

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY



جامعة بادجي مختار - عنابة

Faculté : Sciences de l'Ingéniorat
Département : Electronique
Domaine : Sciences et technologie
Filière : Automatique
Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

ETUDE ET CONCEPTION D'UNE IMPRIMANTE 3D

Présenté par : *REKIMA Housseem*

Encadrant : *LARBI Allal* *Professeur* *Université Badji Mokhtar – Annaba*

Jury de Soutenance :

LAKEL Rabah	Professeur	U. B. M. Annaba	Président
LARBI Allal	Professeur	U. B. M. Annaba	Encadrant
ABBASSI Hadj Ahmed	Professeur	U. B. M. Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mes études et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier ALLAH le Tout Puissant et Miséricordieux, de m'avoir donné le courage et la volonté de mener à terme le présent travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Directeur de mémoire, Mr. LARBI Allal. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes sœurs pour leurs encouragements.

Je ne saurais oublier de remercier vivement les membres du Jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger ce modeste travail.

Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

ملخص

إن تصميم وإنتاج الطابعة ثلاثية الأبعاد ينقسم إلى ثلاثة أجزاء: ميكانيكية، إلكترونية، وبرمجيات. لتحقيق الإنشاء الميكانيكي للطراز الذي نقدّمه، قمنا أولاً ببناء نظام الحركة ثلاثي المحاور: X و Y و Z. وتضمن هذه الحركة بواسطة خمس محركات خطية ثنائية القطب، مع إضافة مستشعرات الحد لضمان عدم تجاوز الطابعة حدود منطقة الطباعة. ثم بالنسبة إلى الأجزاء الإلكترونية والبرمجية، قمنا ببرمجة نظام مضمن ورتبته وفقاً للوحة Arduino Mega. يعيد هذا النظام إنتاج الأوامر المخزنة على بطاقة ذاكرة micro SD التي تم تحويلها إلى GCODE. هذا النظام مسؤول عن التحكم في المحركات الخطية الخمسة، والتحكم في درجة حرارة رأس الطابعة والقاعدة والتحكم فيها

Résumé

L'étude et la conception de notre imprimante 3D est subdivisée en trois parties : mécanique, électronique et logicielle. Pour parvenir à la construction mécanique de notre modèle, nous avons construit en premier lieu un système cinématique à trois axes : X, Y, et Z. Les mouvements de ces derniers sont garantis par le biais de cinq moteurs pas à pas bipolaires, avec l'ajout de capteurs de fin de course pour s'assurer que l'imprimante ne dépasse pas la frontière de la zone d'impression. Ensuite pour la partie électronique et logicielle, nous avons programmé et associé un système embarqué à base de la carte Arduino MEGA. Ce système reproduit les commandes stockées sur une carte mémoire micro SD transcrites en GCODE. Ce système est chargé de commander les cinq moteurs pas à pas, contrôler et commander la température de la tête d'impression et celle du plateau.

Abstract

The design of our 3D printer is divided into three parts: mechanical, electronic and software. To achieve the mechanical construction of our model, we first built a three-axis cinematic system: X, Y, and Z. The movements of the latter, are guaranteed by the mean of five bipolar stepper motors, with the addition of limit sensors to ensure that the printer does not go beyond the boundary of the print area. Then for the electronics and software part, we programmed and associated an embedded system based on the Arduino MEGA board. This system reproduces the commands stored on a micro SD memory card transcribed into GCODE. This system is responsible for controlling the five stepper motors, supervising and controlling the temperature of the print head and the heatbed.

Table des matières

Résumé	II
Table des matières	III
Liste des figures.....	IX
Liste des tableaux	XII
Liste des acronymes	XIII
Introduction générale.....	XV
Chapitre I : Introduction à l'impression 3D.....	1
I.1 Introduction.....	2
I.2 Définition de l'impression3D	2
I.3 L'évolution de l'impression 3D.....	3
I.3.1 Quelques faits marquants de l'impression en 3D	4
I.3.2 Le futur de l'impression3D	4
I.4 Applications de l'impression 3D	5
I.5 Principe de fonctionnement d'une imprimante 3D	6
I.5.1 Les Limitations	7
I.5.2 Les structures de soutien.....	7
I.5.3 Orienter l'objet.....	8
I.5.4 Diviser l'objet	8
I.6 Les technologies d'impression 3D.....	8
I.6.1 Dépôt de fil ou extrusion (FFF et FDM) :.....	9
I.6.1.1 Avantages et limites.....	10
I.6.2 Résine et photopolymérisation (SLA, DLP).....	10
I.6.3 Frittage de poudre et fusion (SLS, SLM.....)	11
I.7 Comparaison entre les différentes techniques d'impression 3D.....	12
I.8 Les imprimantes 3D personnelles.....	12
I.9 Prix des imprimantes 3D.....	13

I.10	Le choix de notre projet	13
I.11	Conclusion	13
Chapitre II : Étude technique sur le projet		14
II.1	Introduction.....	15
II.2	Comment fonctionne l'imprimante 3D (FDM).....	15
II.3	Mécanisme général	16
II.3.1	Système de fonctionnement	16
II.3.2	Organigramme de fonctionnement	16
II.3.3	Les Parties essentielles d'une imprimante 3D FDM.....	17
II.3.3.1	Extrudeuse.....	18
II.3.3.1.1	La Hot end.....	18
II.3.3.1.2	Type d'extrudeuse.....	20
II.3.3.2	Structure.....	21
II.3.3.2.1	L'imprimante cartésienne	21
II.3.3.3	Surface de l'impression.....	22
II.3.3.4	L'électronique	23
II.3.4	Les matériaux d'imprimante 3D en FDM.....	24
II.3.5	Avantage et désavantage de la FDM	24
II.3.6	Conclusion	25
Chapitre III : Conception de la partie mécanique		26
III.1	Introduction.....	27
III.2	Conception mécanique.....	27
III.2.1	Les axes X, Y et Z.....	27
III.2.2	L'axe X	27
III.2.2.1	Transmission de mouvement	28
III.2.2.2	Transformation de mouvement.....	28
III.2.2.3	Le guidage.....	29
III.2.3	L'axe Y	29

III.2.3.1	Transmission demouvement	29
III.2.3.2	Transformation de mouvement	29
III.2.3.3	Le guidage.....	30
III.2.4	L'axe Z.....	30
III.2.4.1	Transmission de mouvement	31
III.2.4.2	La transformation demouvement	31
III.2.4.3	Le guidage.....	31
III.2.5	La tête d'extrusion	32
III.2.6	Les moteurs pas à pas	33
III.2.6.1	Introduction.....	33
III.2.6.2	Moteur à aiment permanent	34
III.2.6.3	Moteur pas à pas rotatif à reluctance variable	35
III.2.6.4	Moteur pas à pas hybride	36
III.2.7	Moteur NEMA 17	37
III.2.7.1	Caractéristiques des Moteurs type NEMA 17 standard :.....	37
III.3	Dimensionnement des pièces mécaniques	38
III.3.1	Les axes X et Y	38
III.3.2	L'axe Z.....	39
III.3.3	La tête d'extrusion	39
III.3.3.1	Dans le cas du filament de 1,75mm.....	40
III.3.3.2	Dans le cas du filament de 3mm.....	41
III.3.4	Matériels utilisés	41
III.3.5	Le dessin industriel	42
III.4	Conclusion	43
Chapitre IV : Conception de la partie commande.....		44
IV.1	Introduction.....	45
IV.2	La carte de commande	45
IV.2.1	Le bloc de contrôle.....	46

IV.2.1.1	Présentation de l'Arduino Mega	46
IV.2.1.2	Caractéristiques techniques.....	46
IV.2.1.3	Ramps 1.4	47
IV.2.1.4	Implémentation de la Ramps sur L'Arduino	48
IV.2.2	Le bloc de commande des moteurs pas à pas	48
IV.2.2.1	Le circuit A4988	48
IV.2.2.2	Montage du circuit A4988	49
IV.2.2.3	Implémentation du circuit A4988 sur la carte principale.....	50
IV.2.3	Le bloc des capteurs.....	51
IV.2.3.1	Les capteurs fin de course.....	51
IV.2.3.2	Les capteurs de température.....	52
IV.2.4	Le bloc d'afficheur LCD et de la carte SD	52
IV.2.4.1	Le module utilisé.....	53
IV.2.4.2	Placement sur la carte Ramps	53
IV.2.5	L'alimentation.....	54
IV.2.5.1	Cahier des charges :	54
IV.3	Conclusion	55
Chapitre V : La partie programmation et simulation		56
V.1	Introduction.....	57
V.2	Le processus d'impression 3D	57
V.2.1	La commande numérique.....	57
V.2.1.1	Le G-CODE	57
V.2.2	Préparer à l'impression 3D	58
V.2.3	Le modèle 3D.....	58
V.2.4	Le slicer.....	58
V.3	Le firmware.....	59
V.3.1	Propriétés principales.....	59
V.3.2	Mode de fonctionnement	60

V.4	Lesoftware.....	61
V.4.1	Slic3r.....	61
V.4.2	Pronterface	62
V.5	Le test.....	62
V.5.1	Téléversement de firmware.....	63
V.5.2	Exportation du G-code via Slic3r	63
V.5.3	Préparation finale à l'impression	64
V.6	Simulation du contrôle d'un moteur pas à pas sous Matlab	64
V.6.1	Description.....	65
V.6.2	Simulation.....	66
V.1	Conclusion	66
Conclusion générale.....		67
Conclusion générale		68
Bibliographie.....		69
Bibliographie		70
Annexe.....		72

Liste des figures

Figure 1 : Des objets imprimés en 3D	2
Figure 2 : Structure de la technique d'impression 3D.....	3
Figure 3 : L'impression 3D au 21ème siècle.....	5
Figure 4 : Type de production en 3D	5
Figure 5 : par secteur Ventes sur 2014	6
Figure 6 : L'impression couche par couche	6
Figure 7 : Impression couche par couche d'un palmier	7
Figure 8 : L'orientation et la déviation du palmier	8
Figure 9 : Les grandes technologies d'impression 3D	8
Figure 10 : Technique d'impression FDM.....	9
Figure 11 : Technique de la stéréolithographie.....	11
Figure 12 : Technique de frittage de poudre	11
Figure 13 : Des exemples d'imprimante 3D personnelle	12
Figure 14 : Les microcouches d'un cube 3D.....	15
Figure 15 : Une conception d'un cube 3D.....	16
Figure 16 : Châssis de l'imprimante 3D.....	17
Figure 17 : Principe de mouvement selon les 3 axes.....	18
Figure 18 : Dissipateur thermique	19
Figure 19 : La barre thermique	19
Figure 20 : Bloc chauffant.....	20
Figure 21 : Une buse	20
Figure 22 : Une extrudeuse directe.....	21
Figure 23: les 3 axes d'impression	21
Figure 24 : Imprimante 3D Prusa i3	22
Figure 25: Lit chauffant	23
Figure 26 : Système de commande.....	23
Figure 27 : Conception du châssis avec SOLIDWORKS	27
Figure 28 : L'axe X	27
Figure 29 : Système poulie-courroie	28
Figure 30: Courroie fixée sur l'axe X.....	28
Figure 31 : Roulement linéaire	29
Figure 32 : L'axe Y	29
Figure 33: Courroie fixée sur l'axe Y.....	30
Figure 34 : Guide linéaire.....	30

Figure 35 : L'axe Z.....	30
Figure 36: Coupleur flexible	31
Figure 37: Deux tiges filetées fixées sur l'axe Z.....	31
Figure 38: Les roulements linéaires fixés sur les 2 pièces de l'axe Z.....	32
Figure 39: Structure d'une buse d'extrusion	32
Figure 40 : Tête d'extrusion MK-08	32
Figure 41: Structure du moteur pas à pas	34
Figure 42 : Représentation d'un schéma du moteur bipolaire.....	34
Figure 43 : Représentation d'un schéma du moteur unipolaire.....	34
Figure 44 : Structure d'un moteur à reluctance variable rotatif à double saillance	35
Figure 45: Fonctionnement du moteur pas a pas a reluctance variable	35
Figure 46: Structure d'un moteur pas a pas hybride	36
Figure 47: Fonctionnement du moteur pas a pas hybride.....	36
Figure 48: Architecture du moteur pas a pas Nema 17 [20]	37
Figure 49: Système poulie-courroie	38
Figure 50: Système vis-écrou	39
Figure 51 : Système de poussée par poulie	39
Figure 52 : La conception (vue globale).....	42
Figure 53 : La conception (vue en largeur)	42
Figure 54 : La conception (vue en épaisseur).....	43
Figure 55 : Schéma synoptique de la carte de commande ramps 1.4.....	45
Figure 56 : Le microcontrôleur ATmega1280	46
Figure 57: Branchement carte Ramps : Différents connecteurs du sheild	47
Figure 58: Montage Arduino+Ramp+A4988	48
Figure 59: Le circuit A4988	49
Figure 60: Schéma de branchement du circuit A4988	49
Figure 61: Branchement de A4988 sur Ramps	51
Figure 62: Capteur fin de course	51
Figure 63: Branchement de capteur fin de course dur Ramps.....	52
Figure 64: Capteur de température CTN de 3k Ω	52
Figure 65: LCD smart controller	53
Figure 66 : Branchement de kit LCD sur carte Ramps	53
Figure 67: Branchement de l'Alimentation.....	54
Figure 68 : Processus d'impression 3D	57
Figure 69 : Le modèle 3D. STL	58

Figure 70 : Le modèle 3D.G-CODE	58
Figure 71 : Marlin firware	59
Figure 72 : Interface marlin siteweb.....	60
Figure 73 : Interface du logiciel Slic3r.....	61
Figure 74 : L'interface du Pronterface	62
Figure 75 : Le modèle 3D du ventilateur d'extrudeuse.....	62
Figure 76 : Téléversement de marlin vers la carte arduino	63
Figure 77 : Exportation en format G-code via Slic3r.....	63
Figure 78 : Connexion Arduino/Proterface pour commencer l'impression	64
Figure 79 : Modèle pilotage d'un NEMA 17 sur Simulink.....	64
Figure 80 : Bloc de paramètres pour NEMA 17.....	65
Figure 81 : Bloc de paramètres A4988 driver.....	65
Figure 82 : Bloc signal builder.....	65
Figure 83: Résultat du scopre après la simulation.....	66

Liste des tableaux

Tableau 1: Dates clés de l’histoire de l’impression 3D.....	4
Tableau 2 : Tableau de comparaison entre les différentes Technologies d’Impression 3D	12
Tableau 3: Tableau de comparaison entre différentes imprimantes 3D personnelles.....	13
Tableau 4: Tableau comparatif des caractéristiques des matériaux d’impression en 3D.....	24
Tableau 5 : Propriétés de la FDM	25
Tableau 6: Les caractéristiques de l’Arduino Mega.....	47
Tableau 7 : Sélection de mode de pas	50

Liste des acronymes

3D : Trois Dimensions.

X : L'axe X.

Y : L'axe Y.

Z : L'axe Z.

E : L'axe E.

GUI: Graphical User Interface.

STL: Standard Tessellation Language.

FDM: Fused Deposition Modeling.

3DP: Three Dimensional Printing.

MIT: Massachussets Institute of Technology.

RepRap: Replication Rapid prototyper.

CNC: Computer Numerical Control.

IMTS: International Manufacturing Technology Show.

DLP: Digital Light Processing.

SLA: Stereolithography.

CAO : Conception assistée par ordinateur.

UV: Ultraviolet.

2PP: Two-Photon Polymerization.

SLS: Selective Laser Sintering.

DMLS: Direct Metal Laser Sintering.

EBM: Electric Beam Melting.

EBDM: Electron Beam Direct Manufacturing.

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

SDL: Selective Deposition Laminated.

PVC: Polyvinyl Chloride.

FDM: Fused Deposition Modeling.

ABS: Acrylonitrile Butadiènestyrène.

PLA: Polylactic Acid.

PC: Polycarbonates.

PPSF : Polyphénylsulfones.

LiPo: Lithium Polymer.

Wi-Fi : Wireless Fidelity.

USB: Universal Serial Bus.

SD : Secure Digital.

NEMA : National Electrical Manufacturers Association.

Pt : Nombre des pas par tour.

Ap : L'angle du pas.

Dx : Distance de translation selon X.

Dy : Distance de translation selon Y.

P : Périmètre de la poulie.

Ps : Nombre des pas désiré.

D : Diamètre de la poulie.

Dz : Distance de translation selon Z.

Pv : Distance entre 2 dents d'une vis.

De : Distance du filament poussé avant la tête d'extrusion.

Ve : Volume du filament poussé avant la tête d'extrusion.

rf : Rayon du filament.

Vf : Volume du filament poussé après la tête d'extrusion.

rb : Rayon de la buse.

Df : Distance du filament poussé de la tête d'extrusion.

M : Moteur.

LCD : Liquid Crystal display.

LED : Light Emitting Diode.

ADC : Analog to Digital Converter.

AC : Alternating Current.

DC : Direct Current.

PFC : Power Factor Correction.

PCB : Printed Circuit Board

ATX : Advanced Technology extended.

PTC : Polymeric positive Temperature Coefficient device.

PWM : Pulse Width Modulation.

UART : Universal Asynchronous Receiver/Transmitter.

E/S : Entrées/Sorties.

SRAM : Static Random Access Memory.

EEPROM : Electrically Erasable Programmable Read Only Memory.

CTN : Negative Temperature Coefficient.

TMP : Température.

MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

EAGLE : Easily Applicable Graphical Layout Editor

G-Code : General Code.

IDE : Integrate Development Environment.

Introduction générale

Depuis quelques années, l'impression tridimensionnelle suscite un intérêt croissant que ce soit chez les industriels, ou bien chez les passionnés de la technologie et les académiques.

Présentement, Les entreprises utilisent l'impression 3D à différentes étapes du cycle de production, du stade initial du prototypage à la production de masse des produits. Les raisons de leur adoption sont nombreuses, mais parmi les plus importantes, citons une vitesse accrue, plus de créativité et des coûts réduits. Mais comment cette technologie est-elle utilisée exactement ?

Du point de vue technique, L'impression 3D permet de réaliser une pièce mécanique par superpositions successives de fines couches de matière, alors que les techniques classiques d'usinage fonctionnent traditionnellement par soustraction ou enlèvement de matière (perçage, fraisage, tournage, etc.). Ce procédé de fabrication additive par couches (ALM pour additive layer manufacturing), où l'on ajoute progressivement de la matière, repose sur l'utilisation d'un système de contrôle à commande numérique (computer numerical control, ou CNC).

Ainsi, dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons mis en œuvre un modèle fonctionnel d'une imprimante 3D qui utilise la technique FDM : modélisation par dépôt de matière fondue. Tout au long de ce travail, nous avons mis le point sur toutes les étapes nécessaires pour la conception et réalisation d'une telle machine. Le travail présent dans ce mémoire sera réparti en cinq chapitres.

Le premier chapitre contient une étude générale sur la technologie d'impression 3D et son fonctionnement, en incluant une vue générale sur les importantes techniques utilisées dans cette dernière, ce qui nous a permis de définir la technique d'impression 3D qu'on va utiliser dans le cadre de ce projet.

Le deuxième chapitre présentera une étude générale dans le côté technique de notre imprimante pour nous permettre de comprendre exactement le fonctionnement de la technique qu'on va utiliser ainsi que le choix du matériel nécessaire.

Dans le troisième et quatrième chapitres on va élaborer la partie mécanique et commande dans notre imprimante.

Dans le cinquième chapitre nous présentons la partie logicielle et programmation de notre système qui sera composée de deux parties : le firmware (programme implémenté dans le contrôleur de l'Arduino) et le software (logiciel de commande sur ordinateur), ainsi qu'une simulation de toutes les étapes d'impression dans notre PC

Enfin, une conclusion générale avec des perspectives dans le domaine d'impression tridimensionnelle.

Chapitre I : Introduction à l'impression 3D

I.1 Introduction

Les imprimantes 3D ont gagné en popularité ces dernières années pour des utilisations personnelles et industrielles et ont récemment gagné l'attention en tant que méthode de production efficace dans les environnements professionnels.

Ce chapitre va présenter une étude générale sur la technologie d'impression 3D, en incluant une vue générale sur la signification de cette énorme technologie et l'évaluation temporelle de cette dernière.

Ensuite, on va focaliser notre étude sur l'utilité et les différentes applications possibles par l'impression tridimensionnelle en expliquant aussi le principe général de fonctionnement.

Après, on va citer les différentes importantes techniques utilisées par cette rapide technologie de prototypage.

Enfin, et afin de choisir la technique à utiliser pour notre modèle et celle actuellement la plus utilisée par une majorité d'imprimantes 3D disponibles sur le marché.

I.2 Définition de l'impression 3D

L'impression tridimensionnelle (3-D) est un processus de fabrication additive qui crée un objet physique à partir d'une conception numérique. Le processus fonctionne en déposant de fines couches de matériau sous forme de plastique liquide ou en poudre, de métal ou de ciment, puis en fusionnant les couches ensemble. [1]

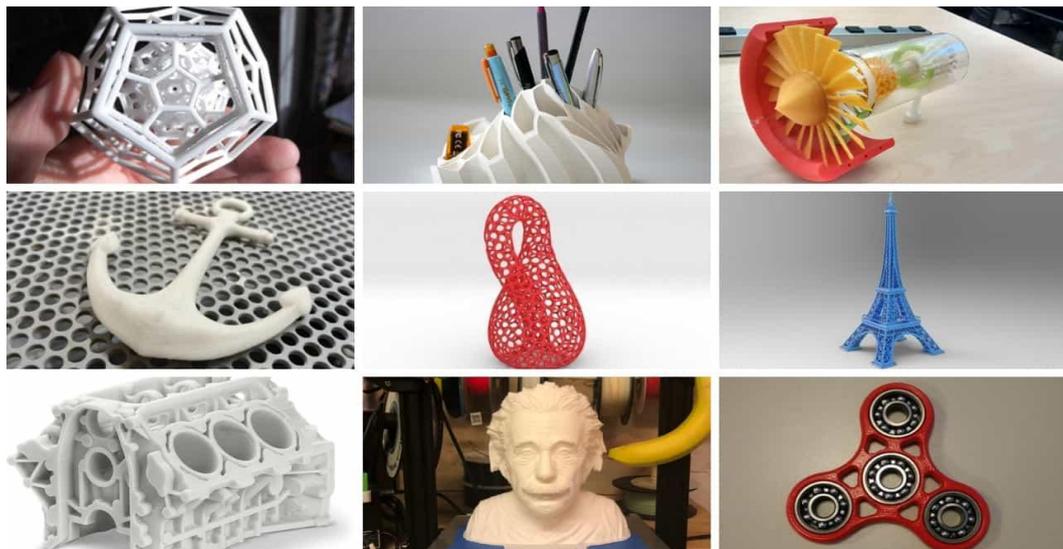


Figure 1 : Des objets imprimés en 3D

Cependant, l'impression 3D est réalisée grâce à une imprimante 3D. Cette machine, qui peut être de taille et d'aspect très divers, est toujours associée à plusieurs logiciels informatiques, qui sont d'une grande importance dans le processus puisqu'ils permettent de préparer le fichier 3D de l'objet à fabriquer, et aussi contrôler l'imprimante pendant toute la durée de l'impression. Une imprimante 3D est donc une machine capable de fabriquer un objet physique à partir d'un modèle 3D [2].

Donc tout commence par un modèle 3D. Vous en créez un vous-même ou le téléchargez à partir d'un référentiel 3D. Lorsque vous le créez vous-même, vous pouvez choisir d'utiliser un scanner 3D, une application, un appareil haptique, un code ou un logiciel de modélisation 3D.

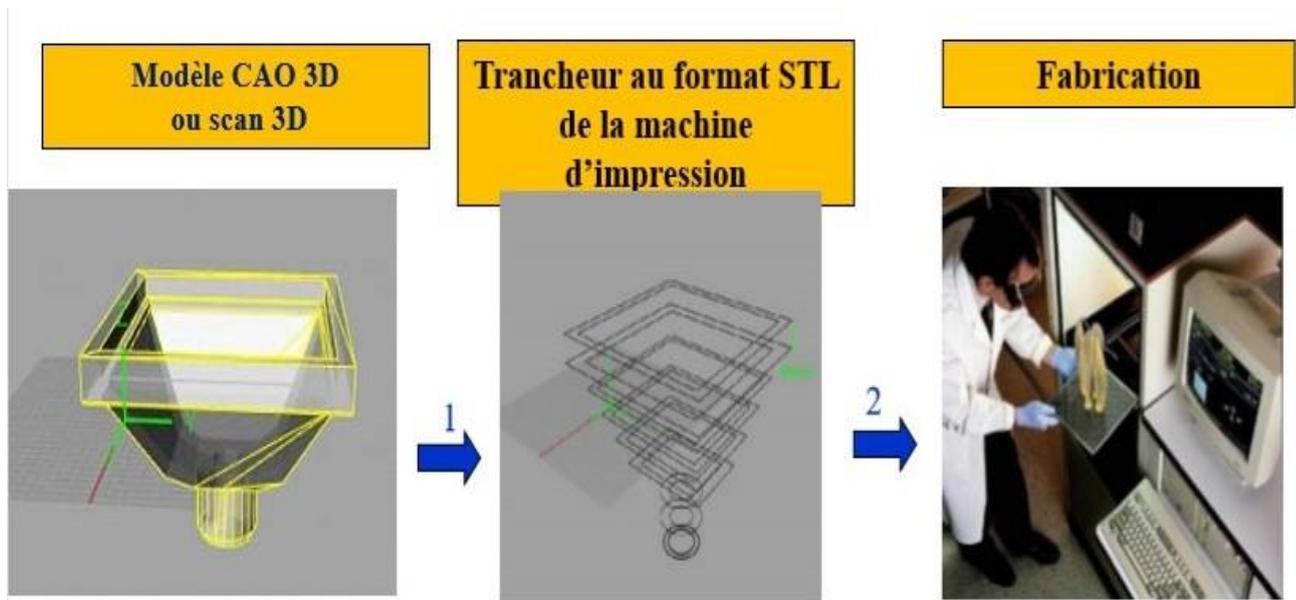


Figure 2 : Structure de la technique d'impression 3D

I.3 L'évolution de l'impression 3D

L'impression 3D existe en réalité depuis environ 40 ans. Depuis son introduction, la technologie d'impression 3-D a déjà augmenté la productivité de fabrication. À long terme, il a le potentiel de perturber massivement les industries de la logistique de fabrication et de la gestion des stocks, surtout s'il peut être intégré avec succès dans les processus de production de masse.

