



## Remerciements

En ouverture de ce compte rendu, je souhaiterai remercier les personnes suivantes :

Mme Claire Rivenc, directrice du Fablab, pour avoir traité ma candidature et m'avoir permis de passer ces 6 mois de stage dans les meilleures conditions.

Thierry Bombardier, sous-directeur du Fablab, pour sa supervision tout au long du stage, ainsi que son aide et son apport de connaissances.

Jean Marie George, bénévole au Fablab et tuteur de stage, pour son implication dans le projet d'imprimante à matières argileuses et le suivi du stage.

Jean Baptiste Bonnemaïson, Valerie Berrivin, Damien Mohadeno et le reste de l'équipe Coh@bit, ainsi que les adhérents du Fablab, pour l'aide et les connaissances qu'ils ont pu m'apporter durant ces 6 mois.

Florence Bazzaro et le service des stages de l'UTBM, qui m'ont permis de vivre cette expérience enrichissante, tant professionnellement que humainement.

## Table des matières

Introduction.....	1
I. COH@BIT: Présentation .....	2
1. Présentation globale .....	2
2. Le FabLab (Organisme responsable du stage) .....	2
Définition générale.....	2
FabLab Coh@bit .....	3
3. Le Technoshop.....	5
II. Travail réalisé.....	7
1. Sujet défini avant mon arrivée .....	7
2. Tâches réelles.....	8
III. Montage et perfectionnement des imprimantes 3D Voxel OX .....	12
Prise en main des logiciels.....	12
SolidWorks :.....	12
InkScape / CorelDraw .....	14
Repetier Host.....	15
Arduino.....	17
Fonctionnement des machines .....	18
Découpe laser Trotec Speedy 300.....	18
Imrpimantes 3D.....	19
Charly-Robot.....	19
Tour à métaux, ponceuse à bande, disqueuse etc.....	19
Monter en compétence sur le domaine des imprimantes 3D .....	20
1- Montage de la première machine avec un modèle.....	20
2- Analyse du fonctionnement et listing des défauts de la machine.....	21
3- Apporter des solutions durables aux principaux problèmes .....	22

IV. Compte rendu du projet céramique .....	24
1. Documentation et veille informative .....	24
Produits déjà existants .....	24
Recherche d'antériorité, base de brevets .....	27
Définition du besoin .....	28
Recherche sur les matériaux .....	28
Analyse fonctionnelle et cahier des charges .....	28
2. Définition du besoin .....	30
3. Prise en main du parc machines, et des logiciels .....	30
4. Conception du prototype .....	30
5. Montage du prototype .....	30

## Introduction

Le stage en entreprise est, pour l'étudiant ingénieur, un **moyen concret de mettre en œuvre les compétences acquises au cours de son cursus antérieur**, et de découvrir comment seront sollicitées ses capacités lorsqu'il intégrera le monde du travail. Il est donc important, au cours de cette expérience, de se familiariser avec les codes de l'entreprise et de revoir ses méthodes de travail afin de s'adapter à un nouvel environnement. À terme, le stage doit permettre d'affiner le choix d'orientation pour la suite du cursus ingénieur, voir même pour l'avenir professionnel du stagiaire.

Le ST40 « Stage professionnel de longue durée » se déroule sur une période de 24 semaines, et est généralement réalisé en début de seconde année du cursus ingénieur proposé par l'UTBM. De ce fait, il est demandé à l'étudiant de trouver lui-même une entreprise de son choix, susceptible de lui proposer un sujet bien défini et lié au domaine de la conception mécanique, lui permettant d'exploiter ses connaissances de cours. Tout au long du stage, l'étudiant devra rendre compte de son activité et de son ressenti.

Dans mon cas, le stage se déroule dans le Fablab du groupe Coh@bit, réunissant en son sein le Fablab ouvert au public, et une jeune entreprise de Recherche & Développement : Le Technoshop. Le sujet qui m'a été proposé est la conception et le prototypage d'une imprimante 3D à extrudeur de matière argileuse, à des fins d'impressions de moules en matériaux réfractaires. Dans ce rapport, vous retrouverez le résumé de mon travail, et mon retour général d'expérience professionnelle et sociale dans ce FabLab.



# I. COH@BIT: Présentation

## 1. Présentation globale

L'association COH@BIT (Creative open House Bordeaux Institute of Technology) a été inaugurée en 2014 par Mr. Manuel Tunon de Lara<sup>1</sup> et Christine Albanel<sup>2</sup>.

**L'association est alors scindée en deux institutions :** Un FabLab, lieu d'ouverture sur les nouvelles technologies ouvert au grand public, et le Technoshop, bureau de recherche et développement.

Les locaux de l'association sont situés en intra-muros dans les bâtiments des IUT de Bordeaux à Gradignan, bien que l'association soit bien distincte du cadre de l'enseignement.

Pour mieux cerner les nuances entre le FabLab et le Technoshop, ils seront présentés séparément.

## 2. Le FabLab (Organisme responsable du stage)

### Définition générale

**Qu'est-ce qu'un FabLab ? (définition tirée du site cite-science.fr)**

*Un FabLab (contraction de l'anglais fabrication laboratory, «laboratoire de fabrication») est un lieu ouvert au public où il est mis à sa disposition toutes sortes d'outils, notamment des machines-outils pilotées par ordinateur, pour la conception et la réalisation d'objets.*

*La caractéristique principale des FabLabs est leur « ouverture ». Ils s'adressent aux entrepreneurs·euse·s, aux designers, aux artistes, aux bricoleur·euse·s, aux étudiant·e·s ou aux hackers en tout genre, qui veulent passer plus rapidement de la phase de concept à la phase de prototypage, de la phase de prototypage à la phase de mise au point, de la phase de mise au point à celle de déploiement, etc. Ils regroupent différentes populations, tranches d'âge et métiers différents. Ils constituent aussi un espace de rencontre et de création collaborative qui permet, entre autres, de fabriquer des objets uniques: objets décoratifs, objets de remplacement, prothèses, orthèses, outils..., mais aussi de transformer ou réparer des objets de la vie courante.*

*Pour être appelé FabLab, un atelier de fabrication doit respecter la charte des FabLabs, mise en place par le Massachusetts Institute of Technology (MIT).*

*La version originale de la charte (en anglais) est disponible sur le site du [M.I.T.](https://www.makerlabs.org/)*



---

<sup>1</sup> Président de l'université de Bordeaux

<sup>2</sup> Fondation orange

# UN FABLAB, C'EST QUOI ?



## FabLab Coh@bit

Le FabLab Coh@bit, est fort d'un atelier de 270m<sup>2</sup> situé dans les locaux des IUT de bordeaux et est ouvert au public du lundi au vendredi de 10 à 20H. Les utilisateurs cotisent sur une base semestrielle pour pouvoir se servir des locaux et des machines.

Les machines spécifiques se trouvent dans des pièces séparées de l'atelier, qui fait également office d'Openspace. Cela évite que le bruit et les odeurs des machines en fonctionnement perturbent le travail des adhérents. D'autres locaux sont mis à disposition de Start Up qui utilisent les moyens du FabLab pour développer leurs projets. Cette cohabitation entre association, start ups et entreprise permet un échange de connaissances et de moyens bénéfiques à chacun des partis. La fondation orange possède elle aussi un bureau dans les locaux de Coh@bit. Mécène du Fablab, cette association est spécialisée dans le raccrochage scolaire et organise de nombreux ateliers dans le cadre de cet objectif. Les adolescents et jeunes adultes ainsi encadrés peuvent découvrir un espace de création numérique, et de nombreux corps de métiers autour de la technologie.

Le Fablab *Coh@Bit* travaille donc exclusivement avec des particuliers, ou des entreprises locales. Les adhérents sont très hétérogènes (tranche d'âge de 13 à 65 ans), avec une part de population un peu plus élevée parmi les étudiants.



Figure 1: Espace Coworking du FabLab Coh@Bit

## Organisation Budgétaire :

Système d'adhésion et de formations payantes, partenariats, mécènes, vente de matières premières aux adhérents, subventions... Le budget annuel du FabLab est approximativement de 50.000 euros, mais le but de l'association n'est nullement lucratif. Les bénéfices générés lors de la mise en place de formations payantes servent à financer les machines du FabLab, les différents projets réalisés en son sein ou encore payer les employés de la structure.

Il arrive que le Fablab réalise certaines prestations tarifées telles que la conception et la fabrication de trophées pour certains événements. Les bénéfices récoltés servent eux aussi à financer ses activités.

**Le parc machine destiné au public du FabLab** est composé de :

- 5 imprimantes 3D de type « Prusa i3 », un modèle répandu d'imprimantes.
- Une imprimante « grand format » (50x50x40cm) basée sur une structure *OpenBuild*<sup>3</sup> de *Voxel OX*<sup>4</sup> et redimensionnée
- **2 imprimantes Voxel OX améliorée d'un BED\_AUTO\_LEVELLING<sup>5</sup> automatique par capteur à induction, d'une interface de démarrage personnalisée et d'un capteur de fin de filament.**
- Une découpeuse laser Trotec speedy 300 permettant la découpe de matériaux « légers » tels que le bois, plexiglas, et divers types de textiles.
- Une fraiseuse à commande numérique CharlyRobot 3Axes
- Deux perceuses à colonnes
- 1 Scanner 3D
- Une découpeuse vinyle
- Une floqueuse
- Une brodeuse numérique
- Tout l'outil grand public nécessaire à la réalisation de prototypes (fer à souder, bricolage etc.)

D'autres machines appartenant au technoshop sont disponibles selon les besoins des utilisateurs, mais elles ne sont pas laissées en libre-service pour éviter les accidents et la casse (Tour à métaux, scie à ruban etc.) ces machines permettent parfois de réaliser des pièces spécifiques pour un projet, qui n'auraient pu être réalisées avec les seules machines du FabLab. De plus, la proximité avec les IUT *Génie Mécanique et Productique* et *Science et Génie des Matériaux* permet l'usinage de pièces complexes lors de projets conséquents.

