPRIMANTE 3D



- L'imprimante 3D qui permet de fabriquer des objets par **dépôts successifs de couches de plastique en fusion**.

LA FRAISEUSE NUMÉRIQUE



- La **fraiseuse numérique** qui permet de **fraiser des matériaux en 3D** par la mobilité d'une fraise en rotation sur elle-même.

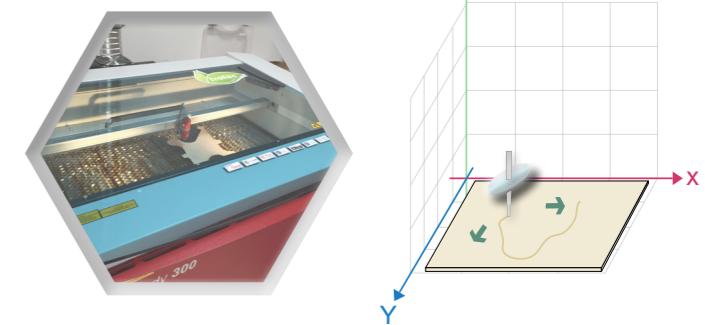
2. LES MACHINES À COMMANDE NUMÉRIQUE



GÉNÉRALITÉS

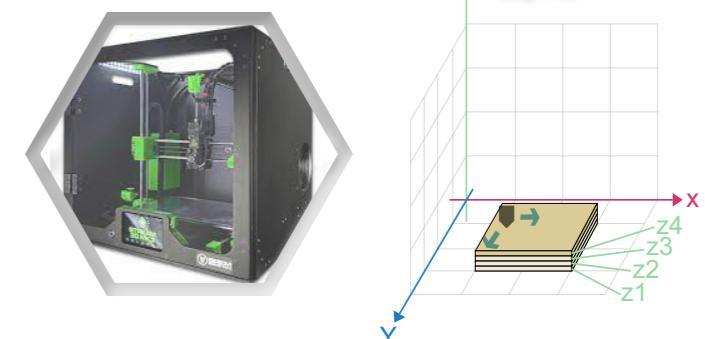
On distingue deux **types de fabrication** : la **soustractive**, qui consiste à retirer de la matière et l'**additive** qui vise à en ajouter. Les machines permettent respectivement la fabrication en **2D, 2,5D et 3D**.

LA DÉCOUPEUSE LASER



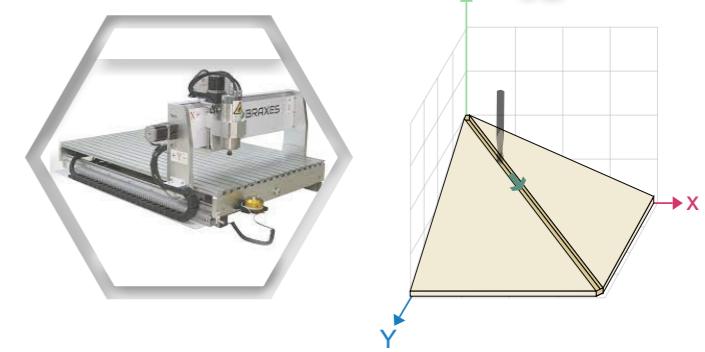
La découpeuse laser se déplace sur les axes X et Y sans variation sur Z. Elle permet donc de faire de la **fabrication soustractive en 2D**.

L'IMPRIMANTE 3D



L'imprimante 3D se déplace **simultanément sur les axes X et Y** avant de faire un décalage sur Z, pour effectuer de nouveau ce type de déplacement. Elle consiste à faire de la **fabrication additive en 2,5D**.

LA FRAISEUSE NUMÉRIQUE



La fraiseuse CNC se déplace en même temps sur les axes X, Y et Z. Elle permet de faire de la **fabrication soustractive en 3D**.



LA DÉCOUPEUSE LASER

La découpeuse laser permet de **découper** des matériaux en **sublimant la matière**, c'est-à-dire en la transformation de l'état solide à l'état gazeux, en **envoyant de l'énergie**.

Elle peut **découper, graver ou marquer** et l'énergie se règle en paramétrant sa **puissance en % de Watt** et sa **vitesse en % de sa vitesse maximum**.

La découpeuse laser de l'Innovation Lab est un **modèle Taïwanais «GCC»** de la marque **GLS**.

DÉCOUPEUSE LASER PRÉSENTE À L'INNOVATION LAB - MODÈLE GCC DE GLS -



Découvrez une vidéo de **découpeuse laser en fonctionnement** via le QR code ci-contre :



2. LES MACHINES À COMMANDE NUMÉRIQUE



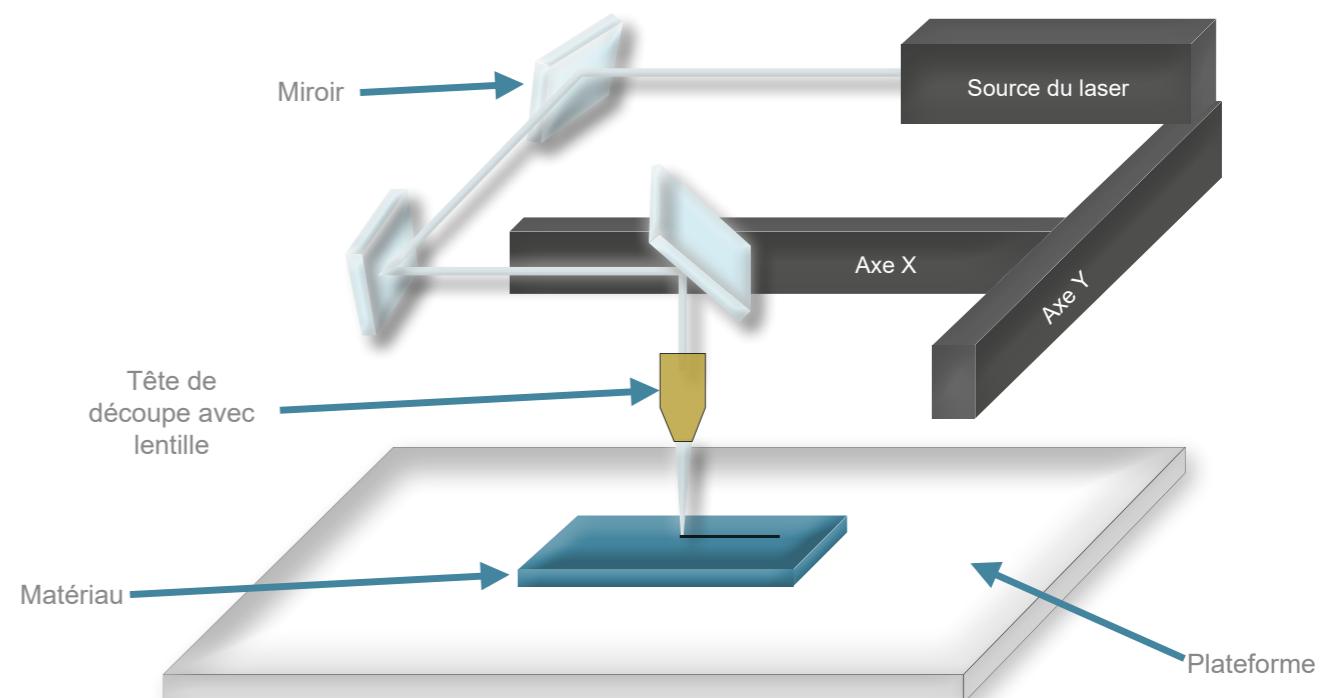
LA DÉCOUPEUSE LASER

La découpeuse laser **découpe des matériaux sur un plan**. Elle se déplace sur les **axes X et Y** uniquement.

Un **laser** est **généré** dans un **tube** contenant du **gaz composé d'atomes d'hydrogène, de dioxyde de carbone et d'hélium**. Ces atomes, soumis à un **champ électrique**, vont émettre des **photons** qui vont croître rapidement. Après un certain temps, ces **photons** vont être libérés sous forme de **rayon**.

Le **laser** arrive à la **tête de découpe** grâce à un jeu de **miroirs** répartis dans la machine puis est **focalisé** grâce à une **lentille**.

SCHÉMA TECHNIQUE DU FONCTIONNEMENT D'UNE DÉCOUPEUSE LASER



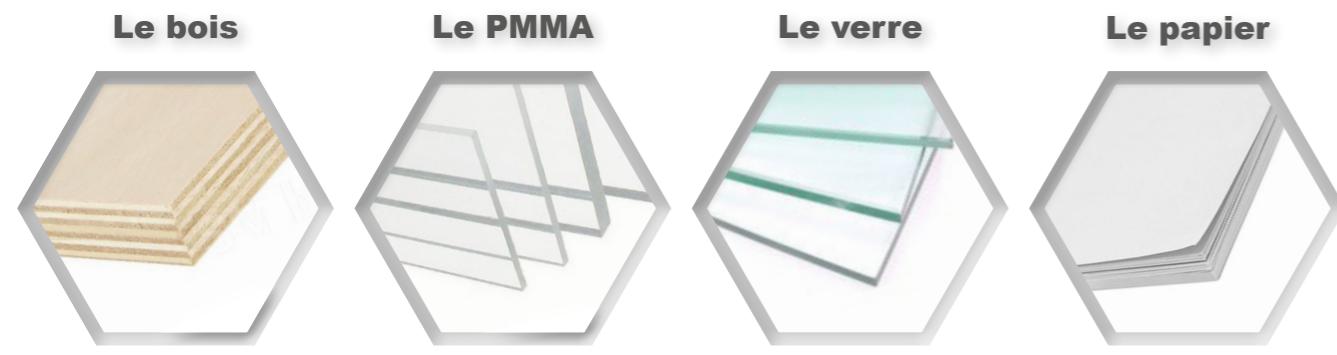


LA DÉCOUPEUSE LASER

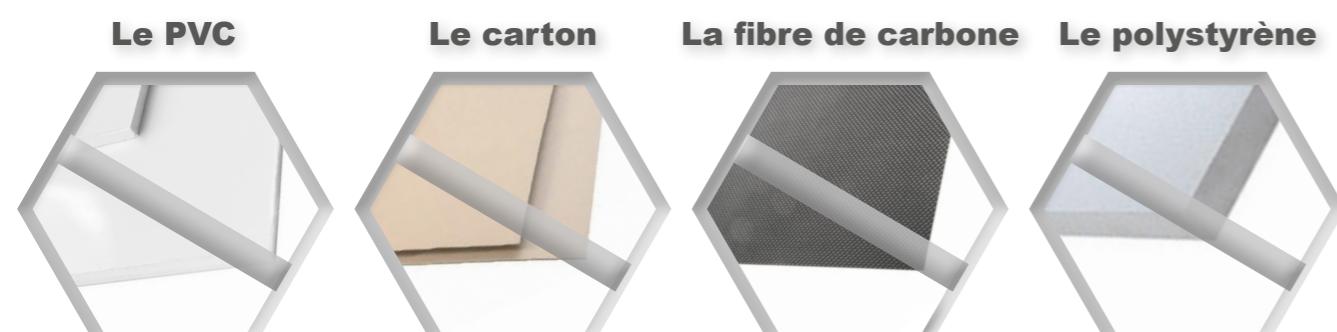
Les matériaux pouvant être utilisés sont : le **bois** (contreplaqué et MDF), le **PMMA**, le **verre** (sauf pour la découpe) et le **papier**.

Il est interdit d'utiliser du **PVC** (gaz nocif), du **carton**, des **fibres de carbone**, du **polycarbonate** et du **polystyrène expansé**.

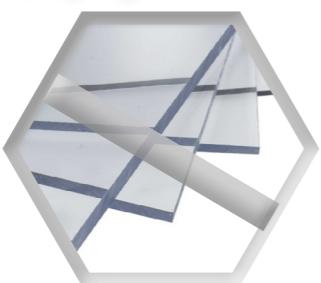
LES MATÉRIAUX AUTORISÉS



LES MATÉRIAUX INTERDITS



Le polycarbonate



2. LES MACHINES À COMMANDE NUMÉRIQUE



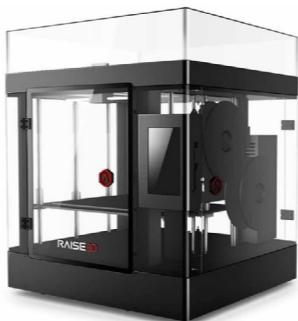
L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

Un des types d'imprimante 3D permet de déposer du matériau préalablement fondu, en l'occurrence des matériaux plastiques. On appelle ça l'impression 3D «**FDM**».

L'objet final est composé de couches de matières déposées successivement, plus les couches seront fines, plus l'objet sera fidèle au modèle initial.

Il y a **6 imprimantes 3D** à l'Innovation Lab. Les 3 **Raise3D** sont des modèles faciles d'utilisation dans un **cadre éducatif**. La **MakerBot** est un **modèle semi-industriel**, un peu plus compliqué d'utilisation. La **Zortrax** et la **Creality** sont des modèles montés "à la main" et sont donc un peu **plus primaires dans leur utilisation**, ils ne permettent pas de faire une qualité d'objet aussi élevée que les autres.

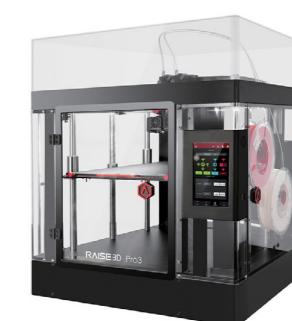
La Raise3D N2



La Raise3D PRO2



La Raise3D PRO3



La Makerbot METHOD



La Creality CR30 PrintMill



La Zortrax M200



Découvrez une vidéo d'une imprimante 3D en fonctionnement via le QR code ci-contre :





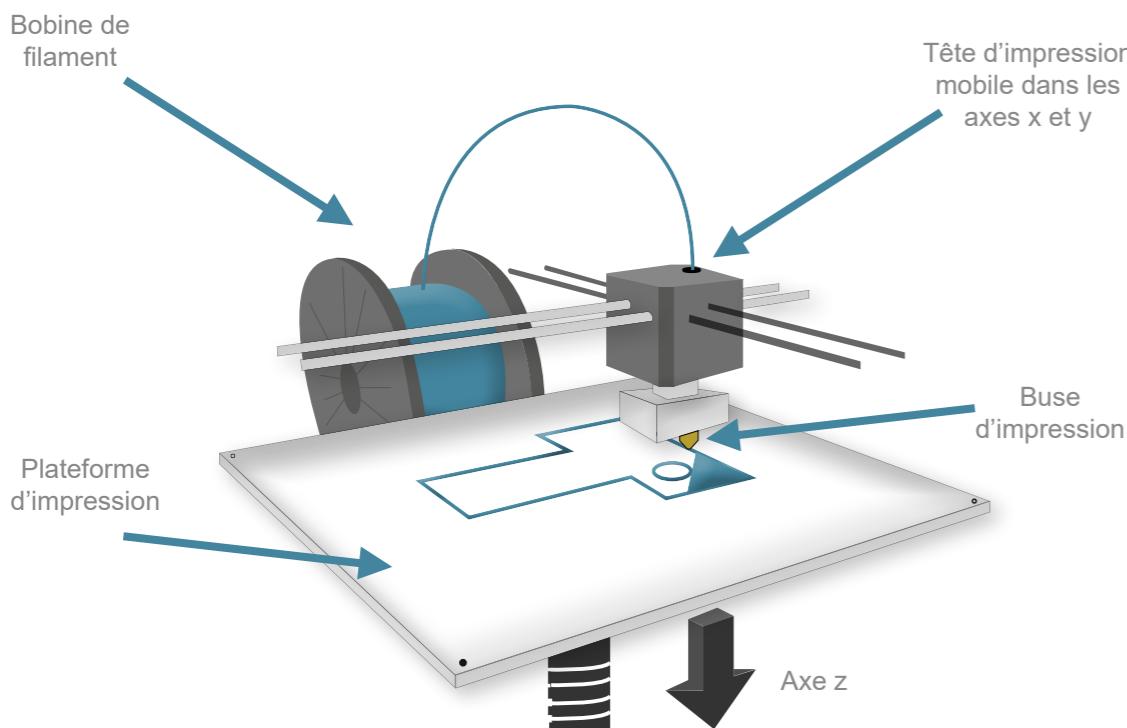
L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

Une **imprimante 3D** est constituée de plusieurs éléments : la **tête d'impression** ou **tête d'extrusion** sur laquelle on trouve une **buse d'impression**, un **plateau** et une **bobine de filament**.

