

OLYMPIADES DE PHYSIQUE FRANCE

XXII^{ème} Edition - Année 2014-2015

Réalisation d'une Imprimante 3D Durable



Élèves : Michele Alessandro ; Massimo Colonna ; Bruno Lomuscio

Professeur encadrant : Gwenaël Cassel

Avec l'aide d'Olivier Gendrin web développeur et ancien membre du FacLab de l'Université de Cergy-Pontoise

Lycée Chateaubriand de Rome

Table des matières

OLYMPIADES DE PHYSIQUE FRANCE XXIIème Edition - Année 2014-2015.....	1
Remerciements.....	3
Introduction.....	4
Partie I - Fonctionnement d'une imprimante 3D.....	5
I) Construction par dépôt de fil en fusion (FDM ou FFF).....	5
II) Technologies à stéréolithographie.....	7
2.1) Stéréolithographie apparatus ou SLA.....	7
2.2) Frittage laser sélectif ou SLS.....	8
III) Choix de la technologie.....	8
Partie II - Conception.....	10
1) Projet initial.....	10
2) Synthèse des matériaux d'impression : Nylon et PLA.....	12
2.1) Synthèse du nylon.....	12
2.2) Synthèse de l'acide polylactique (PLA).....	12
2.3) Fabrication d'un fil de nylon.....	13
2.4) Conclusion sur les matériaux.....	14
III) Redéfinition du projet.....	15
Partie III - Réalisation de l'imprimante.....	17
I) Choix du modèle et premiers pas.....	17
II) Montage.....	17
III) Mise en marche.....	18
IV) Pièces à changer.....	19
Conclusion.....	21
Annexes.....	22
Protocoles Expérimentaux.....	22
Sources.....	25
Sitographie :.....	25
Bibliographie :.....	26
Autres :.....	26

Remerciements

Nous voudrions remercier M. Gwenael Cassel, notre professeur de Sciences Physiques pour avoir impulsé et soutenu l'idée de l'impression 3D au cours de ces derniers mois.

Mais également M. Olivier Gendrin, pour ses conseils avisés sur le développement du projet.

Encore particulièrement les agents techniques de laboratoire et d'informatique du lycée, MM. Della Porta et Charlevoix dont l'aide fut très efficace et précieuse.

Et enfin toutes les personnes que nous avons rencontrées et se sont mises à notre disposition, de près ou de loin, pour l'avancée de ce projet.

Introduction

L'impression tridimensionnelle se présente aujourd'hui comme le possible déclencheur d'une troisième révolution industrielle. Cette innovation technologique, qui se montre comme successeur de la longue histoire de l'impression, permet la réplique physique d'objets à partir d'un modèle digital et il ne faudra pas être surpris de le retrouver chez nous dans quelques années. La recherche dans ce secteur ne cesse d'augmenter depuis sa naissance en 1984 et son industrie se place au sixième rang mondial pour la croissance. L'impression 3D n'est plus aujourd'hui réservée aux grandes entreprises, mais se démocratise notamment autour d'une communauté nommée Reprap. Tout en ayant conscience du contexte de développement durable qui s'affirme de plus en plus, nous avons jugé qu'il serait intéressant d'en réaliser une durable nous même. Il s'agit de la suite naturelle de notre TPE qui nous a donné les bases pour le projet.

Pour réaliser une imprimante 3D, on a dû se poser diverses questions. Comment fonctionne un tel appareil ? Quelles sont les différentes technologies possibles ? Par où débiter la réalisation ? Quelles pièces changer et comment ? Notre projet consiste dans la résolution de ces questions, ainsi que de la réalisation d'une véritable imprimante 3D.

Partie I - Fonctionnement d'une imprimante 3D

3D

Avant de pouvoir fabriquer notre imprimante 3D, il a fallu voir en détail les différentes technologies, afin de faire le meilleur choix. Les trois technologies principales sont aujourd'hui la *modélisation par dépôt de fil en fusion* et la *stéréolithographie : apparatus et frittage sélectif par laser*. Il en existe d'autres dérivées de celles-ci qui paraissent trop compliqués ou nouvelles pour les développer, il n'y aurait donc pas d'intérêt pour nous. Nous avons également analysé pour chacune les matériaux d'impression, les avantages et les inconvénients.

I) Construction par dépôt de fil en fusion (FDM ou FFF)

Comme son nom l'indique, la technologie fonctionne par le principe additif ; c'est à dire que de la matière est fondue en couches fines sur une base (appelée surface d'impression). Celles-ci se superposent afin de former l'objet désiré, contrairement à la fabrication soustractive dont la mise en forme se fait par enlèvement de matière. Le matériau utilisé est imprimé grâce à une buse chauffante et l'objet prend sa forme avec la coordination de trois axes : x,y et z, un pour chaque dimension.

Un système électronique met en fonctionnement les moteurs de l'imprimante, chargés de faire bouger les axes et la buse. Le tout est actionné par un logiciel lisant un fichier numérique, qui correspond à l'objet à imprimer.

Cette technique est connue sous le sigle FDM

(Fused Deposition Modeling), qui est détenu par l'entreprise Stratasys. Pour cela des membres de la

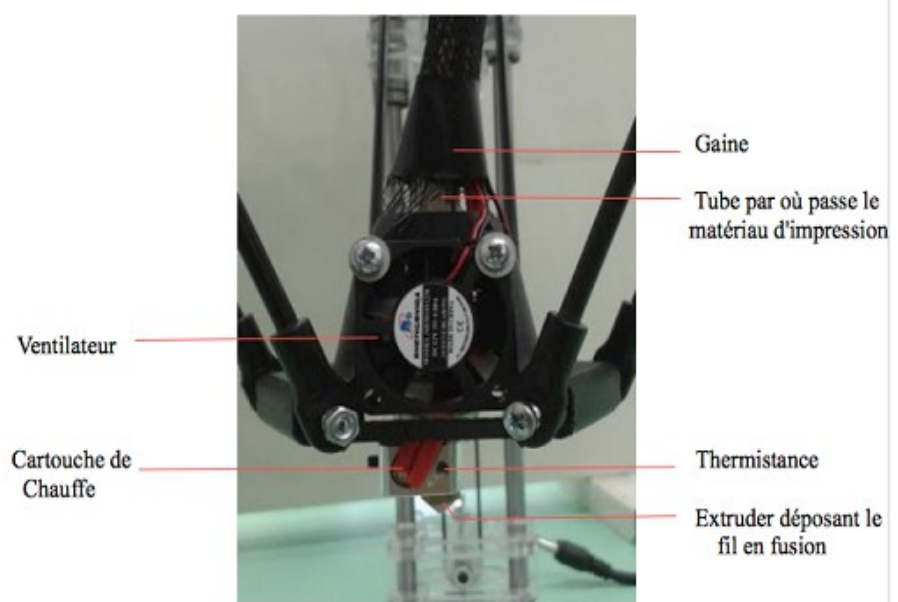


Illustration 1: Tête d'impression d'une imprimante 3D FFF

communauté libre RepRap lui ont donné un autre nom: Fused Filament Fabrication (FFF), qui n'a pas de contraintes légales.