I.3.1 Quelques faits marquants de l'impression en 3D

Année	Entreprise et Technique
1977	Swainson dépose un brevet aux Etats-Unis pour un système de durcissement de résine
1982	Recherches sur la stéréolithographie menées parallèlement en France et aux Etats-Unis
1984	Dépôts de brevets sur la stéréolithographie par J.C. André et C.Hull
1986	Création de 3D Systems à Valencia en Californie (SLA)
1989	Création de Stratasys et commercialisation des imprimantes FDM Création de la société EOS en Allemagne pour les procédés de frittage laser.
1995	Création de Z Corporation et imprimantes 3 DP (MIT)
1990	Dépôt de brevets pour la photofabrication par masques (Pomerantz)
1995-1997	Recherche sur les procédés avec masque : cristaux liquides (LCD) micro-miroirs (DLP/DMD) Création d'Arcam (EBM)
1998-2001	Travaux de recherche des procédés multiphotoniques avec une résolution submicronique
2002	Création Envision TEC Digital Light Processing (DLP) (Allemagne)
2005	2005 : Lancement du projet RepRap au Royaume-Unis à l'Université de Bath
2007	2007 : Création de Shapeways (Pays-Bas) sous licence GNU/GPL, Poly-Shape(France)
2009	2009 : Expiration du brevet de FDM → MakerBot Industries et Sculpteo (France)
2012	45 000 nouvelles machines imprimantes 3D sont vendues Fusion de Stratasys et Objet ; Acquisition de Z Corp et Vidar par 3D Systems
2013	Stratasys absorbe MakerBot Industries . Création de 14 « Fablabs » en France

Tableau 1 : Dates clés de l'histoire de l'impression 3D [3]

I.3.2 Le futur de l'impression 3D

Le secteur de l'impression 3D continue sa croissance. Il adopte de nouveaux matériaux à mesure que les machines se miniaturisent. Ouvert traditionnellement aux industries lourdes, le marché tente de mettre un pied auprès du grand public. L'objectif de certains spécialistes est de pouvoir installer une imprimante dans chaque foyer, notamment pour les besoins courants. Selon les experts, à l'horizon de l'année 2030, les particuliers utiliseront la 3D à domicile pour imprimer des objets du quotidien. Un horizon encore lointain dans la mesure où les besoins en matière d'impression 3D pour les foyers ne sont pas correctement définis [4].



Figure 3 :L'impression 3D au 21ème siècle

I.4 Applications de l'impression 3D

Le champ d'application des imprimantes 3D est potentiellement énorme et tous les secteurs d'activité sont ou vont être concernés dans un avenir proche. En tant qu'usines de fabrication à bas coût que le grand public puisse facilement se procurer, les imprimantes 3D permettent de transformer une idée en un objet tangible, réalisé avec n'importe quelle matière, que celle-ci soit minérale, végétale ou organique. Les premières applications, qui ont permis l'essor de l'impression 3D, sont surtout décoratives, utilitaires ou à des fins de prototypage. Mais il est possible aussi de reproduire des pièces de rechange en réponse aux problèmes d'obsolescence programmée ou de réaliser des pièces de maquette (objets volants, drones personnels).

- Pièces fonctionnelles
- Ajustement et assemblage
- Modèles pour outillage prototype
- Modèles pour fonderie métal Aides visuelles
- Modèles de présentation
- Education-Recherche
- Composants d'outillages

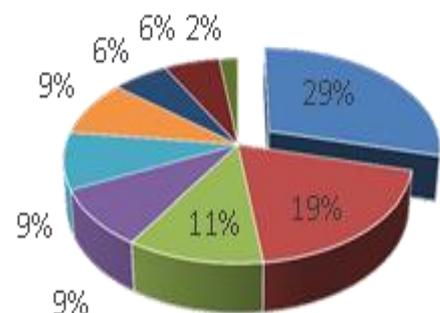


Figure 4 : type de production en 3D.[5]

De nombreuses tentatives ont également été effectuées à l'échelle industrielle, civile ou militaire. Airbus Group (anciennement E.A.D.S., European Aeronautic Defence and Space Company) utilise avec succès l'impression 3D pour la fabrication de pièces complexes en avionique. Les constructeurs automobiles adaptent également leurs méthodologies de fabrication à ces nouveaux outils pour réduire leurs coûts. En utilisant de nouveaux ciments sans mortier, la construction de bâtiments va également profiter de cette évolution méthodologique, et il sera bientôt possible d'« imprimer » des maisons, rapidement et à un coût très réduit. L'industrie agroalimentaire n'est pas en reste, avec l'élaboration d'aliments caractérisés par de nouvelles saveurs et textures. Loin du cliché des sculptures en chocolat pour les gâteaux de mariage, il est déjà possible de concevoir des aliments avec des vertus nutritives dosées de manière précise tout en respectant l'environnement pour leur production.

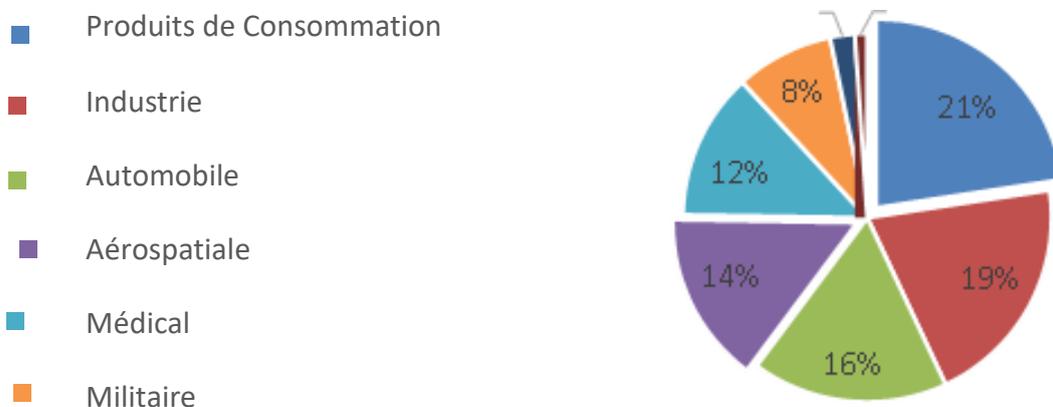


Figure 5 : Ventés par secteur en 2014

I.5 Principe de fonctionnement d'une imprimante 3D

Il existe de nombreux types d'impression 3D, mais toutes les imprimantes utilisent le même principe de fonctionnement : faire partie d'une conception CAO ou d'une conception informatique divisée en couches ou feuilles horizontales.

L'imprimante « imprime » un calque puis répète le processus au-dessus du calque précédent, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un objet soit créé [6].



Figure 6 : L'impression couche par couche

Pour comprendre comment cela fonctionne, vous pouvez imaginer un boulanger faisant un gâteau qui a plusieurs couches de hauteur. Pour faire le gâteau, utilisez le manchon de pâtisserie et recouvrez toute la couche, puis placez une couche de gâteau sur le dessus et répétez le processus.

L'impression 3D est la même, aller empiler les couches les unes sur les autres mais automatiquement.

I.5.1 Les Limitations

Il y a un problème lors de la création d'un objet par couches. Vous devez toujours déposer du matériel sur quelque chose, vous ne pouvez pas imprimer à l'antenne.

Si un palmier est imprimé comme l'image précédente, ce qui suit se produit:



Figure 7 : impression couche par couche d'un palmier

Il arrive un moment où l'imprimante doit imprimer les feuilles de palmier. Ces draps n'ont aucun point d'appui car ils sont suspendus à l'envers.

Pour pouvoir imprimer cette paume, l'imprimante doit être capable de laisser le matériau flottant dans l'air.

Est-ce que toutes sortes d'objets ne peuvent pas être imprimés ? Oui, oui vous pouvez mais vous devez savoir-faire. Pour pouvoir imprimer des objets qui ont des pièces en porte-à-faux, il existe trois astuces :

I.5.2 Les structures de soutien

Le plus simple est d'ajouter des structures de support. Une sorte d'échafaudage est conçue pour maintenir les pièces en porte-à-faux. Les programmes utilisés pour créer des couches le font automatiquement.

L'inconvénient est que vous ajoutez du matériel au processus et que l'impression prend plus de temps.

L'inconvénient est qu'il faut alors retirer ces supports et ils peuvent se trouver dans des endroits inaccessibles ou laisser des marques sur l'objet.

I.5.3 Orienter l'objet

Autrement dit, placez la pièce de sorte que toutes les couches aient toujours le support et soient plus faciles à imprimer.

I.5.4 Diviser l'objet

Dans ce processus, divisez l'objet en parties et joignez-les une fois imprimées. Il y a des cas où le résultat de l'impression sera bien meilleur de cette manière et les objets avec plus de qualité restent.

Vous pouvez voir l'image ci-dessous pour une meilleure compréhension.

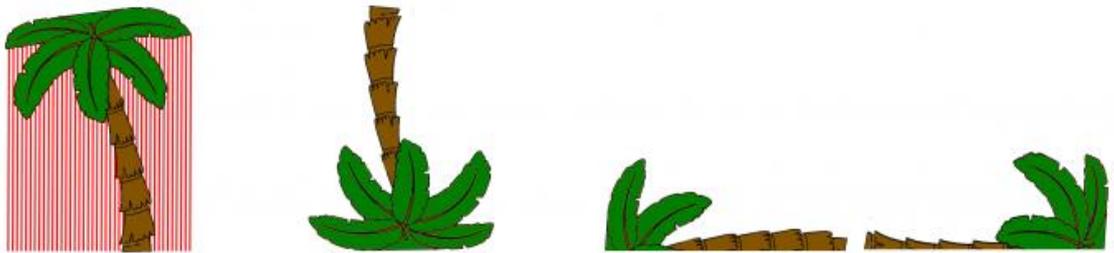


Figure 8 : L'orientation et la déviation du palmier

I.6 Les technologies d'impression 3D

De nombreuses technologies d'impression 3D sont déjà disponibles sur le marché, et un certain nombre sont en cours de développement. Chacune de ces technologies requiert un type de matériau d'impression 3D différent : filaments plastique en bobines (PLA, ABS...), résines liquide photosensibles, poudres (métal, plastiques...), etc.

Chaque technologie d'impression 3D présente des avantages et est adaptée pour des applications particulières.[7]

Il existe trois grandes catégories de technologies d'impression 3D :



Figure 9 : les grandes technologies d'impression 3D

I.6.1 Dépôt de fil ou extrusion (FFF et FDM) :

La technologie d'impression 3D par dépôt de fil fondu, aussi appelée extrusion, utilise du filament plastique (PLA ou ABS) comme consommable. Le filament est chauffé et fondu dans la tête d'impression (aussi appelée buse) de l'imprimante 3D. La buse se déplace selon deux axes (les axes X et Y) en même temps que la plateforme d'impression se déplace sur un axe vertical Z. Les imprimantes 3D utilisant la technologie par dépôt de fil fondu sont communément appelées imprimantes 3D FFF ou FDM.

L'imprimante 3D dépose le filament fondu par couche successives, les unes sur les autres, pour former l'objet en 3D. Lorsqu'une couche est complète, le plateau d'impression s'abaisse légèrement sur l'axe Z (vertical) et le processus d'extrusion reprend en déposant une nouvelle couche de filament fondu au-dessus de la première. Les couches ainsi créées sont fusionnées entre elles par le plastique qui se solidifie rapidement. L'empilement des couches de matière forme l'objet final. Un filament plastique est fondu par la tête d'impression de l'imprimante 3D et déposé sur la plateforme d'impression de l'imprimante 3D pour créer l'objet voulu, couche par couche. La précision et la qualité du résultat final dépendent entre autres de l'épaisseur de couche minimale offerte par l'imprimante 3D (plus les couches sont fines, plus la résolution est importante et le résultat précis).

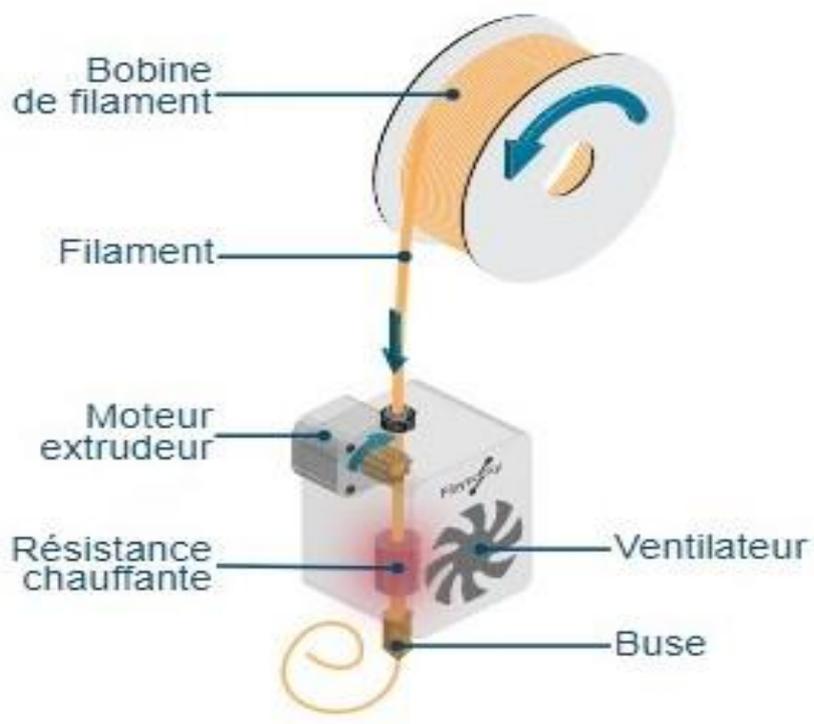


Figure 10: technique d'impression FDM

Les matériaux d'impression 3D compatibles avec les imprimantes 3D à dépôt de fil sont des filaments plastiques sous forme de bobines (en général du PLA ou de l'ABS). Il existe aussi des filaments pour imprimantes 3D dits exotiques, contenant un certain pourcentage de métal ou de bois, ou des propriétés particulières (flexible, transparent, phosphorescent...). Les imprimantes 3D de bureau sont en grande majorité des imprimantes 3D par extrusion et utilisent du filament plastique en bobines comme consommables.

I.6.1.1 Avantages et limites

- ✓ La FDM est actuellement une technologie utilisée par une grande variété d'imprimantes 3D. La qualité de l'impression, le coût et le choix des matériaux varient donc énormément selon le type de machine.
- ✓ Avec la FDM, de nombreux matériaux sont envisageables. Les plastiques de type ABS ou PLA sont généralement privilégiés, avec un large choix de couleurs.
- ✓ Le principal avantage de la FDM réside dans sa simplicité d'utilisation et la variété des usages possibles. Elle est aussi plus rapide que d'autres techniques d'impression, mais la précision n'est pas toujours au rendez-vous, notamment pour les imprimantes personnelles fournies en kit qui nécessitent de paramétrer soi-même la configuration en fonction du matériau. Par ailleurs, le filament est parfois difficile à maîtriser.

I.6.2 Résine et photopolymérisation (SLA, DLP)

Les imprimantes 3D à résine, utilisant les technologies SLA ou DLP, sont basées le processus de photopolymérisation. Une résine photosensible contenue dans un réservoir de l'imprimante 3D, est polymérisée (solidifiée) par une source de lumière (laser ou projecteur), couche par couche. Les imprimantes 3D SLA et DLP utilisent de la résine liquide photosensible comme consommable : ce type de résines sont des photopolymères photosensibles, c'est-à-dire qu'elles réagissent en se solidifiant quand elles sont exposées à certains rayons lumineux. Dans une imprimante 3D à résine (SLA ou DLP), le plateau d'impression est immergé juste sous le niveau de la surface dans un bac contenant la résine liquide. Une source de lumière (projecteur pour DLP ou laser pour SLA) vient solidifier la résine point par point (SLA) ou couche par couche (DLP). Une fois qu'une couche est complète, le plateau s'enfonce un peu plus dans le réservoir et le processus se répète pour créer la couche suivante et former peu à peu l'objet final.

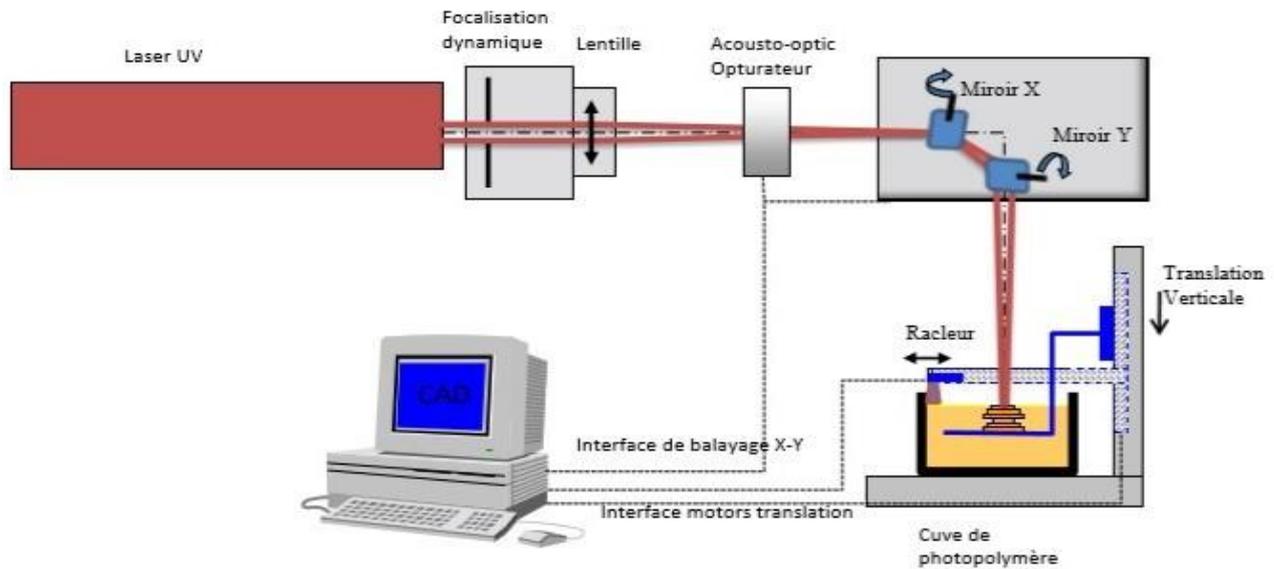


Figure 11 : technique de la stéréolithographie

I.6.3 Frittage de poudre et fusion (SLS, SLM...)

Certaines imprimantes 3D, en général des machines industrielles, utilisent comme consommable des matériaux sous forme de poudre (poudre de métal par exemple). Les principales technologies d'impression 3D basées sur de la poudre sont le frittage sélectif par laser (connu sous le nom SLS pour Selective Laser Sintering) et la fusion sélective par laser (ou SLM, pour Selective Laser Melting). Ces imprimantes 3D SLS ou SLM sont en général destinées à des applications industrielles comme la production de pièces complexes en métal pour l'aviation

Un matériau sous forme de poudre est disposé dans un bac de l'imprimante 3D. Une source d'énergie, en général un laser, vient faire fusionner les grains de poudre pour former une structure solide. On parle principalement d'impression 3D par frittage laser ou frittage de poudre (SLS pour Selective Laser Sintering), même si des variantes de cette technologie existent (SLM pour Selective Laser Melting notamment).

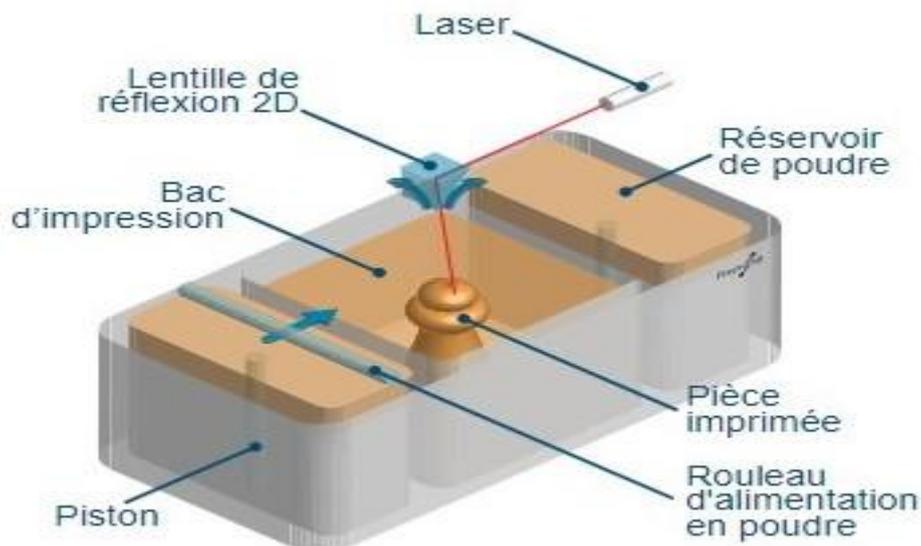


Figure 12 : technique de frittage de poudre

I.7 Comparaison entre les différentes techniques d'impression 3D

Après avoir vu les différentes technologies d'impression 3D, il s'avère judicieux de mener une étude comparative sur chacune de ces techniques en citant leurs avantages, désavantages et matériau utiliser. Le tableau 2 résume les différentes techniques utilisées pour l'impression 3D.

	Technologie	Procédé de fabrication	Avantages	Désavantages	Plastique et Alumide	Métal ou cuivre	Résine	Multicolor
L'impression 3D par photopolymérisation	La stéréolithographie	Photopolymérisation	Géométries complexes Bonne précision du détail	Etape de finition obligatoire Nécessite du support			Oui	
	Le procédé DLP	Photopolymérisation	Impression simultanée de plusieurs objets Formes et tailles complexes Haute précision	Limite d'épaisseur Gamme limitée de matériaux			Oui	
	La technologie Polyjet	Projection de matériau	Haute précision Bon aspect final Nombreux matériaux et couleurs possibles	Procédé de fabrication lent			Oui	Oui
	La 2PP	Photopolymérisation	Haute précision sur l'échelle microscopique	Procédé de fabrication lent			Oui	
L'impression 3D par liage de poudre	Le frittage laser	Poudre Lit de Fusion	Aucun support requis Haute résistance Thermique et Chimique Très rapide	Précision limitée à la finesse de la poudre Surface finie rugueuse	Oui			
	Le procédé E-Beam	Poudre Lit de Fusion	Bonne rapidité d'impression Meilleure précision	Etape de finition obligatoire Utilisation de rayons X		Oui		
	La technique 3DP	Projection	Prix réduit Permet une impression en couleurs Rapide	Matériaux limités Objets fragiles				Oui
L'impression 3D par encollage de papier	La technique SDL	Laminage de feuilles	Prix faible Pas de matériaux toxiques Fabrication rapide de grandes pièces	Manque de précision Pièces non homogènes				Oui
L'impression 3D par dépôt de matière fondue	La technique FDM	Extrusion de matériau	Pièces solides à imprimer	Facile Mauvaise qualité de finition et lent Requiert du support	Oui			

Tableau 2: Tableau de comparaison entre les différentes Technologies d'Impression 3D

I.8 Les imprimantes 3D personnelles

L'impression 3D était Longtemps utilisée exclusivement par les industriels, les imprimantes 3D sont restées quasi inconnues du grand public pendant les vingt années qui ont suivi le lancement du premier modèle à stéréolithographie par 3D Systems en 1986. Mais ces dernières années les imprimantes 3D personnelles sont devenues une tendance sur marché



Figure 13 : Des exemples d'imprimante 3D personnelles

Modèle	Pays	Matériau(x)	Technologie	Taille	Poids (kg)	Diamètre de la buse (mm)	Épaisseur min. d'impression	Vitesse (mm/s)	Taille de filament (mm)	Taille maximum d'impression (mm)	Connectivité	Prix
MakerBot Replicator 2	USA	PLA	Dépôt de matière fondue	490x320x380	11.5	0.40	100 microns	200	1.75	285x153x155	Câble USB, Carte SD	1 950 €
MakerBot Replicator mini	USA	PLA	Dépôt de matière fondue	295x310x381	8	0.40	200 microns	100	1.75	100x100x125	Wi-Fi, Câble USB	999 €
Ultimaker 2	Hollande	PLA & ABS	Dépôt de matière fondue	342x357x488	6	0.40	20 microns	300	1.75	230x225x205	Wi-Fi, Carte SD	1 900 €
Printrbot jr	USA	PLA	Dépôt de matière fondue	356x254x406	4,3	0.40	200 microns	80	1.75	100x100x100	Câble USB	600 €
Cube 3	USA	PLA & ABS	Dépôt de matière fondue	260x260x340	5.7	0.40	75 microns	100	1.75	152.5x152.5x152.5	Câble USB, clé USB, Wi-Fi	950 €

Tableau 3 : Tableau de comparaison entre différentes imprimantes 3D personnelles

I.9 Prix des imprimantes 3D

Grand choix et forte baisse au niveau du Grand Public Plus de 140 modèles de 100 € à 5000 €

- ❖ Imprimantes 3D personnelles ; < 5000 €
 - MakerBox 177 € ; Replicator 3370 € etc. RepRap 4800 € ; Cube
- ❖ Imprimantes professionnelles : prix moyen 50 000€
 - 3D Systems (Z corporation et Stratasys-Objet qui a absorbé MakerBot)
 - EOS
 - Envision TEC, Arcam etc.

