

« Master 1 Génie Mécanique »

« Mémoire industriel de 1ère année »

2021

Evolution d'une imprimante 3D à argile

Baron Théo

Entreprise :

IUT de Bordeaux, 15 rue Naudet 33175
GRADIGNAN, Bâtiment 10A, Fablab

Date de début de stage :

04 – 01 - 2021

Date de fin de stage :

01 – 03 - 2021

Tuteur universitaire :

Matthieu Sartron

Tuteur de Stage :

Jean-Marie George



Mémoire épuré

Mémoire confidentiel

Mémoire non confidentiel

Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu Monsieur François Goossens, professeur grâce à qui j'ai pu trouver ce stage.

Monsieur Jean-Marie Georges, mon tuteur, pour nos échanges constructifs qui m'ont permis d'avancer sur le projet.

Messieurs Jean-Baptiste Bonnemaïson et Pierre Grangé-Praderas, FabManager, pour m'avoir accepté en tant que stagiaire, pour leur sympathie et leur encadrement.

Madame Estèle Jouison, présidente de l'association coh@bit, qui m'a également accepté en tant que stagiaire.

Monsieur Maxime Caillet, ingénieur du technoshop, pour son savoir et ses conseils, le matériel qu'il m'a prêté et pour l'accès à l'atelier du technoshop.

Monsieur Fred De Lazzary, ingénieur du technoshop également, pour son expérience et les idées qu'il m'a apporté.

Monsieur Matthieu Pedros, technicien au département SGM de l'IUT, qui a pu me fournir le tuyau nécessaire pour le projet.

Monsieur Matthieu Sartron, professeur qui m'a suivi dans ce stage.

Pour finir je remercie mes camarades de stage avec lesquels on a pu réfléchir, discuter, s'entraider et travailler ensemble.

Table des matières

Remerciements.....	1
I. Présentation de l'association.....	4
II. Le projet Galatee.....	5
III. Recherche de projets similaires.....	6
1. Les Fabriqueurs.....	6
2. ClayXYZ.....	7
3. Deltawasp.....	8
IV. Cahier des charges.....	9
4. Le projet et ses objectifs.....	9
5. Le contexte du projet et les objectifs.....	9
V. Conception préliminaire, recherche de solutions.....	10
6. Solution 1 - Mini extrudeuse.....	10
7. Solution 2 – Extrudeuse déportée.....	11
8. Solution 3 – Extrudeuse avec réserve déportée (Dart).....	12
Coté réserve.....	12
Coté extrudeuse.....	13
9. Choix de la motorisation.....	14
10. Choix de la solution.....	15
VI. Caractérisation de l'argile.....	16
11. Argile brute.....	16
12. Argiles préparées.....	17
13. Résultats.....	18
VII. Forces mises en jeu.....	19
14. Kellermann et Klein.....	19
15. Charge limite d'Euler (limite au flambement).....	19
16. Pertes de charges.....	21
VIII. Conception détaillée du système déporté (solution 3).....	22
17. Support de la cartouche.....	23
18. Extrudeuse à vis sans fin (Dart).....	24
19. Fixation tuyau.....	25
20. Traitement de surface du tube en acier (expérimental).....	26
21. La buse.....	27
IX. Conclusion.....	28
X. Annexes.....	29
22. Annexe 1 : Imprimante 3D Prusa I3 MK3S.....	29
23. Annexe 2 : Imprimante 3D Creality Ender-3.....	30
24. Annexe 3 : découpeuse, graveuse laser.....	31

25. Annexe 4 : Extrudeuse « Dart »..... 32

26. Annexe 5 : Nomenclature extrudeuse « Dart »..... 33

27. Annexe 6 : Tête de piston 34

28. Annexe 7 : Fixation du tuyau..... 35

29. Annexe 8 : Liste des pièces 36

30. Annexe 9 : Spécifications nema23 avec réducteur 15.3 : 1 37

31. Annexe 10 : Support de la cartouche 38

32. Annexe 11 : nomenclature support de la cartouche 39

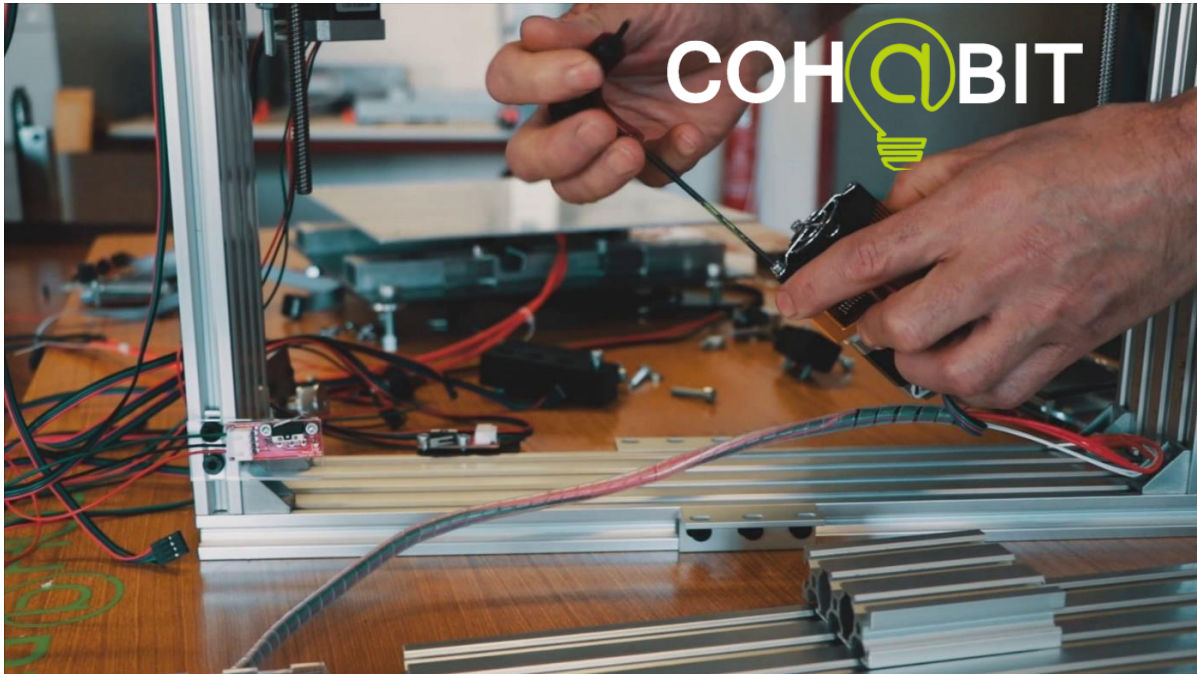
33. Annexe 12 : Dessin de définition de la buse..... 40

34. Annexe 13 : Diagramme de Gantt 41

35. Liste des figures 43

36. Glossaire 44

I. Présentation de l'association



Le Fablab Coh@bit est un espace collaboratif de création technologique, situé à l'IUT de Gradignan, qui propose des ateliers DIY sur Bordeaux, Pessac et Gradignan. Le fablab propose des formations imprimante 3D abordables, mais aussi de la location machine comme la découpeuse laser, découpeuse vinyle, des ateliers pour les associations, pour les entreprises ou pour les collectivités. Le fablab est donc un lieu riche de savoir, d'échanges et de partages unique en Gironde et en Aquitaine qui accueillera les plus jeunes comme les plus vieux.

Coh@bit est une association dans laquelle tout le monde peut y devenir adhérent. Étudiant, particulier, entreprise, labo de recherche..., ce qui donne accès à toutes les ressources du Fablab, aux équipements, aux animations organisées, à des ateliers spécifiques et inclut une formation à la machine laser et aux machines d'impression 3D. Les matières premières sont disponibles sur les lieux à la charge des utilisateurs.

Le fablab dispose d'une équipe de bénévoles qui amènent et développent des projets comme le capteur de spores, la communication racinaire ou le projet Galatee, ce qui amène à des collaborations avec des stagiaires par exemple.

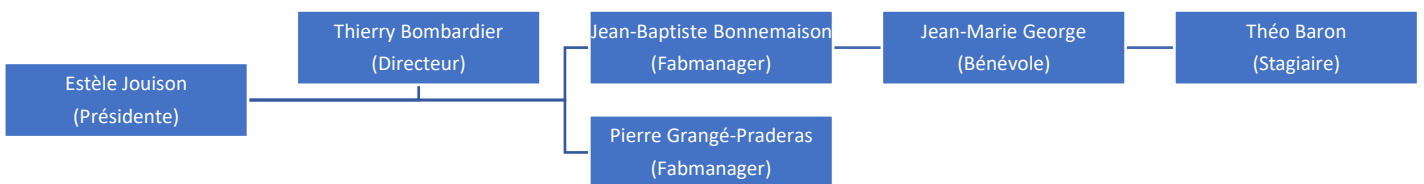


Figure 1 : Hiérarchie du Fablab

II. Le projet Galatee

Les imprimantes 3D n'ont jamais été aussi présentes dans nos quotidiens. Chères et complexes, bon marché et facile à prendre en main, on en trouve différents types exploitant des technologies différentes pour diverses applications. Le spectre des matériaux imprimable s'élargit avec le temps. Des plus répandus, les matériaux plastiques (PLA, ABS, PET, ...), aux matériaux métalliques (Aluminium, titane,) en passant par les résines jusqu'aux céramiques et plus particulièrement aux argiles qui sont le grand enjeu du projet Galatee.

Le projet Galatee, lancé en 2019, a pour objectif de développer une imprimante 3D à dépôt d'argile entièrement documentée et accessible à tous. Son objectif premier est d'imprimer des moules de fonderie pour y couler de l'aluminium par exemple. La machine en elle-même dispose d'un système 3 axes orthogonaux pilotés grâce à une carte arduino ¹ et d'une carte additionnelle Ramps² (et le firmware Marlin³). Elle offre un volume d'impression approximatif de 400*400*400 mm.