Le matériau utilisé est en général sous forme de fil pour optimiser le temps d'impression. Dans notre cas ce sera un thermoplastique, même s'il existe un grand nombre de matériaux possibles (métaux, céramique, etc.). Le plastique est entraîné et contraint dans la buse par des roues, actionnées par un moteur. Le matériau d'impression est ensuite fondu par chauffage, ce qui donne un très petit filament (de 0,1 à 1 mm d'épaisseur). La pression appliquée fait sortir le filament fondu du trou, qui se colle au reste de l'objet : c'est l'extrusion.

Les thermoplastiques utilisés font partie d'une famille des polymères plastiques qui se déforment sous l'effet de la chaleur, et qui conservent cette forme lors du refroidissement (contrairement aux thermodurcissables). Leur température de fusion varie entre 60 et 250 °C.

Les thermoplastiques les plus utilisés sont l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et l'acide polylactique (PLA). D'autres exemples sont le polycaprolactone (PCL), le polyéthylène de haute densité (PEHD), le polycarbonate (PC) et le nylon. Parmi cela le nylon et le PLA attirent notre attention pour leur facilité de synthèse, ce dernier est en plus biodégradable.

Cette technologie avec le PLA paraît plus écologique, évite le gaspillage et offre à l'utilisateur une grande marge de liberté.

La fabrication additive trouve des applications dans beaucoup de domaines y compris la médecine. Enfin elle est beaucoup moins énergivore comparée aux autres technologies (qui utilisent en outre des lasers UV), et par conséquent moins chère.

La FFF présente en revanche aussi quelques inconvénients. L'impression est plus lente par rapport aux autres technologies, notamment à la stéréolithographie. A cela s'ajoute sa marge d'erreur, même si petite et liée à la qualité de l'imprimante, qui est plus grande.

Comme pour toutes les technologies, la taille maximale de l'objet est liée à la taille de l'imprimante ; les objets plus grands devront donc être imprimés par parties. Les objets imprimés doivent par ailleurs être soutenus par des structures, qui en général s'enlèvent à la fin, et qui rajoutent du matériau qu'il faut recycler pour éviter la perte de matériau.

II) Technologies à stéréolithographie

La stéréolithographie est la première technique d'impression 3D inventée, elle reproduit un objet par superposition de couches. L'objet est créé avec un logiciel CAO, qui permet la modélisation digitale d'objets tridimensionnels. Il est ensuite converti en fichier de format .stl (STéréoLithographie) et envoyé à l'imprimante. Celle-ci découpe l'objet en tranches 2D et le reproduit couche par couche. Nous développerons les deux principales variantes de cette branche à principe soustractif : la *SLA* et le *frittage sélectif par laser*.

2.1) Stéréolithographie apparatus ou SLA

La SLA, développée pour la première fois dans les années 1980, est la plus ancienne technique de stéréolithographie. Son fonctionnement se base sur les propriétés de certains liquides, notamment de certaines résines, de se solidifier sous l'effet de la lumière ou de la chaleur : c'est le processus de photopolymérisation.

La plateforme d'impression se trouve dans une cuve qui est remplie par le liquide ou la résine que le laser va polymériser. Le bloc optique, quant à lui, se trouve au dessus des autres composants.

Lors de l'impression d'un objet, le fichier informatique envoie les coordonnées de l'objet au bloc optique. Le laser trace ensuite niveau par niveau la structure de l'objet (par couches) sur la plateforme qui bouge pendant toute la durée de l'opération, afin de se trouver toujours légèrement submergée par le liquide ou la résine. A la fin de l'opération la plateforme émerge et l'objet est récupérable.

Les avantages que la technique d'impression SLA sont multiples. En premier lieu, sa rapidité remarquable : les imprimantes de type SLA sont en effet beaucoup plus rapides car c'est le laser qui crée directement la structure et se dirige donc beaucoup plus rapidement qu'une buse bougeant sur des axes. Un autre avantage est la résolution élevée : les imprimantes SLA ont une excellente précision de trait grâce à la petite taille du faisceau laser et permettent donc l'impression d'objets très détaillés. Finalement, elle permet d'imprimer des objets plus complexes, qui ne nécessitent pas de structures d'appui, comme une sphère par exemple.

Elle présente toutefois un gros inconvénient qui la rend impossible à réaliser avec un budget scolaire : le laser UV coûte à lui seul plus au moins 4000\$ et la résine peut coûter de 80 à 300\$/L. De plus l'énergie nécessaire pour alimenter le laser est très importante. Enfin elle n'a pas la grande variété de matériaux d'impression que proposent la FFF et la SLS.

2.2) Frittage laser sélectif ou SLS

Les imprimantes qui fonctionnent sur la technologie SLS fabriquent des objets à partir de poudre de matériaux qui sont sélectivement chauffés et fusionnés par un laser de haute intensité.

Comme pour la SLA, un logiciel découpe l'objet numérique à imprimer en tranches 2D. Puis une lumière laser fusionne alors la section 2D sur la surface de la poudre. Ensuite une nouvelle couche de poudre est étalée et le processus se répète jusqu'à ce que l'objet soit terminé.

La technologie SLS peut imprimer en utilisant une large palette de poudres de différents matériaux, dont les polymères (nylon, polystyrène, PLA...), des métaux (acier, titane, alliages...), verre, céramique et autres.

Cette technologie présente plusieurs avantages. Contrairement aux autres technologies, la SLS ne nécessite pas de séchage des objets imprimés après leur réalisation. De plus il est possible d'imprimer avec plusieurs matériaux différents lors d'une même impression.

Pour ce qui concerne les inconvénients, les objets peuvent aussi se déformer de façon significative, par la sensibilité de la fusion et la puissance du laser utilisé, ce qui diminue la résolution du résultat. C'est enfin une technologie utilisée plutôt dans l'industrie, ce qui justifie sa taille généralement importante et son coût plus élevé par rapport aux autres technologies.

III) Choix de la technologie

Après avoir compris le fonctionnement des différentes technologies, ainsi que développé les domaines d'application, nous avons voulu commencer à réaliser notre imprimante. La technologie choisie est celle à modélisation par dépôt de fil en fusion (FFF), car c'est la plus accessible et la plus utilisée.