---

<sup>3</sup> Plans en accès libres sur des bases de données publiques

<sup>4</sup> Modèle d'imprimante

<sup>5</sup> Capteur permettant de définir la hauteur du plateau d'impression en plusieurs points de sa surface.





Figure 4: Découpeuse laser



Figure 3: 3D printer



Figure 2: Fraiseuse numérique

### Les ressources humaines du FabLab :

Une responsable, *Mme Claire Rivenc*, ainsi que son adjoint, *Mr Thierry Bombardier*, et de nombreux intervenants.

*Mr Jean Baptiste Bonnemaison*, un employé sous contrat hebdomadaire de 35h qui porte la fonction de « FabManager » et qui assure les horaires d'ouvertures des locaux, le fonctionnement des machines et l'organisation du Fablab.

*Mme Valérie Berrivin* responsable administrative et financière pour le Fablab et le Technoshop.

Les bénévoles de l'association, qui n'ont pas d'horaires prédéfinies.

Un poste de stagiaire est à pourvoir en continu sur l'année. C'est-à-dire que lorsqu'une convention de stage arrive à terme, l'étudiant stagiaire est rapidement remplacé par un nouveau pour travailler sur un nouveau projet et ainsi rentrer dans une dynamique d'innovation permanente.

## 3. Le Technoshop

Définition faite par le technoshop :

*Si le Fab Lab correspond à l'univers du « do it yourself<sup>6</sup> », la philosophie de notre TechnoShop est « **do it together<sup>7</sup>** » ! **Nous ouvrons en grand une porte** sur le monde économique pour les entreprises de toutes tailles qui souhaitent innover, développer un produit en mobilisant toutes les forces et ressources régionales. Nos équipes sont à votre écoute pour comprendre vos besoins en développement de solutions innovantes, vous assister dans l'élaboration du cahier des charges de votre projet et enfin dans la conception, l'intégration de technologie et le prototypage de la solution technique retenue. **Chaque réalisation est suivie par un manager de projet qui sera votre interlocuteur unique** et qui sollicitera, en fonction des spécificités de votre demande, les experts et moyens techniques du campus de l'IUT, mais aussi, en cas de besoins spécifiques, ceux des laboratoires, plateformes ou centres technologiques régionaux pour mobiliser les résultats de la recherche dans les domaines les plus pointus. [Les premiers](#)*

---

<sup>6</sup> Fais le toi même

<sup>7</sup> Faisons-le ensemble

*[projets](#) portés par le TechnoShop sont en lien avec la maintenance nucléaire, la mobilité douce, le handicap, l'imagerie médicale, le développement de solutions d'impression 3D...*

Le Technoshop est composé d'un noyau d'ingénieurs de différents domaines (Programmation, Electronique, Mécanique...), ainsi que d'une responsable administrative.

Le portefeuille de client ne s'étend pas à l'étranger pour le moment.

## II. Travail réalisé

### 1. Sujet défini avant mon arrivée

La mission du stage est basée sur la conception et le prototypage d'une imprimante 3D céramique. Si le système est déjà existant à l'échelle grand public comme industriel, le Fablab, fort de ses capacités de fabrication et de son esprit DIY<sup>8</sup>, souhaitait en concevoir une avec ses propres moyens. Sur place, une structure d'imprimante 3D cartésienne (*plateau en translation sur l'axe Y, buse en translation sur X et sur Z*) est censée servir de modèle à la conception de notre futur prototype, il ne reste donc théoriquement que la conception de l'extruder à faire.

**Ma mission consistait initialement à :**

**Concevoir, dimensionner et prototyper :**

Le système d'entraînement de la pâte argileuse, de son réservoir jusqu'à la buse d'extrusion.

Le système d'extrusion, de manière à obtenir une impression fiable et précise.

**Caractériser** les propriétés du matériau à utiliser pour obtenir un filament viable, et une pièce finale avec un état de surface appréciable.

**Approche rétroactive** du choix d'imprimante, et documentation, pour valider ou non la structure choisie, et apporter les modifications nécessaires tout au long du projet.

**Le but global est d'obtenir, en fin de stage, un prototype achevé et fonctionnel, ou du moins une gamme de fabrication permettant à une personne tierce de finir le prototype sans difficulté.**

Le projet est piloté par Mr Jean-Marie George, bénévole du FabLab et ancien fondeur et professeur aux Arts et Métiers. C'est lui et Mr Bombardier qui vont m'aiguiller sur le travail à réaliser. Nous travaillons donc en collaboration sur le projet. Mon rôle est d'utiliser mes acquis de cours pour faire des recherches de solutions techniques face aux problèmes rencontrés, puis ensemble nous validons ou non les solutions apportées

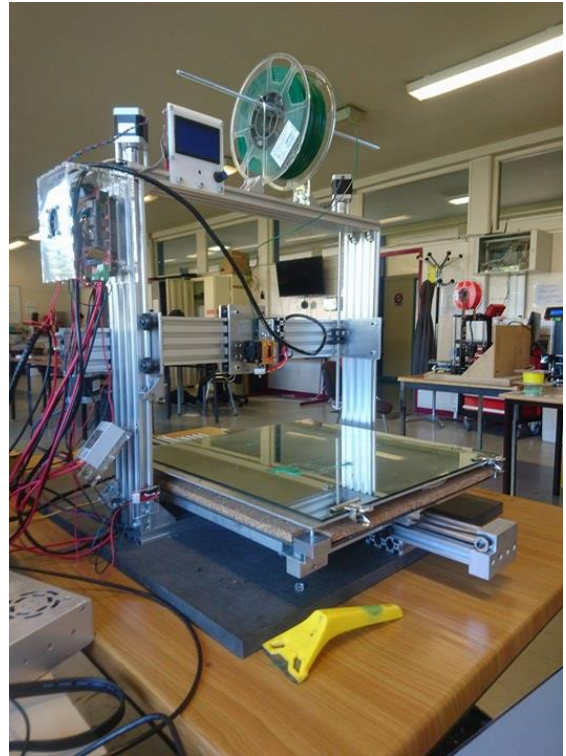


Figure 5: Imprimante Voxel OX redimensionnée et réalisée dans les ateliers du FabLab

---

<sup>8</sup> DIY Do It Yourself "Fais le toi-même"

## 2. Tâches réelles.

Le projet de l'imprimante 3D Céramique était mon projet principal, mais en tant que membre du Fablab, j'ai été affecté à de nombreuses autres missions secondaires, auxquelles j'ai dû attribuer une partie de mon temps.

De plus, pour des raisons évidentes d'incompatibilité entre mes compétences et certains aspects du travail à réaliser que j'exposerai par la suite (principalement la caractérisation du matériau adéquat), ma mission réelle sur le projet a été amenée à évoluer au cours du stage.

**Ci-dessous, le listing des activités rythmant mon quotidien au Fablab :**

### **Gestion du FabLab, des machines et des adhérents (60% du temps)**

- ✓ Accueil des nouveaux adhérents, présentation du parc machine et de son fonctionnement, visite de l'espace de Co-Working etc.
- ✓ Participation aux réunions hebdomadaires pour planifier les activités futures de l'association, et faire le bilan global de l'activité du Fablab.
- ✓ Maintenance, entretien et surveillance du parc machine.
- ✓ Montage et entretien des nouvelles imprimantes 3D Voxel OX, citées [précédemment](#)
- ✓ Dans le cadre d'un partenariat avec l'université de Bordeaux, animation d'un atelier de fabrication numérique durant lequel j'apprenais à des étudiants venant de différents domaines (scientifiques ou non) les bases de la CAO<sup>9</sup> et du prototypage rapide, avec pour objectif de leur faire réaliser un petit projet personnel impliquant conception, impression 3D, découpe laser et électronique.

### **Suivi du stage et rédaction du rapport (10% du temps)**

### **Travail sur le projet d'imprimante 3D céramique (30% du temps)**

Le projet principal a été traité d'une manière similaire aux unités de valeurs à projet à l'UTBM. Joint à la page suivante, les GANTTs établis sur la durée du stage.