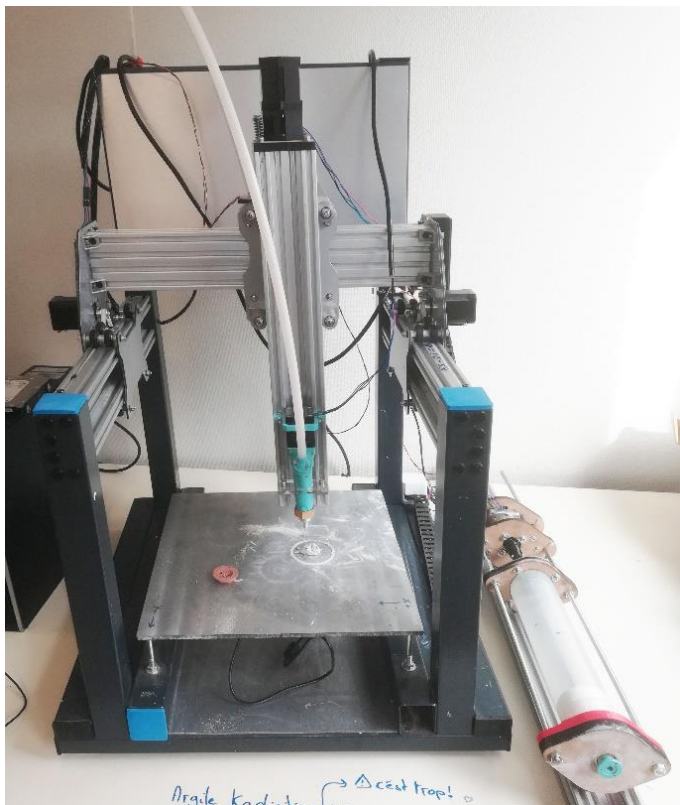


Figure 2 : Vue globale de la machine

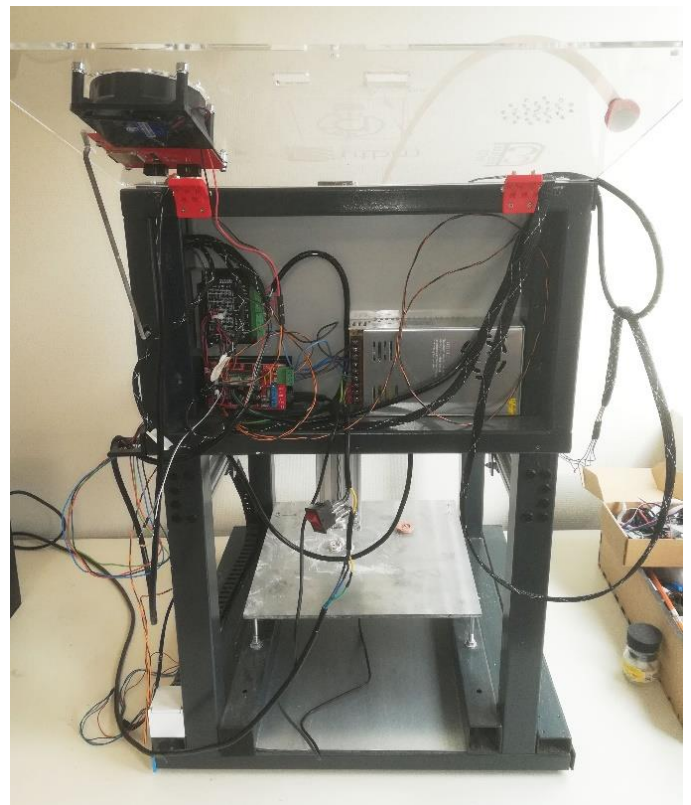
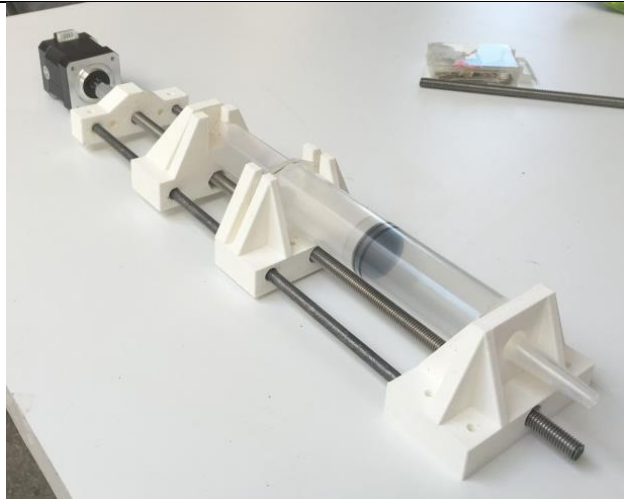


Figure 3 : Vue arrière de l'électronique de la machine

Galatee a été relancé en janvier 2021, il s'agit de la suite du projet et fait l'objet de ce stage. La machine a déjà été conçue et fabriquée par un précédent stagiaire. Le plateau, les axes, les éléments mécaniques, l'électronique qui contrôle les moteurs et le logiciel sont donc prêts. L'élément manquant est la partie extrusion, c'est le point de départ de ce stage.

III. Recherche de projets similaires

1. Les Fabricateurs



Association « Les Fabricateurs », située à Malakoff en région parisienne.



Marché : Ce système à été créé au sein d'une association. Il n'est pas breveté, au contraire, il est libre d'accès pour être reproduit par qui le souhaite.

Conception : L'extrudeuse⁴ est montée sur une imprimante « Mostly Printed CNC » 3 axes orthogonaux. L'extrudeuse est composée d'une seringue 60ml qui sert à la fois de réserve d'argile et de buse. Le corps de la seringue est maintenu fixe tandis que le piston est guidé en translation par deux tige lisse et entraîné par une tige filetée M8. Un moteur pas à pas type nema17 directement couplé à la tige fileté, la met en rotation.

Avantages :

- Système simple, facile à comprendre et à mettre en place.
- Peu onéreux car composé de pièces imprimées 3D et autres éléments bon marché, simple de se les procurer.
- Possibilité d'utiliser différents matériaux sur choix de l'utilisateur.
- Possilité de monter le système sur différentes machines.

Inconvénients :

- Système se déplaçant sur les axes de l'imprimante, problèmes si masse trop importante.
- Modèles 3D non disponible en téléchargement.
- Diamètre de la buse élevé ($\approx 3\text{mm}$), précision réduite.
- Encombrant en longueur.
- Manque de documentation, ex : paramètres d'impression de la machine.

Source : <https://www.fabriqueurs.com/imprimante-ceramique-extruder-de-largile/>

2. ClayXYZ



ClayXYZ est une imprimante 3D imaginée par l'artiste **John Fray**.

Marché : Cette machine a fait l'objet d'une campagne de financement. Pour ce qui est des tarifs, 699\$ pour la machine complète ou 399\$ pour la partie extrusion seulement.

Conception : La zone d'impression de 210x220x180 mm se situe dans une enceinte fermée. L'extrudeuse utilise la technologie de la vis sans fin. Le moteur fait tourner la vis sans fin pour entraîner la matière jusqu'à la buse. La réserve de matière est déportée. Cette dernière est contenue dans un tube, poussée par un piston, puis acheminée jusqu'à la vis sans fin par un tuyau souple. L'imprimante est équipée d'un compresseur capable de retirer les bulles d'air de l'argile.

Avantages :

- Zone d'impression standard.
- Vis sans fin qui offre un contrôle précis sur le flux en sortie de buse.
- Compresseur pour retirer les bulles d'air de la matière.
- Buse fine, entre 0,2 et 0,8 mm.
- Réserve de matière déportée.
- Partie extrusion adaptable sur différentes machines.
- Système d'exploitation Marlin

Inconvénients :

- Prix élevé

Source : <https://www.kickstarter.com/projects/clayxyz/clayxyz-desktop-3d-clay-printer-create-your-own-ar>

3. Deltawasp



Origine : Italie

Marché : Machines haute de gamme développées par la marque wasp. Prix à partir de 2200€ jusqu'à 55000€. La marque propose même des machines sur mesure pour le bâtiment.

Conception :

Zone d'impression $\varnothing 200\text{mm} \times 400\text{mm}$. Il s'agit d'une machine 3 axes verticaux avec plateau fixe. La méthode d'extrusion est similaire à ClayXYZ.

Reserve d'argile déportée mais monte en même temps que les axes.

Avantages :

- Grande zone d'impression (surtout en hauteur)
- Plateau fixe
- Multi matériaux céramique
- 2 buses $\varnothing 1,2\text{mm}$ et $\varnothing 2\text{mm}$

Inconvénients :

- Machine complète lourde (40kg)
- Compresseur d'air requis (8bar min)
- Coût élevé (2000-3000€)

Source : <https://www.3dwasp.com/en/clay-3d-printer-delta-wasp-2040-clay/>

IV. Cahier des charges

4. Le projet et ses objectifs

- Concept du projet : Evolution d'une imprimante 3D argile, développement de la partie extrusion.
- Services attendus :
 - Permettre le chargement de l'argile
 - Permettre l'impression 3D d'objets en argile
 - Pouvoir décharger l'argile et démonter le système pour le nettoyage
- Un prototype documenté avec tout le travail effectué disponible en accès libre pour assurer une traçabilité et la reproductibilité du projet.
- Expression du besoin :
 - Le système doit s'adapter à l'imprimante 3D déjà conçue et fabriquée
 - Le but est de pouvoir charger le système en argile, imprimer des pièces de bonne qualité avec différentes argiles, de petite ou grande taille, puis de pouvoir décharger l'argile et de nettoyer le système.

5. Le contexte du projet et les objectifs

- La situation du projet : Le projet a été initié dans le but de réaliser des moules destinés à la fonderie
- Les conditions initiales :
 - Rédigez une documentation pour le site du Fablab. (Disponible sur : https://projets.cohabit.fr/redmine/projects/galatee/wiki/Du_nouveau_en_2021)
 - Déporter le système car sinon trop de masse à déplacer par les axes.
 - Avoir une réserve d'argile déportée.
 - Prévoir une réserve d'argile de 1kg minimum (600ml).
 - Ne pas utiliser de compresseur d'air (limiter les coûts/encombrement).
 - Amener l'argile à la buse avec le minimum de pertes de charges (<1bar).
 - Obtenir une argile avec la bonne viscosité et définir une plage d'utilisation pour une argile en termes de viscosité.
 - Limiter les bulles d'air.
 - Obtenir un fil d'argile de 1,5mm de diamètre en sortie.
 - Pouvoir faire avancer et reculer le piston sur demande.
 - Etanchéité entre les composants pour éviter l'argile dans les éléments mécaniques.
 - Résister à la corrosion.
- Confidentialité du projet : projet libre d'accès
- Logiciel de CAO imposé : FreeCAD, qui est libre de droit.

Diagramme de Gantt disponible en annexe 13.

V. Conception préliminaire, recherche de solutions

6. Solution 1 - Mini extrudeuse

Directement inspiré de l'extrudeuse des Fabricateurs. C'est une solution rapide à mettre en place et permet de faire des tests d'impression avec différentes argiles. Ce dispositif est également prévu comme banc de test pour caractériser l'argile avec un moteur pas à pas qui exerce une pression constante sur le piston de la seringue pendant un temps déterminé afin d'obtenir le débit massique du fluide plutôt que la viscosité.

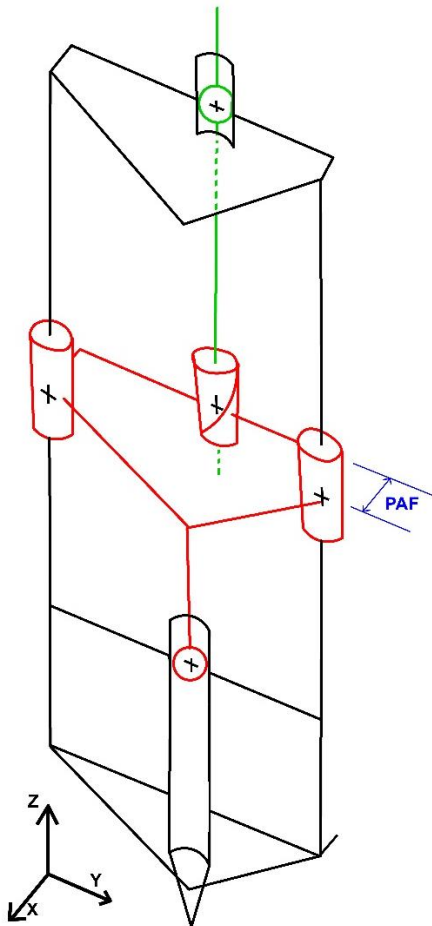


Figure 4 : Mini extrudeuse

S0 : Bâti, partie fixe. Le corps de la seringue est solidaire du bâti.

S1 : Coulisseau, pièce en translation entrainant le piston de la seringue.

S2 : Vis, entraînée en rotation par un moteur pas à pas et fait avancer le coulisseau car écrou fixé sur ce dernier.

$$h = \sum N_s - 6(p - 1) + M = 17 - 12 + 1 = 6$$

L'hyperstatisme vient du fait que certains degrés de libertés sont bloqués au moins 2 fois.

Le porte-à-faux est l'entraxe de la seringue et de la tige filetée.

Avantages :

- Le système est compact
- Montage/démontage facile

Inconvénients :

- Faible réserve d'argile
- Porte-à-faux
- Non déporté

7. Solution 2 – Extrudeuse déportée

Pour répondre à la problématique du système déporté, cette solution propose une extrudeuse en 2 parties. La partie réserve d'argile avec son piston et son moteur est à côté de la machine, et est reliée par un tuyau à la buse qui se déplace dans le plan XY.