Nous avons immédiatement exclu la technologie SLS car elle est principalement utilisée dans l'industrie ; c'est une imprimante de taille trop importante et d'une technologie très difficile à mettre en œuvre de par l'utilisation de laser de puissance et de poudres particulières, hors de notre budget. Nous avons ensuite hésité entre la SLA et la FFF, les deux étant possibles et intéressantes, mais pour la difficulté de trouver un laser UV (ou même visible) et son prix trop élevé, nous avons choisi de construire une imprimante à technologie FFF.

En plus de ces nombreux avantages, une imprimante de cette technologie présente une facilité de synthèse de ses matériaux d'impression. En effet deux de ses matériaux d'impression, l'acide

polylactique et le nylon, sont synthétisable en laboratoire. Nous avons pour cela décidé de les synthétiser au lycée.

Nous avons décidé de contribuer au développement durable en se donnant le défi de réaliser une imprimante 3D la plus biodégradable possible. Pour cela nous utiliserons comme matériaux d'impression uniquement le PLA, un thermoplastique biodégradable, et nous ferons en sorte que la plupart des pièces de l'imprimante soient biodégradables et/ou recyclées, comme certaines pièces de la structure et de la buse. Ainsi notre imprimante laissera le moins de déchets possibles et une moindre empreinte écologique.

Partie II - Conception

1) Projet initial

Notre projet était et est en continuelle évolution, cependant depuis l'année dernière beaucoup de changement ont été apporté. Pour comprendre au mieux notre projet, nous pensons qu'il est nécessaire d'inclure ce qu'étaient nos idées et considérations initiales. Les paragraphes qui suivent entre guillemet relatent exactement ce que furent nos actions pour le commencement et le démarrage du projet.

« Après avoir recherché des exemples d'imprimantes 3D, notamment celles open source que propose Reprap, nous avons défini les constituants principaux de notre future imprimante. Elle sera constituée d'un support, d'une surface d'impression (une base) et de trois axes (z,x,y). Ces axes seront mobiles grâce à des moteurs, gouvernés par des composants électroniques reliés à une carte centrale. La réalisation de la carte centrale nécessite des connaissances en électronique, et nous nous sommes informés sur différentes possibilités (Arduino par exemple). Enfin il nous reste la buse (avec son système de chauffage), dont nous avons trouvé quelques modèles sur internet, et avons commencé à regrouper les pièces. Pour rester fidèles à la biodégradabilité, nous avons uniquement choisi des modèles qui offraient des parties imprimables, que nous imprimerons avec des matériaux biodégradables au Fablab de notre ville.

En s'inspirant des brochures que nous avons récupérées lors du Maiker Faire: The European Edition qui a eu lieu en octobre 2013 à Rome, nous avons défini quelques caractéristiques de notre imprimante. La structure sera en partie faite de pièces biodégradables imprimées et reliée avec des tubes de métal, la mobilité des axes est encore à voir. La buse ne dépassera pas les 15 cm de hauteur, et sa température dépendra de la résistance (nous pensons arriver vers 200 °C), elle comportera aussi une thermistance qui captera sa température. Les moteurs et le système électroniques sont encore à trouver, et par conséquent l'alimentation nécessaire à la mise en marche est encore incertaine. Nous ne pensons pas atteindre une dimension d'impression très élevée (taille maximale d'un objet imprimé), entre 10 et 15 cm³, ainsi qu'une résolution de l'ordre de quelques millimètres. La vitesse d'impression dépendra de la coordination entre les axes, la buse et des moteurs, mais elle ne sera pas très élevée non plus. La taille ne dépassera pas 50x50x50 cm (nous ferons sans doute moins), et elle pèsera quelques kilos. Enfin les logiciels que nous utiliserons pour régler l'imprimante et les objets seront des logiciels gratuits tels que Repetier-Host et Netfabb.

Des bricoleurs se regroupent aujourd'hui dans des laboratoires ouverts, des FabLab, remplis d'outils digitaux et électroniques, telles que des scanners 3D, des traceurs de coupage et des imprimantes 3D. Ils suivent le principe de l'opensource et permettent aux bricoleurs de développer et réaliser leurs projets ; ils sont très liés avec la communauté Reprap. Ces laboratoires permettent aussi aux gens d'imprimer des objets avec leurs imprimantes 3D, de technologie surtout FFF, à un prix moindre. La plupart d'entre eux offrent aussi des cours d'électronique ou de bricolages variés.

Le lieu ressemble à un véritable atelier, des machines pour souder et une imprimante 3D étaient visibles. Les membres étaient, entre autre, en train de réaliser une imprimante 3D eux même, comme nous. Mais ils ne suivaient pas nos enjeux, et achetaient certaines pièces, telle que la buse, sur internet ou les imprimer avec leur autre imprimante.

Notre projet a été rapidement présenté: réaliser une imprimante 3D par nous mêmes. Il nous a été dit que ce sera très difficile, surtout pour la coordination de l'imprimante, et que la marge d'erreur sera très importante. Cette dernière information ne nous soucis pas vu que nous faisons ce projet pour l'expérience didactique. Certaines difficultés, que nous n'avions probablement pas imaginées, apparaîtront au fur et à mesure de la réalisation, notamment dans la mise en marche finale de l'imprimante.

Pour ce qui concerne les matériaux d'impressions, ils utilisent principalement l'ABS et l'acide polylactique. Quand nous leur avons parlé de notre projet de synthèse du nylon et du PLA, ils nous ont pas conseillé de les utiliser comme matériaux d'impression vu que nous ne connaissons pas leurs propriétés spécifiques et ne seront probablement pas adaptés ; il faudrait selon eux les acheter. Nous étions au courant de cela et comme ça a été dit précédemment, c'est l'expérience qui compte.

Enfin ils nous ont averti que le nylon impur que nous avons synthétisé dégage des fumées toxiques lors de son chauffage ; il faudra donc travailler à l'air libre ou sous la hotte lors de sa manipulation. Pour la buse qu'ils fabriquent, ils utilisent pour le chauffage une résistance et une thermistance.

Malheureusement ils n'avaient pas de pièces à jeter ou qu'ils n'utilisaient pas à nous donner. Nous devons néanmoins y retourner plusieurs fois, pour participer aux cours d'électronique qu'ils proposent et pour utiliser leur imprimante pour imprimer certaines pièces de notre imprimante. »

2) Synthèse des matériaux d'impression : Nylon et PLA

Nous avons choisi de synthétiser deux matériaux différents : le nylon et l'acide polylactique, pour leur facilité de synthèse et la biodégradabilité du PLA. L'acide lactique nécessaire à la synthèse du PLA n'étant pas disponible à l'école nous avons donc décidé de le commander nous mêmes auprès d'un laboratoire de chimie (D'Alena Remigio, Via Cavour 620, 00184 Rome).