La **tête d'impression**, où est positionnée la **buse déposant la matière**, est mobile sur les **axes X et Y**. Le **plateau** permet les **déplacements successifs en Z** (on parle de **2,5D**).

Le **filament**, enroulé autour de la **bobine**, rejoint directement la **tête d'impression**, où il va être **chauffé** jusqu'à atteindre sa **température de fusion**.

SCHÉMA TECHNIQUE DU FONCTIONNEMENT D'UNE IMPRIMANTE 3D (FDM)



2. LES MACHINES À COMMANDE NUMÉRIQUE



L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

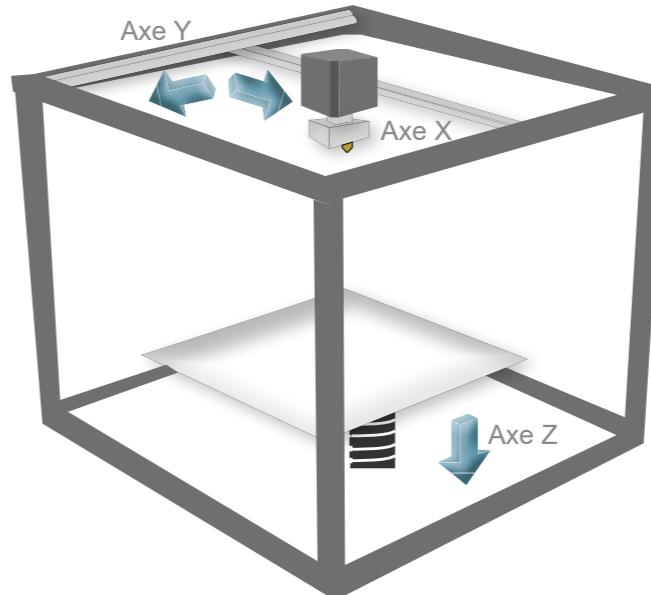
Il existe **trois typologies d'imprimante 3D de dépôt de matière en fusion (FDM)**.

Dans le **modèle core XY**, la **tête d'impression se déplace sur les axes X et Y et le plateau en Z**.

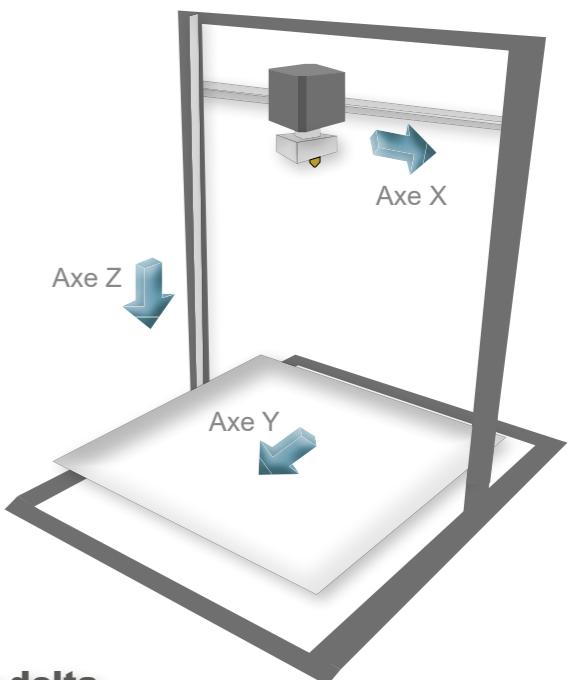
Dans le **modèle cartésien**, la **tête d'impression se déplace en X et Z et le plateau en Y**.

Dans le **modèle delta**, la **tête d'impression est mobile sur tous les axes**.

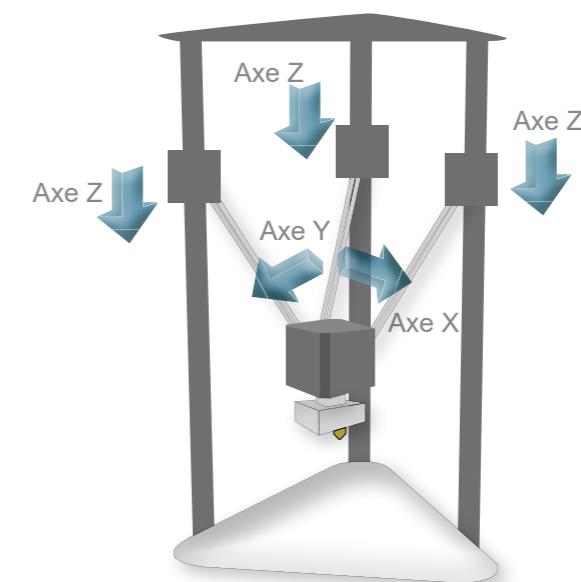
Le modèle core XY



Le modèle cartésien



Le modèle delta





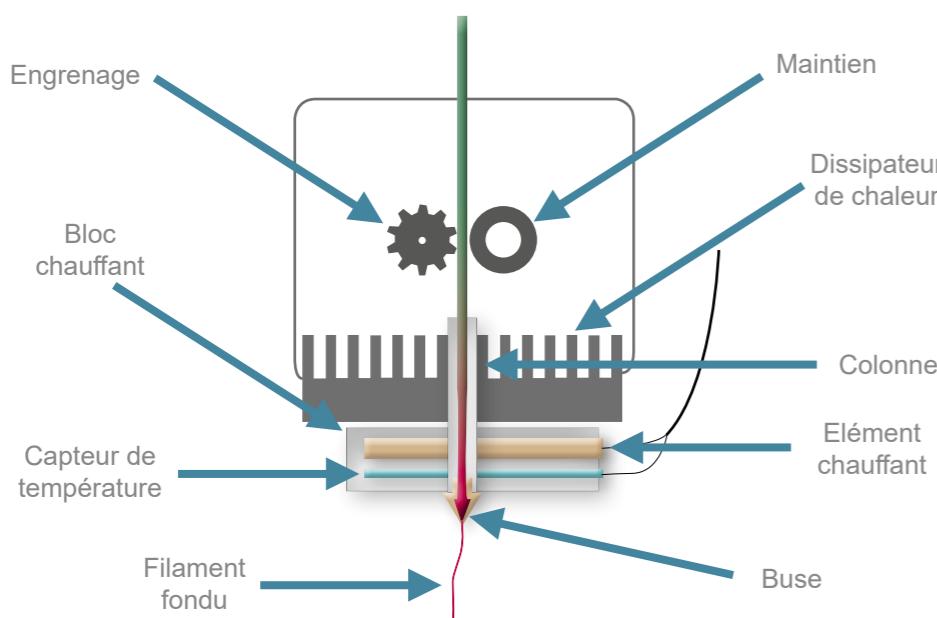
L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

Dans la **tête d'impression**, le filament est maintenu par une roue de maintien et poussé vers la buse par une roue crantée. Il va ensuite arriver jusqu'à une **cartouche de chauffe** permettant au filament d'atteindre sa **température de fusion**.

Un **capteur de température** permet d'avoir une grande précision sur la température atteinte par la **cartouche de chauffe**. Un **dissipateur de chaleur** permet au **moteur** d'être protégé de la température élevée.

Le **filament en fusion** sort ensuite par la **buse** pour être déposé sur le plateau, souvent chauffant lui aussi pour permettre une **bonne adhérence du matériau**.

SCHÉMA DE LA TÊTE D'IMPRESSION OU D'EXTRUSION D'UNE IMPRIMANTE 3D (FDM)



2. LES MACHINES À COMMANDE NUMÉRIQUE



L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

La norme ISO/ASTM 52900:2021 établit et définit les termes utilisés dans la **technologie de la fabrication additive (FA)**, qui applique le principe de mise en forme additive et construit ainsi des géométries physiques en 3D par ajout successif de matériau.

Dans l'**impression 3D** de dépôt de matériel en fusion (FDM), on utilise ces matériaux :

Le PLA, acide polylactique, est un matériau **biodégradable** issu de l'amidon de maïs. Les **échecs sont plutôt rares** et il **coûte peu cher**. Néanmoins, il est **sensible à l'humidité**.

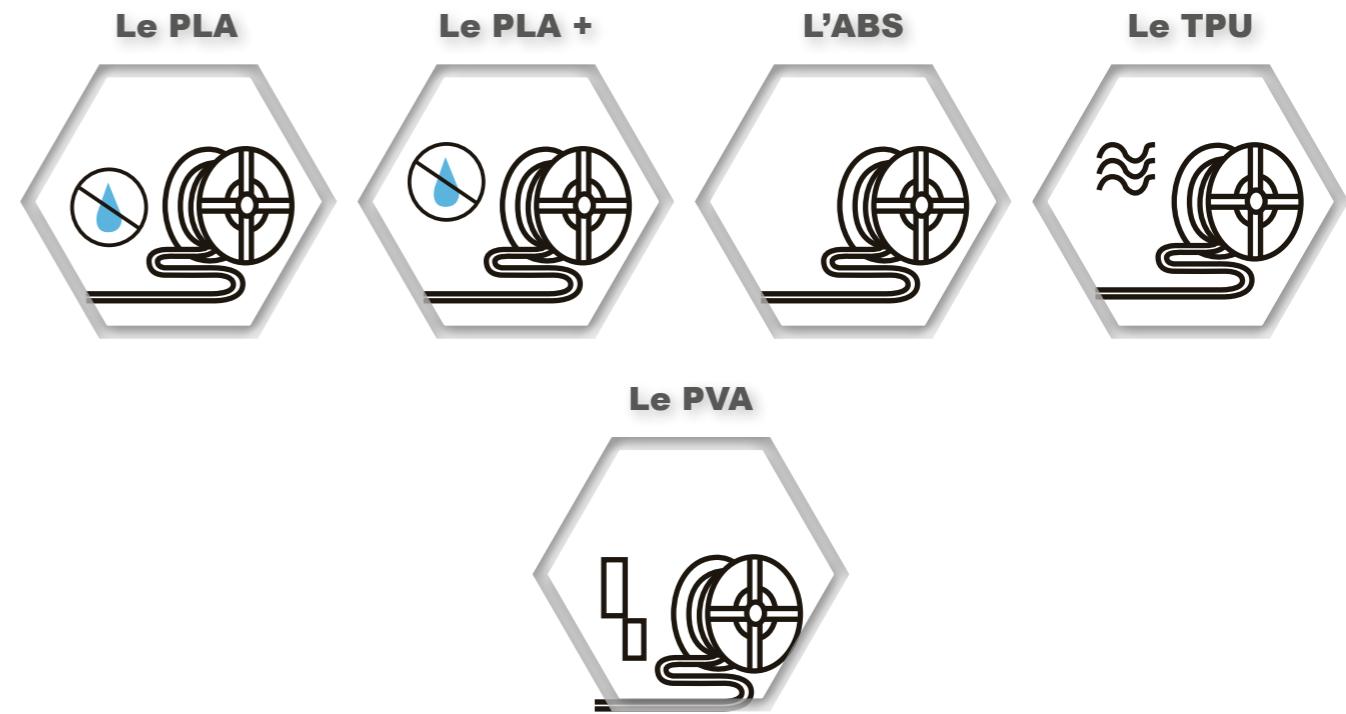
Le PLA+ est similaire au PLA mais **s'assombrit après impression**. Il est **plus résistant** mais les **finitions sont moins bonnes**. Il est aussi **plus cher**.

L'ABS n'est pas biodégradable. C'est un polymère thermoplastique. Le **taux d'échec d'impression est plus élevé** mais il **résiste à l'humidité**.

Le TPU, polyuréthane thermoplastique, est un matériau **flexible** qui s'apparente au caoutchouc.

Le PVA, alcool polyvinyle, est un matériau **utilisé uniquement pour les supports** car il est **soluble dans l'eau**.

LES MATERIAUX UTILISÉS





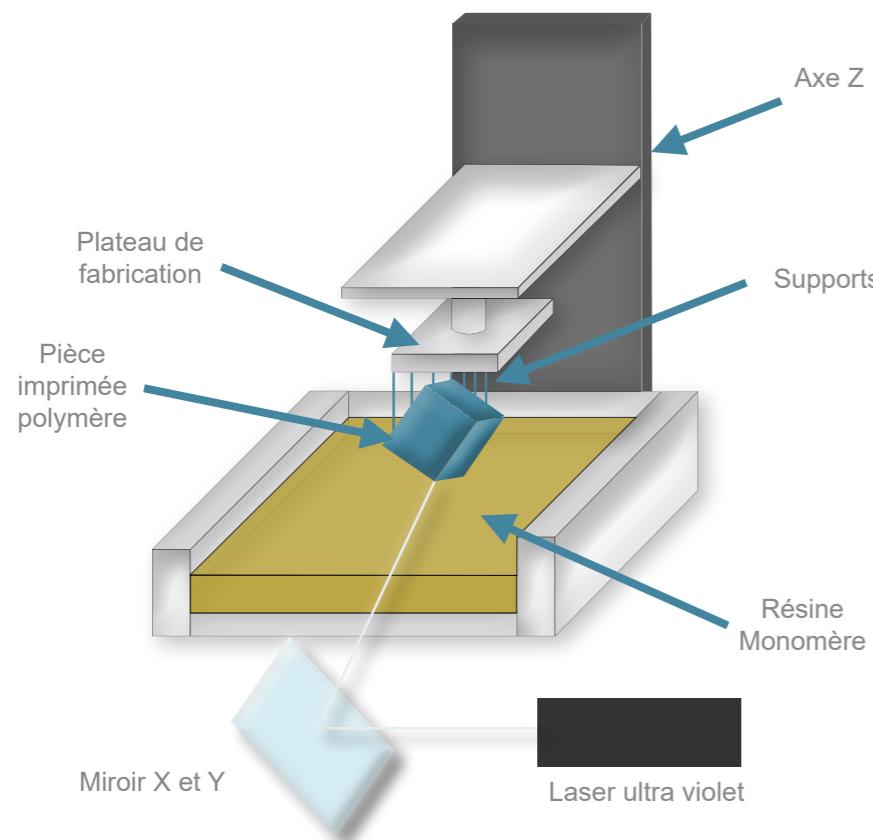
L'IMPRIMANTE 3D (SLA)

Un autre type d'imprimante 3D est l'imprimante 3D stéréo lithographique, dite «**SLA**».

L'impression 3D stéréo lithographique repose sur le **principe de la polymérisation**. Une **source de chaleur va venir durcir un liquide photosensible**, une **résine monomère**, couche par couche.

Cette méthode d'impression 3D permet d'obtenir des **objets avec une définition plus élevée car les couches d'impression sont quasi-invisibles**, néanmoins, elle nécessite aussi **un temps de post-production avec la manipulation de produits toxiques**.