I.10 Le choix de notre projet

L'analyse du marché actuel des imprimantes 3D du point de vue technologique, nous a poussé à opter pour la technique d'impression 3D par dépôt de matière fondue (FDM), puisqu'elle permet d'une part, de répondre au besoin de notre projet (disponibilité, faisabilité) et d'autre part elle assure la précision nécessaire pour réaliser des objets pour l'usage éducatif.

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la technologie d'impression 3D en vue générale et globale avec une explication de tous les termes et techniques relatifs à cette technologie

Cela va nous aider dans le chapitre suivant pour faire une étude correcte selon les normes qui satisfont le marché actuel.

Chapitre II : Étude technique sur le projet

II.1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons vu les différentes techniques d'impression 3D, qui nous a permis à définir et expliquer la technique d'impression 3D que nous allons utiliser dans le cadre de ce projet.

Dans ce qui suit, on va élaborer une étude générale sur notre imprimante pour permettre le choix du matériel à utiliser.

II.2 Comment fonctionne l'imprimante 3D (FDM)

Toutes les imprimantes fonctionnent en divisant l'objet en couches. La différence entre eux est la façon de générer les couches et les matériaux qu'ils utilisent.

Pour notre imprimante, c'est la technique de dépôt de matière fondue, une extrudeuse et des thermoplastiques PLA sont utilisés comme matière première.

Extruder signifie façonner une masse plastique en la faisant sortir par une ouverture. Le matériau passe par une ouverture circulaire et sort sous forme de fil, comme dans une poche à douille ou dans un tube de dentifrice.

Les thermoplastiques sont un matériau qui, à des températures relativement élevées, devient déformable ou flexible, fond lorsqu'il est chauffé et durcit lorsqu'il est à nouveau refroidi.

Bref, les imprimantes 3D FDM chauffent le plastique sous forme de filament, pour le faire passer par une ouverture. Lorsque le matériau sort, l'imprimante se déplace pour « peindre les couches ». Peignez un calque au-dessus de l'autre jusqu'à ce que vous obteniez un objet en trois dimensions [8].

Avec l'exemple suivant, vous le comprendrez parfaitement.

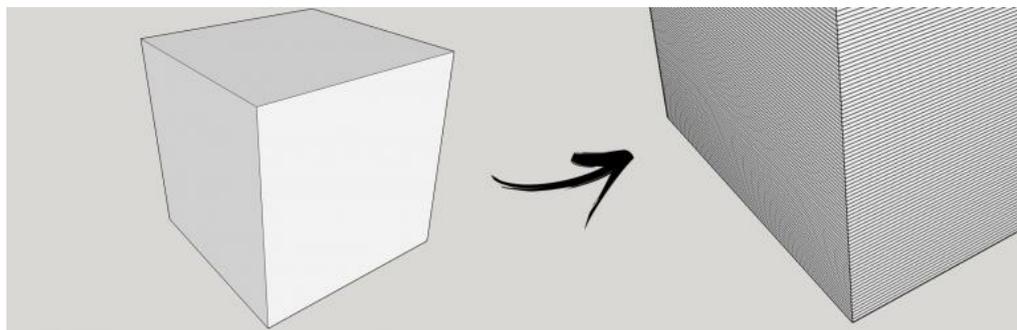


Figure 14: les microcouches d'un cube 3D

La première couche que vous peignez est un carré plein. Puis il peint des carrés les uns sur les autres jusqu'à ce qu'il fasse un cube. Dans l'exemple, pour prendre moins de temps à imprimer, l'intérieur du cube n'est pas solide.

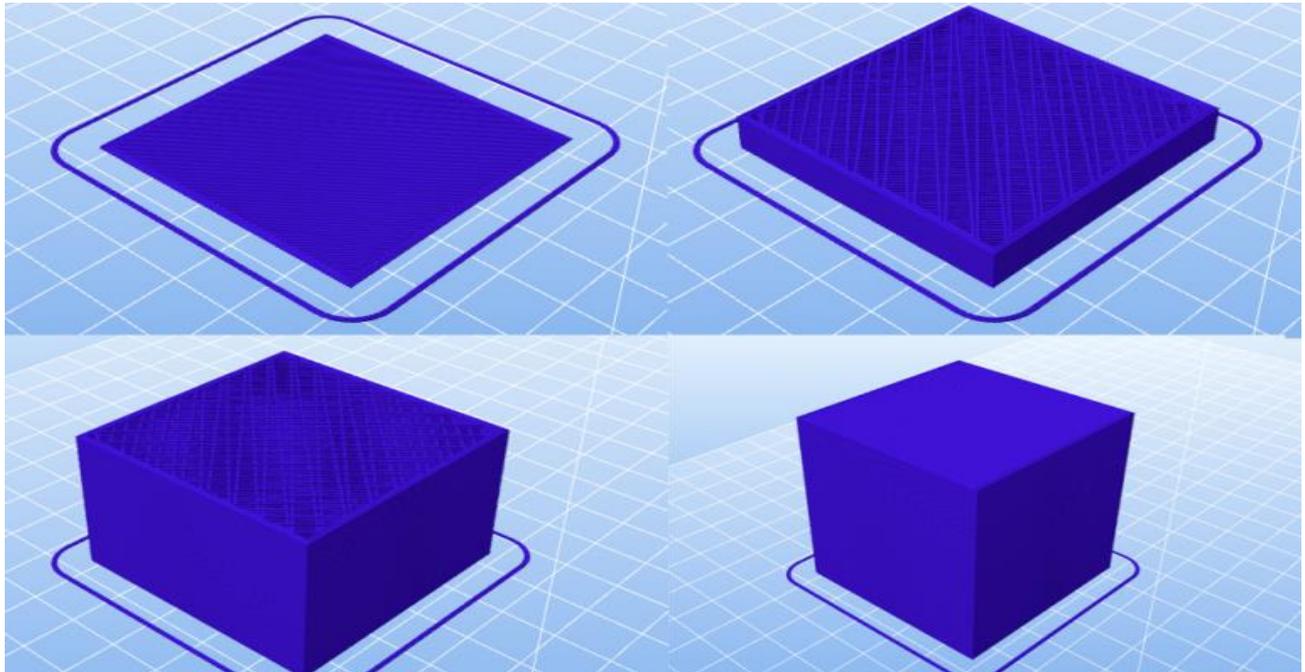


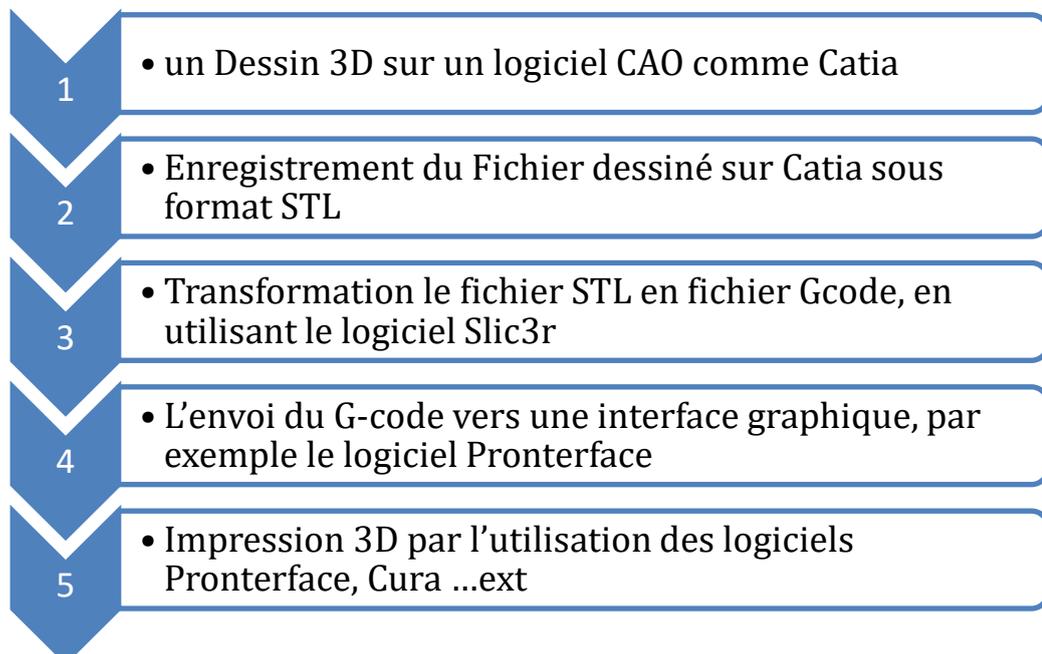
Figure 15: Une conception d'une cube 3D

II.3 Mécanisme général

II.3.1 Système de fonctionnement

- Un opérateur dessine une CAO.
- Le fichier obtenu est envoyé vers une imprimante
- Le fichier 3D est découpé en tranches, puis déposé la matière, couche par couche pour obtenir
- La pièce finale, ces couchent fusionnent par l'intermédiaire d'un appareil spécifique (résistance).

II.3.2 Organigramme de fonctionnement



II.3.3 Les Parties essentielles d'une imprimante 3D FDM

Un certain nombre de pièces sont nécessaires pour fabriquer une imprimante 3D à modélisation de dépôt par fusion.

L'impression 3D est la somme de nombreuses petites choses très simples. Le problème est qu'il y a beaucoup de choses, il est donc important d'aller petit à petit et de comprendre que chaque chose a une fonction.

Ici, nous ne discuterons que des parties importantes :

1. Extrudeuse
2. Structure
3. Surface d'impression
4. Électronique

Comme première étape, et afin d'assurer une enveloppe solide et résistante contre toute vibration et mouvement, nous avons au début conçu le châssis externe. Ce dernier aura pour rôle de fixer les trois axes de mouvement de la tête d'extrusion. Le diagramme de base de notre conception du châssis est représenté sur la figure suivante.

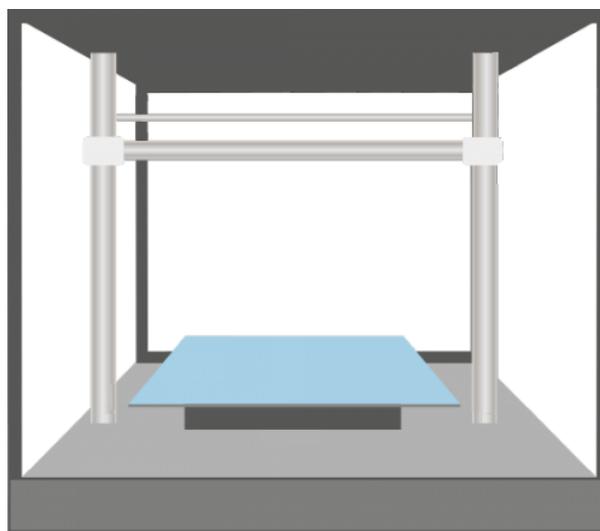


Figure 16 : Châssis de l'imprimante 3D

Le mécanisme de mouvement de la tête d'extrusion par rapport au plateau d'impression est telle que mentionné dans la figure 17.

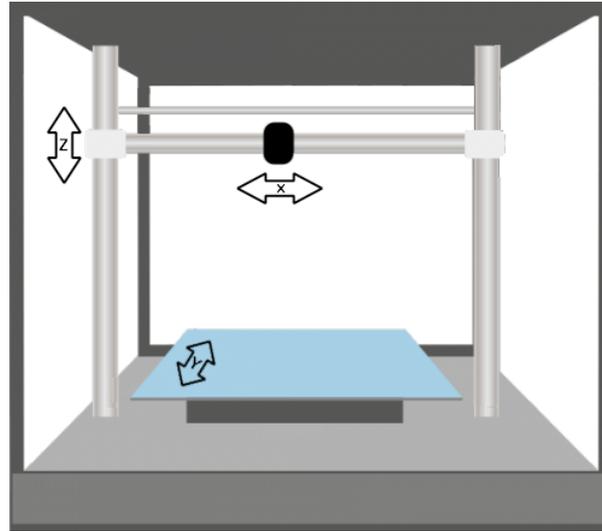


Figure 17 : Principe de mouvement selon les 3 axes

Dans ce système le mouvement du porteur de la tête d'extrusion est sur l'axe X, le plateau d'impression se déplace selon l'axe Y et tout le système qui porte la tête d'extrusion et même l'axe X se déplace sur l'axe Z.

II.3.3.1 Extrudeuse

L'extrudeuse est la «brosse» de l'imprimante 3D, l'une des pièces les plus importantes. Vous pouvez différencier deux parties. Une buse qui est chauffée appelée extrémité chaude, chargée de chauffer le matériau. Et une autre pièce composée d'un système d'engrenages et de paliers qui pousse le filament et le fait passer à travers la buse.

II.3.3.1.1 La Hot end

C'est la partie de l'extrudeuse responsable du chauffage du filament. Il est composé des éléments suivants :

- **DISSIPATEUR DE CHALEUR**

Un dissipateur thermique est un instrument utilisé pour abaisser la température de certains composants

Dans l'extrudeuse, les dissipateurs sont généralement accompagnés d'un ventilateur.

Le problème du chauffage est la dissipation de la chaleur. Si la chaleur augmente, cela rend le filament plus doux sur le dessus. Lors du chauffage sur le dessus, essayer de pousser le filament est plus difficile et peut poser des problèmes d'impression.

Par conséquent, il est très important que chaque fois que l'imprimante fonctionne, le ventilateur du dissipateur thermique soit allumé.



Figure 18: dissipateur thermique

- **Barre thermique**

Cette barre thermique a pour fonction de guider le filament vers la pointe.

Il fait l'union entre le bloc thermique et le système de poussée du filament.

Certains utilisent un tube en Téflon (PTFE) pour améliorer le glissement du filament. Si vous utilisez des matériaux qui nécessitent beaucoup de températures, cela peut poser des problèmes, car le téflon commence à fondre à 270 ° C.

Il existe des versions pour le filament de 1,75 mm et 3 mm.



Figure 19: la barre thermique

- **BLOC CHAUFFANT**

Le bloc chauffant est la partie responsable du chauffage et du maintien de la chaleur. Il fait l'union entre l'embout buccal et la barre thermique.



Figure 20 : block chauffant

- **BUSE**

La buse donne le diamètre avec lequel le matériau sera extrudé.

S'il est parlé en termes de peinture, il en vient à représenter le pinceau avec lequel les couches sont peintes.

Il est nécessaire de différencier les buses pour le filament de 1,75 mm et pour 3 mm.



Figure 21 : une buse

II.3.3.1.2 Type d'extrudeuse

Extrusion directe :

Une évolution des extrudeuses à engrenages sont celles de l'extrusion directe.

L'extrusion directe fait référence au moteur poussant directement le filament.

Une poulie dentée ou "Poulie Hobbed" est placée sur l'arbre du moteur. Cette poulie pousse le filament avec les dents.

Pour s'assurer que le filament ne glisse pas, un roulement est utilisé du côté opposé pour appliquer la pression.

Principal avantage de ce type d'extrudeuse est qu'elle occupe moins d'espace. Il est principalement utilisé dans les filaments de 1,75 mm car ceux-ci nécessitent moins de force pour être poussés.



Figure 22: une extrudeuse directe

II.3.3.2 Structure

En impression 3D, la structure est la partie chargée d'assembler toutes les parties de l'imprimante et de permettre les mouvements des axes.

Différentes structures permettent des mouvements différents, mais il est très important d'avoir une structure robuste. Une structure faible transmet les vibrations et force l'impression à des vitesses lentes.

Une imprimante 3D est un système mobile qui répond à certaines caractéristiques. L'extrudeuse est toujours orientée vers le bas et peut être déplacée par rapport à la surface d'impression dans les trois axes (3 dimensions).

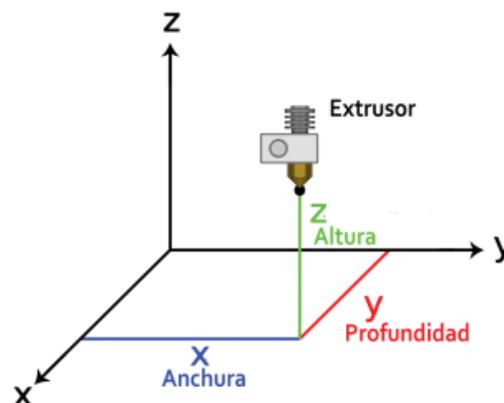


Figure 23 : les 3 axes d'impression

Pour pouvoir déplacer l'extrudeuse, cela peut se faire de plusieurs manières. Vous pouvez utiliser des mouvements linéaires, un pour chaque axe. Également des mouvements rotatifs ou la combinaison de mouvements linéaires avec rotatifs.

II.3.3.2.1 L'imprimante cartésienne

Ces imprimantes reçoivent ce nom en raison du système de coordonnées qu'elles utilisent pour le mouvement, le cartésien.

Il s'agit du type de structure le plus courant dans les imprimantes 3D de modélisation de dépôt par fusion (FDM).

Ils utilisent des mouvements linéaires pour positionner l'extrudeuse. Si vous remarquez, pour déplacer l'extrudeuse de gauche à droite ou d'avant en arrière (axe X et axe Y), utilisez des mouvements droits. Pour changer la hauteur aussi, mais au lieu de déplacer l'extrudeuse déplace la surface d'impression.

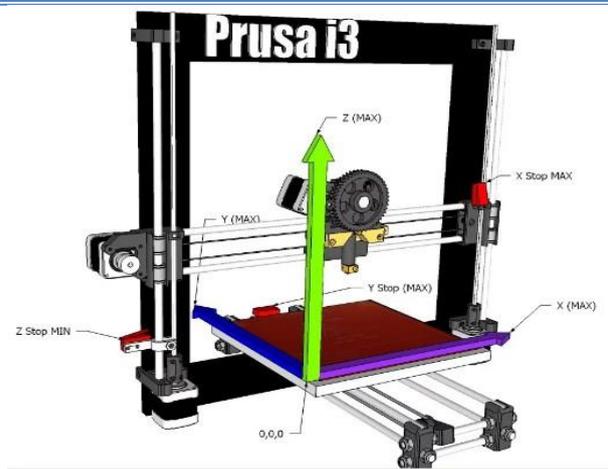


Figure 24 : imprimante 3D Prusa i3

Il existe des structures, telles que le Prusa i3, qui utilisent plus d'un moteur pour faire fonctionner un essieu afin de déplacer un essieu. Tout dépend du type d'axes et de la répartition de la structure. Il existe un système appelé Core XY et un autre système appelé cross rods.

Un avantage des imprimantes cartésiennes est qu'elles sont plus intuitives. Il est plus facile de détecter une défaillance de mouvement. Par exemple, si l'axe X échoue, vous verrez tout de suite que l'extrudeuse ne se déplace pas de gauche à droite.

Les structures sont évolutives mais il faut garder à l'esprit les relations de force. C'est-à-dire que si je fabrique une imprimante plus grosse, j'aurai besoin d'arbres et de moteurs plus gros qui permettent de faire plus de force car ils doivent déplacer plus de poids.

Un autre avantage est que vous pouvez obtenir des structures qui peuvent faire beaucoup de force dans la pointe, la plupart des CNC à trois axes utilisent ce type de structures.

II.3.3.3 Surface de l'impression

La première couche est la plus importante puisque l'objet entier va être construit dessus. Avoir une surface d'impression qui n'a pas d'adhérence peut être un gros problème.

Le plus courant est de chauffer la surface, avec un lit chaud, pour ajouter de l'adhérence.

De nombreux matériaux ont besoin d'un lit chaud pour pouvoir coller à la surface. La première condition qu'une surface d'impression 3D doit remplir est qu'elle doit être la plus plane possible. Si la surface n'est pas plate, il y aura des zones où l'extrudeuse touche la surface et d'autres zones où l'extrudeuse est très haute.

- **Lit chauffant**

Au début, des plaques d'aluminium avec des résistances fixées en dessous étaient utilisées pour chauffer la surface.

Le problème est que la chaleur n'était pas répartie uniformément. Il faisait plus chaud dans les zones de contact avec la résistance.

Plus tard, ils ont été remplacés par des plaques de circuits imprimés (circuits imprimés) avec des pistes très minces.

C'est-à-dire que l'on utilise des «câbles» très fins qui, lors du passage de l'électricité, sont chauffés (comme une ampoule). Ce sont des assiettes de 20 × 20 cm environ.



Figure 25 : Lit chauffant

II.3.3.4 L'électronique

L'électronique représente le cerveau de l'imprimante 3D. Il sera chargé de décider des mouvements et des actions à chaque instant.

Chaque fois qu'un circuit électronique qui doit interagir avec l'environnement est utilisé, il faudra des capteurs et des actionneurs.

- Un capteur est un appareil permettant de trouver des quantités physiques ou chimiques et de les transférer dans la propriété électrique.
- Un actionneur est le contraire, des signaux électriques génèrent des grandeurs physiques ou chimiques. Par exemple, un moteur électrique qui transforme l'électricité en mouvement.

Vous savez déjà qu'il y a des pièces qui sont chauffées, donc des résistances et des capteurs de température (thermistance) sont utilisés. De plus, c'est un système qui bouge, il a donc besoin de moteurs. Voilà, l'imprimante n'a besoin de rien d'autre. Pièces électroniques d'imprimante 3D de modélisation de dépôt fondu

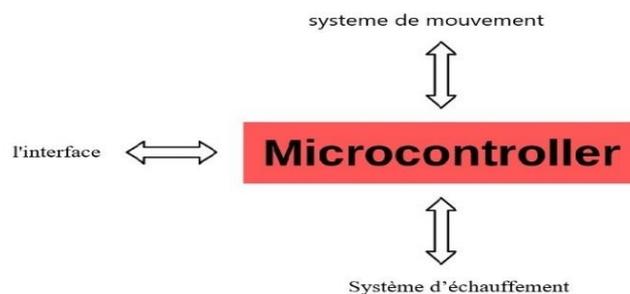


Figure 26 : système de commande

- **Microcontrôleur** : C'est un circuit intégré programmable, capable d'exécuter les commandes enregistrées dans sa mémoire. C'est le cerveau de l'imprimante.
- **Système de chauffage** : Les imprimantes ont une résistance comme actionneurs pour chauffer l'extrudeuse et un lit chauffé. Des capteurs de température sont utilisés pour déterminer la température de ces composants.
- **Système de mouvement** : Comme les moteurs sont les moteurs. Le minimum sera un pour chaque axe et un autre moteur pour l'extrudeuse. La partie mouvement utilise des capteurs pour savoir dans quelle position elle se trouve. Les plus utilisées sont la fin de carrière.
- **Interface** : C'est la partie de l'électronique qui permet à l'utilisateur d'échanger des informations avec l'imprimante. Le plus courant est un écran LCD, mais il peut aussi se faire via un ordinateur utilisant un câble USB, WIFI ou Bluetooth.
- **Alimentation** : Il est généralement utilisé comme source 12V DC avec 20A. Bien que la puissance de la source dépendra de l'imprimante (si elle dispose d'un lit chauffant ou non, du nombre d'extrudeuses).

II.3.4 Les matériaux d'imprimante 3D en FDM

Pour les imprimantes 3D FDM, une large gamme de matériaux est disponible sur le marché. Il peut également être disponible dans une gamme de catégories ci-dessous:

- Thermoplastiques hautes performances
- Matériaux d'ingénierie
- Thermoplastiques de base

La sortie des pièces imprimées en 3D dépend des propriétés mécaniques du matériau et de sa précision. Les matériaux les plus courants sont répertoriés dans le tableau ci-dessous.

Matériaux	Caractéristique
ABS	+ Bonne résistance + Bonne résistance à la température - Plus sensible au gauchissement
PLA	+ Excellente qualité visuelle + Facile à imprimer avec - Faible résistance aux chocs
Nylon	+ Haute résistance + Excellente résistance à l'usure et aux produits chimiques - Faible résistance à l'humidité
PETG	+ Sécurité alimentaire + Bonne résistance + Facile à imprimer
TPU	+ Très flexible - Difficile d'imprimer avec précision
PEI	+ Excellente résistance au poids + Excellente résistance au feu et aux produits chimiques - Coût élevé

Tableau 4: tableau comparative aux caractéristiques des matériaux d'impression en 3D

II.3.5 Avantage et désavantage de la FDM

Les principaux avantages et inconvénients de la technologie d'imprimante 3D de modélisation de dépôt par fusion (FDM) sont énumérés ci-dessous

- + Ce type de technologie d'impression 3D est rentable pour produire des pièces et des modèles thermoplastiques.
 - + La technologie FDM est un processus d'impression très rapide. Ainsi, le délai de livraison sera réduit pour effectuer la livraison le lendemain
 - + En raison de la disponibilité d'une large gamme de matériaux, il peut être utilisé dans de nombreux domaines
 - Cette technologie a une faible précision dimensionnelle par rapport à d'autres technologies. Il ne convient donc pas aux pièces complexes.
 - La sortie des pièces a une ligne de calque visible à nos yeux. Un post-traitement est donc nécessaire pour supprimer ces lignes de calque
 - La mécanique de fixation des couches rend les pièces FDM intrinsèquement anisotropes.
- Les caractéristiques de l'imprimante 3D à modélisation par dépôt fondu sont répertoriées dans le tableau ci-dessous.