2.1) Synthèse du nylon

Nous avons débuté notre projet en commençant par le nylon car sa synthèse est aisée dans un laboratoire de lycée. Le protocole suivi se trouve en annexe (protocole expérimental 1).

Nous avons réussi à synthétiser environ cinq grammes de nylon du premier coup. Le nylon n'a par contre pas été enroulé autour d'un agitateur comme prévu initialement, mais a été directement formé dans le bécher. Cela est dû à une erreur de manipulations de notre part . Mais le résultat final de la synthèse est le même et nous a même accéléré l'expérience.

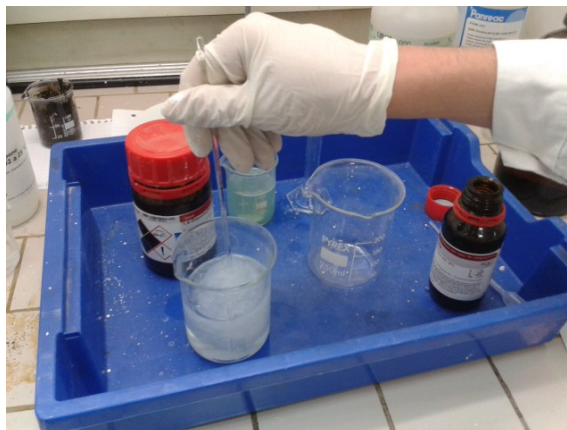


Illustration 2: Synthèse du nylon

Lors de la seconde tentative on a quadruplé les quantités initiales, pour un total final d'environ 25 grammes. Cette fois ci le nylon avait pris une couleur bleuâtre dont nous n'avons pas compris la raison. Le nylon synthétisé a été ensuite lavé en vue d'une utilisation prochaine.

La semaine suivante, après que le nylon a séché, nous l'avons repesé pour trouver qu'il pesait uniquement 2,39 g. Cela veut dire que plus de 20 g du produit de la synthèse provenaient de l'eau ou d'autres espèces chimiques, qui se sont évaporées.

2.2) Synthèse de l'acide polylactique (PLA)

Nous avons ensuite essayé de synthétiser de l'acide polylactique en suivant le deuxième protocole se trouvant en annexe. Le montage réalisé pour l'expérience peut se voir sur la photo ci-dessous.

A cause de certaines imprécisions et incompréhensions du protocole initial, nous avons initialement chauffé l'acide lactique jusqu'à dépasser les 110 °C, avec un thermomètre étant à moitié dans la solution. Cela a alors commencé à bouillir et à fumer, ce qui n'était pas prévu. Nous l'avons alors laissé refroidir une dizaine de minutes sous la hotte, mais sans obtenir le résultat attendu, c'est à dire une pâte très visqueuse.

Nous avons alors décidé de recommencer, cette fois ci en ne pas dépassant les 100 °C et en la laissant au moins 20 min pour voir ce qu'il se passe. Nous croyions que la polymérisation aurait lieu sous l'effet de la chaleur, or après 30 min de chauffage, la solution ne montrait aucun changement à part un léger jaunissement. Nous l'avons alors laissé refroidir et elle a enfin commencé à durcir. Pour accélérer la solidification, nous avons aussi homogénéisé la solution avec un agitateur en verre.

Mais en contrôlant jour après jour, le PLA devenait de moins en moins visqueux, il se dépolymérisait. Au bout d'une semaine, le polymère était entièrement dépolymérisé, à la surprise même de nos enseignants, étant redevenue quasiment à l'état liquide.

2.3) Fabrication d'un fil de nylon

Ayant à notre disposition un bloc de nylon de notre fabrication, nous avons fait une expérience conçue pour transformer ce bloc en fil, dont le protocole se trouve en annexe (protocole expérimental 3).

Les ballons et le chauffe ballon ont été remplacés par des béchers et une plaque chauffante. La photographie ci-dessus montre le montage.

Durant l'expérience, on a observé une couleur plutôt marron indiquant la dégradation du nylon par la chaleur. Nous avons immédiatement sorti le bécher et l'avons laissé refroidir, en prenant quelques petits bouts avec l'agitateur en verre pour les mettre dans l'eau froide (pour voir si le protocole marcherait), or ces petits bouts n'ont pas pris la



Illustration 3: Montage utilisé pour la synthèse du PLA

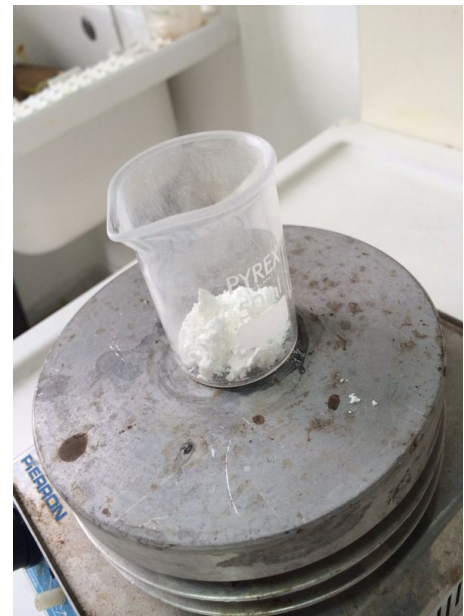


Illustration 4: Montage utilisé pour faire fondre le nylon (poudre blanche dans le bécher)

forme de fil. Le nylon restant s'est solidifié tout en gardant sa couleur. Les résultats apparaissent sur les images ci dessous.



Illustration 5: Aspect du nylon chauffé



Illustration 6: Morceaux de nylons récupérés dans le bécher

Cette expérience nous a permis de conclure que le nylon est très sensible à la chaleur ce qui ne le rend pas aisément manipulable ; il ne peut pas être fondu et ne peut pas être facilement transformé en fil. Nous ne pourrions ainsi pas fabriquer nous même des fils de nylon pour l'impression.

2.4) Conclusion sur les matériaux

Après des recherches plus approfondies sur la synthèse du PLA, ainsi qu'un protocole pour le transformer en fil, sur des thèses universitaires (celle-ci notamment : http://tel.archivesouvertes.fr/docs/00/70/39/92/PDF/2011MULH6151_these_SAMBHA_A.pdf), nous avons constaté que le protocole de la synthèse et de la transformation étaient assez compliqués. Le PLA a besoin de plusieurs catalyseurs et d'au moins deux jours de chauffage variable pour sa synthèse, tandis que la transformation nécessitait diverses machines. Nous arrivâmes ainsi à la conclusion que la synthèse de l'acide polylactique n'était pas possible dans notre laboratoire scolaire. La faillite du protocole pour la transformation en fil n'était pas une surprise, vu que nous l'avons conçu nous mêmes.

