

Matière et Forme : Mise en forme de la matière

L'impression 3D

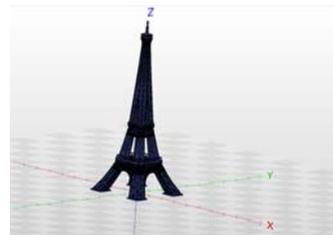
L'imprimante classique (2D), permet de matérialiser une image numérique sur une feuille de papier (ou surface plane).

Le principe de l'imprimante 3D est de rajouter une dimension, c'est-à-dire créer du volume à l'image. Cette image devient un modèle 3D, l'imprimante le découpe en tranches et dépose les couches avec de la matière pour obtenir l'objet final ; c'est l'empilement de ces couches qui crée du volume.

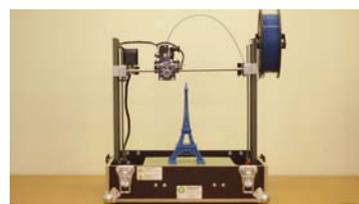
L'impression 3D est une technique de prototypage rapide récente. Issue du MIT (Massachusetts Institute of Technology), elle permet de générer rapidement une pièce physique à partir d'un fichier CAO, (conception assistée par ordinateur) comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement – à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique – et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer.

Dans quelle mesure l'imprimante 3D incarne-t-elle une innovation ?

Nous verrons d'abord quelles sont les étapes de la conception d'un objet virtuellement..



..puis comment se déroule sa mise en forme physique grâce à l'imprimante 3D..



..et enfin ce qu'apporte l'impression 3D dans le monde d'aujourd'hui.



Dossier réalisé par Hugo Isola, Clément Isaert, Alexis Le Feron et Yann Bourdin

Lycée Alain-Fournier, Bourges

Année scolaire 2014-2015

Série Scientifique : Mathématiques et Sciences-Physiques, classe 608

Table des matières

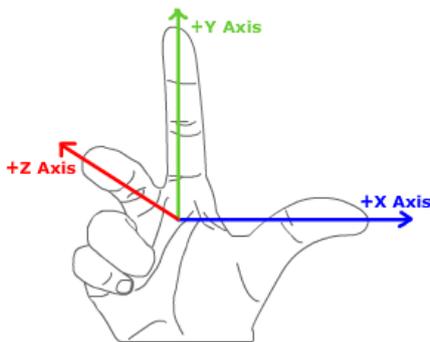
Introduction.....	1
1 Du virtuel au réel.....	3
1.1 Bases de la tridimensionnalité.....	3
1.2 La Conception Assistée par Ordinateur (CAO).....	3
1.3 Transcription d'un fichier STL.....	5
1.4 Les transformations géométriques.....	6
1.5 La Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO).....	8
2 La mise en forme de la matière par fabrication additive.....	9
2.1 Introduction.....	9
2.2 Le dépôt de filament fondu.....	10
2.3 La stéréolithographie.....	11
2.4 Le frittage laser.....	12
3 Les aspects innovants de l'impression tridimensionnelle.....	14
3.1 Dans la gastronomie : impression de confiseries.....	14
3.2 Dans la médecine : impression d'organes.....	15
3.3 Dans l'art et le cinéma.....	15
3.4 Le scanner 3D.....	17
Conclusion.....	19
Sitographie et remerciements.....	20

Du virtuel au réel

Bases de la tridimensionnalité

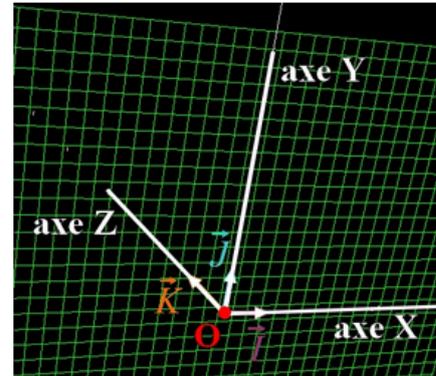
La tridimensionnalité désigne le repérage dans un espace affine de dimension 3 muni d'un repère cartésien orthogonal et orthonormé. Un repère $(O; \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ permet d'associer à tout point dans l'espace un ensemble de coordonnées $(x; y; z)$ à trois axes :

- l'axe des abscisses x
- l'axe des ordonnées y
- l'axe de profondeur z



Par convention, on utilise la règle de la "main droite" pour définir l'orientation de ces axes. Cependant, en CAO (Conception Assistée par Ordinateur), il est préférable que l'axe Z "s'enfonce" dans l'écran.

(image de Fabrice Aubert)



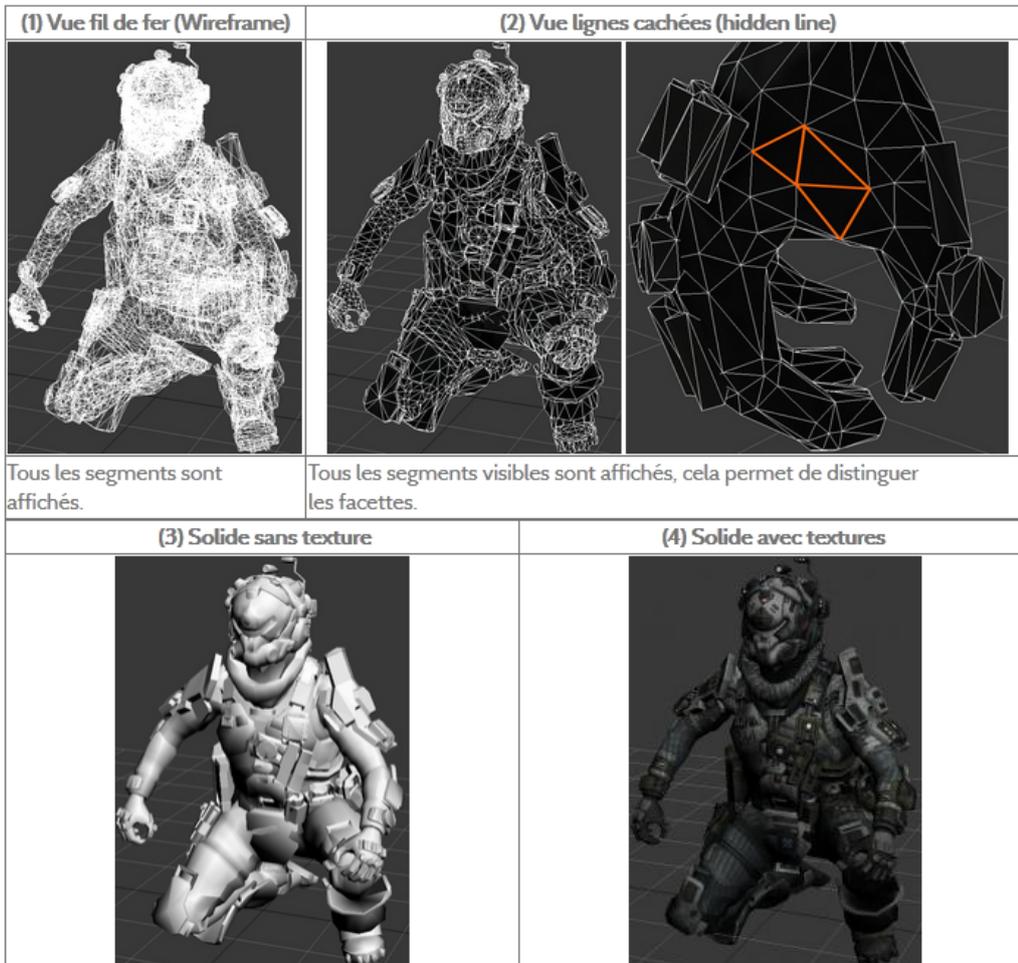
Les calculs avec des coordonnées cartésiennes dans un espace orthonormé ne diffèrent pas de ceux dans un plan :

$$\text{Calcul de distance : } AB = \sqrt{(xB - xA)^2 + (yB - yA)^2 + (zB - zA)^2}$$