Le tuyau ne doit pas être trop long pour limiter les pertes de charges

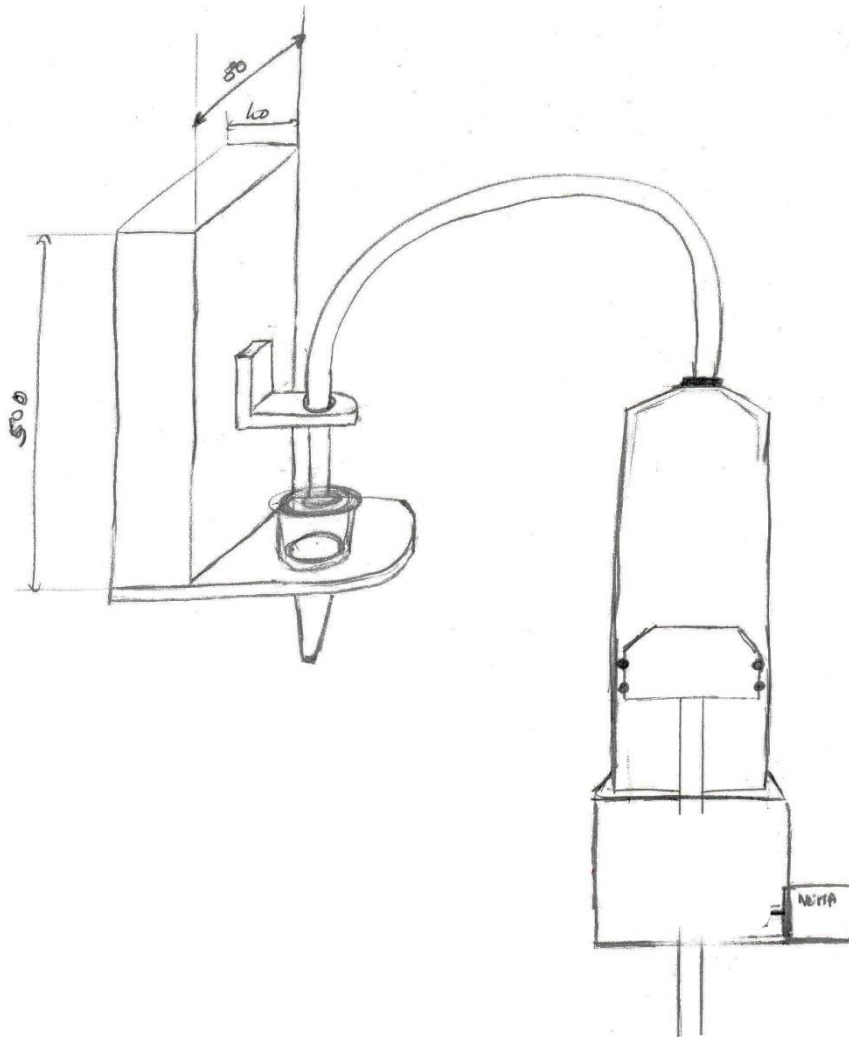


Figure 5 : Croquis extrudeuse déportée

Avantages :

- La réserve est déportée
- La buse et son support sont légers pour la machine
- Pas de porte-à-faux

Inconvénients :

- Pertes de charge dans le tuyau
- La réserve risque de se comporter comme un élastique. Lors d'une impression, quand l'argile est sous pression, la rétractation sera difficile à contrôler.

8. Solution 3 – Extrudeuse avec réserve déportée (Dart)

Coté réserve

Il s'agit ici de déporter la partie extrusion. La réserve d'argile sera poussée par un piston entraîné par une vis, celle-ci mise en rotation par un moteur pas à pas. La sortie de la réserve est reliée à un tuyau qui amène l'argile jusqu'à la buse. Dans ce système le moteur avance en même temps que le piston.

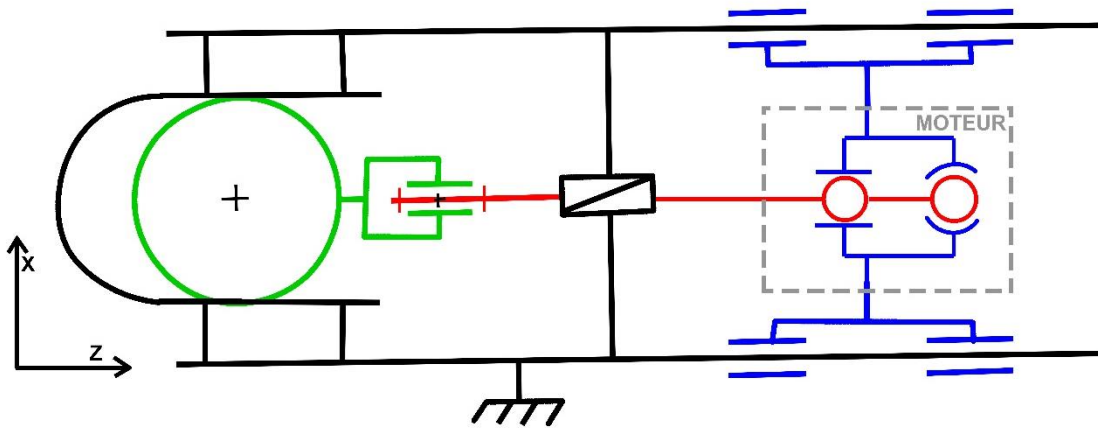


Figure 6 : Schéma cinématique reserve

S0 : Bâti, partie fixe

S1 : Tête de piston qui se comporte comme une liaison linéaire annulaire avec la partie fixe ($L/D < 0,6$)

S2 : Vis T8 et rotor moteur

S3 : Stator moteur

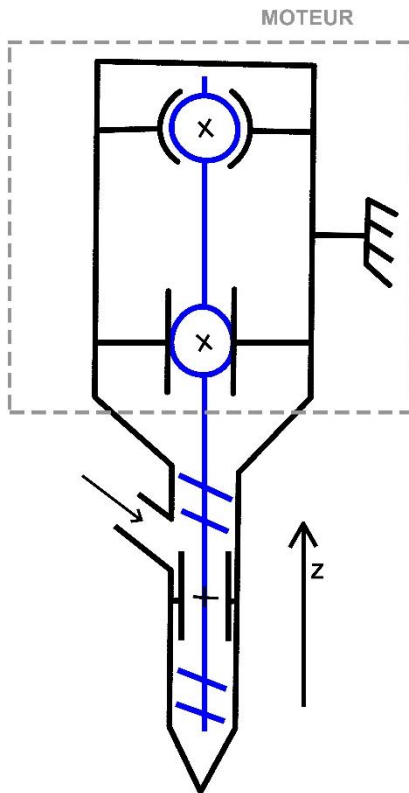
Hyperstatisme :

$$h = 2 + 5 + 5 + 4 * 4 + 2 + 3 - 6 * 3 + 1 = 16$$

La liaison entre **S1** et **S2** sera réalisée par une butée. Son rapport $L/D = 0,7$ ce qui tend à la considérer comme une liaison linéaire annulaire. Cependant les butées sont des composants mécaniques qui tolèrent très peu de défauts angulaires. Elle sera donc considérée comme un pivot.

Coté extrudeuse

Le flux d'argile en sortie du tuyau doit être contrôlé avec précision. Pour cela, une vis sans fin en rotation pour pousser l'argile jusqu'à la buse est une bonne solution. L'axe du moteur et la vis seront liés par un coupleur.



Le moteur entraîne directement la vis sans fin. Les liaisons rotule et linéaire annulaire sont les liaisons internes au moteur. La vis sans fin tourne à l'intérieur d'un tube en acier. Même avec un jeu entre elle et le tube, le rapport $L/D \gg 1,5$ donc elle est en liaison pivot glissant avec le bâti.

Hyperstatisme :

$$h = 3 + 2 + 4 - 6 * 1 + 1 = 4$$

L'hyperstatisme vient du fait que les translations suivant x et z et les rotations autour de x et z sont bloquées deux fois chacune par le pivot glissant.

Une solution sera trouvée par la suite pour supprimer l'hyperstatisme.

Figure 7 : Schéma cinématique extrudeuse

Avantages :

- La réserve est déportée
- L'extrudeuse est légère pour la machine
- Pas de porte-à-faux
- Effet élastique de la cartouche contrôlé par la vis sans fin

Inconvénients :

- Pertes de charge dans le tuyau
- Partie réserve lourde et encombrante

9. Choix de la motorisation

Du côté de l'extrudeuse, la vis sans fin sera entraînée par un moteur pas à pas nema17 (Grand standard des imprimantes 3D). Ils sont abordables en termes de prix pour des performances au rendez-vous.

Du côté de la réserve d'argile, le choix du moteur nécessite un tableau critérié. Sachant que le courant maximum que peut fournir la carte Ramps par moteur est de 2A, que le couple d'un nema17 est de 0,65 N.m et que le couple d'un nema23 est de 1,89 N.m (30 N.m avec un réducteur 15,3 : 1).

	Couple	Puissance absorbée	Faisabilité	(Temps de fabrication)	Coût	Total
COEF	4	1	2	3	2	
Nema17 avec boite de vitesse	3	3	1	1	2	
<p>Angle de pression = 20° Module 1,5 Couple en sortie = 5,09 N.m</p>	12	3	2	3	4	24
Nema23 non captif	0	3	3	3	2	
	4	3	6	9	4	26
Nema23 avec réducteur intégré	4	1	2	3	1	
	16	1	4	9	2	30
Nema17 avec vis sans fin	4	3	1	1	1	
<p>prévoir réglage pour minimiser jeu (Rondelle ondulée !!)</p> <p>Vis sans fin entraînée pas un nema17</p>	16	3	2	3	2	26

0 = destructif

10.Choix de la solution

La solution choisie est la solution numéro 3 car c'est elle qui répond le mieux au cahier des charges.

Le moteur choisi est, d'après de tableau critérié, le Nema23 avec réducteur 15 : 1 intégré. Cependant, ce moteur requière plus de puissance avec un courant de 2,8A. Il lui faudra donc un contrôleur dédié du type TB6600.

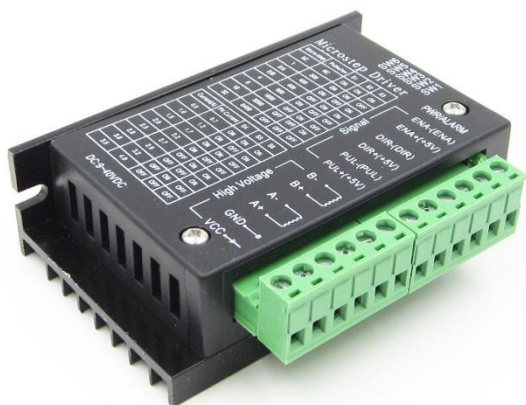


Figure 8 : Contrôleur TB6600

VI. Caractérisation de l'argile

Dans la perspective de dimensionner le système, il faut d'abord caractériser une argile et l'utiliser pour réaliser des mesures (couple). Elle doit avoir une consistance adéquate pour être extrudée.

La méthode de caractérisation idéale serait par la viscosité, mais déterminer la viscosité de l'argile sans viscosimètre n'est pas chose aisée. Il y a cependant une autre méthode plus accessible, en utilisant une seringue graduée, mesurer le volume d'argile expulsé en fonction du temps sous charge constante (débit volumique). L'objectif ensuite sera de déterminer une plage de débit volumique pour laquelle l'argile est valide pour l'impression. Par manque de temps par rapport au diagramme de Gantt, une méthode moins scientifique est mise en place.

11. Argile brute

La première mesure à réaliser est celle du couple minimum requis pour faire sortir un fil d'argile de la buse. Pour cela une seringue en PVC, déjà fabriquée, est chargée d'argile brut. (Il s'agit d'un bloc, déjà malléable).



Figure 9 : Seringue PVC fabriquée avant le début du stage

La buse à gauche est imprimée 3D avec un diamètre de 1,5mm en sortie. Elle est bloquée par un écrou M23 en laiton sur le goulot d'étranglement conique de la seringue (usiné en aluminium). Lui-même est fixé sur la seringue grâce à un écrou PVC. A l'intérieur se trouve une tête de piston usinée en PVC. La seringue est refermée à l'autre extrémité par un bouchon en PVC (usiné) qui s'encastre dedans, puis bloqué avec un même écrou PVC vu précédemment.

Quelques modifications étaient à prévoir pour réaliser la mesure. C'est en serrant à la clé dynamométrique que l'on va mesurer le couple à fournir pour extruder l'argile. La capacité maximum de la clé est atteinte, soit 21 N.m, et au moment du démontage, on voit bien que la tige filetée a flambé.

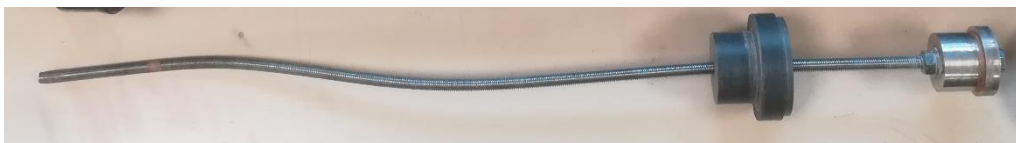


Figure 10 : Tige filetée M8 ayant flambée

Il est évident que l'argile brut est trop visqueuse et qu'il faut lui ajouter de l'eau pour la fluidifier.

12. Argiles préparées

Pour la suite, pour trouver l'argile idéale, 6 préparations sont faites avec 2%, 4%, 6%, 8%, 10% et 12% d'apport massique en eau. L'objectif derrière est de mesurer le taux d'humidité dans l'argile et d'établir une loi entre le taux d'humidité et le couple à fournir pour extruder chaque argile. 10 mesures par d'argiles sont réalisées en changeant de place le capteur dans l'échantillon à chaque fois. Finalement, les résultats ne sont pas concluants ni même exploitables car la valeur de la mesure ne fait que décroître entre le moment où le capteur est placé et jusqu'à 60 secondes plus tard. De plus il n'y a pas de différence notable entre les différentes argiles ce qui pousse à abandonner cette méthode de caractérisation.