En conclusion, nous n'avons pas pu fabriquer des matériaux d'impression. Le mieux est de se les procurer déjà prêts. Nous maintenons cependant notre idée d'imprimer uniquement avec de l'acide polylactique pour sa biodégradabilité.

III) Redéfinition du projet

Suite à l'échec des synthèses et malgré notre motivation initiale, nous nous sommes rapidement rendu compte de l'impossibilité de la réalisation *ex nihilo* d'une imprimante 3D. En tant que lycéens, nous sommes loin d'avoir les connaissances techniques nécessaires à la conception d'un tel défi. En suivant les conseils des "makers" du Fablab ainsi que ceux de M. Olivier Gendrin, nous avons choisi une nouvelle approche : s'appuyer d'un modèle préexistant. Notre idée était alors d'acheter et de regrouper toutes les pièces séparément, de façon à mettre en œuvre le critère de durabilité dès le début.

Tout d'abord nous voulions commencer à réaliser une partie importante, la buse. En nous appuyant sur celle du modèle opensource Prusa Mendel, nous avons regroupé la ferrure requise et fait imprimer les pièces en PLA chez une industrie spécialisée afin de l'assembler nous-même. Cette dernière fut une étape intéressante qui nous a initié au montage de notre futur imprimante et familiarisé avec le PLA. Nous n'avons pas inclus d'*extruder*, le dernier composant qui chauffe et dépose le matériau d'impression, pour son prix considérable alors que ce n'était qu'un début de projet.



Illustration 7: Mécanisme pas à pas permettant de faire avancer le fil vers l'extruder, fabriqué sur notre demande par une société spécialisée dans ce genre de réalisations.

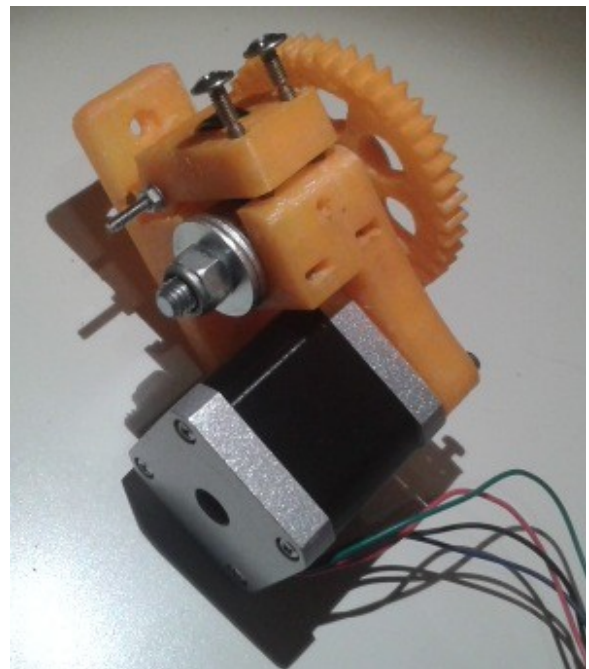


Illustration 8: Le pièces oranges sont en PLA

Nous avons établi un premier budget de pièces détachées de 650 euros. Mais pour des raisons de temps d'assemblage et de budget, nous avons changé de direction à nouveau, en s'inspirant de la méthode de la rétro-ingénierie. Cette activité consiste dans l'étude et l'assemblage d'une imprimante préexistante et vendu en kit, afin d'en comprendre le fonctionnement. Une fois cela terminé, nous pourrions remplacer la plupart des pièces par d'autres biodégradables et durables. Cette méthode s'est révélée très efficace et nous a enfin amené à notre première réalisation concrète du projet, ainsi que nous donner une démarche solide. Notre prochaine étape à donc été de trouver le kit d'assemblage le plus adapté, en appliquant divers critères tels que l'aspect économique, la disponibilité en Europe ainsi que la facilité de montage et de fonctionnement.

Partie III - Réalisation de l'imprimante

I) Choix du modèle et premiers pas

Après des recherches et aidés par notre conseiller M. Gendrin, nous hésitions entre différents kits opensources d'imprimantes 3D. Le choix de l'imprimante à modifier n'a pas été facile et a alimenté plusieurs débats au sein du groupe. Nous avons défini plusieurs critères pour restreindre les possibilités et trouver l'imprimante la plus apte pour le projet. L'imprimante, en effet, ne devait pas être trop grande pour être facilement transportable, mais eu même temps pas trop petite pour réduire la difficulté de montage et surtout celle de changement des pièces ; elle devait s'inscrire dans une optique durable, c'est à dire ne pas avoir une consommation d'énergie excessive et déjà être constituée au maximum de matériaux biodégradables.

Nous avons opté pour le modèle MicroDelta vendu par eMotion, ce type d'imprimante se distingue des autres par un prix relativement bas (≈ 480 € TTC et frais de port inclus) et une facilité de montage plus grande car les soudures sont déjà faites. De plus elle ne possède pas de plaque chauffante et consomme moins d'énergie que d'autres imprimantes qui, au contraire, ont cette caractéristique. Elle permet l'impression avec du PLA et certaines de ses pièces en sont constituées.

II) Montage



Illustration 9 : Ensemble du matériel disponible et nécessaire au montage de l'imprimante.

Pour mieux comprendre les étapes de fabrication, une photo annotée de l'imprimante est disponible en annexe.

Pour mettre les axes nous avons du forcer à coup de marteau vu que les trous étaient légèrement plus étroits que les axes en question.

Ensuite nous avons monté les tendeurs des courroies et les roulements. Nous avons donc

procédé à l'assemblage de la partie supérieure de l'imprimante surface supérieure, moteurs, courroies ainsi que les capteurs de fin de course.

Nous avons, lors de cette étape, rencontré quelques problèmes à résoudre.

1. Nous nous sommes rendus compte que, lors du mouvement des axes, les courroies sortaient de leurs axes, ne passant pas sur les roulements : nous avons mis des rondelles larges contre le roulement pour régler le problème.

Courroie
d'entraînement de la
tête d'impression hors
du roulement à bille

Roulement à bille

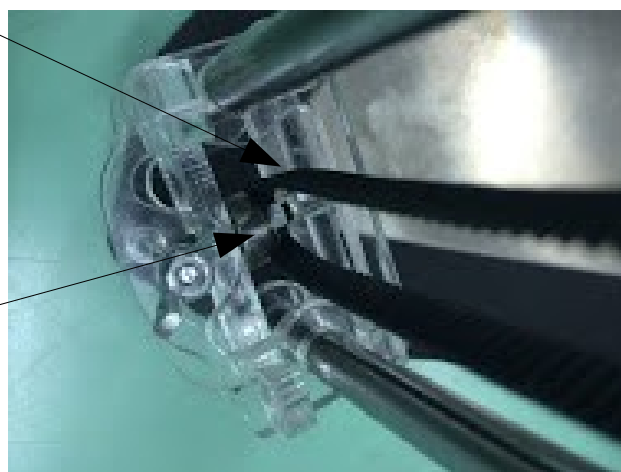


Illustration 10: La courroie est sortie de sa course.