---

<sup>9</sup> Conception assistée par Ordinateur

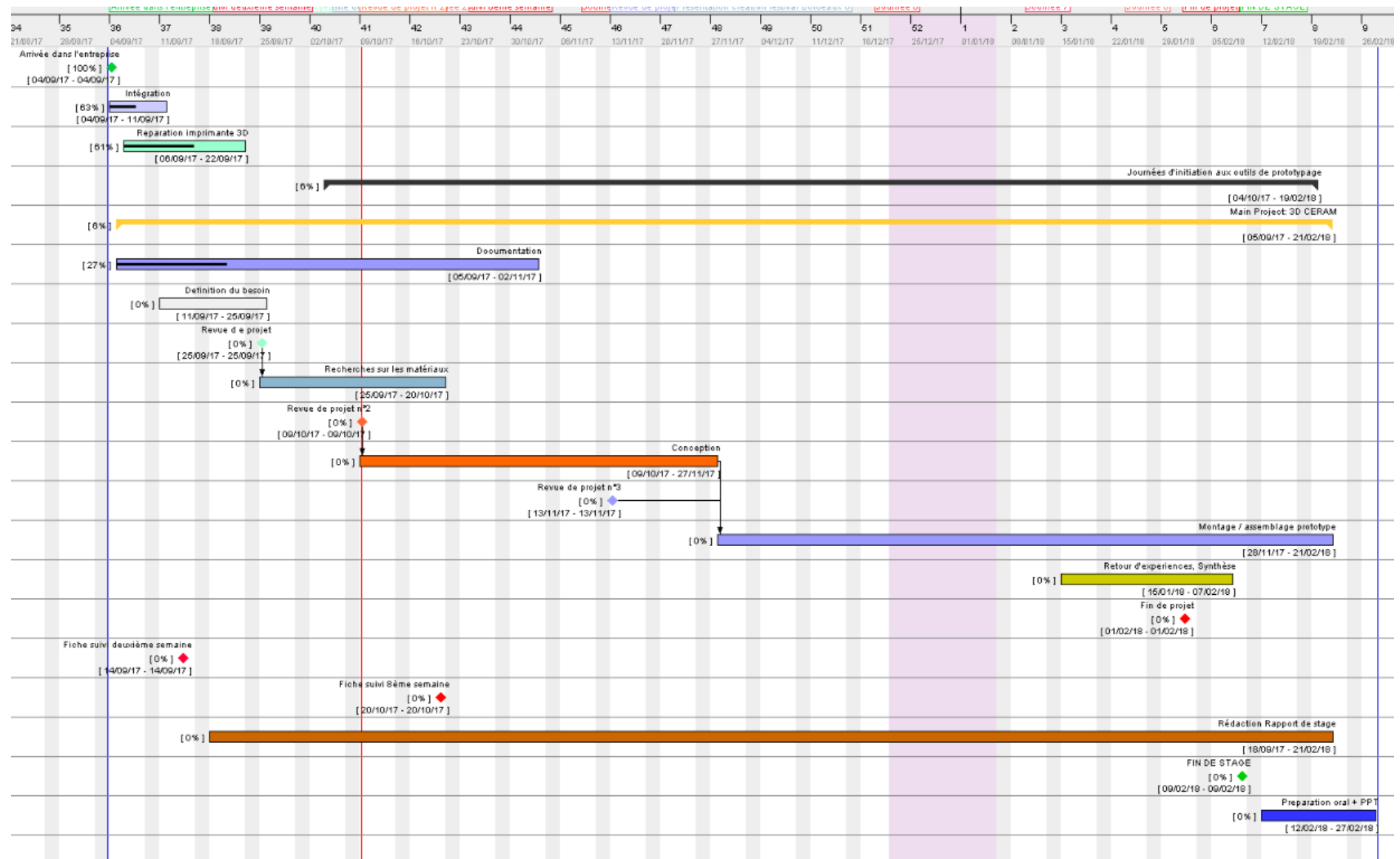


Figure 6: GANTT Initial du stage



Les différences entre le planning initial et le planning réel sont principalement liées à la segmentation du projet en 3 sous-projets.

La partie matériau sera gérée par un groupe d'étudiants de la spécialité Science et génie des matériaux des IUT de Bordeaux. La partie Imprimante 3D sera gérée par un groupe d'étudiants en master de technologies d'usinages, et moi-même. La partie extruder sera gérée par moi-même. Je devrais aussi jouer le rôle d'intermédiaire entre chaque branche du projet de manière à respecter un cahier des charges communs, et les délais du projet.

Cette segmentation permet de spécialiser chaque partie du projet en fonction des compétences des autres étudiants, et d'aboutir à un produit plus recherché et plus complet.

### III. Montage et perfectionnement des imprimantes 3D Voxel OX

Cette partie de mon stage a été, après le projet d'imprimante 3D à matériaux réfractaires, la plus conséquente.

L'objectif pour le FabLab était de monter deux imprimantes 3D sur la base du modèle OpenBuild Voxel OX. Ces imprimantes ont la particularité d'être conçues majoritairement à base de métaux (aluminium, acier), ce qui est un gros avantage, car elles devraient être plus tard utilisées dans un projet de FabLab Mobile, implanté dans une caravane. Elles seront donc potentiellement exposées à de fortes chaleurs (jusqu'à 60°C), auxquelles les imprimantes auto-réplicatives classiques (prusa i3 par exemple) n'auraient pu résister en raison de leurs nombreuses pièces plastiques. Le Plastique sous l'effet de la chaleur perd ses propriétés mécaniques, et les pièces deviennent inutilisables. (Fragilité, et/ou n'assure plus sa fonction principale etc.)

#### Prise en main des logiciels

##### SolidWorks :

La plupart des pièces 2D et 3D conçues durant mon stage l'ont été grâce au Logiciel SolidWorks développé par Dassault Systèmes<sup>10</sup>. J'ai été amené à utiliser le logiciel pour le montage des imprimantes Voxel OX, et pour la création de pièces supplémentaires telles que le capteur de fin de filament. De plus, de nombreuses pièces déjà existantes ont été modifiées pour tenter d'améliorer le fonctionnement de la machine une fois terminée. L'image ci-contre est une C.A.O. trouvée sur internet par l'un des ingénieurs du TechnoShop (le modèle est en OpenBuild), qui m'a servi de plan pour le montage de la machine, et de support pour l'essai des pièces modélisées.

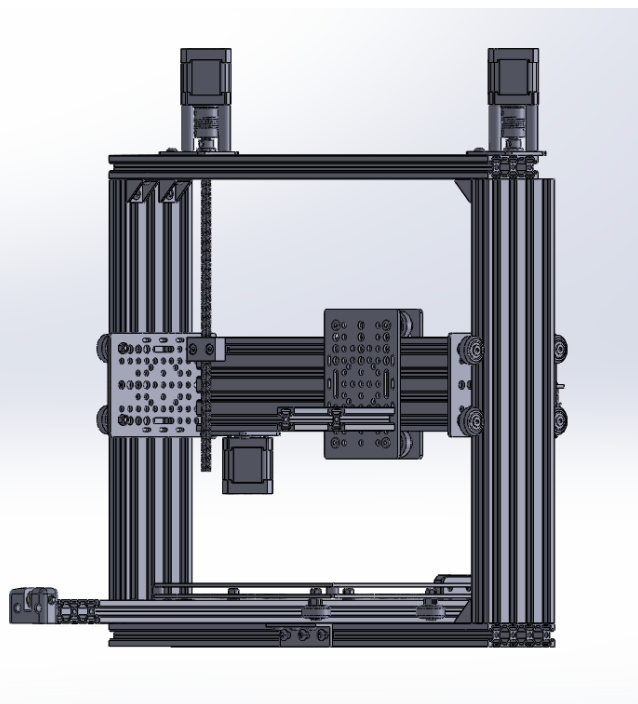


Figure 7: Voxel OX SolidWorks Assemblage

---

10



SolidWorks est un logiciel professionnel de conception assistée par ordinateur. Issus et développé par le même groupe que Catia<sup>11</sup>, celui-ci a, à mon goût, une interface mieux pensée en terme d'ergonomie et d'intuitivité, mais devient plus laborieux à utiliser lorsque l'on sort des outils de conception classique (conception paramétrée, catalogues de pièces etc.)

Dans le cadre du stage, ce logiciel avait l'avantage de pouvoir générer aisément des fichiers au format DXF, très utiles pour la découpe laser (voir point suivant).

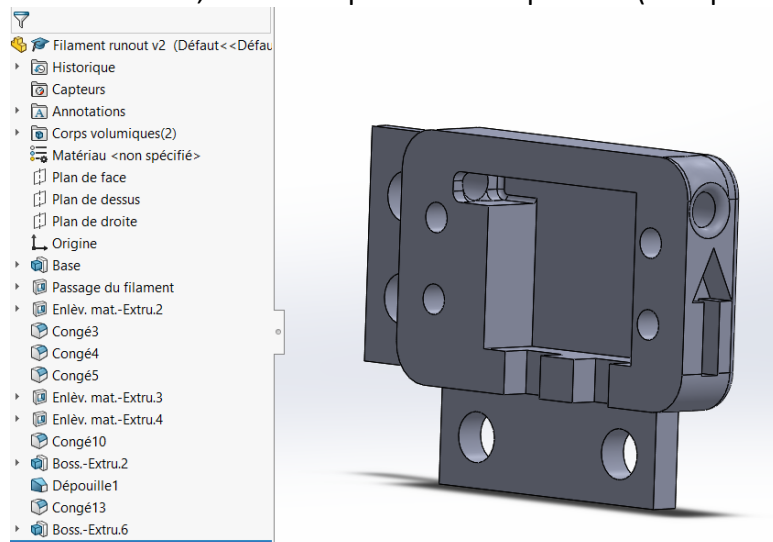


Figure 8: CAO Filament RunOut Sensor

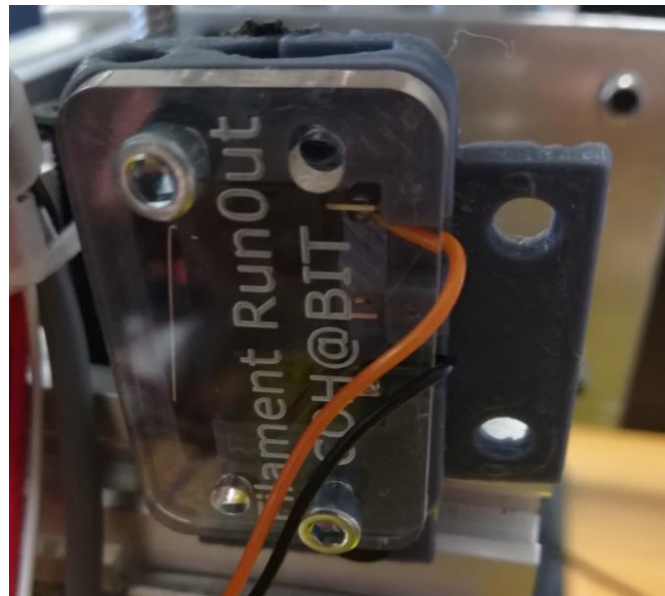
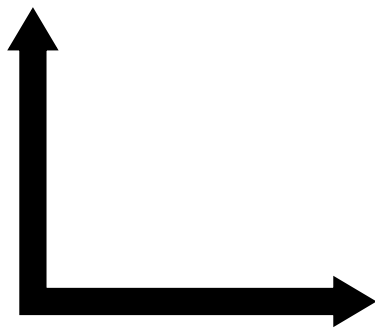