	Dépôt de filament fondu (FDM)
Matériaux	Thermoplastiques (PLA, ABS, PETG, PC, PEI, etc.)
Précision dimensionnelle	$\pm 0,5\%$ (limite inférieure $\pm 0,5$ mm) - bureau $\pm 0,15\%$ (limite inférieure $\pm 0,2$ mm) - industriel
Taille de construction typique	200 x 200 x 200 mm - bureau 1000 x 1000 x 1000 mm - industriel
Hauteur de couche commune	50 à 400 microns
Support	Pas toujours requis (dissoluble disponible)

Tableau 5 : propriétés de la FDM

II.3.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a identifié le principe de fonctionnement de notre imprimante 3D sous la technologie du dépôt de filament fondu.

Ensuite on a étudié les différentes parties importantes d'une fabrication celle de notre projet et on a cité les différents matériaux utilisables pour la FDM et on a fini par les avantages et les désavantages de cette dernière

Cette étude nous a permis à choisir les différents composants qu'on a besoin dans notre projet pour assurer un bon fonctionnement.

Chapitre III : Conception de la partie mécanique

III.1 Introduction

Après avoir compris le fonctionnement systématique de notre technique, on doit élaborer la partie mécanique qui construira notre imprimante.

Ainsi, nous allons réaliser la conception générale des différentes parties mécaniques pour permettre la transmission, la transformation des mouvements et pour les guidages.

III.2 Conception mécanique

Pour notre projet nous avons réalisé la conception mécanique des différents organes à l'aide du logiciel de CAO SolidWorks.

Les composants essentiels de notre système sont le châssis, l'axe X, l'axe Y, l'axe Z et la tête d'extrusion.

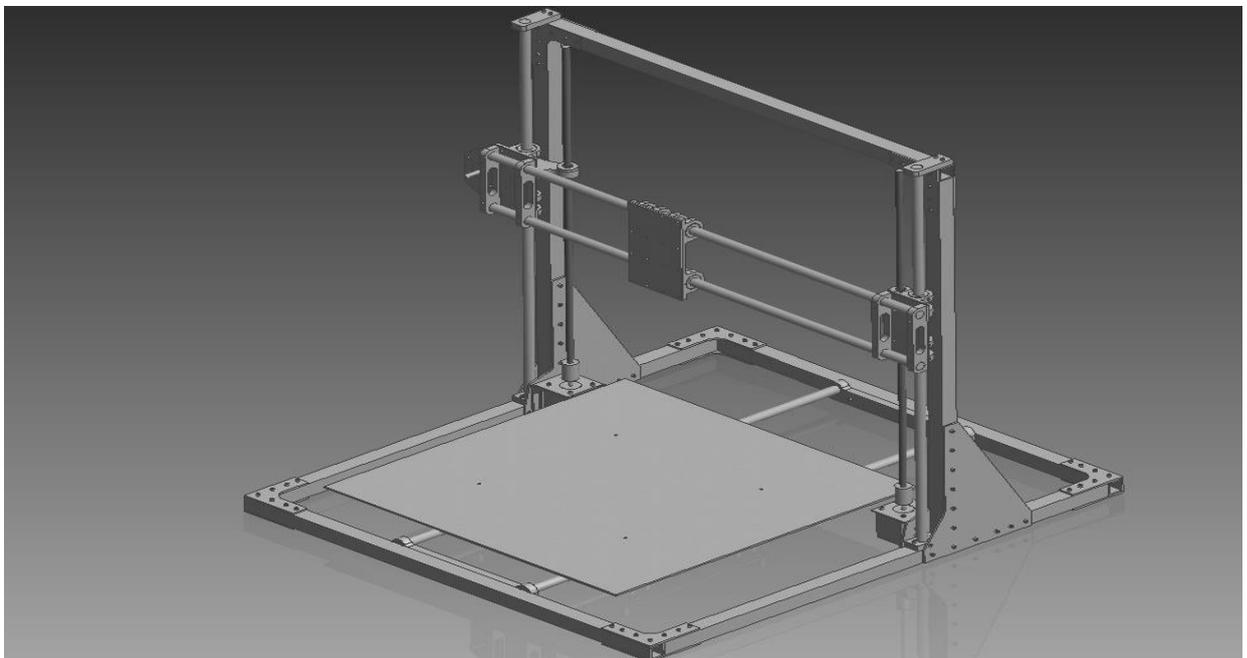


Figure 27 : conception du châssis avec SOLIDWORKS

III.2.1 Les axes X, Y et Z

Pour avoir un mouvement libre, sans frottement et sans vibrations, nous devons sur les trois axes, utiliser différents composants : roulements, guides linéaires et des rails.

III.2.2 L'axe X

L'axe X assure le mouvement de la buse d'extrusion sur le plan horizontal



Figure 28 : L'axe X

III.2.2.1 Transmission de mouvement

Pour produire un mouvement de rotation, nous optons pour les moteurs pas à pas. La Transmission de mouvement se faisait principalement par intermédiaire.

Dans le cas de notre système, nous nous orientons vers le système poulie-courroie, pour cela on fixe une tête dentée de diamètre 10 mm sur l'arbre du moteur.

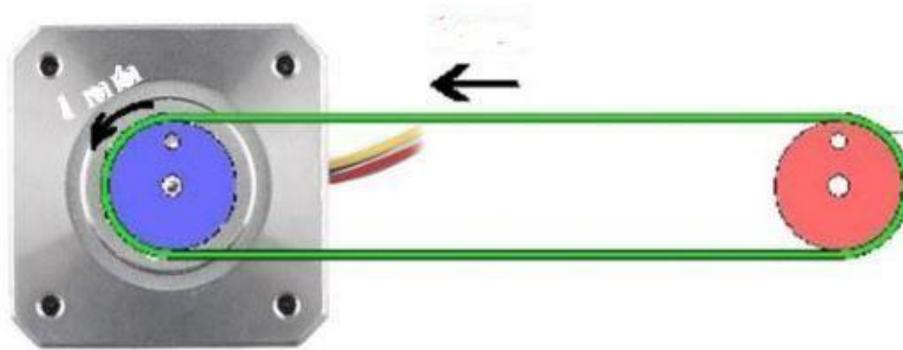


Figure29: Système poulie-courroie

III.2.2.2 Transformation de mouvement

L'axe X doit ses déplacements au moteur pas à pas qui donne un mouvement de rotation à l'arbre de sortie, et il le transmet à la tête dentée. Notre but ici est de transformer cette rotation en un mouvement de translation. Il faut donc un système qui transforme celui-ci en mouvement de translation, pour cela nous avons utilisé une courroie.

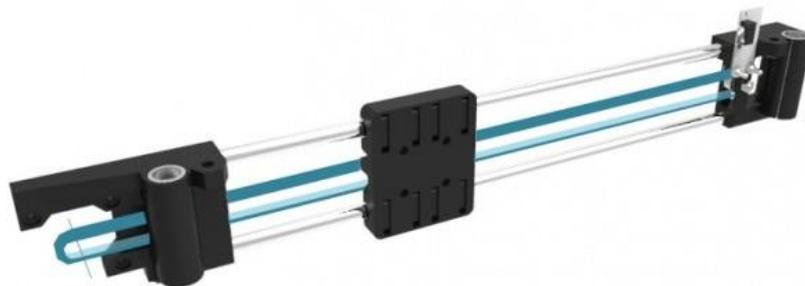


Figure 30 : Courroie fixée sur l'axe X

III.2.2.3 Le guidage

L'axe X est l'axe contenant la tête d'extrusion, nous avons donc conçu un support pour l'extruder qui recevra la courroie pour pouvoir se translater.

La pièce support est conçue pour accueillir des roulements linéaires. Elles suppriment les frottements générés par la translation sur les tiges lisses.

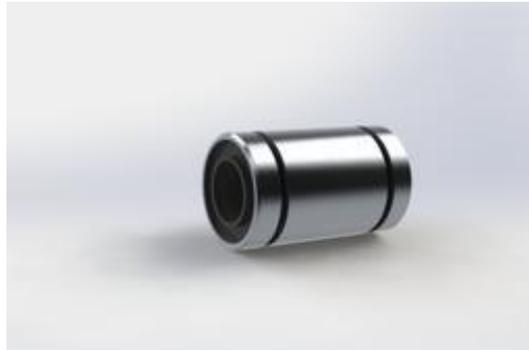


Figure 31 : Roulement linéaire

III.2.3 L'axe Y

L'axe Y assure le mouvement du plateau d'impression sur le plan horizontal.

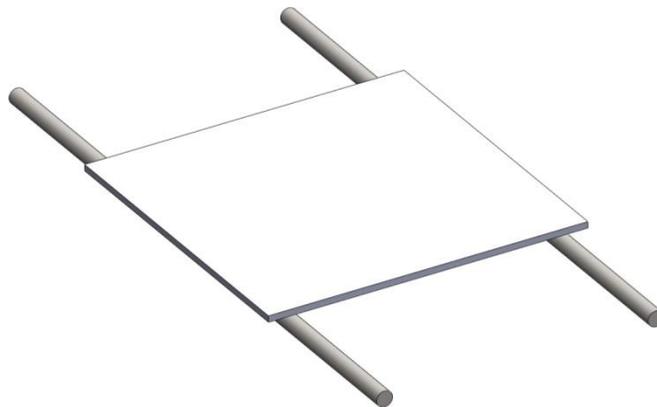


Figure 32 : L'axe Y

III.2.3.1 Transmission de mouvement

Pour l'axe Y on a utilisé le même système que l'axe X, système poulie-courroie alors même l'intermédiaire de transmission est le même, une tête dentée de 8 mm sur l'arabe du moteur.

III.2.3.2 Transformation de mouvement

Pour la transformation du mouvement dans l'axe Y, on a aussi utilisé le même système que l'axe X : système de courroie.

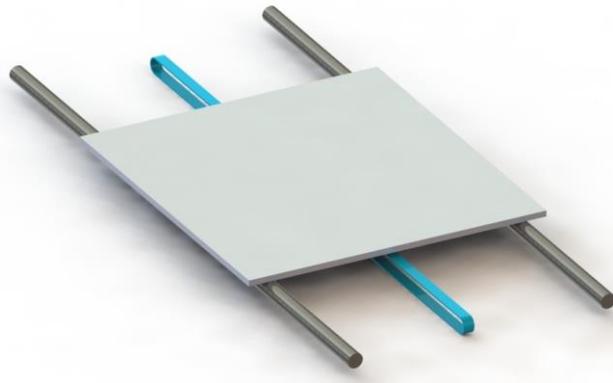


Figure 33 : Courroie fixé sur l'axe Y

III.2.3.3 Le guidage

L'axe Y contient le plateau d'impression. Ainsi, pour supprimer les frottements générés par la translation sur les tiges on a utilisé des guides linéaires fixés au-dessous du plateau.

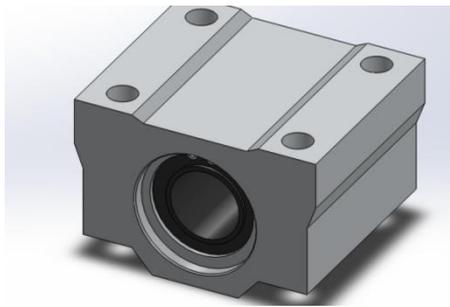


Figure 34 : Guide linéaire

III.2.4 L'axe Z

L'axe Z assure le mouvement de la buse d'extrusion sur le plan vertical.

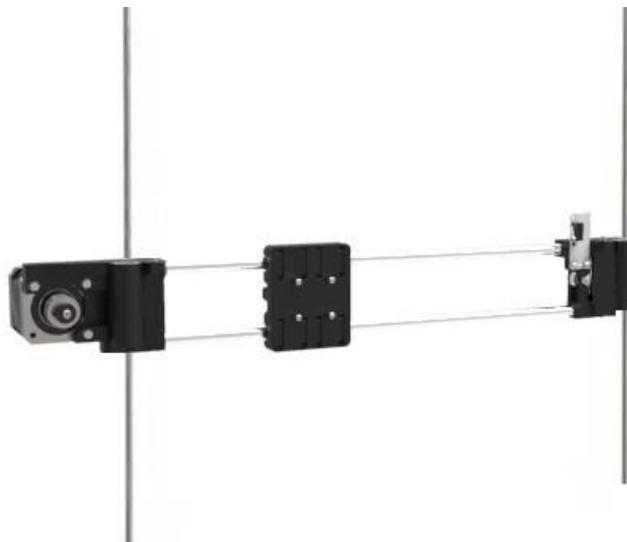


Figure 35 : L'axe Z

III.2.4.1 Transmission de mouvement

Pour le mouvement de l'axe Z, nous avons aussi utilisé des moteurs pas à pas. La transmission de mouvement se faisait par intermédiaire.

Dans ce cas-là, nous nous sommes orientés vers le système vis-écrou. Le principe de réalisation est basé sur la fixation d'un coupleur flexible sur l'arbre du moteur.



Figure 36 : coupleur flexible

III.2.4.2 La transformation de mouvement

Le moteur pas à pas qui se charge du mouvement de l'axe Z donne un mouvement de rotation de l'arbre de sortie, et il le transmet au coupleur flexible. Pour transformer ce mouvement de rotation en mouvement de transmission, on a utilisé des tiges filetées de diamètre de 6 mm et la distance entre deux dents de cette dernière est 0,5 mm.

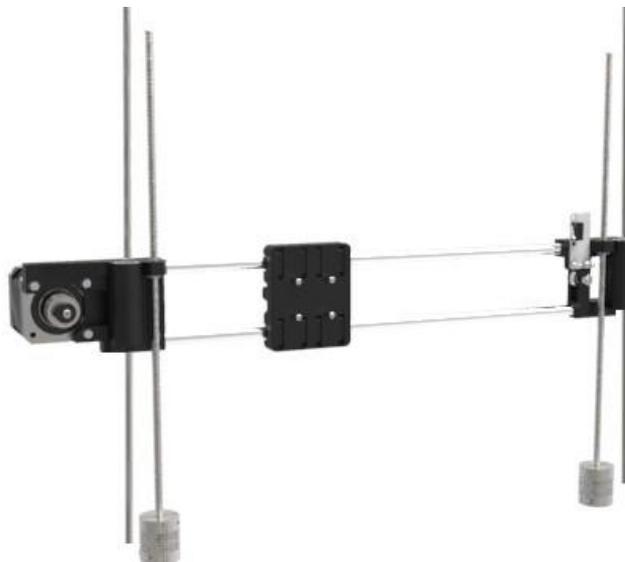


Figure 37 : Deux tiges filetées fixées sur l'axe Z

III.2.4.3 Le guidage

On a 2 pièces de guidage sur l'axe Z. Les deux viennent accueillir les tiges lisses de l'axe X qui permet la translation de la tête d'extrusion.

Les deux sont taraudés pour créer la liaison vis/écrou. Un trou de passage de douille billes est prévu pour supprimer les frottements entre la pièce 1 est la tige lisse.



Figure 38 : Les roulements linéaires fixés sur les 2 pièces de l'axe Z

III.2.5 La tête d'extrusion

L'extrudeur est le mécanisme le plus important de l'imprimante, la buse qui se déplace en micromillimètre, demande une grande précision quand elle se déplace durant l'impression, c'est pour cela qu'il ne faut aucun frottement, aucune vibration durant l'impression, la partie mécanique de la machine est la plus essentielle pour offrir cette précision sur les axes de déplacement.

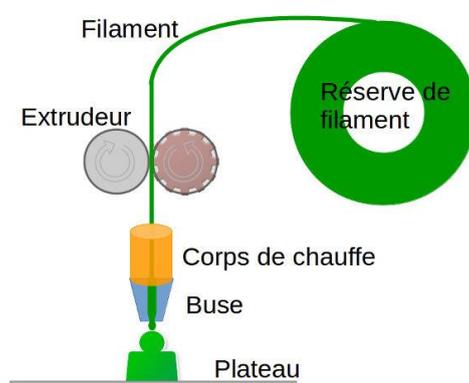


Figure 39 : Structure d'une buse d'extrusion

Pour déplacer le fil de filament la tête d'extrusion nous avons utilisé un système de poulie, son diamètre est 10 mm.

Dans notre système on a utilisé une tête d'extrusion MK-08.



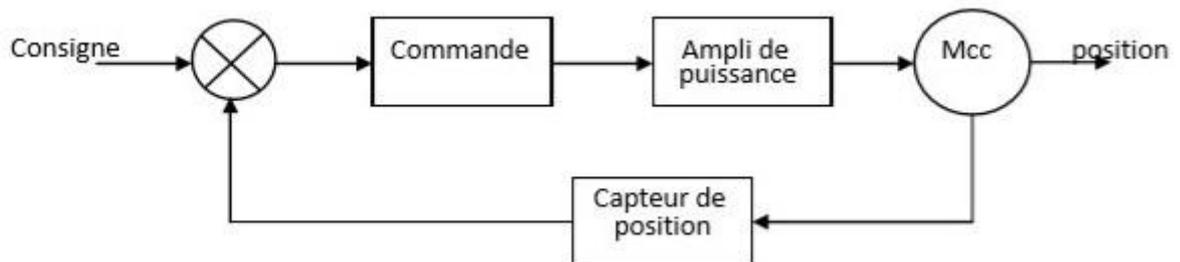
Figure 40 : Tête d'extrusion MK-08 0.4 mm

III.2.6 Les moteurs pas à pas

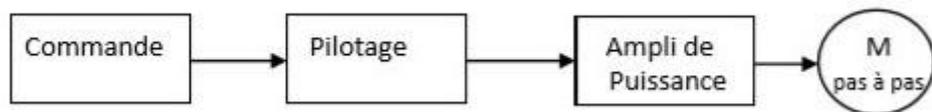
III.2.6.1 Introduction

Un moteur pas à pas un moteur qui transforme des impulsions de commande en une rotation de "n" pas du rotor : il permet donc un positionnement précis sans boucle d'asservissement (via potentiomètre, codeur ...).[9]

- Principe de commande en position d'un moteur à courant continu



- Principe de commande d'un moteur pas à pas



On constate que le système est beaucoup plus simple. En effet, à chaque impulsion du signal de commande correspond au niveau du rotor un déplacement angulaire bien défini appelé « pas ». Un moteur pas à pas est caractérisé par sa résolution ou encore son nombre de pas par tour. Il peut avoir une valeur comprise entre $0,9^\circ$ et 90° . Les valeurs les plus couramment rencontrées sont :

- $0,9^\circ$: soit 400 pas par tour
- $1,8^\circ$: soit 200 pas par tour
- $3,6^\circ$: soit 100 pas par tour
- $7,5^\circ$: soit 48 pas par tour
- 15° : soit 24 pas par tour

La vitesse de rotation est fonction de la fréquence des impulsions. On distingue 3 groupes de moteur pas à pas :

- ✓ Les moteurs à aimant permanent
- ✓ Les moteurs à reluctance variable
- ✓ Les moteurs hybrides

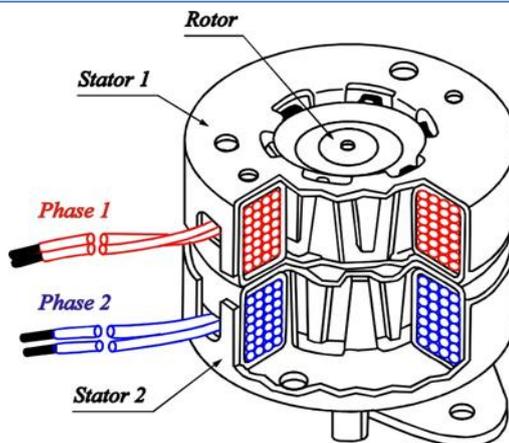


Figure 41 : structure du moteur pas à pas

III.2.6.2 Moteur à aimant permanent

Un moteur à aimant permanent comprend :

- Un rotor bipolaire constitué d'un aimant permanent (partie mobile)
- Un stator à deux paires de pôles (partie fixe)

Les bobines diamétralement opposées constituent les phases. Elles sont connectées de façon à créer un pôle Sud et un pôle Nord.

En inversant les sens des courants dans une phase, on permute les pôles engendrés par une bobine. Le rotor se déplace alors et prend une nouvelle position d'équilibre stable. Selon la conception des enroulements, on distingue deux grands types de moteurs pas à pas :

Le moteur bipolaire

Les enroulements du stator n'ont pas de point milieu. Chaque borne de chaque enroulement est alimentée par une polarité positive puis négative (d'où le terme bipolaire).

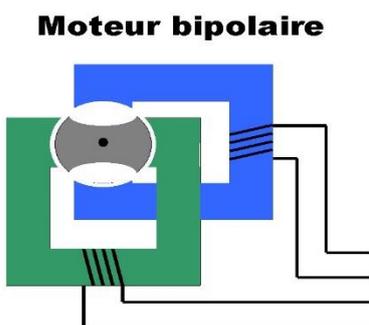


Figure 42 : représentation d'un schéma du moteur bipolaire

Le moteur unipolaire

Les enroulements sont à point milieu. Les bornes sont toujours alimentées par une polarité de même signe (d'où le terme unipolaire).

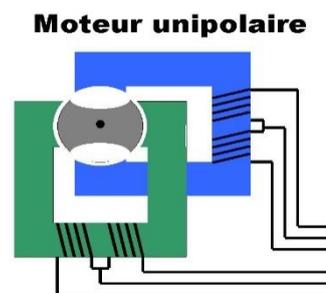


schéma du moteur unipolaire

▪ **Caractéristique :**

- ✓ Nombre de pas par tour plus faible, dû à la difficulté de loger les aimants du rotor.
- ✓ Construction plus élaborée.
- ✓ Couple moteur élevé, dû à la puissance des pôles aimantés (Couple proportionnel au courant).
- ✓ Sens de rotation lié à l'ordre d'alimentation des bobines et au sens du courant dans les bobines.

III.2.6.3 Moteur pas à pas rotatif à reluctance variable

Ce moteur comporte une denture dont le pas n'est pas le même au stator et au rotor ; le rotor n'est pas aimanté.

Exemple : Stator 8 pôles et rotor 6 pôles

Pas statorique : $\alpha_s = 360^\circ/8 = 45^\circ$

Pas rotorique : $\alpha_r = 360^\circ/6 = 60^\circ$

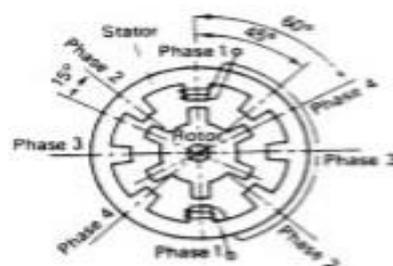


Figure 44 : Structure d'un moteur à reluctance variable rotatif à double saillance

Quand on alimente les bobines AA', puis BB' et enfin CC', le rotor se place de telle façon que le flux qui le traverse soit maximal ; la réluctance est donc minimale.

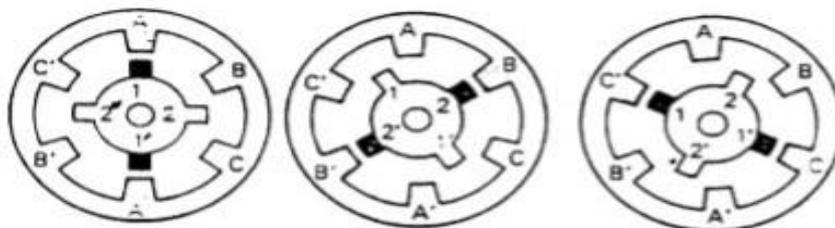


Figure 45 : fonctionnement du moteur pas à pas à reluctance variable

Pour rendre la réluctance variable, le rotor et le stator auront des encoches disposées de telle façon qu'il n'existe qu'une seule possibilité pour diminuer la réluctance compte-tenu de la bobine alimentée.

Le nombre de pas par tour est donné par la relation : $N_p = 360 / (\alpha_r - \alpha_s)$

- α_r : Pas dentaire rotorique (en degrés)

- α_s : Pas dentaire statorique (en degrés)

- **Caractéristique :**
 - ✓ Nombre de pas par tour important (bonne résolution) ;
 - ✓ Construction assez facile ;
 - ✓ Couple moteur (proportionnel au carré du courant dans les bobines) assez faible
 - ✓ Sens de rotation lié à l'ordre d'alimentation des bobines.

Ce moteur présente une simplicité de construction mais du fait de son faible couple moteur, il est le plus souvent remplacé par des moteurs pas à pas à aimant permanent ou hybrides.

III.2.6.4 Moteur pas à pas hybride

Il existe des dispositions très variables selon les constructeurs et le nombre de pas par tour (résolution).

