

---

**Travail de fin d'études et stage[BR]- Travail de fin d'études : Développement et prototypage d'un système de tubage automatisé de séparateurs de faisceaux de tubes[BR]- Stage d'insertion professionnelle**

**Auteur :** Manti, Selim

**Promoteur(s) :** Duysinx, Pierre

**Faculté :** Faculté des Sciences appliquées

**Diplôme :** Master : ingénieur civil mécanicien, à finalité spécialisée en mécatronique

**Année académique :** 2021-2022

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/14381>

---

*Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

Université de Liège  
Faculté des Sciences Appliquées

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master  
Ingénieur civil mécanicien, à finalité spécialisée en mécatronique

---

---

Développement et prototypage d'un  
système de tubage automatisé de  
séparateurs de faisceaux de tubes

---

---

*Auteur :*  
Selim MANTI

*Promoteur :*  
Prof. Pierre DUYSINX

*Superviseur industriel :*  
Martin MARCHAL



Année académique 2021 — 2022

## Résumé

De nos jours, les techniques de fabrication additive présentent un intérêt grandissant et permettent de fabriquer des pièces complexes, impossibles à réaliser à l'aide de méthodes classiques. La société Aerosint se voit être un intervenant unique dans le domaine par sa technologie innovante de tête d'impression par déposition sélective de poudre. En injectant sélectivement de la matière à l'aide d'un réseau pneumatique de tubes, cette innovation ouvre la porte des procédés de lit de poudre multi-matière.

La société est en phase d'optimisation de ses produits et de leurs assemblages pour à terme accroître leur volume de production. Ainsi, il était impératif de limiter les opérations manuelles sur la tête d'impression et plus spécialement, le placement des tubes d'éjection. Ce travail a pour objectif de développer un système de tubage automatisé de manière à répondre aux attentes de l'entreprise. La conception s'est articulée autour d'éléments mécaniques, électriques et de programmation afin de proposer un prototype fonctionnel au terme de cette étude. Par la suite, des essais ont été réalisés afin de valider la conception. Enfin, les potentiels défauts ont été soulignés pour en proposer des améliorations qui seront utiles dans une version définitive de la machine.

Ce travail aura permis d'automatiser l'ensemble des opérations à fournir sur l'assemblage du réseau d'éjection de gaz et évite ainsi la présence d'une personne afin de l'épargner d'un processus long et fastidieux.

**Mots-clés :** Conception de machine, entraînement de tube, tubage, prototypage, sertissage

## **Abstract**

Nowadays, additive manufacturing techniques are increasingly rich and diverse and make it possible to manufacture complex parts that are impossible to achieve using conventional methods. Aerosint sees itself as a growing player in the field with its innovative technology of selective powder deposition printing head. This innovation allows greater freedom of deposition in powder bed processes by ejecting selectively materialgrainsthrough with a pneumatic tube network.

The company is constantly looking for new features on its products and their assemblies in order to increase their production volume. Thus, there was a strong need to limit manual operations on the printing head and more specifically, the placement of the bundle of pneumatic tubes. The objective of this work is to develop an automated tubing system to meet the company's expectations. The design was based on mechanical, electrical and control elements in order to propose a working prototype at the end of this study. Some tests were carried out to validate the concept and, finally, potential defects have been highlighted in order to propose improvements that will be useful in a final version of the machine.

This work has brought the possibility to automate all the operations to be provided on the assembly of the gas ejection network and thus limit the presence of a person in order to avoid him a long and tedious process.

**Keywords** : Machine design, tube feeder, tube casing, prototyping, crimping

## **Remerciements**

L'élaboration de ce travail de fin d'études est le fruit de la collaboration de plusieurs personnes dont je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Tout d'abord, je voudrais remercier chaleureusement mon superviseur académique, Monsieur Pierre Duysinx, pour son encadrement et nos entrevues mensuelles malgré son emploi du temps plutôt chargé. Au fil des mois, ses conseils pertinents ont permis d'améliorer la qualité de ce travail.

Ensuite, je tiens également à remercier toute l'équipe de la société Aerosint pour la bonne ambiance qui s'en dégageait et de m'avoir accepté dans leurs locaux. Je tiens à citer Monsieur Matthias Hick pour m'avoir proposé ce sujet des plus passionnants et instructifs. Sans leurs précieux conseils techniques, ce travail n'aurait pas pu aboutir et donc, je tiens spécialement à remercier Monsieur Martin Marchal et Monsieur Florent Lempereur pour avoir pris le temps de discuter sur le sujet.

Enfin, je tiens à remercier mes proches, ma mère et mon frère qui m'ont toujours soutenu malgré les difficultés. Je tiens particulièrement à citer mon défunt père avec qui j'aurais sûrement eu plaisir de discuter de ce travail.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1	Présentation de l'entreprise . . . . .	1
2	Techniques d'impressions par lit de poudre compatibles . . . . .	2
3	Problématique . . . . .	4
4	Organisation du travail . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Analyse du besoin</b>	<b>8</b>
1	Entraînement du tube . . . . .	8
2	Sertissage du tube dans les plaques . . . . .	8
3	Placement du tube par rapport aux plaques . . . . .	9
4	Ejection du tube . . . . .	10
5	Choix de la paire de plaques . . . . .	10
6	Chargement du tube depuis la machine à étirer . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Tête d'extrusion</b>	<b>12</b>
1	Analyse de la première conception . . . . .	12
1.1	Description du système . . . . .	12
1.2	Défauts présents . . . . .	13
2	Ordre de tubage . . . . .	14
3	Choix de la technologie d'entraînement . . . . .	15
3.1	Entraînement à deux roues . . . . .	15
3.2	Glissement du tube . . . . .	17
4	Implémentation du mécanisme . . . . .	19
4.1	Système à lame ressort . . . . .	19
4.2	Système rigide . . . . .	22
4.3	Système à roue d'entraînement adaptative . . . . .	24
5	Roue d'entraînement . . . . .	27
5.1	Choix du matériau . . . . .	27
5.2	Choix du moteur . . . . .	29
6	Mécanisme de dégagement du tube . . . . .	30
6.1	Couvercle avec aimants permanents . . . . .	30
6.2	Couvercle avec électroaimants et plaque en acier . . . . .	32
7	Impression en résine . . . . .	34
<b>4</b>	<b>Placement du tube</b>	<b>36</b>
1	Modes de déplacements . . . . .	36
1.1	Axes X et Y . . . . .	36
1.2	Axe Z . . . . .	38
2	Alignement des plaques . . . . .	41

2.1	Rails de guidage . . . . .	41
2.2	Nouveau bâti . . . . .	42
2.3	Montage des éléments de guidage . . . . .	43
2.4	Support des plaques . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Mécanisme de sertissage</b>	<b>48</b>
1	Préhenseur pneumatique . . . . .	48
1.1	Abandon de la pince angulaire . . . . .	48
1.2	Pince parallèle . . . . .	49
2	Support . . . . .	51
3	Lame de découpe . . . . .	52
4	Montage complet . . . . .	53
5	Contrôle pneumatique . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Contrôle de la machine</b>	<b>56</b>
1	Séquence d'opération pour un tubage complet . . . . .	56
1.1	Calibration . . . . .	57
1.2	Opérations sur la plaque de droite . . . . .	58
1.3	Opérations sur la plaque de gauche . . . . .	59
1.4	Détection d'un mauvais passage du tube . . . . .	60
2	Séquence d'opération pour la sauvegarde d'une plaque . . . . .	62
3	Choix du microcontrôleur . . . . .	62
<b>7</b>	<b>Implémentation de la commande</b>	<b>64</b>
1	Capteur de présence du tube . . . . .	64
1.1	Détection des tubes de 1.16 mm . . . . .	64
1.2	Adaptation aux tubes fins . . . . .	71
2	Capteur de passage de tube . . . . .	72
3	Capteur de <i>Homing</i> . . . . .	73
4	Déplacement des axes linéaires . . . . .	75
4.1	Profil de vitesse . . . . .	75
4.2	Ordre de tubage d'une plaque . . . . .	76
5	Gestion des ressources électriques . . . . .	76
6	Relais avec charge inductive . . . . .	78
7	Montage électrique . . . . .	79
<b>8</b>	<b>Mise en marche complète de la machine</b>	<b>81</b>
1	Montage complet . . . . .	81
2	Premiers résultats . . . . .	81
2.1	Perte de précision . . . . .	81
2.2	Nouvelle matrice d'éjection . . . . .	82
2.3	Premiers cycles de tubages . . . . .	83
2.4	Nouvel adaptateur de la matrice d'éjection . . . . .	83
2.5	Passage des tubes fins à travers sa plaque d'interface . . . . .	84
3	Résultats finaux . . . . .	84
3.1	Tubage complet de la paire donnée . . . . .	84
3.2	Vitesse d'exécution . . . . .	87
3.3	Comportement du tube . . . . .	87
3.4	Roue d'entraînement . . . . .	88

3.5	Dégradation du tube . . . . .	89
<b>9</b>	<b>Liaison avec la machine à étirer</b>	<b>90</b>
<b>10</b>	<b>Perspectives d'améliorations</b>	<b>92</b>
1	Assemblage . . . . .	92
2	Tête d'extrusion . . . . .	92
3	Optimisation du temps . . . . .	94
4	Communication avec l'extérieur . . . . .	95
5	Modes de déplacement . . . . .	96
6	Mécanisme de sertissage . . . . .	96
7	Chargement du tube . . . . .	97
8	Changements imposé par les tubes fins . . . . .	97
9	Conception finale de la machine à tuber . . . . .	98
<b>11</b>	<b>Conclusion</b>	<b>99</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>101</b>



# Table des figures

1.1	Schéma de fonctionnement de la tête d'impression [1]	1
1.2	Mise en place de la tête d'impression à deux cylindres [1]	2
1.3	Aconity MIDI + [1]	3
1.4	Putter de golf	3
1.5	Schéma de fonctionnement de l'éjection pneumatique	4
1.6	Type de plaques rencontré dans l'assemblage	5
1.7	Faisceau de tube sertis avant et après la découpe	5
1.8	Conditionnement du tube	6
1.9	Première conception de la machine à tuber	7
2.1	Passage du tube à travers une plaque	9
2.2	Passage possible malgré le désalignement des axes	10
2.3	Paire de plaques test	10
3.1	Tête d'extrusion (transparence de 50%)	12
3.2	Fermeture des canaux horizontaux par une lame en PLA	13
3.3	Variante verticale (a) et variante horizontale (b)	14
3.4	Séquence de tubage de la matrice d'éjection	15
3.5	Interférence entre la tête et la matrice	15
3.6	Entraînement à deux roues	16
3.7	Entraînement de la machine à étirer	17
3.8	Nouveau principe d'entraînement du tube	18
3.9	Déformation de lame avec le passage du tube	19
3.10	Tête d'extrusion implémentant la lame flexible	20
3.11	Changement de direction du tube	21
3.12	Revêtement d'une ancienne tête d'extrusion	22
3.13	Tête d'extrusion avec glissière intégrée	23
3.14	Butée au niveau du contact avec la roue	24
3.15	Adaptation à des tubes de 0.65 mm	24
3.16	Premier prototype d'une tête d'extrusion adapté au tubes fins	25
3.17	Changement de support de la tête d'extrusion	26
3.18	(a) : Configuration à écartement fixe (b) : Configuration à écartement variable	26
3.19	Montage de la tête d'extrusion sur son support	27
3.20	Les différentes roues testée pour l'entraînement, en partant de la gauche : aluminium brossé, polyuréthane lisse, silicone légèrement granuleux et PLA avec revêtement en silicone	28
3.21	Remplacement de la carte de contrôle du moteur de la roue	29
30figure.caption.37		
3.23	Rotation d'un couvercle par l'action du tube	31

3.24	Couvercle retenu par des aimants permanents . . . . .	31
3.25	Libération du tube par le recul de la tête d'extrusion . . . . .	32
3.26	Paire d'électroaimants . . . . .	33
3.27	Montage des électroaimants et du couvercle sur la tête d'extrusion . . . . .	34
3.28	Têtes d'extrusion imprimées en résine . . . . .	35
3.29	Montage du couvercle sur la tête d'extrusion en résine . . . . .	35
4.1	Déplacements de la conception antérieure . . . . .	36
4.2	Rail motorisé sur l'axe Y . . . . .	37
4.3	Vérin électrique avec sa carte de contrôle . . . . .	38
4.4	Gamme <b>LSA</b> de chez <b>Nanotec</b> [18] . . . . .	40
4.5	Montage de l'actionneur à l'emplacement du vérin électrique . . . . .	40
4.6	Rails de guidage . . . . .	41
4.7	Nouveau bâti de la machine . . . . .	43
4.8	Montage des rails pour le déplacement en X . . . . .	44
4.9	Perte de l'alignement le long de l'axe X . . . . .	45
4.10	Vue de coupe du montage du socle . . . . .	45
4.11	Éléments fixes du montage des plaques . . . . .	46
4.12	Surfaces de références possibles . . . . .	46
4.13	Adaptateur de la matrice courte . . . . .	47
4.14	Adaptateur de la matrice d'éjection . . . . .	47
5.1	Schéma de fonctionnement de la pince pneumatique . . . . .	48
5.2	Changement de la géométrie des mâchoires . . . . .	49
5.3	Nouvelle pince de préhension du tube . . . . .	50
5.4	Fixations à respecter mis en évidence en bleu . . . . .	51
5.5	Support de vérin . . . . .	51
5.6	Lame de découpe afin de garantir la préhension d'un seul tube . . . . .	52
5.7	(a) : Découpe à 1 mm et (b) : Découpe à 4 mm . . . . .	53
5.8	Montage complet du système de sertissage . . . . .	54
5.9	Schéma pneumatique . . . . .	55
5.10	Schéma électrique . . . . .	55
6.1	Séquence générale . . . . .	56
6.2	Calibration . . . . .	57
6.3	Opérations sur la première plaque . . . . .	58
6.4	Opérations sur la seconde plaque . . . . .	59
6.5	(a) : Placement de la tête et (b) : Sertissage du tube . . . . .	60
6.6	Ejection du tube dans une configuration anormale . . . . .	61
6.7	(a) : Arduino Uno et (b) : Arduino Mega [24] . . . . .	63
7.1	Variation de la résistance en fonction de la position du tube . . . . .	65
7.2	Boîtier du capteur avec un schéma des composants présents . . . . .	66
7.3	Variation de la résistance en fonction de la position du tube . . . . .	67
7.4	Mode de fonctionnement d'un phototransistor [26] . . . . .	67
7.5	Circuit de conditionnement . . . . .	68
7.6	Test sur les ouvertures du capteur . . . . .	69
7.7	Emplacement des capteurs . . . . .	69
7.8	Emplacement des surfaces réfléchissantes . . . . .	70

7.9	Informations provenant du capteur avant et après filtrage . . . . .	71
7.10	Principe de fonctionnement de la détection du sertissage . . . . .	72
7.11	Face arrière de la roue d'entraînement . . . . .	73
7.12	Capteur pour (a) : l'axe X, (b) : l'axe Y et (c) : l'axe Z . . . . .	75
7.13	Profils de position, vitesse et accélération [32] . . . . .	76
7.14	Convertisseur DC-DC . . . . .	77
7.15	Bloc d'alimentations 12 et 24 VDC . . . . .	78
7.16	Schéma électrique d'un relais avec une charge inductive . . . . .	79
7.17	Branchement de la machine . . . . .	79
7.18	Intégration d'un PCB entre l'environnement extérieur et la carte de contrôle	80
8.1	Vue d'ensemble sur la machine . . . . .	81
8.2	Nouvelle matrice d'éjection . . . . .	82
8.3	Première réalisation de plusieurs cycles de tubages . . . . .	83
8.4	Modification de l'adaptateur de la matrice d'éjection . . . . .	84
84figure.caption.100		
8.6	Tubage quasi complet de la paire de plaques . . . . .	85
8.7	Tubage de la matrice d'éjection . . . . .	86
8.8	Tubage de la plaque de séparateurs de faisceaux de tubes . . . . .	86
8.9	Écrasement du tube précédemment serti par le mouvement de la tête d'ex- trusion . . . . .	88
8.10	Roue saine (à droite) et abîmée (à gauche) . . . . .	88
9.1	Tube arrêté à mi-chemin sans pouvoir être entraîné . . . . .	90
9.2	Tube de liaison avec la poussée d'un tube sur un autre . . . . .	91
10.1	Nouveau concept de la tête d'extrusion . . . . .	93
10.2	Variation de la forme de la section en sortie de canal . . . . .	93
10.3	Déplacement en diagonal de la tête . . . . .	94
10.4	Centralisation de la commande au niveau de l'interface de l'étireuse . . . .	95
10.5	Contrôle indépendant du mouvement latéral des pinces . . . . .	96
10.6	Point de chargement possible du tube . . . . .	97
10.7	Début du montage de la version finale de la machine . . . . .	98

# Chapitre 1

## Introduction

### 1 Présentation de l'entreprise

Les techniques de fabrication additive suscitent un fort engouement depuis plusieurs années pour la réalisation de pièces complexes, et ce, avec un grand éventail de matériaux possibles. Aerosint SA [1] propose un procédé innovant de dépôt sélectif multi-matière, abrégé SPD<sup>1</sup>, adapté aux méthodes d'impression par lit de poudre.

Les méthodes conventionnelles de déposition de poudre s'opèrent par l'intermédiaire d'un racleur. Celui-ci étale uniformément la poudre sur un plateau pour former une couche d'une épaisseur donnée. C'est ici que l'entreprise se démarque par la possibilité de déposer 2 voire 3 poudres de matériaux différents, et ce, simultanément.

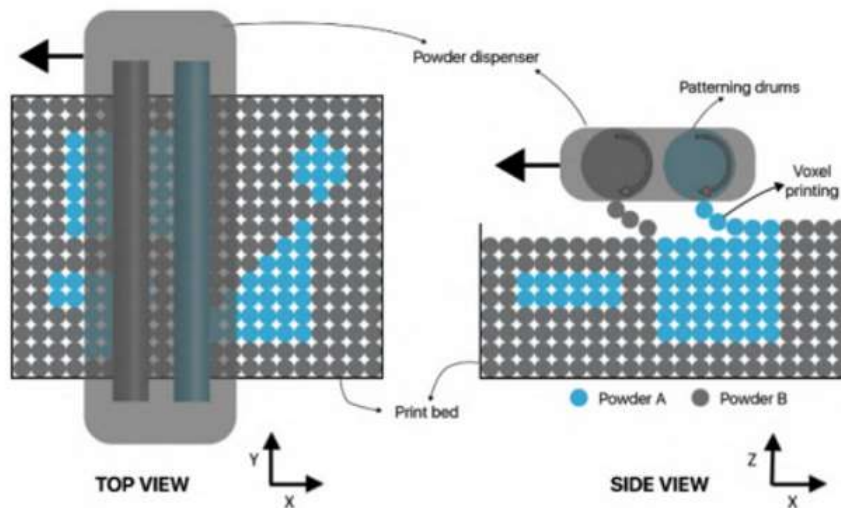


FIGURE 1.1 – Schéma de fonctionnement de la tête d'impression [1]

Un schéma de fonctionnement est illustré sur la figure 1.1 où l'impression est réalisée avec deux matériaux. Les poudres sont amenées par aspiration depuis un réservoir et elles sont étalées sur la surface extérieure de cylindres dont la surface est poreuse. En fonction du

---

1. Selective Powder Deposition

motif désiré, le gaz est éjecté par un réseau pneumatique en emportant de la poudre qui se dépose sur le lit d'impression. Une vue réelle de la tête est illustrée sur la figure 1.2.

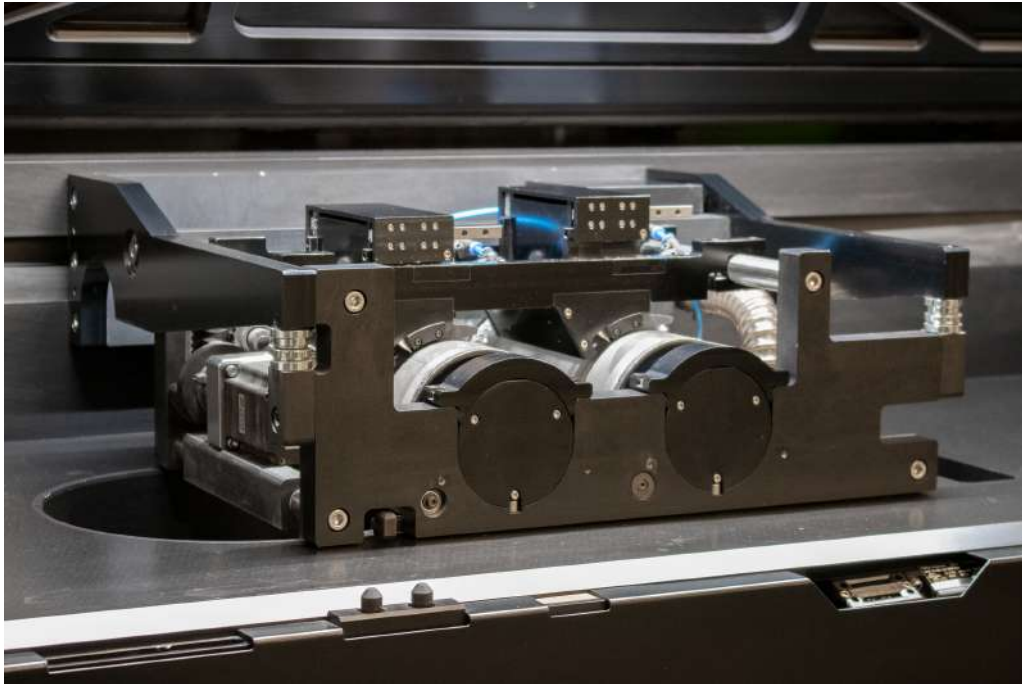


FIGURE 1.2 – Mise en place de la tête d'impression à deux cylindres [1]

En fonction de l'application, le lit de poudre peut être consolidé ou non. La principale application est bien évidemment la fabrication additive néanmoins la technologie peut servir dans d'autres domaines tels que le pharmaceutique pour du dosage ou pour du revêtement sur des tôles de métal.

## 2 Techniques d'impressions par lit de poudre compatibles

Afin de consolider la matière, un premier procédé s'articule autour de la technologie SLM<sup>2</sup> où une fusion localisée est appliquée au lit de poudre à l'aide d'un apport d'énergie. La machine associée résulte d'un partenariat entre Aerosint et la société allemande Aconity3D GmbH [2]. La machine intègre la tête d'impression pour le dépôt de poudre et un laser scanne la zone d'impression à chaque couche déposée sous atmosphère inerte. L'imprimante Aconity Midi+ présentée sur la figure 1.3 est devenue la première imprimante SLM multi-matière.

Le second procédé est le frittage complet dans un four. Le dépôt de poudre s'effectue dans un creuset où une pression est appliquée pour réduire les porosités et le motif 3D de la pièce à imprimer est réalisé progressivement couche par couche pour ensuite placer le creuset dans un four. Ce procédé possède l'avantage d'être compatible avec un grand nombre de matériaux métalliques et céramiques.

---

2. Selective Laser Melting



FIGURE 1.3 – Aconity MIDI + [1]

Un dernier procédé par frittage indirect est en cours de développement et s'articule sur la technologie de *Binder Jetting*. Un liant est déposé sur le lit de poudre pour maintenir temporairement la forme de la pièce à imprimer. Après la déposition de toutes les couches, cette pièce est placée dans un four afin d'évaporer la colle dans un premier temps et ensuite fritter la matière.

Lorsque plusieurs matériaux sont disponibles au sein de la tête d'impression, il est possible d'en utiliser un pour le dépôt d'une poudre exclusivement destinée à supporter la pièce à imprimer. Ainsi, cette poudre peut être recyclée plus facilement puisqu'elle n'est plus destinée à être dans le corps de la pièce. Il est aussi possible de rendre les opérations de post-traitement beaucoup plus simples comme par exemple l'enlèvement de supports par dissolution sélective chimique.



FIGURE 1.4 – Putter de golf

Outre les avantages en production, l'impression multi-matériaux offre un panel de possibilités tant au niveau des performances que de l'esthétique. Par exemple, on peut citer la réalisation d'un putter de golf dans un alliage de bronze et d'acier inoxydable afin d'en améliorer ses performances.

### 3 Problématique

Afin d'introduire le sujet de travail de fin d'études, il est nécessaire d'étudier plus en détail le fonctionnement de l'éjection des poudres au sein d'un cylindre.

Un faisceau de tube en PTFE<sup>3</sup> de 1.16 mm de diamètre externe transporte un gaz, air ou argon, entre un bloc d'électrovalves et les cylindres de la tête d'impression dont le contrôle permet de réaliser un motif sur le plateau comme illustré sur la figure 1.5.

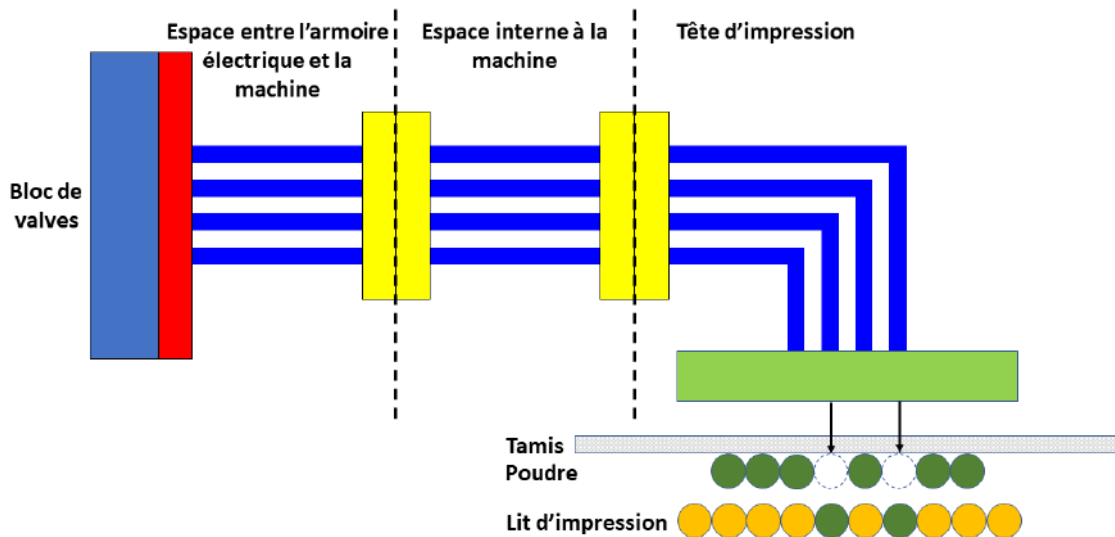


FIGURE 1.5 – Schéma de fonctionnement de l'éjection pneumatique

Le faisceau de tube est discontinu pour faciliter la séparation de l'armoire électrique et de la tête d'impression de la machine. Pour ce faire, les extrémités des tubes sont serties dans des plaques qui permettent une jonction entre les différents modules. Il existe actuellement trois types de plaques implémentés dans l'assemblage :

- Les plaques d'interfaces (voir figure 1.6a) : montée sur le bloc de valves, elles possèdent 48 orifices et se positionnent dans l'armoire électrique ;
- Les plaques de séparateurs de faisceaux de tubes (voir figure 1.6b) : elles permettent la jonction entre deux faisceaux et possèdent 192 orifices ;
- Les matrices dites d'éjection (voir figure 1.6c) : présentent au sein d'un cylindre, elles sont plutôt allongées et libèrent le gaz afin d'éjecter la poudre. Elles possèdent également 192 orifices.

3. Polytétrafluoroéthylène



Il existe plusieurs variations de ces modèles en fonction de l'évolution de la technologie ou de la taille du cylindre néanmoins, leurs fonctions restent identiques. Lorsque les nombres d'orifices ne correspondent pas dans une paire, il est nécessaire d'en utiliser plusieurs d'un même type comme par exemple 4 plaques d'interfaces avec un seul séparateur de faisceau de tubes.