2. Les capteurs de fin de course ne s'actionnaient pas car leur languette en acier était trop courte. Nous les avons allongées avec des languettes de notre fabrication scotchées sur celle d'origine.

3. Une vis de l'extrudeur était inadaptée et nous l'avons remplacée par une des nôtres.

4. Par la suite, nous avons assemblé et ajouté la buse à la structure ce qui a également posé initialement problème. En effet, le bout de la cartouche de chauffe était mal limé et ne se fixait pas dans la buse hexagone (extruder). Nous avons donc du élargir le trou à l'aide d'une perceuse. La dernière partie électronique c'est bien passée.

Au total, environ 15h de travail aurons été nécessaires au montage de l'imprimante.

III) Mise en marche

Une fois notre imprimante montée, il a fallu la calibrer afin de la mettre en marche. Les makers du Fablab ainsi que Mr. Gendrin nous avait prévenu de la difficulté de cette étape qui n'aurait très probablement pas marché du premier coup. En effet, même en suivant les instructions d'utilisation de la MicroDelta, nous n'avons initialement pas réussi à la mettre en marche. Après avoir installé le logiciel de gestion de l'imprimante, les moteurs ne semblaient pas réagir aux commandes envoyées de l'ordinateur. Toutefois l'alimentation électrique était certifiée par la LED allumée de la carte électronique et par les ventilateurs qui étaient allumés. La buse, dont la température était contrôlée par la thermistance, a également fonctionné en arrivant aux 130 °C nécessaire à l'impression.

Il a donc fallu trouvé une solution pour les moteurs, sans lesquels la calibration est impossible. Nous avons pensé la démonter pour ensuite remonter la dernière partie électronique de l'imprimante, pour espérer ainsi pouvoir actionner les moteurs. Cette démarche a été payante, alors que nous écrivons ces lignes les moteurs fonctionnent correctement et avons hâte de réaliser notre premier objet imprimé en PLA.

IV) Pièces à changer

Au fur et à mesure du montage de l'imprimante, une fois que nous avons compris l'importance relative et la fonction de chaque pièce, nous avons identifié celles que nous pourrions remplacer par d'autres plus durables. Nous avons établi la liste suivante (le nom des pièces fait référence aux noms employés dans la liste précédant les instructions du montage → voir * dans les sources), la photo annotée en annexe peut également aider à se repérer :

- **Les plateaux inférieur et supérieur** sont déjà en bois, mais leur peinture noire pourrait ne pas être biodégradable. Il serait donc intéressant de les faire refaire sans peinture.
- Nous avons remarqué qu'il n'y a pas de **vis** soumise à une force trop importante, à la température élevée de buse ou à des frottements particuliers, mis à part quelques-unes. Ainsi nous pensons presque toutes les remplacer par d'autres plus durables ou biodégradables; le bois nous semble le meilleur choix. De plus, certaines vis sont plus longues que nécessaire, le bois nous permettra de les adaptés à leur dimensions requises.
- Les **rondelles** sont d'importance secondaire pour le tout, mais jouent tout de même un

rôle de stabilité. Il serait donc intéressant de les substituer avec d'autres de même dimensions imprimées par notre propre imprimante.

- Les nombreux **colliers de serrage** en nylon peuvent être remplacés par d'autres en PLA.
- Les **pièces en plexiglas** ne subissant pas d'efforts trop importants peuvent se remplacer par le même modèle imprimé par notre imprimante.



Illustration 11: Différentes pièces en plexiglas servant dans l'imprimante

- Les **engrenages** liant moteurs et courroies peuvent être imprimés en PLA. C'est en effet ce que nous avons fait pour notre première buse (voir illustration 7).
- La **gaine**, le tube couvrant les fils partants de la buse jusqu'à la carte électronique, sera changée par une autre de dimensions semblables mais de plastique biodégradable. Il sera par contre impossible de l'imprimer nous-même car elle est trop grande et la précision d'impression certainement trop importante pour notre imprimante.
- Le **plan support** de la bobine de PLA est en plexiglas. Nous pensons la remplacer par un même modèle en bois. Nous avons exclu le PLA pour la taille de l'objet trop important pour notre imprimante et pour éviter des éventuels déformations liées au poids assez important de la bobine.
- Les **bielles** qui tiennent la buse pourraient également être substituées par d'autres biodégradables. Il reste cependant à trouver une substitution qui ne déformera le fonctionnement de l'imprimante.

Nous avons également déterminé l'ordre dans lequel nous allons remplacer les pièces. Il s'agira de procéder dans le sens inverse du montage et par facilité de fabrication des pièces à changer afin d'optimiser le temps employé.