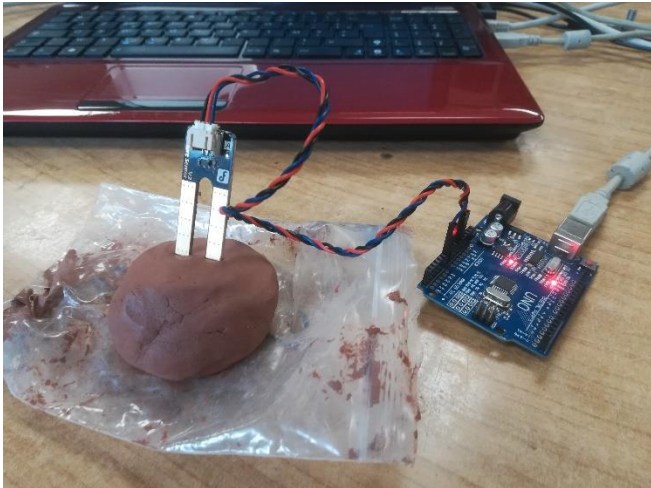


Figure 11 : Mesure de l'humidité grâce à une sonde d'humidité lue par un microcontrôleur Arduino uno

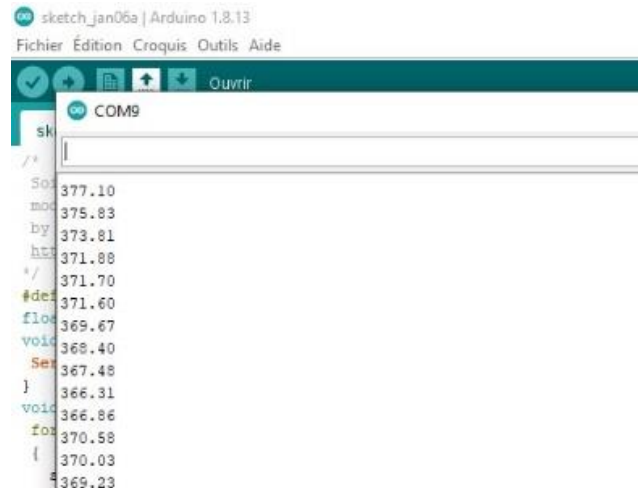


Figure 12 : Moniteur série de l'IDE d'arduino affichant la valeur de la conductivité de l'argile toutes les secondes.

Toujours dans l'optique de trouver une argile adéquate, une seringue transparente comme sur la photo ci-dessous est utilisée. Elle est remplie avec les différentes préparations d'argiles et le piston est poussé à la main afin de déterminer la "meilleure" argile en termes d'efforts à fournir, de tenue entre couches et d'état de surface.



Figure 13 : Différentes argiles à tester

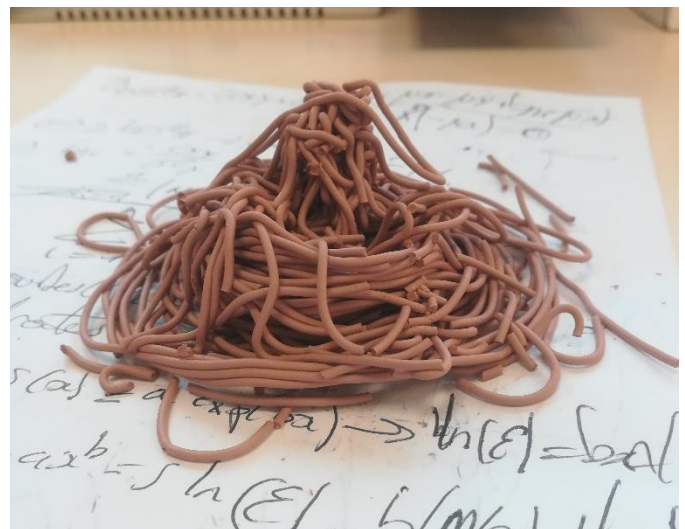


Figure 14 : Filament obtenu à la main

13. Résultats

Tableau récapitulatif des résultats obtenus :

Pourcentage d'eau	Equivalent en masse	Observations
2%	3g	Très dur à extruder. Fil dur, peu malléable et sèche très vite. Pas d'adhérence entre les couches
4%	6g	Dur à extruder. Fil un peu dur, pas suffisamment malléable et sèche trop vite. Légère adhérence entre les couches
6%	9g	Facile à extruder. Fil malléable qui accroche bien aux couches inférieures
8%	12g	Encore plus facile à extruder. Fil lisse qui accroche très bien aux couches inférieures
10%	15g	De plus en plus facile à extruder. Fil lisse qui accroche très bien aux couches inférieures
12%	18g	Pas d'amélioration notable, toujours très facile à extruder. Fil lisse qui accroche très bien aux couches inférieures

La meilleure argile est celle contenant entre 10% et 12% d'eau. C'est avec celle-ci que la mesure de couple est refaite. Entre temps, la buse de la seringue a été changée (usinée en alu avec le même diamètre) et la tige filetée est maintenant une tige filetée M10. L'argile sort très bien avec l'aspect souhaité et un couple mesuré de 4 N.m.

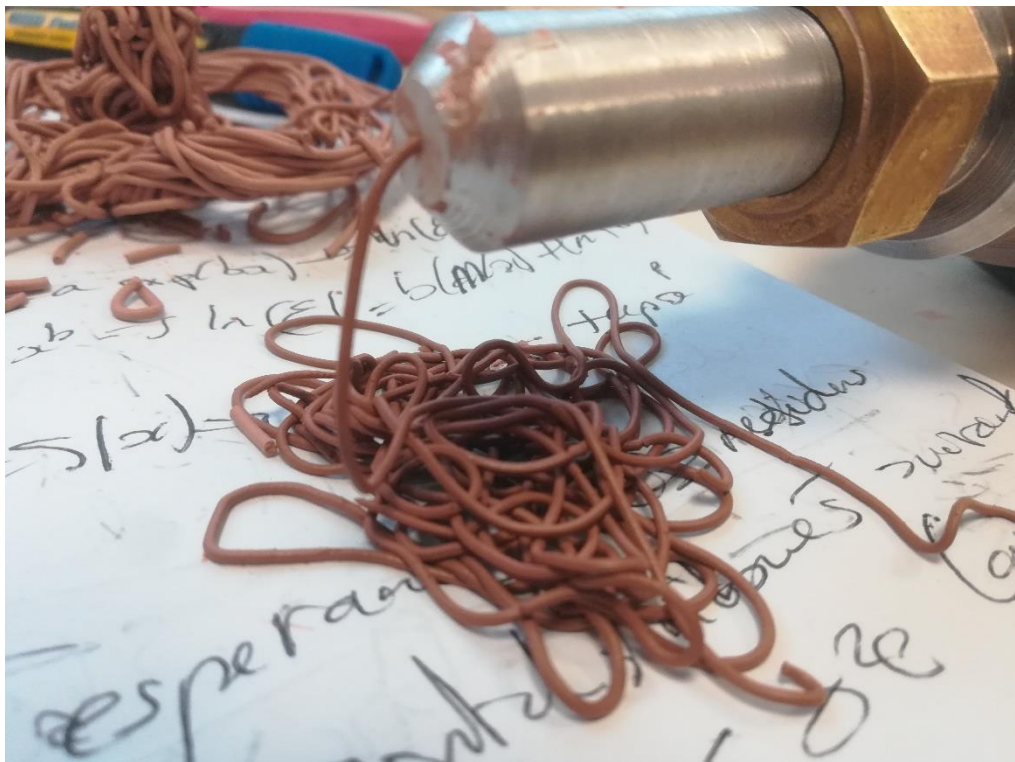


Figure 15 : Filament obtenu lors de la mesure du couple

VII. Forces mises en jeu

L'intérêt du calcul des forces mises en jeu est de comprendre pourquoi il y a eu des dommages irréversibles sur la tige filetée M8, de permettre de dimensionner les composants mécaniques et d'estimer les pertes de charges.

14. Kellermann et Klein

La relation de Kellermann-Klein permet de relier le couple de serrage C_s à la force de serrage F_s qui correspond à la tension dans la vis ou à la force générée par le bout d'une vis.

$$C_s = F_s \cdot (C_1 + C_2 + C_3)$$

- C_s : couple de serrage (N.m) = **4 N.m**
- F_s : force de serrage (N)
- C_1 : $pas/2\pi$ (m)
- C_2 : $\mu_t \cdot D_{moy}/2$ (m)
- C_3 : $\mu_h \cdot 0,58 \cdot d_{moy}$ (m)
- $\mu_t = \mu_{acier-acier} = 0,2$
- $\mu_h = \mu_{acier-PVC} = 0,217$

Ce qui donne :

$$F_s = \frac{C_s}{\left(\frac{pas}{2\pi} + 0,58 \cdot D_{moy} \cdot \mu_t + d_{moy} \cdot \mu_h\right)}$$

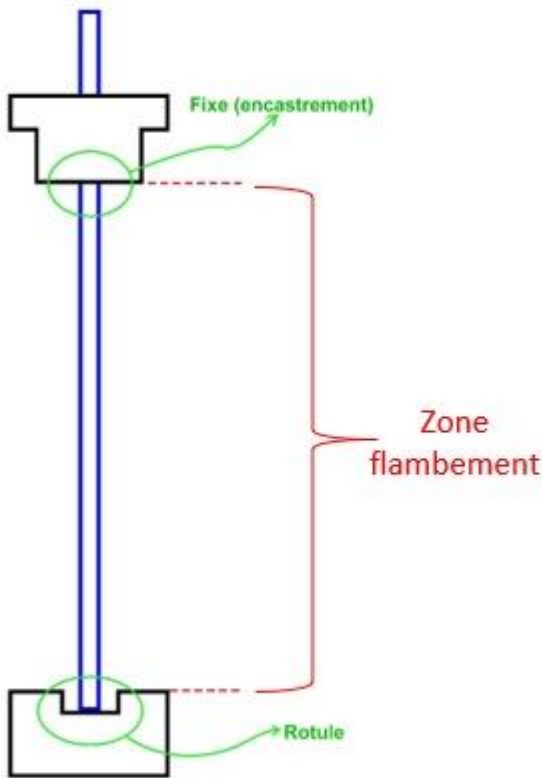
15. Charge limite d'Euler (limite au flambement)

Lors des premières mesures de couple avec la seringue en PVC, l'argile était trop visqueuse. En forçant la vis à tourner, la charge critique d'Euler a été dépassée, c'est à dire la force limite avant flambement de la vis (cf figure 6).

On peut estimer cette force limite grâce à la relation de la charge critique d'Euler :

$$F_e = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_G}{L_k^2}$$

- E : Module d'Young (210GPa pour l'acier)
- I_G : Moment quadratique. C'est une section circulaire, on prend le rayon moyen de la vis soit 8,376mm. Donc $I_G = \pi^2 \cdot D^4 / 32$
- L_k : Longueur de l'objet multiplié par un coefficient dépendant des liaisons de l'objet.



Nous avons les liaisons encastrement et rotule. Cette combinaison correspond à :

- $L_k = 0,699 \cdot L$
- L : Longueur de la zone de flambement

0,699 étant le coefficient correspondant à la combinaison encastrement-ponctuelle

Figure 16 : Schéma explicatif charge critique d'Euler

Tableau récapitulatif des valeurs obtenues en fonction des vis :

Vis	Pas (mm/tr)	Diamètre (fond de file) en mm	F _s en N	Pression max en Pa	F _e en N
M10	1,5	8,4	1318	27510	2950
M8	1,25	6,6	1668	34815	7437
T8	8	6,5	1164	24296	2522

Pour éviter que la tige fileté flambe, il faut que $F_s < F_e$. C'est une tige filetée T8 qui sera utilisée, d'après le tableau, elle ne sera pas endommagée.

16. Pertes de charges

L'argile sera transportée via un tuyau jusqu'à l'extrudeuse. Des pertes de charges sont à prévoir.

Le nombre de Reynolds permet de déterminer si un écoulement est laminaire ou turbulent :

On sait que si $Re < 2000$, on est en écoulement laminaire.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

- ρ = masse volumique argile (kg/m^3) = 1700 kg/m^3
- V = Vitesse de l'argile (m/s) $\ll 0,01 \text{ m/s}$
- D = Diamètre du tuyau (m) = 0,01 m
- μ = Viscosité dynamique de l'argile (Pa.s)

AN :

$$Re = \frac{1000 * 0.01 * 0.01}{\mu} = \frac{0.1}{\mu} \ll 2000$$

$Re \ll 2000$ même sans connaître la viscosité de l'argile, donc écoulement laminaire. On peut même dire que $Re < 0,1$ si on prend la viscosité de l'eau qui vaut 1 Pa.s, ce qui est inférieur à la viscosité de l'argile.