Figure 9: capteur de fin de filament après ajout du capot

## InkScape / CorelDraw

Ces deux logiciels de dessins vectorisés en 2D sont indispensables à l'utilisation de la découpe laser. Ils permettent de générer les fichiers d'impressions lus par la TROTEC Speedy 300<sup>12</sup>. Les matériaux principalement utilisés pour la découpe sont le plexiglas (PMMA), et le bois recomposé (MDF) tous deux en épaisseurs variables allant de 3 à 12 mm. En paramétrant l'épaisseur et la couleur des lignes sur l'un des deux logiciels nommés, on peut envoyer différentes commande à la découpe laser pour régler la découpe, la gravure, et le nombre de passes de chacune d'entre elles. Les fichiers initiaux sont générés en DXF<sup>13</sup> sur SolidWorks comme le montre l'illustration suivante :

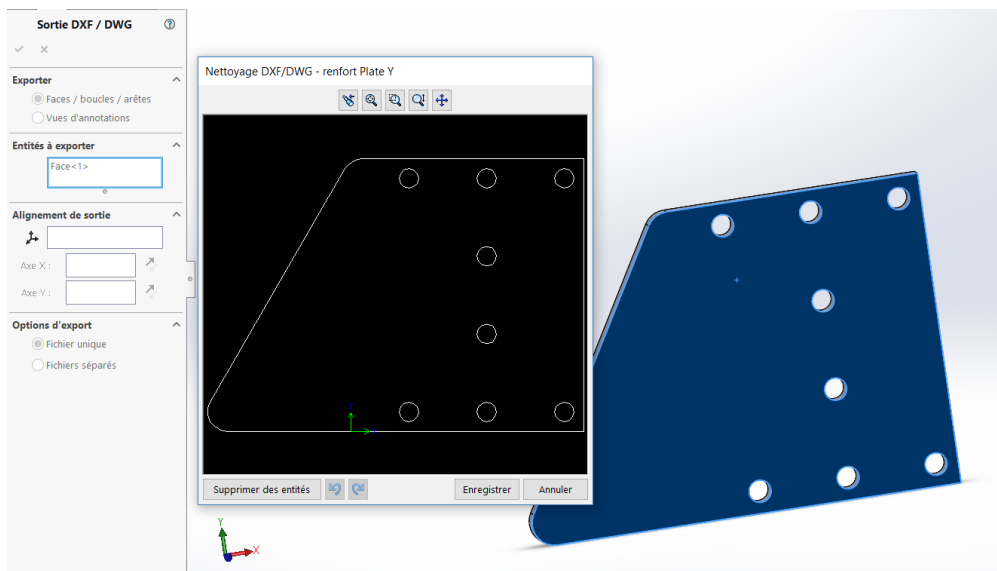


Figure 10: Enregistrement d'un dxf

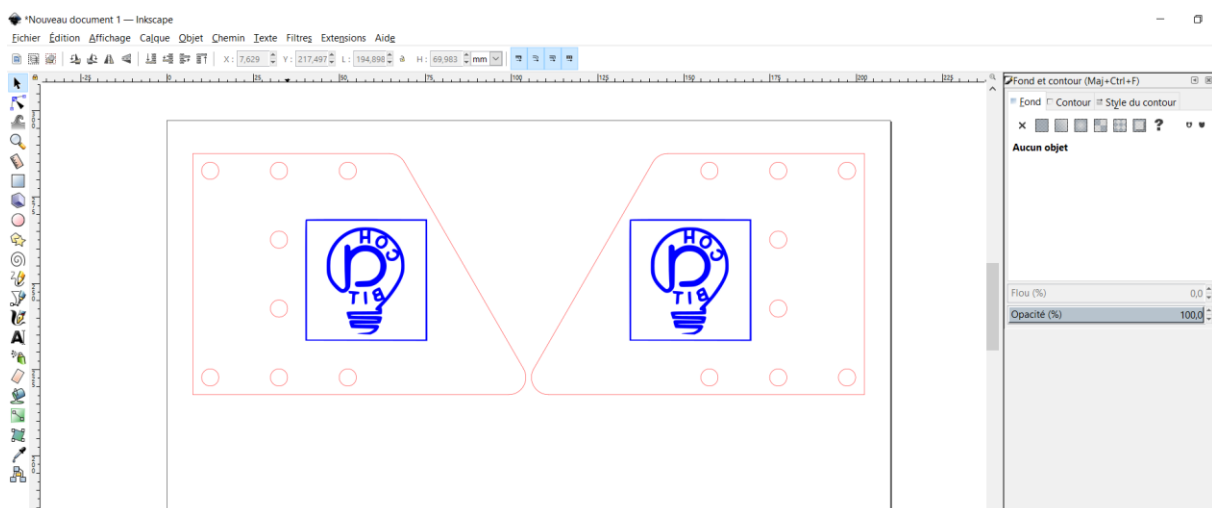


Figure 11: Exemple InkScape

<sup>12</sup>

<sup>13</sup>



### Repetier Host

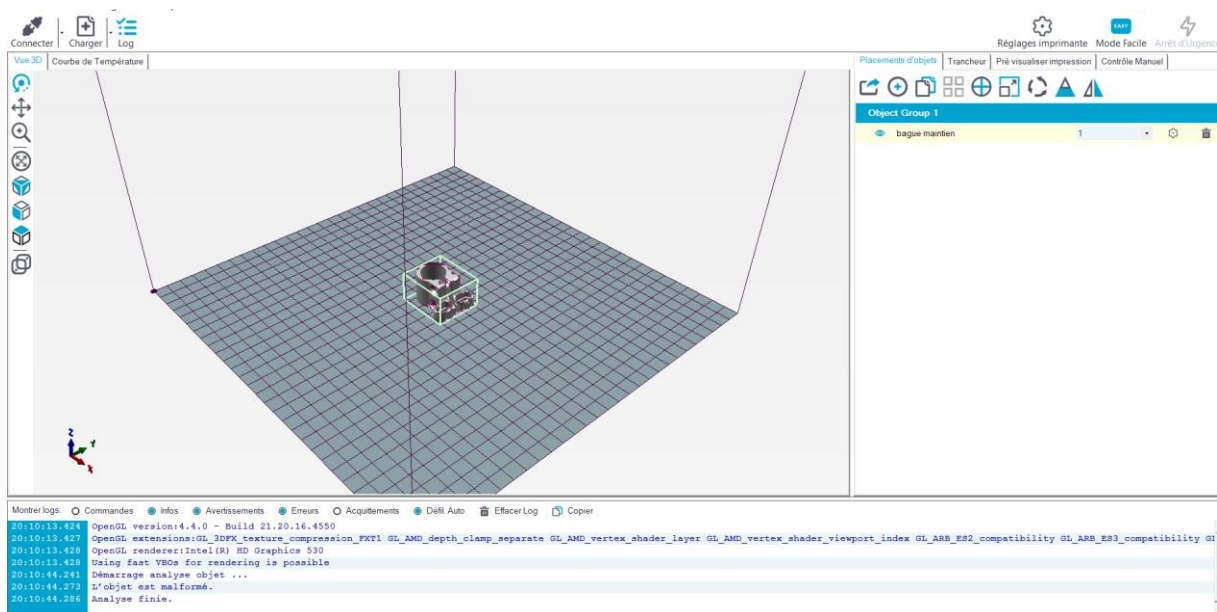


Figure 12: Interface Repetier Host-V2.0.5

Logiciel de contrôle de l'imprimante 3D. On configure d'abord dans ce logiciel les spécificités de l'imprimante utilisée, telle que les dimensions de sa surface d'impression, son type d'extrudeur (taille du filament plastique) et sa vitesse maximale d'impression. Une fois cette étape effectuée, le logiciel permet de : Contrôler les déplacements des axes de l'imprimante, et les chauffages et/ou ventilation respectifs de l'extrudeur et du plateau chauffant. De plus, ce logiciel est païré à un trancheur, sous forme de Plug-In. Le trancheur est le logiciel permettant de couper le Fichier 3D à imprimer en « tranches », comme le montre l'illustration ci-dessous, et de générer le G-CODE correspondant. Dans Repetier, on utilise principalement les trancheurs Slic3r et CuraEngine. Les illustrations qui vont suivre sont tirées du trancheur Slic3r, car c'est celui que j'ai le plus utilisé lors de mon stage.

Comme on le voit en figure 12, on place d'abord virtuellement l'objet à imprimer sur le plateau de l'imprimante.