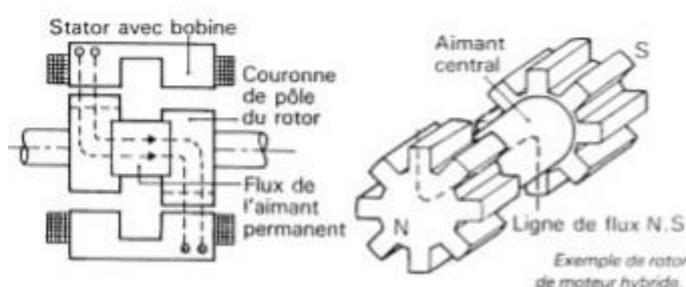


Figure 46 : structure d'un moteur pas à pas hybride

Son fonctionnement est sensiblement identique à celui du moteur à aimant permanent. Les figures suivantes montrent les positions successives du rotor après l'alimentation des bobines du stator.

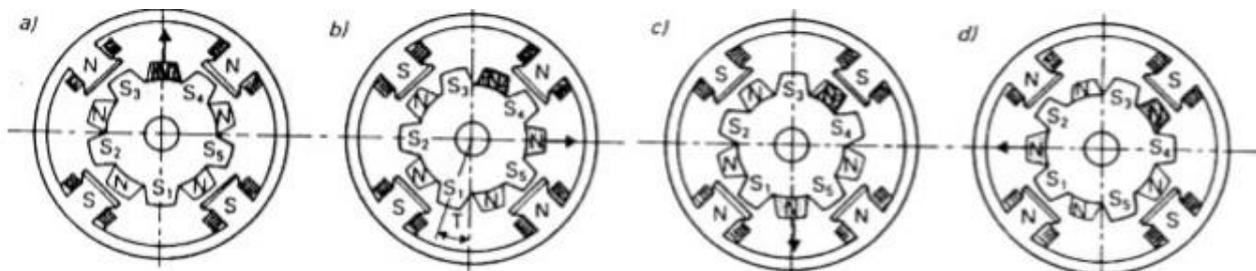


Figure 47 : fonctionnement du moteur pas à pas hybride

- **Caractéristique :**
 - ✓ Très bonne résolution.
 - ✓ Couple moteur élevé dû à l'aimantation du rotor (proportionnel au courant).
 - ✓ Sens de rotation lié à l'ordre d'alimentation des bobines et au sens du courant

III.2.7 Moteur NEMA 17

Pour cette partie, nous avons utilisé 5 moteurs pas à pas identiques : un pour chaque un des axes X, Y et E. Pour l'axe Z on a utilisé 2 moteurs.

Les moteurs qu'on a utilisés sont du modèle Nema 17. Notre choix sur ce type de moteur est essentiellement dû à leur précision élevée : pas de $1,8^\circ$.

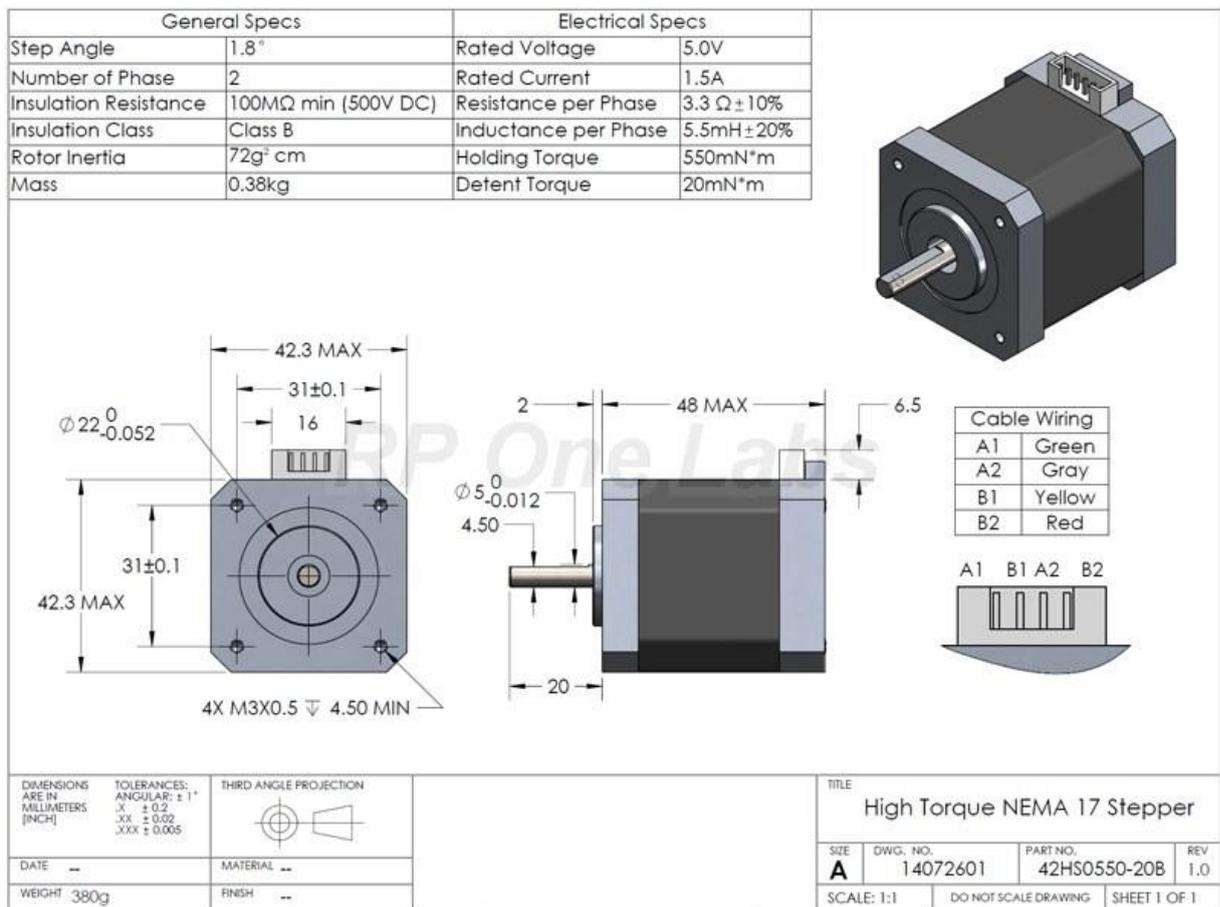


Figure 48 : Architecture du moteur pas a pas Nema 17 [10]

III.2.7.1 Caractéristique des Moteurs type NEMA 17 standard :

- 200 pas par tour (1.8 deg/pas)
- 2 phases (bipolaires)
- Cordon de 4 fils
- Voltage 2 V DC
- Courant 1.2 A
- Résistance de la phase : 1.7 Ohm ± 10% (20° C)
- Inductance de la phase : 4.5 mH ± 20% (1kHz 1 V rms)
- Couple de maintien : 0.4 N.m Min.
- Diamètre de l'axe : 5 mm / 0.188" (3/16")
- Longueur de l'axe : 22 mm
- Hauteur du corps du moteur : 40 mm

III.3 Dimensionnement des pièces mécaniques

Après avoir finalisé la conception et l'étude des différents organes qui composent notre imprimante, nous allons présenter dans cette section le dimensionnement des différentes parties mécaniques, notamment le calcul des distances de déplacement linéaire.

On a trouvé ces relations selon les 4 axes.

III.3.1 Les axes X et Y

Les axes X et Y utilisent les mêmes principes de transmission et transformation de mouvement système poulie-courroie.

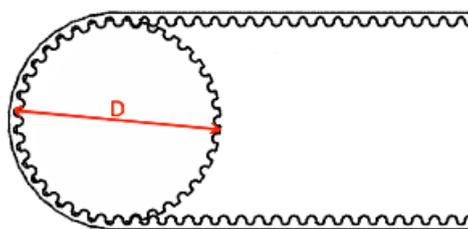


Figure 49 : Système poulie-courroie

Les paramètres pris pour le dimensionnement du système poulie-courroie :

a. Nombre des pas par tour Pt est donné par:

$$Pt = 360^\circ / Ap$$

Avec :

Ap : L'angle du pas

Pour un choix de : $Ap = 1,8^\circ$, on aura : $Pt = 200$.

b. Les distances de translations : Dx : Distance de translation selon X et Dy : Distance de translation selon Y.

$$Dx = Dy = \frac{p * ps}{pt} \text{ et } P = D * \pi$$

Avec :

P : Périmètre de la poulie.

Ps : Nombre des pas désiré.

D : Diamètre de la poulie.

Pour un choix de : $D = 10\text{mm}$ et $P = 31,4\text{ mm}$, nous pouvons avoir :

$$Dx = Dy = 0,157 * Ps$$

III.3.2 L'axe Z

L'axe Z utilise le système vis-écrou.

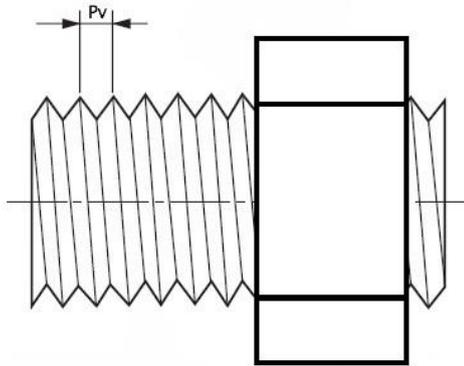


Figure 50 : système vis-écrou

Les paramètres pris pour le dimensionnement du système vis-écrou :

La distance de translation selon Z Dz est donnée par :

$$Dz = \frac{Ap * pv * ps}{360}$$

Avec :

Ap : L'angle du pas.

Ps : Nombre des pas désiré.

Pv : Distance entre 2 dents d'un vis.

Pour un choix de : $Ap = 1,8^\circ$ et $Pv = 0.5$ mm

$$Dz = Ps * 0,0025 \text{ mm}$$

III.3.3 La tête d'extrusion

La tête d'extrusion pousse le fil de filament avec une poulie fixé sur l'arbre du moteur.

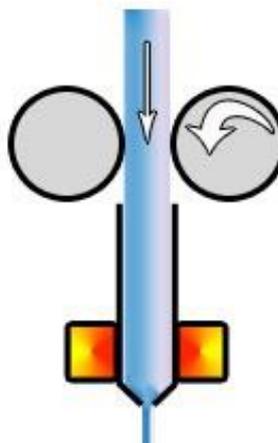


Figure 51 : Système de poussée par poulie

Les paramètres pris pour le dimensionnement du système de la buse d'extrusion :

a. Nombre des pas par tour Pt est donné par:

$$Pt = 360^\circ / Ap$$

Avec :

Ap : L'angle du pas

Pour un choix de : $Ap = 1,8^\circ$, on aura : $Pt = 200$.

b. Distance du filament poussé avant la tête d'extrusion De est donné par:

$$De = \frac{P * Ps}{Pt}$$

Avec :

P : Périmètre de la poulie.

Ps : Nombre des pas désiré.

c. Volume du filament poussé avant la tête d'extrusion Ve est donné par:

$$Ve = De * \pi * rf^2$$

Avec :

rf : Rayon du filament

d. Volume du filament poussé après la tête d'extrusion Vf est donné par:

$$Vf = Df * \pi * rb^2$$

Avec :

rb : Rayon de la buse

Df : Distance du filament poussé de la tête d'extrusion

e. Distance du filament poussé de la tête d'extrusion

Les volumes du filament poussé avant et après la buse d'extrusion sont égaux $Ve = Vf$ alors :

$$De * \pi * rf^2 = Df * \pi * rb^2$$

$$Df = \frac{De * \pi * rf^2}{\pi * rb^2}$$

Pour un choix de : $D = 10mm$, $P = 31,4 mm$, $rb = 0,4mm$ nous pouvons avoir :

$$Df = Ps * rf^2 * 0,98125mm$$

$$Vf = Ps * rf^2 * 0,49298mm^3$$

III.3.3.1 Dans le cas du filament de 1,75 mm

On a $rf = 0,875 mm$ alors :

$$Df = Ps * 3,005078125 mm$$

$$Vf = Ps * 1,50975125mm^3$$

III.3.3.2 Dans le cas du filament de 3mm

On a $r_f = 1,5 \text{ mm}$ alors :

$$D_f = P_s * 8,83125 \text{ mm}$$

$$V_f = P_s * 4,43682 \text{ mm}^3$$

III.3.4 Matériels utilisés

Matériaux du châssis :

- Profilés en aluminium 20x20x2 mm
- Feuille d'aluminium 3 mm
- Arbres de rail linéaire 12 mm
- Roulements d'arbre linéaire 12 mm
- Beaucoup de vis, d'écrous et de rondelles
- Supports de moteur pas à pas

Composants mécaniques :

- Moteurs pas à pas Nema 17
- Courroies de distribution GT2 6mm
- Poulies synchrones GT2
- Tiges à vis

Électronique :

- Arduino Mega 2560
- Rampes 1.4
- Stepstick A4988
- LCD 12864
- Source de courant
- Lit chauffant
- Bloc chauffant
- Butées
- Thermistances
- Beaucoup de fils

III.3.5 Le dessin industriel

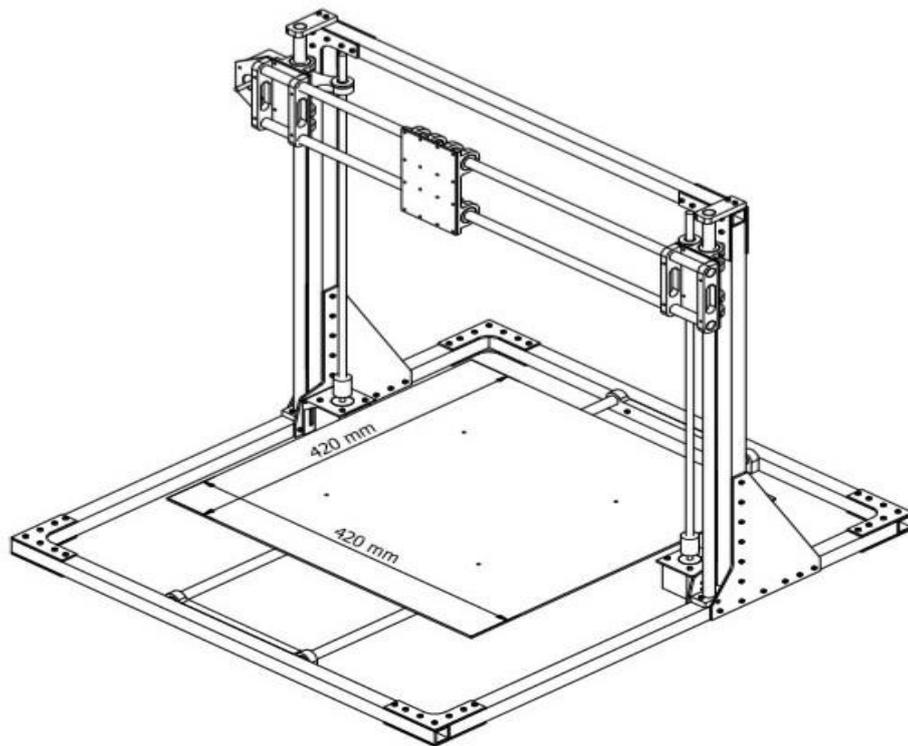


Figure 52: La conception (vue globale)[11]

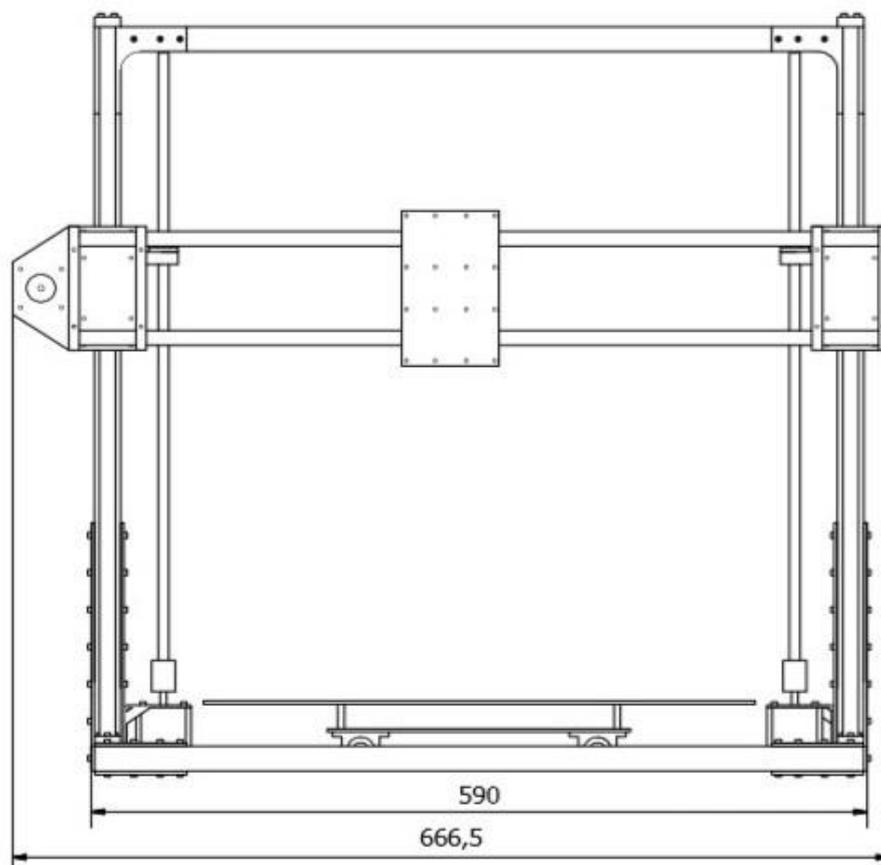


Figure 53: La conception (vue en largeur) [11]

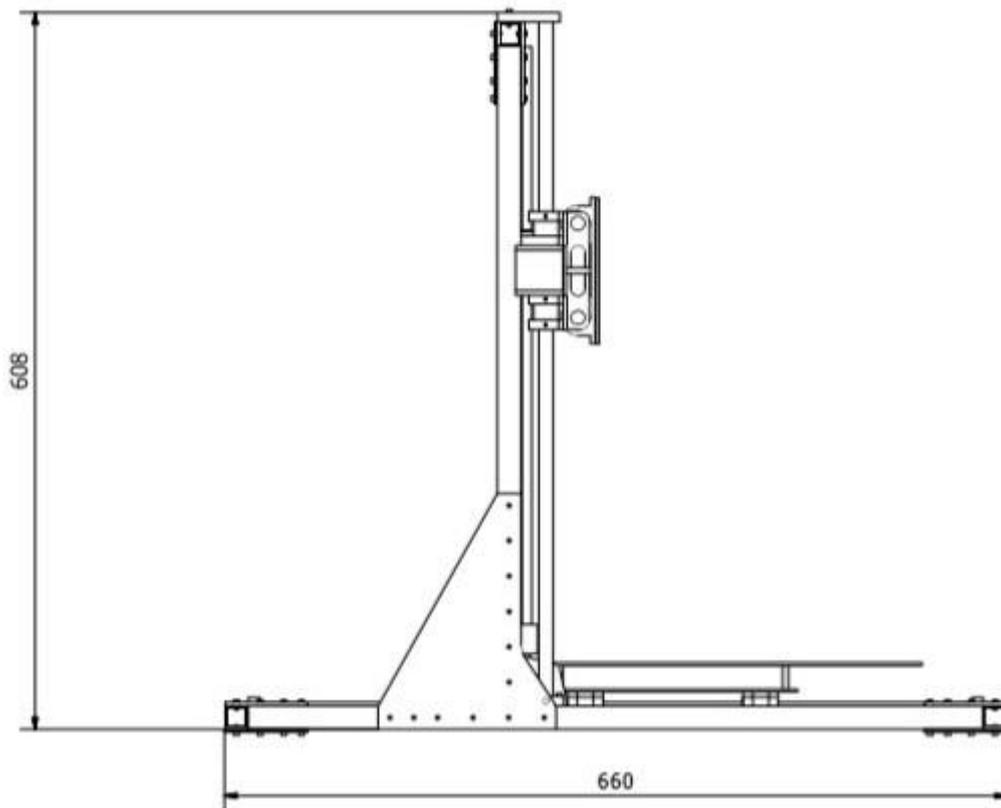


Figure 54: la conception (vue en épaisseur)[11]

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la conception mécanique des différents organes qui composent notre imprimante 3D.

Pour cette fin, nous avons établi les relations entre le pas du moteur et la distance de traction, selon les trois axes X, Y et Z, et la relation entre le pas de ce dernier et la longueur et le volume du filament poussé pour la tête d'extrusion

Chapitre IV : Conception de la partie commande

IV.1 Introduction

Ce chapitre sera focalisé sur la conception de la partie commande de notre imprimante 3D.

Nous allons décrire toutes les parties qui composent notre système : la carte de commande, les interfaces entrée/sortie, l'alimentation, etc.

IV.2 La carte de commande

L'objectif du circuit de commande est d'assurer le contrôle des différents organes de l'imprimante 3D. Le schéma synoptique suivant présente notre branchement sur la carte de commande ramps 1.4

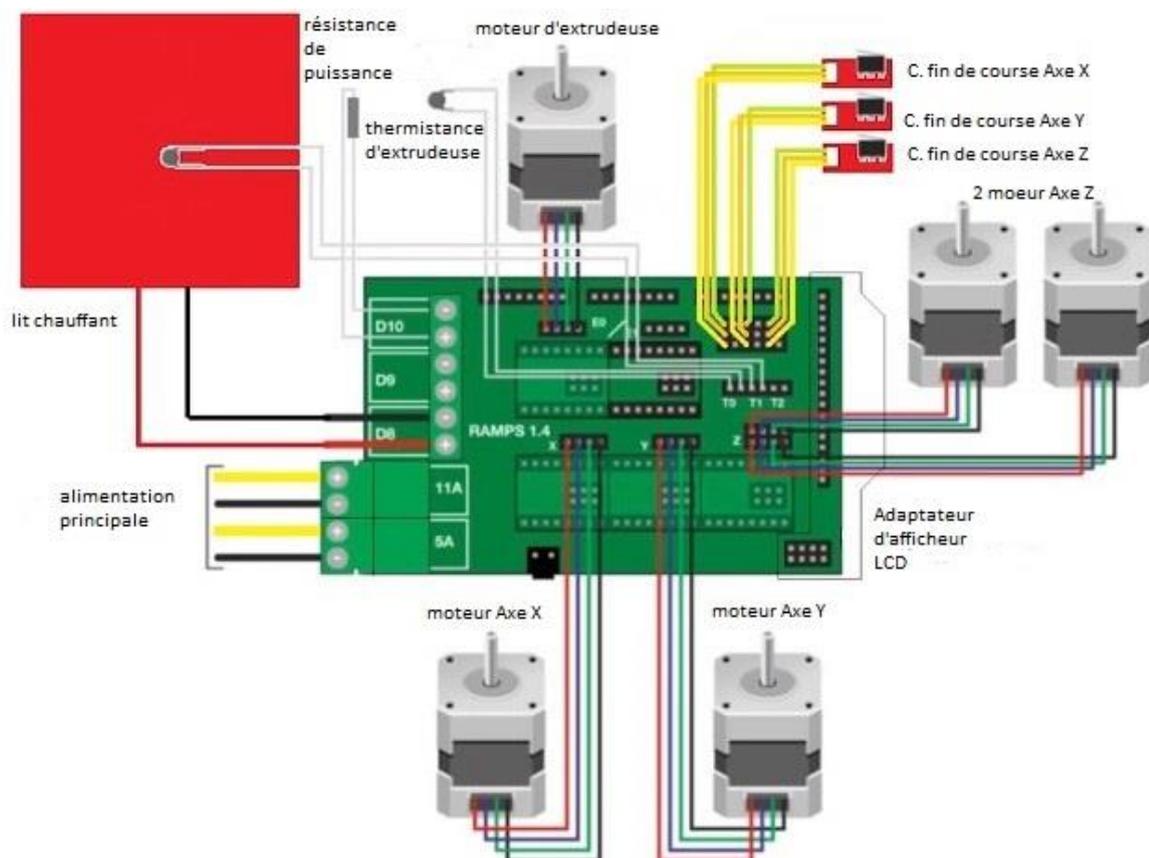


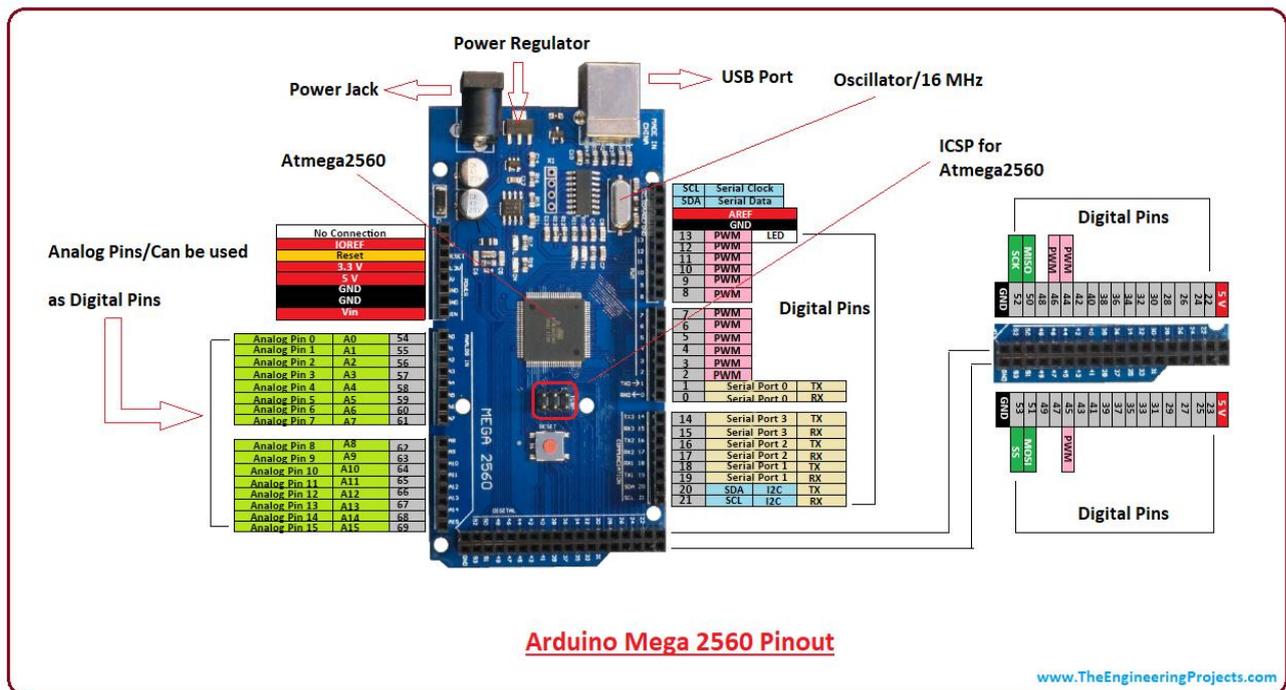
Figure 55 : Schéma synoptique de la carte de commande ramps1.4

IV.2.1 Le bloc de contrôle

Le bloc de contrôle a le rôle de commander les différents composants électroniques de la carte de commande ainsi de recevoir les données des différents capteurs. La conception de notre système est basée sur la carte ARDUINO MEGA 2560 et un circuit de pilotage Ramps 1.4. Bref, le microcontrôleur (Arduino) est la partie qui pense, et pour pouvoir communiquer avec le reste des éléments, il a besoin d'adaptateurs (RAMPS).