On estime les pertes de charges avec la relation suivante :

$$\Delta p^* = \lambda \left(\frac{1}{2} \rho V_{moy}^2 \right) \frac{L}{D} \quad \text{Avec : } \lambda = \frac{64}{Re}$$

Sans valeur précise du nombre de Reynolds on ne peut pas estimer les pertes de charges. Le délai prévu pour la caractérisation de l'argile n'est pas suffisant pour déterminer sa viscosité.

VIII. Conception détaillée du système déporté (solution 3)

Le système doit offrir une capacité suffisante et doit être déporté car il est trop lourd pour être déplacé par les axes de l'imprimante et cela peut causer des soucis surtout dans les phases d'accélération. Il s'agit d'une cartouche qui sera la réserve d'argile et qui sera reliée à la buse, qui elle sera fixée sur l'axe Z de l'imprimante, par un tuyau en PTFE $\varnothing 10\text{mm}$.



Figure 17 : Cartouche (voir annexe 8 : liste des pièces)



Figure 18 : Tuyau PTFE D=12mm d=10mm

Cette cartouche est vendue avec un piston, mais celui-ci n'est pas conçu pour être tiré (seulement poussé). Il faut donc concevoir un système pouvant pousser/tirer le piston tout en autorisant la rotation de la vis trapézoïdale qui le pousse. La forme de l'intérieur de la tête de piston est telle qu'on peut y emboîter un assemblage de pièces qui va pouvoir résoudre le problème.

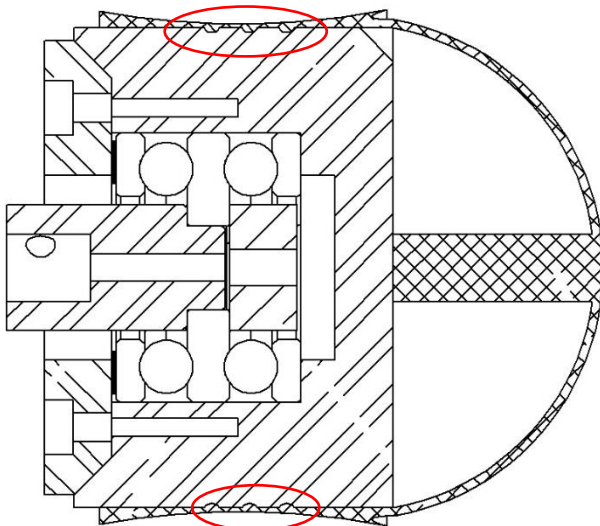


Figure 19 : Vue en coupe de la tête de piston. Détails en annexe 6



Figure 20 : Tête de piston assemblée

17.Support de la cartouche

La cartouche doit être maintenue dans un support de manière à ce que la tête de piston puisse être comprimé. La vis trapézoïdale est entraînée par un moteur pas à pas nema23 avec réducteur 15.3:1 intégré. Le nema23 est guidé en translation par des douilles à billes LM8UU montés sur deux tiges lisses reliées aux tiges filetées par des manchons. Ainsi, le moteur avance en même temps que le piston. Les pièces du montage sont pour certaines imprimées 3d et découpées laser pour d'autres. Le nema23 est contrôlé en tant qu'extrudeuse via un driver TB6600 lui-même branché sur la carte Ramps.

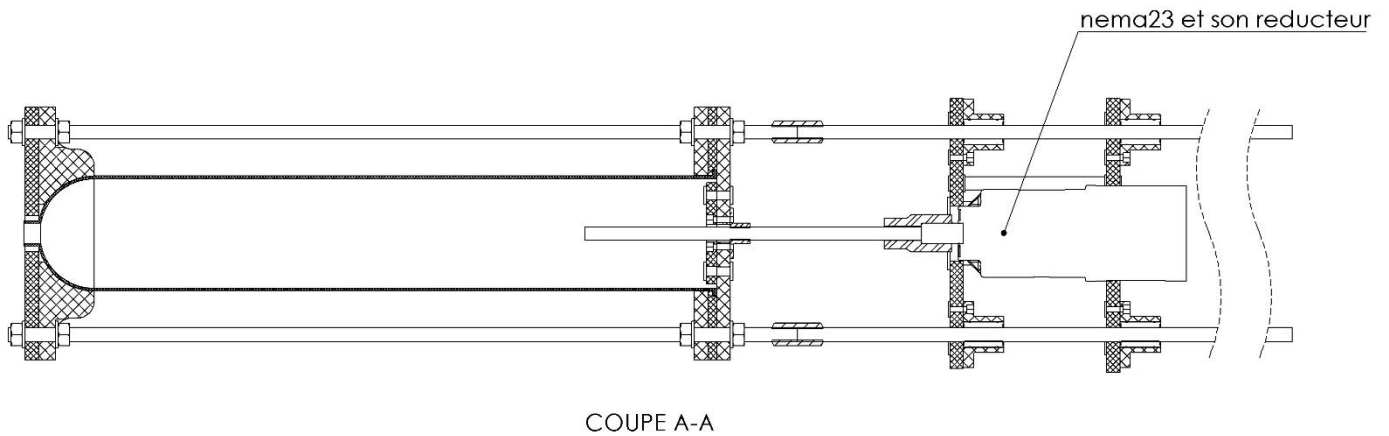


Figure 21 : Vue en coupe du support motorisé de la cartouche (tête de piston non représentée)

Les billes à l'intérieur des douilles à billes LM8UU sont montées sur une bague intérieure en plastique souple, ce qui reprend les défauts angulaires. De plus les supports des douilles sont flottants et seront serrés au montage ce qui permet de contourner l'hyperstatisme. On a donc une glissière générée par 4 pivots glissants (détails en annexe 10 et 11).

L'écrou fixe de la tige filetée T8 est également flottant et sera serré à la fin du montage pour les mêmes raisons.

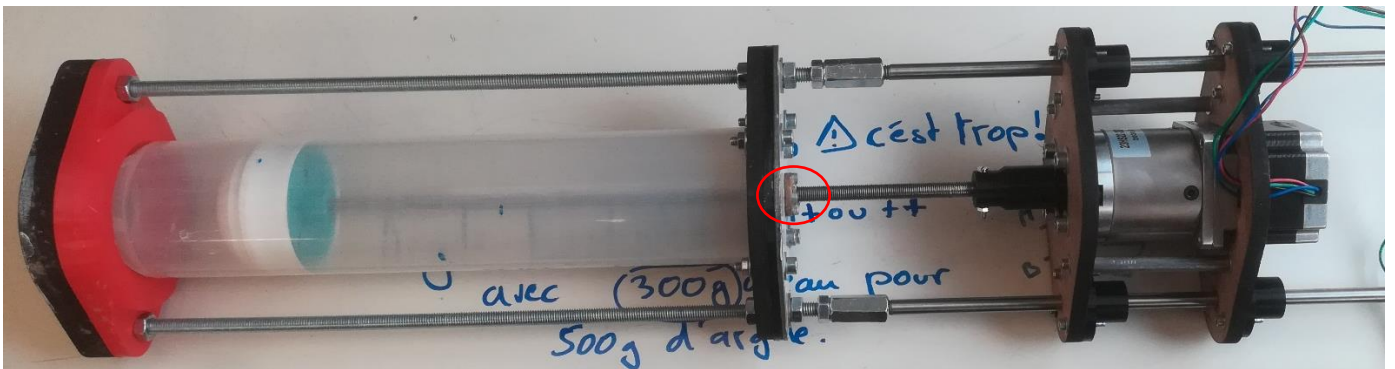


Figure 22 : Support motorisé de la cartouche fabriquée

18.Extrudeuse à vis sans fin (Dart)

Afin d'avoir un maximum de contrôle sur l'écoulement de l'argile en sortie de buse, il est nécessaire de concevoir une extrudeuse à vis sans fin. Ce dispositif s'inspire des méthodes d'injection plastique dans l'industrie. Le système d'exploitation de l'imprimante ne permettant pas de gérer deux extrudeuses indépendamment, l'extrudeuse est branchée sur le driver TB6600. Le nema23 de la cartouche et le nema17 de l'extrudeuse tourne donc en même temps.

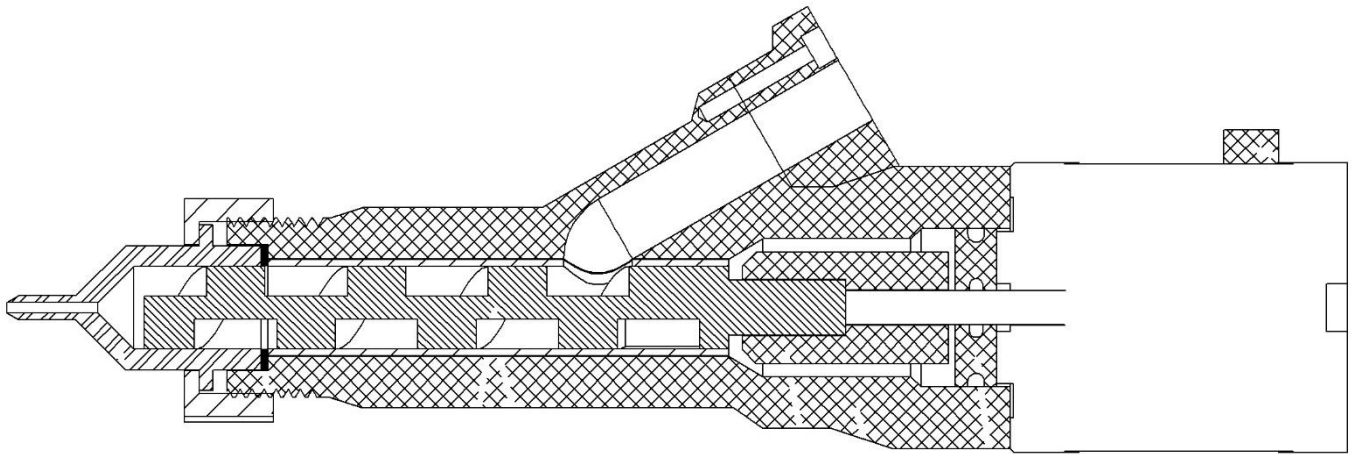


Figure 23 : Vue en coupe de l'extrudeuse. Détails en annexe 4

Le corps de l'extrudeuse se visse directement sur le moteur pas à pas nema17. L'axe du moteur est couplé à la vis sans fin grâce à un coupleur 5-8 flexible pour supprimer l'hyperstatisme. La vis sans fin n'est pas en contact direct avec le plastique, elle tourne dans un tube en acier qui s'enfonce en force dans le corps de l'extrudeuse. La buse, usinée en aluminium, se place en bout d'extrudeuse et est bloqué par un écrou M26 en laiton. L'étanchéité entre la buse et le corps est réalisé par un joint en carton découpé laser. Pour éviter que l'argile vienne s'installer dans les roulements du moteur, une bague d'étanchéité entre le moteur et le coupleur assurera l'étanchéité (Les joints toriques de cette bague ne sont pas représentés). Des inserts sont prévus pour éviter de visser directement les vis dans le plastique (voir annexe 8).

Le corps de l'extrudeuse est imprimé en 3D sur la Prusa mk3 du Fablab.