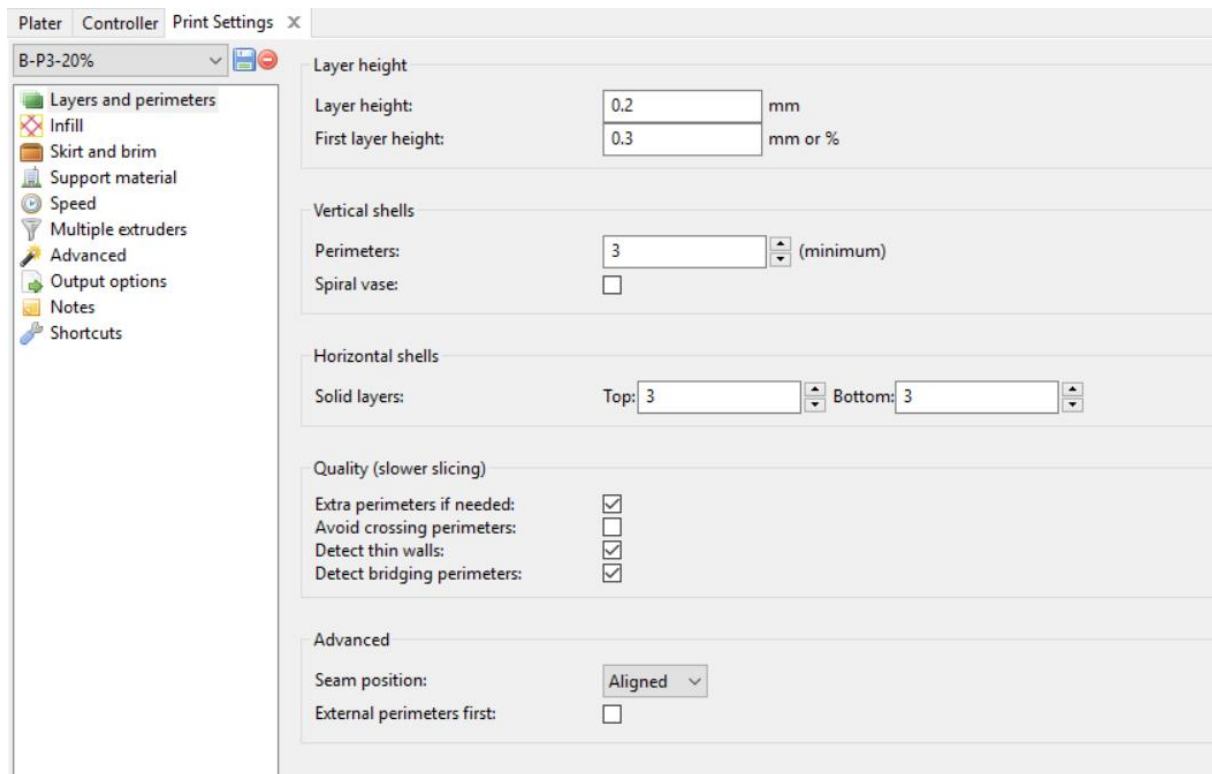


Figure 13: interface du trancheur Slic3r

Grace à cette interface, on gère les différents paramètres de la pièce à imprimer. Le procédé utilisé est un empilement de fines couches de plastique qui donne forme à la pièce finale. On travaille donc la hauteur des couches, le nombre de périmètres tracés, le taux de remplissage de la pièce et les géométries de remplissage (nid d'abeille, concentrique...), la création automatique de support pour les zones dont les contre dépouilles présentent un angle trop important etc.

Ces paramètres influencent sur les caractéristiques mécaniques des pièces obtenues comme leur poids, leur solidité selon le sens de la sollicitation, leur souplesse. On peut aussi dans certains cas faire varier ces paramètres pour réduire le temps d'impression de la pièce.

▶ **Trancher avec Slic3r**

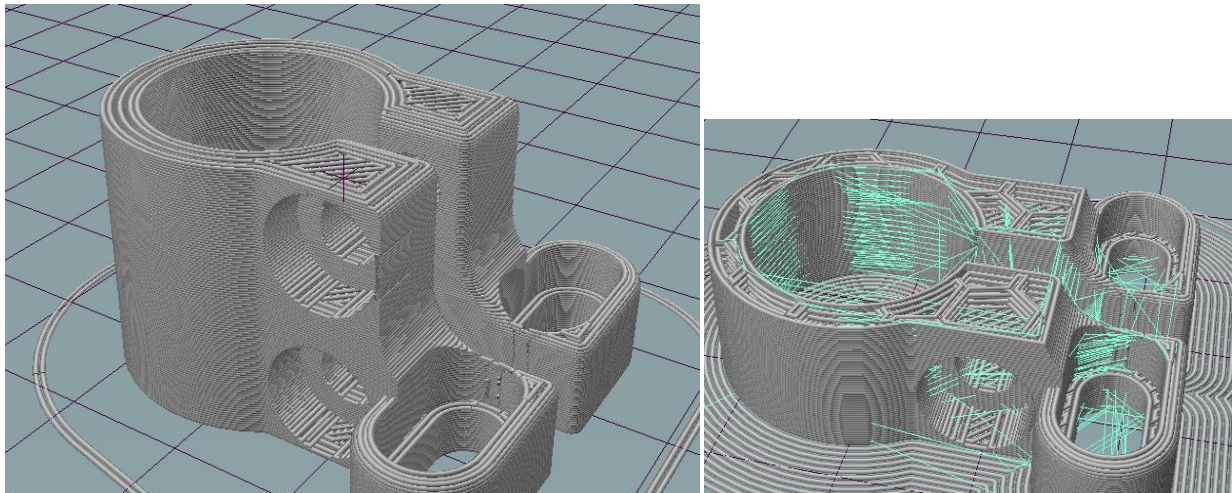


Figure 14: Exemple de pièce après "tranchage", et de sa coupe transversale

## Arduino

Le logiciel Arduino permet de programmer en langage C pour ensuite téléverser le programme sur des cartes spécifiques et ainsi, pouvoir commander les imprimantes 3D. Il s'agit en fait d'un compilateur. La programmation d'un Firmware capable de contrôler tous les paramètres d'une imprimante et de générer le Gcode adéquat à partir d'un fichier STL est un travail trop long pour un stagiaire, surtout en conception mécanique. En revanche, des bibliothèques et des programmes en Open Sources existent et sont accessibles sur le site de [Marlin](https://marlinfw.org/) par exemple. Ce firmware est très répandu dans le domaine de l'impression 3D et c'est celui sur lequel je me suis basé pour contrôler les machines sur lesquelles j'ai travaillé. Pour moi, l'avantage était un accès à un code très complet mais très bien commenté, ce qui, quand on est novice dans ce domaine, est un grand avantage. Au fil du temps, les compétences acquises grâce à Marlin m'ont permis de rajouter dans le programme déjà existant, les options telles que le capteur de fin de filament, un auto-leveling, ou encore quelques modifications d'interfaces graphiques sur les écrans dédiés des imprimantes.



Figure 15: exemple du code Marlin dans Arduino



## Fonctionnement des machines

### Découpe laser Trotec Speedy 300

La découpe laser permet de travailler sur de nombreux matériaux telles que le MDF, le PMMA, le carton, le papier, le cuir, certains métaux, le verre etc. Soit sur des pièces planes, soit sur des pièces cylindriques grâce à un tour installé sur le plateau de la machine.

La machine peut usiner des plaques de 0.1 à 12 mm d'épaisseur, et de dimensions 440\*700 mm.

Son fonctionnement est simple : Un laser guidé par lentilles est piloté selon les axes X et Y qui eux sont commandés par un système poulie-courroies, et l'axe Z est commandé par un système vis sans fin. Z est réglé manuellement en début de process, avec un étalon, de manière à positionner le point de focalisation du laser à la bonne distance de la plaque à travailler. Une fois que Z est réglé, on propose à la machine différentes vitesses et puissance pour le laser (caractérisé par des couleurs de lignes sur le logiciel), ainsi qu'un nombre de passes, afin d'obtenir le résultat voulu sur la plaque. Il est important que le laser soit bien réglé lors d'une impression, car un surplus de puissance risque d'endommager le martyr, et un manque de puissance risque d'attaquer la plaque sans la découper, et donc de la détériorer inutilement. La découpe laser a un cout environnemental, car les vapeurs dégagées lors de la découpe de certains matériaux sont nocives, malgré le filtre de la machine.

Lors de la conception d'une pièce à des fins de découpe laser, il est nécessaire de prendre en compte l'épaisseur du rayon laser, de manière à anticiper le retrait de matière lors des passages du rayon. Le laser coupe la plaque au centre des traits dessinés par le concepteur. Avec une épaisseur de 0.2 mm, on compte un retrait de 0.1mm de chaque côté de la plaque, et ce retrait doit être anticipé pour éviter tout jeu sur une pièce technique, ou justement pour garder un jeu voulu (dans le cas des encoches de fixation d'une boîte par exemple)

Le plexiglas est un matériau translucide résistant à la chaleur jusqu'à 130°C. Il est donc très utile lorsque l'on a besoin de créer des pièces planes, des supports, des boîtiers, ou toutes autres pièces de géométrie simple. Pour le prototypage rapide, ses avantages sont sa couleur transparente que l'on ne peut obtenir, ou difficilement en impression 3D, le gain de temps par rapport à l'impression, et la précision du résultat finale (si l'on compare deux pièces planes similaires, en découpe et en impression.)

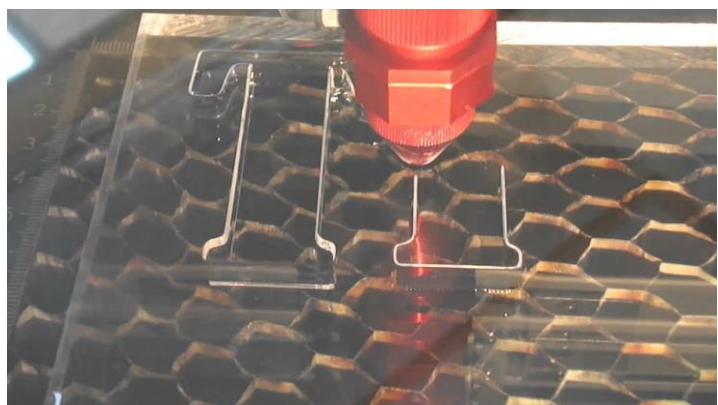


Figure 16: laser découpant une plaque de PMMA

## Imprimantes 3D

Si le fonctionnement des imprimantes 3D m'était déjà familier grâce aux unités de valeurs réalisées à l'UTBM, ce stage m'a permis, d'un point de vue utilisation comme fabrication, d'affiner mes connaissances. Les réglages classiques tels que le taux de remplissage de la pièce à imprimer, le nombre de contours fait autour de la pièce avant de lancer le remplissage, le Brim<sup>14</sup>, les températures d'extrusion et de chauffe du plateau en fonction du plastique utilisé... ne suffisaient pas à réaliser des impressions avec un niveau de finition suffisamment correct pour toutes les pièces à réaliser

Comme certaines impressions étaient destinées à servir sur d'autres machines, les contraintes mécaniques étaient importantes à respecter, à commencer par les dimensions des pièces. Il y a plusieurs choses à prendre en compte lors de la conception des pièces pour l'impression 3D :

- Rétractation du plastique
- Ecrasement des couches les unes sur les autres (peut légèrement modifier les dimensions d'une pièce, et donc provoquer un dysfonctionnement).
- Sens d'impression de la pièce pour éviter un délaminage des couches lorsqu'une contrainte est appliquée à la pièce.
- Anticipation des supports pour éviter une génération automatique trop importante
- Différents états de surface en fonction de la matière du plateau d'impression.
- Pré-perçage des trous à tarauder pour obtenir un contour fiable et solide sur le passage de vis

## Charly-Robot

La fraiseuse à commande numérique Charly-Robot 3 axes m'était déjà relativement familière grâce aux cours déjà réalisés à l'UTBM. Je ne m'en suis pas servi faute d'avoir un logiciel permettant de générer du G-CODE, mais j'ai pu en apprendre quelques utilisations faites par le Technoshop, autre que le prototypage, tel que le surfacage d'entretoises pour augmenter le degré de précision de celles-ci, ou encore la réalisation de « plate » (Objet en deux dimensions auquel on ajoute simplement une épaisseur) en aluminium.