SCHÉMA TECHNIQUE DU FONCTIONNEMENT D'UNE IMPRIMANTE 3D (SLA)



2. LES MACHINES À COMMANDE NUMÉRIQUE



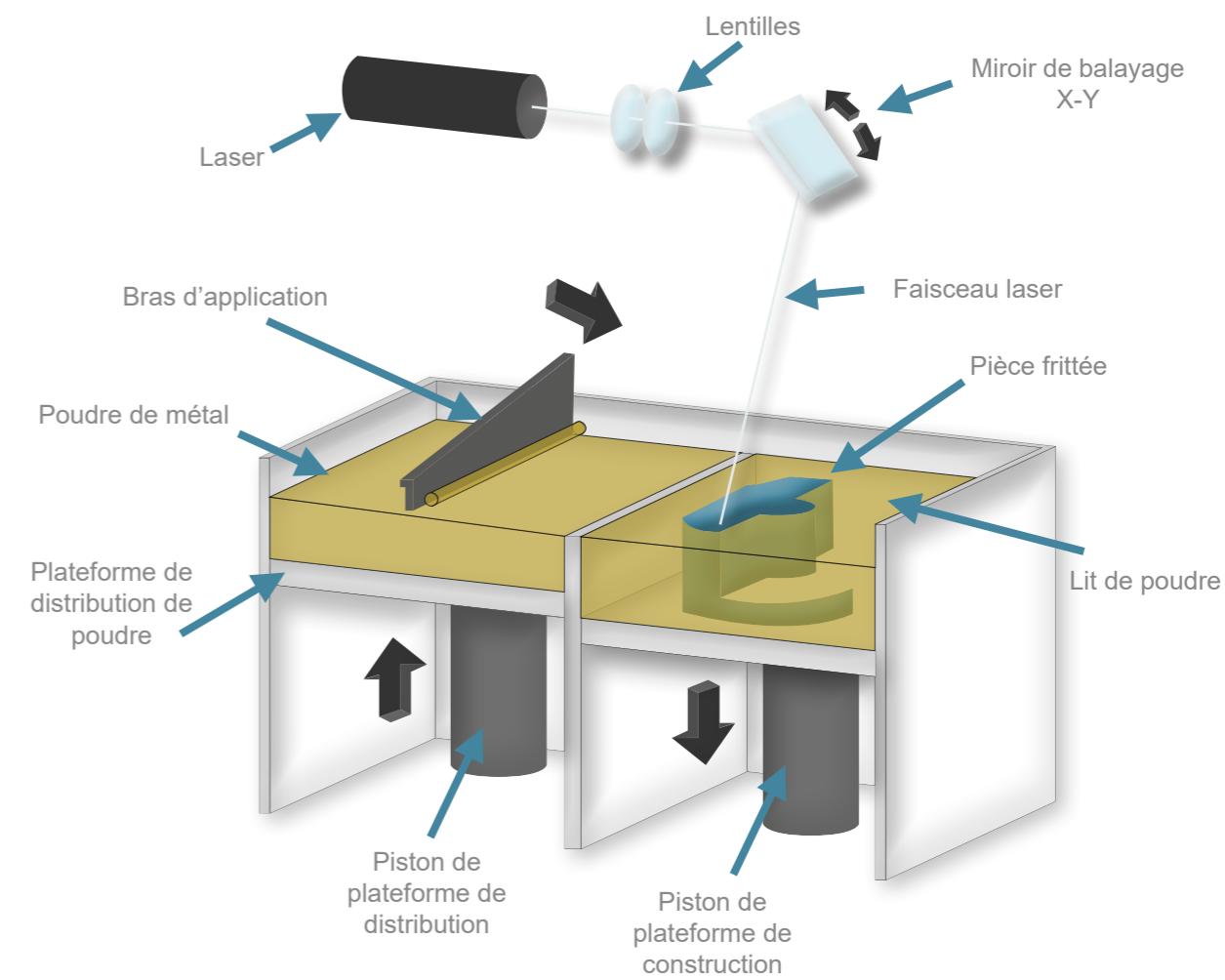
L'IMPRIMANTE 3D (SLS)

Un dernier type d'imprimante 3D est l'imprimante 3D par frittage sélectif, dite «**SLS**».

Essentiellement, chaque fois qu'une nouvelle couche est imprimée, un cylindre répand une fine couche de poudre fine sur la plateforme, qui est ensuite frittée avec un laser dans la forme requise.

Cette méthode d'impression 3D permet d'obtenir une **définition de l'objet d'une très grande qualité avec des traces invisibles de fabrication**. Néanmoins, le **coût de ce type d'impression est très élevé**.

SCHÉMA TECHNIQUE DU FONCTIONNEMENT D'UNE IMPRIMANTE 3D (SLA)





LA FRAISEUSE NUMÉRIQUE

On entend souvent le terme «CNC» pour désigner cette machine. Il ne s'agit pas du terme approprié, mais un terme générique pour désigner toutes les machines à commande numérique. Il s'agit en réalité d'une **fraiseuse numérique**.

A l'inverse de l'imprimante 3D, la fraiseuse va venir enlever de la matière au matériau, c'est de la **fabrication soustractive**.

Pour cela, un outil tranchant, une **fraise**, va tourner sur lui-même et se déplacer sur les trois axes X, Y et Z de manière simultanée.

FRAISEUSE NUMÉRIQUE PRÉSENTE
À L'INNOVATION LAB



Découvrez une vidéo de **fraiseuse numérique** en fonctionnement via le QR code ci-contre :



2. LES MACHINES À COMMANDE NUMÉRIQUE



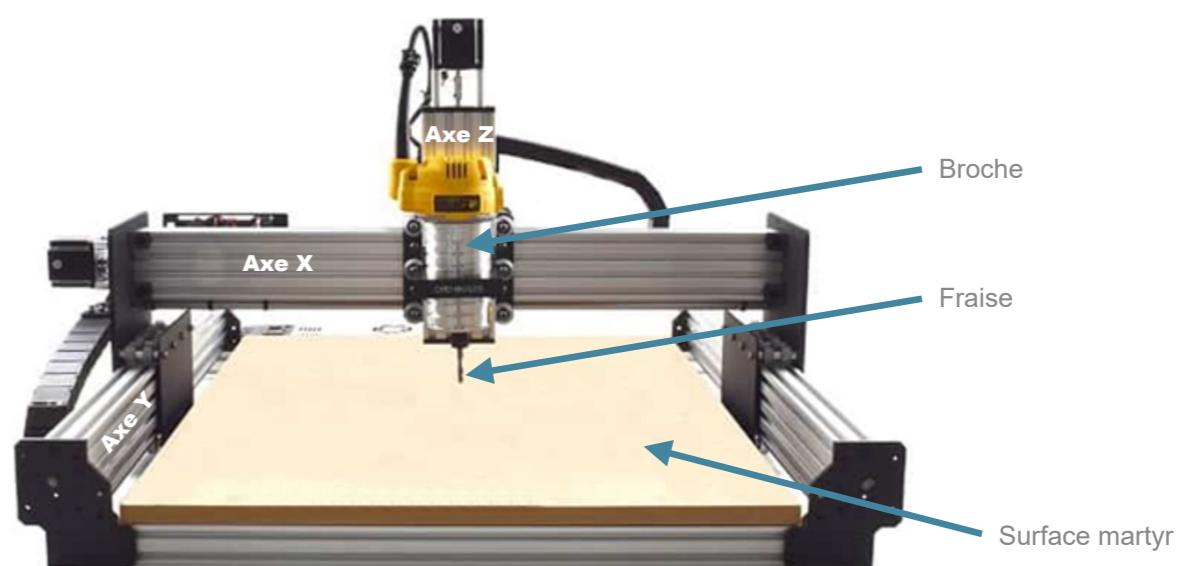
LA FRAISEUSE NUMÉRIQUE

La **surface sur laquelle va être déposé le matériau** s'appelle la **surface martyr**. On lui donne cette appellation car lorsque le matériau va être fraisé et traversé, une partie de la surface martyr le sera également.

Un **moteur**, nommé la **broche** va activer la rotation de l'**objet tranchant** nommé la **fraise**.

Enfin, le **matériau qui va être fraisé** s'appelle le **marbre**.

SCHÉMA TECHNIQUE DU FONCTIONNEMENT
D'UNE FRAISEUSE NUMÉRIQUE





LA FRAISEUSE NUMÉRIQUE

Avec une fraiseuse numérique, on utilise les **matériaux suivants** :

On utilise trois types de **bois** : Le **MDF** qui est un bois aggloméré de faible densité, le **HDF** qui est aussi un bois aggloméré, mais de forte densité et enfin, le **bois brut**.

Il est aussi possible de fraiser du **HDPE**, un plastique usinable.

On peut aussi fraiser de l'**aluminium** ou des plaques de cuivre pour les circuits imprimés, appelés **PCB**.

LES MATÉRIAUX UTILISÉS

Le MDF



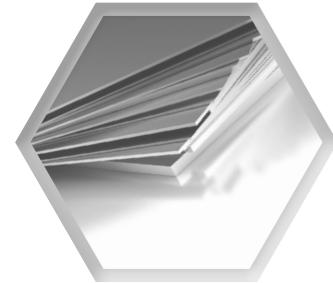
Le HDF



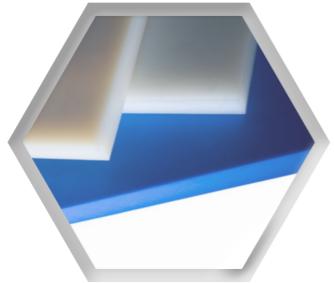
Le bois brut



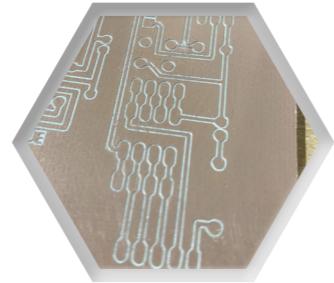
L'aluminium



Le HDPE



Le PCB



2. LES MACHINES À COMMANDE NUMÉRIQUE



WORKFLOW GÉNÉRAL DE LA FABRICATION NUMÉRIQUE

La fabrication numérique mène à une **réflexion sur la matérialité**. Le processus n'est donc **pas linéaire**, comme la production industrielle, mais **itératif**.

Le process commence par la **conception assistée par ordinateur (CAO)**. On va ensuite transférer le modèle 2D ou 3D, dans une forme d'extension de fichier particulière, vers un **logiciel interface machine** qui nous permettra de **générer un Gcode** (pour générer le **parcours d'outils**).

Dans ce **logiciel interface machine**, on viendra également **paramétrier la machine pour la fabrication**, qui sera la phase suivante. Enfin, il faudra souvent prévoir un temps de **post-fabrication**.

A la fin de ce process, on revient à l'étape de la conception CAO pour apporter des **modifications au modèle, si besoin, après sa fabrication**.

2. GÉNÉRATION D'UN CODE PARCOURS D'OUTILS

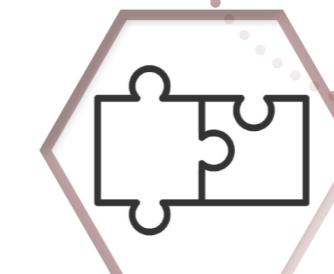
1. CONCEPTION CAO



3. PARAMÉTRAGE MACHINE



5. POST-FABRICATION



4. FABRICATION

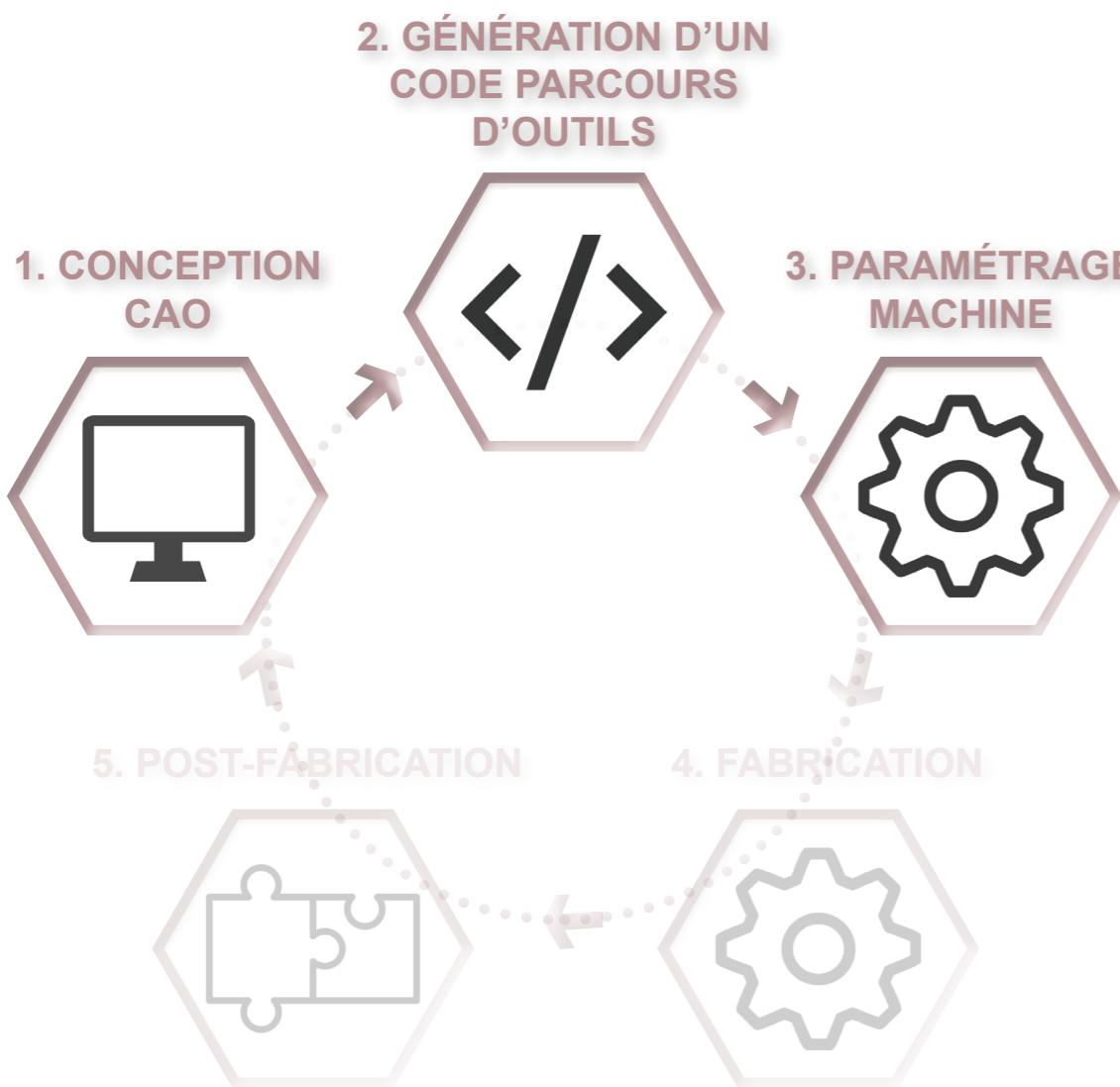




WORKFLOW GÉNÉRAL DE LA FABRICATION NUMÉRIQUE

La première phase du processus est ce qu'on pourrait appeler la **partie "virtuelle"** du projet. A ce moment de la conception, l'objet, en voie de fabrication, n'est qu'une **représentation géométrique abstraite** dans un logiciel de dessin 2D ou de modélisation 3D. Il n'a ni épaisseur, ni échelle, etc.... C'est une **approximation visuelle** de l'objet final.

Dans cette partie du processus itératif, il y a déjà des **risques majeurs d'erreurs**. L'objet conçu peut être **inadapté au mode de fabrication ou à la machine choisie**. Le modèle 2D ou 3D peut également présenter des **erreurs géométriques** et la machine peut **être mal paramétrée** depuis le logiciel interface.