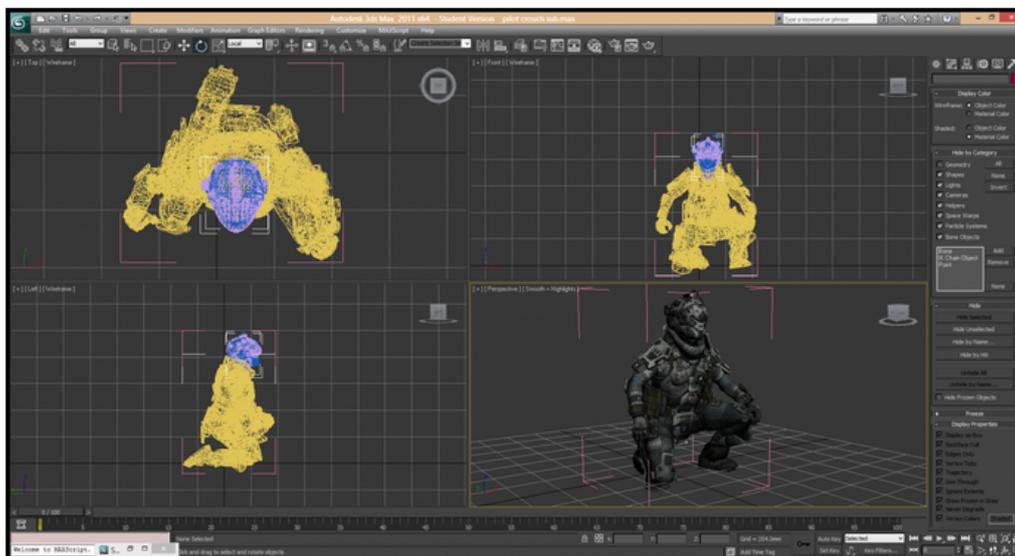
$$\text{Calcul des coordonnées du point M milieu de AB : } M \begin{pmatrix} \frac{xA + xB}{2} \\ \frac{yA + yB}{2} \\ \frac{zA + zB}{2} \end{pmatrix}$$

La Conception Assistée par Ordinateur (CAO)

Tout fichier représentant un objet en trois dimensions est appelé **modèle 3D**. Un modèle 3D est formé de points comme toute figure géométrique **(1)**. Nous avons vu qu'une position dans un monde 3D est constituée de 3 coordonnées: x , y et z . Chaque sommet doit avoir ses propres coordonnées. Les sommets sont à la base de tout, ils forment l'objet en lui-même. Cependant, en modélisation 3D, un modèle est composé de groupes de n sommets formant un polygone, dits **facettes** (généralement des triangles) **(2)**.



Selon les formats de modèle, le modèle peut être texturé (i.e. coloré, voir **3** et **4**). Les formats les plus utilisés pour être imprimés sont OBJ, et STL (dont nous parlerons par la suite). Ces formats n'intègrent pas les textures (**3**).



Interface du logiciel de CAO 3D Studio Max 2011

Transcription d'un fichier STL

Un fichier STL (STereoLithography, c'est à dire un fichier de stéréolithographie*) est un fichier de modèle 3D permettant de définir une surface triangulée (les facettes sont définies par trois points) à dimensions arbitraires et absolues, c'est-à-dire que les coordonnées des points sont toutes définies par rapport à l'origine et n'ont pas d'unité prédéfinie (comme m, km, ft...). La quasi-totalité des logiciels de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) permettent son exportation.

*Note : la stéréolithographie est une technique d'impression que nous détaillerons ultérieurement

Le fichier apparaît sous la forme suivante :

```
début du fichier
facette
    sommet
    sommet
    sommet
facette
    sommet
    ...
...
fin du fichier
```

Ce fichier peut être codé en ASCII (caractères anglophones), ou en binaire pour minimiser le poids du fichier. Nous allons étudier la structure de ce fichier en ASCII :

le fichier commence avec la ligne *solid name* où *name* correspond au nom de l'objet et est facultatif ; puis il se poursuit par la définition de toutes les facettes ; et se termine par l'instruction *endsolid*.

Modélisation

```
facet normal ni nj nk
outer loop
```

```
vertex v1x v1y v1z
vertex v2x v2y v2z
vertex v3x v3y v3z
```

```
endloop
endfacet
```

Création d'une facette où n_i , n_j et n_k correspondent aux vecteurs \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} du repère (par convention, ils valent 1)

Début de la définition de la facette

Déclaration des sommets (dits vertices, **vertex** au singulier) où v_{1x} , v_{1y} , v_{1z} , v_{2x} , v_{2y} , v_{2z} sont respectivement les coordonnées en **x**, **y** et **z** du premier, second et troisième sommet. (il y a un sommet par ligne)

Fin de la définition de la facette

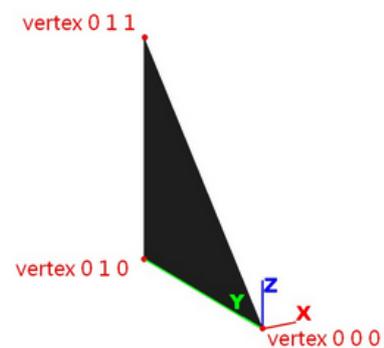
Fin de la création de la facette

Exemple : un simple triangle

```
solid triangle
facet normal 1 1 1
outer loop
```

```
vertex 0 0 0
vertex 0 1 0
vertex 0 1 1
```

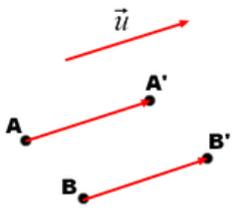
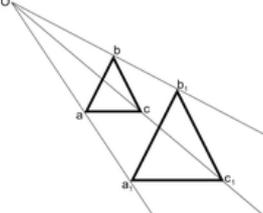
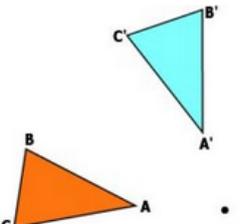
```
endloop
endfacet
endsolid
```



Les transformations géométriques

Avant de procéder à l'impression, il faut s'assurer que l'objet fasse les bonnes dimensions et qu'il soit bien positionné dans l'espace. Le logiciel de CAO le permet simplement à l'utilisateur. Comment applique-t-on des transformations géométriques à un objet ?