## Tour à métaux, ponceuse à bande, disquuse etc.

J'ai eu l'occasion d'apprendre à utiliser certaines machines comme un tour à métaux, une ponceuse à bande etc. avec lesquelles je n'avais pas encore eu l'occasion de me familiariser à l'UTBM. Ces connaissances m'ont été ensuite utiles pour savoir rapidement quels moyens étaient disponibles et comment réaliser les pièces qu'il me manquait pour monter ou modifier une imprimante.

---

14



Figure 17: Scie à ruban à métaux, utilisée pour la découpe de profilés Bosch

## Monter en compétence sur le domaine des imprimantes 3D

En montant les Voxel OX, mon objectif était de monter en compétence sur les imprimantes 3D, d'une part sur leur utilisation, mais aussi sur leur fonctionnement. Ainsi, je pourrai d'une part proposer des solutions pour améliorer le fonctionnement des imprimantes, et soulager un peu le travail de maintenance des machines, et d'autre part proposer aux utilisateurs une expérience d'utilisation plus agréable avec les imprimantes 3D.

La hiérarchisation du travail sur cette mission s'est donc faite naturellement, de cette manière :

### 1- Montage de la première machine avec un modèle.

Première partie en approche naïve sur l'imprimante : Tous les éléments de montage sont en ma possession, sauf certaines pièces simples à réaliser en impression 3D. Un modèle déjà monté est présent dans l'atelier. Je me base donc sur ce modèle pour commencer mon montage. J'en profite pour découvrir la cinématique de la machine, les différentes solutions techniques apportées pour la rendre fonctionnelle, et sa gamme de

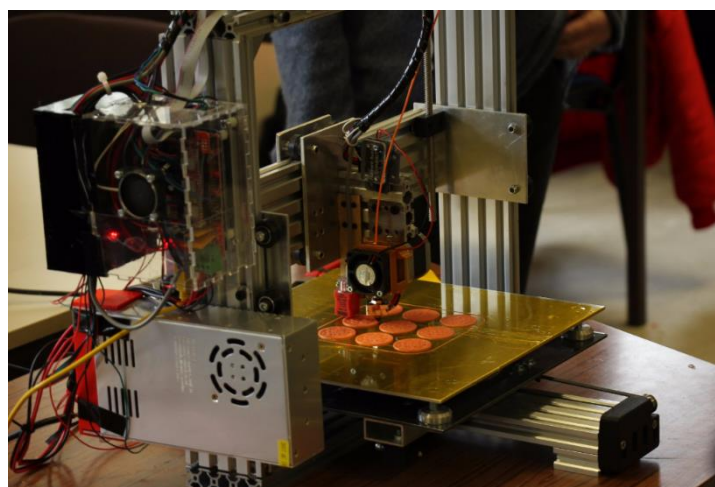


Figure 18: imprimante Voxel en phase de test



montage. Je redessine les pièces dont j'ai besoin en fonction des difficultés rencontrées lors du montage.

Lorsque l'assemblage est terminé, je m'occupe d'installer un firmware fonctionnel sur la carte électronique de l'imprimante. Il s'agit simplement de modifier les valeurs de certaines variables dans un code déjà programmé. La plupart des variables sont de type réel (nombre de pas que doit effectuer un moteur stepper pour faire avancer son axe associé d'un millimètre, par exemple. Ce calcul dépend de la dentition des poulies dans le cas d'une transmission de mouvement par poulie-courroie, et du pas de vis dans le cas d'une transmission de mouvement par vis sans fin).

Certaines variables sont booléennes<sup>15</sup> (choix du type de matériel branché sur la carte, inversion de signal pour les interrupteurs, inversion de sens des moteurs etc.)

## 2- Analyse du fonctionnement et listing des défauts de la machine

Une fois l'imprimante capable d'imprimer ses premiers objets, j'ai fait un suivi régulier des problèmes qu'elle rencontrait le plus fréquemment, de manière à la rendre plus performante et plus fiable. Les premiers défauts à apparaître sont souvent liés au montage ou au paramétrage de la machine : Courroie trop, ou trop peu tendue, impliquant une mauvaise transmission du mouvement, mauvaises soudures, défaut de calibration etc. Ces défauts ne sont pas les plus importants car ils sont rapides à corriger et sont plus liés à la mauvaise manipulation de l'imprimante qu'à une erreur réelle de conception. L'analyse de l'imprimante ne devient vraiment utile que lorsque l'un des défauts remarqués ne peut être corrigé par un réglage, mais par l'apport d'une solution nouvelle. Ainsi, lorsque je remarque que certaines fonctions ne sont pas correctement assurées, ou simplement qu'un défaut mécanique est présent sur le modèle, j'essaie de trouver une solution pour corriger le problème.



Figure 19: Montage du projet céramique

---

<sup>15</sup> Variable qui ne peut prendre que deux valeurs « vrai » ou « faux »

### 3- Apporter des solutions durables aux principaux problèmes

- Apporter des modifications de conception

**Exemple de problème rencontré :** usure prématurée de la courroie de transmission du mouvement du plateau, et décalage récurrent dans les impressions

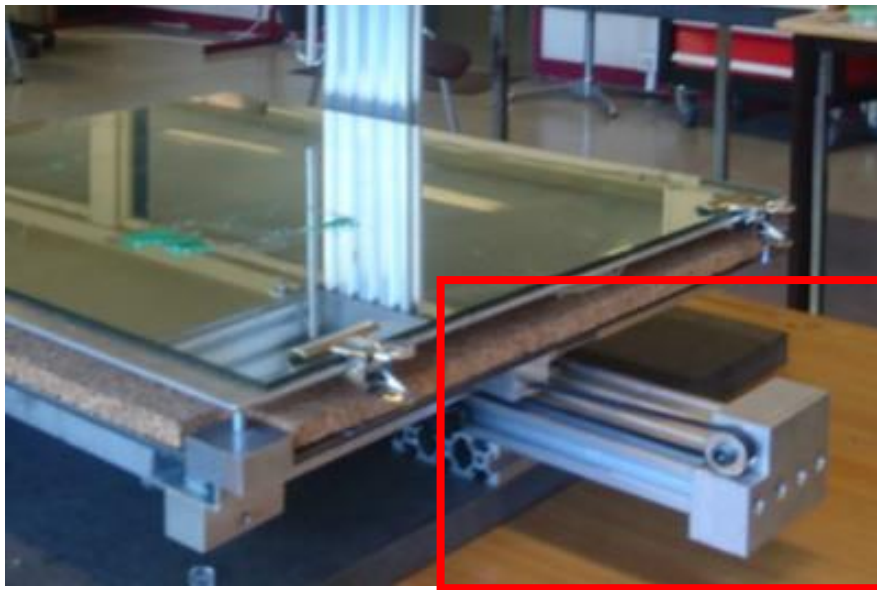


Figure 20: Pièce porteuse de la poulie de courroie du plateau

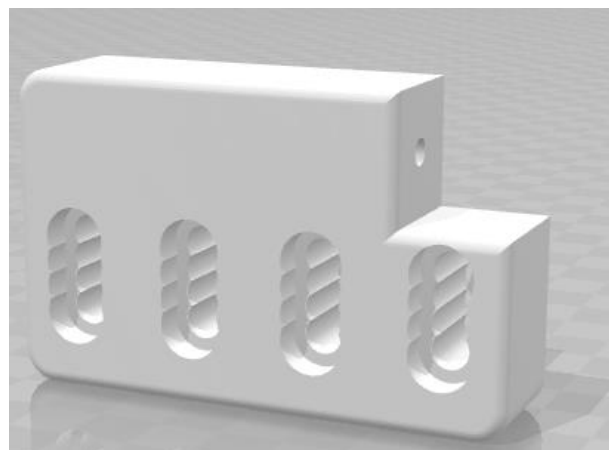
On a pu remarquer sur cette imprimante un défaut d'impression régulier, consistant en un décalage des couches successives selon l'axe Y, et ce malgré le réglage de la tension de la courroie. Par ailleurs, le moteur d'entraînement de la courroie affichait plus de 50°C lorsque nous l'avons pointé à la caméra thermique, or ce moteur n'est pas censé chauffer, même lors d'une longue activité.

Le plateau de cette imprimante est particulièrement lourd, et le moteur légèrement sous dimensionné. De plus, la pièce supportant la poulie de courroie était légèrement décalée par rapport à l'axe du moteur, entraînant un frottement de la courroie contre une pièce métallique, et une mauvaise transmission du mouvement.