Figure 24 : Eclaté de l'extrudeuse

19. Fixation tuyau

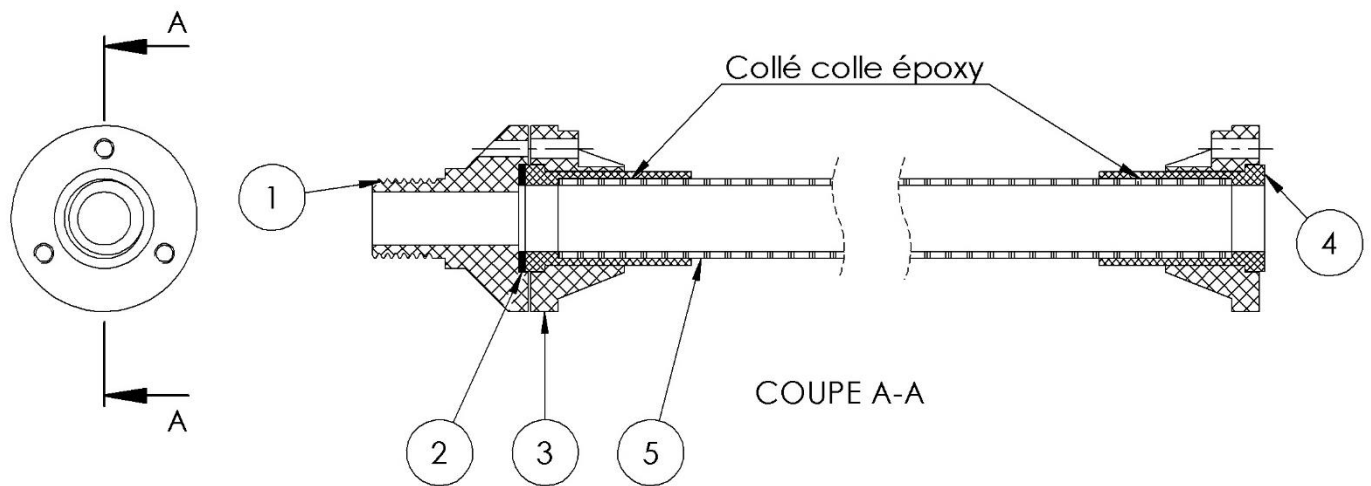


Figure 25 : Vue en coupe de la fixation du tuyau sur la cartouche et sur l'extrudeuse (voir annexe 7)

La pièce 1 se visse directement sur la cartouche qui dispose d'un taraudage à sa sortie. La pièce 4 est collée en bout de tuyau et elle est solidaire du tuyau 5. La bague 3, qu'il faut insérer dans le bon sens autour du tuyau avant de coller la pièce 4, va venir plaquer cette dernière sur la pièce 1, mais avant tout sur le joint qui assurera l'étanchéité de la fixation. Avec cette méthode, le tuyau peut tourner tant que la pièce 3 n'est pas serrée. Des inserts sont prévus pour éviter de visser les vis directement dans le plastique (voir annexe 8)

Ces pièces sont imprimées en 3D sur la Prusa mk3 du Fablab.



Figure 27 : Pièce 1 qui se visse dans la cartouche



Figure 26 : Extrémité du tuyau avec pièce 4 collé et la bague 3

20. Traitement de surface du tube en acier (expérimental)

Le tube en acier est soumis à l'humidité de l'argile. Il risque donc avec le temps de s'oxyder. Pour parer à cela une fine pellicule de cuivre est déposée à sa surface en le plongeant dans une solution d'ions cuivre Cu^{2+} fortement diluée.



Figure 28 : Traitement de surface du tube en acier

Afin de fixer cette couche de cuivre sur l'acier, il est chauffé au four à 200° pendant 10 minutes. D'où l'aspect noir de la pièce.

21.La buse

La buse est usinée en aluminium. Elle vient se placer un bout d'extrudeuse et est maintenue par un écrou M26 (voir figure 22). Le diamètre du trou à sa sortie est de 1,5mm conformément au cahier des charges.

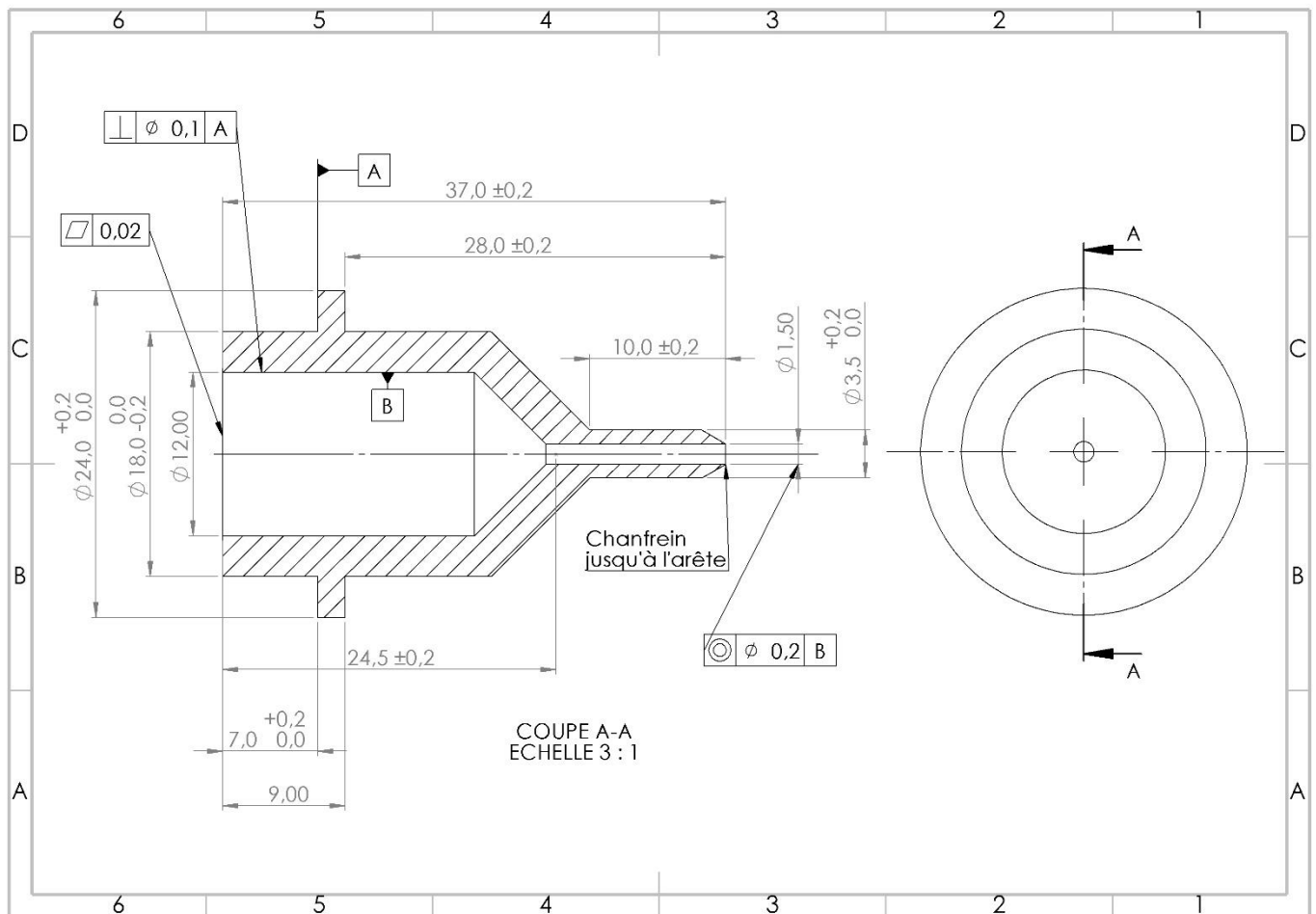


Figure 29 : Dessin de définition de la buse

IX. Conclusion

Durant le stage, nombre d'objectifs ont été atteints comme la réalisation du système déporté avec son extrudeuse et sa réserve. D'autres n'ont pas été atteints par manque de temps notamment la caractérisation d'argile et de sa viscosité (et réaliser des calculs de pertes de charges précis) qui pourrait faire à elle seule l'objet d'un stage. Des améliorations sont envisageables comme sur le montage/démontage de la cartouche de son support ou le problème lié au contrôleur TB6600 qui ne fournit pas assez de puissance pour deux moteurs. Il faut que le nema23 ait son propre asservissement et qu'il soit contrôlé de manière à maintenir une pression constante dans la cartouche.

Je me suis retrouvé pendant 2 mois et demi avec d'autres stagiaires et services civiques qui travaillaient sur d'autres projets, ce qui m'a permis de m'intégrer facilement. J'ai pu apporter un regard nouveau pour répondre aux problématiques du projet grâce à mes connaissances en génie mécanique et en impression 3D. J'ai appris à utiliser un nouveau logiciel de CAO et les personnes qui m'ont entouré m'ont apporté des connaissances, des conseils et du soutien.

J'ai pu m'améliorer dans la hiérarchisation de mes idées et dans la gestion de mon temps en respectant les délais imposés, ce qui sera indispensable à l'avenir dans le milieu professionnel. Il me reste tout de même à progresser dans la gestion de mon temps à passer sur certaines tâches.

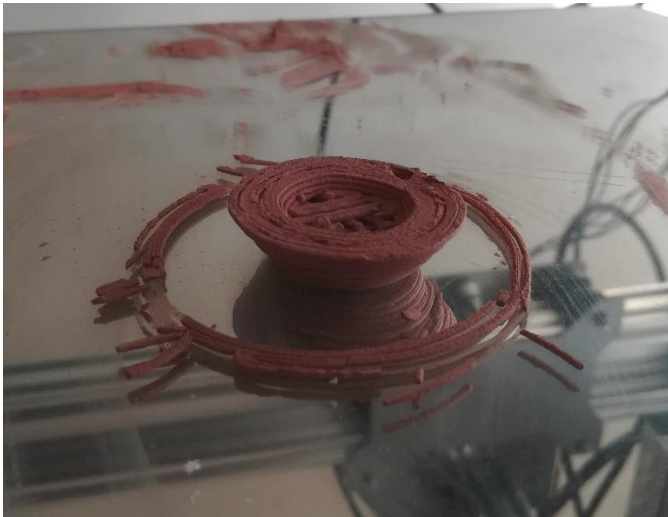


Figure 30 : Pièce obtenue avec la mini extrudeuse



Figure 31 : Impression avec l'extrudeuse "Dart"

X. Annexes

22. Annexe 1 : Imprimante 3D Prusa I3 MK3S



BASIC INFORMATION

- **Build volume :** 25×21×21 cm (9.84"×8.3"×8.3")
- **Layer height:** 0.05 - 0.35 mm
- **Nozzle:** 0.4mm default, wide range of other diameters/nozzles supported
- **Filament diameter:** 1.75 mm
- **Supported materials:** Wide range of thermoplastics, including PLA, PETG, ASA, ABS, PC (Polycarbonate), CPE, PVA/BVOH, HIPS, PP (Polypropylene), Flex, nGen, Nylon, Carbon filled, Woodfill and other filled materials.
- **Max travel speed:** 200+ mm/s
- **Max nozzle temperature:** 300 °C / 572 °F
- **Max heatbed temperature:** 120 °C / 248 °F
- **Extruder:** Direct Drive, Bondtech gears, E3D V6 hotend
- **Print surface:** Removable magnetic steel sheets with different surface finishes, heatbed with cold corners compensation
- **Safety features:** IR filament sensor, high-quality Delta PSU with Power Panic, 3 thermistors, RPM monitoring
- **LCD Screen:** Monochromatic LCD

23. Annexe 2 : Imprimante 3D Creality Ender-3



Technical Specifications :

- **Modeling Technology:** FDM (Fused Deposition Modeling)
- **Printing Size:** 220x220x250mm
- **Printing Speed:** 180mm/s
- **Filament:** 1.75mm PLA, TPU, ABS
- **Working Mode:** Online or SD offline
- **File Format:** STL, OBJ, G-code
- **Machine Size:** 440x440x465mm
- **Net Weight:** 8KG
- **Power Supply:** 100-265V 50-60HZ
- **Output:** 24V 15A 270W
- **Layer Thickness:** 0.1-0.4mm
- **Nozzle Diameter:** 0.4mm
- **Printing Accuracy:** ± 0.1 mm
- **Nozzle Temperature:** 255°C
- **Hotbed Temperature:** 110°C