Il existe trois transformations géométriques "basiques" :

<p>La translation</p>	<p>La translation permet de faire glisser un point, ou un autre objet géométrique, selon un vecteur.</p> <p>(ici, les points A' et B' sont les images de A et B par la translation de vecteur \vec{u})</p>	
<p>L'homothétie</p>	<p>L'homothétie permet le rapprochement/éloignement d'un point, ou l'agrandissement/rétrécissement d'un objet géométrique par rapport à un pivot (généralement l'origine).</p>	
<p>La rotation</p>	<p>La rotation consiste à faire pivoter un point, ou un autre objet géométrique, d'un angle Thêta par rapport à un pivot.</p>	

A chacune de ces transformations géométriques est associée une matrice.

Une matrice est un tableau de nombres ordonnés en lignes et en colonnes entourés par des parenthèses. Sa syntaxe est semblable à celle

d'un vecteur mais avec plus de nombres : $\begin{pmatrix} 7 & 3 & 10 \\ 6 & 0 & 6 \\ 4 & 8 & 12 \end{pmatrix}$. Une matrice n'est pas forcément un tableau de 9 cases, elle peut en

contenir jusqu'à l'infini. Nous allons voir deux types de matrice en particulier : la matrice d'identité et la matrice carrée.

La matrice d'identité

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Elle a la particularité d'avoir toutes ses valeurs égales à 0 hormis les valeurs de sa diagonale qui, elles, sont égales à 1. Quelle que soit la taille de la matrice, on retrouvera toujours cette particularité, et la multiplication d'un vecteur par cette matrice ne changera pas le vecteur :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \\ 4 \end{pmatrix}$$

La matrice carrée

$$\begin{pmatrix} 7 & 3 & 10 \\ 6 & 0 & 6 \\ 4 & 8 & 12 \end{pmatrix}$$

Une matrice carrée est une matrice ayant le même nombre de colonnes et de lignes.

Il y a 3 rangées de colonnes et 3 rangées de lignes, c'est donc ce que l'on appelle une matrice carrée. Son nom complet est d'ailleurs : matrice carrée d'ordre 3. L'ordre permet de spécifier la taille. Si on avait mis le chiffre 4, alors la matrice aurait eu 4 colonnes et 4 lignes.

Application

Pour appliquer une transformation (ici, la translation) à un point, on multiplie la matrice correspondante à la transformation voulue avec les coordonnées du point. $A'(x'; y'; z')$ est l'image des coordonnées du point A $(x; y; z)$ par la matrice $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \end{pmatrix}$ où X correspondent aux coordonnées du vecteur de translation.

$$\text{On a alors } A' \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + X \\ y + Y \\ z + Z \end{pmatrix}$$

NB : Pour rendre la multiplication possible, nous ignorons ici la quatrième ligne de la matrice de translation. Cette dernière ligne est utilisée

par le logiciel de CAO pour déterminer si le point est affiché ou non : le calcul aurait donc été $A' \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 100 & X \\ 010 & Y \\ 001 & Z \\ 000 & 1 \end{pmatrix}$

La Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO)

Nous avons vu dans l'introduction que l'imprimante 3D découpait le modèle en tranches et qu'elle déposait les couches avec de la matière pour obtenir l'objet final. Ce découpage est effectué par le logiciel de slicing (= tranchage, en français) de l'imprimante, plus communément appelé logiciel de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur). Les logiciels de slicing traduisent les modèles numériques en instructions physiques destinée à l'imprimante. On peut les imaginer comme un ordre de trajectoires que va suivre la tête d'impression. Le format de sortie le plus couramment utilisé est le G-code, autant pour l'imprimante 3D que pour d'autres machines industrielles.

G-Code : Généralités

Instruction	Description
G0	Déplacement rapide
G1	Déplacement linéaire
G28	Origine machine
G90	Déplacements en coordonnées absolues
G91	Déplacements en coordonnées relatives
F#	Définit l'avance du déplacement en mm/min

Par exemple, pour que la tête d'impression se place au centre d'un plateau 200x200, il faut utiliser la commande :

```
G1 X100 Y100 F3000
```

G1 : Commande de déplacement linéaire (voir tableau)

X : Coordonnée en X du vecteur de translation

Y : Coordonnée en Y du vecteur de translation

F : Vitesse en mm/sec du déplacement

Ainsi, nous avons vu comment se passait la mise en forme d'un objet numériquement à l'ordinateur et vu comment l'imprimante interprétait ces données. Nous allons maintenant expliquer comment se déroule la matérialisation d'un modèle grâce à l'imprimante 3D.

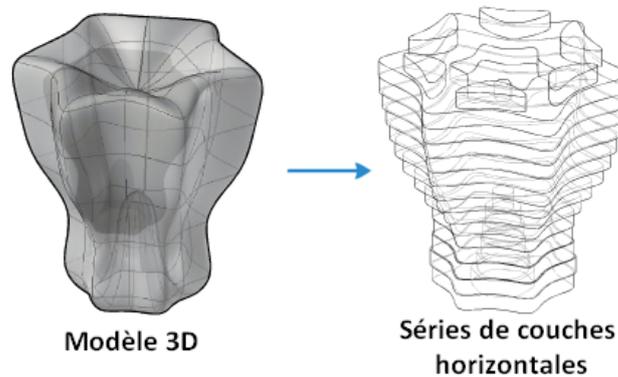
La mise en forme de la matière par fabrication additive

Introduction

L'impression 3D est une technique permettant la production d'un objet par fabrication additive de plastique, de résine ou encore de métal, c'est-à-dire grâce à un empilement de couches successives de matière. Cette technique est en opposition avec la mise en forme par enlèvement de matière utilisé pour l'usinage, ou l'on part d'une matière première pour la modifier. L'impression 3D nécessite trois paramètres principaux:

- Une source d'énergie
- Des matériaux compatibles avec le type d'impression (poudre, fil ou liquide)
- Un fichier CAO créé sur ordinateur

Le fichier CAO détaillé dans la première partie va être envoyé au logiciel de l'imprimante qui va le découper en tranches horizontales (fichier FAO).



Après cette étape, une source de chaleur va venir mettre en forme la matière. Elle peut prendre plusieurs formes selon la technique utilisée: laser, rayon UV ou IR, ect...

La mise en forme de la matière (ou fabrication additive) a pour objectif de donner une forme déterminée au matériau, afin d'obtenir un objet ayant les propriétés souhaitées. C'est un travail qui nécessite de maîtriser parfaitement les paramètres expérimentaux (composition du matériau, température, pression, vitesse de refroidissement, etc.).