3. WORKFLOW

21

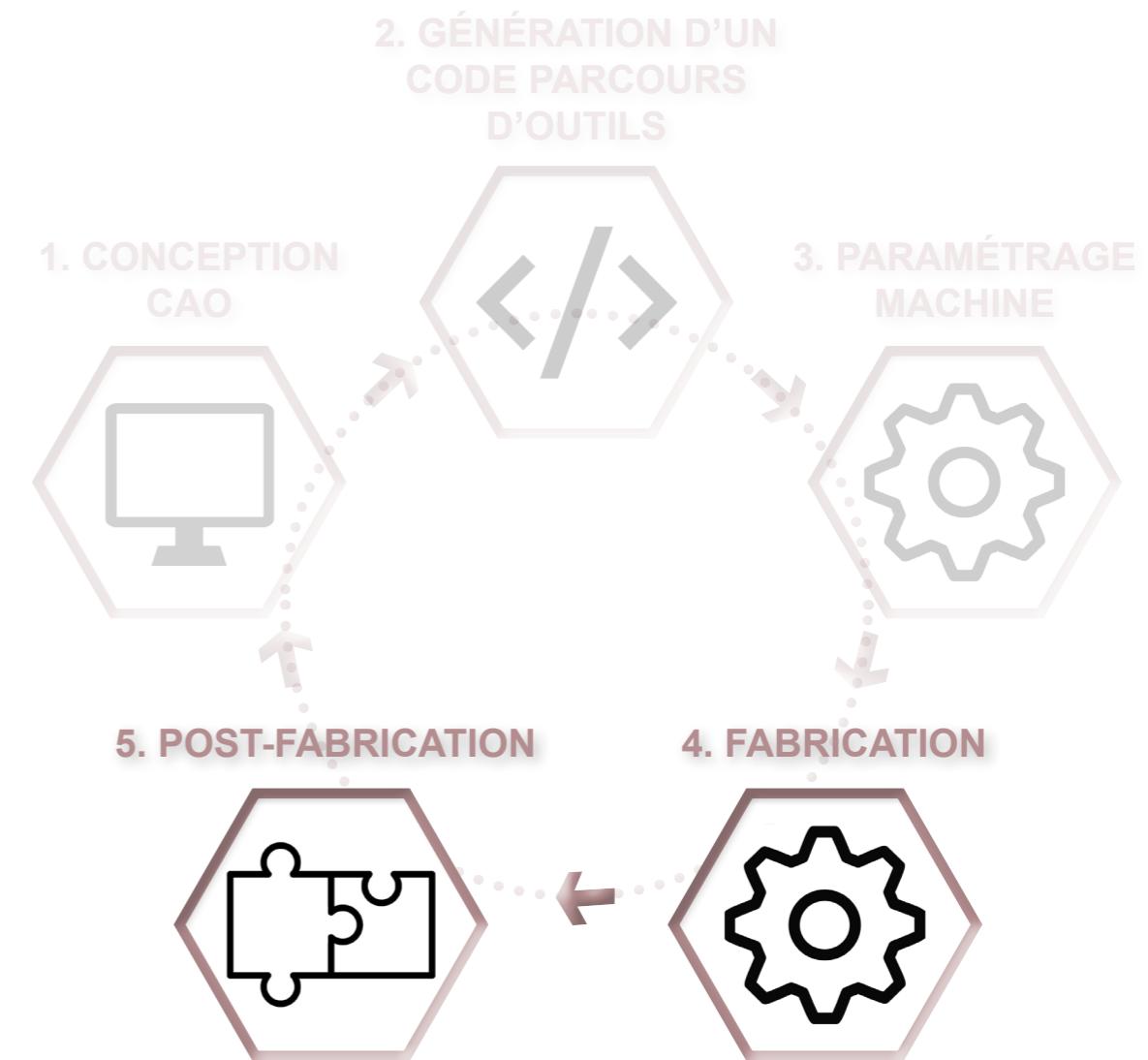


WORKFLOW GÉNÉRAL DE LA FABRICATION NUMÉRIQUE

La deuxième phase du processus est ce qu'on pourrait appeler la **partie "matérielle"** du projet. A ce moment là, l'objet prend une **dimension tangible**. Il a alors une **échelle, une épaisseur, une matérialité, etc....**

Lors de ces étapes, la **machine peut être mal paramétrée manuellement**. Il y a également un **risque d'aléa de mauvaise fabrication**, lié à la **machine en elle-même ou au matériau**. Le bois, par exemple, est un matériau naturel, constitué de fibres, non homogène et anisotrope. Cela peut amener à des complications non prévues lors de la fabrication.

L'ensemble de ces **risques d'erreurs**, rencontrés lors du processus, fait de ce dernier un processus itératif où il est souvent nécessaire de procéder à des répétitions pour arriver à la fabrication finale d'un objet.



3. WORKFLOW

22



CHANGEMENT DE PARADIGME

La fabrication numérique entraîne un **changement de paradigme**, il s'agit d'un **nouveau mode de pensée du faire** qui vient s'opposer à celui de la production industrielle en chaîne.

La fabrication numérique vise la **production d'objet unique et sur-mesure**. Cela rends le **processus de fabrication plus long** que celui de la production industrielle. Le **processus itératif** vient également s'opposer à un **processus linéaire** où la logistique est plutôt importante.

PRODUCTION INDUSTRIELLE

- ▶ Processus linéaire
- ▶ Logistique importante
- ▶ Centralisée
- ▶ Rigidité du process
- ▶ Standardisation
- ▶ Propriété intellectuelle

FABRICATION NUMÉRIQUE

- ▶ Processus itératif
- ▶ Accessible
- ▶ Décentralisée
- ▶ Flexible
- ▶ Unique
- ▶ Ouverte / Open Source

3. WORKFLOW



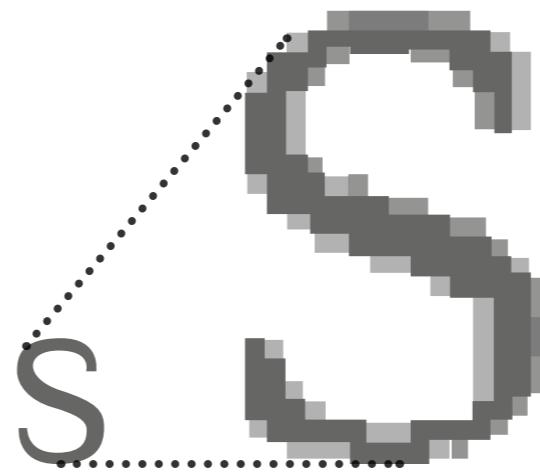
LA DÉCOUPEUSE LASER

La première étape du **workflow** de la découpeuse laser est de **produire un dessin 2D à l'ordinateur**.

Il existe **deux typologies de dessin** : le **dessin matriciel** et le **dessin vectoriel**. Le premier est composé de **pixels**, le deuxième de **vecteurs**.

En l'agrandissant, le dessin vectoriel conservera ses propriétés. Ainsi, le dessin vectoriel conservera sa précision, alors que le matriciel, en diminuant son ratio de pixels, perdra en qualité.

AGRANDISSEMENT D'UNE IMAGE MATRICIELLE



AGRANDISSEMENT D'UNE IMAGE VECTORIELLE





LA DÉCOUPEUSE LASER

Il existe plusieurs logiciels de dessin 2D adaptés au workflow de la découpeuse laser. Nous trouvons quelques exemples ci-dessous. Certains, comme **Tinkercad**, sont accessibles gratuitement.

Quelque soit le logiciel de dessin 2D utilisé, il est d'usage d'exporter son fichier final sous l'**extension .dxf** avant de l'envoyer vers le **logiciel interface machine**.



CORELDRAW



ILLUSTRATOR



INKSCAPE



SKETCHUP



SOLIDWORKS



TINKERCAD



RHINOCEROS



AUTOCAD

4. LA PHASE DE CONCEPTION

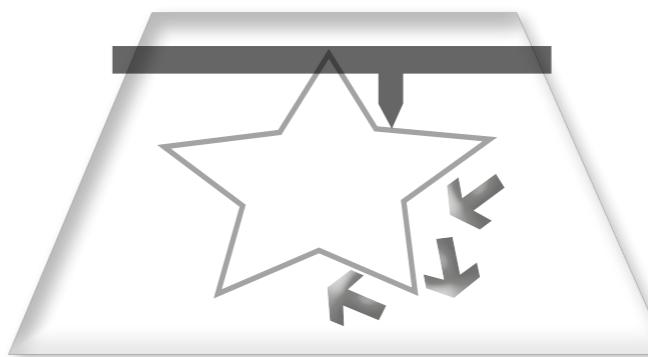


LA DÉCOUPEUSE LASER

Il existe trois typologies de travaux sur une découpeuse laser : la **découpe**, le **marquage** et la **gravure**.

Dans la **découpe** et le **marquage**, la machine va venir marquer le **contour du dessin** dans un déplacement simultané sur les axes **x** et **y**.

Dans la **gravure**, la machine va faire un **balayage sur l'axe x** puis reproduire l'opération en faisant un **décalage sur l'axe y**.



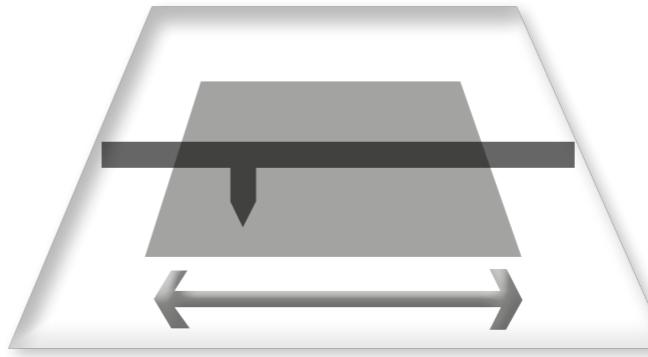
MARQUAGE



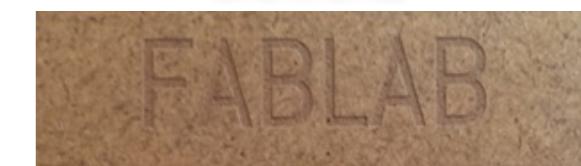
DÉCOUPE



.....



GRAVURE

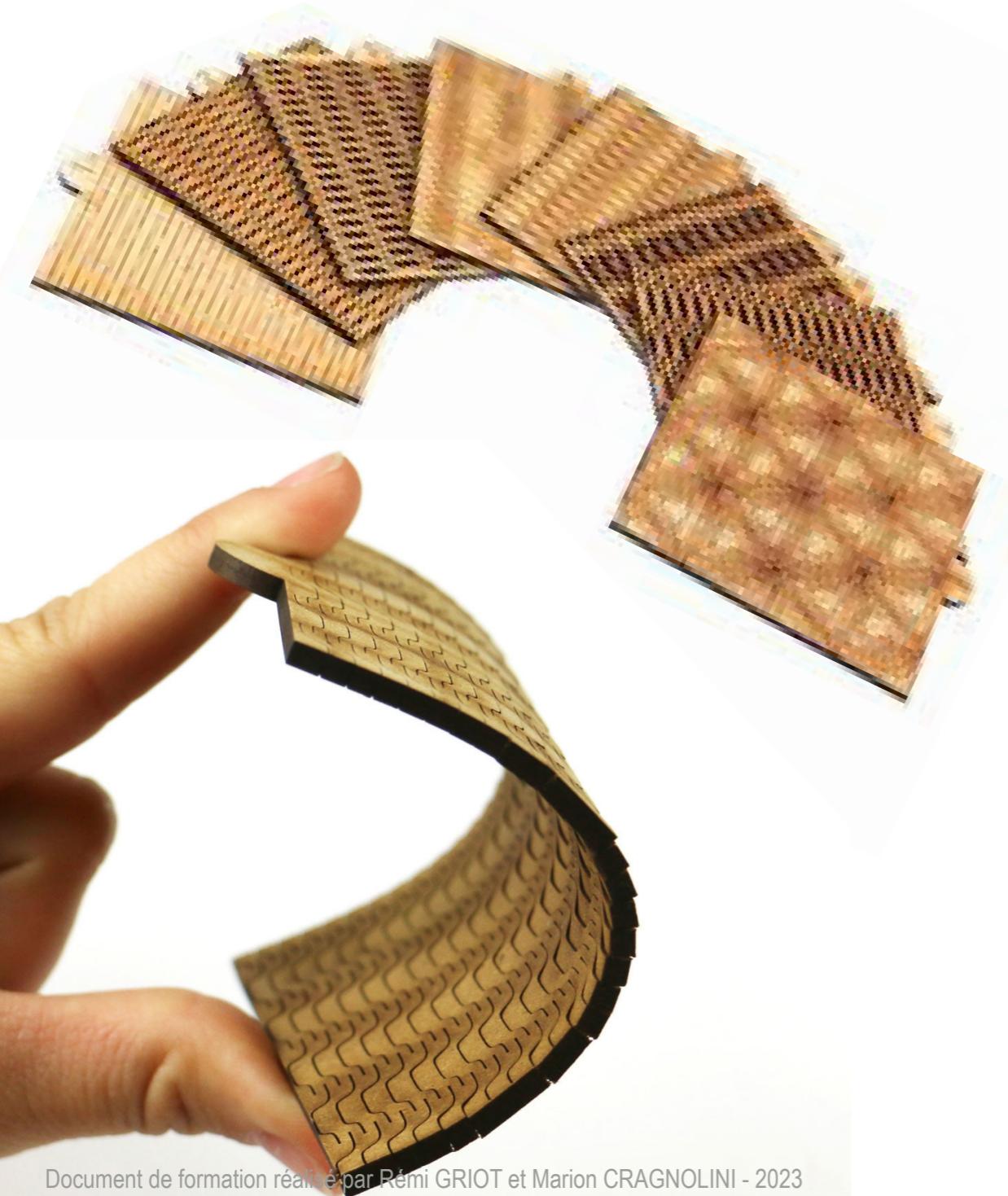




LA DÉCOUPEUSE LASER

L'aspect du matériau et sa flexibilité en fin de production machine dépendent de la conception et du motif (pattern) de coupe utilisé.

Il existe une multitude de patterns permettant de rendre plus ou moins flexible le matériau en lui soustrayant de la matière.

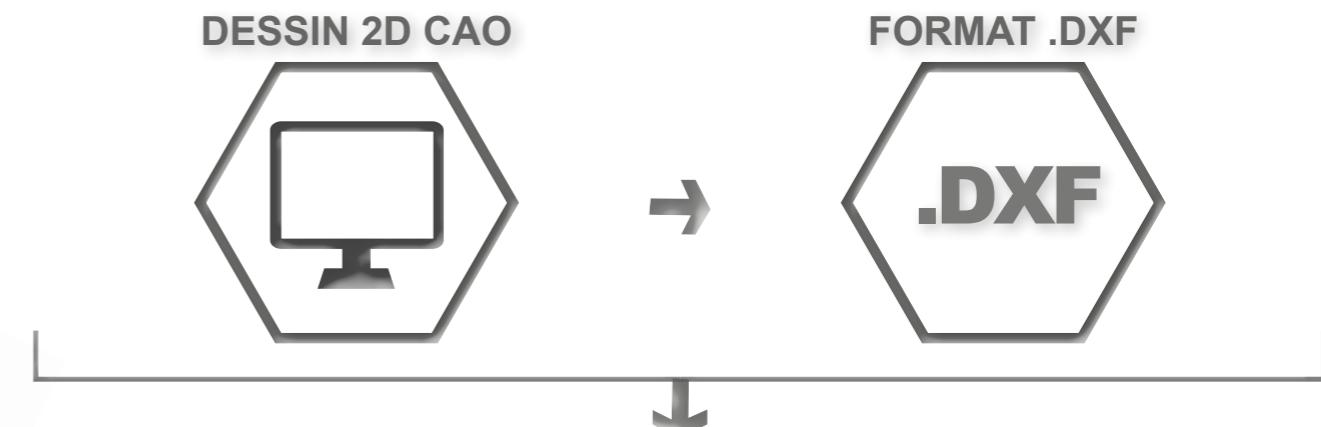


4. LA PHASE DE CONCEPTION



LA DÉCOUPEUSE LASER

Comme vu précédemment, il existe une **multitude d'erreurs possibles** lors de la réalisation du modèle conçu par ordinateur et de son **exportation au format .dxf**. Voici quelques **exemples des erreurs les plus fréquentes** :



COURBES OUVERTES / GÉOMÉTRIE INCOHÉRENTE



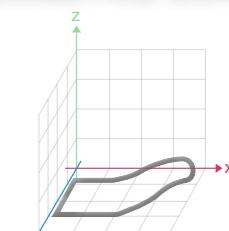
Il faut toujours vérifier que les courbes soient fermées, sinon les travaux de découpe peuvent être compromis.

DOUBLE GÉOMÉTRIE SUR Z



S'assurer que les courbes ne soient pas doublées sur Z, sinon la découpeuse repassera plusieurs fois.

VARIATION DE LA GÉOMÉTRIE SUR Z



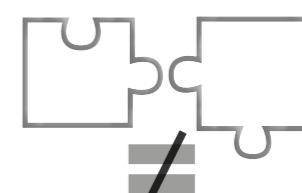
Si les courbes présentent des variations sur Z, il y a des risques de la projection soit fausse.

NON PRISE EN COMPTE DU TRAIT DE COUPE



L'épaisseur du trait de coupe est à prendre en compte pour les assemblages notamment.

INCOHÉRENCE DES ASSEMBLAGES



Attention à ce que le dessin 2D prenne bien en compte l'épaisseur du matériau choisi.



L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

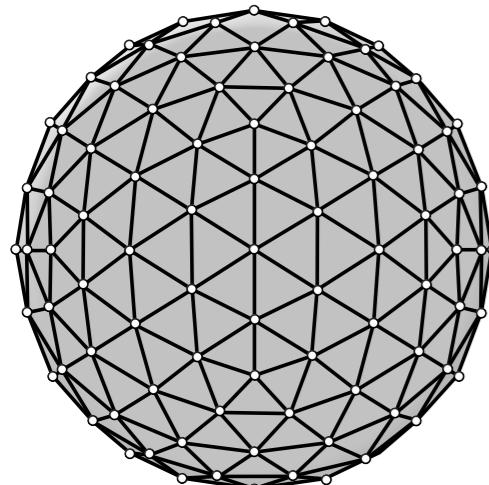
La première étape du workflow pour imprimer un objet en 3D est la **modélisation 3D**.