IV.2.1.1 Présentation de l'Arduino Mega

L'Arduino Mega est une carte électronique basée sur le microcontrôleur ATmega1280. Elle dispose de 54 broches numériques d'entrée/sortie (dont 14 peuvent être utilisés comme sorties PWM), 16 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), un oscillateur cristal de 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation, et un bouton de remise à zéro. Elle contient tout le nécessaire pour soutenir le microcontrôleur. La carte Mega 2560 est compatible avec la plupart des shields conçus pour l'Uno et les anciennes cartes Duemilanove ou Diecimila [12].



Microcontrôleur	ATmega1280
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'alimentation (recommandé)	7-12V
Tension d'alimentation (limites)	6-20V
E / S numériques	54 (dont 15 fournissent la sortie PWM)
Pins d'entrée analogique	16
Courant pour les E/S	40 mA
Courant pour 3.3V	50 mA
Mémoire flash	128 KB dont 4 KB utilisé par bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Vitesse de l'horloge	16 MHz

Tableau 6 : Les caractéristiques de l'Arduino Mega

IV.2.1.3 Ramps 1.4

Le module Ramps (RepRap Arduino MegaPololuShield) est une plaque d'adaptation ou un blindage qui est placé directement sur l'Arduino. Les microcontrôleurs fonctionnent à 5 volts, la même « électricité » qui passe par une clé USB. Afin de déplacer les moteurs et de pouvoir chauffer, car cela nécessite plus « d'électricité », les signaux d'entrée et de sortie doivent être adaptés. La RAMPS a cette fonction, adapter les signaux qui entrent et sortent de l'Arduino aux capteurs et actionneurs, Il existe de nombreuses alternatives et des plaques déjà préconçues à utiliser dans l'impression 3D. Ils sont une combinaison d'Arduino et de RAMPS tout en un. Beaucoup de ces plaques sont Open Source, et vous pouvez même télécharger les designs et apporter les modifications souhaitées. [13]

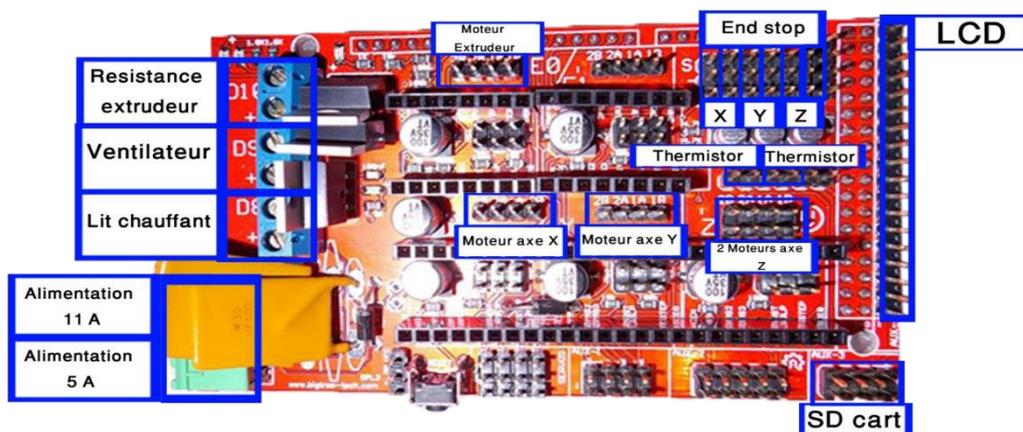


Figure 57: Branchement carte Ramps : Différents connecteurs du shield

IV.2.1.4 Implémentation de la Ramps sur L'Arduino

La figure en dessous montre le shield RAMPS 1.4 monté sur la carte Arduino Mega, On y voit également les 4 drivers pololus destinés à piloter les 5 moteurs nécessaires au fonctionnement de l'imprimante.

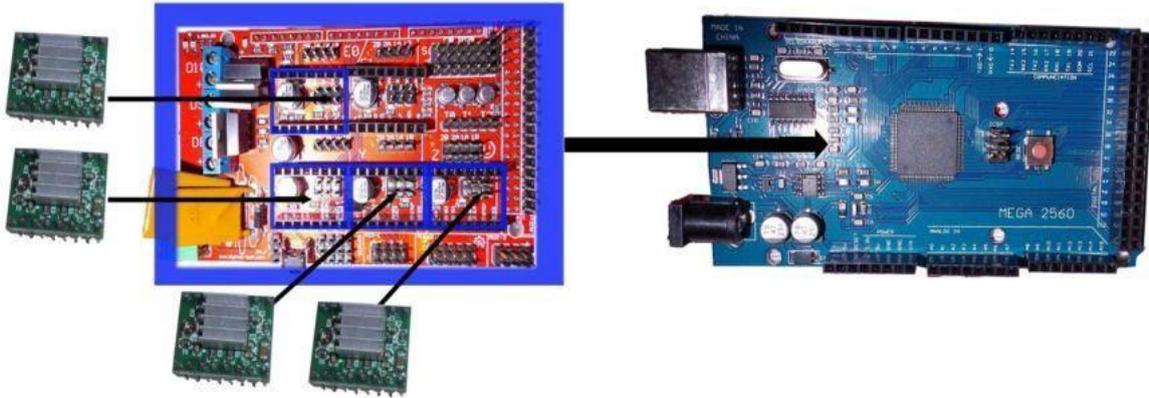


Figure 58: Montage Arduino+Ramp+A4988

IV.2.2 Le bloc de commande des moteurs pas à pas

Le bloc de commande des moteurs pas à pas se compose de quatre circuits :

Trois circuits A4988 connectés respectivement aux trois moteurs pas à pas des axes X, Y et E. Un circuit additionnel connecté parallèlement aux deux moteurs pas à pas de l'axe Z.

IV.2.2.1 Le circuit A4988

Il permet de contrôler des moteurs pas-à-pas bipolaires en micro-pas avec un maximum de 2 ampères par bobine. Il se distingue par:

Voici quelques caractéristiques clés de ce circuit:

- Interface de contrôle de pas et de direction simplissime.
- 5 résolutions différentes de pas:
 - Full-step : Pas complet
 - Half-step : 1/2 pas
 - Quarter-step : 1/4 de pas
 - Eighth-step : 1/8 ième de pas
 - Sixteenth-step : 1/16 ième de pas
- Contrôle en courant ajustable un potentiomètre permet de fixer le courant maximum. Cela permet d'utiliser une tension supérieure à celle recommandée par le moteur (puisque le courant est limité) et permet ainsi d'atteindre un débit de pas plus élevé (et donc une vitesse élevée).
- Une commande de hachage intelligente qui sélectionne

automatiquement le bon mode de décroissance de courant (fast decay = baisse/chute rapide du courant OU slow decay = chute lente).

- Protection (arrêt) en cas de surchauffe, sous tension, surcharge/sur-courant/court-circuit. Utile en cas de surcharge/blocage moteur (car le courant va monter en flèche, ce qui doit provoquer la mise en protection) [14].

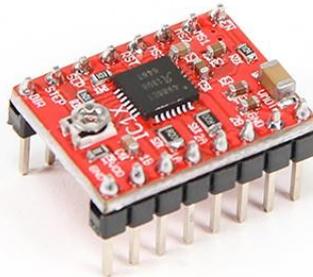


Figure 59 : Le circuit A4988

IV.2.2.2 Montage du circuit A4988

Pour parvenir au montage du A4988, il faut distinguer ses différents pins ainsi que leurs fonctionnalités. La figure suivante montre l'architecture des pins ainsi et leurs rôles.

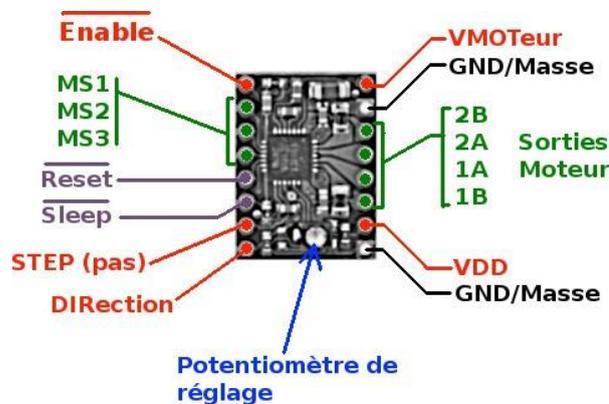


Figure 60 : Schéma de branchement du circuit A4988

- Enable: Logique Inversée, permet d'activer ou désactivé le moteur. Etat Haut=High=Moteur actif... et axe bloqué entre les pas. Etat bas=Low=Axe totalement libre.
- MS1, MS2, MS3: permet de sélectionner la configuration Step/MicroStep. Ces broches disposent de résistances Pull-Down ramenant le potentiel à 0v lorsque rien n'est connecté sur ces broches.
- Reset: Logique inversée. Permet de faire une réinitialisation du module. Généralement connecté sur la broche "sleep".
- Sleep: Logique inversée. Généralement connecté sur la broche "Reset" du module.

- Step: Envoyer un signal d'horloge (Niveau Haut puis Niveau bas, High puis Low) pour avancer le moteur d'un pas.
- DIR: Permet d'indiquer la direction de rotation du moteur. Etat Haut=High pour tourner dans un sens, Etat bas=Low pour tourner dans l'autre sens.
- VMot: Tension d'alimentation du moteur. Habituellement 12V pour les moteurs pas à pas. Tension entre 8 et 12v.
- GND: Sous "VMOT", masse pour l'alimentation moteur. Habituellement mise en commun avec la masse de logique de commande (celle sous "VDD").
- 2B 2A: Première bobine du moteur pas à pas bipolaire.
- 1A 1B: Deuxième bobine du moteur pas à pas bipolaire.
- VDD: Alimentation de la logique de commande entre 3 et 5.5v. Habituellement 5V.
- GND: Sous "VDD", masse de la logique de commande. Souvent mise en commun avec la masse d'alimentation du moteur.[15]

IV.2.2.3 Implémentation du circuit A4988 sur la carte principale

Jusqu'à maintenant le réglage par défaut est de 1/16 micro pas (tous les cavaliers sont installés).

1. Découpez des longueurs de 8 broches afin qu'elles s'insèrent des 2 côtés des pololus.
2. Insérez ces broches de 8 dans les prises femelles de la RAMPS.
3. Insérez les pololus sur les broches et soudez-les. Chauffez chaque broche pendant quelques secondes seulement pour éviter d'endommager le support sur la carte.

Collez le radiateur en haut du chip A4988 en utilisant le morceau d'adhésif double face

MS1	MS2	MS3	Résolution Microstepping
Low	Low	Low	Pas complet (<i>full step</i>)
High	Low	Low	1/2 pas
Low	High	Low	1/4 de pas
High	High	Low	1/8 ième de pas
High	High	High	1/16 ième de pas

Tableau 7 : Sélection de mode de pas

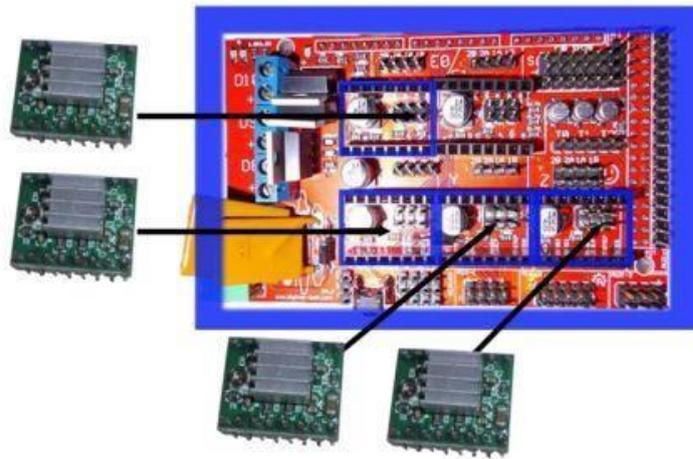


Figure 61: Branchement de A4988 sur Ramps

IV.2.3 Le bloc des capteurs

Ce bloc contient les différents capteurs utilisés dans notre système et il définit leurs connexions avec le contrôleur de la carte de commande.

Dans notre imprimante on a deux types de capteurs, des capteurs fins de course et des capteurs de température.

IV.2.3.1 Les capteurs fin de course

Dans notre système on a trois capteurs fin de course placés à l'extrémité inférieure de chacun des trois axes X, Y et Z pour que l'imprimante ne dépasse pas la limite inférieure de la zone de travail.

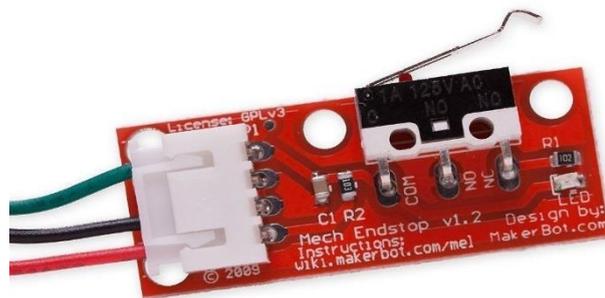


Figure 62 : Capteur fin de course

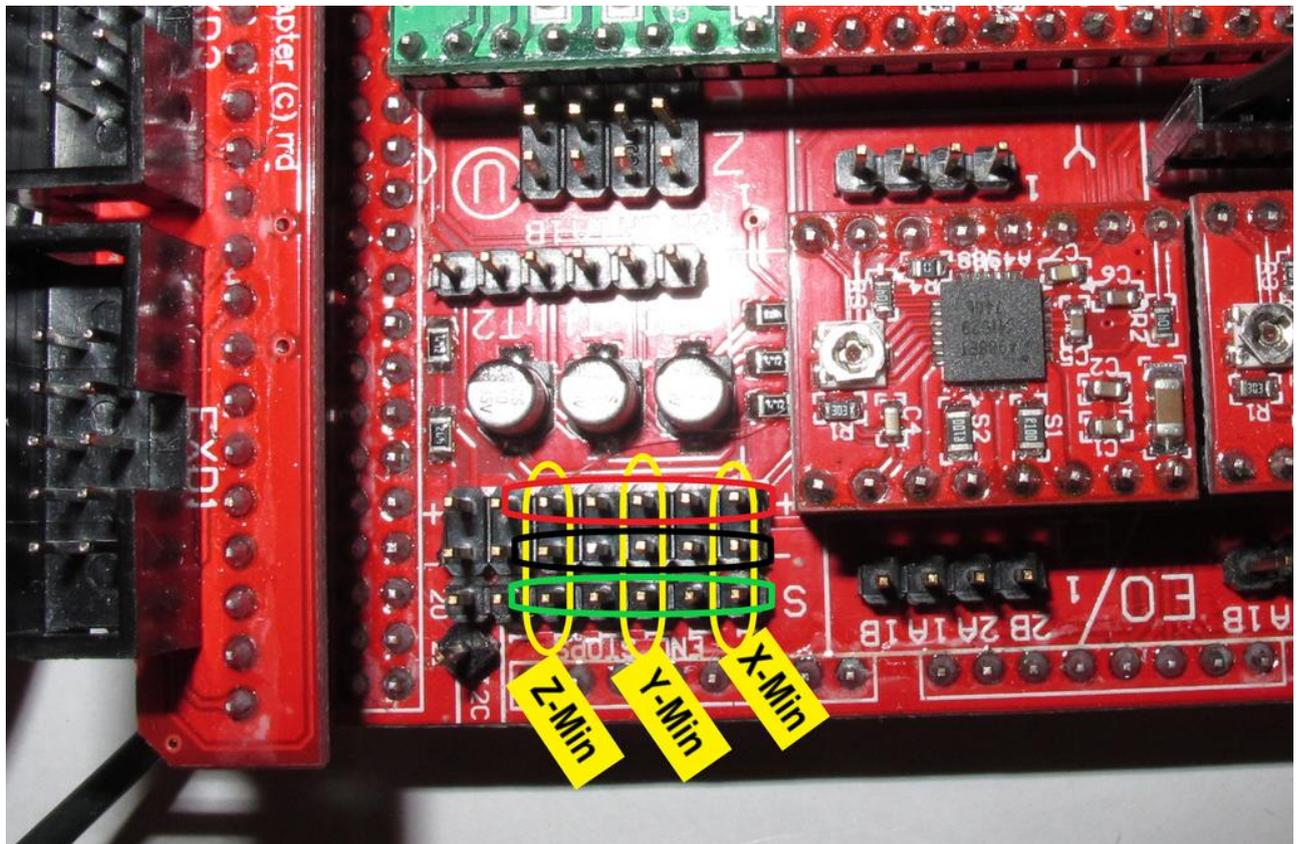


Figure 63 : Branchement de capteur fin de course dur Ramps

IV.2.3.2 Les capteurs de température

Pour la mesure de la température du plateau d'impression et de la tête d'extrusion on a utilisé deux capteurs de température CTN.



Figure 64 : Capteur de température CTN de 3kΩ

Les deux capteurs sont connectés aux bornes D10 de la Ramps 1.4

IV.2.4 Le bloc d'afficheur LCD et de la carte SD

Ce bloc se compose de deux organes un afficheur LCD et une carte SD ces deux composants sont essentiels dans la commande de notre imprimante.

L'afficheur LCD affiche les données de notre imprimante (température, position...), et la carte SD est utilisée pour récupérer les données d'impression.

IV.2.4.1 Le module utilisé

On a utilisé un module qui contient un écran LCD et un lecteur carte SD
La figure suivante montre le module qu'on a utilisé



Figure 65 : LCD smart controller.

Le kit LCD se compose de 4 composants

1. L'écran LCD lui-même
2. Câbles plats
3. Adaptateur intelligent LCD qui se connecte au Shield
4. L'adaptateur s'adapte au-dessus du carte RAMPS 1.4

IV.2.4.2 Placement sur la carte Ramps

Les pins de l'écran LCD et ceux du lecteur de carte sont connectés directement aux pins de la carte Ramps

La figure suivante montre le montage qu'on a fait sur la carte

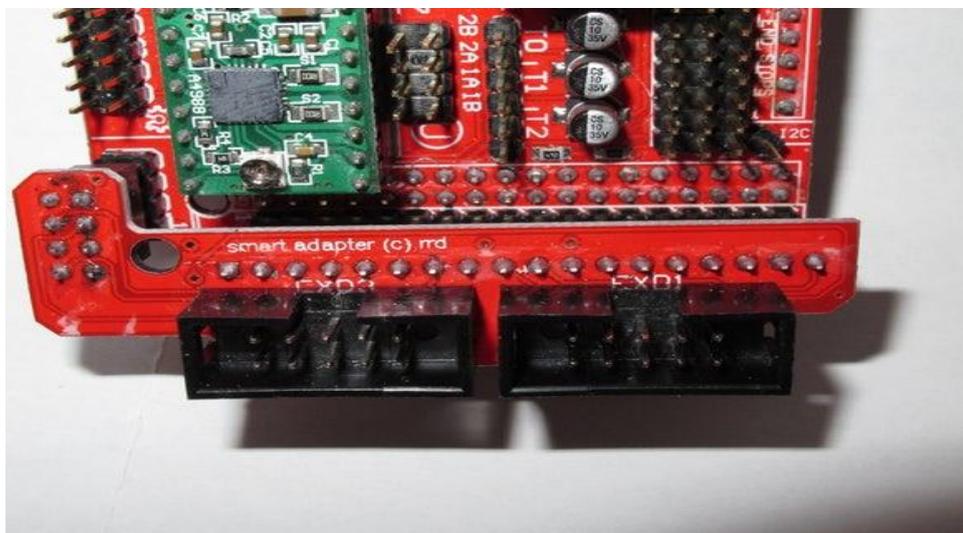


Figure 66 : branchement de kit LCD sur carte Ramps

Figure 67 : Branchement de l'Alimentation

Il ne reste plus qu'à couper les fils d'une des prises IDE (ou Sata), fil jaune/noir/noir/ rouge. Nous ignorerons le fil rouge (5v) qui ne nous sert à rien. Le fil jaune sera branché sur la borne (+) 5A du shieldRamps, le noir se branchant sur le (-).

Pour connecter un lit chauffant, il faut alimenter le bornier 11A du shield. Pour cela, couper la prise ATX (fil jaune/noir/jaune/noir) et faire le branchement [16].

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre on a fait une conception de la carte de commande (Arduino + Ramps 1.4)

Et on a étudié les différents composants nécessaires qui concernent la partie commande dans notre projet on précise leurs branchement et câblage.

Chapitre V : La partie programmation et simulation

V.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à la partie logicielle de notre système. Dans ce qui suit, nous allons présenter les deux parties composantes du logiciel : le firmware (programme implémenté dans le contrôleur de l'Arduino) et le software (logiciel de commande sur ordinateur).

V.2 Le processus d'impression 3D

Pour convertir une idée en un fichier prêt à être imprimé en 3D plusieurs étapes sont nécessaires.

1. Création ou récupération d'un modèle 3D
2. Tranchage du fichier STL et exportation en G-Code
3. Transmission de la commande vers l'interface ordinateur ou vers la carte SD
4. L'impression 3D : c'est la phase finale de l'exécution.



Figure 68 : processus d'impression 3D[17]

V.2.1 La commande numérique

La commande numérique est une technique utilisant des données composées de codes alphanumériques pour représenter les instructions géométriques et technologiques nécessaires à la conduite d'une machine ou d'un procédé.

C'est également une méthode d'automatisation des fonctions des machines ayant pour caractéristique principale une très grande facilité d'adaptation à des travaux différents.

Pour notre commande on a utilisé le G-Code.[18]

V.2.1.1 Le G-CODE

Le G-code est un langage de programmation indiquant à une machine toutes les actions et tous les déplacements nécessaires à la fabrication d'une pièce. C'est un peu le GPS de votre imprimante avec tout l'itinéraire et les actions à faire.

V.2.2 Préparer à l'impression 3D

Avant de pouvoir imprimer un objet en 3D, il faut :

- Créer ou télécharger un modèle 3D (.STL)
- Générer et fournir à l'imprimante un fichier d'impression (.GCODE).

V.2.3 Le modèle 3D

C'est un fichier numérique (.STL) réalisé avec un modéleur volumique (Sketchup, Solidworks, Autocad, Fusion 360, Blender...) ou téléchargé sur Internet (Cults, Thingiverse, YouMagine, Instructables...). Simplement dit : c'est le dessin 3D de votre objet [19].

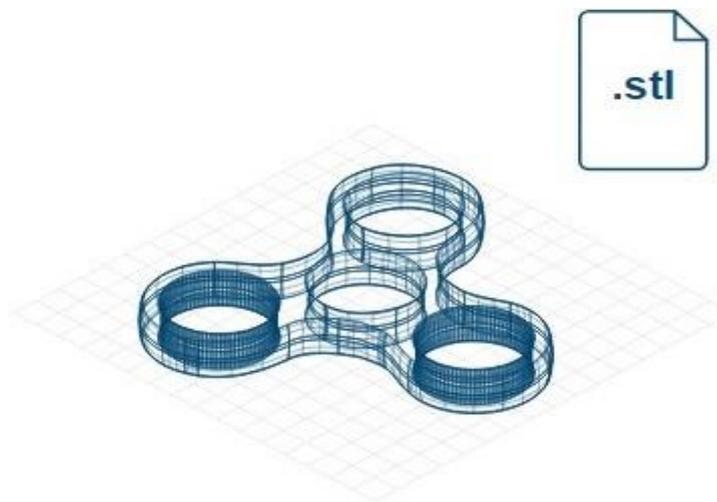


Figure 69 : Le modèle 3D. STL

V.2.4 Le slicer

C'est un logiciel de découpe ou de stratification 3D. Le slicer découpe votre objet en une multitude de couches qui seront imprimées les unes après les autres. Les principaux logiciels d'impression 3D sont : Slic3r, Cura, Simplify3D, Repetier... Il permet de préparer le fichier d'impression (. GCODE) qui sera lu par votre imprimante 3D [19].