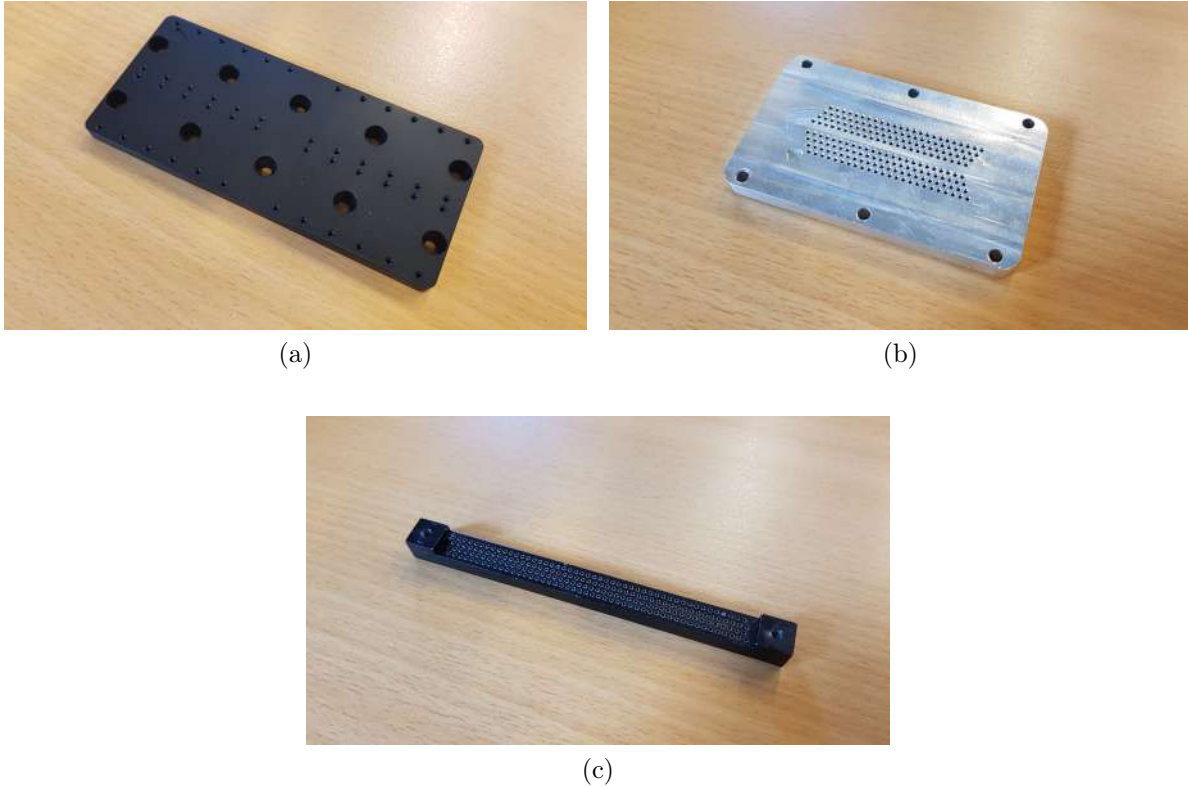


FIGURE 1.6 – Type de plaques rencontré dans l'assemblage

Il est nécessaire de placer les tubes manuellement, un par un, et par la suite, venir les sertir en les tirant avec une pince (voir figure 1.7a). Pour finir, les parties devenues inutiles sont découpées à fleur de la surface à l'aide d'une lame quelconque comme par exemple un scalpel (voir figure 1.7b).

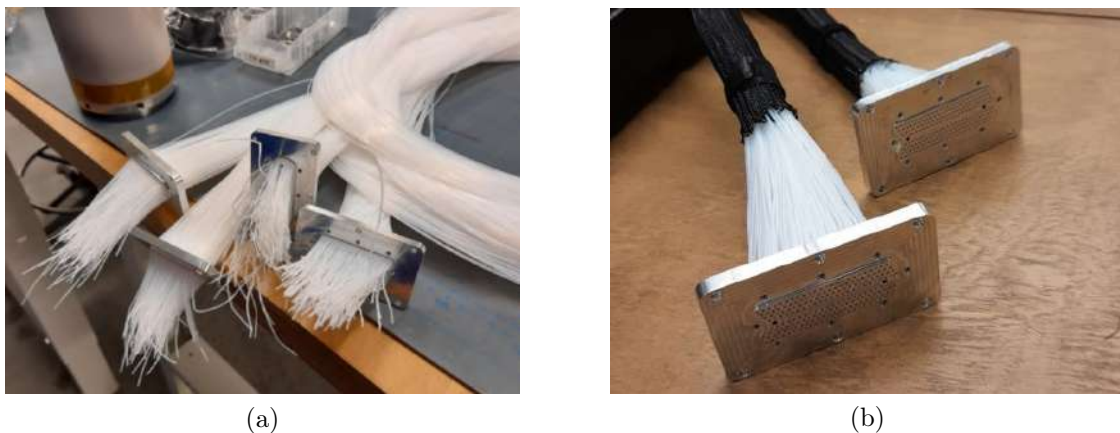


FIGURE 1.7 – Faisceau de tube sertis avant et après la découpe

Les tubes sont conditionnés de telle sorte à avoir une section aux extrémités moins large



que leur section nominale afin de faciliter leur passage à travers une plaque. En effet, les orifices possèdent un diamètre de 1 mm et donc, inférieur à celui des tubes pour permettre leur fixation par déformation radiale.

Dans un premier temps, le conditionnement des tubes était réalisé à la main mais rapidement il a été remarqué que l'opération pouvait être automatisée. Ainsi, un travail de fin d'études a été proposé et au terme de ce celui-ci, une machine fonctionnelle a été réalisée dont une illustration est présentée sur la figure 1.8a. La machine permet de découper à la longueur souhaitée un nombre de tube programmé et d'étirer sur quelques centimètres ses extrémités (voir figure 1.8b).

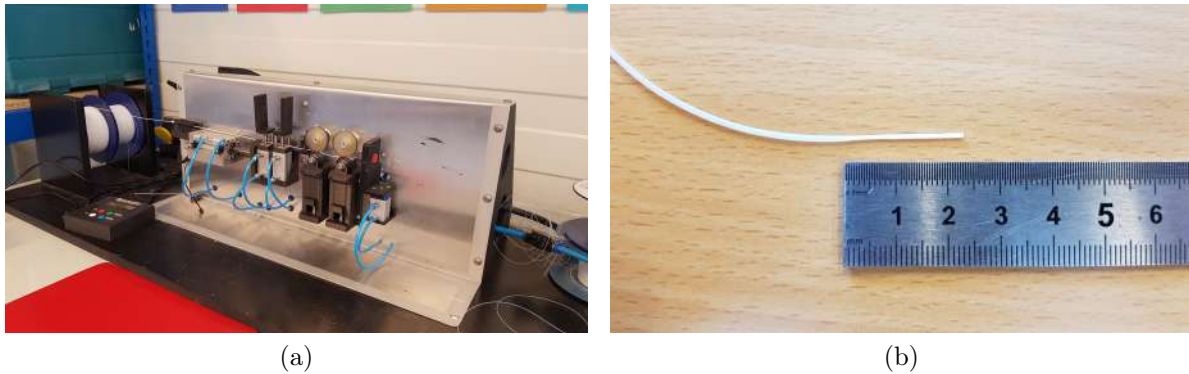


FIGURE 1.8 – Conditionnement du tube

Le conditionnement des tubes étant automatisé, il était logique de rendre tout autant la procédure de tubage. En partant d'une bobine de tube de PTFE, une paire serait réalisée sans aucune intervention manuelle. Rendre tout le processus autonome éviterait aux employés de devoir consacrer plusieurs heures à placer les tubes eux-mêmes et donc, s'occuper plus longuement sur leurs activités principales.

Ainsi, on en vient à la problématique de ce travail de fin d'étude dont le sujet se portera sur la conception d'un système de tubage automatisé qui apportera un gain de temps dans une entreprise en quête d'amélioration continue sur leur technologie tant au niveau des résultats que de la rapidité de l'assemblage.

Le sujet d'étude a déjà été abordé dans un précédent travail réalisé par un étudiant, Fabien Guissen, durant l'année académique 2020-2021 [3]. Au terme de son travail, un premier prototype a été conçu (voir figure 1.9) mais malheureusement celui-ci n'était pas complètement fonctionnel d'où la nécessité de reprendre le sujet.

La conception du prototype se base sur une structure à trois degrés de liberté le long d'axes linéaires. La paire de plaques à tuber est fixée sur des supports adaptés et placés en vis-à-vis de part et d'autre du mécanisme d'entraînement du tube, désigné comme la tête d'extrusion. Cette tête se déplace entre les matrices et permet de charger un tube conditionné depuis l'extérieur. Ensuite, le tube est déroulé successivement dans chacune des plaques où un système de sertissage prend le relais afin de tirer son extrémité jusqu'à ce que sa section nominale traverse la plaque. Enfin, le tube est libéré du système afin de recommencer un nouveau cycle.



FIGURE 1.9 – Première conception de la machine à tuber

Dans sa forme la plus aboutie, la machine a permis de sertir uniquement un seul tube, et ce, sous certaines conditions bien spécifiques. Néanmoins, la machine est une bonne base de travail pour la suite du développement et sera reprise en partie afin d'obtenir des résultats satisfaisants rapidement.

## 4 Organisation du travail

Ce travail de fin d'études s'est réalisé sur deux quadrimestres, en présentiel, dans les locaux de l'entreprise durant l'année académique 2021-2022.

Ce rapport relate des différentes analyses et conceptions en commençant par une analyse des besoins qui est présentée dans le chapitre 2 pour en dégager les fonctions que la machine à tuber doit pouvoir effectuer. De là, différentes parties de la machine sont étudiées en commençant par le chapitre 3 sur la tête d'extrusion, élément central de la conception. Ensuite, le chapitre 4 relate des modes de déplacements et du montage requis pour des mouvements fluides et précis tandis que le sertissage des tubes est abordé à travers le chapitre 5. La commande des opérations et son implémentation sont décrites, respectivement, dans les chapitres 6 et 7 afin d'avoir un contrôle efficace de la machine. Plusieurs résultats sont observés et analysés dans les chapitres 8 et 9 où ce dernier aborde plus spécialement de la liaison entre la machine à étirer et celle à tuber. Enfin, quelques améliorations sont proposées à travers le chapitre 10 dans le but de concevoir une version finale de la machine.

# Chapitre 2

## Analyse du besoin

Afin d'automatiser le tubage d'une paire de plaques, il est nécessaire d'étudier les attentes de l'entreprise et de dresser les fonctions à pourvoir de la future machine. Dans la suite de ce rapport, les différentes fonctions sont abordées pour en analyser le respect du premier prototype auquel cas les modifications nécessaires sont apportées.

### 1 Entraînement du tube

L'opération la plus délicate à réaliser est le passage de chacune des extrémités du tube à travers les deux plaques sans aucune intervention manuelle. Pour un entraînement fiable et sans détérioration, il est nécessaire de dimensionner le système en fonction des propriétés physiques d'un tube en PTFE [4] [5].

Pour une paire de plaques donnée, tous les tubes associés sont de la même longueur bien que la machine à étirer peut amener des erreurs sur la découpe. Cependant, l'erreur relative est inférieure à 1% et peut être considérée comme négligeable. Les longueurs rencontrées en pratique se situent entre 20 cm et 300 cm. Ces tubes doivent pouvoir être chargés dans le système.

La connaissance de la position des extrémités permet, potentiellement, de valider le passage d'une opération à une autre. Ainsi, il serait nécessaire d'avoir une erreur négligeable entre la longueur déroulée au niveau de la commande et du résultat en pratique. L'erreur tolérable dépend essentiellement de la solution technique choisie. Néanmoins, une valeur maximale de 1 mm/m semble suffisante.

La densité de tubes sertis à proximité d'une plaque s'accroît avec l'avancement du tubage. Ainsi, l'élément qui permettrait de dérouler le tube doit éviter de gêner voire sectionner ceux déjà sertis et donc, posséder une géométrie adéquate.

### 2 Sertissage du tube dans les plaques

Lorsque le tube est placé dans une plaque, seule sa fraction étirée peut circuler dans les orifices par une force de poussée (voir figure 2.1). La section nominale doit être, elle, tirée par l'intermédiaire de la partie émergente qui a traversé la plaque. La préhension du tube doit être indépendante du nombre de tubes déjà sertis et pouvoir agripper uniquement

celui en cours de manière fiable. Cette traction s'opère sur une longueur d'au moins 20 mm afin de sertir tous les cas possibles..

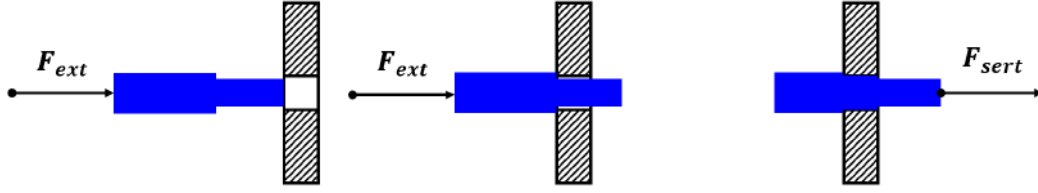


FIGURE 2.1 – Passage du tube à travers une plaque

La force de traction nécessaire dépend des propriétés mécaniques du tube, de ses dimensions et de la force de frottement présente lorsque la section nominale traverse la plaque. Au vu de la déformation plastique du tube, la mesure a été directement réalisée à l'aide d'un dynamomètre où la force minimale nécessaire pour contraindre le tube à traverser est d'environ 14 N. Cette force augmente avec l'accélération que l'on veut appliquer. Cependant, le PTFE à une résistance à la rupture en traction entre 20 et 30 MPa, qui donne une tension maximale dans le tube :

$$F_{max} = 25 \times \pi(0.58^2 - 0.28^2) = 20.26 [N]$$

En considérant, une moyenne de 25 MPa, un tube avec un diamètre extérieur de 1.16 mm et intérieur de 0.56 mm.

Ainsi, il faudrait que le système de sertissage puisse appliquer au minimum une force de 20.26 N pour être certain de tirer le tube quelle que soit l'accélération. Auquel cas le tube serait rompu en deux si celui-ci est contraint autre part et donc, se trouvait préalablement dans une configuration anormale.

### 3 Placement du tube par rapport aux plaques

À chaque mise sous tension de la machine, celle-ci doit pouvoir se positionner automatiquement en face de chaque orifice des plaques, et ce, en démarrant depuis une configuration initiale arbitraire.

Le placement des extrémités du tube doit pouvoir couvrir au moins la totalité de la surface de chaque plaque possible à savoir une surface de 15 x 5 cm.

Lorsqu'une extrémité arrive à proximité de son orifice correspondant, il faut que les deux soient concentriques en considérant une marge d'erreur possible. Comme expliqué précédemment, l'extrémité possède une section plus petite que celle des orifices et en moyenne la différence diamétrale est de 100 µm avec la présence de légères fluctuations dues à la machine à étirer.

Ainsi, un désalignement d'au plus de 50 µm autour de l'axe de l'orifice sera acceptable si la plaque ne possède pas de chanfrein. Au contraire, si un chanfrein de 200 µm est présent, comme illustré sur la figure 2.2, le tube a tendance à être guidé et la précision demandée peut-être réduite à 250 µm.

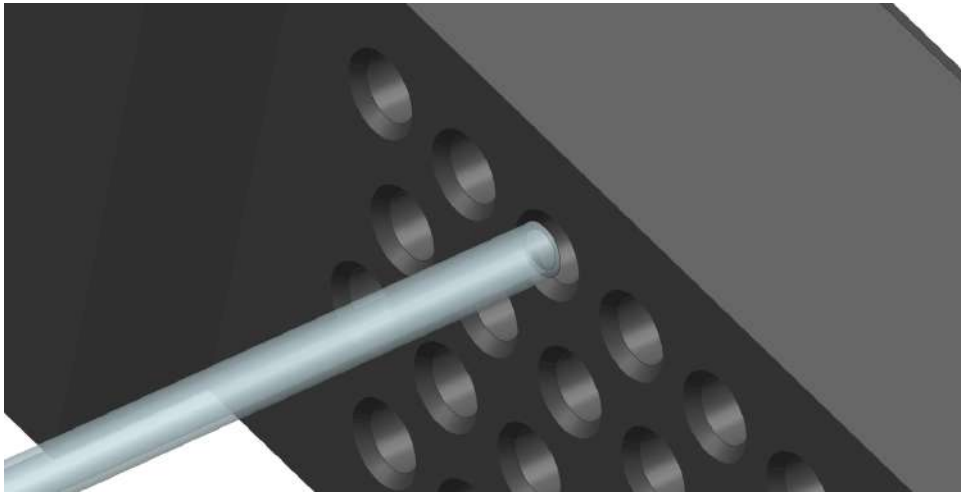


FIGURE 2.2 – Passage possible malgré le désalignement des axes

## 4 Ejection du tube

Le tube doit pouvoir s'extraire du système lorsque toutes les opérations ont été réalisées sans quoi le suivant ne pourra pas être chargé dans le système. Le dégagement doit être fiable et ne jamais détériorer la surface du tube.

## 5 Choix de la paire de plaques

Dans un premier temps, une paire de plaques typique sera proposée afin d'obtenir rapidement des premiers résultats sur le tubage. La paire choisie est celle installée dans la tête d'impression illustrée sur la figure 2.3 et donc, constituée d'une matrice d'éjection et d'un séparateur de faisceau de tube. Ces deux plaques restent différentes sur leur géométrie afin de ne pas avoir le cas simple d'une paire identique similaire à la conception antérieure.

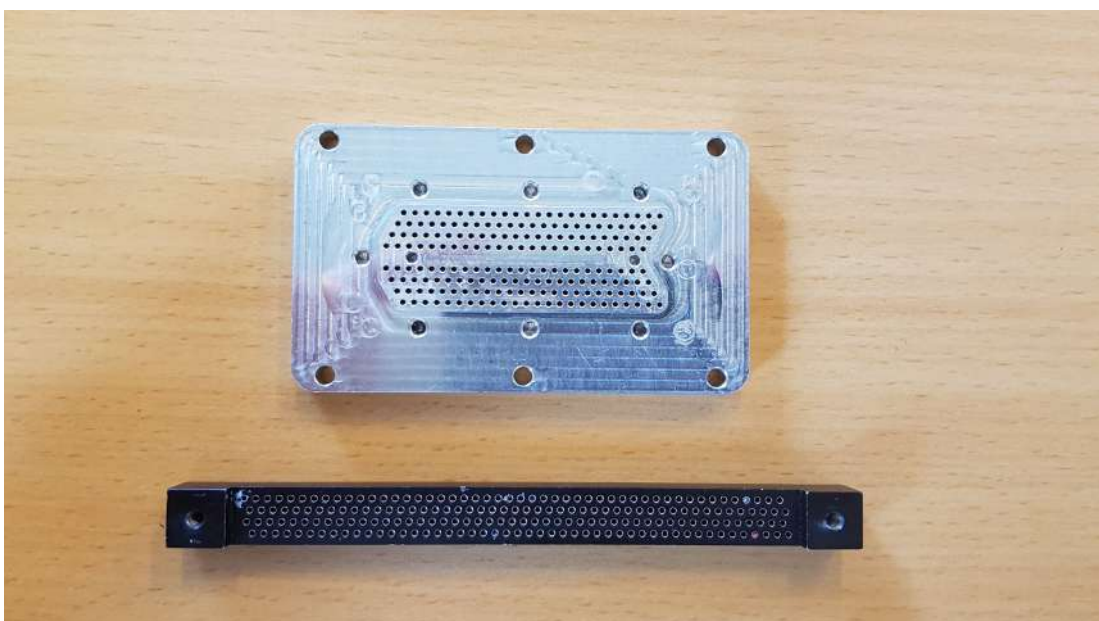


FIGURE 2.3 – Paire de plaques test

Par la suite, il est nécessaire d'adapter la machine pour qu'elle accepte d'autres paires déjà existante ou non. Idéalement, le changement d'une plaque doit nécessiter un minimum de modification pour son montage tout en restant simple pour l'utilisateur. Le placement d'une plaque doit être répétable afin de garder des paramètres de tubages constants au vu du changement régulier de la paire à tuber. Enfin, la machine doit pouvoir reconnaître la paire en question et s'adapter en fonction des trajectoires de ses différents éléments mobiles.

## **6 Chargement du tube depuis la machine à étirer**

La liaison avec la machine à étirer permet d'automatiser complètement le tubage des plaques. Ainsi, partant du rouleau de tube, en passant par l'étireuse, une paire pourrait être totalement complétée sans aucune intervention manuelle. Pour ce faire, il est nécessaire que toutes les longueurs possibles de tubes puissent être amenées sans encombre. Vu que le placement des tubes est variable, il est nécessaire de considérer une liaison mobile et souple.

# Chapitre 3

## Tête d'extrusion

Ce chapitre reprend l'analyse, le choix et l'implémentation des différents éléments constituant la tête d'extrusion afin de parvenir à un système fiable et automatisé respectant les besoins demandés.

### 1 Analyse de la première conception

#### 1.1 Description du système

Au sein du premier prototype, la tête d'extrusion est la pièce mécanique qui permet le placement du tube en PTFE dans les plaques. Outre cette fonction, elle assure le chargement du tube depuis l'extérieur et permet son éjection lorsque toutes les opérations ont été réalisées.

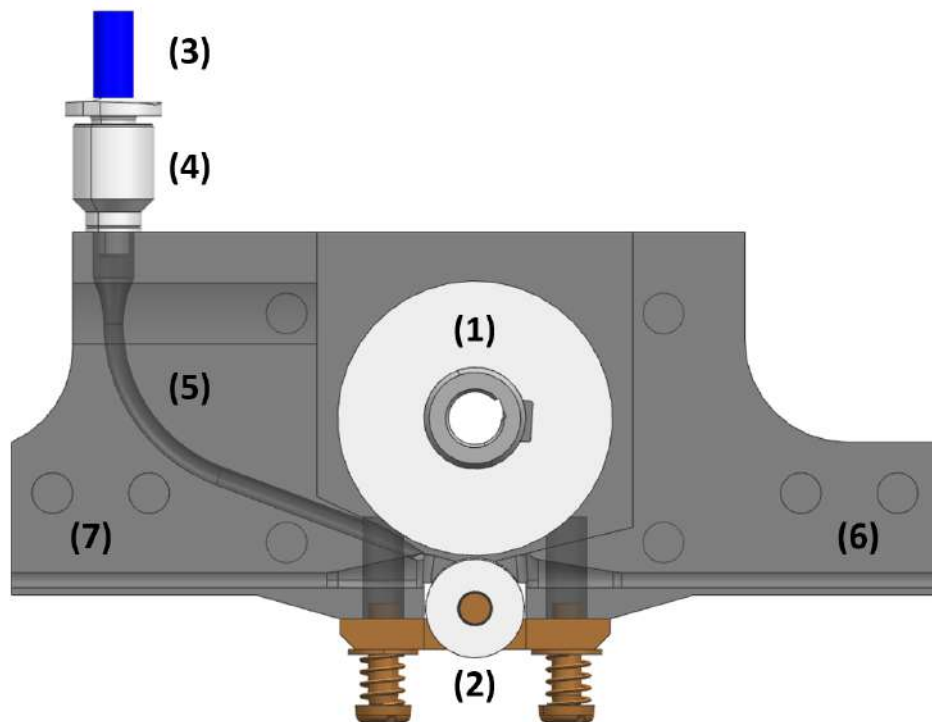


FIGURE 3.1 – Tête d'extrusion (transparence de 50%)



Le schéma illustré sur la figure 3.1 reprend les différents éléments constitutants de la pièce. L'entraînement est assuré par un moteur pas-à-pas couplé à une roue en aluminium (1) possédant un état de surface rugueux pour une bonne adhérence avec le tube. La seconde roue (2) agit comme simple support montée sur des ressorts. La mobilité verticale de cette roue aide au bon entraînement du tube en considérant ses changements de section à ses extrémités.

Le tube, conditionné par la machine à étirer, est chargé et guidé par l'intermédiaire d'un flexible pneumatique plus large (3) et maintenu par un raccord adapté (4).

Durant les essais, le tube était amené manuellement par l'intermédiaire d'un canal d'acheminement (5) complètement intégré dans la pièce. L'extrémité se positionnait au niveau de l'entraxe des deux roues ou plus précisément à l'endroit où l'entraînement était possible.

La longueur était connue à l'avance du microcontrôleur et à partir de là, le tube était déroulé vers la première plaque, à travers le canal de droite (6).

Pour la seconde plaque, il fallait dérouler le tube jusqu'à ce que sa seconde extrémité soit au niveau de l'entraxe. Ensuite, la rotation de la roue était inversée pour effectuer le déroulement à travers le canal de gauche (7). Afin de compléter la tête d'extrusion, une lame flexible couvrait les canaux horizontaux pour permettre la libération du tube comme illustrée sur la figure 3.2.

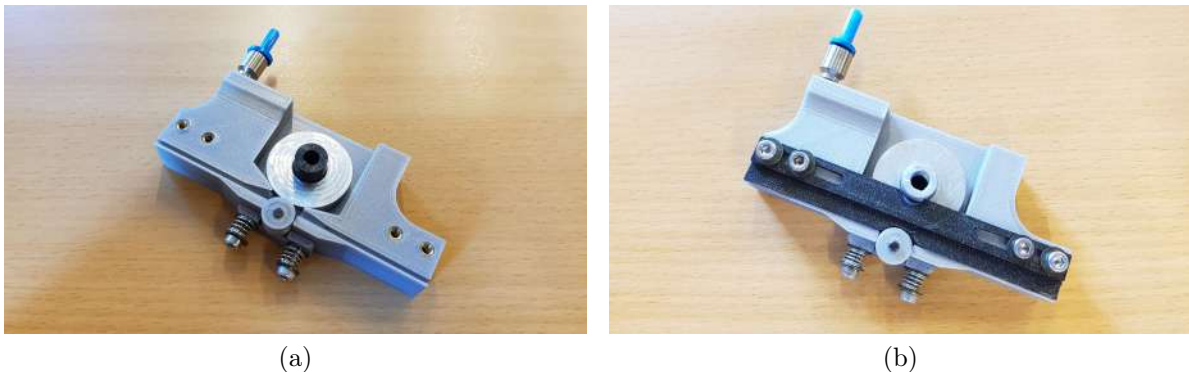


FIGURE 3.2 – Fermeture des canaux horizontaux par une lame en PLA

La tête d'extrusion reste une pièce assez aboutie dans son fonctionnement. Le système de déroulement à trois canaux est intéressant dans sa conception et permet un placement des deux extrémités du tube dans chacune des plaques. En effet, un système en amont n'aurait pu amener qu'une seule extrémité comme il est généralement le cas dans la pratique. Ainsi, il a été décidé de conserver le fonctionnement général de la tête pour la suite de l'étude.

## 1.2 Défauts présents

Le mécanisme présente plusieurs points qui font défaut et empêchent le bon déroulement des opérations. L'entraînement de la roue est imprécis et il a été relevé qu'une erreur de 10 mm pouvait se produire sur l'extrusion d'un tube de 340 mm. Cette imprécision empêche le changement de direction du tube d'être effectué dans certaines situations puisque le tube a dépassé l'entraxe.



La roue de support n'entre pas en rotation et le tube glisse à cause des mauvaises tolérances de montages qui amène du frottement. Il faut fortement appuyer sur le tube pour limiter l'erreur sur le déroulement, seulement la pression de contact déforme plastiquement le tube. De plus, les ressorts sur la face inférieure peuvent gêner voire sectionner les tubes déjà sertis.

Les canaux restent trop larges pour le tube et on peut souligner le manque de concentricité entre le tube et l'orifice de la plaque ce qui rend difficile le passage à travers celle-ci.

## 2 Ordre de tubage

Dans un premier temps, avant de pouvoir dimensionner la nouvelle tête d'extrusion, il est nécessaire d'envisager la technique pour dérouler le tube à travers les plaques. En effet, la tête doit pouvoir se déplacer sans gêner les tubes déjà sertis comme expliqué dans l'analyse du besoin.

L'idée est de reprendre l'emplacement de la sortie des canaux horizontaux. Cependant, il n'est possible d'avoir que deux séquences dans cette configuration afin d'avoir accès à tous les orifices de chaque plaque. La première variante est de tuber de façon verticale chaque rangée de tubes où, potentiellement, un décalage est nécessaire (voir figure 3.3a). La seconde variante est de tuber chaque rangée complètement avant de pouvoir passer à la suivante (voir figure 3.3b).