Il existe **deux typologies de géométrie en modélisation 3D** : les **maillages** et les **surfaces courbes** (les **NURBS**).

Un **maillage** est un ensemble de **sommets, d'arêtes et de faces planes** qui forment ensemble un **objet tridimensionnel**. Dans le cas d'une sphère, on sera toujours sur une **approximation** dont la précision augmentera avec le nombre d'éléments constituant la géométrie.

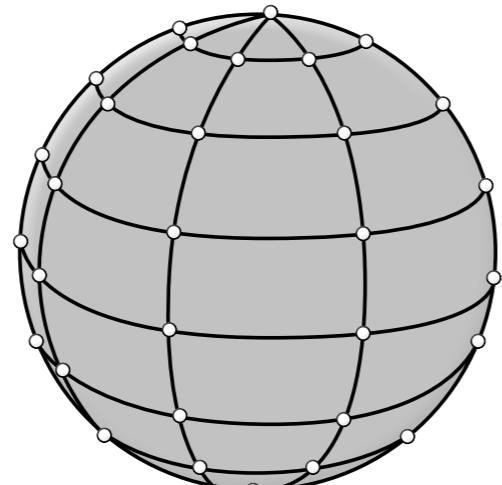
Les **surfaces courbes** ou **NURBS** (Non-Uniform Rational B-Splines) sont des représentations mathématiques de la géométrie en 3D pouvant, à l'inverse, décrire avec une **précision totale** toute forme géométrique. Ces géométries sont constituées de **surfaces construites par des courbes dans deux directions**.

MAILLAGE



- Sommet
- Face
- Arête

**SURFACE COURBE
(NURBS)**



- Point de contrôle
- Sphère NURBS
- Splines

4. LA PHASE DE CONCEPTION



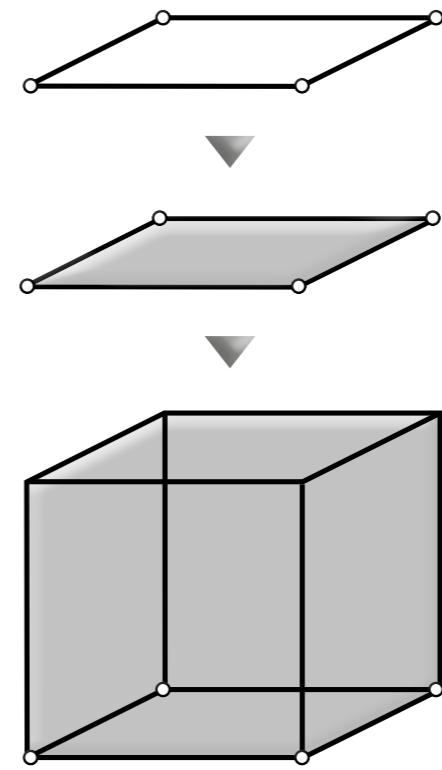
L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

Il existe aussi **deux typologies de processus de modélisation 3D** : la **modélisation 3D paramétrique** et la **modélisation 3D directe**.

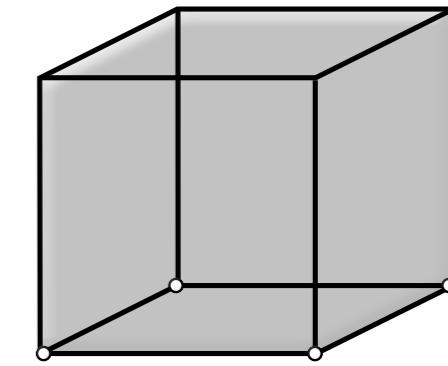
La conception 3D paramétrique permet de définir une entité par des **paramètres qui peuvent être modifiés facilement**. Ces paramètres peuvent être de **plusieurs types** : **intrinsèques** (longueurs, angles), **cartésiens** (coordonnées par rapport à un repère), **situationnels** (distance, angle entre 2 éléments). Une **contrainte** est un **paramètre qu'on ne veut pas modifier**. On a également un **historique dans ces logiciels**, qui permet de retrouver les différentes étapes de fabrication du modèle.

Dans la **modélisation 3D directe**, les **différents objets géométriques** qui composent le modèle **ne sont pas interdépendants**. C'est une typologie à choisir stratégiquement lorsque la **rapidité et la flexibilité de modélisation** sont recherchées.

**MODÉLISATION 3D
PARAMÉTRIQUE**



**MODÉLISATION 3D
DIRECTE**





L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

Ci-dessous, on observe quelques **logiciels de modélisation 3D** classés selon leurs typologies.

MODÉLISATION 3D PARAMÉTRIQUE

SURFACES COURBES (NURBS)



GRASSHOPPER



CATIA

MAILLAGES



GRASSHOPPER



FUSION 360



SOLIDWORKS



CATIA

MODÉLISATION 3D DIRECTE



BLENDER



RHINOCEROS



SKETCHUP



RHINOCEROS



3DS MAX



TINKERCAD

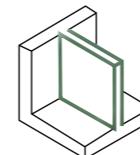
4. LA PHASE DE CONCEPTION



L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

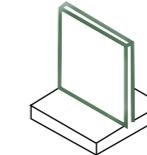
Lorsqu'on modélise en 3D pour de l'**impression de type FDM**, il est important de **respecter certaines règles**. Celles-ci correspondent aux **limites de la machine** et permettent d'éviter les échecs.

Mur soutenu



0,8 mm minimum d'épaisseur

Mur non soutenu



0,8 mm minimum d'épaisseur

Supports et porte-à-faux



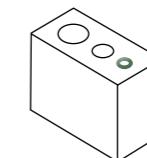
45° angle maximum

Ponts horizontaux



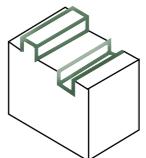
10 mm maximum de long

Trous

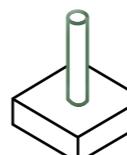


2 mm minimum de diamètre

Détails en relief et gravés

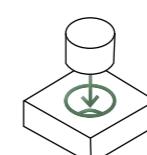
0,6 mm minimum de large
2 mm minimum de haut

Diamètre d'un tube



3 mm minimum de diamètre

Pièces de connexion / mobiles

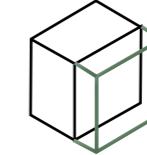


0,5 mm minimum de profondeur



2 mm minimum de large

Tolérance



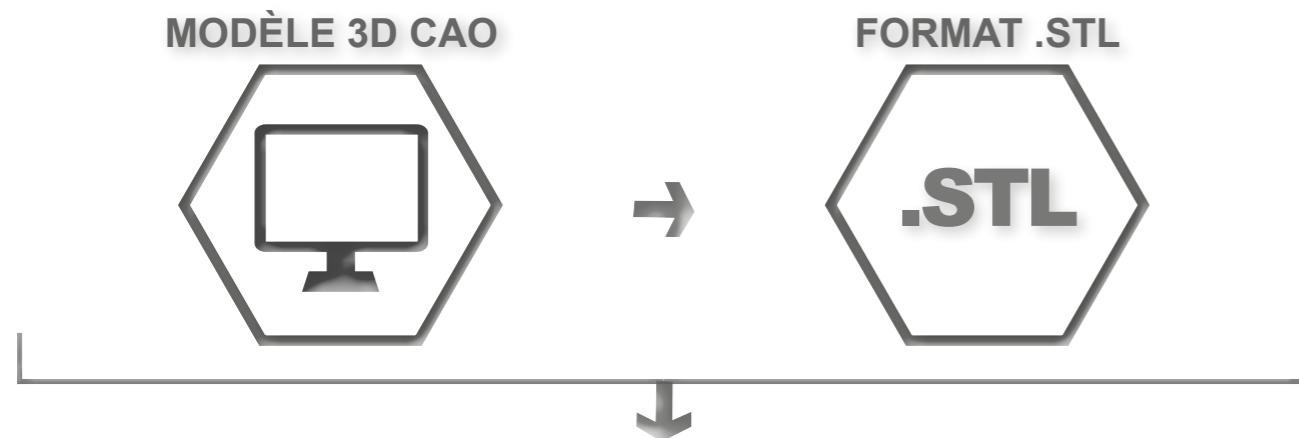
+- 0,5% de tolérance



L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

Une fois le **modèle 3D réalisé**, celui-ci devra être **exporté au format .stl**.

Lors du passage au format **.stl**, la **géométrie est transformée en maillage**. Il est possible de **choisir le nombre de triangles** qui composeront la géométrie et ainsi la **précision** de celle-ci.



Lorsque la géométrie d'origine est constituée uniquement de surfaces planes, comme un cube, par exemple, le maillage en .stl exporté sera totalement fidèle.



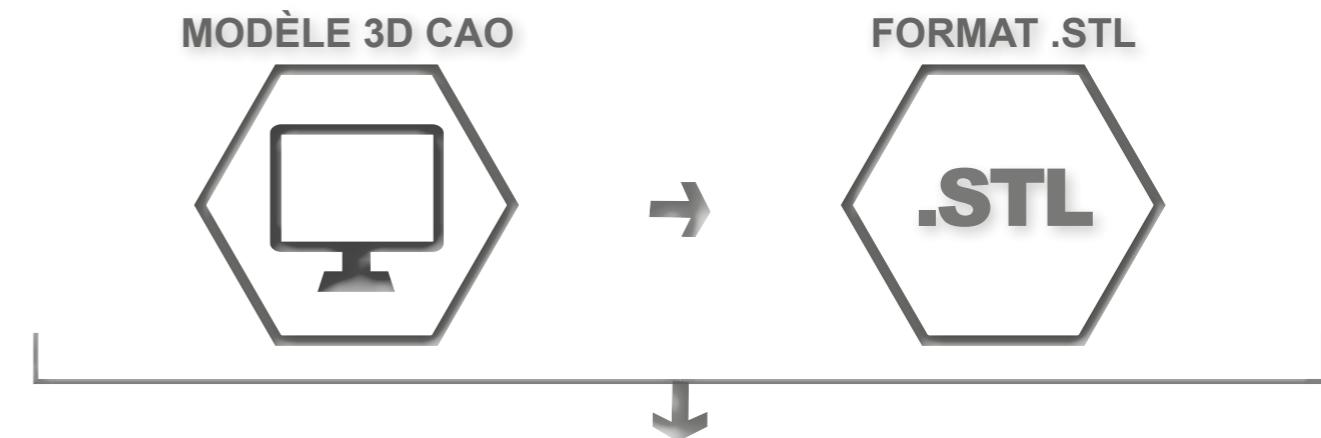
Lorsque la géométrie d'origine est une surface courbe, comme une sphère, par exemple, le maillage en .stl sera une approximation de la géométrie. Plus le nombre de triangles qui constituent le maillage sera élevé, plus le maillage se rapprochera de la géométrie d'origine. Attention, à l'inverse du cube, il y aura une variation sur les dimensions de la géométrie.

4. LA PHASE DE CONCEPTION

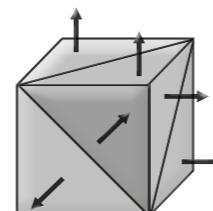


L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

Il existe une **multitude d'erreurs possibles** lors de la réalisation du modèle 3D conçu par ordinateur et de son **exportation au format .stl**. Voici quelques **exemples des erreurs les plus fréquentes** :



TRIANGLE INVERSÉ



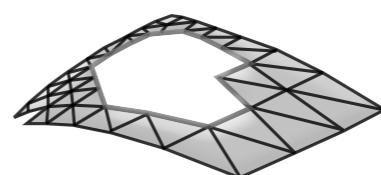
Un triangle dont la normale est inversée (vers l'intérieur) provoquera certainement un bord imprécis.

TRIANGLES NON RELIÉS



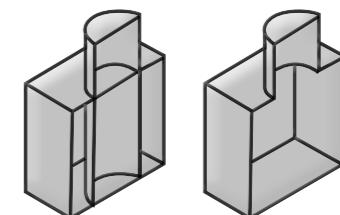
Parfois, l'arête d'un triangle n'est pas bien connectée, c'est un bord imprécis et discontinu.

TROUS PLANAIRES



Les trous planaires se produisent lorsque des triangles ou des parties de géométrie manquent.

COQUES



Le chevauchement des coques est une erreur assez courante et peut créer des problèmes lors du tranchage.



LA FRAISEUSE NUMÉRIQUE

La fraiseuse numérique est capable, via un logiciel interface machine, d'identifier un **dessin en deux dimensions** sur lequel elle viendra créer un **parcours d'outils**. La méthode de dessin 2D est identique à celle utilisée par la découpeuse laser, mais se limite au **dessin vectoriel**.

Les informations sur les **logiciels de dessin 2D** sont contenues en [page 25](#) et les **erreurs fréquentes** de conception à éviter en [page 28](#) de ce document.

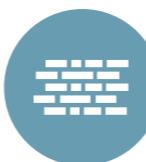


Il est également possible de concevoir un **modèle 3D** pour fabriquer un objet à la fraiseuse numérique. Dans ce cas de figure, le **parcours d'outils sera déterminé pour avoir la plus grande approximation avec le modèle 3D importé**.

Les informations sur les **logiciels de modélisation 3D** sont contenues en [page 31](#) et les **erreurs fréquentes** de conception à éviter en [page 34](#) de ce document.

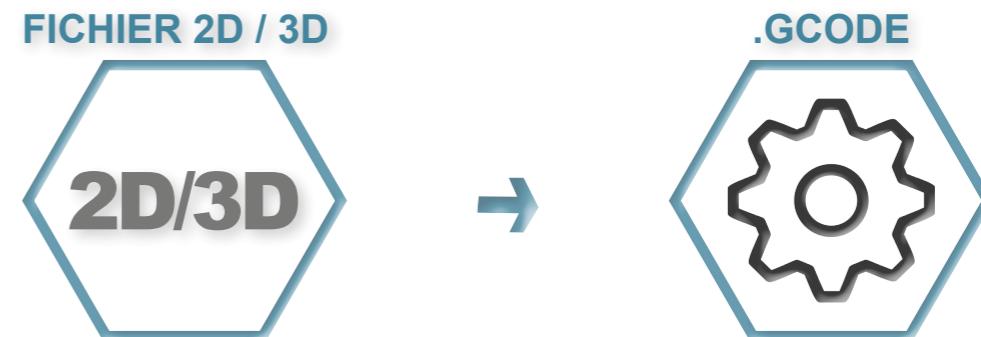


4. LA PHASE DE CONCEPTION



LE GCODE

Lorsqu'un **fichier à fabriquer** est généré, il faudra le transformer, la plupart du temps, en **.gcode** pour que le **parcours d'outils** soit compris et **interprété par la machine** à commande numérique.



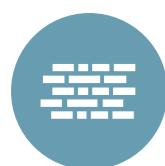
À l'origine, le langage de programmation était le **G-code**, développé par l'**EIA** au début des années **1960**, et finalement **normalisé** par l'**ISO** en février **1980** sous la référence **RS274D/ (ISO 6983)**.

Développé à l'origine pour des **machines-outils** agissant par **enlèvement de matière**, le **code ISO** est désormais utilisé dans un **domaine très vaste de la fabrication**, avec des adaptations :

- **usinage par enlèvement de matière** : tournage, fraisage, perçage, gravure, défonçage...
- **découpe avec** : couteau, laser, jet d'eau, plasma, flamme ou oxydation...
- **poinçonnage**
- **Impression 3D** : par dépôt de matière, durcissement d'une résine...