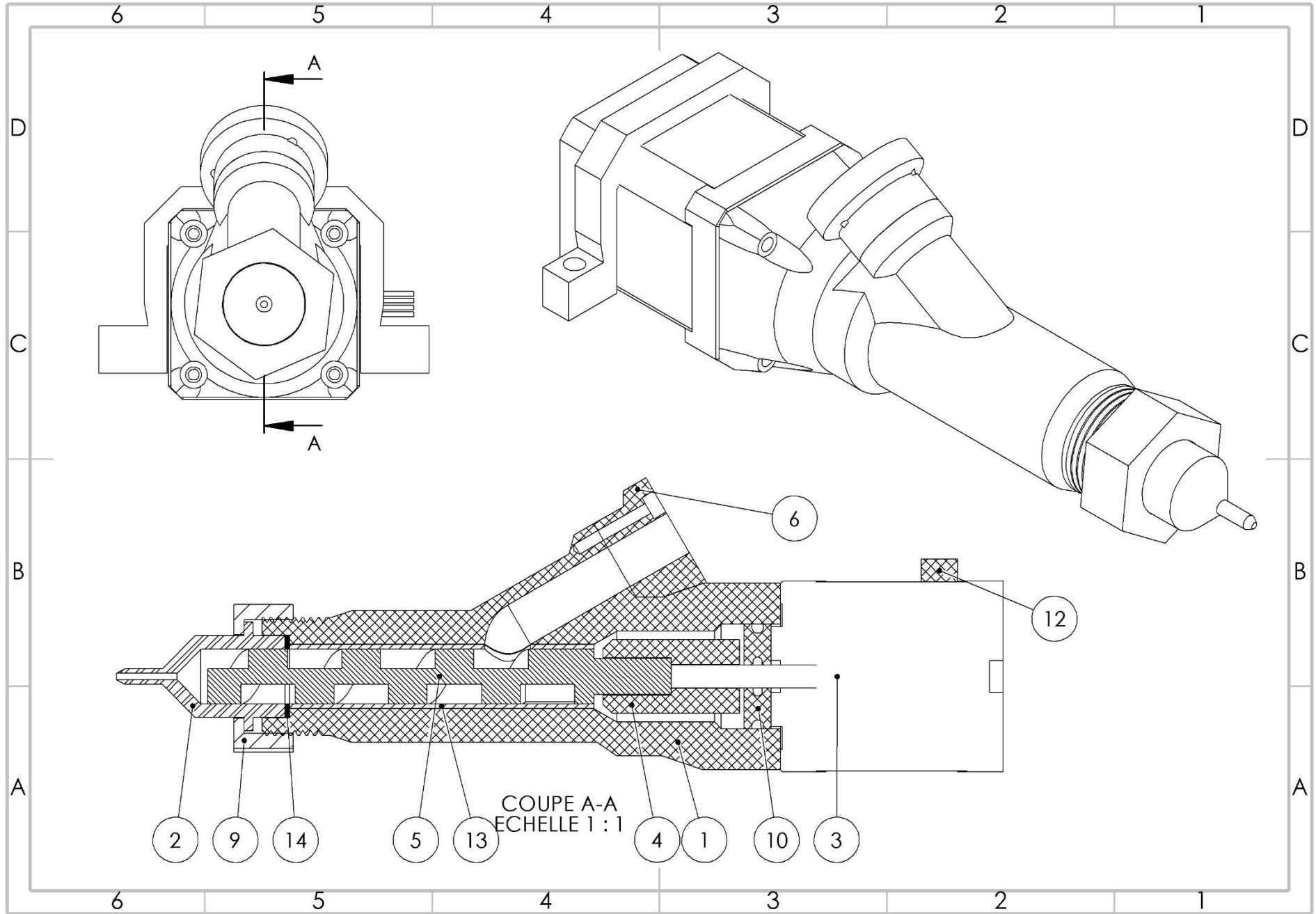
24. Annexe 3 : découpeuse, graveuse laser



The Speedy Series

	Speedy 100	Speedy 300	Speedy 360	Speedy 400
Available products	Speedy 100 Speedy 100 fiber* Speedy 100 flexx	Speedy 300 Speedy 300 fiber* Speedy 300 flexx	Speedy 360 Speedy 360 fiber Speedy 360 flexx	Speedy 400 Speedy 400 flexx
Overall dimensions (WxDxH)	38.7 x 29.1 x 39.1	44.4 x 35.9 x 41.5"	48.1 x 31.1 x 41.5 inch	55.4 x 37.8 x 42.1 inch
Working area	24 x 12 inch	29 x 17 inch	32 x 20 inch	40 x 24 inch
Max. height of workpiece	6.7 inch	7.9 inch	11 inch	12 inch
Max. processing speed				
CO ₂ laser	110 inch/sec	140 inch/sec	140 inch/sec	170 inch/sec
Fiber laser	110 inch/sec	140 inch/sec	78.7 inch/sec	78.7 inch/sec
Acceleration	4g	5g	5g	5g
Laser power				
CO ₂ laser	30 – 60 watts	30 – 120 watts	40 – 120 watts	40 – 120 watts
Fiber laser	10 – 30 watts	10 – 50 watts	10 – 50 watts	10 – 50 watts

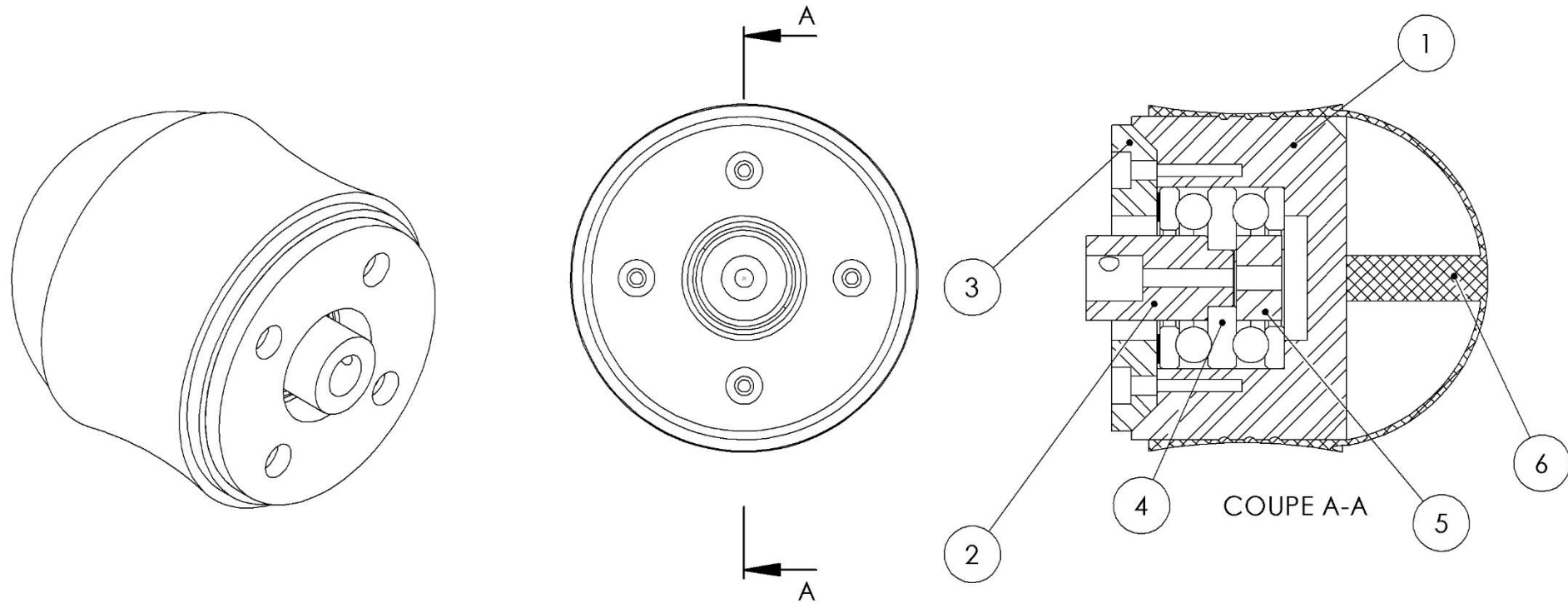
25. Annexe 4 : Extrudeuse « Dart »



26. Annexe 5 : Nomenclature extrudeuse « Dart »

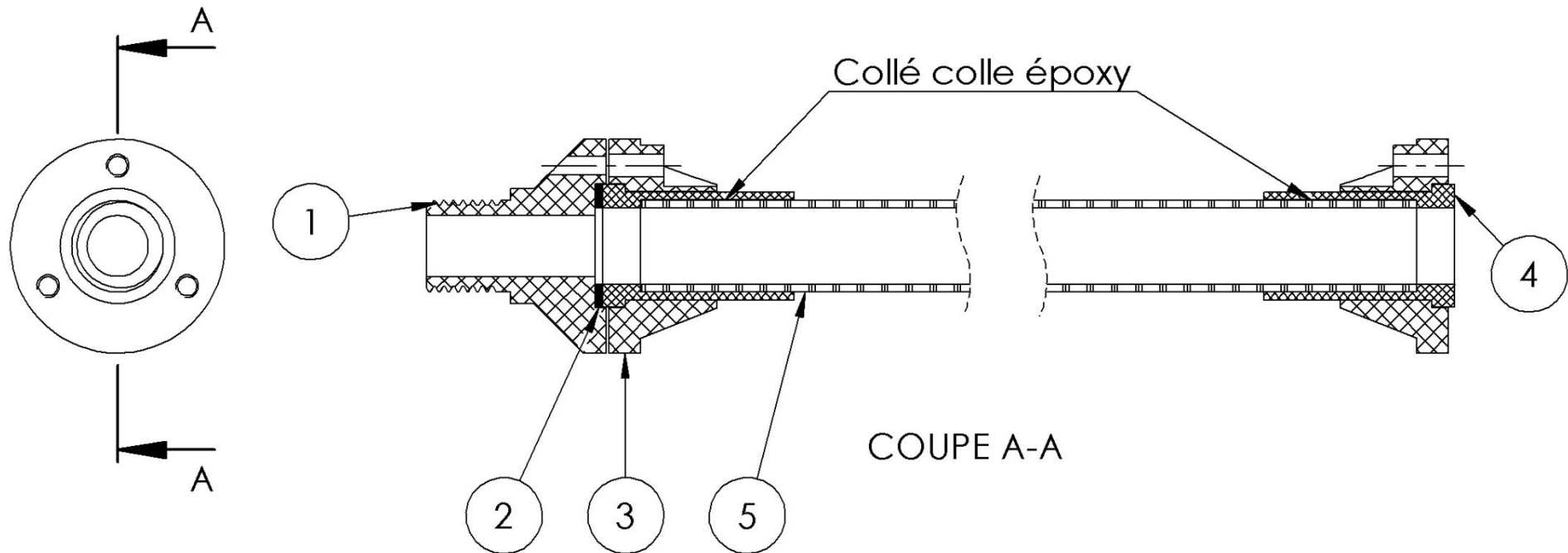
No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION
1	Corps_extrudeuse	
2	buse	
3	moteur_nema17	
4	coupleur_nema_vsf	
5	vis_sans_fin (vsf)	
6	adaptateur_diametre	Pour brancher le tuyau
9	Ecrou_laiton_M26	
10	bague_ectancheite	Joints toriques non représentés
12	support_extrudeuse	
13	tube	En acier
14	joint_buse_extrudeuse	
15	4_Vis_M3	L=16mm

27. Annexe 6 : Tête de piston



Numéro pièce	Nom pièce	DESCRIPTION
1	interieur_piston	
2	fond_tige	
3	rondelle	
4	butee_double_effet	Dext=32 , Dint=10 , h=22
5	fond_tige_blocage	
6	tete_piston	

28. Annexe 7 : Fixation du tuyau

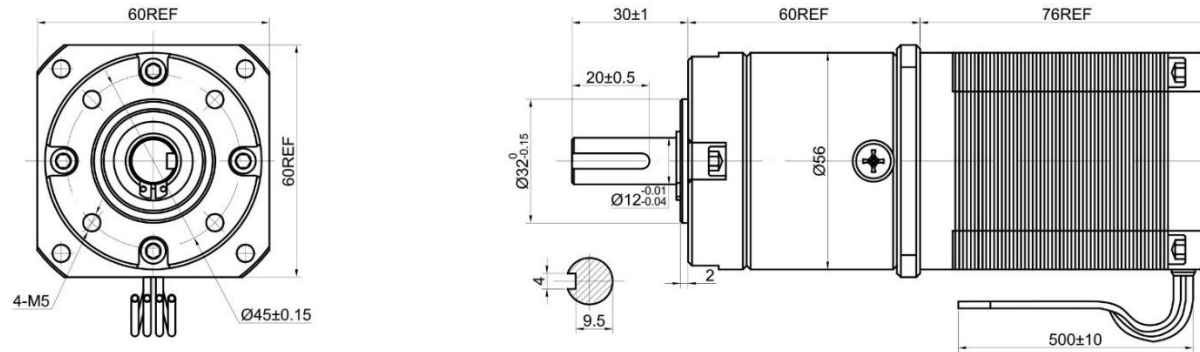


No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	fixation_bague		1
2	joint_plat	D=16 , d=10 , h=1	1
3	bague		2
4	connecteur_tuyau		2
5	tuyau		1