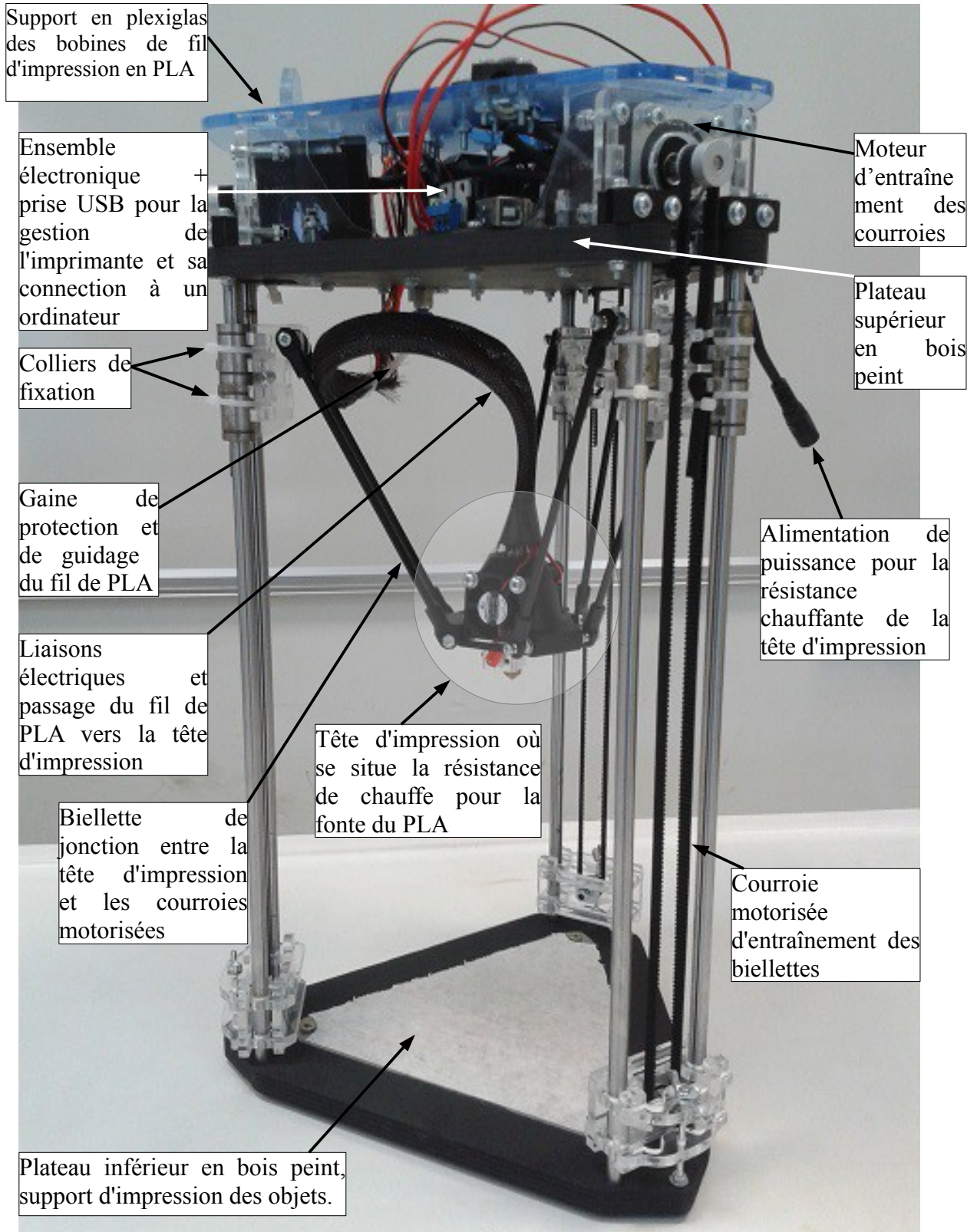
Conclusion

L'intention initiale a bien évolué. En effet, après avoir choisi la technologie FFF pour sa plus grande simplicité, son utilisation de PLA biodégradable et sa plus faible consommation d'énergie que les autres techniques, nous avons pour ambition de fabriquer entièrement notre propre imprimante. Mais les échecs des fabrications de matériaux d'impression (PLA et nylon) nous ont conduit à nous intéresser aux matériaux déjà prêts à l'emploi, aux pièces détachées et à la construction de certaines parties par une entreprise tiers (cas du mécanisme d'entraînement du fil de PLA). Cependant les contraintes temporelles et financières nous ont guidées vers l'acquisition d'un kit MicroDelta, de l'entreprise eMotion, à monter nous-même. En mettant en application la rétroingénierie nous avons construit l'imprimante afin de bien la connaître avant de remplacer certaines pièces non-biodégradables (comme les éléments en plexiglas ou en nylon) en leur équivalent en bois ou en PLA. Finalement une liste des parties à remplacer a été constituée.

Nous aimerions maintenant remplacer les pièces soit en les faisant faire soit encore mieux, en revenant au principe de l'impression 3D, notre imprimante construirait elle-même ses pièces de rechange.

Annexes

Photo de notre imprimante Micro Delta



Protocoles Expérimentaux

I: Synthèse du Nylon

Le nylon est un polymère synthétique thermoplastique obtenue a partir de la polycondensation. Outre que toutes ses nombreuses applications, le nylon peut aussi être utilisé en tant que matériel d'impression 3D. Pour cette raison nous aimerons le synthétiser et pouvoir imprimer avec. Voici le protocole que nous avons suivi.

I] Le matériel nécessaire pour cette synthèse est:

- Trois béchers de 100 mL (le troisième en cas d'échec)
- Trois becher de 50 mL
- Du Chlorure de Sebacoyl
- De l'Heptane
- De l'Hexaméthylène diamine (nocive et irritante)
- Un Agitateur en verre
- Une Spatule
- Un Trombone
- Des pipettes pasteur

II] Experience:

Vu que l'Hexaméthylène diamine est nocif et irritant, cette expérience doit être faite sous la hotte, avec des gants et des lunettes.

Dans un bécher, diluer 1 mL de Chlorure de Sebacoyl dans 19 mL de Heptane, soit 5% du volume d'Heptane de Chlorure de Sebacoyl.

Dans un autre bécher, diluer la meme proportion de l'Hexaméthylène diamine qu'avec l'Heptane précédemment dans de l'eau. (l'Hexaméthylène diamine se solidifie lorsqu'il est sortie, il faut donc le gratter jusqu'à le rendre une poudre avec une spatule)

Verser très délicatement le deuxième bécher dans le premier.

Tirer sur le voile qui se forme à la surface de séparation des deux solutions, afin de dégager la fibre de nylon.

Enrouler la fibre autour d'un agitateur en verre jusqu'à vider le bécher.

La quantité de nylon produit doit être assez importante (pour permettre l'impression), cette expérience sera donc réalisée plusieurs fois.

Une fois synthétisé, le nylon devra être moulé en fibre (sous forme de fils).

Sources: - Groupe TPE "Nanoparticules"

- <http://hackaday.com/2012/05/22/3d-printing-with-nylon-for-a-more-useful-objects/>

Manuel Physique Chimie 3ème

II: Synthèse de l'Acide Polylactique (PLA)

L'acide polylactique est un polymère biodégradable obtenue à partir de la polymérisation de l'acide lactique.

L'objectif de l'expérience est de polymériser ce thermoplastique.

I] Le matériel nécessaire pour cette synthèse est:

- De l'acide lactique pur (commandé)
- De l'acide sulfurique concentré (catalyseur)
- Bécher en plastique de 250 mL (ou verre mais ça colle aux parois)
- 3 Bêchers en verre de 50 mL
- Des Pipettes pasteur
- Plaque chauffante et thermomètre (la température doit arriver à 110 C)
- Un agitateur en verre

II] Expérience:

Vu que l'acide lactique est irritant et que l'acide sulfurique concentré est corrosif, la manipulation initialement faite sous la hotte, avec les gants et les lunettes.

Introduire de l'acide lactique (pur) dans un bécher.

Introduire quelques gouttes d'acide sulfurique concentré (avec gants et lunettes de protection).

Chauffer avec la plaque chauffante progressivement jusqu'à atteindre une température de 110 C, laisser chauffer une trentaine de minutes.