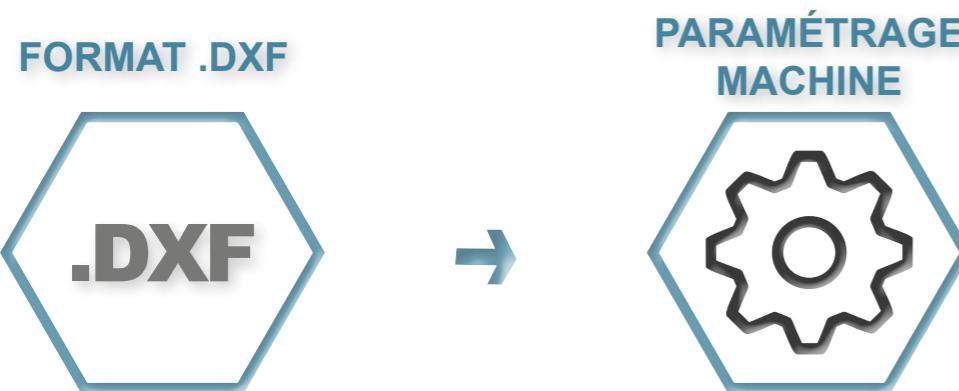
POUR ALLER PLUS LOIN





LA DÉCOUPEUSE LASER

Une fois le fichier exporté au format .dxf, il est envoyé vers un **logiciel interface machine**. Dans celui-ci, le **dessin 2D** va être paramétré pour l'envoi vers la découpeuse laser. A l'issue du paramétrage, le fichier sera **exporté en .Gcode et envoyé vers la machine** pour la fabrication.



#	R	V	B	Energie
1. (Noir)	0	0	0	Gravure (max)
2. (Rouge)	255	0	0	Découpe (max)
3. (Vert)	0	255	0	Marquage (max)
4.	255	255	0	
5.	0	0	255	
6.	255	0	255	
7.	0	255	255	
etc...	x	x	x	

Dans le **logiciel interface machine**, on vient définir la **couleur des traits** pour leur attribuer une typologie : **découpe, marquage ou gravure**. De manière universelle, il est admis que la **découpe est représentée par des traits rouges**, le **marquage des traits verts** et la **gravure par un remplissage noir** (on peut utiliser toutes les couleurs pour la gravure, mais il faudra paramétriser le logiciel en conséquence).

Cela permet de régler ensuite le **couple puissance / vitesse** de la machine en fonction de la couleur de trait ou du remplissage choisi.

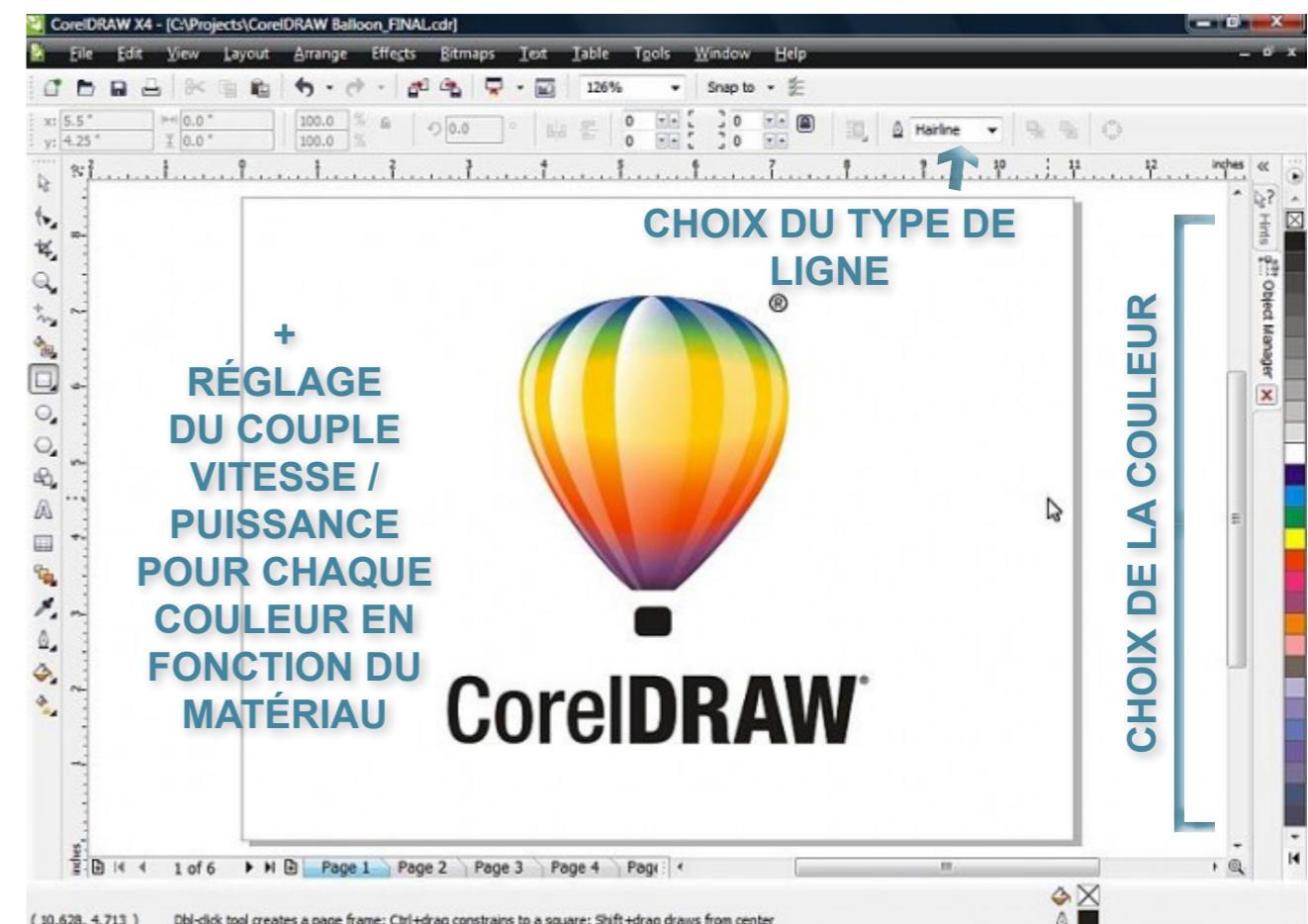
5. LA PHASE DE FABRICATION



LA DÉCOUPEUSE LASER

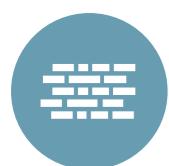
Un des logiciels interfaces de la découpeuse laser est **CorelDraw**. C'est le logiciel utilisé à l'Innovation Lab.

Ci-dessous, on observe l'interface du logiciel, où il va être possible d'**importer le dessin 2D** et de **régler les épaisseurs des lignes, les couleurs et les remplissages**.



La machine, lue depuis l'ordinateur comme une imprimante classique, va recevoir le .Gcode et être en mesure de lancer la production.

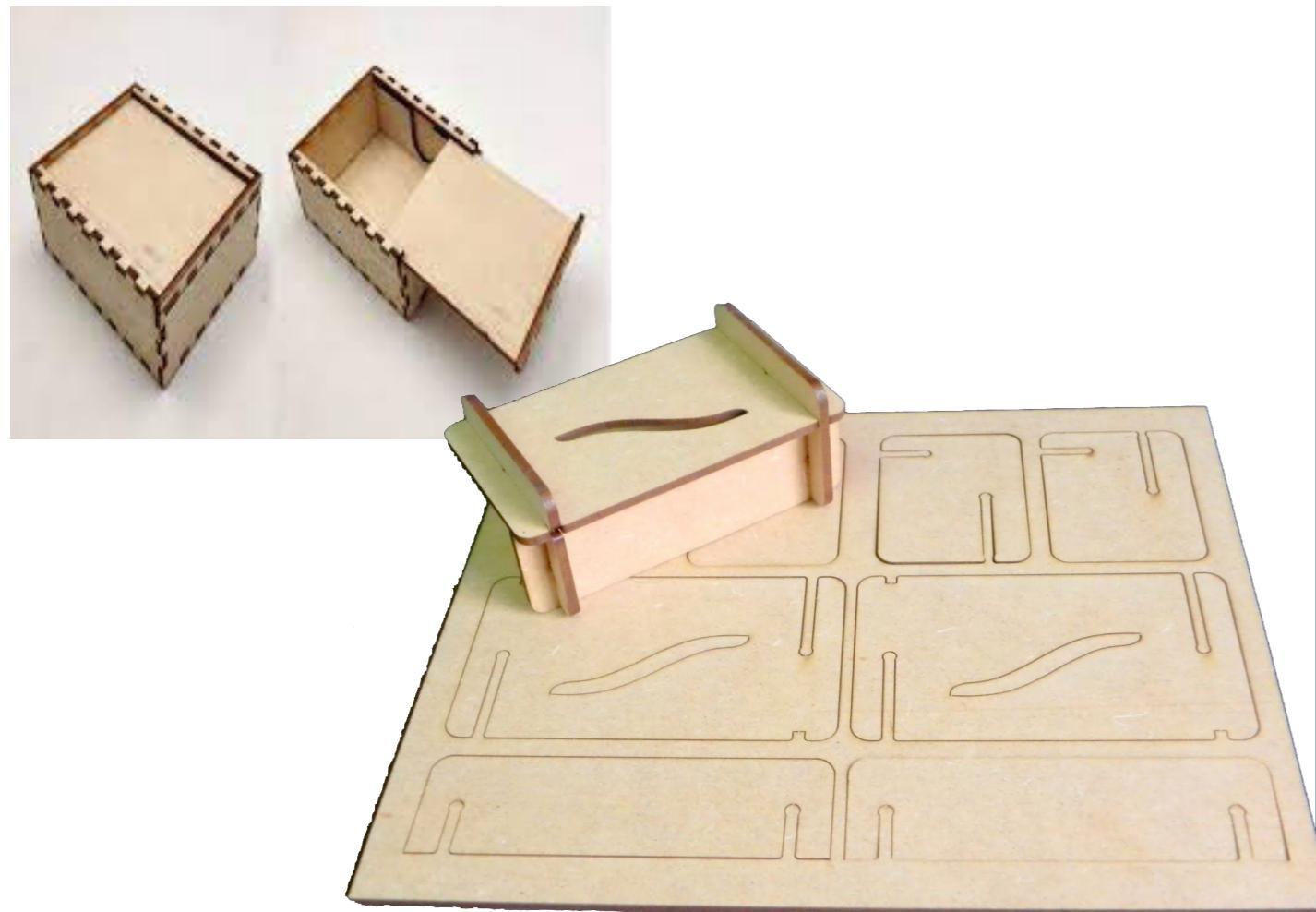
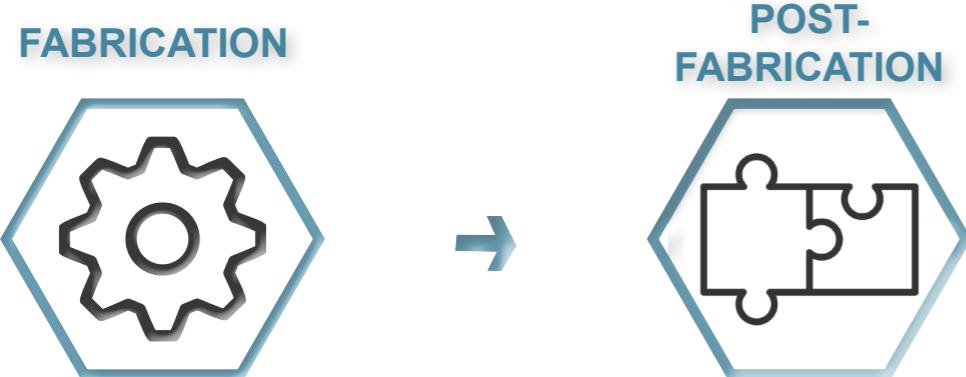
Elle fera d'abord une **mise au point de la distance focale** en fonction de l'épaisseur du matériau puis **lancera le travail**.



LA DÉCOUPEUSE LASER

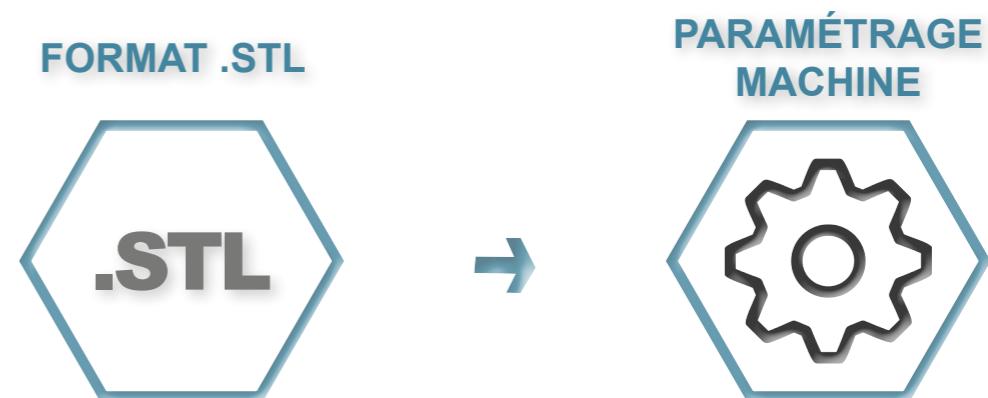
Une fois la fabrication réalisée, il y aura souvent une phase de post-fabrication visant à assembler des éléments plans entre eux.

A l'issue de cette phase, la boucle itérative revient vers la conception 2D CAO, si des ajustements sont nécessaires.



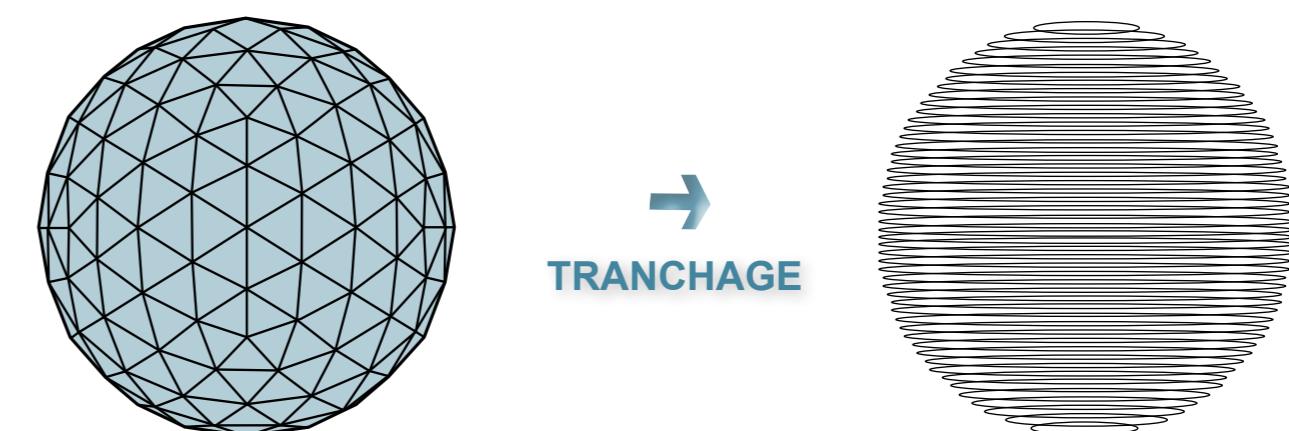
L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

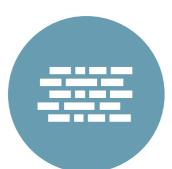
Une fois le fichier exporté au format .stl, il est envoyé vers un logiciel interface machine, appelé un **slicer**. Dans celui-ci, le maillage va être paramétré pour l'envoi vers l'imprimante 3D. A l'issue du paramétrage, le fichier sera exporté en **.Gcode** et envoyé vers la machine pour la fabrication.



A cette étape du processus, les **paramètres d'impression 3D** vont être intégrés et le maillage va être découpé en **tranches** qui vont correspondre aux différentes **couches de filament** déposées lors de la fabrication.

Ce processus s'appelle le **tranchage**.

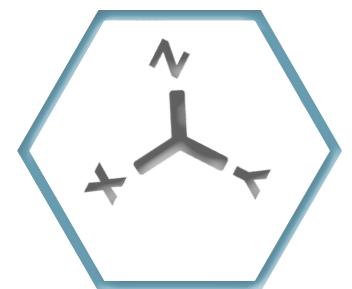




L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

Pour arriver au **processus de tranchage**, il faut définir plusieurs **paramètres d'impression 3D** dans le logiciel **slicer** : l'orientation de la pièce, le ou les matériaux utilisés, les supports, le mode d'adhérence au plateau, la température de la buse et du plateau, la hauteur de couche, le type de remplissage et sa densité, l'épaisseur de coque, la vitesse d'impression, etc....