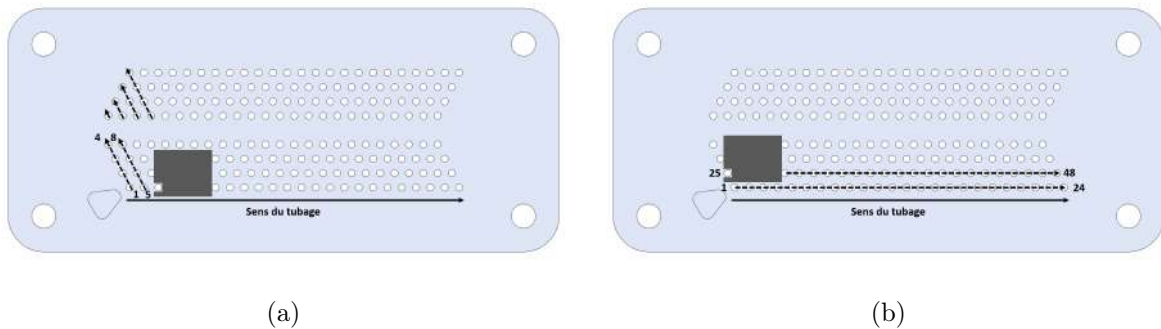


FIGURE 3.3 – Variante verticale (a) et variante horizontale (b)

Dans le cas de la matrice d'éjection, la séquence de tubage réalisée à la main diffère des deux variantes proposées. En effet, la figure 3.4 illustre la séquence à effectuer où la troisième rangée est tubée avant la seconde. Après discussion avec l'équipe technique, il est possible de modifier la séquence pour les besoins de la machine. Ainsi, on impose une séquence identique pour tous les types de plaques en implémentant la seconde variante qui est plus simple à programmer.

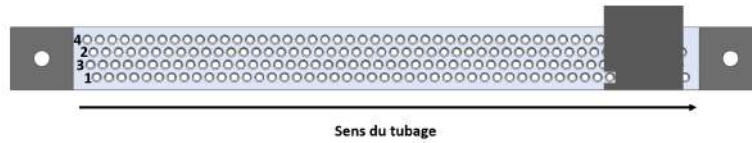


FIGURE 3.4 – Séquence de tubage de la matrice d'éjection

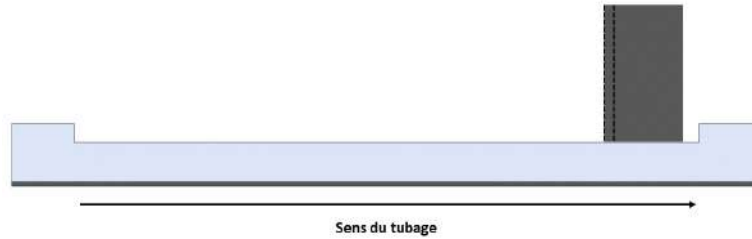


FIGURE 3.5 – Interférence entre la tête et la matrice

Outre le changement de l'ordre de passage, le tubage complet de la matrice d'éjection est impossible dans l'état à cause de sa géométrie. Si on se réfère à la figure 3.5, l'épaisseur de la tête d'extrusion amène inévitablement un contact avec la pièce avant d'avoir atteint le dernier orifice de la rangée. Après avoir mis en évidence ce problème à l'équipe technique, il est tout à fait possible de supprimer les montants dans les futures versions des têtes d'impression, en constante évolution. Dans le reste du travail, on continuera à utiliser la même matrice d'éjection en s'arrêtant quelques millimètres avant le contact.

Ainsi, la tête d'extrusion doit avoir une épaisseur la plus fine possible bien que dans le futur celle-ci ne sera plus une contrainte. Au niveau de la face inférieure, l'épaisseur de la matière doit être au maximum de 1 mm en dessous de la sortie du canal pour éviter le contact avec la rangée inférieure déjà sortie.

Afin d'éviter de tels changements sur la séquence de tubage, il a été imaginé une autre implémentation pour être indépendant du volume pris par la tête d'extrusion. La mise en place d'un allongement des canaux de sortie par des aiguilles creuses légèrement plus larges aurait pu amener les tubes en PTFE. Le problème est que le canal reste complètement fermé rendant ainsi la libération du tube impossible. La solution aurait été d'avoir la possibilité de scinder le tuyau en deux, mais à de telles dimensions et au vu de l'ajout de complexité, cette dernière n'a pas été retenue.

### 3 Choix de la technologie d'entraînement

#### 3.1 Entraînement à deux roues

La première tête d'extrusion implémente un système à deux roues dont l'utilisation est courante en pratique dans le but de dérouler de longues tiges cylindriques et souples. On peut citer par exemple les fils de polymères des imprimantes 3D ou encore les fils de

soudure au MIG. Les roues peuvent présenter diverses géométries en fonction des besoins. Elles peuvent être crantées pour déformer localement la tige, rainurées pour épouser sa forme ou tout simplement lisses. Il existe aussi des revêtements pour permettre un coefficient de frottement supérieur à l'aide d'un matériau adéquat. Au final, le choix dépend fortement de la tige à entraîner, de sa raideur, des légères détériorations acceptables ou non et de la précision sur le déroulement.

Dans la théorie, l'implémentation du mécanisme à deux roues aurait pu donner de meilleurs résultats dans le cas de la machine à tuber. Dans un régime établi, si les frottements dans l'axe de la roue de support étaient négligés, seule la force de frottement statique entre la roue et le tube engendrerait le mouvement de celui-ci comme illustré sur le schéma de gauche de la figure 3.6. La roue de support serait considérée dans un mouvement de roulement sans glissement et ne freinerait pas le tube sauf au début du mouvement.

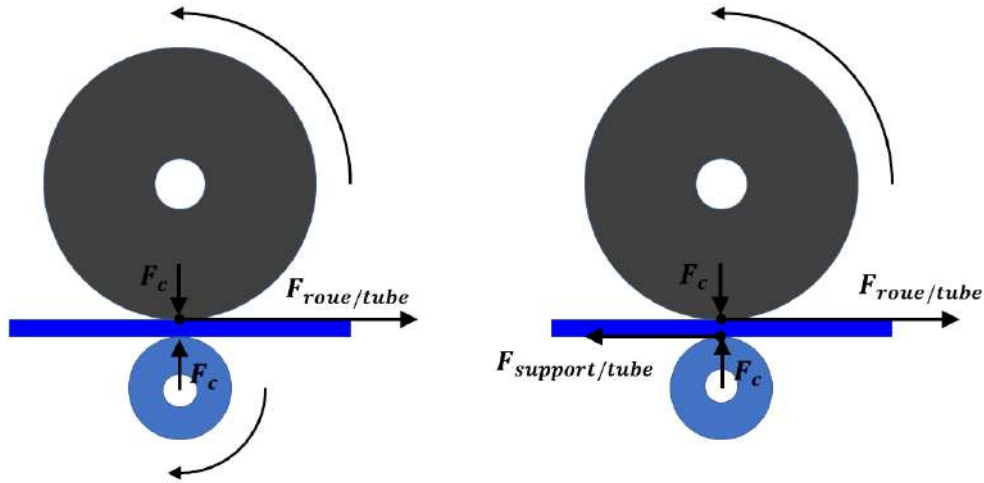


FIGURE 3.6 – Entraînement à deux roues

Cependant, la réalité est que le support n'entre pas en rotation dû à un blocage de celui-ci. Le tube n'ayant pas assez de friction pour mettre en rotation le support, il ne peut que glisser dessus comme illustré sur le schéma de droite de la figure 3.6. Ce glissement amène une force de frottement cinétique opposée à celle de la roue d'entraînement dont la conséquence est la réduction de la force de traction du tube. Ce résultat se traduit par un roulement avec glissement et donc d'une perte de précision sur la longueur extrudée.

Ainsi, la force de traction,  $F_{traction}$ , est déduite par la différence des forces appliquées sur le tube :

$$F_{traction} = F_{roue/tube} - F_{support/tube}$$

où celles-ci dépendent du coefficient de frottement  $\mu$  et de la réaction normale  $F_c$  du tube sur les différentes roues dont la norme équivaut à celle de la force totale de compression des ressorts :

$$F = \mu \times F_c$$

Pour que le mécanisme fonctionne correctement, il aurait fallu appliquer une plus grande force de compression. Néanmoins, le tube reste très souple et se déforme plastiquement très rapidement lorsque le contact est ponctuel avec les roues. Pour éviter de pincer le tube, il est possible d'obtenir des roues souples qui répartissent mieux la pression de contact et procurent en général un meilleur coefficient de frottement. Tel est le cas pour le mécanisme d'entraînement de la machine à étirer (voir figure 3.7). Cependant, il faut de larges déformations pour recouvrir suffisamment le tube nécessitant de plus grandes forces et roues. Par conséquent, il était nécessaire d'opter pour une solution plus compacte.

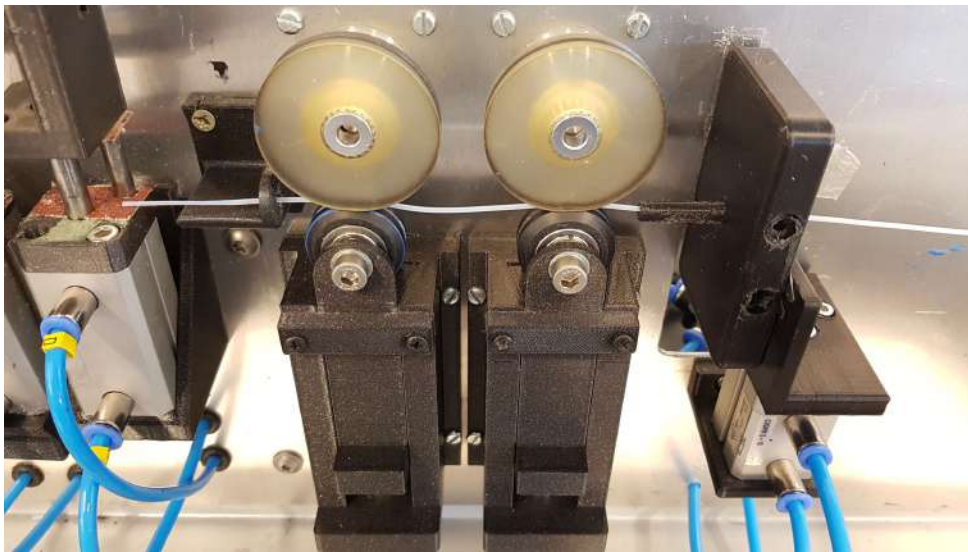


FIGURE 3.7 – Entraînement de la machine à étirer

### 3.2 Glissement du tube

L'idée était venue d'étudier plus en détail un système avec glissement du tube sur son support, car il permet de ne plus se soucier de la rotation d'une seconde roue, mais bien d'un élément fixe, et ce, grâce à la faible adhérence que propose le PTFE. Ainsi, il est possible de réduire la complexité du mécanisme et par conséquent du volume de la pièce.

Le PTFE est un matériau qui possède la propriété intéressante d'avoir une très faible adhérence avec d'autres matériaux ou lui-même. À titre d'exemple, son coefficient de frottement statique avec lui-même ou l'acier est de 0.04 en moyenne [6]. Il est à noter que la différence entre son coefficient statique et dynamique est faible et évite ainsi une variation brusque entre l'adhérence et le glissement [7]. Par la suite, la distinction entre les deux coefficients n'est plus prise en compte dans ce rapport.

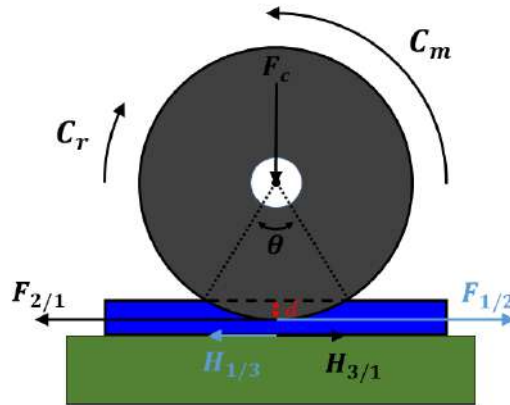


FIGURE 3.8 – Nouveau principe d'entraînement du tube

Il est possible d'utiliser cette propriété à notre avantage pour la conception d'un nouveau mécanisme. Le tube peut simplement s'appuyer sur une surface et glisser dessus, où une roue diamétralement opposée l'entraînerait. Un schéma de fonctionnement est illustré sur la figure 3.8 dans le cas d'une glissière plane.

L'avantage d'une telle configuration est la possibilité de modifier la courbure de la glissière pour imposer un plus long contact du tube avec la roue. Ainsi, l'angle d'embrassement du tube sur la roue  $\theta$  peut varier et amener une meilleure traction du tube. En effet, le tube arbore un poids et il n'est pas infiniment rigide se déformant sous l'action de la force de compression qui apporte une certaine tension dans le tube. Ainsi, on peut comparer ce système avec l'entraînement d'une courroie sur une poulie. Dans ce cas, il est possible d'appliquer l'équation d'Euler [8] :

$$\frac{T}{t} = e^{\mu\theta}$$

où le frottement sur la poulie apporte une différence de tension  $T$  et  $t$  entre les brins d'une courroie, avec  $\mu$  le coefficient de frottement. Ainsi, la poussée  $F_{1/2}$  appliquée au tube croît de manière exponentielle avec  $\theta$  sans modifier la compression  $F_c$ .

De plus, un contact plus long apporte une meilleure répartition de la compression et évite que l'enfoncement  $d$  amène de la plasticité sur le tube dont la présence avait été soulignée sur le système à deux roues.

Un dernier avantage possible est la variation du coefficient de frottement en fonction de la charge. En effet, le PTFE est un polymère quasi-incompressible tout comme le caoutchouc où la déformation au niveau du contact ne remplit pas l'ensemble des aspérités entre les deux solides. La surface de contact réelle n'est pas vraiment proportionnelle à la charge ainsi on se retrouve avec une tendance du coefficient à décroître avec la charge [9] [10]. Ce phénomène reste une supposition et nécessite divers tests pour le vérifier. Néanmoins cette propriété reste intéressante pour l'entraînement.

Toutefois, l'implémentation d'un tel système amène potentiellement une plus grande détérioration du tube vu que le PTFE possède une résistance à l'usure relativement faible

[11]. Toutefois, un point de la surface sera en contact avec le mécanisme sur quelques centimètres à faible pression et donc, à première vue, l'usure serait négligeable.

Il en est de même pour le couple à fournir sur la roue d'entraînement  $C_m$  qui croît avec le frottement du tube et la présence d'un couple résistif  $C_r$  proportionnel à la force de compression due au phénomène d'hystérésis avec la déformation du tube.

Afin d'améliorer l'entraînement du tube, la différence de frottement de l'équation 3.1 doit être maximisée en ayant une forte adhérence du tube sur la roue avec un angle d'enroulement assez élevé et une faible adhérence sur la glissière.

Cette analyse posera les bases des choix des futurs mécanismes tout au long de ce travail, mais ce de manière qualitative. En effet, les forces en jeu ou plus précisément les coefficients de frottement sont difficiles à déterminer et ne sont pas spécialement cruciaux pour l'étude. Une bonne configuration de la tête d'extrusion sera surtout validée de façon itérative par une succession de tests simples et rapides.

## 4 Implémentation du mécanisme

### 4.1 Système à lame ressort

Pour une première implémentation, il a été imaginé une lame ressort comme glissière où le schéma de la figure 3.9 illustre le principe. Cette lame reprend l'idée des ressorts du premier prototype dont la déformation est dépendante du passage du tube et de ses changements de section. En fonction de la raideur et de la longueur de la lame, la longueur de contact varie entre la roue et le tube.

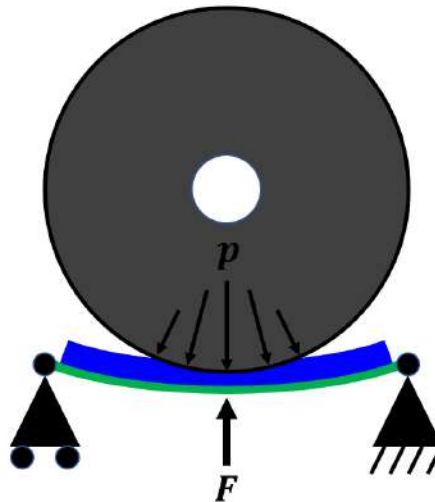


FIGURE 3.9 – Déformation de lame avec le passage du tube

Afin de valider le concept, la lame a été imprimée en PLA. Le tube adhère peu sur la face qui était en contact avec la plaque d'impression de l'imprimante. Afin d'avoir une idée des dimensions de lame, un calcul de la flèche  $f$  a été réalisé sur base d'un matériau en



PLA<sup>1</sup> isotropique où une force  $P$  de 10 N est nécessaire :

$$f = \frac{PL^3}{48EI} [mm] \quad (3.1)$$

Où la longueur  $L$  est imposé à 30 mm, une largeur proche de l'épaisseur de la roue à savoir 5 mm et le module de Young  $E$  fixé à 3000 MPa [12]. En imposant une flèche du diamètre externe du tube, l'épaisseur de la lame devait valoir 1.57 mm.

Ainsi, une lame avec une épaisseur de 1.6 mm a été testée où le tube n'avait pas assez d'adhérence avec la roue dû au faible rayon de courbure. De là, il a été décidé de conserver l'épaisseur de 1.6 mm au niveau du contact mais de laisser les extrémités plus fines et donc plus souple. La mise en place de la pièce dans la nouvelle tête d'extrusion est illustrée sur la figure 3.10.

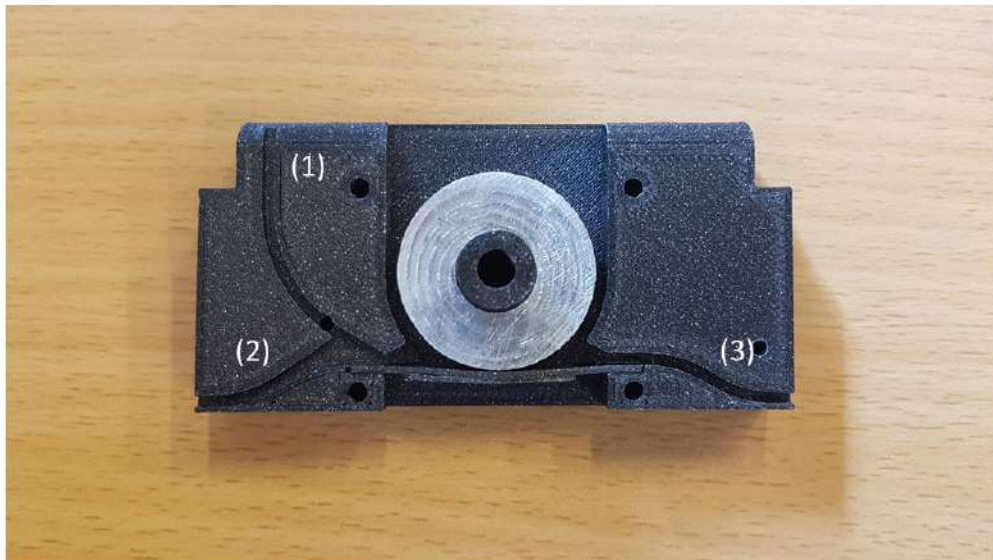


FIGURE 3.10 – Tête d'extrusion implémentant la lame flexible

Comme introduit précédemment, l'épaisseur en dessous de la sortie du canal doit être limitée à 1 mm. Dans ce cas, une épaisseur de 800  $\mu\text{m}$  a été choisie entre la surface inférieure du canal en sortie et celle de la tête. Par conséquent, le design des canaux a été totalement modifié afin d'amener le contact entre la roue et le tube plus haut que la sortie des canaux (2) et (3). Cependant, les canaux deviennent courbés dans cette configuration et apportent du frottement. Ainsi, les rayons de courbure ont été maximisés pour limiter la friction indésirable sur le tube.

Le canal (1) est, quant à lui, le nouveau canal d'acheminement. En effet, l'ancienne implémentation avec la sortie du canal au niveau de la roue rendait le changement de direction hasardeux avec pour conséquence des tubes déroulés trop loin. Ici, le canal a été décalé

---

1. Acide polylactique

vers la gauche pour permettre une plus grande plage d'arrêt. Cette zone est mise en avant sur les figures 3.11a et 3.11b qui illustrent les cas limites de la position du tube où le changement de direction est possible.

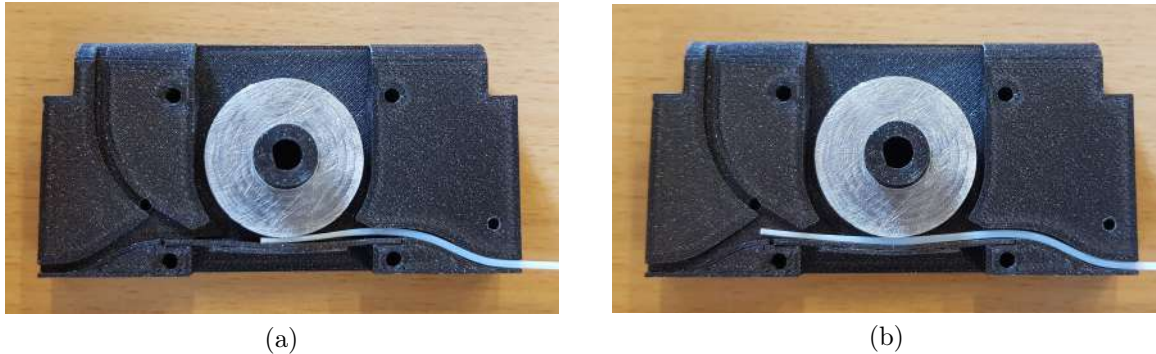


FIGURE 3.11 – Changement de direction du tube

Ainsi, on se retrouve avec une plage de quasi 20 mm pour effectuer le changement de direction du tube et dorénavant, il existe une plus grande indépendance avec la précision de l'entraînement.

Le déplacement du canal amène la création d'un carrefour en "Y". La jonction a été conçue afin d'amener les tubes vers la roue en limitant les frottements et empêcher ceux-ci de retourner dans le premier canal durant le changement de direction.

Les canaux sont tous positionnés en surface pour, potentiellement, fabriquer la tête d'extrusion par des méthodes plus classiques et on évite ainsi des canaux difficiles d'accès. La largeur globale des canaux est assez large pour éviter que le tube ne se coince ou ne soit trop gêné dans son déroulement. Après quelques essais, en variant la géométrie des canaux, il a été décidé que ceux-ci auraient une section carrée avec une largeur de 1.5 mm. Une telle section évite d'avoir des variations de section à cause du sens de l'impression. En effet, des canaux circulaires posséderaient un effet escalier.

Au niveau des sorties des canaux, la largeur de la section subit une réduction afin de minimiser l'erreur sur le positionnement. Néanmoins, la réduction est limitée par le frottement du tube dans les canaux et donc, une largeur de 1.3 mm a été réalisée. En moyenne le diamètre de l'extrémité étirée est de 0.9 mm et donc, l'erreur maximale associée est de  $(1.3-0.90)/2 = 0.2$  mm dans le plan de la face latérale de la tête. Sans même considérer le déplacement de la tête, l'erreur est déjà aux limites des 200  $\mu$ m imposée précédemment dans le cas des chanfrein. Toutefois, selon la verticale, le jeu est quasi nul grâce à la courbure des canaux qui amène l'extrémité du tube à toujours être en contact avec la surface inférieure. Sinon par rapport à l'autre direction et après plusieurs essais d'extrusion, le tube a tendance à être en contact avec le couvercle qui sera introduit dans la section suivante.

L'hypothèse que le tube soit contraint dans le coin inférieur gauche de la sortie sera la base de tous les futurs tests afin de conserver une conception simple néanmoins certaines limitations seront observées et décrites dans le chapitre 8.

Des essais sur la longueur extrudée ont été réalisés avec des tubes entre 10 et 100 cm



de longueur. Les résultats obtenus sont une erreur sur la longueur de 50  $\mu\text{m}$  sur des tubes de 10 cm à moins de 300  $\mu\text{m}$  sur ceux de 100 cm. Ces résultats respectent le cahier des charges néanmoins, la lame se voit très vite limitée dans son utilisation.

En effet, il s'est avéré que la lame n'était pas parfaitement droite lorsqu'elle n'était plus contrainte et subissait des déformations plastiques. Vu la compression nécessaire pour entraîner le tube et les pauvres propriétés mécaniques de la pièce, il était évident que la lame subirait de la fatigue. Pour un usage à long terme, il aurait fallu une lame fabriquée avec un acier à ressort par exemple dont les propriétés auraient été meilleures. En effet, il aurait été possible d'avoir une faible adhérence tout en conservant une résistance mécanique plus que suffisante.

Bien qu'il s'agisse d'une solution, la lame se déforme peu pour permettre un rayon de courbure plus prononcé et donc améliorer l'entraînement. Il était encore possible d'avoir de meilleures performances en compressant davantage le tube sur la lame, mais de nouveau un pincement était visible.

## 4.2 Système rigide

Afin de remplacer la lame ressort, nous avons envisager une surface naturellement courbée et rigide dans la continuité des canaux horizontaux qui imposerait un plus long contact du tube avec la roue en s'articulant uniquement sur sa raideur radiale. Plus de libertés seraient possibles au niveau de la forme de la glissière pour avoir un total contrôle, plus simple, sur la pression exercée sur le tube. La complexité de la tête d'extrusion se verrait aussi réduite avec l'absence d'éléments mobiles.

L'implémentation a débuté avec la mise en place d'une simple lame d'acier comme revêtement dans un ancien prototype (voir figure 3.12). Lors des essais, l'extrusion était régulière et lorsque le tube était retenu à la main, une meilleure adhérence était présent par rapport à la lame ressort. Par cette expérience, le concept était validé et d'autres prototypes, plus complexes, ont pu suivre.

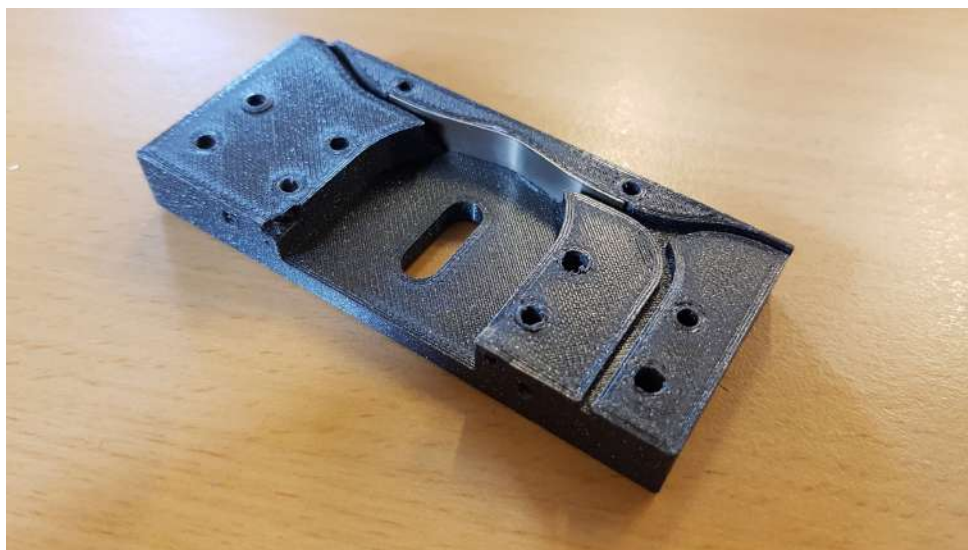


FIGURE 3.12 – Revêtement d'une ancienne tête d'extrusion

L'espacement entre la roue et la glissière était réglable au montage et restait fixe durant les opérations de déroulement. Cependant, cette rigidité réduisait voire rendait impossible l'entraînement des parties étirées du tube. En effet, l'espacement était réglé uniquement en fonction de la section nominale du tube pour imposer une légère déformation élastique sur celui-ci. Ce changement pouvait potentiellement gêner lors du changement de direction puisqu'à cet instant, l'entraînement dans le sens inverse se produit sur les derniers centimètres du tube. D'un autre côté, le fait que la section étirée n'était pas en contact, la rendait moins sujette à des variations de géométrie qui pouvait rendre le passage difficile du tube à travers les plaques, bien qu'il s'agisse là d'un phénomène à première vue négligeable.

Par la suite, une nouvelle tête d'extrusion a été imprimée pour intégrer le nouveau mécanisme d'entraînement. Le tube glisse tout simplement sur un pan incurvé de la pièce illustrée sur les figures 3.13. En effet, le tube glisse très bien grâce aux nombreuses aspérités provenant de la superposition des couches de PLA aligné avec les canaux.

La disposition des canaux reste similaire au modèle précédent sauf pour les courbures plus prononcées sur la portion de canal en bordure de la roue. Ce changement a amené à revoir la jonction entre le canal d'acheminement et de sortie, qui est beaucoup plus délicate à réaliser où le tube avait plus de facilité à remonter.