#### Solutions apportées :

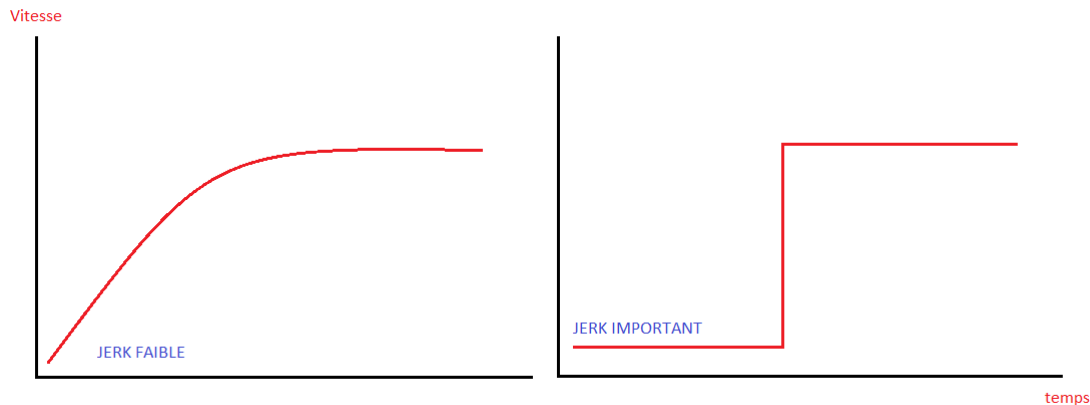
- Nouvelle pièce support de poulie :

La pièce ci-contre a remplacé celle dans l'encadré rouge fig. 20. Celle-ci permettait simplement de pouvoir régler l'orientation de la poulie de manière à ce que la courroie soit guidée dans un rail et ne frotte plus contre le métal de la structure de l'imprimante.



- Réglage du Firmware pour soulager le moteur :

Les paramètres directement liés à la puissance instantanée délivrée par le moteur sont directement liés à sa vitesse, son accélération, et le JERK. Le JERK, (dérivée de l'accélération), permet de donner à l'imprimante l'accélération minimale à partir de laquelle le moteur ne doit pas traduire la commande qui lui a envoyée par un changement de vitesse instantané, comme l'explique le schéma ci-dessous.



L'accélération doit être la plus fluide possible pour éviter des changements de vitesse brusques impliquant des efforts importants de la poulie sur la courroie, faisant chauffer le moteur et souvent causant des sauts de pas, à l'origine des décalages d'impression.

En baissant le JERK pour l'axe Y, on a pu constater une nette amélioration concernant ce problème.

- Suivre des gammes de montage fiable

Exemple de problème rencontré : défaut d'étanchéité de la buse d'extrusion

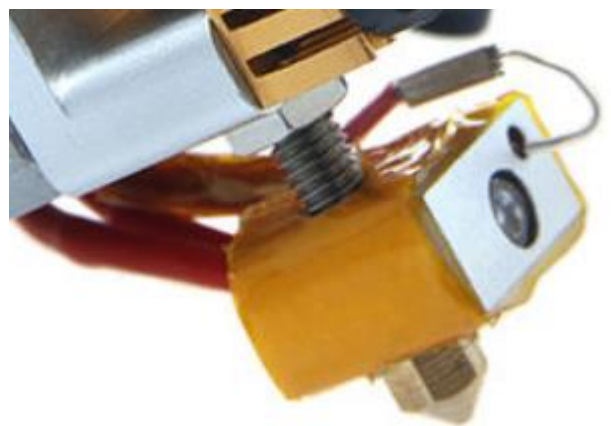
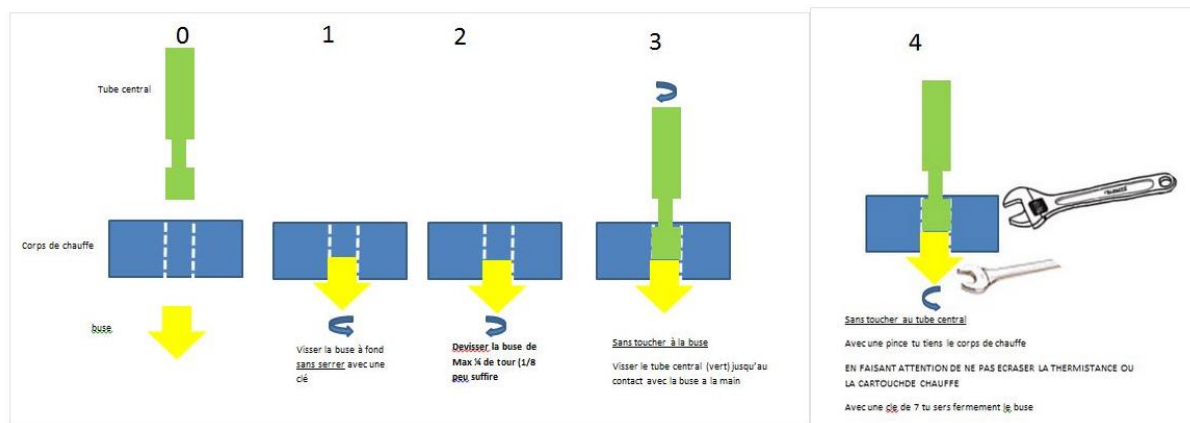


Figure 21: photo de buse recouverte de plastique fondu, car défaut d'étanchéité



- Proposer une interface d'utilisation plus intuitive

## IV. Compte rendu du projet céramique

### 1. Documentation et veille informative

Afin de bien prendre en main le sujet, le projet a commencé par une documentation sur le thème des impressions 3D, et les matériaux couramment utilisés en impression.

#### Produits déjà existants

Je vais synthétiser les recherches de produits déjà existants à travers un benchmark, puis en réalisant un comparatif des différentes structures existantes d'imprimantes RepRap<sup>16</sup> : Le benchmark résumera le marché de l'impression 3D céramique, de manière à cerner quels sont les technologies déjà utilisées, et le comparatif fera l'inventaire des différents types d'imprimantes 3D « grand public », listant ainsi leurs avantages et leurs inconvénients.

Cette démarche est indispensable à la bonne conduite du projet, car elle me permettra d'une part de définir le besoin de manière plus précise, mais aussi de choisir sur quelle structure d'imprimante s'orienter, pour répondre au mieux aux contraintes imposées par l'impression de la céramique.

#### Analyse du benchmark :

<sup>16</sup> Replication Rapid prototyper : Imprimante tridimensionnelle libre de droit et en partie auto-répliquative.

Si de nombreux produits existent, les imprimantes à lit de poudre sont principalement réservées aux industries, et ont un coût très élevé. Le plus avantageux pour le FabLab est de se concentrer sur une structure d'imprimante RepRap classique, dimensionnée selon les spécifications du cahier des charges, et de travailler sur la conception de l'extruder céramique.

### **Analyse comparative des structures existantes :**

Le but ici est de trouver une structure d'imprimante libre de droits, adaptée à notre projet, et réalisable avec les moyens du FabLab. Ces indications feront office de consignes primaires, qui deviendront des critères du cahier des charges de l'imprimante.

A mon arrivée, Mr Bombardier souhaitait mettre le dispositif sur une imprimante cartésienne (voir fig.8), mais après réflexion (Incompatibilité avec le cahier des charges) et à l'aide du tableau comparatif, nous avons décidé de partir sur la base d'une imprimante delta (fig.8), ou sur une base Corexy, ou même encore sur un autre type d'imprimante se rapprochant du système d'une fraiseuse numérique 3 axes (tête d'extrusion guidée en Z).

J'ai tout de même réalisé la plupart de mes essais et la prise en main Hardware et Software<sup>17</sup> sur les imprimantes cartésiennes déjà présentes dans le FabLab.

---

<sup>17</sup> Hardware : Matériel Software : Logiciel


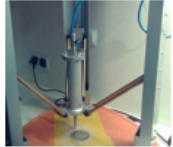



BENCHMARK IMPRIMANTES 3D CERAMIQUES										
Imprimante	Modèle	Marque	Technologie	Limite de volume	Taille de buse	Utilisation	Matériaux	Dimensions pièces	adaptabilité	Prix
	Clay XYZ	Eponyme	Buse + conteneur sous pression	Taille de la cartouche	0,2/0,8mm	Poteries / deco	Argiles	210 x 220 x 180 mm	Tete d'impression universelle	700\$
	Delta Ceramic	Titan 3D	Imprimante delta	Non (cartouche rechargeable)	1 mm; 1,5 mm; 2 mm	Poteries, deco, pièces	Multiples	diamètre 20 cm, hauteur 35 cm	X	X
	Promaker V6000	Prodways	Multicouche polymérisation laser	xxx	32 microns	Moules, pièces techniques, joaillerie	ceramique, matières liquides, composites	120x500x150mm	x	x
	Ceramaker	3D CERAM	Multicouche polymérisation laser	Dimensions du bac	~30 µm	Moules, pièces techniques, joaillerie	ceramique	1000 x 2300 x 2300 mm (LxHxH)	x	x
	Spitfire red extruder	wasp	Buse + conteneur sous pression	xxx	1,2mm	Poteries, deco, pièces	Ceramique, plastique	xxx	xxx	180\$

Figure 22: extrait du benchmark imprimantes 3D céramique







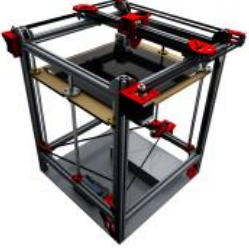

	Imprimante cartésienne	Imprimante Delta	Imprimante Corexy	Bras Robot
<b>Illustration</b>				
<b>Points positifs</b>	Modelé le plus courant, conception facile, programmation en accès libre (marlin), support d'extrudeur facilement adaptable pour de nouveaux concepts	Impressions de meilleure qualité, plateau totalement fixe, conception facile, programmation en accès libre (Marlin)	Plateau fixe en x et y et facile d'accès, structure aisément carenable pour isoler la zone d'impression	Pas de limite de taille due au plateau d'impression, grande mobilité,
<b>Points négatifs</b>	Plateau qui bouge en x et y = instabilité de la pièce en cours d'impression	Retrait de la pièce en fin d'impression	Programmation difficile, plus dur à l'entretien	Onéreux, programmation et entretien difficile, structure peu développée

Figure 23: Comparatif des structures d'imprimantes existant



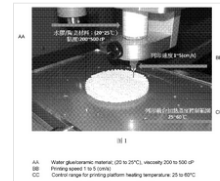
## Recherche d'antériorité, base de brevets

Cette étape permet de vérifier que les solutions que nous proposerons durant nos recherches n'entreront pas en contradiction avec une propriété intellectuelle déjà déposée. De plus, cela permet de recenser les techniques existantes, c'est une source d'idées pour nos recherches.