ORIENTATION



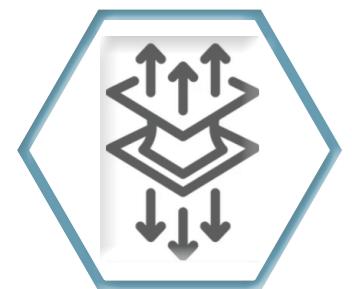
MATÉRIAUX



SUPPORTS



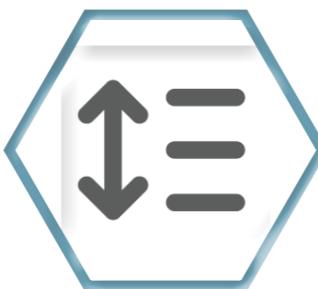
ADHÉRENCE



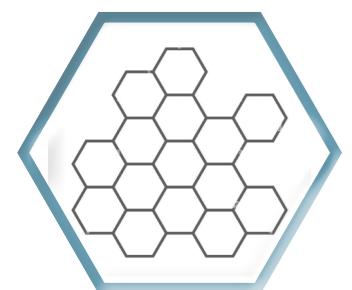
TEMPÉRATURE



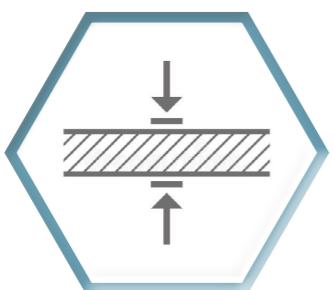
ÉPAISSEUR DE COUCHE



REMPISSAGE



COQUE



VITESSE D'IMPRESSION



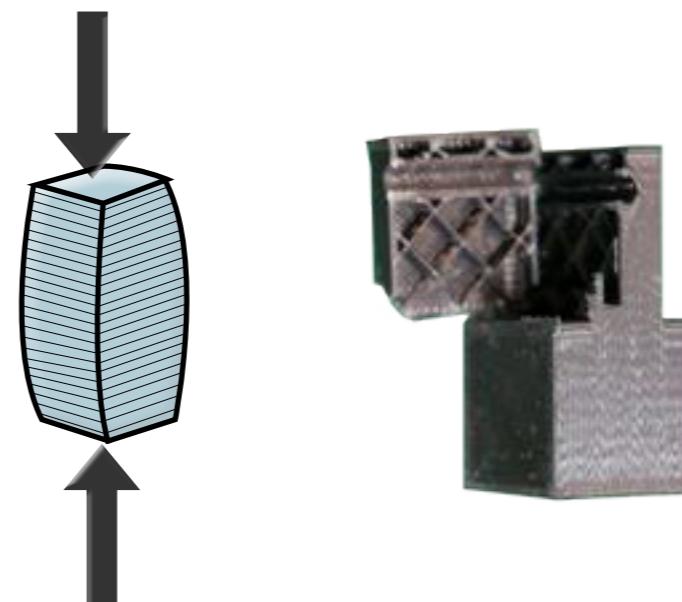
5. LA PHASE DE FABRICATION



L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

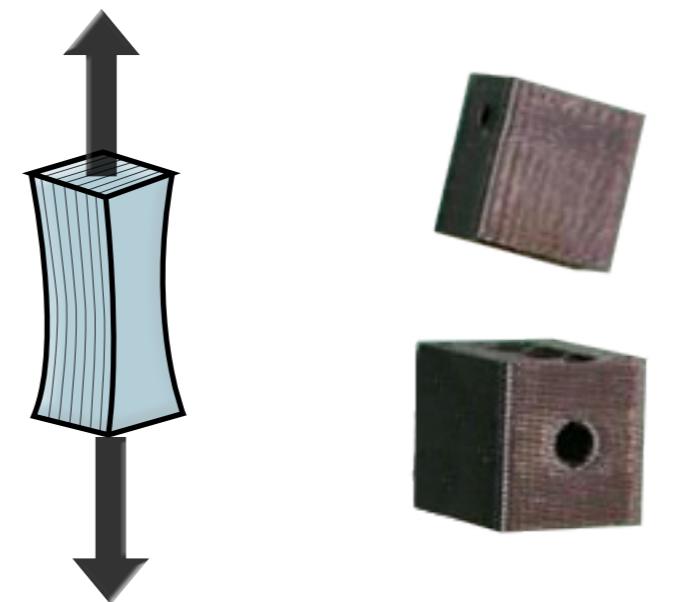
Chaque pièce imprimée en 3D est, par définition, **anisotrope**. Pour illustrer l'importance des paramètres de tranchage et donc d'impression 3D, nous pouvons voir comment **l'orientation de la pièce influe sur le résultat final**, par exemple. Pour un objet étant imprimé en 3D, l'**orientation des couches va modifier sa résistance en fonction des forces qui lui seront imposées**, la fragilité d'une pièce se situant à l'inter-couche.

COMPRESSION

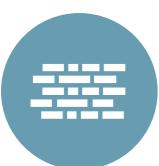


Dans le cas d'une pièce mal orientée, la résistance en compression sera moindre et la pièce sera écrasée en cassant à divers endroits de l'inter-couche.

TRACTION

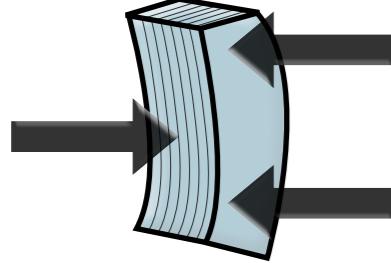


Dans le cas d'une pièce mal orientée, la résistance en traction sera moindre et la cassure se fera de manière nette à l'inter-couche la plus fragile.



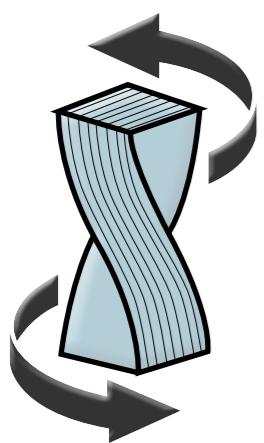
L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

FLEXION



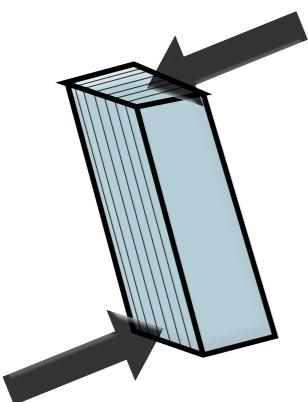
Dans le cas d'une pièce mal orientée, la résistance en flexion sera moindre et la pièce cassera de manière nette à l'inter-couche au niveau de la flèche.

TORSION



Dans le cas d'une pièce mal orientée, la résistance en torsion sera moindre et la pièce cassera à plusieurs endroits de l'inter-couche.

CISAILLEMENT



Dans le cas d'une pièce mal orientée, la résistance en cisaillement sera moindre et la pièce cassera à plusieurs endroits de l'inter-couche.

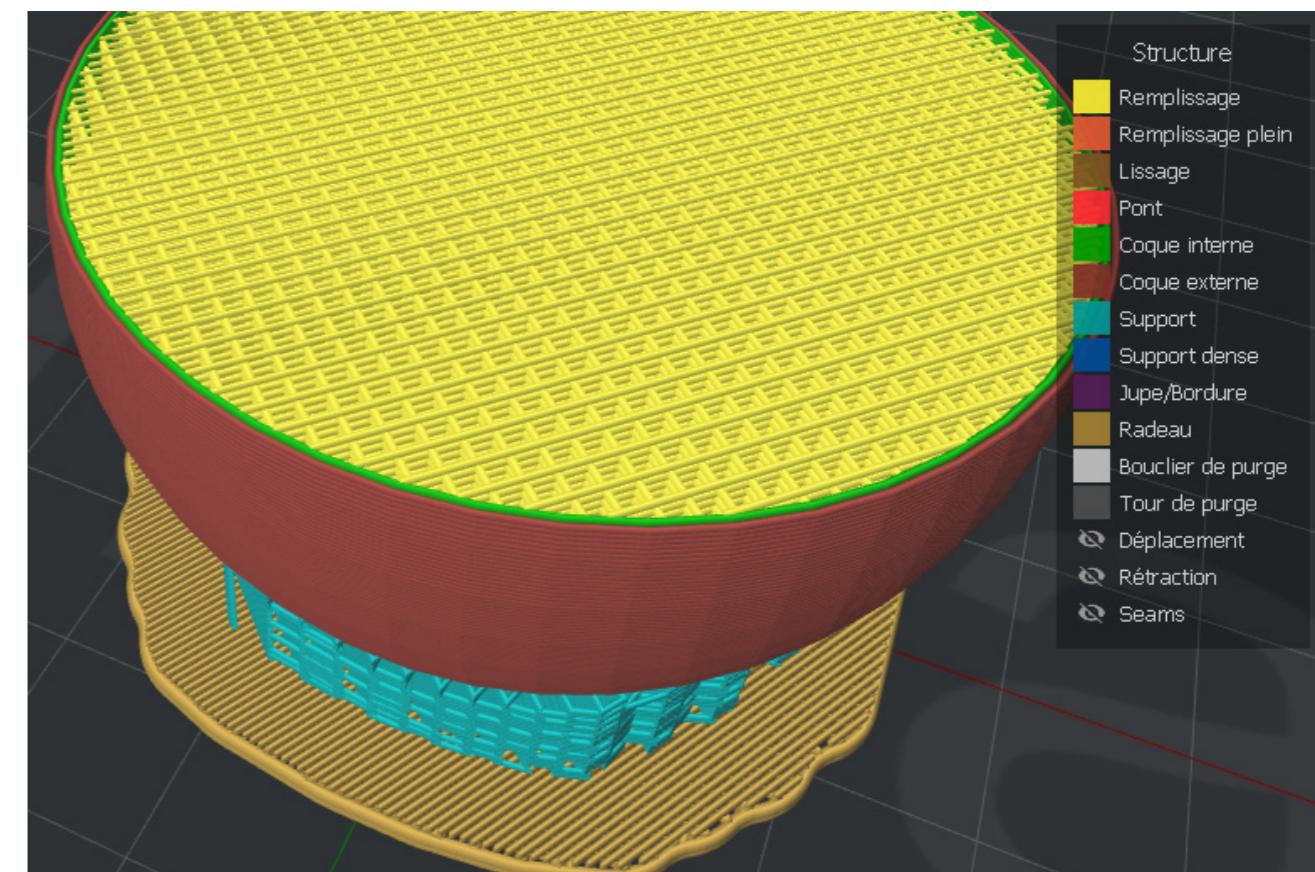
5. LA PHASE DE FABRICATION



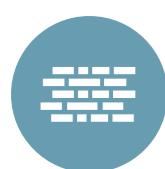
L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

Un des logiciels interfaces de l'imprimante 3D FDM est **IdeaMaker**. C'est le logiciel utilisé à l'Innovation Lab.

Ci-dessous, on observe l'interface du logiciel, nous permettant d'obtenir une **prévisualisation de l'impression 3D avant son envoi vers la machine**. On peut voir, ci-dessous, les différents **calques de la structure** de l'objet à imprimer en 3D.



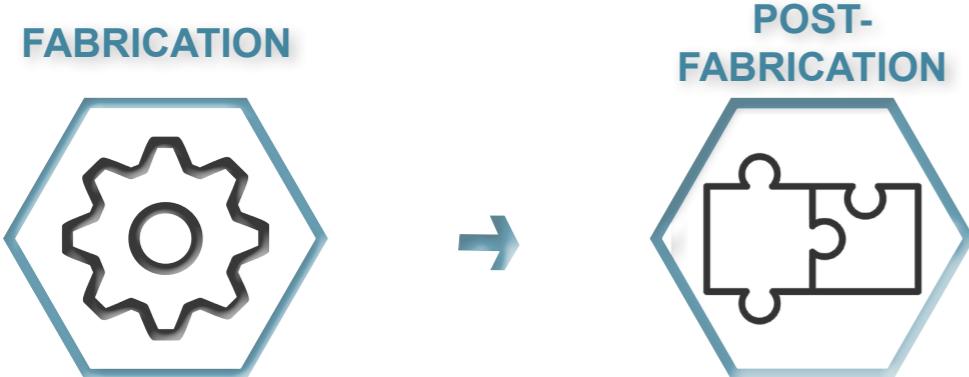
Une fois le **.gcode généré par le slicer**, la fabrication pourra être lancée. La machine fera d'abord une **mise à niveau sur Z du plateau**, puis la **buse** et le **plateau** vont atteindre leur **température d'impression**. l'imprimante 3D FDM lancera ensuite le travail.



L'IMPRIMANTE 3D (FDM)

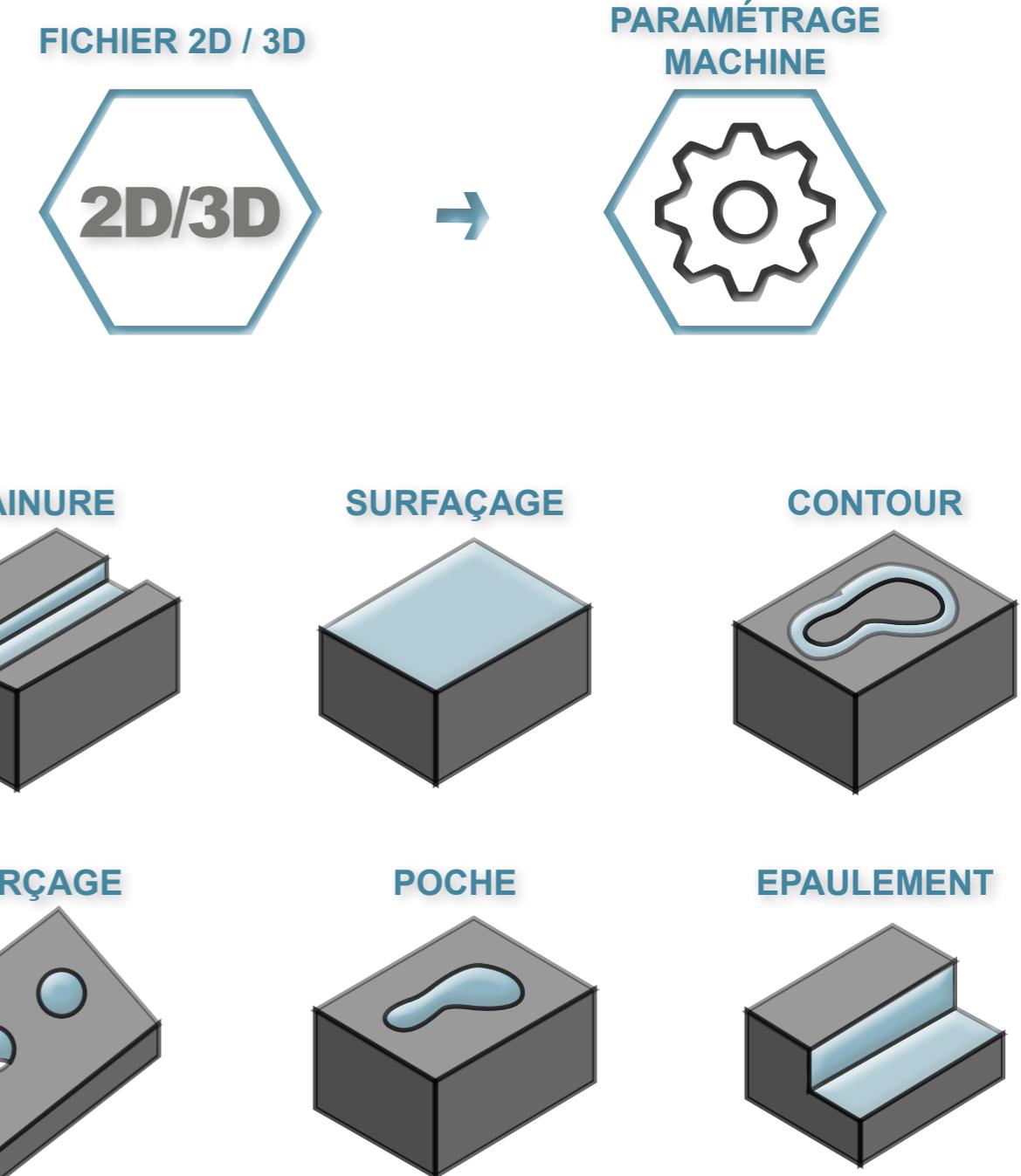
Une fois la fabrication réalisée, il y aura souvent une **phase de post-fabrication** visant à **nettoyer la pièce de tous les éléments servant à son maintien et à son adhérence** (supports, radeau, etc...).