FIGURE 3.13 – Tête d'extrusion avec glissière intégrée

La tête d'extrusion a été réalisée en deux parties où une lame de 800  $\mu\text{m}$  a été fixée sur la face inférieure afin de limiter la fragilité des sorties de canaux. En effet, la pièce restait du PLA et se brisait facilement si une paroi était trop fine dans le sens de l'impression où le cas s'était présenté sur une pièce imprimée d'un seul bloc.

Une légère butée de 400  $\mu\text{m}$  d'épaisseur a été réalisée au niveau de la glissière (voir figure 3.14) pour guider le tube au niveau de la roue afin d'éviter d'implémenter des entonnoirs en entrée des canaux et que le tube ne se loge derrière la roue d'entraînement.

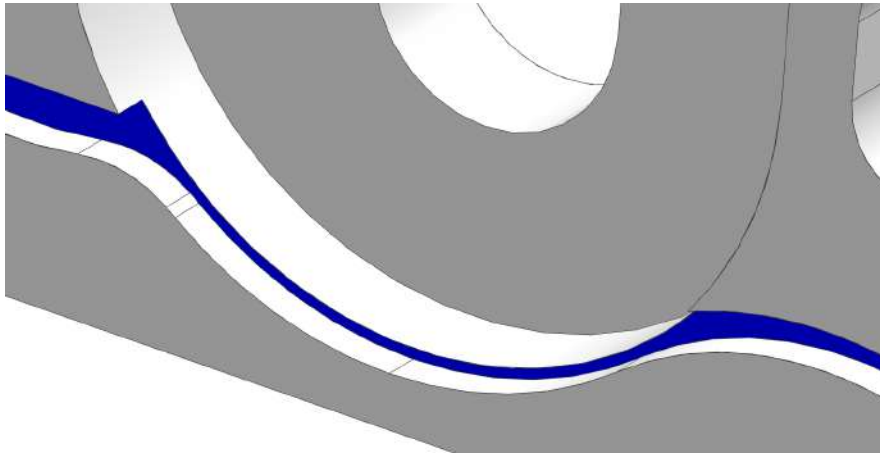


FIGURE 3.14 – Butée au niveau du contact avec la roue

Ce mécanisme a été le premier à être fiable durant les opérations de tubages. Les tests ont montré un bon entraînement du tube et le changement de direction était finalement réalisable puisqu'il était possible de garder un contact entre la section nominale et la roue.

### 4.3 Système à roue d'entraînement adaptative

L'entreprise évolue vite et sa technologie aussi. Au cours de mon stage, de nouveaux prototypes de tête d'impression ont été conçus pour permettre une meilleure résolution du dépôt de poudre. La nouvelle conception s'appuie toujours sur des tubes en PTFE. Or, ceux-ci sont devenus plus fins passant de 1.16 mm à 0.65 mm de diamètre extérieur (voir figure 3.15a). Ainsi, il m'a été demandé d'étudier les changements nécessaires pour permettre l'entraînement de ces tubes.

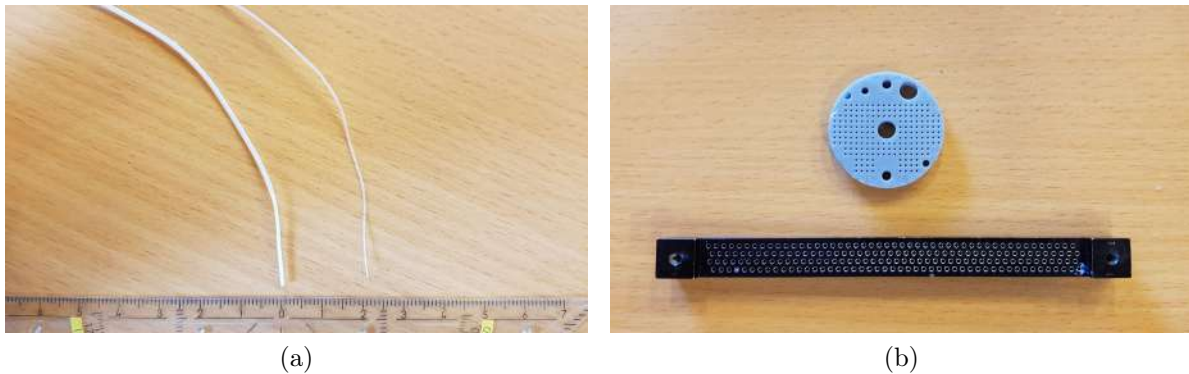


FIGURE 3.15 – Adaptation à des tubes de 0.65 mm

Les nouveaux tubes subiront les mêmes opérations que les précédents, et ce, avec des matrices adaptées à leurs diamètres (voir figure 3.15b). L'idée la plus simple repose sur un changement de la tête d'extrusion en fonction du diamètre du tube. En effet, chaque diamètre est associé à une largeur de canal optimale afin d'éviter que le tube ne se torde ou perde en précision en sortie de la tête.



FIGURE 3.16 – Premier prototype d'une tête d'extrusion adapté au tubes fins

Cette solution est amplement suffisante lorsqu'il existe quelques types de tubes si le remplacement de la tête est rapide et répétable. La figure 3.16 illustre le simple changement sur la largeur des canaux passant de 1.5 mm à 0.8 mm. Toutefois, la réduction en sortie de canal reste délicate à réaliser par une fabrication FDM où les cotes ne sont pas respectées à de telles dimensions.

Afin de pouvoir remplacer les différentes têtes, il était impératif de revoir le montage de celles-ci sur leurs supports. Durant les différents essais sur l'entraînement, un problème récurrent était le réglage vertical de la tête d'extrusion à chaque montage. La roue d'entraînement restait fixe sur le support et la seule manière de régler l'écartement était la mise en place de trous oblongs au travers de la tête.

S'il n'y avait qu'un seul type de tube, la pièce aurait été fixée définitivement au montage final de la machine et une seule calibration aurait été nécessaire. Cependant, il est maintenant possible de changer la tête régulièrement et donc, la méthode de montage devait être revue.

Premièrement, deux butées de référence ont été réalisées sur le support pour permettre à deux encoches sur l'extrudeur d'être en contact et d'être toujours montés de la même manière pour les deux pièces à disposition. Dès lors, la conservation de la position verticale est assurée et une seule calibration est nécessaire, et ce, même après plusieurs changements.

Deuxièmement, si la position verticale de la tête était fixée, il aurait fallu une alternative pour régler la compression de la roue, et ce, pour toutes les sections de tube existantes. Pendant la conception des premiers prototypes, le support proposait une fixation rigide comme illustrée sur la figure 3.17a. Ainsi, il fallait que la roue soit mobile verticalement et, de là, le moteur associé aussi. Pour ce faire, le porte-à-faux a subi des changements afin de guider le moteur comme illustré sur la figure 3.17b.



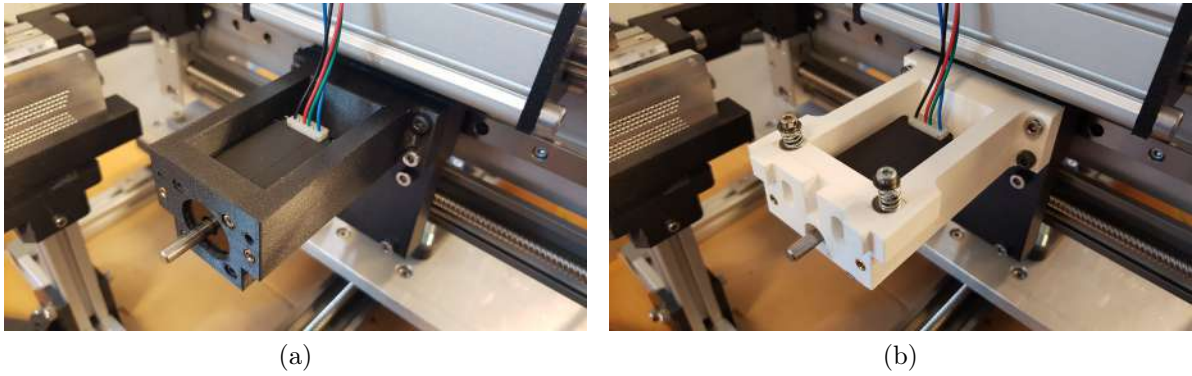


FIGURE 3.17 – Changement de support de la tête d'extrusion

Le moteur était solidaire d'une pièce mobile selon l'axe vertical dont le guidage était assuré par deux vis et un emplacement prévu dans le porte-à-faux. Bien qu'il soit difficile d'obtenir des tolérances voulues sur des pièces imprimées par FDM, l'ensemble coulissait assez bien de telle sorte qu'il n'y ait eu aucun blocage à tous les niveaux.

De ce montage, il existait deux manières de placer les ressorts de compression comme illustrés sur la figure 3.18. La première variante, avec un écartement fixe, est le placement des ressorts entre le support et la pièce mobile. Dans ce cas, on se retrouve avec une roue d'entraînement dont le mouvement vers le haut est impossible et donc, similaire au système rigide. Si un changement de tête d'extrusion s'opérait, il serait nécessaire de régler la hauteur des vis.

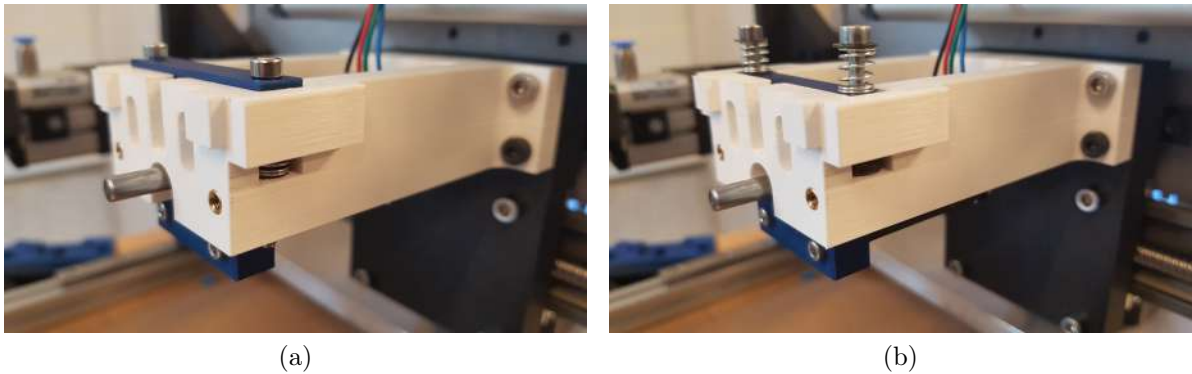


FIGURE 3.18 – (a) : Configuration à écartement fixe (b) : Configuration à écartement variable

La deuxième variante, à écartement variable, m'a été proposée afin de laisser la roue libre d'effectuer un mouvement vers le haut où les ressorts sont placés entre les têtes de vis et la pièce mobile. On se retrouverait alors dans un cas similaire à la roue de support de la première conception. Ce montage permet d'entraîner efficacement les deux types de tubes sans avoir à changer un paramètre. De plus, il est possible de reprendre les erreurs d'excentricité dans une certaine mesure et ainsi, avoir un contact quasi-continu avec la roue. Le montage de la tête d'extrusion sur son support est présenté sur la figure 3.19. La force de compression nécessaire était d'environ 10 N afin de conserver un entraînement fiable du tube où une augmentation de celle-ci amenait la roue à se bloquer.

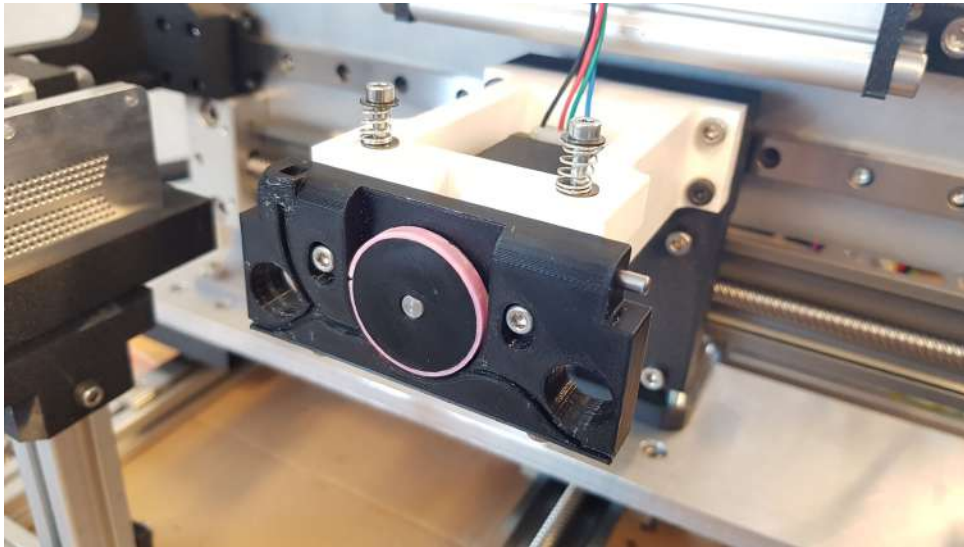


FIGURE 3.19 – Montage de la tête d'extrusion sur son support

## 5 Roue d'entraînement

Outre le choix de la glissière, la roue d'entraînement est tout aussi importante afin de mettre en mouvement le tube. Sa taille, sa flexibilité et son adhérence sont des paramètres à prendre en compte afin d'obtenir des résultats satisfaisants.

### 5.1 Choix du matériau

La première conception utilisait une roue en aluminium d'environ 27 mm de diamètre et 5 mm d'épaisseur. À l'aide d'un papier à poncer, la surface de contact avec le tube a été rendu très rugueuse afin d'avoir une bonne adhérence. Durant le début de ce travail, la roue en aluminium avait été conservée sans réellement étudier une meilleure alternative. L'aluminium est connu pour sa grande adhérence avec d'autres matériaux donc, il était normal de garder la pièce.

Par la suite, deux problèmes se sont présentés lorsque la glissière commençait à devenir plus incurvée. Comme expliqué plus tôt dans ce rapport, le couple nécessaire au moteur augmente avec l'augmentation de la surface de contact avec le tube. Ainsi, le couplage devenait insuffisant pour transférer le couple dans certains cas et la roue glissait sur l'arbre du moteur. L'autre problème provenait de la géométrie de la roue. Celle-ci possède une légère excentricité lorsqu'elle est mise en rotation, mais aussi, la surface de contact n'est pas parfaitement circulaire. Ainsi, on se retrouvait avec une variation du rayon de 150  $\mu\text{m}$  au niveau du contact avec le tube.

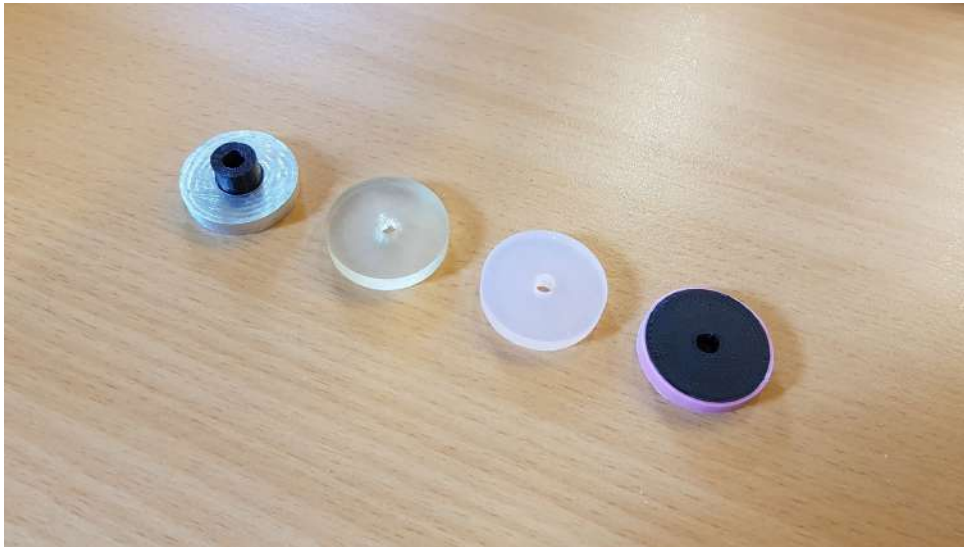


FIGURE 3.20 – Les différentes roues testées pour l'entraînement, en partant de la gauche : aluminium brossé, polyuréthane lisse, silicone légèrement granuleux et PLA avec revêtement en silicone

Dans la suite de la conception, il était nécessaire de remplacer la roue pour améliorer les performances d'entraînement. L'épaisseur de la pièce a été légèrement réduite à 4.8 mm afin de limiter le contact avec le couvercle. Le diamètre de la roue pourrait être agrandi pour limiter une trop grande courbure du tube pour une même surface de contact et donc, la direction du vecteur vitesse en sortie serait plus horizontale. Cependant, la largeur de la tête d'extrusion en serait impactée et la longueur minimale de tube acceptable par la machine se verrait augmenter. Ainsi, les dimensions de la roue ont été conservées afin d'éviter aussi toutes modifications sur le design des canaux.

Le changement de roue s'est opéré durant la conception du système d'entraînement rigide afin d'apporter davantage de flexibilité. Dans un premier temps, des roues assez flexibles ont été testées comme par exemple le polyuréthane (TPU) ou le silicone. Au ressenti, ces roues adhèrent beaucoup plus que la roue en aluminium. Cependant, il est difficile de transmettre un couple, l'arbre glisse dans l'alésage et la compression latérale du tube amène un fléchissement de la roue le long de la ligne d'action de la force. Ce phénomène a tendance à pousser le tube vers l'extérieur et de soulever le couvercle pendant le déroulement. Ce type de matériaux a l'avantage de se déformer autour du tube et donc, de répartir la force sur une plus grande surface. Néanmoins, il faut éviter que la roue recouvre le tube du côté du couvercle pour assurer son dégagement. Afin d'utiliser ces roues, il aurait été nécessaire de placer moyeu rigide en leur centre et de lier les deux éléments de manière irréversible.

Pour obtenir des performances similaires et transmettre le couple moteur plus facilement, un morceau de feuille de silicone a été collé sur le pourtour d'une roue en PLA. L'addition de l'épaisseur du silicone et du rayon de la roue donne un diamètre légèrement inférieur à 27 mm. La transmission du couple est assurée par un emmanchement de la roue sur l'arbre grâce au méplat pour plus de simplicité et vu que le couple à transmettre est faible. Dans la pratique, le méplat est utilisé avec une vis fixée sur la roue mais aurait demandé une pièce plus épaisse.

L'entraînement du tube est plus efficace par rapport au montage avec une roue en aluminium. La rotation de la roue est moins sensible aux fluctuations du diamètre qui sont tout de même présentes, à cause des limitations de l'impression et le collage approximatif du silicone. Certes, l'adhérence est moins forte que les roues flexibles, mais elle suffisante pour bloquer la roue lorsque la compression verticale est trop grande. Il est même difficile de retenir le tube lorsqu'il est déroulé dans un sens à tel point que la roue bloque et vibre en essayant d'entraîner le tube.

## 5.2 Choix du moteur

L'entraînement du tube nécessite un couple au niveau de la roue et la conservation du moteur pas-à-pas déjà présent semble suffire. Par leur principe, ces moteurs sont contrôlés par le nombre d'impulsions envoyées depuis le contrôleur. Le moteur est un NEMA 11 du fabricant **Nanotech** et peut générer un couple de maintien maximal de 0.061 Nm à des vitesses inférieures à 200 tour/min [13]. Sa fiche technique complète est disponible en Annexe C.1.

Toutefois, lors des essais sur le premier prototype, le moteur vibrait énormément à faible vitesse. Ce phénomène s'apparente à une résonance du moteur dont la plage d'activation est assez basse en fréquence lorsque des pas entiers sont imposés par la carte de contrôle illustrée sur la figure 3.21a. La solution à ce problème a été de réduire le pas angulaire du moteur dont la réalisation est possible à l'aide de drivers plus avancés qui permettent de modifier la séquence d'impulsions. Le choix a donc été porté sur un driver similaire à ceux des steppers des axes linéaires illustrés sur la figure 3.21b. Le fonctionnement se base sur la puce **TB67S109AFTG** dont la fiche technique est disponible en Annexe C.8.

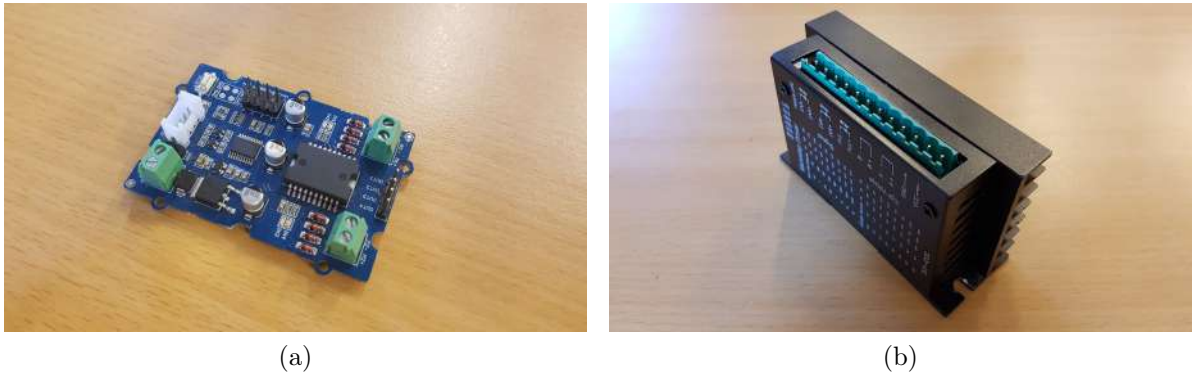


FIGURE 3.21 – Remplacement de la carte de contrôle du moteur de la roue

Ces drivers permettent d'améliorer la résolution de la position angulaire de la roue en réduisant le pas du moteur. Cependant, la précision, elle, est limitée par les spécifications du moteur avec une erreur de  $\pm 5\%$  sur un pas entier et donc diminue avec l'augmentation de la résolution. Il est à noter que l'utilisation du *microstepping* réduit fortement le couple délivré par le moteur. Néanmoins, dans le cas de la roue, le couple moteur est suffisant pour un microstepping de 4 qui est un bon compromis entre un stepper silencieux avec une plus longue durée de vie et une résolution largement suffisante pour le changement de direction.



## 6 Mécanisme de dégagement du tube

En se référant à la première conception, les canaux horizontaux n'étaient pas complètement fermés pour permettre l'éjection du tube à l'aide d'une lame en PLA. Cette lame était assez rigide pour éviter que le tube ne s'échappe avant d'atteindre une des deux plaques. Lorsque les deux extrémités sont serties, un mouvement vers l'arrière de la tête d'extrusion est effectué. Le tube, supposé tendu, soulève progressivement la lame afin de se libérer complètement après une course d'une longueur donnée comme illustré sur la figure 3.22.

Ce premier concept sur base d'une lame flexible a l'avantage d'être passif et donc, il ne requiert aucune source d'énergie supplémentaire. Cependant, le tube doit être tendu pour pouvoir s'éjecter ce qui est rare comme situation en pratique. De plus, la lame par sa nature flexible rend la largeur des canaux assez aléatoire surtout au niveau des sorties et donc, la précision se voit impactée. Cet effet est partiellement dû aux larges déformations répétées de la lame qui amènent une certaine fatigue et plus spécialement pour un élément fabriqué en PLA qui n'est pas adapté à de telles conditions.

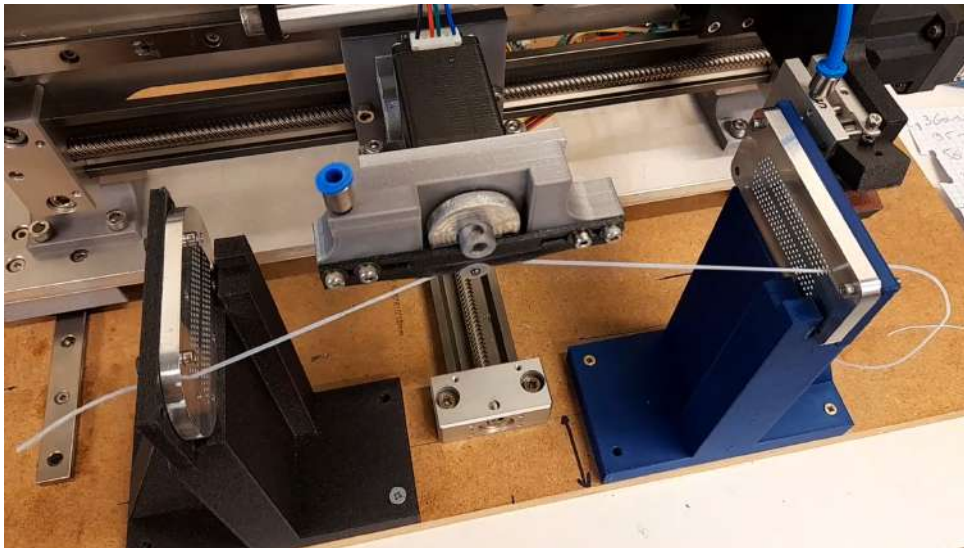


FIGURE 3.22 – Libération d'un tube tendu par recul de la machine<sup>2</sup>

### 6.1 Couvercle avec aimants permanents

Afin d'éviter une conception trop complexe au niveau du dégagement, l'idée de la lame flexible a été reprise ou plus précisément le mouvement angulaire de celle-ci. Dans cette nouvelle conception, le tube soulève un couvercle libre de réaliser une rotation par rapport à un axe fixe comme illustré sur la figure 3.23. Afin de guider le tube jusqu'il atteigne une des deux plaques, il est nécessaire de concevoir un mécanisme qui puisse retenir le couvercle en place.

2. <https://drive.google.com/file/d/1yOXA1qro739QSyhIZsP2oE8v0vzSkoqc/view?usp=sharing>

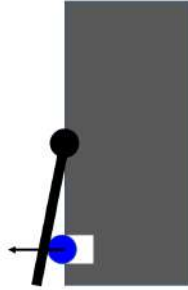


FIGURE 3.23 – Rotation d'un couvercle par l'action du tube

Dans un premier temps, l'idée a été de placer une paire d'aimants permanents sur un couvercle et au sein de la tête d'extrusion comme illustrée sur la figure 5.8. Ce sont des aimants puissants en néodyme de forme cubique dont la largeur est de 5mm [14]. Ceux-ci ont été placés de telle sorte qu'ils s'attirent mutuellement par force magnétique où celle-ci décroît rapidement avec la distance. La force d'attraction entre les aimants n'est pas arbitraire. Elle doit être suffisante pour retenir le tube dans les canaux de sortie et être négligeable lorsque le tube a réussi à soulever le couvercle.

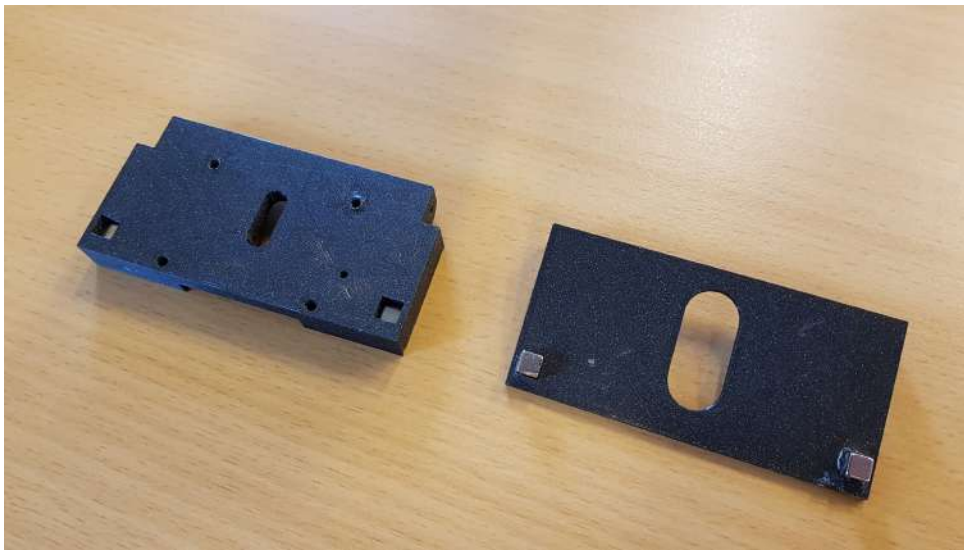


FIGURE 3.24 – Couvercle retenu par des aimants permanents

Tout comme le premier prototype, le recul du chariot selon l'axe X permet de soulever le couvercle par la réaction du tube. Par contre, il est nécessaire de libérer le tube de manière répétable et indépendamment de sa longueur. Pour faciliter la libération, le recul est réalisé à proximité de la seconde plaque où le tube serait contraint de soulever le couvercle vu son point de fixation. Le point de rotation a été placé le plus haut possible afin que le déplacement vertical de l'extrémité du couvercle soit limité et donc, que le tube puisse le soulever sur une plus grande distance de recul.