Agiter régulièrement puis laisser refroidir (le mélange se solidifie).

La quantité de PLA produit sera assez importante, il faudra donc réaliser ce protocole plusieurs fois. Le PLA obtenu devrait rester transparent.

III] Biodegradabilité et application

Une fois que l'acide polylactique a été synthétisé, il faudrait montrer sa biodégradabilité. Pour cela nous devons mesurer sa masse très précisément et mettre le polymère dans de la terre très riche en sédiments et en microorganismes..

Nous laverons ensuite une fois par jour le polymère et le pèserons, afin de suivre sa diminution de masse qui résultera de sa biodégradation. Un graphique sera réalisé à la fin pour représenter les résultats.

Une fois que nous aurons démontré la biodégradabilité de l'acide polylactique, nous devons le mouler en forme de fil pour qu'il puisse être utilisé comme matériel pour notre buse. Vu la couleur plutôt transparente, il serait intéressant de colorer le PLA obtenue en y ajoutant des colorants.

Source: - <http://eduscol.education.fr/rnstl/spcl-sc.-physiques-chimiques-laboratoire/chimie-developpement-durable/lait>

Le même protocole est revenu plusieurs fois sur internet.

III: Transformer les polymères sous forme de fil

Afin de rendre l'impression possible, nous avons conçu un protocole permettant de transformer les polymères en fils, vu que la buse nécessite cette forme pour imprimer. Ce protocole n'a pas été testé auparavant et pourrait ne pas marcher. L'objectif de cette expérience est de transformer les deux polymères synthétisés en fil.

Les deux polymères synthétisés sont :

- **Le Nylon:** toxique (Manipulation sous la hotte), espèce impure donc température de fusion incertaine (il faudra le chauffer progressivement jusqu'à qu'il fonde)
- **Le PLA:** pourrait être toxique, température de fusion de 150-160 C

I] Le matériel nécessaire pour ce protocole est:

- 2 Bechers
- Deux ballons en verre
- Un chauffe ballon
- Une cuve de hauteur 10cm+
- Gants thermiques
- Deux agitateurs en verre

II] Expérience :

Synthétiser et laver les polymères (afin d'enlever le maximum de substances toxiques).

Mettre un polymère dans un ballon.

Chauffer le ballon à l'aide d'un chauffe ballon jusqu'à atteindre sa température de fusion et attendre que le polymère devienne sous forme liquide.

Verser délicatement le polymère liquide dans la cuve pour qu'il se solidifie au contact de l'eau froide et durcisse sous forme de fil.

Il faudra réaliser ce protocole deux fois, une fois pour chaque polymère. Il vaut mieux manipuler avec la blouse et faire très attention car les polymères vont être très chauds ainsi que d'utiliser des lunettes puisqu'ils risquent de faire échapper des fumées toxiques.

Une fois que nous aurons obtenus les polymères sous forme de fil, nous pourrons les utiliser comme matériaux d'impression. Ce sera une grande étape dans la réalisation de notre imprimante.

Sources

Sitographie :

L'impression 3D étant encore un sujet assez récent, nous avons principalement utilisé des sites internet comme sources d'informations.

Instructions : *** <http://www.reprap-france.com/home/113-µdelta.html> ***

- http://en.wikipedia.org/wiki/Fused_deposition_modeling [dernière modification: 19 janvier 2014]
- http://reprap.org/wiki/RepRap_Universal_Mini_Extruder [dernière modification: 16 juillet 2013]
- <http://reprap.org/wiki/RepRap> (plusieurs pages dont des matériaux d'impression et des modèles de buses et d'imprimantes 3D)
- http://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing [dernière modification: 30 janvier 2013]
-
- <http://chimie.sup.pagesperso-orange.fr/polymeres/GENERALITESPOLYMERES.html>
- http://archives.universcience.fr/francais/ala_cite/expositions/developpement-durable/calcul-empreinte-ecologique/
-
- <http://www.economist.com/node/21553017>
- <http://3d-printerdesign.com/3d-printing-advantages/>
- <http://www.economist.com/news/technology-quarterly/21584447-digital-manufacturing-there-lot-hype-around-3d-printing-it-fast>
- <http://www.theengineer.co.uk/in-depth/the-big-story/the-rise-of-additive-manufacturing/1002560.article>
- http://www.lemonde.fr/sciences/article/2013/08/26/le-versant-sombre-des-imprimantes-3d_3466650_1650684.html
- <http://www.gizmag.com/3d-printed-biological-tissues/24155/>
- <http://www.newscientist.com/special/3D-printing>
- <http://www.forbes.com/sites/ciocentral/2012/12/07/manufacturing-the-future-10-trends-to-come-in-3d-printing/>
- http://www.nytimes.com/2010/09/14/technology/14print.html?pagewanted=all&_r=0
- <http://dribbble.com/shots/1062909-3d-Printer-Icon>
- <http://fab.cba.mit.edu/about/charter/>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering [dernière modification: 30 janvier 2014]
- <http://www.3dsystems.com/3d-media/3d-printing-process-sls>
- <http://garyhodgson.com/reprap/prusa-mendel-visual-instructions/>
- <http://www.thingiverse.com/thing:33697>
- <http://officine.romamakers.org/>
- <http://www.livescience.com/38190-stereolithography.html>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography> [dernière modification: 29 janvier 2014]
- <http://computer.howstuffworks.com/stereolith.htm>
- <http://www.instructables.com/id/Build-a-Laser-3D-Printer-Stereolithography-at-Ho/>
- <http://www.3ders.org/3d-printing-basics.html>
-
- <http://www3.imperial.ac.uk/polymersandmicrofluidics/projects/frontalphotopolymerisation>
- http://reprap.org/wiki/Micro_Delta [dernière modification 14 aout 2014]
-

Bibliographie :

- *Focus Italy* numéro 251 (édition de Septembre 2013), article sur la Médecine

- *Photoinitiated Polymerisation: Theory and Applications*, de J.P. Fouassier. Disponible sur google books :

http://books.google.it/books?id=ThV0FpBvkk0C&pg=PA19&lpg=PA19&dq=photopolymerisation&source=bl&ots=-Ri4P3HeW-&sig=eVIW__VxQkDCywAdC2CdNUNtswg&hl=it&sa=X&ei=7jp6Uo3fBZDb4QTx-YCYBg&ved=0CG0Q6AEwCw#v=onepage&q=photopolymerisation&f=false

Autres :

- Brochure des imprimantes 3Drag et 3tnr A4, prises à la Maiker Faire: European Edition (éditions 2013 et 2014) à Rome

Toutes les images sans sources ont été photographiées par nous-même