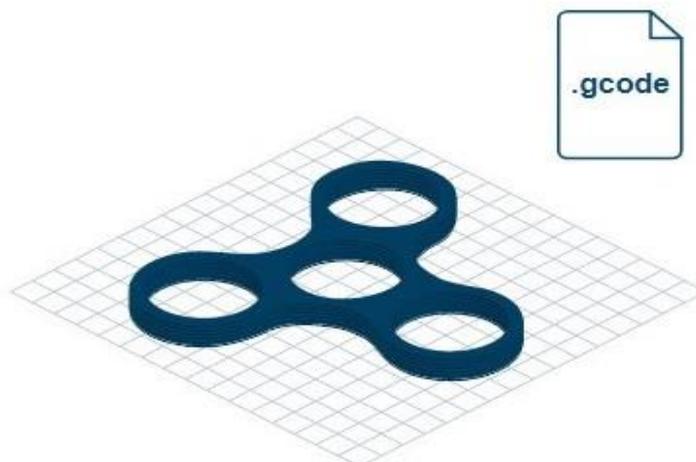


Figure 70 : le modèle 3D. GCODE

V.3 Le firmware

Le micro-logiciel est le système d'exploitation de l'imprimante. C'est le programme qui est installé dans le microcontrôleur pour déterminer les commandes. Si le microcontrôleur est le « cerveau », le firmware est la « capacité de penser ».

Au niveau open source, je souhaite mettre en évidence le micro-logiciel Marlin



Figure 71 : marlin firmware[20]

Les caractéristiques de l'imprimante sont enregistrées dans le firmware

- ❖ Quel type de mouvement ils ont (est cartésien, delta)
- ❖ Quelles sont les dimensions de la surface d'impression ? Si vous avez un lit chaud ou froid.
- ❖ Les étapes nécessaires aux moteurs sont configurées.
- ❖ Même quel type d'électronique est utilisé.

V.3.1 Propriétés principales

- G-code complet avec plus de 150 commandes
- Suite complète de mouvements de code G, comprenant des lignes, des arcs et des courbes de Bézier
- Système de mouvement intelligent avec anticipation, mouvement basé sur l'interruption, accélération linéaire
- Prise en charge de la cinématique cartésienne, delta, SCARA et Core / H-Bot
- Commande de chauffage PID en boucle fermée avec réglage automatique, protection thermique, coupure de sécurité
- Prise en charge de jusqu'à 5 extrudeuses plus un plateau d'impression chauffé
- Interface utilisateur du contrôleur LCD avec plus de 30 traductions linguistiques
- Impression basée sur l'hôte et sur carte SD avec démarrage automatique
- Compensation de nivellement du lit - avec ou sans sonde de lit
- Avance linéaire pour l'extrusion basée sur la pression. [20]

V.3.2 Mode de fonctionnement

Le micro-logiciel Marlin fonctionne sur la carte principale de l'imprimante 3D, gérant toutes les activités en temps réel de la machine. Il coordonne les chauffages, les steppers, les capteurs, les lumières, l'écran LCD, les boutons et tout ce qui est impliqué dans le processus d'impression 3D.

Le langage de contrôle pour Marlin est un dérivé du G-code. Les commandes de code G indiquent à une machine de faire des choses simples comme « régler le chauffage 1 à 180 ° » ou « passer à XY à la vitesse F »

Lorsque Marlin reçoit des commandes de mouvement, il les ajoute à une file d'attente de mouvement à exécuter dans l'ordre reçu. L'interruption pas à pas traite la file d'attente, convertissant les mouvements linéaires en impulsions électroniques précisément synchronisées vers les moteurs pas à pas. Même à des vitesses modestes, Marlin doit générer des milliers d'impulsions pas à pas chaque seconde. (Par exemple, 80 pas par mm * 50 mm / s = 4000 pas par seconde) Étant donné que la vitesse du processeur limite la vitesse à laquelle la machine peut se déplacer, nous recherchons toujours de nouvelles façons d'optimiser l'interruption du pas à pas.

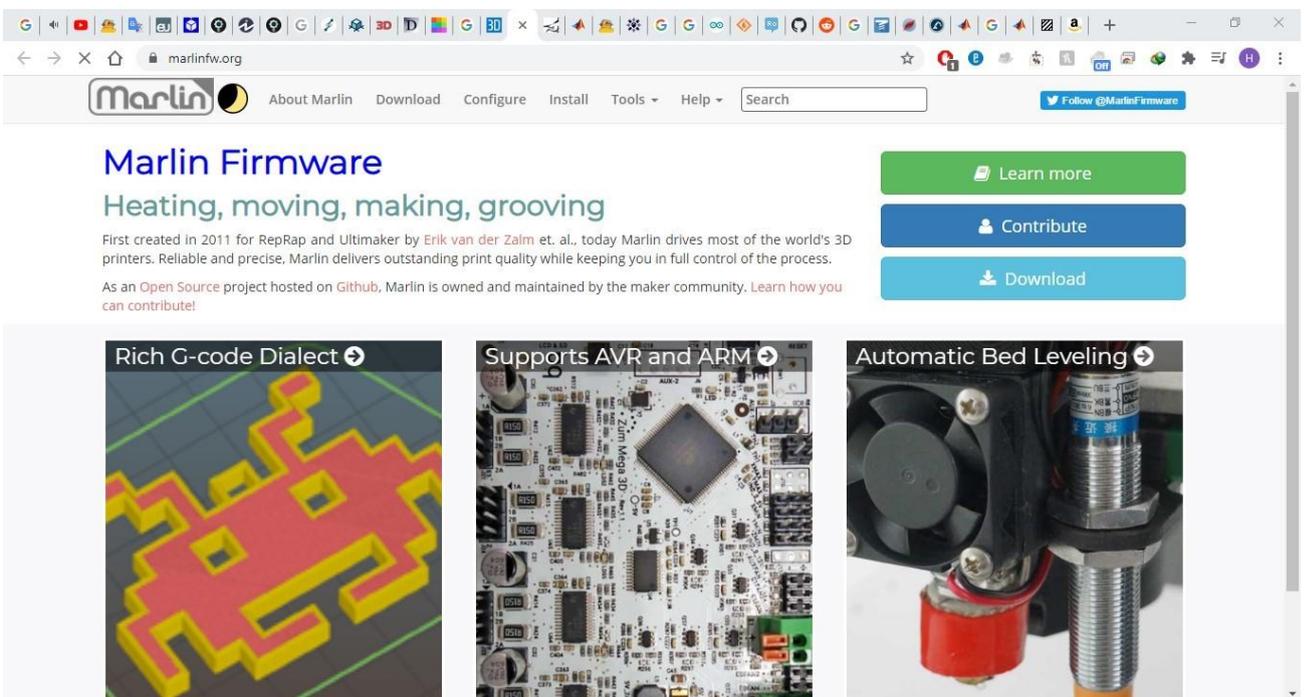


Figure 72 : Interface Marlin site web[20]

V.4 Lesoftware

Le logiciel hôte est disponible pour plusieurs plateformes, y compris les systèmes de bureau, Raspberry Pi et les tablettes Android. Tout appareil doté d'un port USB et d'un terminal série peut techniquement servir d'hôte, mais vous bénéficierez d'une meilleure expérience d'impression en utilisant un logiciel hôte spécialement conçu pour les imprimantes 3D. Les sélections actuelles comprennent :

- Pronterface est un hôte open source de Kliment.
- Repetier Host est un hôte à source fermée de Repetier Software.
- OctoPrint est un hôte open source pour Raspberry Pi par Gina Häußge.
- Cura est un hôte open source par Ultimaker. (AVERTISSEMENT : vous ne pouvez plus sélectionner manuellement le port et la vitesse de communication, votre imprimante doit être détectée automatiquement par Cura)
- Simplify 3D comprend à la fois un hôte et un segment.

V.4.1 Slic3r

Les slicers préparent un modèle 3D solide en le divisant en fines tranches (couches). Dans le processus, il génère le G-code qui indique à l'imprimante en détail comment reproduire le modèle.

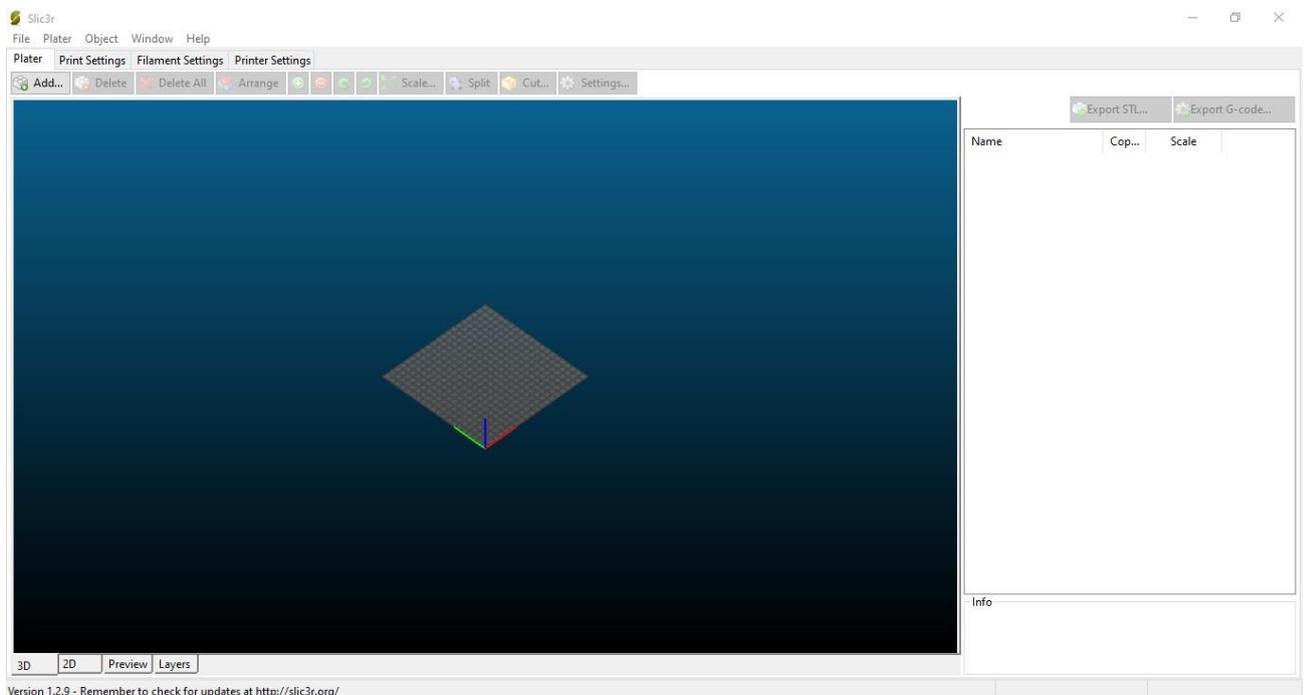


Figure 73 : Interface du logiciel Slic3r

V.4.2 Pronterface

C'est le logiciel principal de l'imprimante 3D. Il fera fonctionner votre processus d'impression 3D.

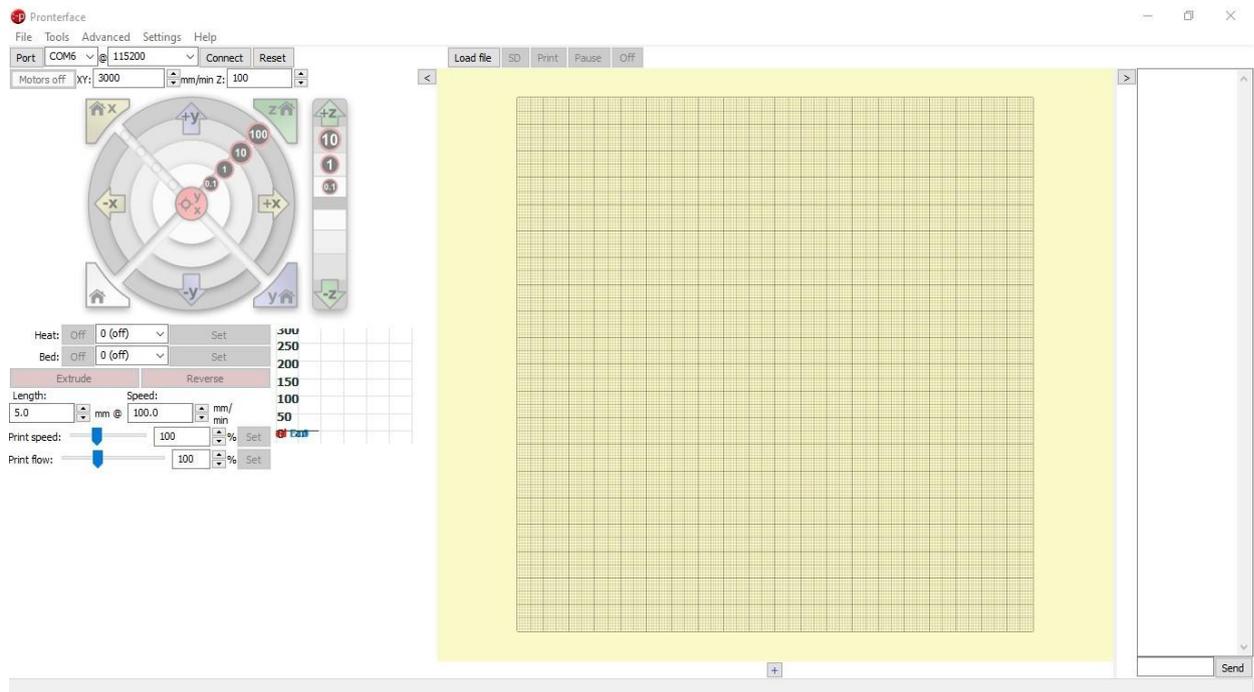


Figure 74 : L'interface du logiciel Pronterface

V.5 Le test

Donc on a fait un exemple de pré-impression d'une pièce additionnelle celle de l'emplacement du ventilateur d'extrudeuse comme vous voyez dans la figure suivante :



Figure 75 : le model 3D du ventilateur d'extrudeuse

V.5.1 Télversement de firmware

Tout d'abord on doit implémenter le firmware sur notre microcontrôleur Arduino mega, A Partir du logiciel Arduino cc (IDE) On a connecté la carte Arduino Mega au pc à partir de port COM6 pour faire téléverser le micrologiciel Marlin 1.0

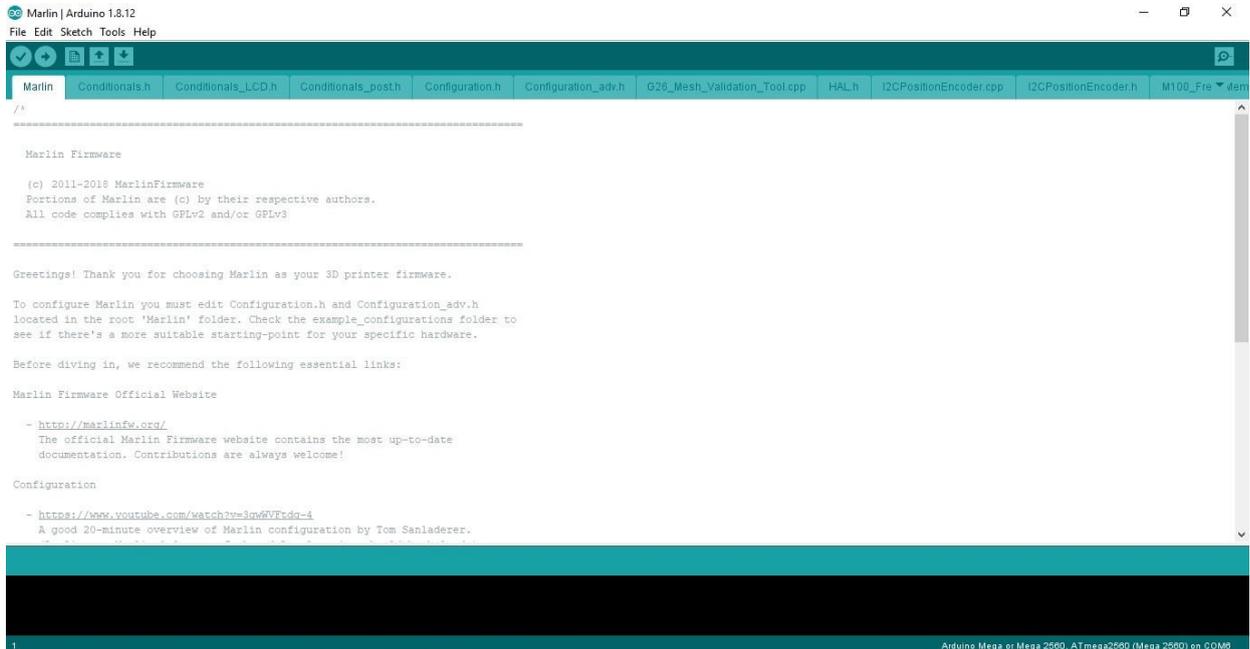


Figure 76 : Télversement de marlin vers la carte Arduino

V.5.2 Exportation du G-code via Slic3r

On utilise le logiciel Slic3r pour lire notre model 3D en format initial .STL, ensuite de l'exporter en format dont on a besoin .gcode

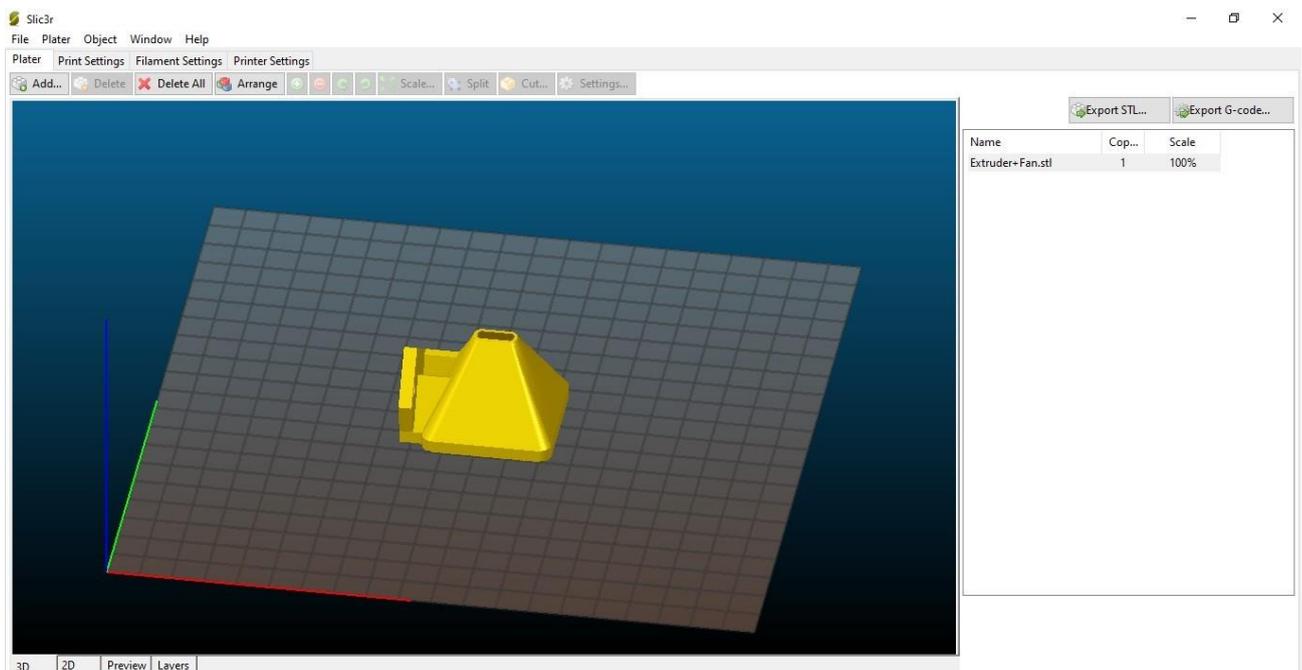


Figure 77 : Exportation en format .gcode via Slic3r

V.5.3 Préparation finale a l'impression

Après avoir le format gcode du model souhaitais à imprimer, on l'importe sous le logiciel pronterface et faire connecte l'Arduino au port COM6 comme vous voyez sur la figure 78.

Après tous ces étapes on peut commencer le processus d'impression 3D

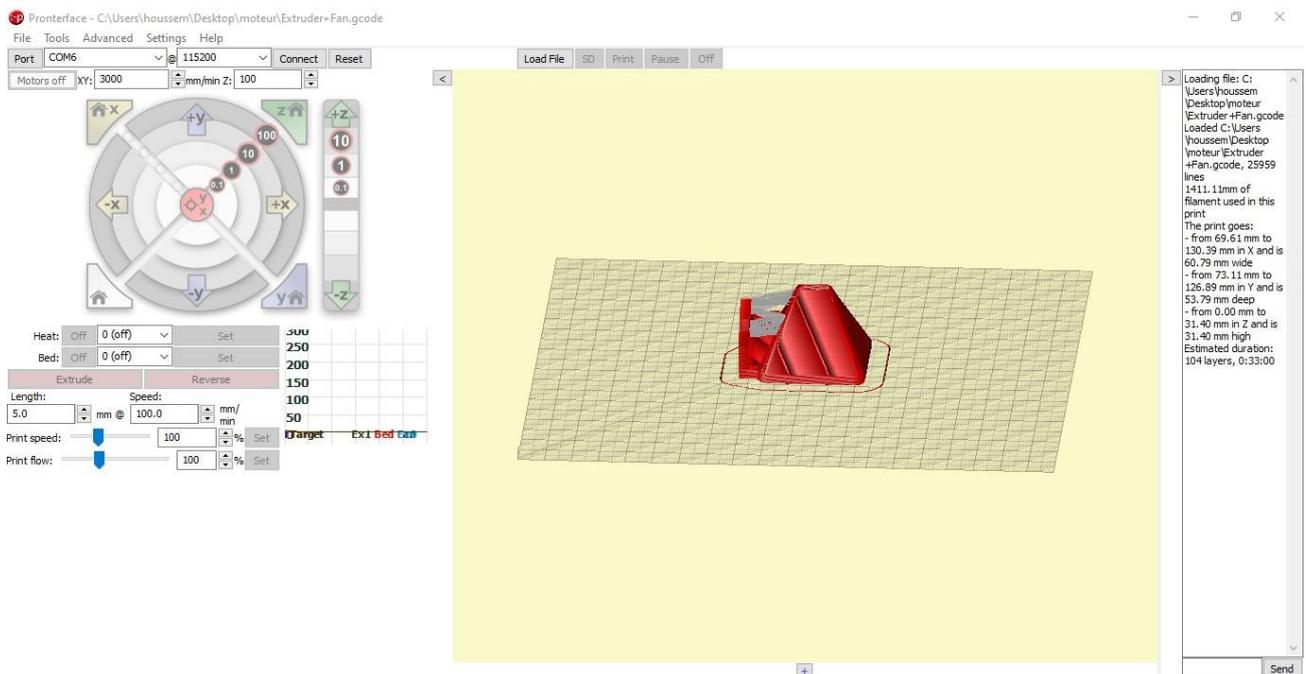


Figure 78 : Connexion Arduino/Proterface pour commencer l'impression

V.6 Simulation du contrôle d'un moteur pas à pas sous Matlab

Nous avons utilisé un modèle d'un moteur pas à pas sur la plateforme Matlab Simulink qui consiste à un pilotage d'un moteur NEMA 17.