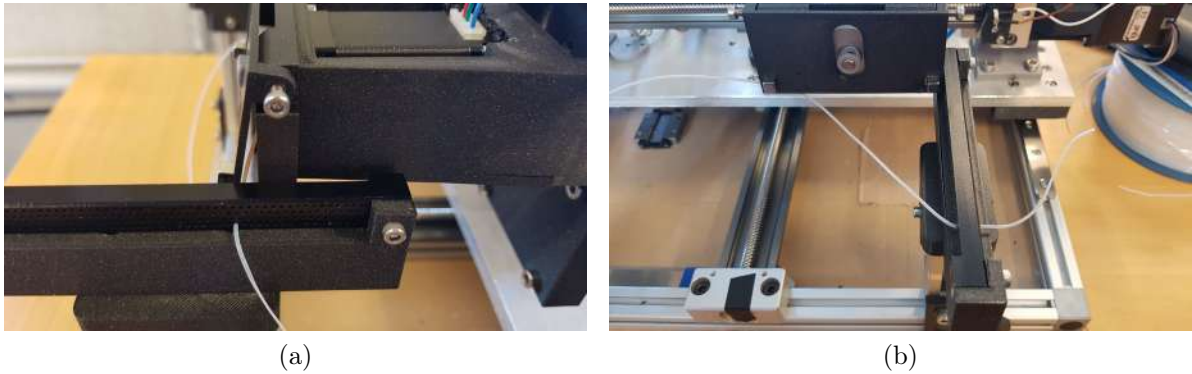


FIGURE 3.25 – Libération du tube par le recul de la tête d'extrusion

La figure 3.25a illustre l'état de l'éjection du tube lorsque le chariot recule. Afin de prouver que la longueur du tube entre les deux plaques n'entre pas en compte lors du dégagement, l'opération a été testée avec la seconde extrémité totalement libre et pendante dans le vide.

À faible vitesse de recul, une première moitié réussit à être libérée, mais très vite le couvercle se referme et ralentit l'éjection. Ce phénomène se produit lorsque le bas du couvercle en contact avec le tube se retrouve à la même hauteur que ce dernier. À ce moment, le tube passe devant le couvercle et n'ayant aucune rétention, le couvercle se referme alors que la seconde moitié ne s'est pas encore libérée. Dans cette configuration, le tube se libère beaucoup moins vite et après une course de 7 cm, celui-ci n'est toujours pas libre comme illustré sur la figure 3.25b.

Lorsqu'une forte accélération était imposée, le tube se libérait instantanément. Toutefois, il arrivait tout de même que le tube se coince à cause du couvercle. À de telles accélérations, la machine fléchissait à vu d'œil à cause de son inertie. Ainsi, un tel phénomène est à proscrire pour éviter de réduire la durée de vie de la machine.

Un autre test a été réalisé pour observer le comportement du tube avec aucune force appliquée sur le couvercle. Le constat est clair, le tube se libère facilement à faible vitesse. Néanmoins, la force de maintien du couvercle ne peut être réduite sinon le tube se libère au niveau de la roue et l'entraînement est interrompu. Ainsi, il était nécessaire de commander cette force pour qu'elle soit active pendant toutes les opérations de déroulement ou de sertissage et seulement inactive lorsque le tube doit être libéré.

## 6.2 Couvercle avec électroaimants et plaque en acier

Les aimants permanents fournissent une force suffisante pour retenir le couvercle donc, naturellement, il a été décidé de les remplacer par des électroaimants pour répondre au problème d'une force commandée.

La force d'attraction est générée par la circulation d'un courant dans un solénoïde et permet d'attirer des objets ferromagnétiques ou autres aimants placés à proximité. Cependant, les électroaimants illustrés sur la figure 3.26 ont un fonctionnement opposé dans notre cas. Un aimant permanent est intégré dans le composant qui produit une force magnétique appréciable, mais lorsque un courant circule, il y a une annulation de champ et plus aucune attraction n'est possible.

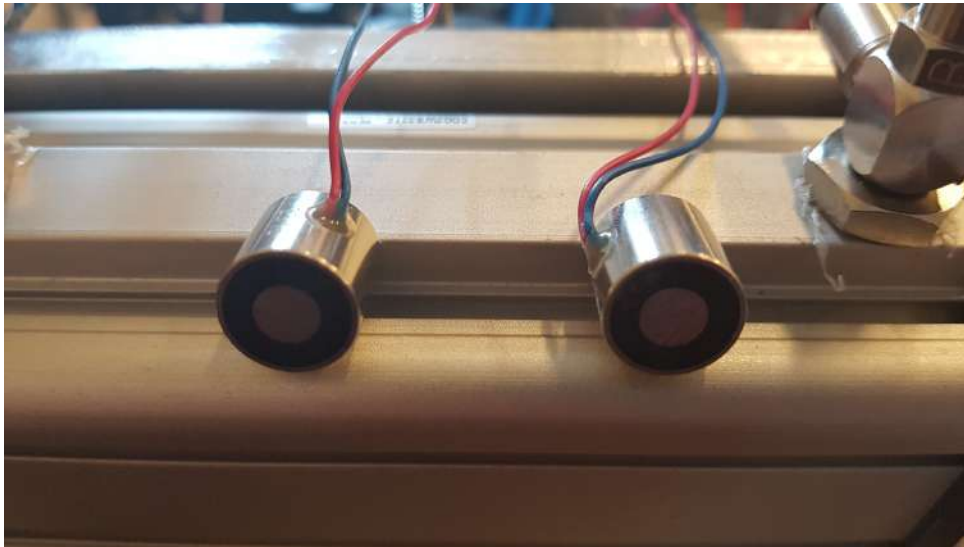


FIGURE 3.26 – Paire d'électroaimants

L'avantage d'un tel fonctionnement est la mise sous tension des aimants uniquement lorsque le maintien du couvercle doit disparaître. Ainsi, le système consomme moins d'énergie et surtout, les aimants ont le temps de se refroidir. En effet, ces électroaimants consomment un courant d'environ 500 mA pour une tension de 12 V ce qui représente une puissance de 6 W dont la majorité est dégagée sous forme de chaleur. L'éjection du tube ne dure que peu de temps sur l'ensemble des opérations et donc, la température de l'aimant reste légèrement supérieure à la température ambiante. Un fonctionnement opposé aurait amené la tête à des températures plus proches de la température de transition vitreuse du PLA dont la valeur se situe autour de 60 °C [12]. On évite ainsi la déformation de la pièce et plus spécialement des canaux de sortie.

Le potentiel inconvénient de ces composants est la possibilité que l'aimant permanent perde son pouvoir magnétique avec les cycles répétés d'un champ opposé. Au moment de la rédaction, plusieurs heures de tubages ont été réalisées et aucun signe de faiblesse n'a été détecté.

Les électroaimants sont assez imposants dans leur taille où le modèle fait 12 mm de diamètre ce qui est considéré comme l'un des plus petits modèles. Il a fallu remplacer l'encoche de 5 mm des aimants au néodyme par deux trous débouchants d'un diamètre légèrement inférieur aux nouveaux aimants pour réaliser une légère interférence de montage.

Au niveau du couvercle, de fines tôles d'un acier d'une épaisseur d'environ 0.55 mm ont été collées de part et d'autre afin d'être attirées par les deux aimants. L'épaisseur de la tôle est inférieure à l'entraxe des orifices des plaques d'interfaces et donc permet de sertir deux orifices successifs. Le mouvement du couvercle a été analysé pour vérifier si aucun tube déjà sertie ne gênait la rotation et d'un autre point de vue, si les tubes ne subissaient aucune détérioration.

Après plusieurs essais, le mécanisme a prouvé qu'un dégagement fiable et répétable était possible avec une distance de recul de seulement 3 cm en conservant une accélération

identique aux déplacements généraux de la machine.

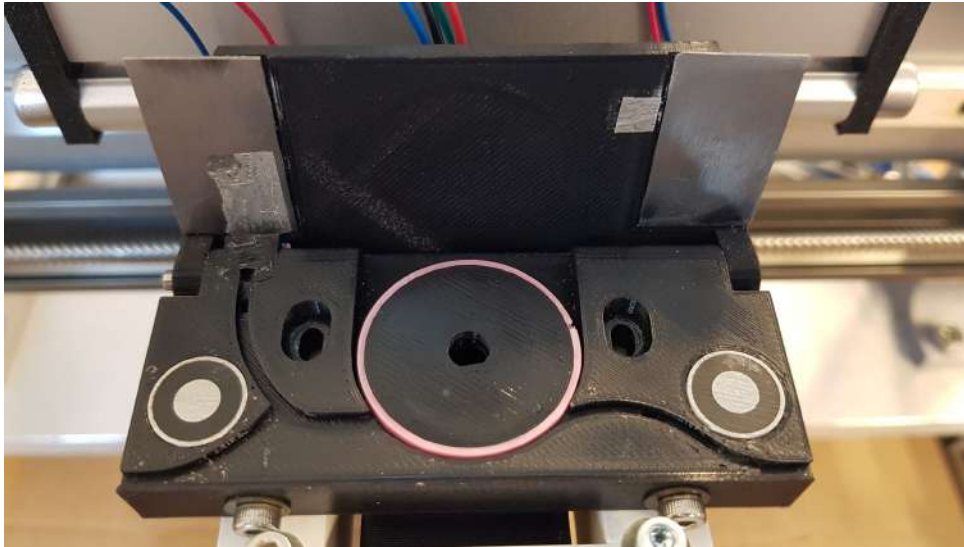


FIGURE 3.27 – Montage des électroaimants et du couvercle sur la tête d'extrusion

## 7 Impression en résine

Jusqu'à maintenant, l'impression FDM a suffi à fabriquer les têtes d'extrusion avec des tolérances acceptables pour l'application. Le sens de l'impression permet d'obtenir des canaux lisses où les stries des couches de PLA s'alignent avec le tube dans son mouvement et donc, limitent le frottement. Néanmoins, les limites du procédé sont atteintes lorsqu'une variation de quelques centaines de micromètres est imposée sur les canaux comme par exemple ceux de sortie.

Ainsi, la méthode de fabrication doit être revue afin d'obtenir des tolérances sur la géométrie moins aléatoire et plus précise. La première idée venue était d'usiner la pièce. Toutefois, vu la complexité de la pièce, le temps nécessaire entre la réalisation des plans et la livraison, il a été décidé de réaliser la pièce au sein de l'entreprise à l'aide d'une imprimante SLA<sup>3</sup> avec de la résine photopolymérisable.

La figure 3.28 présente les nouvelles têtes d'extrusions réalisées à l'aide d'une résine transparente.

---

3. Stéréolithographie



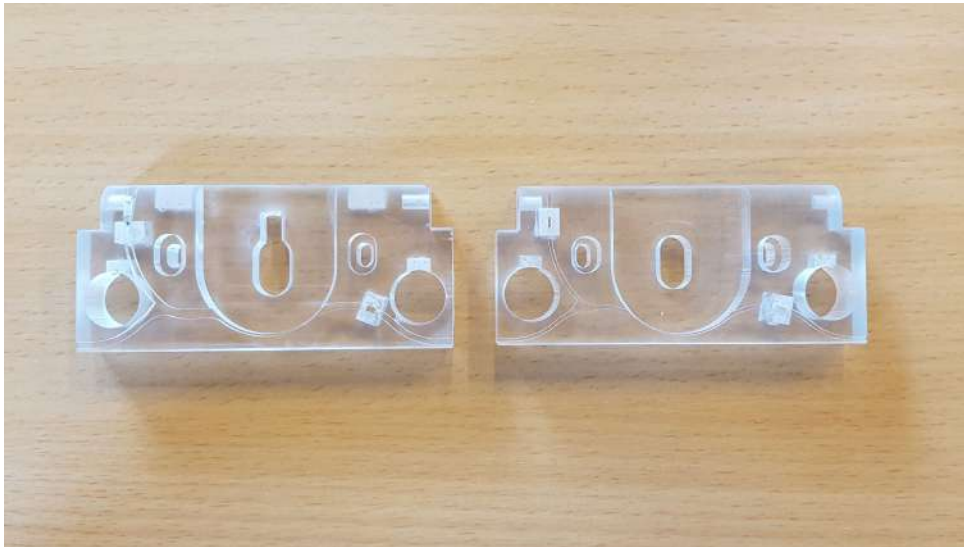


FIGURE 3.28 – Têtes d'extrusion imprimées en résine

Ces pièces possèdent un degré de finition supérieur aux précédentes, où il est dorénavant possible de placer précisément les tubes fins. Néanmoins, le glissement du tube est moins prononcé à cause d'un effet escalier le long des canaux provenant de la méthode de fabrication. En observant l'entraînement du tube, l'opération reste moins efficace. Dans ce genre de cas, si le glissement n'est pas parfait, on pourra reprendre l'idée du revêtement à l'aide d'une lame métallique décrit précédemment.

Dans l'idée d'harmoniser la tête d'extrusion, le couvercle a été lui aussi réalisé en résine où la figure 3.29 illustre le montage final.

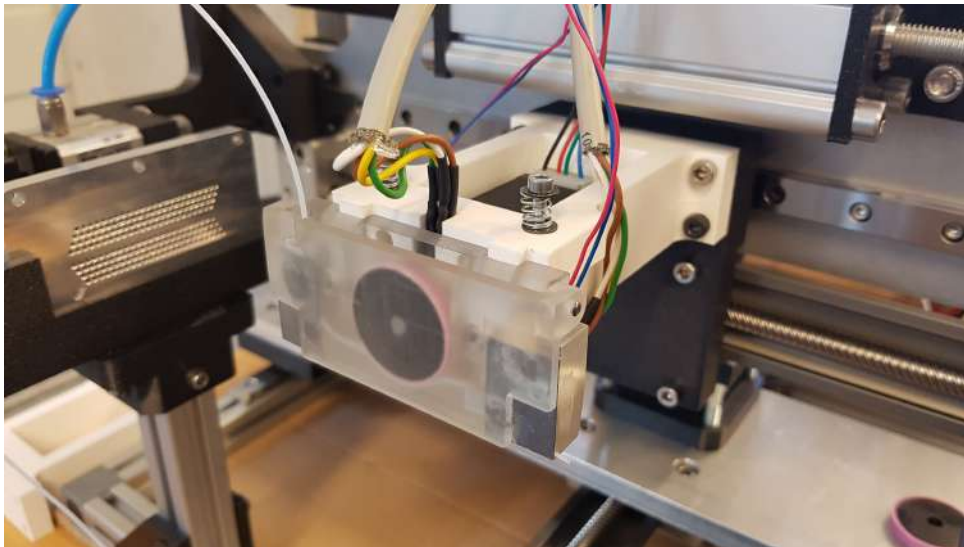


FIGURE 3.29 – Montage du couvercle sur la tête d'extrusion en résine

# Chapitre 4

## Placement du tube

Ce chapitre relate des divers modifications réalisées sur la machine pour rendre le placement et l'alignement de la tête d'extrusion le plus précis possible par rapport aux plaques.

### 1 Modes de déplacements

Les déplacements de la tête d'extrusion restent alignés selon trois axes linéaires dont la configuration a été conservée du précédent travail. Le modèle illustré sur la figure 4.1 met en évidence le mouvement relatif des différents éléments structurels du premier prototype par rapport au système d'axe choisi.

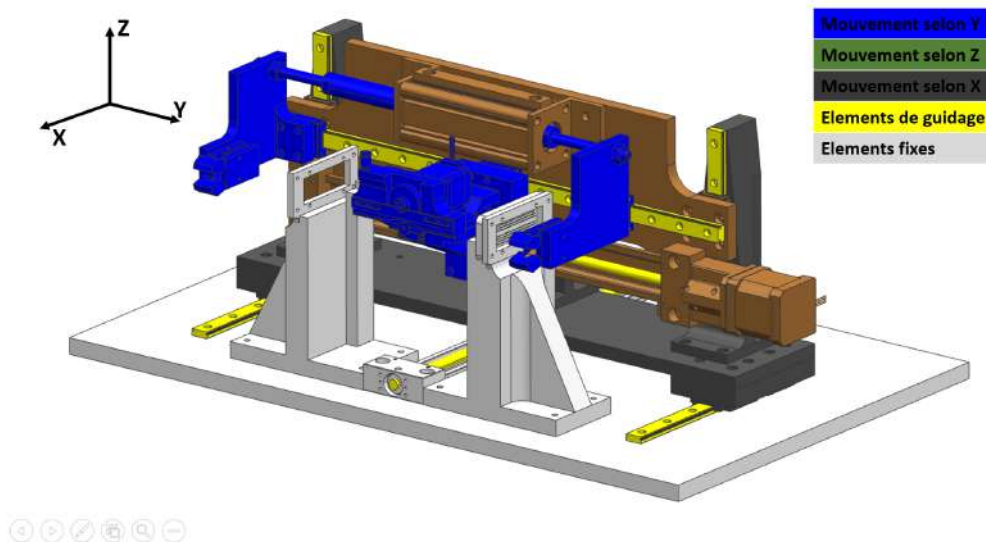


FIGURE 4.1 – Déplacements de la conception antérieure

#### 1.1 Axes X et Y

Le mouvement selon les axes X et Y est assurée par deux rails linéaires motorisés du fournisseur **IGUS** [15]. Les rails avaient été précédemment dimensionnés et bien qu'il y ait eu plusieurs changements depuis, ceux-ci restent largement adaptés pour le prototype actuel en demandant au maximum des accélérations de  $0.1 \text{ m/s}^2$  pour une charge d'environ

10 kg sur l'axe X et 0.5 kg sur l'axe Y. Les fiches techniques associées sont disponibles en Annexe C.2.

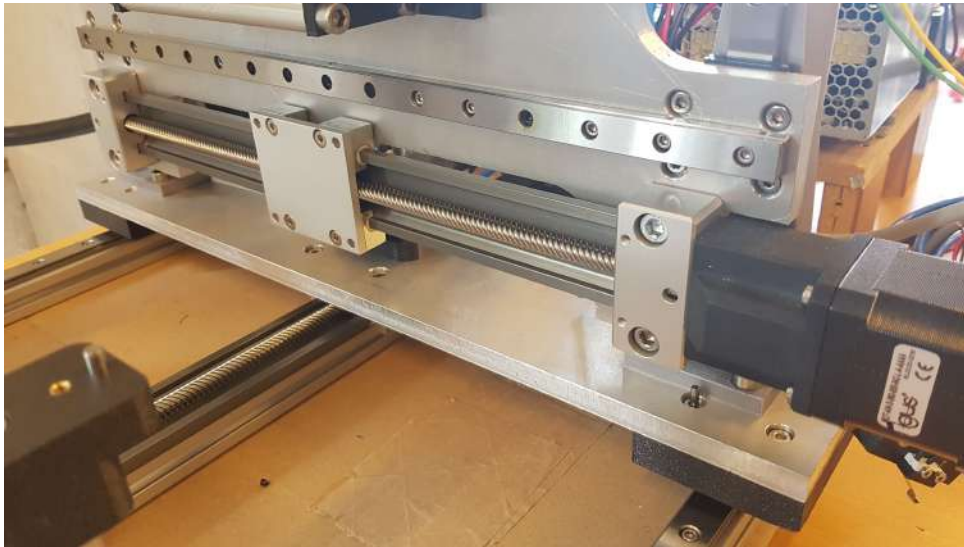


FIGURE 4.2 – Rail motorisé sur l'axe Y

Outre la charge à déplacer, la précision du placement doit être vérifiée. La vis possède un pas de 15 mm et elle est associée à un moteur pas-à-pas identique pour les deux axes. Les moteurs sont des modèles avec une résolution de 200 pas entiers sur une rotation complète. Néanmoins, le moteur vibre énormément à basse vitesse comme il était le cas pour le moteur de la roue et il est nécessaire d'appliquer un microstepping d'au moins 8 afin d'avoir un mouvement lisse. Le couple moteur en est impacté et réduit de 80 % en se référant au tableau 1.1.

Micro-pas	Fraction restante du couple de maintien
1	100 %
2	70.71 %
4	38.27 %
8	19.51 %
16	9.8 %
32	4.91 %

TABLE 4.1 – Dépendance du couple de maintien par rapport au microstepping [16]

Toutefois, le couple reste suffisant pour les déplacements à effectuer. Au final, la résolution du mouvement est théoriquement de 9.38  $\mu\text{m}$ .

Il est à noter que l'erreur sur l'arrêt du moteur est fixe et non cumulable dont la valeur est de  $\pm 0.09^\circ$ . Cette valeur correspond à une erreur linéaire de 3.75  $\mu\text{m}$ . La précision qui en résulte peut sembler mauvaise. néanmoins, à de tels ordres de grandeur, il n'y a quasi aucun impact sur le tubage.

Ces résultats ne sont valables que lorsque le palier se déplace dans la même direction. En effet, il existe un jeu mécanique (*backlash*) entre l'écrou et la vis qui apporte une erreur de positionnement lorsque la rotation de la vis s'inverse. Ce jeu a été mesuré sur



les deux axes à l'aide d'un comparateur micrométrique et sa valeur est d'environ 70  $\mu\text{m}$ . À chaque mouvement une compensation du jeu mécanique sera mise en place au niveau du software de la machine.

## 1.2 Axe Z

### Abandon du vérin électrique

Le mouvement vertical était assuré par un vérin électrique couplé à un servomoteur. Le vérin et sa carte de contrôle provenaient du fabricant **Actuonix** avec pour référence **L16-140-150-12-P** [17] et illustrés sur la figure 4.3.



FIGURE 4.3 – Vérin électrique avec sa carte de contrôle

Une analyse du mouvement de la tête d'extrusion a montré des faiblesses que présentait le vérin. Premièrement, le positionnement vertical était instable et provoquait des fluctuations de plusieurs millimètres alors qu'il était nécessaire de rester immobile. Le positionnement du vérin est réalisé par l'intermédiaire d'un contrôleur proportionnel-dérivatif dont la modification des paramètres était difficile et le feedback peu précis. Ceci amenait au deuxième problème qui est la répétabilité beaucoup trop faible pour nos besoins. En effet, une répétabilité de 500  $\mu\text{m}$  est en dehors de la valeur fixée de 200  $\mu\text{m}$  et n'aurait certainement pas pu dérouler correctement un tube dans une plaque. Ainsi, il a été décidé de remplacer ce vérin électrique par un autre actionneur.

### Implémentation du nouvel actionneur

Afin de déterminer le choix d'un nouvel actionneur, il est nécessaire de dresser une liste des spécifications requises :

- **Charge** : Une charge de 70 N est à mouvoir verticalement en supposant que celle-ci est purement axiale où les guides linéaires reprennent l'entièreté du moment autour de l'axe Y ;
- **Vitesse** : A maximiser puisqu'il n'y a aucune contrainte de temps ;
- **Course** : Elle dépend de la hauteur des plaques définie à 5 cm ;
- **Précision** : En reprenant la valeur du cahier des charges, il faut une erreur de positionnement de maximum 150  $\mu\text{m}$  avec l'addition des autres sources.
- **Cycle de service** : Tout dépend de la séquence des mouvements et de la position des plaques néanmoins on peut se fixer une valeur de 10% d'utilisation.

Toutes ces spécifications peuvent être reprises par une table linéaire similaire aux deux autres axes. Cependant, elle aurait demandé des changements beaucoup trop importants

sur la machine et donc, il a été décidé d'implémenter un système plus simple, se rapprochant d'un fonctionnement du vérin électrique.

Vu que le positionnement est le point le plus critique et la vitesse peut être relativement faible, il a décidé d'implémenter un entraînement à vis. On préférera un glissement direct entre la vis et son palier pour leur meilleure propriété autobloquante dans les mouvements verticaux contrairement au vis à bille où leur coefficient de frottement est beaucoup plus faible.

De plus, une charge verticale n'amène aucun jeu mécanique entre le palier et la vis qui fait défaut dans d'autres configurations tel que les axes X et Y par rapport à un système à billes naturellement plus précis. Le prix plus attractif des vis classiques a aussi été considéré pour leur choix dans la conception de ce prototype.

Afin d'harmoniser le contrôle des mouvements de la machine et la faible vitesse que nécessite la rotation de la vis, un moteur pas-à-pas était requis. Le choix de l'actionneur s'est porté sur un modèle du fournisseur **Nanotec** où plusieurs capacités de charge étaient disponibles [18].

La charge dynamique est proche de celle statique de 70 N au vu des faibles accélérations demandées. Les performances des actionneurs sont généralement données par la poussée maximale. Néanmoins il est possible que le moteur requiert un microstepping et réduit la poussée disponible par la relation 4.1 :

$$f_s \times F = \eta \times \frac{2\pi \times (\beta C_m - C_d)}{p} \quad (4.1)$$

Où le paramètre  $\beta$  est la fraction de couple restant en fonction du *microstepping* repris dans le tableau 1.1. L'efficacité  $\eta$  dépend du pas de la vis  $p$  et du coefficient de frottement  $\mu$  par la relation 4.2.

$$\eta = \frac{1 - \mu \times \tan(p)}{1 + \mu / \tan(p)} \quad (4.2)$$

En supposant un microstepping de maximum 8 et un facteur de service  $f_s$  de 1.1, il faudrait une poussée de 420 N en négligeant le couple de détente  $C_d$ . Ainsi, le choix de l'actuateur linéaire s'est porté sur le modèle **LSA421S14-A-TJBA-152** avec un écrou sans rattrapage de jeu illustré sur la figure 4.4 et certaines spécifications techniques sont reprises dans le tableau 1.2. Sa description complète est disponible en Annexe C.3.

<b>Poussée max</b>	469.8 N	<b>Vitesse max sans charge</b>	26 mm/s
<b>Pas de vis</b>	1 mm	<b>Course</b>	133 mm

TABLE 4.2 – Caractéristiques de l'actionneur linéaire

FIGURE 4.4 – Gamme **LSA** de chez **Nanotec** [18]

Un microstepping de 4 était finalement suffisant pour l'utilisation du moteur où sa résolution est maintenant de  $1.25 * 10^{-3}$  mm par impulsion moteur pour une erreur de  $\pm 1.25 * 10^{-4}$  mm.

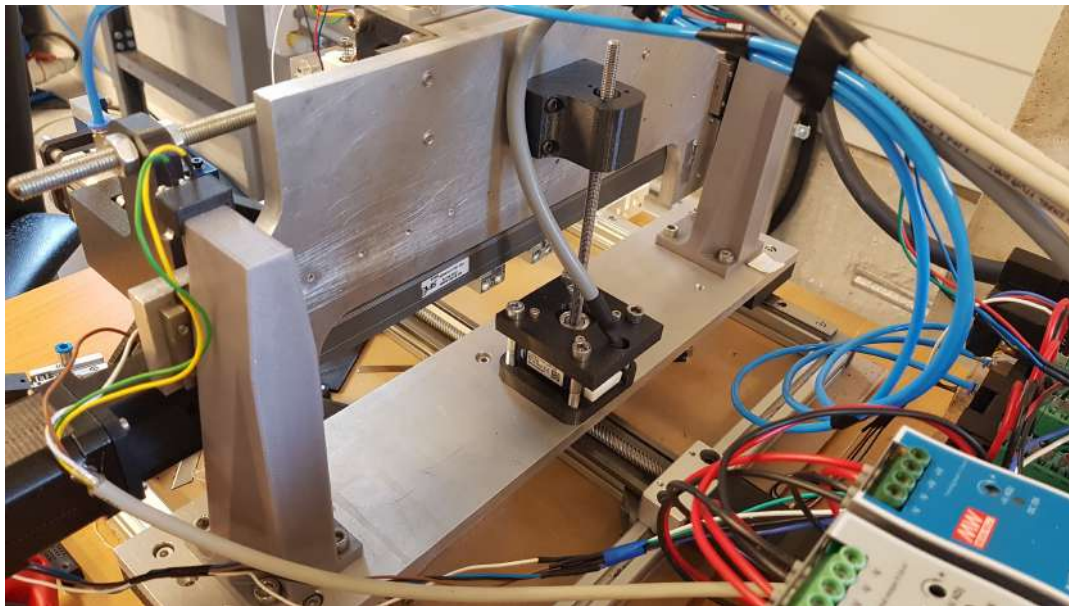


FIGURE 4.5 – Montage de l'actionneur à l'emplacement du vérin électrique

La figure 4.5 illustre l'implémentation de l'actionneur dans la machine à la place du vérin électrique où des nouvelles pièces ont été imprimées pour adapter sa fixation.