Pour l'impression 3D, ces techniques sont regroupées sous une appellation, celle du prototypage rapide qui consiste à obtenir des modèles physique à partir d'une définition numérique 3D (CAO).

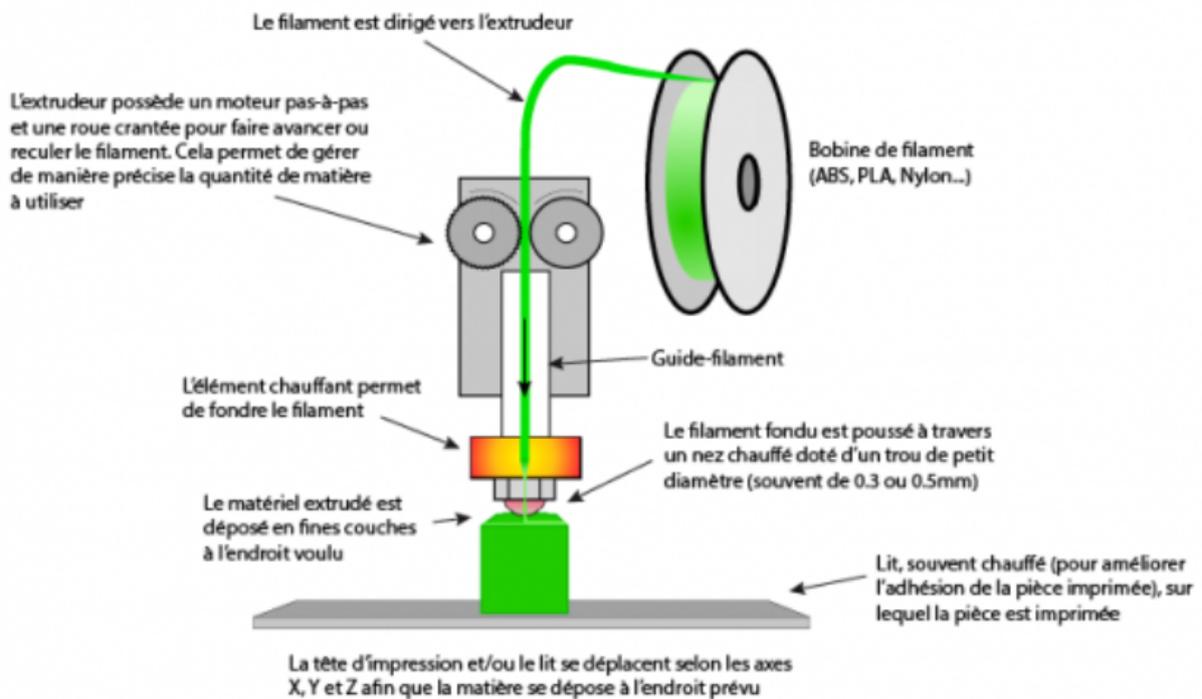


Ci-dessus, une imprimante FMD professionnelle développée par la société Stratasys et commercialisée au prix de 9 999€

Il existe plusieurs techniques différentes pour l'impression 3D, nous allons les détailler ci-dessous.

Le dépôt de filament fondu

Principe de fonctionnement d'une imprimante 3D FFF (*Fused Filament Fabrication*)



Adapté de: <http://www.thingiverse.com/thing:29432> par edurobot.ch

Le dépôt de filament fondu (FMD inventé en 1991) est un type d'impression est utilisé majoritairement pour les imprimantes 3D des particuliers, car c'est actuellement la technologie la plus accessible au grand public en raison de son fonctionnement relativement simple, de son prix (compter 400 euros pour l'entrée de gamme), de ses matériaux (principalement des polymères thermoplastiques) de faible coût et un risque d'utilisation peu élevé.

Le filament de matière est déroulé à l'aide d'une roue crantée située dans l'extrudeur et chauffé à une certaine température dans une tête d'impression appelée buse. Cette température se situe aux alentours de 200 °C et varie selon les matériaux utilisés. La tête d'impression va alors se déplacer sur trois axes, X, Y et Z pour permettre de déposer le plastique sur un "lit" souvent chauffé car certaines matières tel que l'ABS rétrécissent au contact de l'air ce qui provoque un décollement des pièces. Cette plateforme descend d'un niveau à chaque passage de la buse, ajoutant ainsi une nouvelle couche permettant la création de l'objet qui est utilisable directement après la fabrication.



L'épaisseur de la couche va de 0,1 à 0,2 mm, (de la même manière que pour une image numérique avec les pixels, plus il y a de couches de matières, plus l'objet va être lisse et précis) ce qui est élevé par rapport aux autres technique et rend les différentes couches de matière visibles à l'oeil nu.

Les matières les plus utilisées pour cette technique d'impression sont principalement les polymères thermoplastiques, tels que l'ABS, qui signifie Acrylonitrile Butadiène Styène, utilisé pour la fabrication de nombreux objets tels que les LEGO et le PLA, l'acide polylactique, qui est un plastique entièrement biodégradable. D'autres matières peuvent aussi être utilisées telles que des filaments de bois-plastique, du métal ou même des matières alimentaires telles que le sucre et le chocolat.

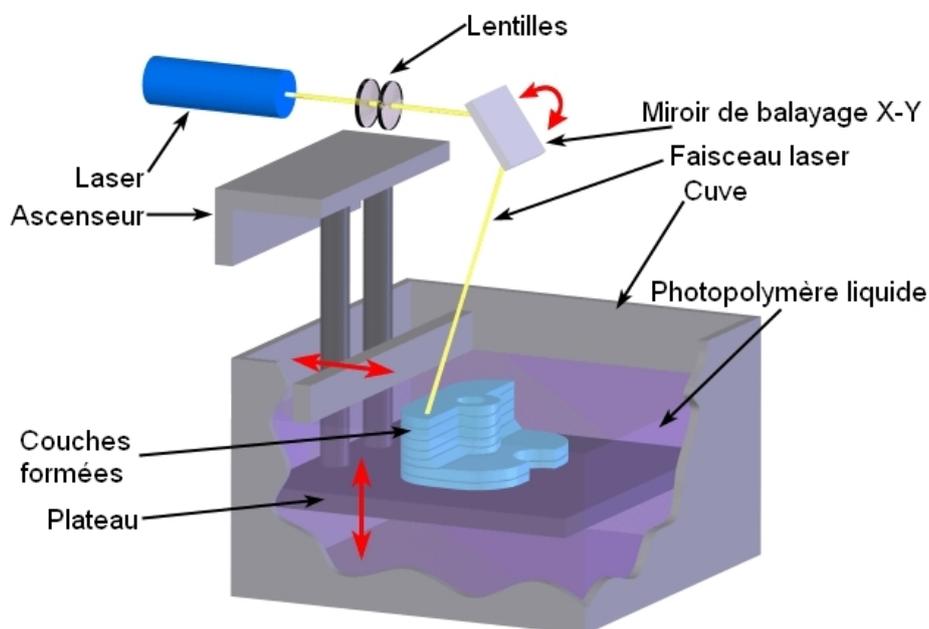
-L'ABS est un polymère thermoplastique. Le terme polymère désigne une molécule de masse molaire élevée, constituée d'un grand nombre de molécules identiques (monomère) transformée grâce à la polymérisation. L'adjectif thermoplastique indique que ce polymère peut être ramolli par chauffage ou durci par refroidissement, de façon répétée. C'est un plastique qui fond à 180°C et peut être travaillé réellement à partir de 210°C, il se plie facilement et est résistant aux chocs. L'utilisation du plateau chauffant est nécessaire car l'ABS peut se déformer si il refroidit trop rapidement.