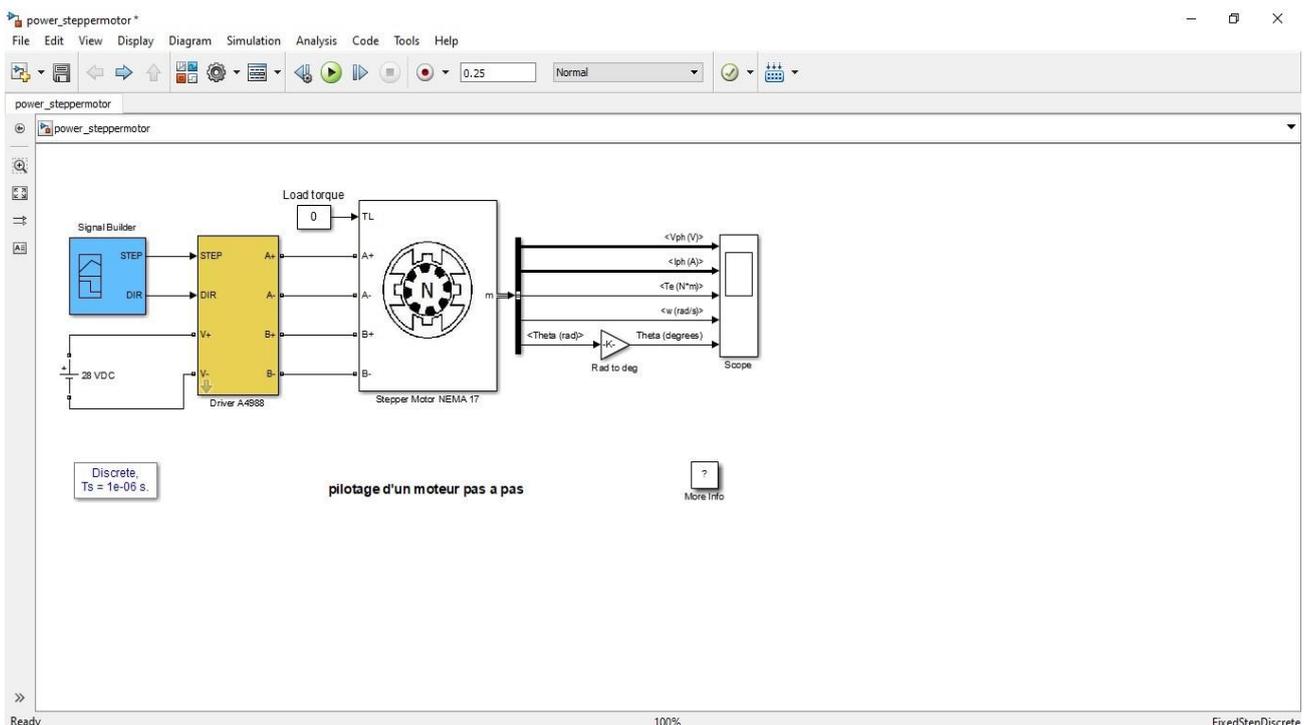


Figure 79 : Modèle pilotage d'un NEMA 17 sur Simulink

V.6.1 Description

Cet exemple présente un moteur pas à pas utilisant le modèle hybride biphasé sélectionné parmi les options de la fenêtre de dialogue. Les paramètres des moteurs sont ceux d'un petit moteur pas à pas (NEMA 17). Les phases du moteur sont alimentées par deux convertisseurs PWM MOSFET H-bridge. Le bus CC est représenté par une source de tension CC de 28 V. Les courants du moteur sont régulés indépendamment par deux contrôleurs basés sur l'hystérésis qui génèrent les signaux d'entraînement de MOSFETs en comparant les courants mesurés avec leurs références. L'ondulation dans les formes d'onde actuelles est contrôlée par la bande d'hystérésis des comparateurs. La fréquence de commutation est variable et dépend des paramètres du moteur.

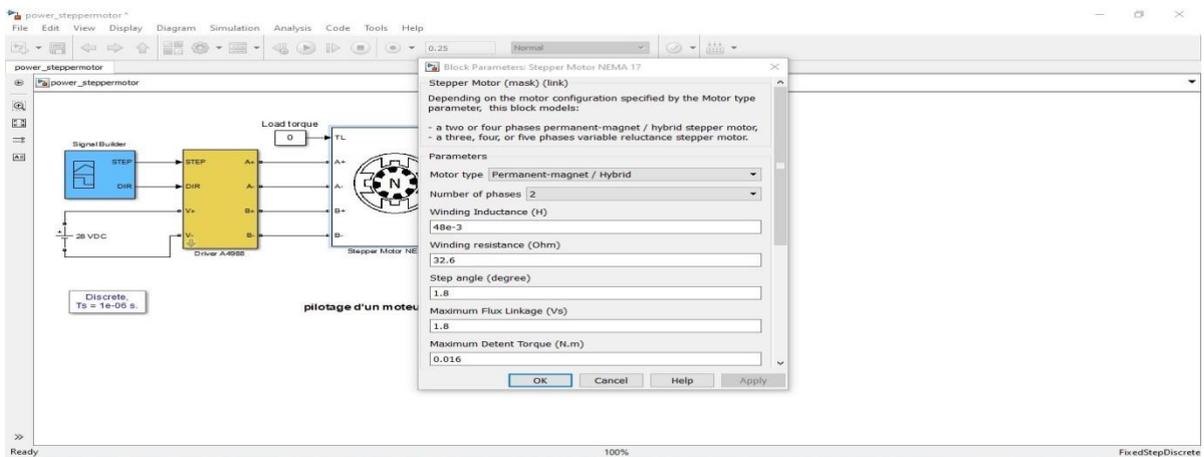


Figure 80 : Bloc de paramètre pour NEMA 17

Dans cet exemple, le schéma d'excitation monophasé est utilisé en raison de sa simplicité. Les références de courant d'onde carrée sont générées en utilisant l'amplitude de courant et les paramètres de fréquence de pas spécifiés dans la fenêtre de dialogue. Le mouvement du moteur pas à pas est contrôlé par les signaux STEP et DIR reçus du bloc Signal Builder. Pas à pas est contrôlé par les signaux STEP et DIR reçus du bloc Signal Builder.

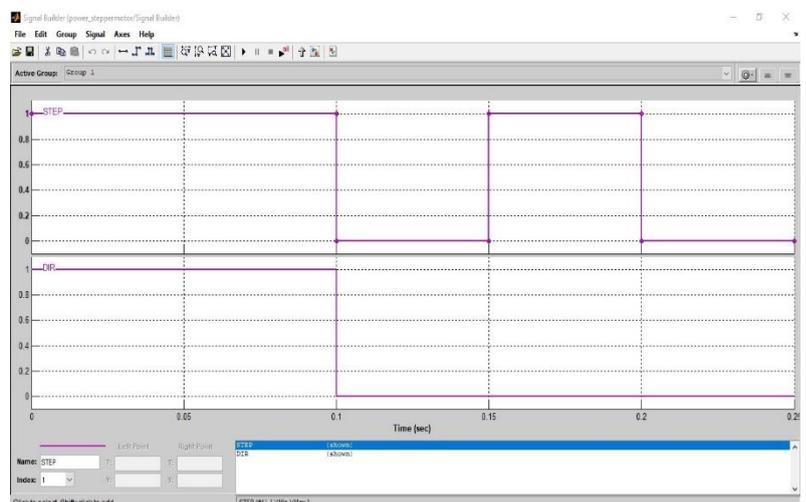
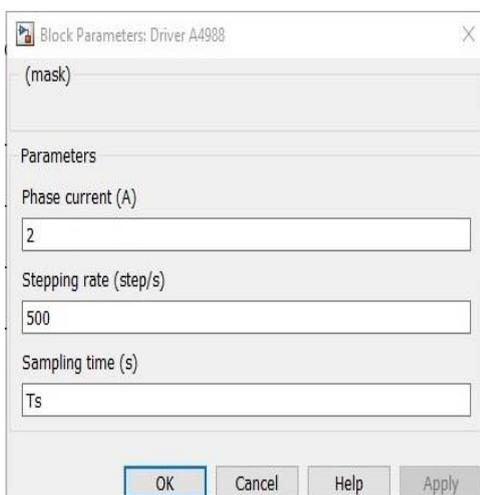


Figure 81: Bloc de paramètres A4988 driver Figure 82 : Bloc signal builder

V.6.2 Simulation

L'amplitude actuelle et le taux de pas sont sélectionnés dans le masque de dialogue pour être respectivement 2A et 500 pas/s. Le signal STEP du bloc Signal Builder contrôle le mouvement du moteur pas à pas. Une valeur positive (1.0) fera tourner le moteur et une valeur zéro arrêtera la rotation. Le signal DIR contrôle la direction de rotation. Une valeur positive (1.0) imposera la direction positive tandis qu'une valeur zéro imposera la direction inverse. Le fonctionnement du moteur pas à pas est illustré par les courbes principales (tensions, courants, couple, vitesse et position) affichées sur le bloc Oscilloscope. La simulation est réalisée à l'aide d'un solveur à pas fixe avec un temps d'échantillonnage de 1 us, fournissant une précision acceptable pour le PWM. Si une précision PWM élevée est requise, une étape de temps plus petite peut être utilisée, mais la simulation sera plus lente.

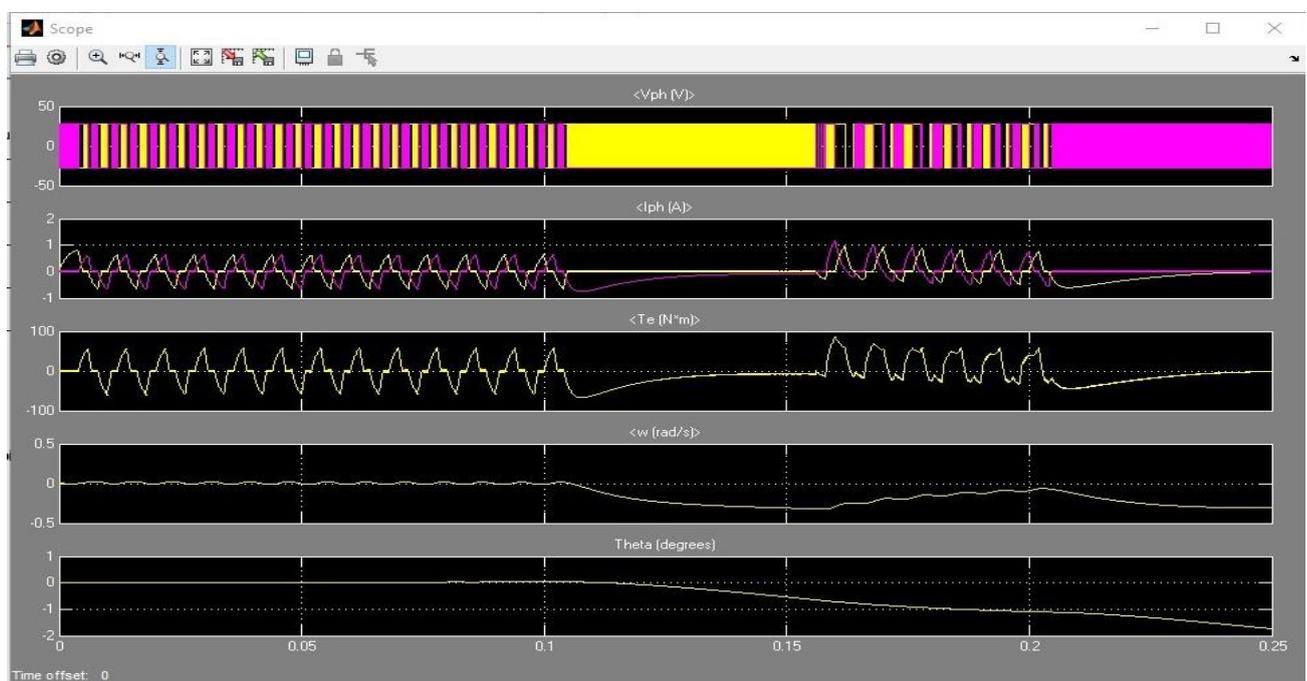


Figure 83 : Résultat de scope après la simulation

Ces résultats de la simulation lors d'un pilotage d'un moteur pas à pas caractériser par NEMA 17 paramétrages, donc on obtient cinq axes :

Voltage par phase (Vph), Courant par phase (Iph), Te (N*m) , w (rad/s), theta (rad).

V.1 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté toute la partie logicielle de l'imprimante. Nous avons vu que cette partie comprend deux parties : une servant à faire fonctionner la carte de commande (le firmware) et une autre pour garantir une communication avec l'ordinateur pour pouvoir envoyer des commandes à la carte (le software).

Ainsi, on a fait un petit test de la préparation d'impression d'une pièce additionnelle nécessaire de notre imprimante.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les médias définissent, à raison, l'impression 3D comme la troisième révolution industrielle, après la mécanisation et le taylorisme. Par son infini champ d'applications, l'impression 3D va nécessairement bouleverser l'économie et les pratiques de fabrication traditionnelles. Son potentiel créatif est, de plus, renforcé par le fantasme de pouvoir réaliser un objet chez soi, sans l'intervention ou le contrôle d'un tiers dans le processus de fabrication, ce qui peut d'ailleurs conduire à des dérives.

Dans ce travail, nous avons mis en œuvre une imprimante 3D. Ainsi, nous avons décrit étape par étape la construction d'une imprimante 3D, notamment : l'étude des modèles existants, l'étude mécanique, l'électronique et le logiciel. Ainsi, nous avons mis en place la conception :

- Un système mécanique à trois degrés de liberté.
- Une carte électronique qui se compose de deux parties : Partie puissance à base de Ramps 1.4 qui permet de commander cinq moteurs pas à pas et deux résistances chauffantes. Partie commande à base d'Arduino MEGA, cette carte permet la récupération des commandes depuis une carte SD ou depuis l'ordinateur.
- Des programmes qui sont implémentés sur l'Arduino IDE.

Tout au long de ces étapes, nous avons décrit la base du fonctionnement de l'imprimante 3D construite avec tout ce que ce nom englobe comme étapes à étudier. Pour mettre en valeur notre travail, nous avons effectué un test d'impression très satisfaisant sur une forme géométrique.

Bien que toutes les étapes essentielles permettant la conception et la construction d'une imprimante 3D aient été palliées, quelques points peuvent être approfondis afin de les améliorer. A cet effet, quelques pistes intéressantes seront à considérer :

- Améliorer la partie mécanique en fixant le mouvement vertical de l'axe X, et faire le mouvement vertical avec le plateau d'impression,
- Changer le mécanisme du système de la tête d'extrusion par un système qui accepte le changement d'outils (fesseuse, tube laser...), et même développer la tête d'extrusion en ajoutant d'autres têtes d'extrusion pour qu'on puisse imprimer avec plusieurs couleurs,
- Améliorer le programme afin que même en cas de coupure d'énergie prolongée, le système puisse revenir continuer le travail là où il s'était arrêté,
- Améliorer la partie logicielle en ajoutant la fonctionnalité d'impression sans fil, et ajouter la compatibilité d'autres outils (découpe laser, fraisage...)
- Enfin, nous souhaiterions qu'il y ait une continuation pour cette étude, une levée de fond afin de concevoir d'autres imprimantes 3D, ou machines CNC en général.

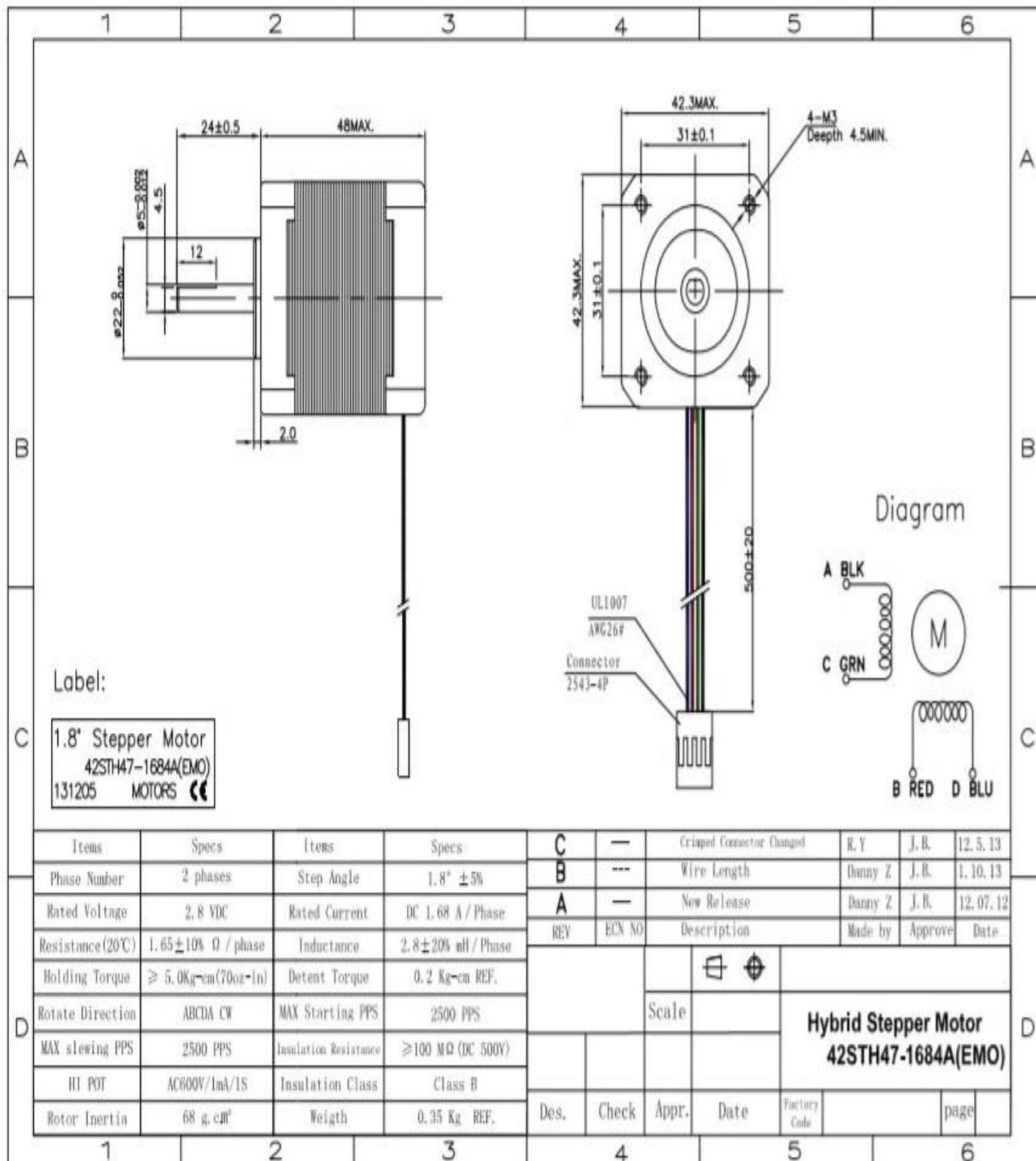
Bibliographie

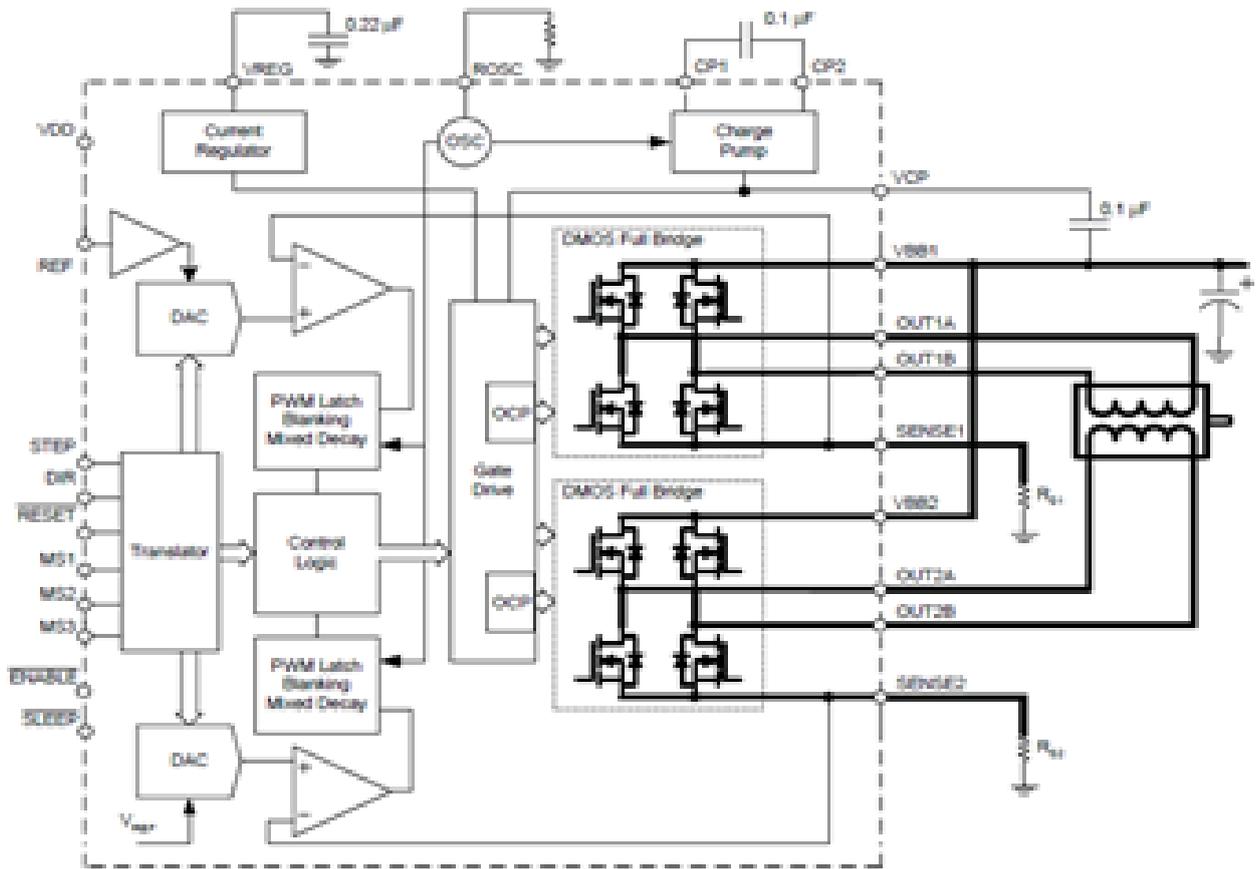
Bibliographie

- [1] « Qu'est-ce que l'impression 3D? » [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.investopedia.com/terms/1/3d-printing.asp>
- [2] C. Barlier et A. Bernard, *Fabrication additive: Du prototypage rapide à l'impression 3D*. Dunod, 2015.
- [3] Serge Corbel « Historique de l'impression 3d » Laboratoire Réactions et Génie des Procédés [En ligne]. Disponible sur: <http://rdm.cnrs.fr/>
- [4] O. Robillart, « L'imprimante 3D à domicile, une fausse vision du futur ? », [En ligne]. Disponible sur: <http://www.clubic.com/pro/actualite-e-business/actualite-783100-3d-printshow.html>.
- [5] Serge Corbel « Historique de l'impression 3d : Secteur d'application » Laboratoire Réactions et Génie des Procédés [En ligne]. Disponible sur: <http://rdm.cnrs.fr/>
- [6] « Fused Deposition Modeling | FDM 3D Printer Technology ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.creativitybuzz.org/fused-deposition-modeling/#Fused_Deposition_Modeling.
- [7] « Les technologies d'impression 3D ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aniwaa.fr/guide/imprimantes-3d/les-technologies-dimpression-3d/>.
- [8] « Fused Deposition Modeling | FDM 3D Printer Technology ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.creativitybuzz.org/fused-deposition-modeling/#Fused_Deposition_Modeling.
- [9] « les moteurs pas à pas » Cours de : Capteurs et actionneurs en instrumentation.
- [10] « Pololu - Stepper Motor: Unipolar/Bipolar, 200 Steps/Rev, 42×48mm, 4V, 1.2 A/Phase ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.pololu.com/product/1200>.
- [11] 3D+Printer+40x40x40+-+Thomas+Workshop.pdf
- [12] « Arduino - ArduinoBoardMega ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega>.
- [13] « Fused Deposition Modeling | FDM 3D Printer Technology ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.creativitybuzz.org/fused-deposition-modeling/#Fused_Deposition_Modeling.
- [14] « A4988 — MCHobby - Wiki ». [En ligne]. Disponible sur: <http://wiki.mchobby.be/index.php?title=A4988>.
- [15] « A4988 ». [En ligne]. Disponible sur: https://wiki.mchobby.be/index.php?title=A4988&mobileaction=toggle_view_desktop « Interrupteur de position », *Wikipédia*.24-avr-2016.

- [16] « Alimentation ATX». [En ligne]. Disponible sur:
<http://www.f8eho.net/?q=content/alimentations>
- [17] « 3D printing process chain.». [En ligne]. Disponible sur:
https://www.researchgate.net/figure/3D-printing-process-chain_fig2_327760995.
- [18] R. Longchamp, *Commande numérique de systèmes dynamiques: cours d'automatique*. PPUR Presses polytechniques, 2010.
- [19] « Comment fonctionne une imprimante 3D ?», [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.playhooky.fr/focus/imprimante-3d/>
- [20] « What is Marlin?», Disponible sur:
<https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html#printing>

Annexe





Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Load Supply Voltage	V_{BB}		35	V
Output Current	I_{OUT}		± 2	A
Logic Input Voltage	V_{IN}		-0.3 to 5.5	V
Logic Supply Voltage	V_{DD}		-0.3 to 5.5	V
VBBx to OUTx			35	V
Sense Voltage	V_{SENSE}		0.5	V
Reference Voltage	V_{REF}		5.5	V
Operating Ambient Temperature	T_A	Range S	-20 to 85	°C
Maximum Junction	$T_J(max)$		150	°C
Storage Temperature	T_{stg}		-55 to 150	°C

Data sheet only for reference,final data sheet please do not hesitate to send us a enquiry to ask from us			
Item	ABS	PLA	HIPS
Printing temperature	230~240°C(normal color) 240°C(silver,golden)	220~230°C (normal color) 230°C(silver,golden)	220-240°C
bed temperature	90-110°C	70-100°C	90-110°C
Item	ABS Conductive	TPE/TPU/Flex	PET/PETG
Printing temperature	235~255°C	230~240°C	210~240°C
bed temperature	90-110°C	80-100°C	80-100°C
Item	PVA	PLA color change	Wood
Printing temperature	160~180°C	210~230°C	200~240°C
bed temperature	not need	80-100°C	90-100°C
Item	Nylon/PA	PC	
Printing temperature	230~270°C	255~270°C	
bed temperature	100-110°C	100-110°C	