Vu la faible vitesse du mouvement, il est possible de réaliser un montage simple où la seconde extrémité de la vis n'est pas contrainte. Cette configuration fixe-libre d'une vis allongée est la moins favorable pour le flambement et donc, la charge critique d'Euler a été vérifiée [19] :

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{\alpha L^2} [N] \quad (4.3)$$

où  $E$ ,  $I$ ,  $\alpha$  et  $L$  sont respectivement le module de Young, le moment quadratique, le coefficient lié aux conditions limites et la longueur libre de la tige.

Dans le cas le plus défavorable où la tête d'extrusion est à sa position verticale maximale, la charge critique est de 1419 N. Ainsi, le fonctionnement est sans risque en considérant une charge de 70 N.

## 2 Alignement des plaques

Il a été conclu qu'un déplacement relatif précis sur chaque axe est possible, seulement, il n'est pas dit que les axes soient perpendiculaires entre eux et possède un mouvement parallèle aux plaques. Il existe à cet effet des rails linéaires qui apportent un certain degré de linéarité dans les mouvements. Cependant, il a été remarqué que certaines positions sur les axes sont difficiles d'accès à cause d'un mauvais alignement. Ou encore, un mouvement supposé parallèle de la tête d'extrusion à la plaque est en réalité légèrement incliné. Ces défauts d'alignement proviennent en majorité d'un mauvais montage des éléments de guidage et de la paire de plaques.

### 2.1 Rails de guidage

Afin d'assurer un bon guidage des différentes motorisations linéaires, des rails linéaires avec des chariots à billes avaient été implémentés dans la conception précédente.

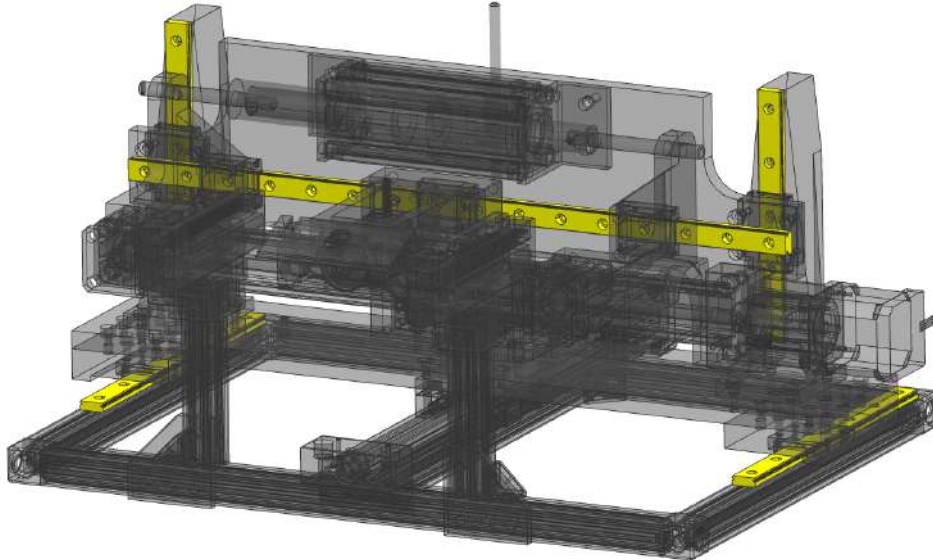


FIGURE 4.6 – Rails de guidage

Ces rails proviennent du revendeur **MISUMI** [20] dont la fiche technique est disponible en Annexe C.4. Une paire de rails a été introduite pour les axes X et Z pour guider les larges plaques en aluminium solidaire au palier des guides **IGUS**. Quant à l'axe Y, seulement un guide est présent pour le support de la tête d'extrusion et ceux des pinces

pneumatiques.

Le montage des rails et des chariots est légèrement précontraint par la présence d'un jeu négatif. Ce type de montage est couramment utilisé pour accroître la rigidité et la précision du mouvement au détriment de la durée de vie par l'ajout d'une charge statique. Cette durée de vie est calculée de manière similaire aux roulements à billes classiques [8] par l'équation 4.4.

$$L_{50} = \left( \frac{C}{P} \right)^3 \times 50 \text{ [km]} \quad (4.4)$$

Où les rails ont 90% de chance de supporter la charge sur la distance calculée  $L_{50}$  avant de s'écailler. Sans rentrer dans les détails, les charges dynamiques restent faibles dans notre cas et permettent d'effectuer plusieurs centaines de milliers de passes sans aucun souci.

Néanmoins, le montage des rails ou de leurs chariots sur les différents éléments structurels se doivent d'être précis pour atteindre les spécifications du constructeur et respecter la durée de vie calculée. Dans le cas de la machine, il existe un mauvais parallélisme entre les différents guides d'un même axe. En effet, en fin de course, on pouvait ressentir une contrainte croissante qui gêne l'avancement et, plus spécialement, sur l'axe X posé sur un panneau en aggloméré.

## 2.2 Nouveau bâti

Il était nécessaire de revoir le bâti de la machine pour permettre une fixation précise des trois éléments suivants :

- Les deux guides linéaires ;
- Le rail motorisé ;
- Les montants pour les supports de plaques.

L'utilisation d'éléments de guidages impose la mise en place de surfaces de référence pour conserver un haut degré de parallélisme dans les différents éléments mobiles se déplaçant selon un même axe. Ainsi, un bâti usiné est généralement réalisé dans ce genre de situation. Il en est de même pour la plaque joignant les différents paliers qui peuvent présenter des épaulements en guise de référence. Du moins, lorsque plus d'un rail est utilisé, il est nécessaire de distinguer un palier fixe et un palier flottant pour compenser les tolérances d'usinages [21].

Cependant, travaillant sur un prototype qui risquerait de voir plusieurs changements se réaliser si un imprévu se présentait, il est plus recommandable de garder une certaine flexibilité dans le montage et avoir la possibilité d'ajouter ou de déplacer un point de fixation si le besoin en est.

Il a été imaginé d'acquérir une table d'optique pré-trouée. Néanmoins, il n'existe chez les fournisseurs que certaines possibilités d'entraxe entre les points de fixation qui ne correspondent pas à la configuration de la machine.

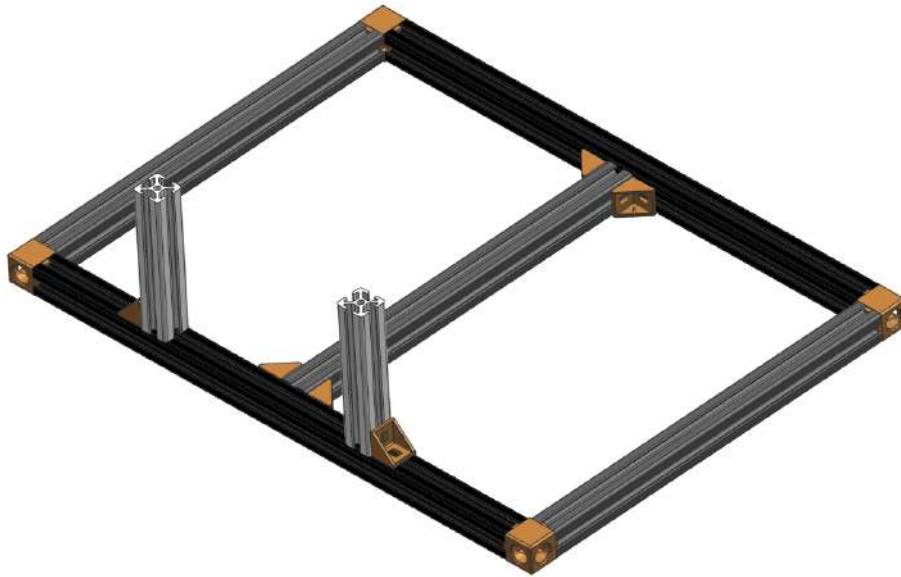


FIGURE 4.7 – Nouveau bâti de la machine

Le choix s'est finalement porté sur une structure en profilé en aluminium de section carrée avec une largeur de 20 mm qui serait découpé par le fournisseur, ici Motedis [22]. Le montage est illustré sur la figure 4.7 où trois longueurs ont été commandées, 2x372 mm, 3x264 mm et 2x100 mm et divers accessoires tels que des équerres de fixation.

Le choix d'une telle configuration permet d'avoir tous les points de fixation précisément sur une rainure d'un des profilés. Les deux derniers profilés serviront de montants pour les prochains supports de plaques. Ainsi, on remplace les anciens supports imprimés qui sont encombrant et imprécis par des éléments plus fins et libres de se déplacer latéralement le long du profilé et d'y être fixés.

### 2.3 Montage des éléments de guidage

Bien qu'il s'agisse de la solution la moins précise pour l'axe X, il est possible d'obtenir un haut degré de parallélisme par un montage proche de ceux réalisé en pratique et de répéter une opération similaire sur les axes Y et Z.

Le rail de droite est d'abord fixé en gardant une force latérale (1) pour appuyer les vis dans la rainure comme illustrées sur la figure 4.8. Par la suite, le second rail et le guide motorisé sont montés de manière lâche afin de pouvoir les déplacer légèrement dans le plan XY. Les chariots des rails sont montés puis les cales imprimées et enfin, la plaque en aluminium. Les chariots sont fixés solidement sur la plaque et plusieurs passes (2) sur toute la course disponible sont réalisées à la main pour aligner les éléments lâches. Progressivement et en alternance, le second rail et le guide sont fixés tout en continuant les passes jusqu'à la fixation complète de tous les éléments.



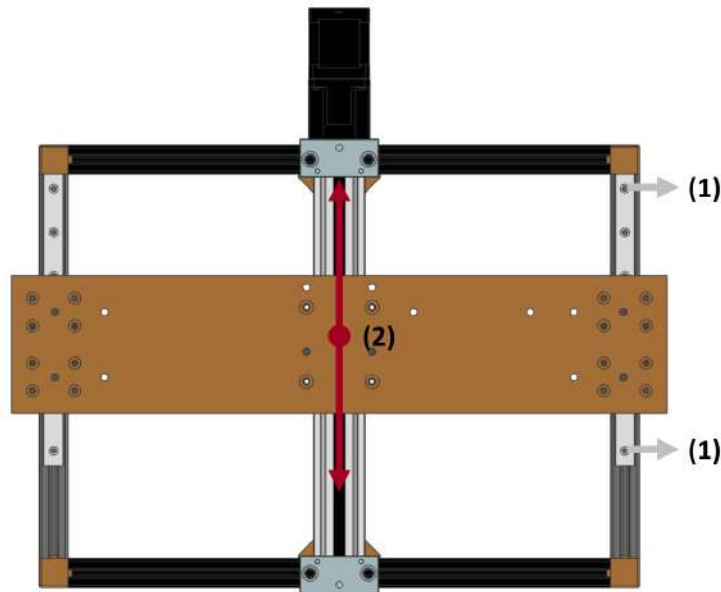


FIGURE 4.8 – Montage des rails pour le déplacement en X

Des opérations similaires sont réalisées sur les axes Y et Z néanmoins ceux-ci sont limités par la qualité de fabrication des plaques en aluminium et les montants imprimés en PLA qui ne sont pas destinés à de tels niveaux de précision.

Grâce à ces montages, lorsqu'un chariot est en butée, le second l'est aussi au niveau d'un même axe. La course disponible sur chacun des axes est pleinement exploitable sans sensation de freinage.

## 2.4 Support des plaques

La paire de plaques doit être alignée selon les trois axes de la machine supposés perpendiculaires entre eux. Sinon, il est possible que la tête d'extrusion s'éloigne ou s'approche de la surface d'entrée d'une des plaques en fonction de l'état d'avancement comme illustré sur la figure 4.9 pour un mouvement selon l'axe X.

Ainsi, la fixation d'une plaque doit d'être à la fois répétable pour les futurs montages et démontage d'une paire à tuber et aligner au maximum avec la tête d'extrusion pour limiter le manque de concentricité.

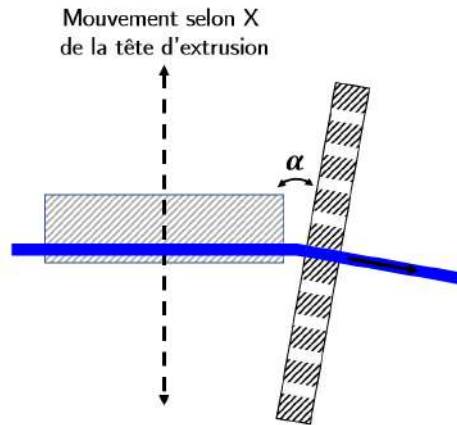


FIGURE 4.9 – Perte de l'alignement le long de l'axe X

Précédemment, des montants en profilé avaient été introduits et fixés sur le bâti de la machine. Ces montants permettent d'amener les plaques à tuber à une hauteur atteignable par la tête d'extrusion selon l'axe Z. Ceux-ci sont alignés sur le système d'axe de la machine à l'aide de cales imprimées et une équerre de fixation pour limiter au maximum toutes déviations au niveau du bas du montant.

Afin de pouvoir fixer les adaptateurs des plaques en tant que telles, un socle fixe a été conçu sur les parties supérieures des montants de telle façon à être emmanché sur le profilé. Les deux points de fixation sur le socle sont légèrement décalés du centre de la face qui, elle, est légèrement plus large que les 20 mm du profilé. Ainsi, le socle est monté de telle manière à être appuyé sur trois faces afin de limiter de nouveau toute déviation angulaire. Une vue de coupe est illustrée sur la figure 4.10 tandis que la figure 4.11 présente le montage complet du support.

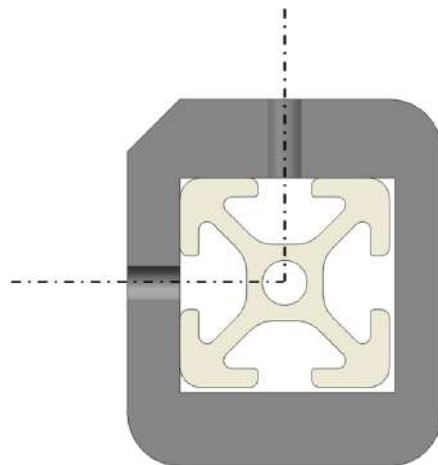


FIGURE 4.10 – Vue de coupe du montage du socle

La face supérieure du socle possède deux inserts de fixation pour les adaptateurs, mais aussi deux goupilles de positionnement garantissant une certaine répétabilité du montage



des plaques.

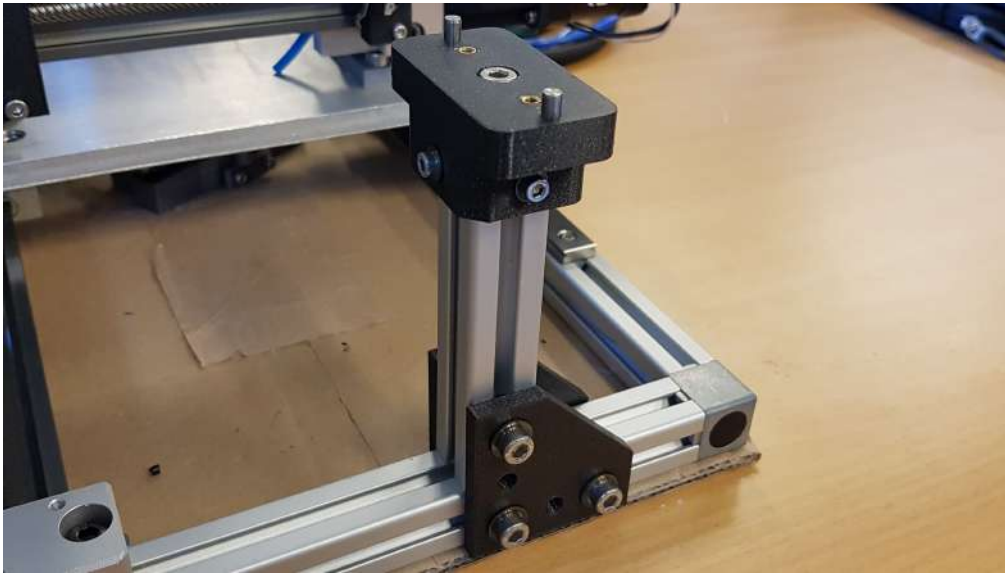


FIGURE 4.11 – Éléments fixes du montage des plaques

Dorénavant, seuls les adaptateurs des plaques sont encore à étudier où chaque type de plaque en possède un. Les plaques sont prévues avec des perçages taraudés ou non afin de pouvoir les fixer à leurs emplacements. Les fixations seules ne suffisent pas à garantir un montage répétable et donc, il a fallu introduire des surfaces de référence.

Tout comme le socle, il faut 3 surfaces pour assurer un montage répétable qui, nécessairement, apporte plus de matière autour de la plaque. En général, les plaques possèdent au moins trois faces planes toutes perpendiculaires entre elles, et ce, en dehors de la zone du tubage. La figure 4.12 illustre ces références dans le cas du séparateurs de faisceaux de tubes.

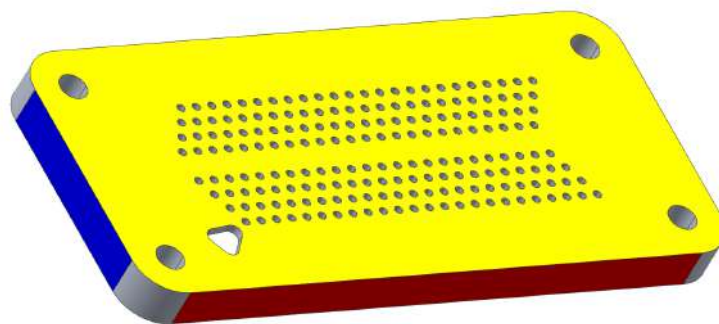
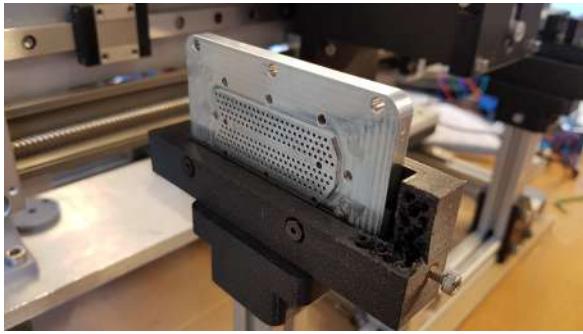
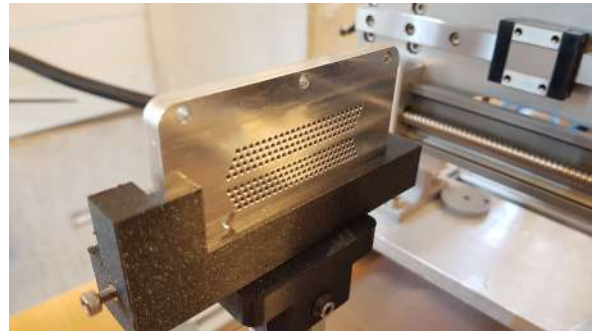


FIGURE 4.12 – Surfaces de références possibles

La conception de l'adaptateur est différente entre la matrice d'éjection et le séparateur de faisceaux de tubes. Pour le séparateur, la fixation est réalisée par des vis de compression appuyant, par l'intermédiaire de cales imprimées, sur deux faces de l'adaptateur (voir figure 4.13). Quant à la matrice, elle est fixée grâce à un taraudage déjà présent et loin de la zone de travail (voir figure 4.14).

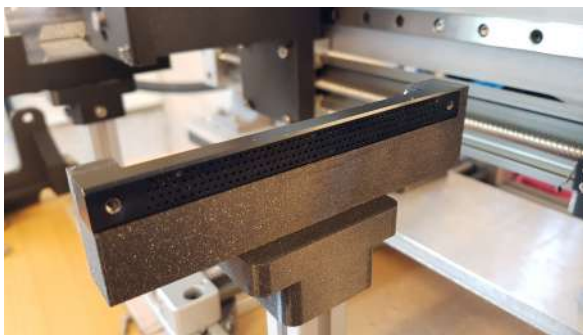


(a)



(b)

FIGURE 4.13 – Adaptateur de la matrice courte



(a)



(b)

FIGURE 4.14 – Adaptateur de la matrice d'éjection

# Chapitre 5

## Mécanisme de sertissage

Lorsque le tube a réussi à traverser une plaque, le mécanisme de sertissage rentre en action afin de sertir définitivement le tube. L'étude sur le mécanisme reprend l'idée générale de la conception précédente. En effet, la préhension du tube et sa traction à travers une plaque peuvent s'articuler autour de deux états stables. Ainsi, l'utilisation d'éléments pneumatiques remplit pleinement ces fonctions tout en ayant un contrôle relativement simple.

### 1 Préhenseur pneumatique

L'analyse du premier prototype avait révélé le manque de friction de la pince pneumatique pour réussir à sertir le tube. En effet, le tube glisse entre les mâchoires et n'est pas correctement sertie.

#### 1.1 Abandon de la pince angulaire

La référence de la pince est le modèle **MHC2 - 10S** du fabricant **SMC**. Son fonctionnement dit simple effet rapproche les mâchoires par mise sous pression et l'écartement est assuré par le rappel d'un ressort. La particularité de ce genre d'élément pneumatique est que la force de préhension dépend de la distance de l'axe de rotation à cause d'un effet de levier illustré sur la figure 5.3. Ainsi, pour chaque pression de travail, il existe une caractéristique force-distance où la force décroît avec la distance.

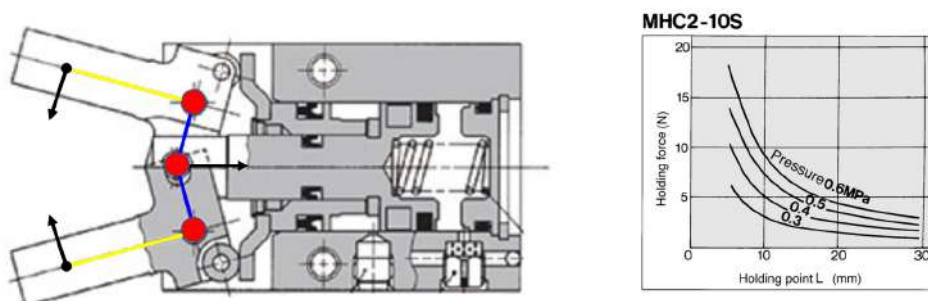


FIGURE 5.1 – Schéma de fonctionnement de la pince pneumatique

Dans le cas du premier prototype, le tube était agrippé à 15 mm de l'axe de rotation à

une pression de 6 bars donc, la force normale au tube était d'environ 7 N. L'analyse du besoin avait révélé une force minimale de 20.26 N et donc, le coefficient de frottement doit valoir au moins 1.5 sur les deux mâchoires. Il est difficile d'assurer une telle valeur pour du PTFE même avec du papier à poncer d'où le glissement présent. La distance pouvait être légèrement réduite, néanmoins, le glissement persistait.

Par la suite, l'idée a été de remplacer le contact plan entre le tube et les mâchoires par ces dernières en forme de dent de scie pour avoir une meilleure traction. En effet, cette partie du tube n'étant plus utile et vouée à être découpée, il n'y avait aucune contrainte à la détériorer.

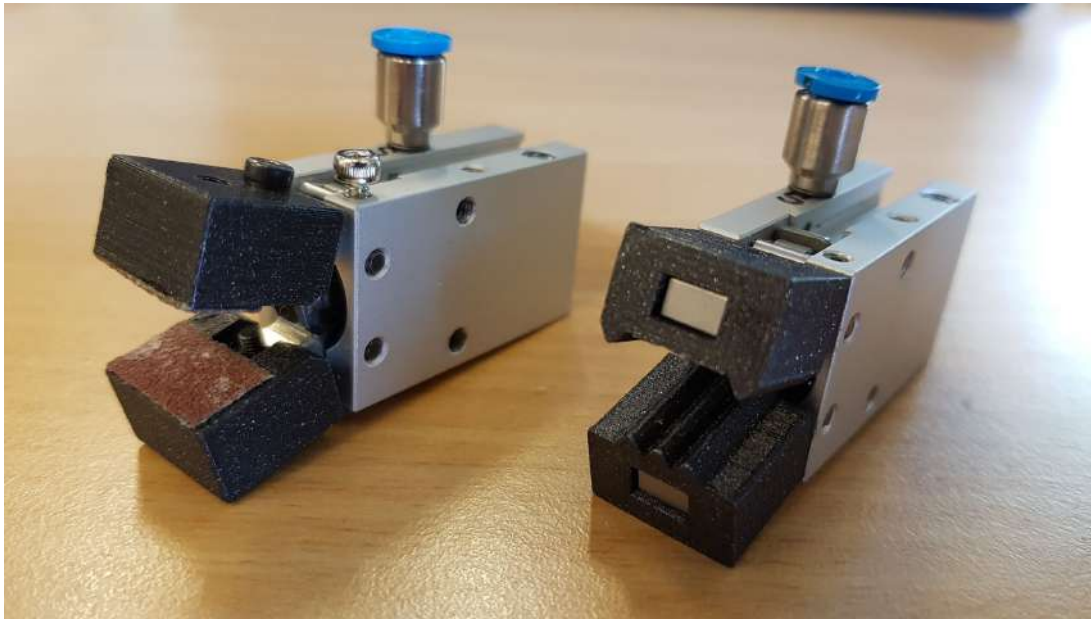


FIGURE 5.2 – Changement de la géométrie des mâchoires

Des tests ont été réalisés avec ces nouvelles mâchoires où les résultats étaient légèrement meilleurs que le papier à poncer. Cependant, le problème persistait à cause d'une force de préhension beaucoup trop faible pour pouvoir déformer le tube.

Il existe des modèles supérieurs à cette pince pouvant atteindre jusqu'à 100 N de force à 15 mm du point de rotation. Toutefois, la taille augmente en conséquence et le prix qui se situe entre 200 et 300 € la pièce en fonction du modèle. Pour le peu de force gagnée, il existe des solutions beaucoup plus simples et bon marché et donc, la préhension par une pince angulaire a été mise à l'écart.

## 1.2 Pince parallèle

Dans le but de simplifier le modèle pneumatique et d'avoir une force suffisante pour maintenir le tube, une paire de vérins compacts simple effet a été implémentée. Ces vérins proviennent de nouveau du même fabricant et se rétractent lorsqu'une pression est appliquée.

À l'extrémité de la tige liée au piston du cylindre, il a été choisi de réaliser un taraudage dans l'optique de fixer une plaque dont le mouvement écraserait le tube sur le corps du vérin.

La force nécessaire a été déterminée par l'hypothèse d'une adhérence du PTFE sur deux surfaces en aluminium. Ainsi, la force normale nécessaire se déduit par la loi de frottement :

$$N = F_f / \mu = 142.4 \text{ [N]}$$

où  $F_f$  est la force de frottement calculée précédemment pour maintenir le tube et  $\mu$  est supposé à 0.15 [23]. La moitié de cette force doit être considérée puisqu'il y a deux contacts, à savoir 71.2 N.

Seules deux courses sont disponibles dans cette gamme à savoir, 5 et 10 mm. Pour plus de liberté sur le montage, on choisira une course de 10 mm.

Ainsi, le modèle **CQSB20 - 10T** correspondait à nos attentes avec une force de 91 N à 5 bars de pression et une paire a été commandée. Sa fiche technique est disponible en Annexe C.6.