-PLA est un bioplastique, formé à partir de produits recyclés ou d'amidon de maïs est biodégradable et peut être utilisé pour confectionner des objets en contact avec la nourriture. Il est plus sensible à l'eau et à la chaleur que l'ABS mais ne nécessite pas d'utilisation de plateau chauffant. Il ne se tord pas et est cassé facilement. Il fond entre 160 et 220°C et offre une large palette de couleurs pour l'impression.

Ces deux matériaux offrent une bonne résistance aux chocs et à la chaleur, et peuvent supporter des torsions sans casser.

Conclusion: Le dépôt de filament fondu est une technique d'impression permettant d'avoir des pièces fonctionnelles immédiatement, utilisant des matières premières bon marché (entre 20 et 30 euros la bobine), plutôt destinée aux particuliers. Malgré cela, les imprimantes à dépôt de plastique sont celles permettant de créer les objets les moins fins à cause de l'épaisseur des couches.

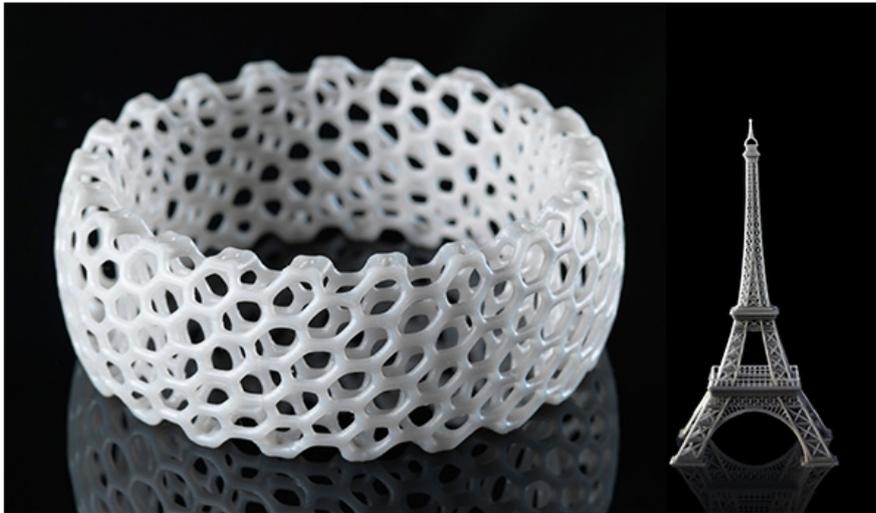
La stéréolithographie



La stéréolithographie (qui signifie "écriture en relief") est la première technique d'impression 3D, inventée en 1986 par 3D systems. C'est la technique de prototypage rapide la plus utilisée par les professionnels dans l'industrie car elle est rapide et permet d'avoir des pièces d'un degré de précision élevé, avec des couches de matière allant de 0,05 à 0,01 mm. Elle permet de produire des objets de grande taille.

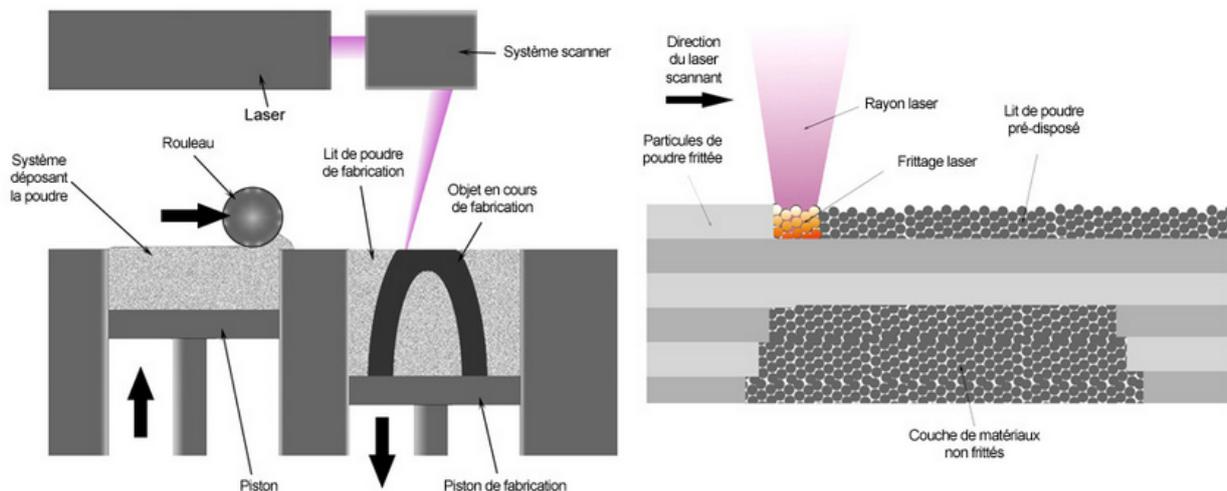
Fonctionnement :

Cette technique utilise un laser d'ultra-violet afin de solidifier de la résine, un photopolymère situé dans une cuve, par polymérisation. Ce procédé d'impression se déroule comme le FMD vu précédemment, par couches successives, une couche de résine de monomère repose sur un plateau et est polymérisée par le laser, puis, le plateau descend pour permettre d'avoir une nouvelle couche de résine non polymérisée sur le dessus. Le passage du balais est nécessaire à chaque couche pour s'assurer qu'il ne reste pas de résine non solidifiée. Un traitement au four après la production de l'objet permet de terminer complètement la polymérisation et d'augmenter la résistance de l'objet.



Conclusion : La stéréolithographie est une technique d'impression rapide par rapport au dépôt de plastique, qui permet la production d'un objet détaillé mais d'une taille réduite. Une telle imprimante coûte aux alentours de 3300 euros et le prix d'un litre de résine est de 50 euros. Les résines utilisées sont souvent cassantes et la vapeur dégagée par les poudres est toxique

Le frittage laser



Le frittage laser plus connu sous le nom de SLS (Selective Laser Sintering, inventé en 1995) est un procédé inventé en 1997 par le professeur américain du nom de Carl Deckard. Cette technique utilise un laser afin de solidifier des matériaux sous forme de poudre, souvent des plastiques comme le nylon. Ces poudres peuvent être aussi métalliques ou de céramique mais nécessitent des réglages différents.