**Voici un listing des brevets trouvés qui ont retenu mon attention :**

### PROCÉDÉ POUR LA FABRICATION ADDITIVE D'OBJETS IMPRIMÉS EN 3D

DESCRIPTION	DOCUMENTS
N° et date de publication de la demande	WO2017092713 - 2017-06-08
Type de la demande	A1
N° et date de dépôt	PCT/CN2016108373 - 2016-12-02
N° et date de priorité	US201562263005 - 2015-12-04
Classification CIB	B29C 64/00 ; B29C 67/00 ; C04B 38/00
Classification CPC	B29C 67/00 ; C04B 38/00
Famille de brevets	WO2017092713A1



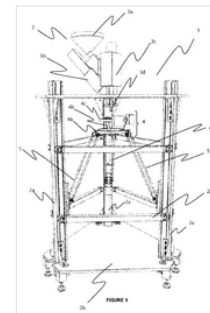
#### Abrégé

L'invention concerne un procédé pour la fabrication additive d'objets imprimés en 3D, consistant à : (a) déposer une ou plusieurs couches de suspension par impression à l'aide d'une imprimante 3D, la suspension comprenant une composition de poudre **céramique**; (b) en outre, verser de l'huile à la circonférence de l'une ou de plusieurs couches de suspension, la hauteur de l'huile déversée étant inférieure à la hauteur de la suspension; (c) répéter les étapes (a) et (b) jusqu'à obtention d'un corps présentant une certaine forme géométrique telle que requise; et (d) chauffer pour fritter le corps afin d'obtenir un objet imprimé en 3D, l'imprimante 3D présentant une température de support d'impression de 30 à 80°C.

Ici, dépôt d'une pâte accompagné d'huile, puis frittage<sup>18</sup> de l'objet imprimé

### DISPOSITIF POUR FABRICATION ADDITIVE DIRECTE AU MOYEN DE L'EXTRUSION DE POUDRES MÉTALLIQUES ET DE MATÉRIAUX CÉRAMIQUES SUR UNE TABLE CINÉMATIQUE PARALLÈLE

DESCRIPTION	DOCUMENTS
N° et date de publication de la demande	WO2016198291 - 2016-12-15
Type de la demande	A1
N° et date de dépôt	PCT/EP2016062305 - 2016-05-31
N° et date de priorité	ITUB20150970 - 2015-06-09
Classification CIB	B29C 67/00 ; B22F 3/00 ; B23Q 1/25 ; B25J 9/00 ; B28B 1/00 ; B33Y 10/00 ; B33Y 30/00
Classification CPC	B33Y 30/00 ; B22F 3/008 ; B23Q 1/25 ; B25J 9/0033 ; B28B 1/001 ; B28B 3/20 ; B29C 64/106 ; B29C 64/20 ; B33Y 10/00
Famille de brevets	WO2016198291A1



#### Abrégé

La présente invention concerne un système de production **additive** (1) basé sur l'extrusion et le dépôt en 3D d'un mélange métallique (ou d'un matériau de **céramique** évolué) en poudre et d'un liant polymère. Le système comprend a) une unité d'injection CNC (3) de matériau pour moulage par injection de métal ou de **céramique**, qui est fixe dans l'espace et doté d'une buse (3d) pour l'extrusion d'un filament ; et b) une machine cinématique parallèle (4) ayant 5 degrés de liberté.

Non plus une pâte mais de la poudre accompagné d'un liant. On remarque l'utilisation d'une imprimante 3D Delta.

D'autres brevets ont été trouvés, mais non retenus pour apparaître dans le rapport.

<sup>18</sup> Cuisson à haute température

### Définition du besoin

La définition du besoin a été vue avec les responsables du projet, voici le récapitulatif global :

- L'imprimante doit pouvoir imprimer des moules qui résistent à de hautes températures afin de contenir un corps en fusion tel que du métal, et qui ne risquent pas d'altérer les surfaces en contact lors du moulage d'une pièce. Les dimensions de la zone d'impression doivent être de 50 x 50 x 50 cm

- Utiliser un maximum des moyens propres au Fablab, tout en ayant un coût abordable, de manière à mettre en valeur les ressources matérielles et humaines de l'association.

### Recherche sur les matériaux

Mes recherches sur les matériaux ont été faites de manière succincte, d'abord en lisant des articles édités par le magazine « Sciences de l'ingénieur », puis en m'appuyant sur certains cours d'UVs de l'UTBM. Si cela m'a permis d'apprendre un peu de vocabulaire et les bases de la céramique réfractaire (historique, utilisation...), j'ai vite compris que mes compétences ne me permettraient pas de caractériser le matériau assez vite, d'où la nécessité de faire intervenir une autre équipe pour cette partie du projet.

### Analyse fonctionnelle et cahier des charges

L'analyse fonctionnelle sera réalisée sur la partie extrudeur. Il en découlera un cahier des charges qui régira la conception du prototype.

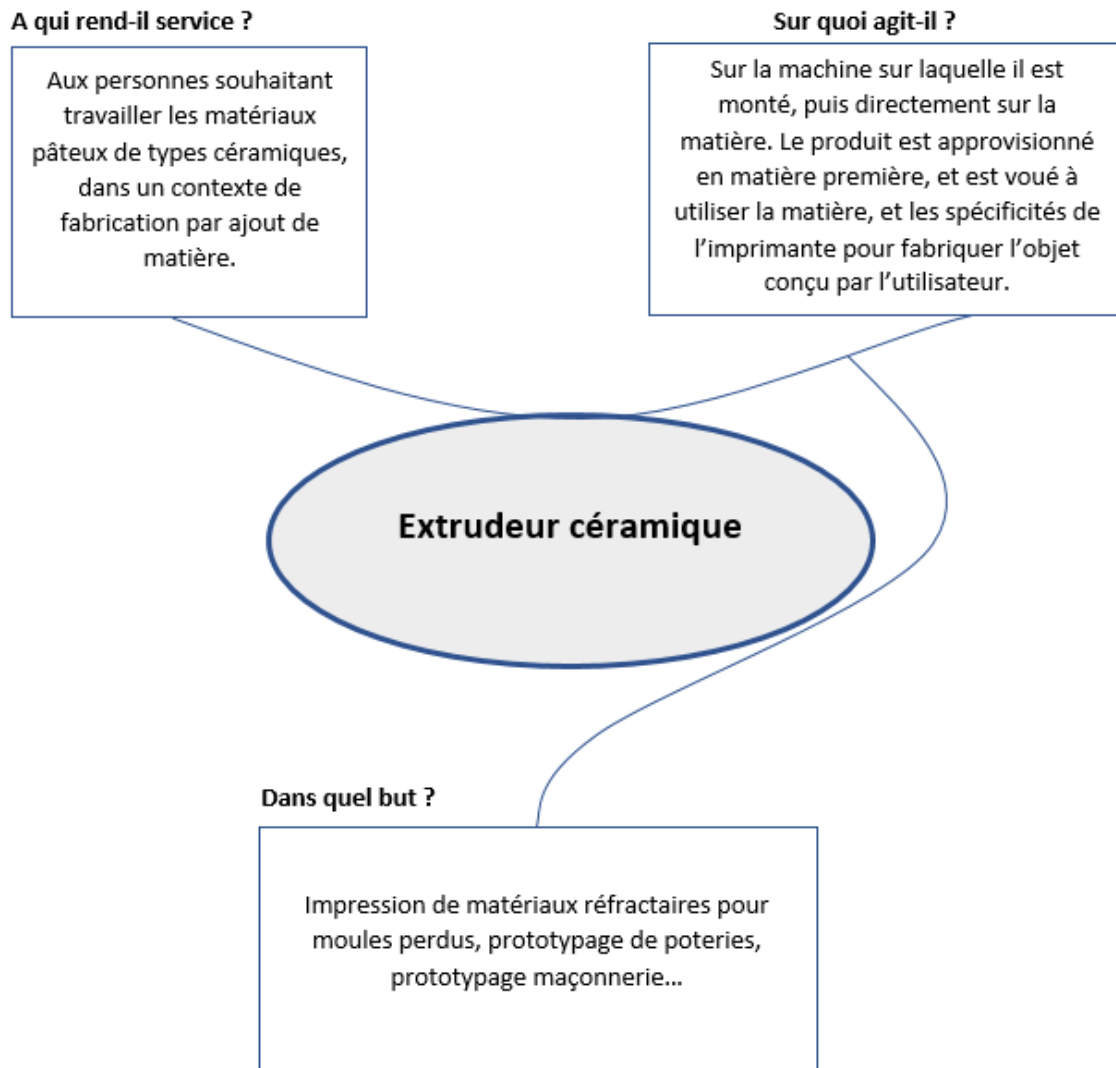


Figure 24: Diagramme bête à corne du projet

2. Définition du besoin

3. Prise en main du parc machines, et des logiciels

4. Conception du prototype

5. Montage du prototype

<https://www.neozone.org/innovation/apis-cor-la-maison-de-38m2-a-9500e-imprimee-en-3d-en-moins-de-24h/>

<http://3dceram.com/>

<http://www.kallisto.net/>

<https://www.3dnatives.com>

<http://www.deltabots.com/>

<https://www.lesimprimantes3d.fr>