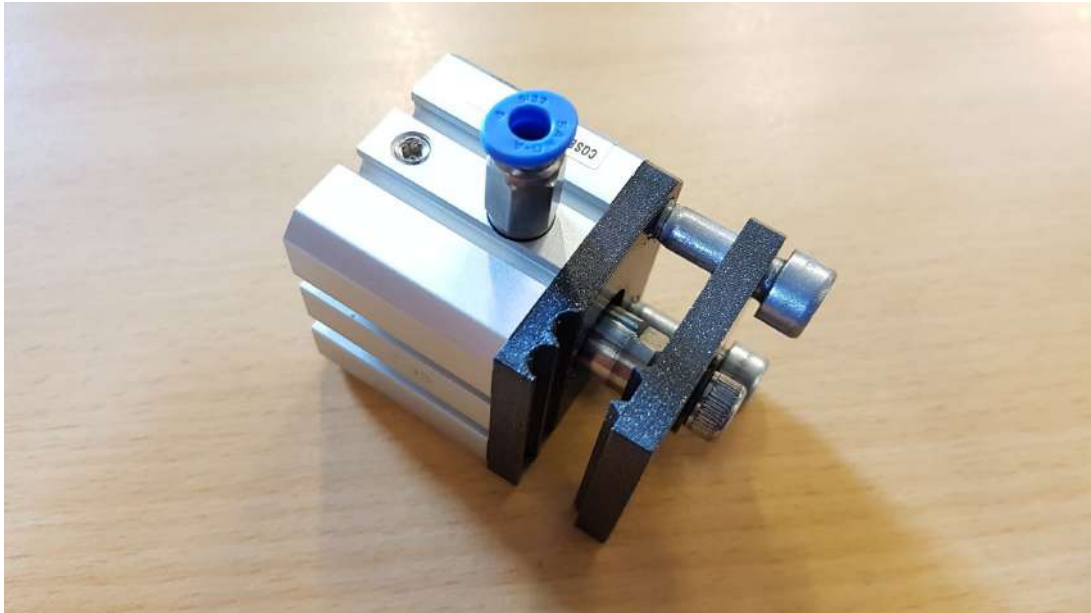


FIGURE 5.3 – Nouvelle pince de préhension du tube

Pour éviter d'être trop dépendant de la pression, les mâchoires en dents de scie ont été reprises. Deux plaques ont été imprimées, une sur le vérin et l'autre fixée au piston par une vis. Afin de contraindre la rotation de la plaque mobile, deux vis supplémentaires ont été placées dans les taraudages prévus pour la fixation du vérin. Bien qu'il existe des modèles de vérin à colonne, ceux-ci étaient placés en diagonale, ce qui peut potentiellement gêner le passage du tube.

À des pressions supérieures à 3 bars, la nouvelle pince permettait de tirer le tube à travers une plaque sans aucun glissement. Lorsque ce dernier était maintenu, il ne glissait pas et se déformait jusqu'à se rompre, ce qui permet de valider le concept en termes de retenue.



## 2 Support

Puisque la pince a été remplacée, il en était de même pour son support devenu obsolète. Cet élément relie le chariot sur la glissière, le goujon associé au vérin double effet et la face arrière du vérin, si possible d'une seule pièce (voir figure 5.4). La position du vérin a été étudiée de façon que le tube soit centré entre les deux mâchoires afin de compenser les possibles déviations en sortie d'une plaque. Ces déviations sont d'autant plus faibles que les mâchoires sont proches de la plaque.

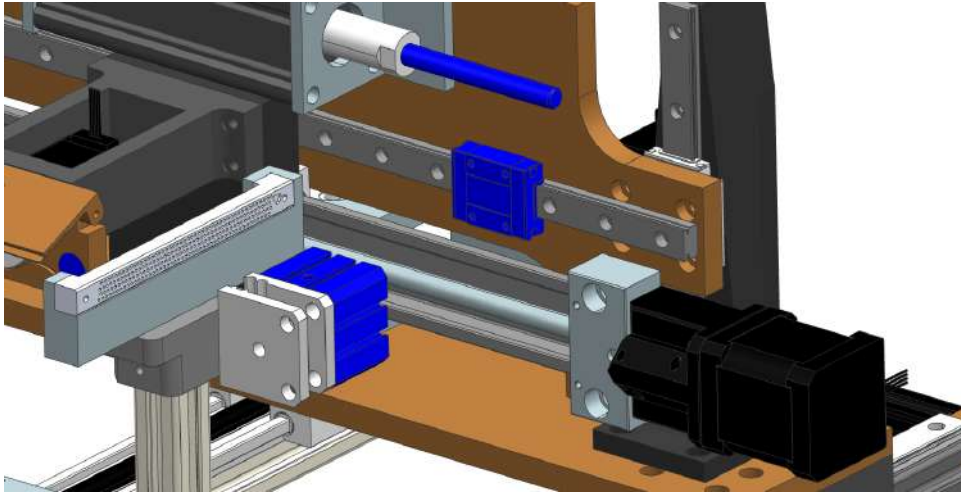


FIGURE 5.4 – Fixations à respecter mis en évidence en bleu

Un premier modèle a été modélisé et par la suite imprimé. Lorsque la pince s'éloigne de la plaque, la tension du tube contraint le support de telle manière à le fléchir autour de l'axe Z. Le porte-à-faux est assez long et donc, il est intéressant de limiter les contraintes au niveau des points de fixation et accessoirement la flèche résultante. La pièce est imprimée de façon à déposer chaque couche normale à la direction de la force pour avoir une meilleure résistance à la rupture et éviter la délamination. Enfin, un renfort a été rajouté dans un second prototype puisque la pièce montrait une flèche encore trop importante. Le montage complet du support et du vérin est illustré sur la figure 5.5.

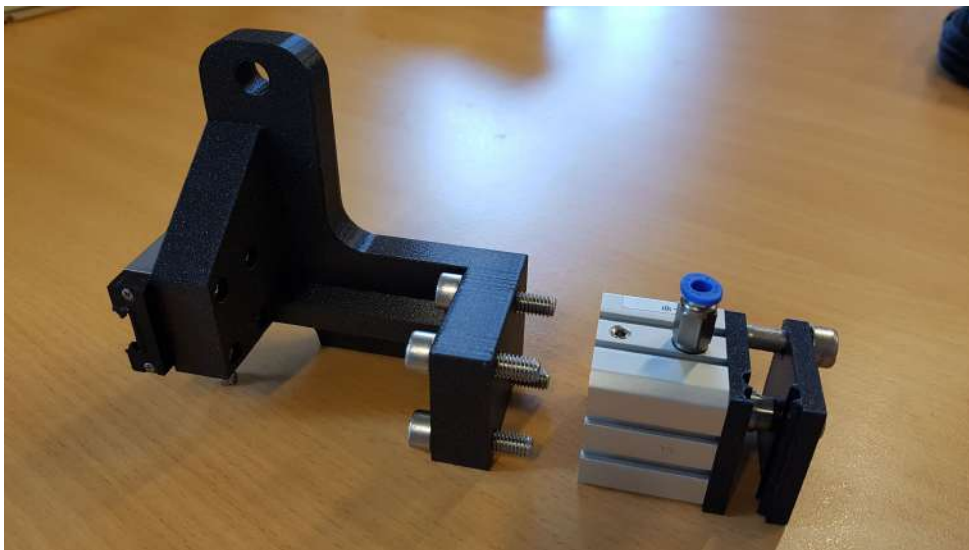


FIGURE 5.5 – Support de vérin

### 3 lame de découpe

Le dernier point que le mécanisme de sertissage doit respecter est la préhension d'un seul tube à la fois. En effet, les mâchoires sont assez imposantes pour agripper d'autres tubes déjà sertis et ne plus assurer un sertissage fiable de celui en cours comme illustré sur la figure 5.6a.

On pourrait réduire la taille de la pince, mais l'entraxe entre les orifices est beaucoup trop faible pour un tel changement. Il est aussi possible de tirer toute une rangée de tube d'une seule opération. Cependant, il faut s'imaginer la force nécessaire pour y arriver et assurer que sur une rangée aucun glissement ne soit visible. Donc, il est quasi impossible d'assurer la préhension d'un seul tube si d'autres sont encore présents à proximité.

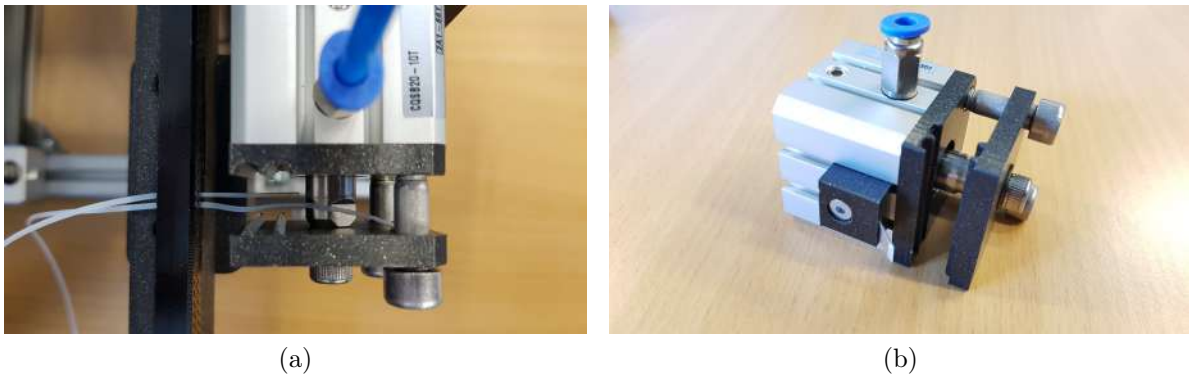


FIGURE 5.6 – lame de découpe afin de garantir la préhension d'un seul tube

La solution a été de s'inspirer de l'opération de découpe comme expliquée dans l'introduction. Jusqu'à maintenant, l'opération aurait été réalisée après la mise en place de tous les tubes, mais rien n'empêche celle-ci d'être effectuée après chaque sertissage. Ainsi, lorsqu'un tube est sertit et découpé, le prochain n'en aurait aucun à proximité et le sertissage serait d'autant plus aisé à réaliser, et ce, pour l'entièreté de la plaque.

Un premier prototype avec une lame de scalpel placée sur la mâchoire mobile de la pince a été conçu. Le côté tranchant est placé de telle sorte à ce que le recul de la machine selon l'axe X sectionne le tube. Après des résultats concluants, un changement de la lame est nécessaire afin qu'elle soit moins encombrante et puisse découper toutes les rangées de tubes avec potentiellement la première rangée proche des adaptateurs de plaques. Ainsi, l'extrémité de la lame ne doit pas se retrouver au plus d'un millimètre en dessous de la première rangée. Un dernier point a été aussi de pouvoir remplacer la pièce si elle venait à s'émousser ou à casser puisque durant le premier test le montage avait été assuré avec de la colle instantanée.

Toutes ces spécifications prises en compte, la nouvelle lame est placée dorénavant sur le corps du vérin à l'aide des rainures présentes à sa surface par l'intermédiaire d'un support imprimé. Pour complètement immobiliser ce support, une vis de compression appuie sur le vérin et permet de régler la distance entre le tranchant et le tube. La lame en elle-même provient d'un morceau cutter de 5 mm, placée de telle manière à ce que le tranchant soit parallèle à l'axe vertical. L'avantage d'une telle lame et qu'il est possible

qu'elle soit plus basse que son support et permet de découper des tubes fort proches des adaptateurs.

La découpe du tube est réalisable entre 0 et 5 mm de la surface de la plaque. À moins de 1 mm, la découpe est rapide et nette, tandis qu'au-delà, le tube commence à être poussé et retarde la découpe comme illustré sur la figure 5.6b. Outre la découpe plus propre, l'espacement le plus faible est recommandé puisque la partie étirée du tube est relativement courte en sortie d'orifice. En effet, le tube doit dépasser la paire de dents des mâchoires pour assurer un bon sertissage. De plus, la déformation du tube est moins présente avec une préhension plus proche et donc, l'erreur entre la course du vérin central et le tube diminue.

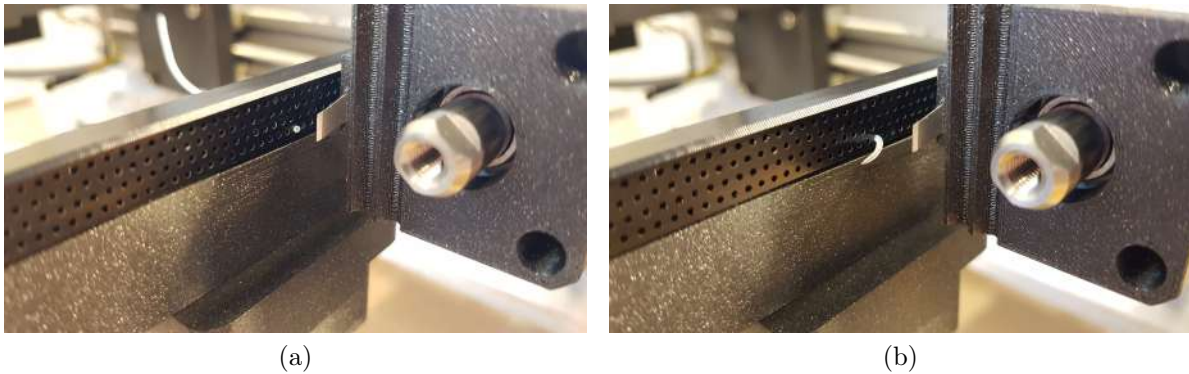


FIGURE 5.7 – (a) : Découpe à 1 mm et (b) : Découpe à 4 mm

## 4 Montage complet

Chacune des deux plaques possède une pince dont le mouvement est dépendant d'un vérin double effet central dont la fiche technique est disponible en Annexe C.7. Le décalage entre une pince et une plaque est réglable par l'intermédiaire de deux écrous de part et d'autre du support le long du goujon de fixation. Ainsi, l'espacement entre les deux plaques est arbitraire tant que la course du chariot des supports reste sur le rail.

La longueur nécessaire pour sertir le tube est au minimum de 20 mm. Le vérin central possède une course de 75 mm dans les deux directions ce qui oblige à rapprocher les plaques du centre de la machine pour éviter que les chariots ne quittent le rail. Afin de limiter la course, une entretoise d'une longueur de 45 mm a été placée sur l'un des goujons. Ce montage permet d'éloigner davantage les supports afin que la tête d'extrusion soit plus libre dans ses mouvements. Le montage complet de l'ensemble du système est illustré sur la figure 5.8.



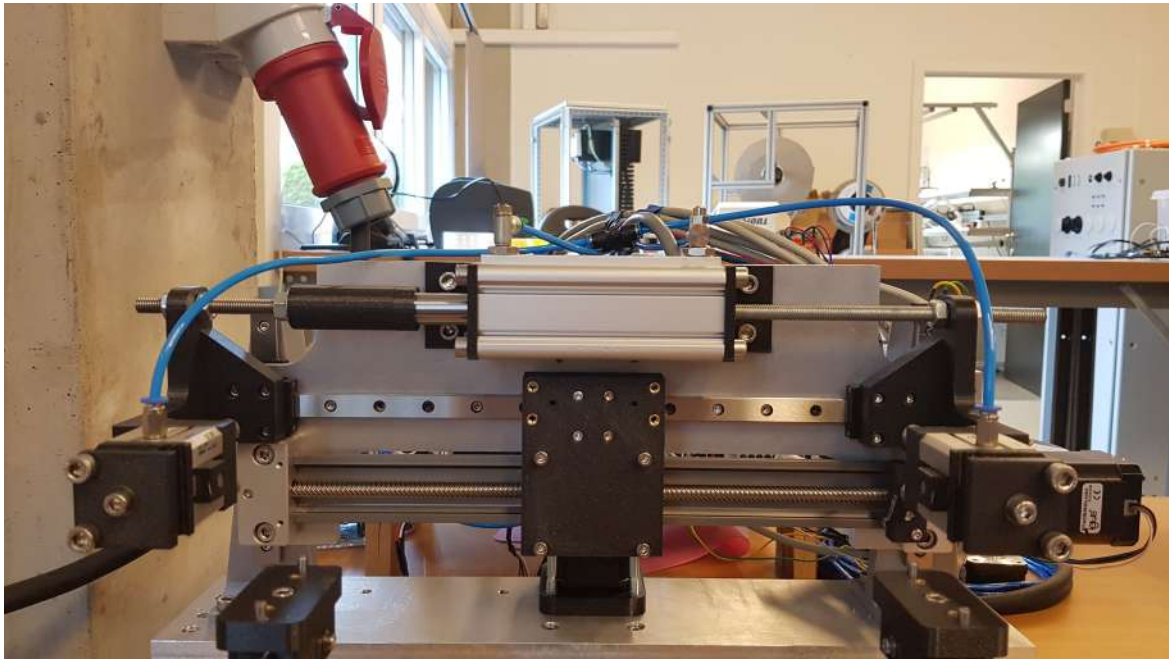


FIGURE 5.8 – Montage complet du système de sertissage

## 5 Contrôle pneumatique

Le système de sertissage dépend uniquement d'un réseau pneumatique où la source d'air comprimé provient d'une des différentes vannes présentes dans l'atelier. Un régulateur de pression avec manomètre est présent afin d'imposer une pression d'au minimum 3 bars dans le système. Malgré les changements effectués, le réseau reste identique par rapport à l'implémentation précédente et donc les distributeurs pneumatiques 3/2 et 5/2 ont été conservés. La commande électrique de 24 VDC est assurée par deux relais électromécaniques commandés par une tension de 5 VDC provenant du microcontrôleur. Le schéma de fonctionnement est illustré sur la figure 5.9, d'un point de vue pneumatique et sur la figure 5.10, d'un point de vue électrique.

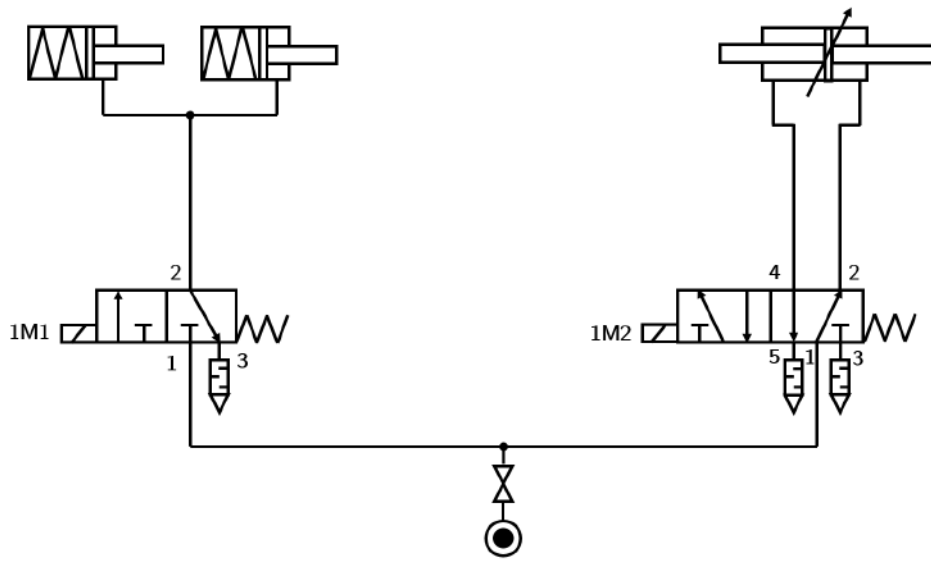


FIGURE 5.9 – Schéma pneumatique

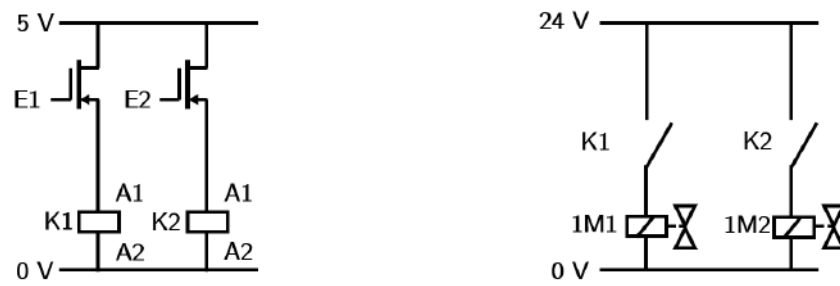


FIGURE 5.10 – Schéma électrique

# Chapitre 6

## Contrôle de la machine

Afin de concevoir un programme pour la machine à tuber, il est nécessaire d'étudier les différentes opérations qui seront effectuées pour amener un tube chargé dans la tête d'extrusion jusqu'à sa libération. Pour un premier prototype, on se limite à un fonctionnement où chaque action est réalisée seule et non en parallèle.

Dans ce chapitre, la description des séquences est complétée par l'outil GRAFCET, utile dans l'automatisation pour avoir une description claire et rapide du fonctionnement de la machine. Le niveau de description est limité à une transcription littérale sans considération technologique. Les transitions entre les différentes sous-fonctions sont marquées par leur état  $X$  afin de souligner qu'il n'est pas possible d'avoir deux actions en simultané.

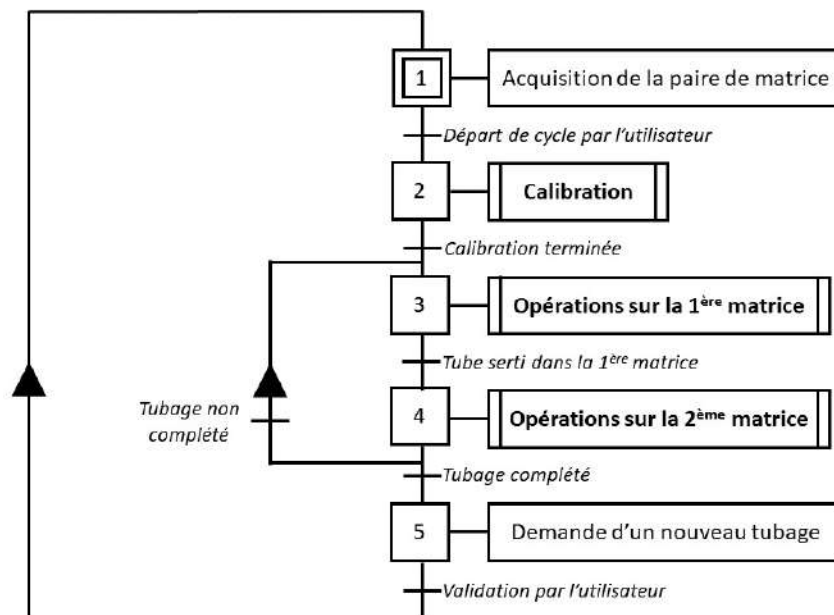


FIGURE 6.1 – Séquence générale

### 1 Séquence d'opération pour un tubage complet

Afin de pouvoir compléter une paire de plaques donnée, une succession d'opérations est à réaliser comme illustré sur la figure 6.1. Après avoir monté les plaques sur leurs supports,

il est nécessaire de le signaler manuellement au microcontrôleur. La machine effectue une calibration de ses trois axes dans le but de se repérer dans l'espace. Le tubage de la paire de plaques est une succession d'un même cycle tant que l'entièreté de ceux-ci n'est pas complétée. Enfin, la paire est démontée et, si besoin, un nouveau cycle peut être directement réalisé par la suite.

## 1.1 Calibration

Au démarrage de la machine, la tête d'extrusion possède une position inconnue dans l'espace. Dans le but de l'amener automatiquement vers les plaques, il est nécessaire d'implémenter des points de références. Ceux-ci serviront d'origine des axes afin de proposer un positionnement absolue aux plaques et à la tête.

Afin d'éviter toutes interférences avec les plaques à tuber, chaque prise de référence est exécutée successivement dans l'ordre X-Z-Y. L'opération consiste à déplacer, à faible vitesse, les différents paliers jusqu'à ce qu'un capteur détecte le rapprochement et définisse l'origine de l'axe  $\{0,0,0\}$ .

Depuis ces trois repères, la position du premier orifice de chaque plaque a été précédemment sauvegardée et la séquence de tubage peut débuter. La tête d'extrusion se décale selon l'axe Y vers une position intermédiaire  $\{0,y_{via},0\}$  au centre des deux plaques qui évite toute collision avec les plaques lors du tout premier placement.

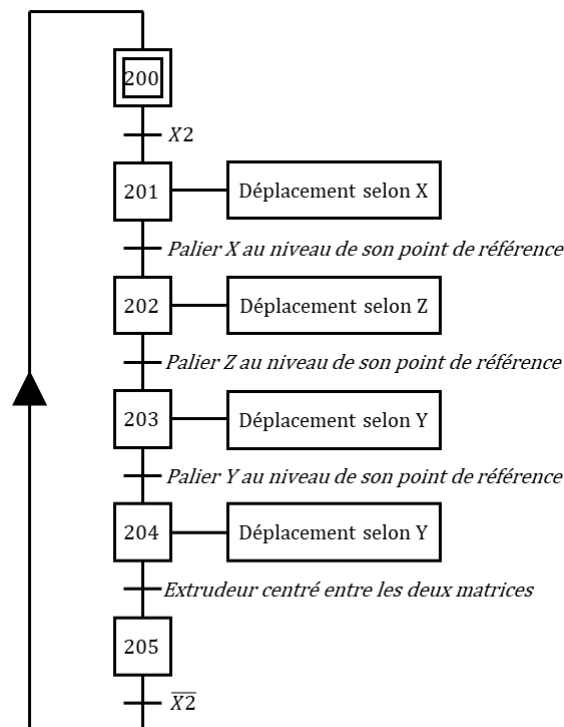


FIGURE 6.2 – Calibration

## 1.2 Opérations sur la plaque de droite

L'état d'avancement du tubage est connu du contrôleur qui permet de définir le déplacement de la tête d'extrusion en face de l'orifice à tuber,  $\{x,y,z\}$ . Les déplacements sont de nouveau réalisés un par un, dans l'ordre X-Z-Y. Le dernier mouvement selon l'axe Y est justifié par un rapprochement normal à la plaque et éviter au maximum le contact avec d'autres tubes déjà sertis.

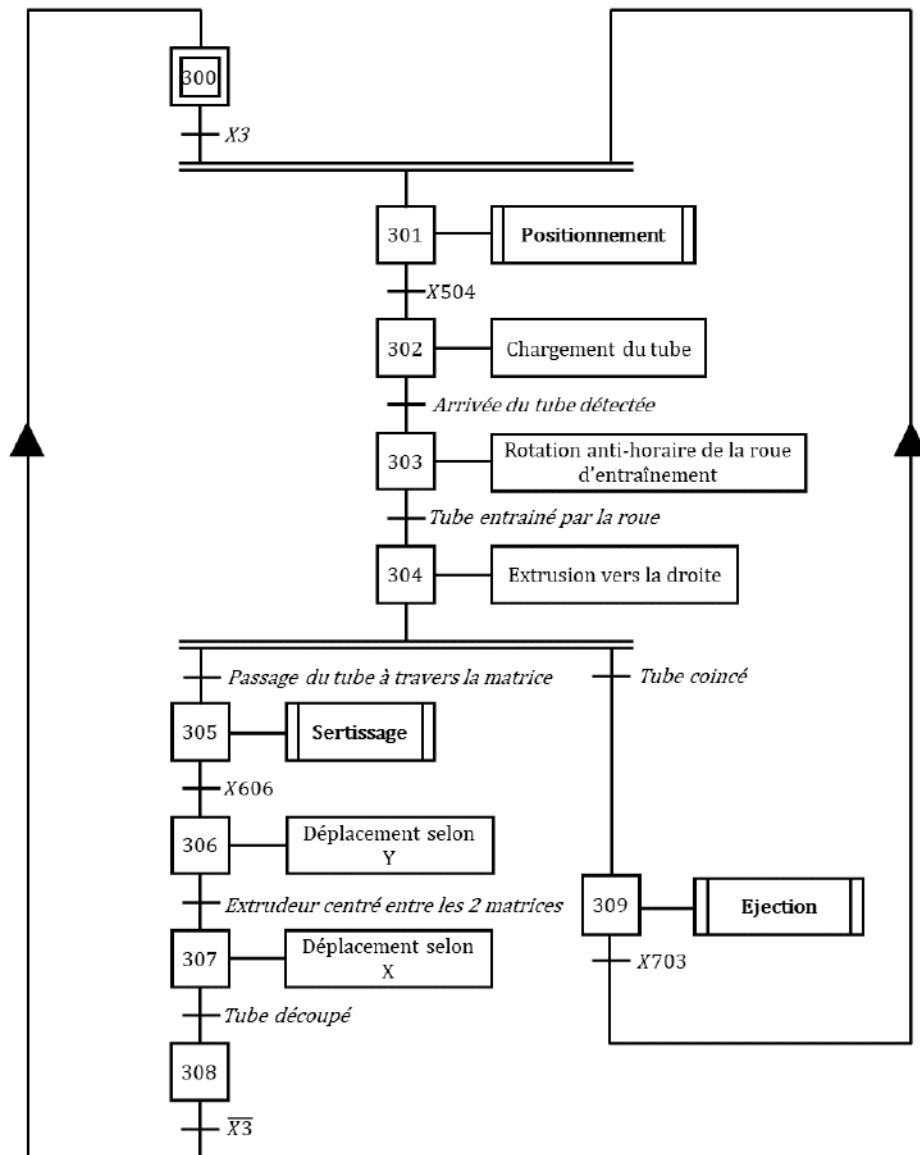


FIGURE 6.3 – Opérations sur la première plaque

Lorsque la tête est positionnée, le déroulement du tube peut débuter avec la détection de l'arrivée de son extrémité dans le canal d'acheminement à l'aide d'un premier capteur. À ce moment, la roue commence une rotation anti-horaire à vitesse constante jusqu'à ce que le tube soit entraîné pour enfin le dérouler d'une longueur prédéfinie. L'extrémité a traversé la plaque et attend d'être fixée par le mécanisme de sertissage.