Fonctionnement :

Le piston sur lequel se situe la poudre va remonter afin de permettre au rouleau de venir déposer une fine couche de poudre sur la plateforme d'impression qui elle va descendre au fur et à mesure du processus de solidification de la poudre. Celle-ci va être frappée par le laser, ce qui provoquera une augmentation en température afin de fusionner les particules de poudre entre elles. Le laser solidifie alors les couches une par une jusqu'à ce que le processus soit terminé. Une fois l'objet demandé étant au point on se débarrasse du reste de poudre mais on peut aussi la réutiliser. Cette poudre non solidifiée fait office de support pour stabiliser l'objet. Les avantages de cette technologie sont qu'il y a très peu de déchet et que la poudre non fusionnée peut être réutilisée par la suite. Cette technique est très rapide et propose une excellente qualité de finition grâce à un post-traitement qui rend l'objet très lisse. En revanche, le frittage laser demande une poudre aux grains homogènes et un réglage très précis du laser.



Ci-dessus, des poudres teintées.

Conclusion : Le frittage laser est une technique réservée aux professionnels en raison du prix des machines de l'ordre de plusieurs dizaines voir centaines de milliers d'euros. Mais elle a de gros avantages, car elle est dotée d'une grande précision, et les couches de matières sont quasiment invisibles. La poudre peut aussi être teintée pour obtenir des objets en couleur.

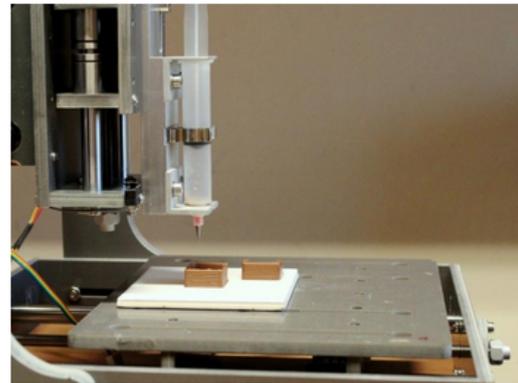
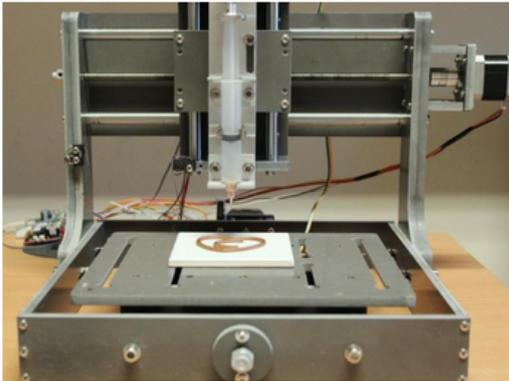
Avec des techniques d'impression de plus en plus poussées et l'arrivée de nouveaux matériaux compatibles sur le marché, la réalisation d'objets de plus en plus complexes et différents est maintenant possible. Nous allons voir dans cette dernière partie quelles sont les innovations qu'a permis d'apporter l'impression 3D.

Les aspects innovants de l'impression tridimensionnelle

Dans la gastronomie : impression de confiseries

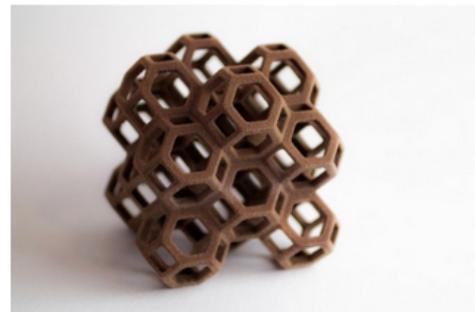
Pour créer une confiserie, l'imprimante a besoin d'eau et d'ingrédients à base de poudre sèche.

Elle fonctionne de la manière suivante: un mécanisme ressemblant à un rouleau à pâtisserie étale d'abord une fine couche de poudre sur la surface imprimable. Une tête à jet d'encre diffuse ensuite un filet d'eau étroit, dessinant sur la couche de sucre en suivant le schéma pré-programmé. Quand l'eau entre en contact avec la poudre, elle recristallise, de manière à ce que tout ce qui touche l'eau durcisse.



Le processus se répète couche après couche, formant le dessert de bas en haut, à la vitesse de 25mm par heure.

Résultat final : des confiseries complexes, détaillées, qui se tordent, tournent et scintillent.

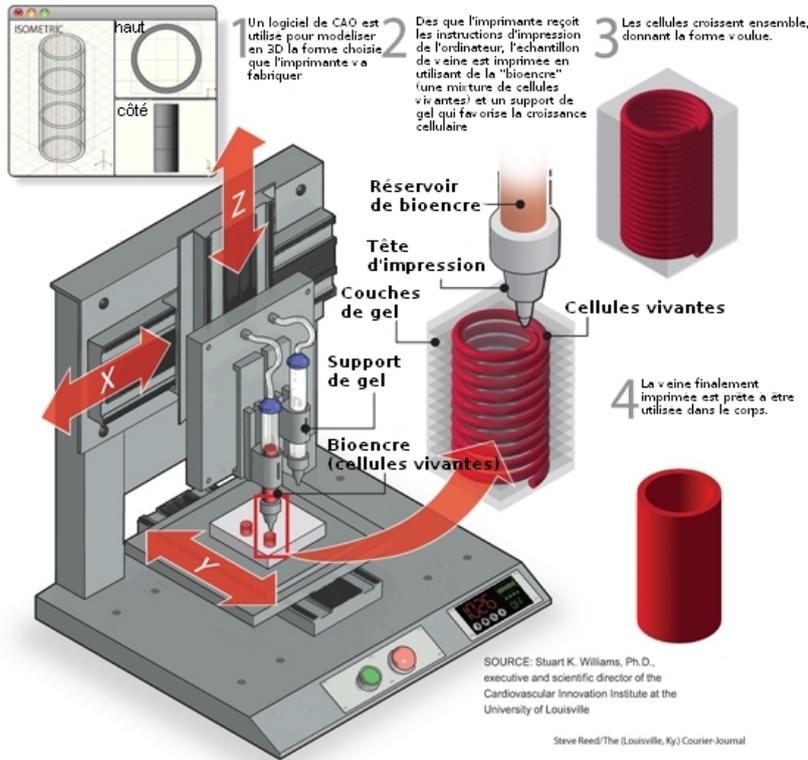


Les confiseries peuvent être utilisées comme sculptures ornementales pour des gâteaux de mariage, simples morceaux de sucre, sucreries imprimées et personnalisées.

Dans la médecine : impression d'organes

L'utilisation de l'impression 3D dans la médecine

Basée sur l'idée d'une imprimante classique, la "bioimpression" 3D prend une structure biologique tridimensionnelle et la duplique en utilisant une imprimante. Alors que les cartouches normales des imprimantes impriment en deux dimensions, cette bioimprimante utilise l'information d'un modèle 3D d'un ordinateur afin de l'imprimer en trois dimensions, le long des axes X, Y et Z. Le mouvement de l'imprimante est contrôlé par ordinateur par le biais de moteurs individuels. Dans ce cas, les cellules sont prises d'un patient, et une section de veine est modélisée puis envoyée à l'imprimante pour être fabriquée. Une fois placée dans le patient, elle ne sera pas rejetée puisqu'elle a été faite à partir de ses propres cellules.