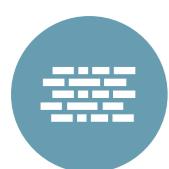
A l'issue de cette phase, la **boucle itérative** revient vers la **conception 3D CAO**, si des ajustements sont nécessaires.



LA FRAISEUSE NUMÉRIQUE

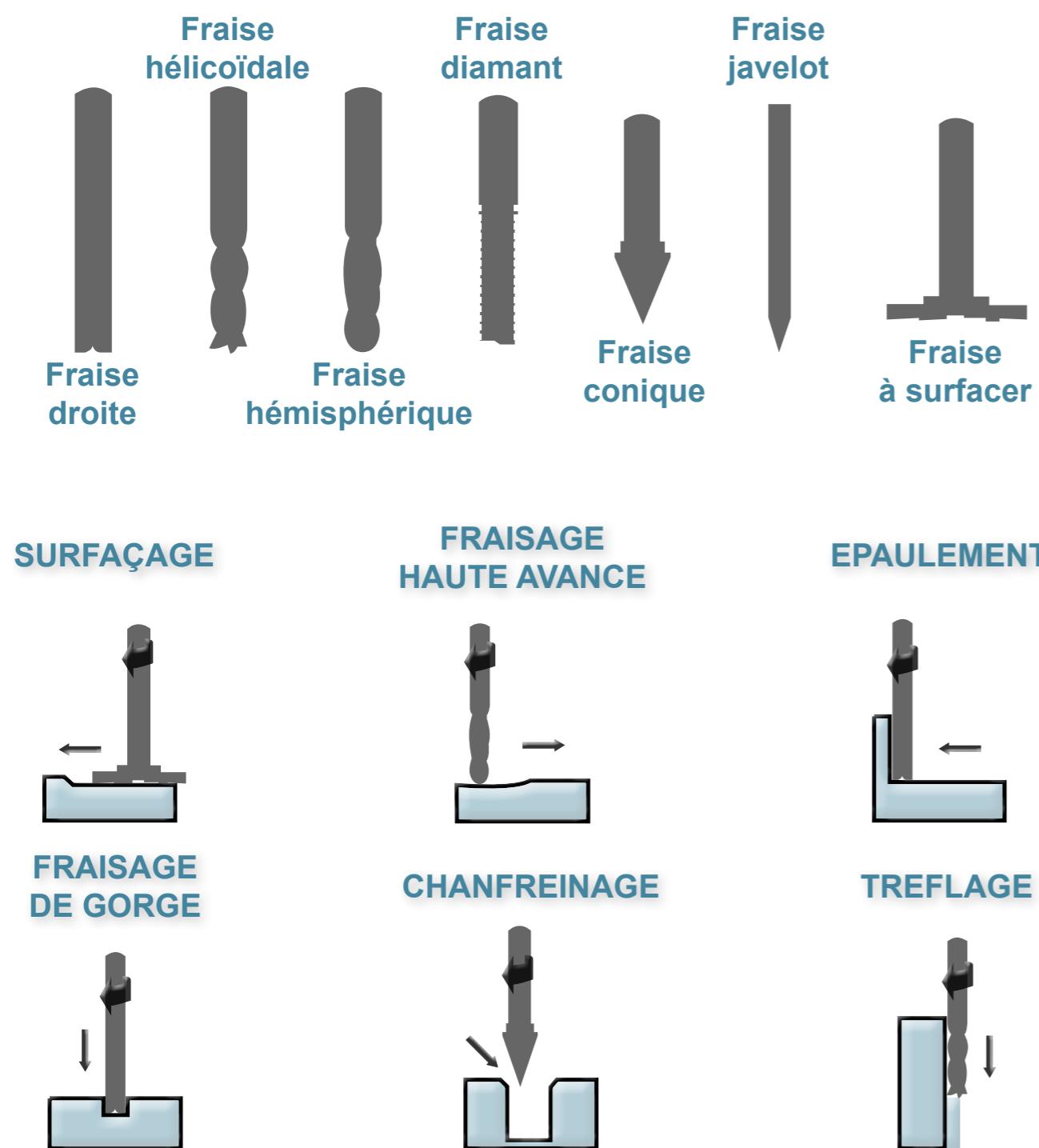
Une fois le fichier 2D ou 3D exporté au **format .dxf ou .stl**, il est envoyé vers un **logiciel interface machine**. Dans celui-ci, le **fichier 2D ou 3D** va être paramétré pour l'envoi vers la fraiseuse numérique. S'il s'agit d'un **fichier 2D**, le **parcours d'outils** sera défini par rapport au **contour**. S'il s'agit d'un **fichier 3D**, le paramétrage consistera à **fabriquer l'objet tel qu'il apparaît dans le logiciel**. Lors du paramétrage du **parcours d'outils**, il est possible de **choisir une des typologies** (liste non exhaustive) pour le **fraisage**. A l'issue du paramétrage, le fichier sera **exporté en .Gcode** et **envoyé vers la machine** pour la fabrication.





LA FRAISEUSE NUMÉRIQUE

Lors du **paramétrage** et de la **création du parcours d'outils**, il est important de **choisir la bonne fraise** et ses **bonnes caractéristiques dans le logiciel interface machine**. En fonction de leur **forme**, de leur **taille**, etc... Les fraises vont être adaptées à des **types de travaux** et des **matériaux différents**. On observe, ci-dessous, quelques **exemples de fraises** et de leur **utilisation**.



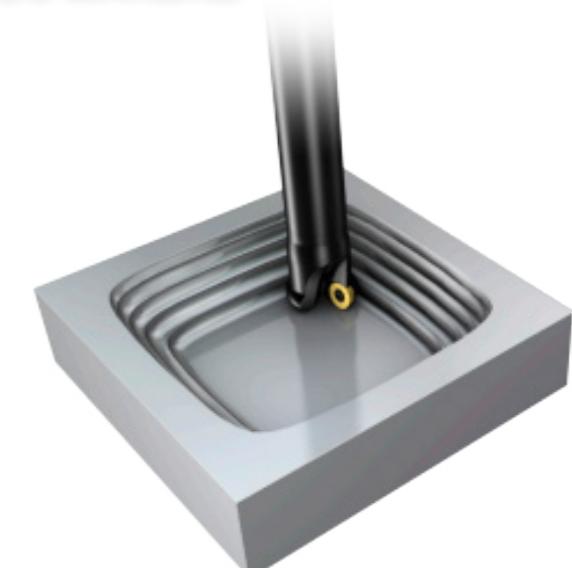
LA FRAISEUSE NUMÉRIQUE

Une même pièce peut être **fraisée en plusieurs étapes**. Si on souhaite, par exemple, surfacer le marbre, ensuite le dégrossir puis le lisser, on paramétrera trois phases de travail dans le logiciel interface machine. **Chaque phase pourra être associée à l'utilisation d'une fraise différente et aura son propre .gcode**.

Cela induit, par rapport à la découpeuse laser et à l'imprimante 3D FDM, qu'il y aura possiblement, lors de la fabrication d'une pièce avec une fraiseuse numérique, des **aller-retours fréquents entre le paramétrage interface machine** (génération de .gcode étape par étape) et **la machine** (changement de fraise à chaque étape).

EXEMPLE D'ÉTAPE 1 DE FRAISAGE DU MARBRE

L'ÉBAUCHE



Fraise à bout plat pour dégrossir le marbre



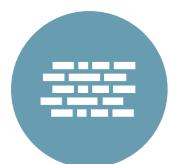
EXEMPLE D'ÉTAPE 2 DE FRAISAGE DU MARBRE

LE SMOOTHING



Fraise à bout sphérique pour lisser le marbre

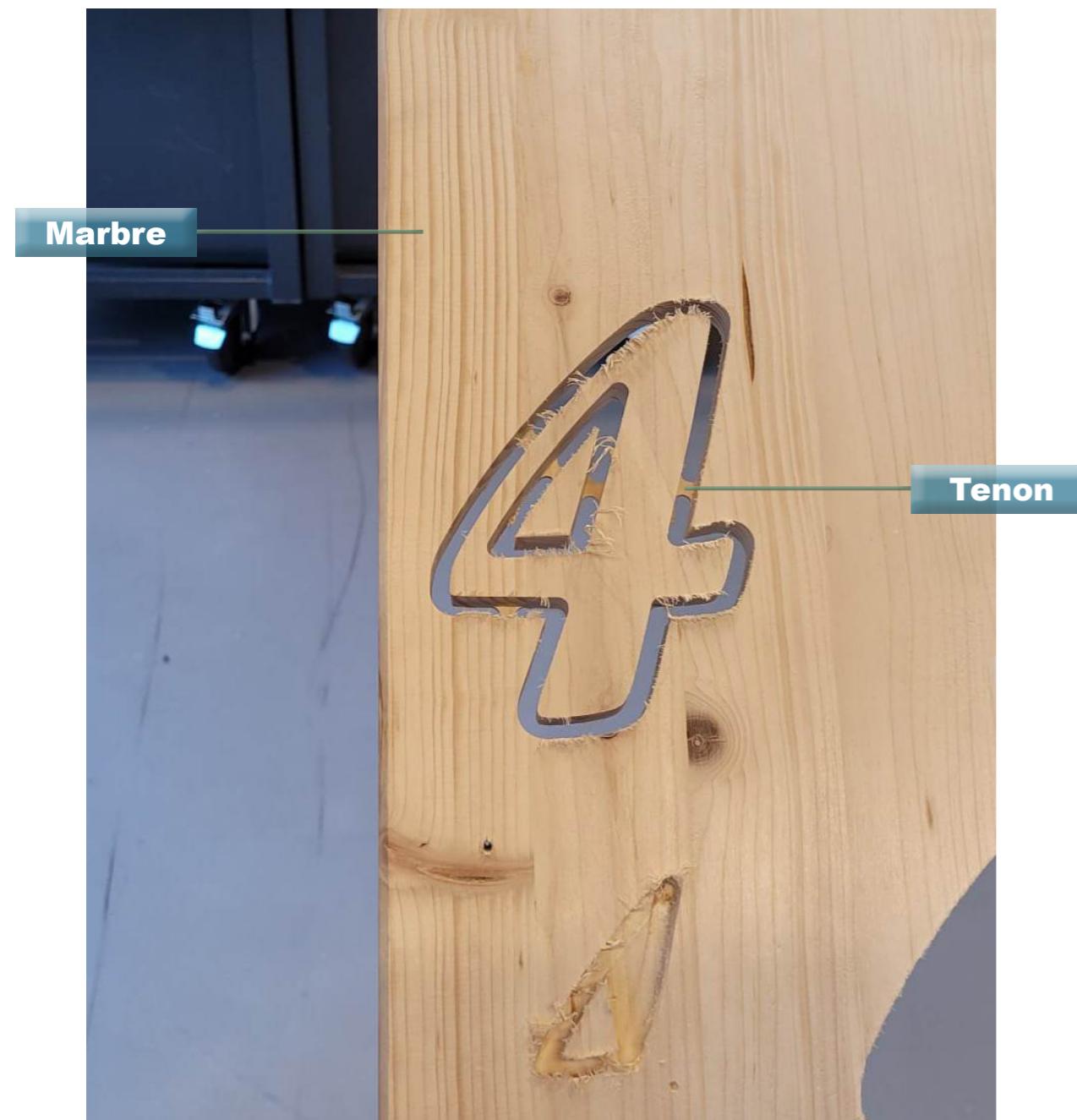




LA FRAISEUSE NUMÉRIQUE

Le fraisage demandera parfois aussi une phase de **post-fabrication**. Dans la fabrication de cette pièce, la fraise est passée totalement à travers le marbre et a ainsi découpé en partie la surface martyr. Pour permettre à la pièce de rester en place lors du fraisage, des **tenons** ont été disposés pendant la préparation du Gcode.

A l'issue du fraisage, il s'agira de **couper les tenons** et de **poncer la pièce** pour qu'elle soit lissée.



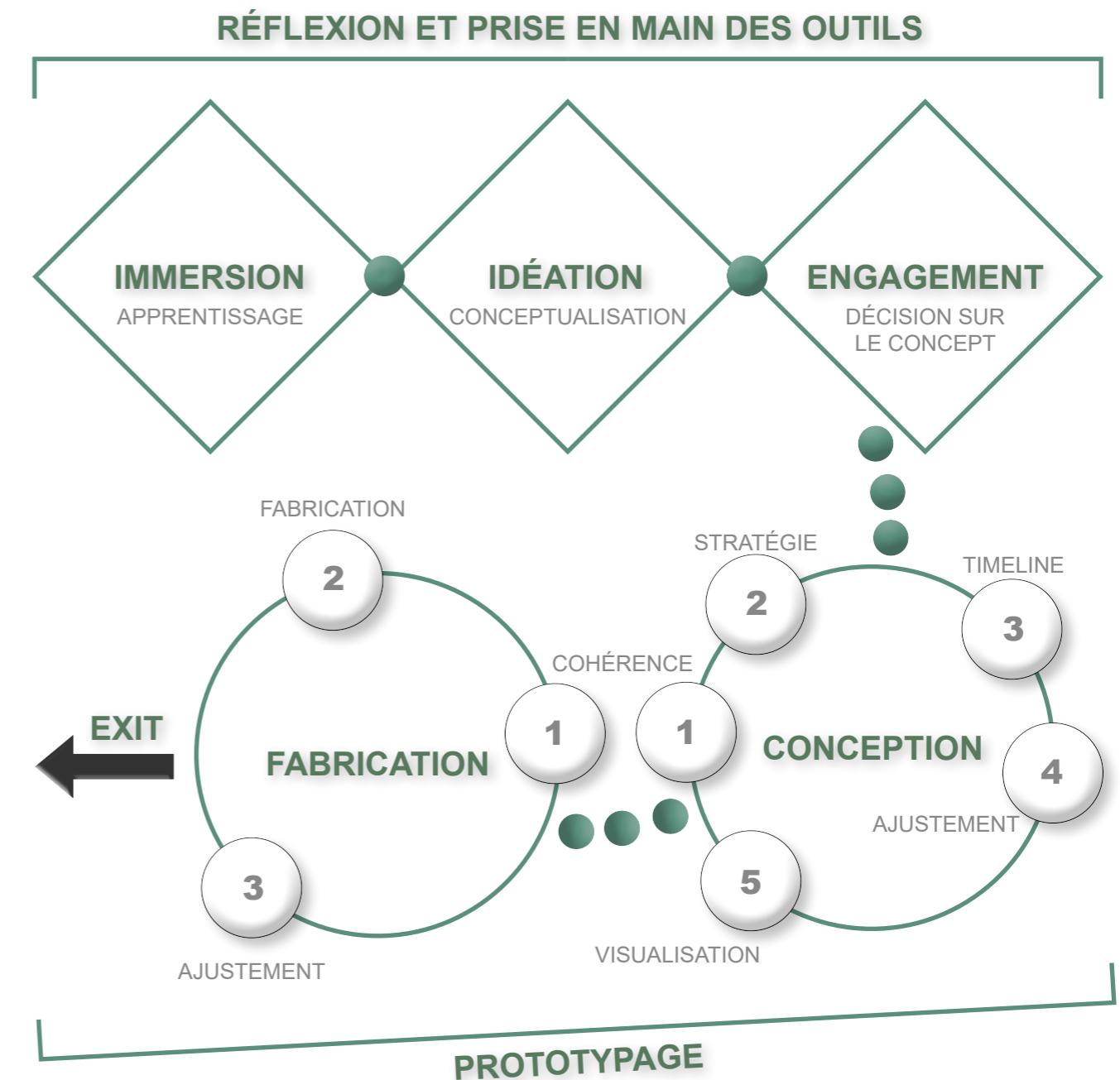
5. LA PHASE DE FABRICATION

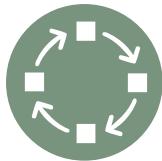


GÉNÉRALITÉS

La méthodologie de la fabrication numérique se divise en deux grandes étapes :

- **La réflexion et la prise en main des outils**, composée d'une phase d'apprentissage, d'idéation et d'engagement.
- **Le prototypage**, avec la conception et la fabrication, deux phases interdépendantes et composant une boucle itérative jusqu'au résultat final.





GÉNÉRALITÉS

Ci-dessous, on observe un **zoom sur les différentes étapes qui constituent l'étape du prototypage.**