29. Annexe 8 : Liste des pièces

<p>Cartouche</p> 	<p>1,5L Diamètre intérieur 61mm</p>	<p><u>Dosage2000</u> https://www.usinenouvelle.com/expo/consommables-de-dosage-optimum-p15833.html</p>
<p>Nema23 avec réducteur</p> 	<p>Nema23 avec réducteur intégré</p>	<p><u>Stepperonline</u> https://www.omc-stepperonline.com/economy-planetary-gearbox/nema-23-stepper-motor-bipolar-l76mm-w-gear-raio-151-planetary-gearbox-23hs30-2804s-pg15.html?mfp=184-frame-size-mm%5BNema%2023%20%2857%20x%2057%29%5D&limit=100</p>
<p>LM8UU</p> 	<p>Pour arbre de diamètre 8mm</p>	<p><u>Reprap France</u> https://www.reprap-france.com/produit/323-roulement-lineaire-lm8uu</p>
<p>Insert</p> 	<p>Pour vis M3 Diamètre d'insertion 4mm</p>	<p><u>Rs-Online</u> https://fr.rs-online.com/web/p/inserts-filetes/0278534/</p>

30. Annexe 9 : Spécifications nema23 avec réducteur 15.3 : 1

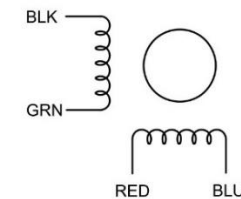


SPECIFICATION	CONNECTION	BIPOLAR
AMPS/PHASE		2.80
RESISTANCE/PHASE(Ohms)@25°C		1.13±10%
INDUCTANCE/PHASE(mH)@1KHz		5.40±20%
HOLDING TORQUE w/o GEARBOX(Nm)[lb-in]		1.89[16.73]
GEAR RATIO		15 ³ / ₁₀
EFFICIENCY		81.00%
STEP ANGLE w/o GEARBOX(°)		1.80
BACKLASH@NO-LOAD		<=1,5°
MAX.PERMISSIBLE TORQUE(Nm)		30.00
MOMENT PERMISSIBLE TORQUE(Nm)		50.00
SHAFT MAXIMUM AXIAL LOAD(N)		100.00
SHAFT MAXIMUM RADIAL LOAD(N)		200.00
WEIGHT(Kg)[lb]		1.90[4.19]
TEMPERATURE RISE:MAX.80°C (MOTOR STANDSTILL;FOR 2PHASE ENERGIZED)		
AMBIENT TEMPERATURE -10°C-50°C[14°F-122°F]		
INSULATION CLASS B 130°C[266°F]		

TYPE OF CONNECTION (EXTERN)		MOTOR	
PIN NO	BIPOLAR	LEADS	WINDING
1	A —	BLK	A
2	A\ —	GRN	A\
3	B —	RED	B
4	B\ —	BLU	B\

FULL STEP 2 PHASE-Ex. ,
WHEN FACING MOUNTING END (X)

STEP	A	B	A\	B\		CCW
1	+	+	-	-	↓	↑
2	-	+	+	-		
3	-	-	+	+	↑	↓
4	+	-	-	+		



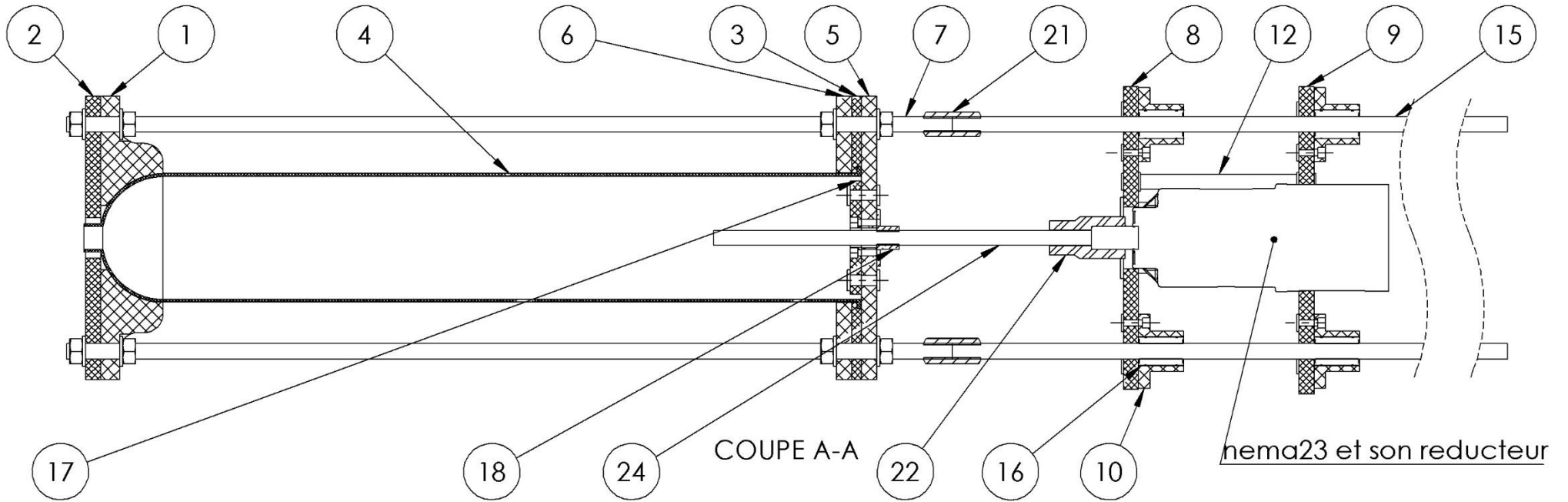
STEPPERONLINE®

APVD		8.20.2018
CHKD		
1:1.5	DRN	
SCALE	SIGNATURE	DATE

STEPPER MOTOR

23HS30-2804S-PG15

31. Annexe 10 : Support de la cartouche



32. Annexe 11 : nomenclature support de la cartouche

No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	extremite_courbe	Epouse la forme de la cartouche	1
2	extremite	Vient renforcer la pièce 1	1
3	fixe_seringue_etage	Epaulement circulaire pour que la colerette de la cartouche vienne s'y loger	1
4	cartouche		1
5	fixe_seringue_ecrou	Vient prendre en sandwich avec la pièce 6, la pièce 3	1
6	fixe_seringue	Vient prendre en sandwich avec la pièce 5, la pièce 3	1
7	tige_filetee		2
8	gli_moteur_axe	Vient se fixer sur le réducteur	1
9	gli_moteur	Vient tenir le moteur	1
10	gli_roulement_lineair	Se fixe sur les pièces 8 et 9 et accueille les douilles à billes	4
12	entretoise_longue	Défini l'espace entre les pièces 8 et 9	2
15	tige_lisse	Guide les douilles à billes	2
16	douille_à_bille	LM8UU	4
17	support_ecrous	Permet de maintenir les écrous des vis de l'écrou T8	1
18	ecrou_T8	Vissé sur la pièce 5 (fixe/piston et moteur)	1
21	manchon_M8_30mm	Solidarise tige filetées et tiges lisses	2
22	coupleur_nema_23		1
24	tige_filetee_T8	Permet l'avancement du piston	1

34. Annexe 13 : Diagramme de Gantt

Semaine	Janvier				Février			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Prise en main de la machine								
Recherche de projets similaires								
Rédaction cahier des charges								
Recherche de solutions								
Conception préliminaire								
Choix de la solution								
Caractérisation de l'argile								
Calcul des forces mises en jeu								
Dimensionnement des éléments mécaniques								
Conception détaillée de la solution								
Fabrication								

Le projet Galatee lancé en 2019 et développé au Fablab de l'IUT de Bordeaux a pour but de réaliser des moules de fonderie grâce à la technologie de l'impression 3D. Ce stage est la suite des travaux déjà réalisés par d'autres stagiaires pour se concentrer sur une partie essentielle qui est l'extrudeuse (Le reste de la machine étant opérationnel). Sous la directive de Jean-Marie George pour la rédaction du cahier des charges, la première étape est de caractériser une argile pour la rendre « imprimable » en y ajoutant des doses précises d'eau, puis de calculer les forces mises en jeu pour dimensionner le futur système et ses composants mécaniques. Plusieurs solutions sont imaginées mais la solution choisie qui répond au cahier des charges est un système déporté qui comporte une extrudeuse est une réserve déportée. Cette réserve est composée d'une cartouche et d'un moteur pas à pas qui la met sous pression pour acheminer l'argile par un tuyau jusqu'à l'extrudeuse qui est l'élément se déplaçant sur les axes de l'imprimante. Cette dernière est composée d'une vis sans fin qui, en tournant, fait sortir l'argile par la buse, tout en offrant un contrôle précis sur le débit.

The Galatee project launched in 2019 and developed at the Fablab of the IUT in Bordeaux aims to create foundry moulds using 3D printing technology. This internship is the next step of work already done by other students to focus on an essential part which is the extruder (The rest of the machine being operational). Under the directive of Jean-Marie George for the drafting of the specifications, the first step is to characterize a clay to make it « printable » by adding precise doses of water, then calculate the forces involved to size the future system and its mechanical components. Several solutions are imagined but the chosen solution that meets the specifications is the remote system that includes an extruder is a remote reserve. This reserve consists of a cartridge and a stepper motor that puts it under pressure to route the clay through a pipe to the extruder which is the element moving along the axes of the printer. The latter consists of a worm screw which, by turning, pulls out the clay through the nozzle, while offering precise control over the flow.

Mots clé :

- Extrusion
- Argile
- Imprimante3D
- Conception
- Vis sans fin

35. Liste des figures

Figure 1 : Hiérarchie du Fablab.....	4
Figure 2 : Vue globale de la machine.....	5
Figure 3 : Vue arrière de l'électronique de la machine.....	5
Figure 4 : Mini extrudeuse.....	10
Figure 5 : Croquis extrudeuse déportée	11
Figure 6 : Schéma cinématique reserve.....	12
Figure 7 : Schéma cinématique extrudeuse	13
Figure 8 : Contrôleur TB6600	15
Figure 9 : Seringue PVC fabriquée avant le début du stage.....	16
Figure 10 : Tige filetée M8 ayant flambée	16
Figure 11 : Mesure de l'humidité grâce à une sonde d'humidité lue par un microcontrôleur Arduino uno	17
Figure 12 : Moniteur série de l'IDE d'arduino affichant la valeur de la conductivité de l'argile toutes les secondes.	17
Figure 13 : Différentes argiles à tester	17
Figure 14 : Filament obtenu à la main	17
Figure 15 : Filament obtenu lors de la mesure du couple	18
Figure 16 : Schéma explicatif charge critique d'Euler	20
Figure 17 : Cartouche (voir annexe 8 : liste des pièces)	22
Figure 18 : Tuyau PTFE D=12mm d=10mm.....	22
Figure 19 : Vue en coupe de la tête de piston. Détails en annexe 6	22
Figure 20 : Tête de piston assemblée	22
Figure 21 : Vue en coupe du support motorisé de la cartouche (tête de piston non représentée).....	23
Figure 22 : Support motorisé de la cartouche fabriquée.....	23
Figure 23 : Vue en coupe de l'extrudeuse. Détails en annexe 4	24
Figure 24 : Eclaté de l'extrudeuse	24
Figure 25 : Vue en coupe de la fixation du tuyau sur la cartouche et sur l'extrudeuse (voir annexe 7).....	25
Figure 26 : Extrémité du tuyau avec pièce 4 collé et la bague 3	25
Figure 27 : Pièce 1 qui se visse dans la cartouche	25
Figure 28 : Traitement de surface du tube en acier	26
Figure 29 : Dessin de définition de la buse	27
Figure 30 : Pièce obtenue avec la mini extrudeuse	28
Figure 31 : Impression avec l'extrudeuse "Dart"	28

36. Glossaire

A

ABS	
Acrylonitrile butadiène styrène	5

D

DIY	
Do It Yourself	4

P

PET	
Polytéréphtalate d'éthylène	5
PLA.....	5
Acide polylactique	5
PVC	
Polychlorure de vinyle	16

¹ Arduino Méga : microcontrôleur programmable de la marque Arduino permettant de faire du prototypage rapide.

² Ramps : Carte additionnelle qui vient se brancher sur une carte Arduino Méga offrant des possibilités supplémentaires comme contrôler des moteurs pas à pas, des buses chauffantes ou des ventilateurs car elle supporte des courants plus intenses.

³ Firmware Marlin : Marlin est un système d'exploitation conçu pour les imprimantes 3D. Il est libre d'accès et offre beaucoup de paramètres modifiables. C'est ce système d'exploitation qui est implanté sur l'Arduino Méga.

⁴ L'extrudeuse est composée d'un moteur, généralement pas à pas, qui entraîne la matière de manière directe ou indirecte au travers d'une buse qui va définir le diamètre du filament à sa sortie. La réserve de matière ne fait donc pas forcément partie de l'extrudeuse