Dans l'art et le cinéma

Les nouvelles résines utilisées dans la photopolymérisation permettent de créer des objets à la rigidité et la résistance très proche d'un thermoplastique.

Les artistes tâchent à présent de diversifier les matières : les travaux du chercheur français, Thierry Chartier, ont ainsi récemment abouti à la création d'une résine photosensible, capable de produire des objets en céramique dense.

Un nouveau processus de création

Dans le domaine du design et de l'art, les possibilités se trouvent démultipliées par ce type de technique : pièces transparentes, complexes, voire impossibles...

Cela permet de plus aux artistes de produire rapidement des prototypes, L'utilisation de ces techniques engendre inévitablement un nouveau processus de création. Le modèle numérique est malléable, modifiable : comme une sculpture pour laquelle le sculpteur pourrait revenir sur ses erreurs... ceci change complètement la méthode de création, l'approche du travail et sa technique.

De nouveaux artistes



Collier en poudre de nylon frittée, par Miguel Chevalier

Miguel Chevalier, qui s'intéresse au numérique depuis 1978, est un de ces artistes; Cet artiste utilise toutes les formes d'expression numérique à sa disposition : installations interagissant avec les visiteurs, installations sonores et visuelles, vidéos, stéréolithographies... Ses *Fractal Flowers* sont générées de façon variable au moyen d'un code de programmation : la stéréolithographie matérialise cette réalité virtuelle, autogénérée.

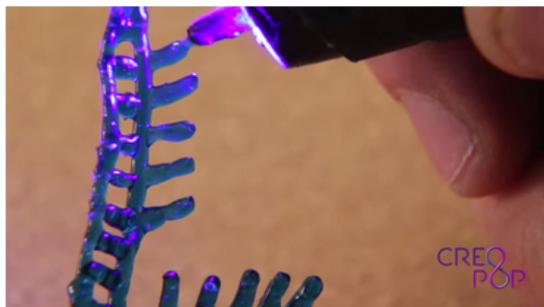
D'une certaine façon, il met un terme au débat récurrent entre réel et virtuel, la stéréolithographie est un pont entre de multiples réalités; "virtualisation du monde réel", "naturalisme de la création virtuelle"...

Un autre outil de création : le stylo 3D

L'outil se présente sous la forme d'un très gros stylo électrique. Le stylo 3D utilise un fil de plastique ABS (*Acrylonitrile Butadiène Styrène*), fondu dans une buse chauffée. Le plastique devient alors malléable permettant ainsi de dessiner dans le vide comme sur une feuille de papier et refroidit à l'air libre en quelques millisecondes.



Un autre type de stylo 3D utilise de l'encre froide en tant que photopolymère au lieu de thermoplastique. Le stylo intègre une lampe à ultraviolets qui polymérise l'encre photosensible presque spontanément.



Dans le cinéma

L'impression 3D offrirait en effet aux professionnels du cinéma un gain de temps considérable puisqu'à défaut de proposer aux réalisateurs de premières ébauches entièrement réalisées à la main (un processus long et coûteux), il leur suffirait aujourd'hui de modéliser en 3D leurs personnages, bâtiments, machines, etc.



Le scanner 3D

Un scanner tridimensionnel est un appareil qui analyse les objets ou leur environnement proche pour recueillir des informations précises sur la forme et éventuellement sur l'apparence (couleur, texture, ...) de ceux-ci. Les données ainsi collectées peuvent alors être utilisées pour construire des images de synthèse en 3 dimension (objets numériques) à des fins diverses. Ces appareils sont beaucoup utilisés par les industries du divertissements pour des films ou des jeux vidéo. Un scanner 3D mesure généralement le positionnement d'un échantillonnage de points dans un système de coordonnées - un nuage de points - de la surface d'un sujet pour ensuite en extrapoler la forme à partir de leur répartition : ce procédé est appelé une reconstruction 3D.



Si la couleur de chacun des points est analysée, alors celle de la surface peut également être reconstituée. L'image produite est basée sur un série de données composées des coordonnées positionnant chacun des points échantillonnés par rapport au scanner 3D.

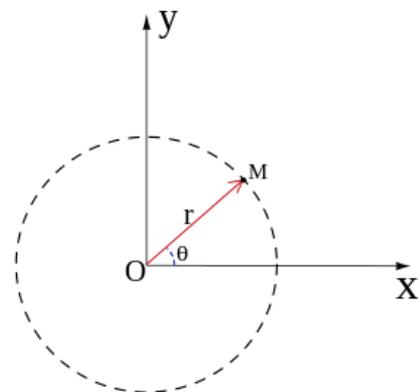
Si un système de coordonnées sphériques est utilisé et que le scanner en est l'origine, chaque point peut alors être identifié par des coordonnées (r, φ, θ) . r représente la distance du scanner au point. φ et θ sont les angles formés entre la ligne allant de l'origine au point analysé à deux plans passant par l'origine, l'un horizontal et l'autre vertical. Ces coordonnées sphériques permettent de situer dans l'espace chacun des points par rapport au scanner, travail préalable et nécessaire à la modélisation numérique de l'image en trois dimensions de l'objet.

Le processus, utilisant les différentes mesures avant d'être réinterprétées jusqu'à la modélisation est connu sous le nom de (en) *3D scanning pipeline*.

Systèmes de coordonnées polaires et sphériques

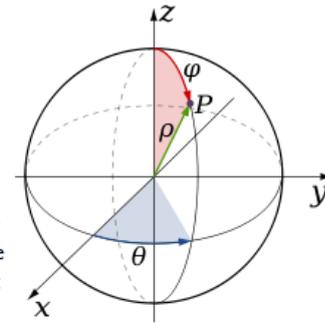
Coordonnées Polaires

Les **Coordonnées Polaires** sont un système de coordonnées à deux dimensions dans lequel chaque point du plan est entièrement déterminé par un angle et une distance. Ce système est particulièrement utile dans les situations où la relation entre deux points est plus facile à exprimer en termes d'angle et de distance. Comme il s'agit d'un système bidimensionnel, chaque point est déterminé par les coordonnées polaires, qui sont la coordonnée radiale et la coordonnée angulaire. La coordonnée radiale (souvent notée ρ , et appelée rayon) exprime la distance du point à un point central appelé pôle (équivalent à l'origine des coordonnées cartésiennes).



En coordonnées polaires, la position du point M est définie par la distance r et l'angle θ .

Coordonnées Sphériques Les **Coordonnées Sphériques** rajoutent une dimension aux coordonnées polaires du plan. Un point de l'espace y est repéré par la distance à un pôle et deux angles. Ce système est d'emploi courant pour le repérage géographique : l'altitude, la latitude, et la longitude sont une variante de ces coordonnées. Plusieurs systèmes de coordonnées sphériques sont également employés en astrométrie.



Dans cette convention de coordonnées sphériques, la position du point P est définie par la distance ρ et par les angles φ (colatitude) et θ (longitude).

Les types de scanner

Scanner avec contact	<p>Sonde l'objet grâce à un contact physique, on appelle généralement ce genre de scanner un <u>bras de mesure</u>. Le déplacement de ce bras sur lequel le palpeur est monté fait que les mesures sont réalisées à une faible fréquence (100 pts/sec).</p> 
Scanner sans contact actif	<p>Calcule la distance avec chaque point de l'objet étudié en comptant le temps nécessaire au trajet aller-retour de l'impulsion du faisceau laser, ultrason ou rayon X réfléchi; généralement, ce type de scanner peut sonder 10 000 à 100 000 points par seconde</p>
Scanner sans contact passif	<p>N'étant émetteur d'aucun type de rayonnement, il se base sur la détection de rayonnement ambiant réfléchi, généralement la lumière visible car elle est immédiatement disponible. D'autres types de rayonnement, comme les infrarouges peuvent également être utilisés. Les méthodes passives peuvent être bon marché, du fait que dans la majorité des cas elles ne nécessitent pas d'appareil d'émission spécifique.</p>

Un exemple de scanner sans contact actif : le scanner par temps de vol

Un scanner par temps de vol utilise un faisceau laser pour sonder le sujet. Un rayon modulé en fréquence est projeté sur une cible. La cible renvoie ce rayon vers l'appareil. Le temps mis par le rayon pour revenir est mesuré et la distance séparant l'utilisateur de la cible est calculée.

On sait que

$$V = \frac{\Delta_d}{\Delta_t}$$

On connaît la vitesse de la lumière et le temps d'aller-retour de celle-ci

$$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

On a alors la relation

$$c = \frac{\Delta_d}{\Delta_t}$$

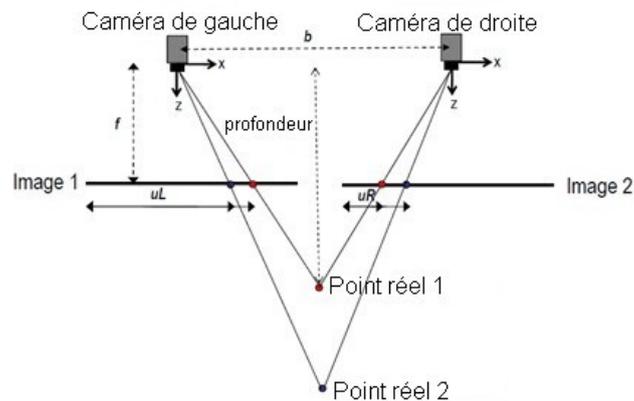
$$\Delta_d = c \cdot \Delta_t$$

La distance du point par rapport au scanner (en mètres) est donc

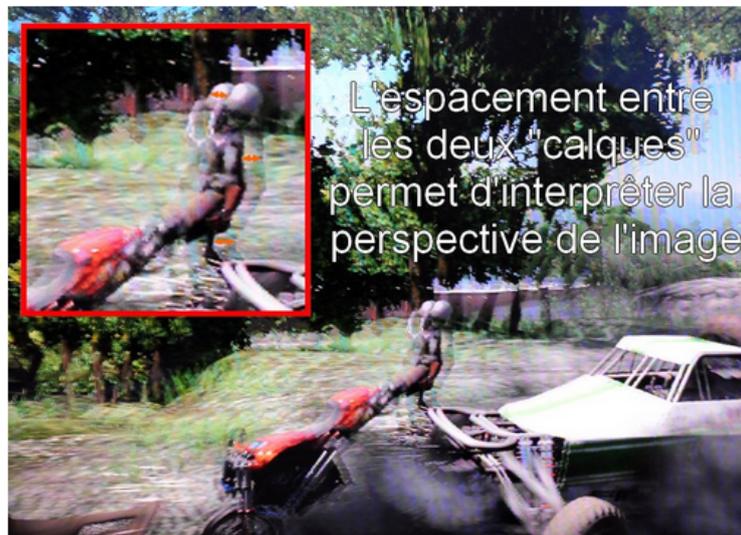
$$\frac{c \cdot \Delta_t}{2}$$

Un exemple de scanner sans contact passif : le scanner stéréoscopique.

Système stéréoscopique



Les systèmes stéréoscopiques utilisent généralement deux caméras vidéos, légèrement espacées, pointant vers la même scène. En analysant les légères différences entre les images des deux appareils, il est possible de déterminer la distance de chaque point de l'image. La même technique est utilisée dans le cinéma 3D (stéréoscopique) afin de donner une illusion de relief.



Conclusion

A l'issue de ce dossier, nous avons vu que l'impression 3D incarnait une innovation dans les différents domaines, comme l'industrie, l'art, la médecine, etc. Ainsi, au-delà d'être une simple innovation, l'impression 3D révolutionne les méthodes de fabrication puisque qu'elle est plus rapide et plus économique et qu'elle permet la fabrication d'objets et pièces plus complexes. L'imprimante 3D peut même être couplée avec un scanner 3D afin de dupliquer des objets. Cependant, cette technologie est déjà dépassée puisque l'impression 4D a fait son apparition. L'impression 4D est basée sur la technique de l'impression 3D en rajoutant une dimension, celle du temps. Les objets produits pourront interagir avec leur environnement grâce à une source d'énergie apportée comme l'eau, l'énergie ou la lumière... : ces objets intelligents pourront se déplacer, onduler, se contracter, rétrécir ou s'élargir etc... en fonction de circonstances extérieures comme la chaleur, la lumière, l'humidité ou les sons.

Sitographie

- Imprimer en 3D [en ligne], disponible sur <http://www.imprimeren3d.net/>
- 3DNatives [en ligne], disponible sur <http://www.3dnatives.com/>
- Tutoriel sur OpenGL 3.3 [en ligne], disponible sur <http://betterdreamapp.site50.net/>
- Les Numériques [en ligne], disponible sur <http://www.lesnumeriques.com/>
- Premiers pas dans l'impression 3D, LabAdkos [en ligne], disponible sur <http://www.shakaddict.com/labadkos/2014/09/premiers-pas-dans-limpression-3d/>
- Journal du Geek [en ligne], disponible sur <http://www.journaldugeek.com/>
- Creopop [en ligne], disponible sur <http://www.creopop.com/>
- Le blog de Mod&Wa [en ligne], disponible sur <http://blog.modandwa.com/>
- Wikipédia :
 - Coordonnées cartésiennes
 - Repère affine
 - STL (file format)
 - Scanner tridimensionnel

Remerciements

Pour avoir contribué à l'achèvement de ce site, nous tenons à remercier nos professeurs encadrants M. Kamal et M. Valencourt pour nous avoir accompagnés et aidés tout au long de ce semestre ainsi que Jean-Paul Russéry, directeur de Protocentre, pour nous avoir présenté divers outils de prototypage rapide et renseigné à ce sujet.