Le sertissage se résume à agripper le tube, le tirer et le relâcher. Chacune de ces opérations est considérée comme terminée après un certain laps de temps puisqu'il n'était pas nécessaire d'implémenter une détection de fin de course.

La tête d'extrusion se décale latéralement en  $\{x, y_{via}, z\}$  en conservant les positions X et Z pour dérouler le tube jusqu'à la détection de la seconde extrémité au niveau du premier capteur. À cet instant, il y a assez de mou pour sectionner la partie sortie avec la lame par une avance de la machine selon l'axe X.

### 1.3 Opérations sur la plaque de gauche

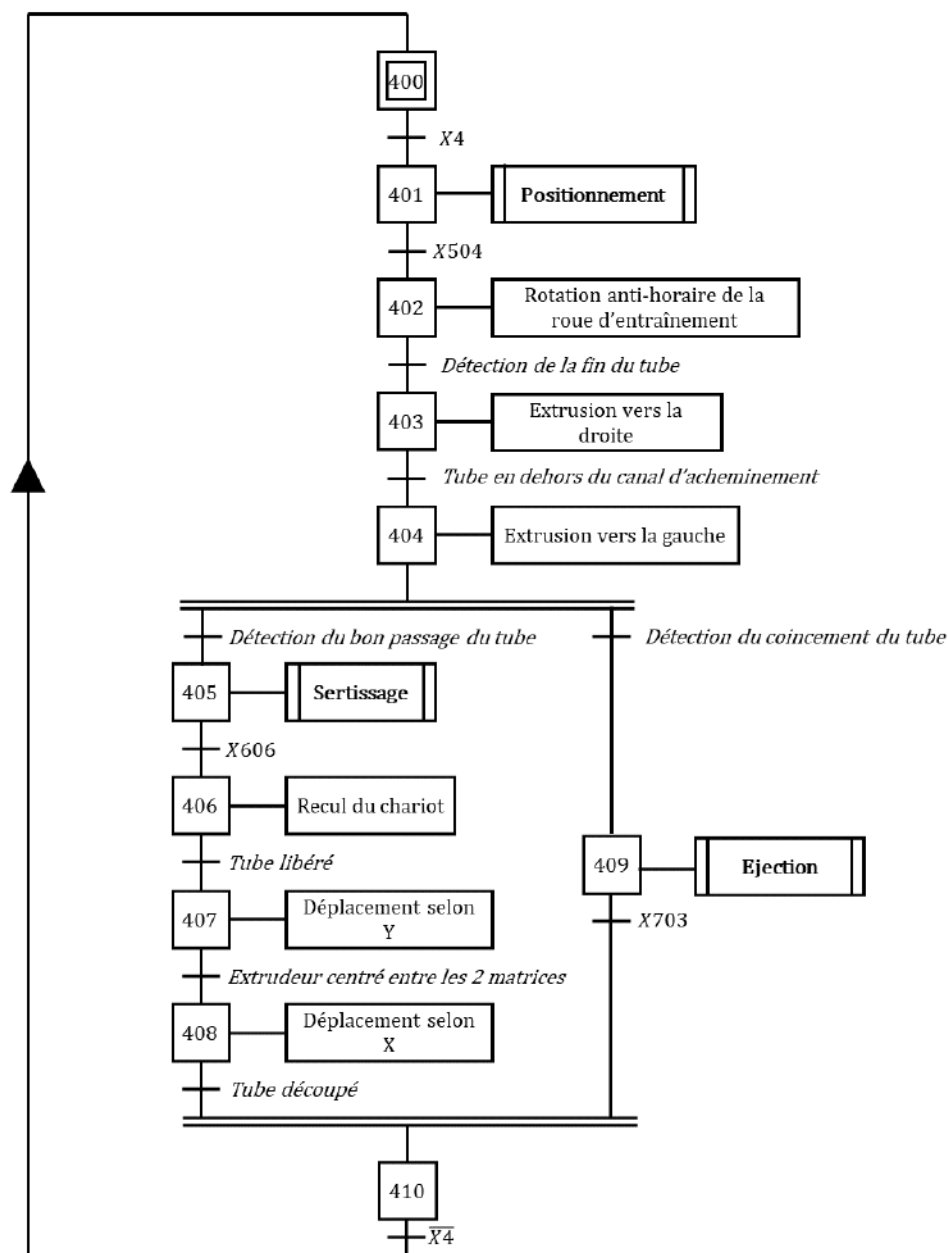


FIGURE 6.4 – Opérations sur la seconde plaque

De la même manière, le placement de la tête est réalisé par rapport à la seconde plaque. Le tube est déroulé d'une longueur prédéfinie afin d'amener la seconde extrémité dans le canal de sortie de gauche pour ensuite changer la direction de l'entraînement. Le tube est déroulé d'une longueur prédéfinie et le mécanisme de sertissage prend le relais. Après toutes ces opérations, il est nécessaire de libérer le tube en reculant la machine selon X. Puis de nouveau, la tête est décalée en  $\{x, y_{via}, z\}$  pour effectuer la dernière découpe.

Tant que le dernier tube n'est pas à sertir, les opérations sont répétées de la même manière en fonction du placement par rapport aux plaques et si le cas se présente, la machine se décale une dernière fois dans la position centrale afin de pouvoir libérer la paire complètement tubée.

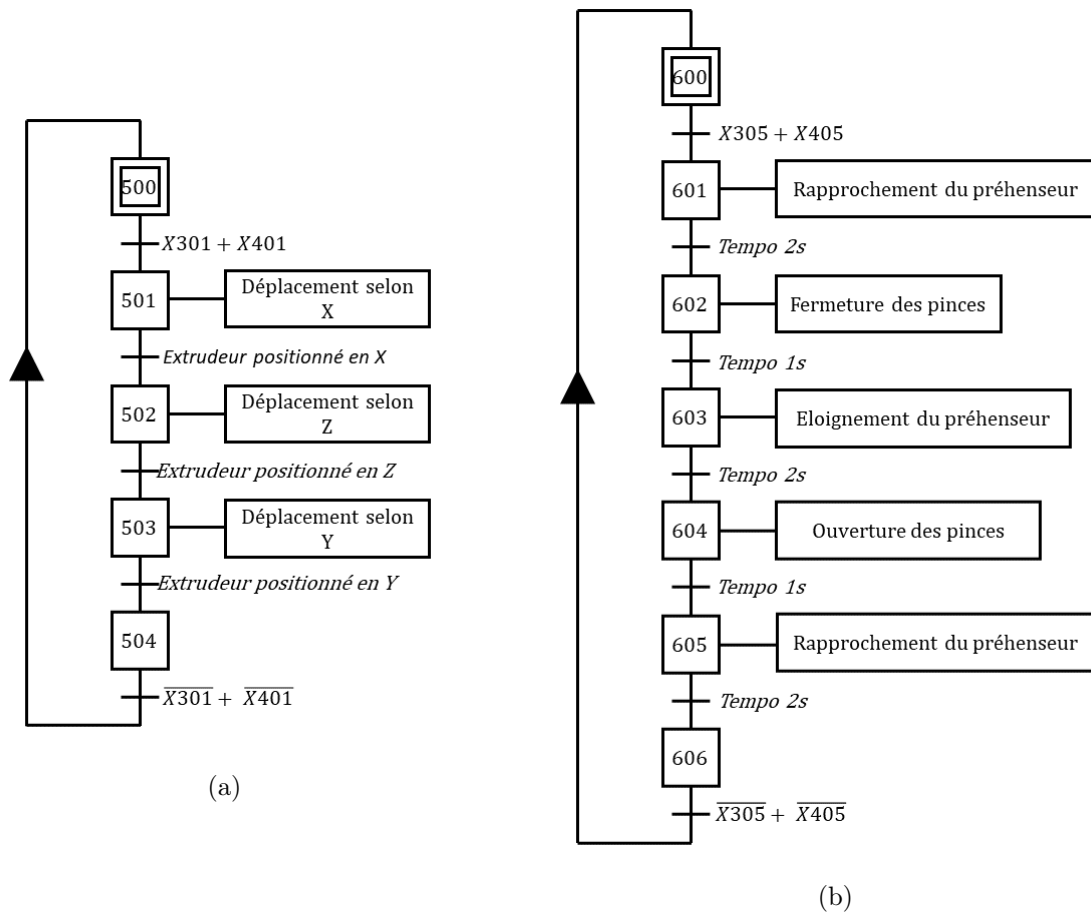


FIGURE 6.5 – (a) : Placement de la tête et (b) : Sertissage du tube

#### 1.4 Détection d'un mauvais passage du tube

La machine reste complètement fonctionnelle en exécutant les diverses opérations décrites précédemment. Toutefois, il a été très vite remarqué que si un tube venait à rater son passage à travers la plaque, le tubage serait compromis. Ce phénomène se présentait souvent en début de conception lorsque l'alignement entre la tête d'extrusion et un orifice n'était pas parfait. Néanmoins, il n'était pas rare de remarquer ce problème dans une conception plus aboutie où des tubes étirés manuellement et mal conditionnés étaient chargés dans le système.



Si le raté se présentait sur la première plaque, la séquence continuerait et le tube serait libéré. Au contraire, si le raté se présentait sur la seconde plaque ou sur les deux, le tube n'aurait aucun moyen de se libérer et le suivant ne pourrait pas débiter ses opérations. Dans tous les cas, le tubage n'est pas validé et il est nécessaire de pouvoir le détecter et réagir en fonction.

Lorsqu'il y a un raté, l'extrémité se déforme généralement et il n'est plus possible de dérouler de nouveau le tube dans une plaque. Ce tube doit être éjecté par un autre moyen que la rotation du couvercle en fonction du cas qui se présente.

Si la détection se présentait sur la première plaque (voir la seconde branche de la figure 6.3), la tête d'extrusion se déplacerait vers  $\{x, y_{via}, z\}$  et déroulerait au maximum le tube vers la droite jusqu'à ce que la roue ne puisse plus l'entraîner. À cet instant, environ 3 cm de tube sont encore présents dans le canal de droite et ne peuvent s'extraire seul. La seule solution dans le cas de ce prototype est l'extraction à la main. Néanmoins, s'il existe un positionnement où la tête d'extrusion peut être en contact avec la pince de sertissage, celle-ci pourrait simplement agripper le tube et le tirer. Le tube étant extrait, il est possible de recommencer le déroulement d'un nouveau tube.

Si la deuxième extrémité posait problème (voir la seconde branche de la figure 6.4), il ne serait plus possible de remplacer le tube puisque dans tous les cas celui-ci est serti dans la première plaque. La seule solution est de l'extraire de la même façon que le cas précédent et il sera nécessaire qu'une intervention manuelle soit réalisée pour placer le tube dans la plaque.

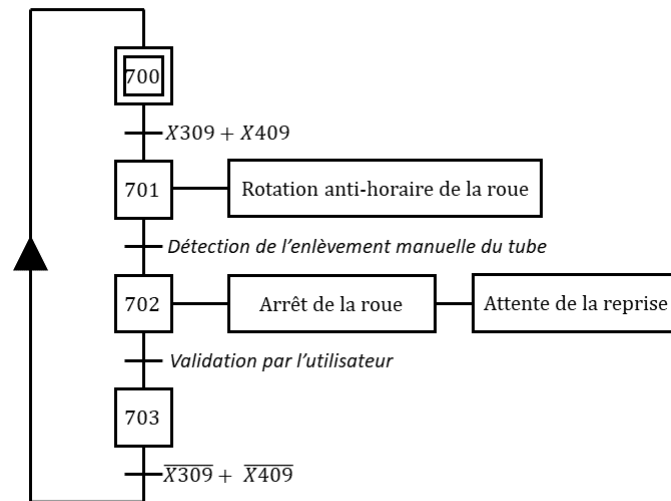


FIGURE 6.6 – Ejection du tube dans une configuration anormale

Dans les deux cas, les opérations sont identiques au niveau de la commande comme illustrées sur la figure 6.6. Dans la pratique, si la machine possède un montage précis et que les tubes sont bien conditionnés, le fait qu'un tube manque son déroulement devra être un cas très rare.

## 2 Séquence d'opération pour la sauvegarde d'une plaque

Durant le travail antérieur, un placement manuel de la tête d'extrusion au niveau de la première plaque était nécessaire pour l'aligner avec le premier orifice. Quant à la seconde plaque, identique à la première, son premier orifice se devait d'être parfaitement concentrique où il était impératif de connaître la distance entre les deux. De là, il était possible de débiter le tubage.

Cette opération se devait d'être réalisée à chaque départ de cycle de la machine en fonction de la paire donnée. Si le montage était propre et répétable, il aurait été possible de garder ce calibrage. Cependant, il avait été souligné la déviation possible de la tête le long des axes et donc, il est difficile d'aligner dans ce cas deux orifices éloigner de plus de 20 cm.

Ainsi, il a été décidé de rendre la connaissance des deux plaques indépendantes de l'une de l'autre pour ce prototype sur base d'un système de calibration introduit précédemment. Ceci permet de placer une seule fois la tête d'extrusion manuellement devant une nouvelle plaque à sauvegarder, d'en connaître le positionnement précis et d'en tirer les avantages suivants :

- Placement automatique de la tête d'extrusion en face du premier orifice de chaque plaque sans intervention humaine ;
- Reprise du tubage à un quelconque orifice si la machine venait à s'arrêter volontairement ou non. La butée de référence ne serait plus toujours disponible après plusieurs tubes déjà sertis ;
- Le placement manuel de la tête est possible seulement si la transmission est réversible au niveau des rails motorisés, ce qui n'est pas le cas de l'axe Z.

L'opération de sauvegarde, indépendante du tubage et réalisée une seule fois, nécessite la mise en place manuelle de la tête d'extrusion en face d'un point de l'espace particulier. La solution a été de placer la tête directement en face de l'orifice en essayant d'avoir un passage à travers la plaque sans accroc déductible d'un son audible d'un contact avec le chanfrein. Cette opération doit être réalisée un certain nombre de fois pour obtenir une moyenne exploitable. La séquence est identique à la calibration où seulement le déplacement est calculé sur chaque axe jusqu'au point de référence.

## 3 Choix du microcontrôleur

Jusqu'à maintenant, les différents tests ont été réalisés avec la programmation d'une carte Arduino UNO (voir figure 6.7a). La carte est facile à prendre en main par son langage proche du C++. C'est un bon compromis dans le choix d'un microcontrôleur avec un prix attractif, 14 broches entrée/sortie configurable et plusieurs fonctionnalités intéressantes telles que des convertisseurs analogique-numérique.

La nouvelle conception de la machine a apporté divers changements sur son contrôle et par la même occasion, l'ajout d'entrées et de sorties sur la carte dont le nombre de broches devenait très vite limité. Ainsi, il a été décidé d'acquérir un nouveau contrôleur et de réaliser une simple analyse pour en déterminer le choix.

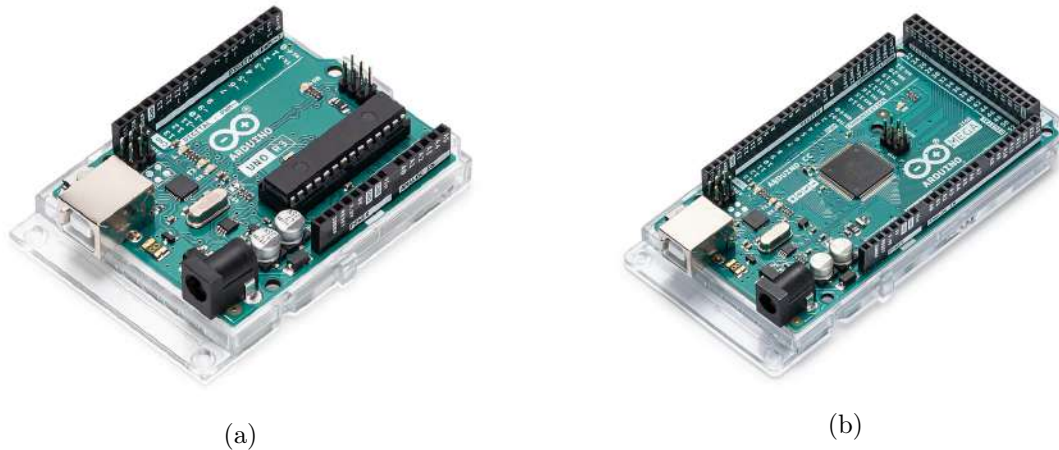


FIGURE 6.7 – (a) : Arduino Uno et (b) : Arduino Mega [24]

Lorsqu'on visualise les GRAFCET's, il est clair que le fonctionnement de la machine est totalement séquentiel où chaque tâche est exécutée après que la précédente soit terminée. En effet, les tâches sont simples et ne requièrent pas l'utilisation excessive du contrôleur à première vue pour ne pas imposer la mise en place d'un mode en fonctionnement en parallèle. Il était aussi important que le contrôleur puisse réagir à des éventuelles interruptions déclenchées en interne telle que des timers ou par un événement externe.

Le choix s'est donc porté sur une carte Arduino MEGA (voir figure 6.7b) qui permettait entre autres de reprendre les codes déjà réalisés sur la carte précédente. Les performances restent sensiblement identiques au modèle de base sauf pour les broches en plus grand nombre et une plus grande capacité de mémoire. La carte s'est vue aussi rajoutée un *shield* pour faciliter le branchement des différents câbles et rendre par la même occasion le montage beaucoup plus propre.

Cette carte reste pratique dans le prototypage, mais moins robuste que des solutions industrielles telles que des automates programmables bien qu'il s'agisse d'une machine dans un environnement moins contraignant et ne nécessitant pas de précautions particulières lors d'événements problématiques comme par exemple une coupure de courant.

Les différentes opérations réalisables sur la machine ont été transcrites dans un seul fichier disponible en Annexe A.

# Chapitre 7

## Implémentation de la commande

Ce chapitre relate des différentes implémentations réalisées pour mettre en pratique les séquences de fonctionnement de la machine à tuber.

### 1 Capteur de présence du tube

Le premier prototype ne présentait aucun moyen de détection sur l'état d'avancement du tubage et devait donc fonctionner tout du long en boucle ouverte. Cette implémentation restait indifférente lorsque des paramètres avaient légèrement changé telle que la longueur du tube. Ainsi, l'acquisition de la présence du tube était nécessaire pour un bon fonctionnement de la machine.

#### 1.1 Détection des tubes de 1.16 mm

Un premier capteur est nécessaire en amont de la roue d'entraînement pour détecter l'arrivée du tube. La séquence serait lancée automatiquement par le contrôleur en fonction de l'état du capteur au lieu d'un lancement manuel qui faisait défaut dans la conception antérieure de la machine.

L'emplacement du capteur est défini aussi comme un point de référence dans le réseau de canaux de la tête. Ainsi, si la détection de l'arrivée du tube est possible, l'inverse l'est tout autant, à savoir, la détection son dépassement. À l'aide de ces deux points de référence, il n'est plus nécessaire de connaître la longueur du tube pour le changement de direction. En effet, la détection du dépassement et la distance entre le capteur et la roue suffisent au contrôleur de tourner le moteur d'un nombre de pas connu au préalable et de repartir dans le sens contraire.

Le choix du capteur s'articule principalement sur la détection d'un tube de PTFE de 1.16 mm de diamètre. Un volume minimaliste permettrait un rapprochement du capteur avec la roue afin de réduire au maximum les erreurs de déroulement. En général, les capteurs sont sujets à une usure ou dérive de leur signal donc on essaiera de maximiser le nombre de cycles qu'elles peuvent endurer.

Le choix du type de capteur a été réalisé par élimination en étudiant les différentes propriétés physiques du PTFE qui sont potentiellement exploitables et reprises dans le tableau 1.1.

<b>Résistivité</b>	$10^{18} - 10^{19} [\Omega\text{cm}]$	<b>Permittivité relative à 1 kHz</b>	2.1
<b>Transparence</b>	opaque	<b>Perméabilité relative</b>	$\approx 1$
<b>Module de Young</b>	500 - 800 [MPa]	<b>Coefficient de Poisson</b>	0.46

TABLE 7.1 – Propriétés physiques du PTFE

Les capteurs résistifs sont inadaptés puisque le tube se décrit comme un très bon isolant électrique. Il en est de même pour les capteurs inductifs où le PTFE a aucune affinité magnétique.

Un contact mécanique à l'aide d'un bras de levier ou d'une bille sur ressort est délicat à réaliser, car le tube est très souple et risque d'être freiné voire bloqué par un tel système.

La détection d'une déformation ou le déplacement d'éléments mobiles au niveau de la tête d'extrusion est possible en théorie. Cependant, la détection est beaucoup trop tardive puisqu'elle serait réalisée au niveau de la roue d'entraînement.

L'utilisation du tube comme diélectrique variable entre deux électrodes est théoriquement possible. Cependant, la capacité obtenue serait très faible ( $< 1 \text{ pF}$ ) pour cause des petites surfaces en jeu et de la constante diélectrique seulement 2 fois plus grande que l'air. Sans compter le circuit complexe de conditionnement et les capacités parasites.

Vu que le PTFE est un polymère semi-cristallin, il a tendance à être opaque et laisse peu de lumière le traverser. Ainsi, il a été décidé d'utiliser un capteur de type photosensible comme première approche.

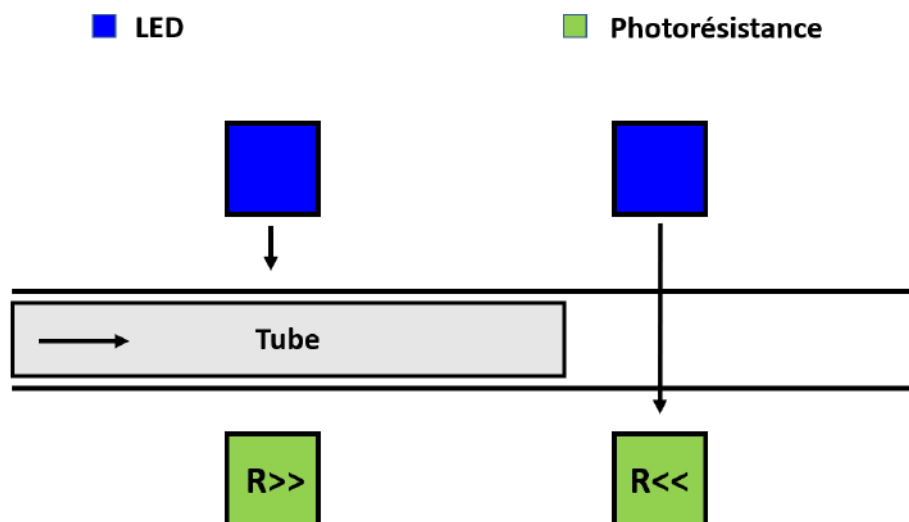


FIGURE 7.1 – Variation de la résistance en fonction de la position du tube

Dans un premier temps, il existe les photorésistances où il a été imaginé une ouverture dans le canal qui donne sur l'extérieur de la machine ou bien sur l'emplacement d'une

autre source de lumière comme par exemple une LED<sup>1</sup>. La résistance est placée en face de la source lumineuse et le tube passe entre les deux pour modifier l'intensité des rayons incidents et donc de la résistance.

Après quelques tests, ce montage n'était pas fonctionnelle, car l'ouverture de la photorésistance est limitée par la largeur du canal qui est de 1.5 mm. N'ayant pas trouvé de composant aussi petit, il a fallu utiliser une fraction de sa surface cependant plus aucune détection n'était possible à cause de sa faible sensibilité. De plus, la réactivité de ce type de composant est assez lente et par conséquent, elle amène une erreur sur le passage réel du tube.

Pour palier le problème de sensibilité et de réactivité tout en conservant un fonctionnement similaire, le choix des composants s'est tourné vers des semiconducteurs. Les capteurs basés sur cette technologie sont généralement composés d'une cellule émettrice et d'une autre réceptrice. Il existe généralement 3 configurations en pratique [25] :

- **Directe** : Les deux cellules sont de vis-à-vis et lorsqu'un objet passe le flux de lumière est interrompu similaire au montage précédent ;
- **Réflexive** : Les deux cellules sont dans le même boîtier et dans leur visé se trouve une surface réfléchissante. Le passage d'un objet interrompt le flux ;
- **Diffus** : Même principe que le précédent sauf la fraction réfléchie par l'objet est détecté par le récepteur.

Pour rendre le capteur le plus compact et l'insérer dans la tête d'extrusion, il a été décidé d'utiliser un capteur de type réflectif comme illustré sur la figure 7.2. C'est un composant OPB706B du fabricant OPTTEK où la fiche technique correspondante est disponible en Annexe C.5. Les deux cellules sont disposées sur une surface longue de 6.1 mm et large de 4.4 mm. Il est à noter que son point de fonctionnement optimal se réalise avec une surface réfléchissante à 1.27 mm du capteur ce qui est dans l'ordre de grandeur des canaux.



FIGURE 7.2 – Boîtier du capteur avec un schéma des composants présents

L'émetteur est une diode infrarouge afin de limiter la sensibilité à la lumière environnante et le récepteur est un phototransistor où sa base est sensible à lumière incidente tout comme une photodiode. Dans notre cas, le phototransistor produit un courant assez appréciable pour pouvoir être mesuré sans circuit de conditionnement supplémentaire. Un schéma de fonctionnement est illustré sur la figure 7.3 similaire au précédent sauf qu'il

1. Diode électroluminescente



suffit que le passage du tube cache une fraction réfléchissante de la surface du canal où le capteur serait diamétralement opposé.

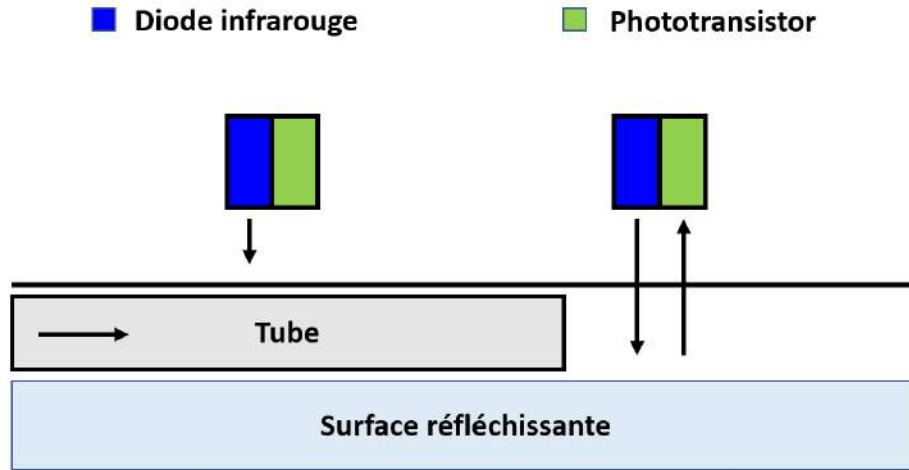


FIGURE 7.3 – Variation de la résistance en fonction de la position du tube

Dans l'idéal, ce capteur doit avoir un comportement binaire pour le contrôleur et donc pouvoir distinguer la présence ou non du tube. Pour ce faire, il est possible de faire l'analogie avec une étude sur les modes de fonctionnement idéals d'un transistor bipolaire classique [26].

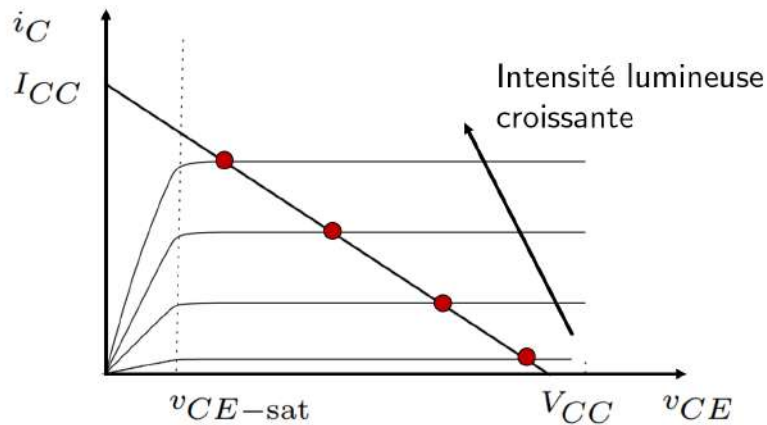


FIGURE 7.4 – Mode de fonctionnement d'un phototransistor [26]

Dans la pratique, un transistor est décrit par sa tension entre son collecteur et son émetteur  $V_{CE}$  et son courant de base  $I_B$  illustré sur la figure 7.4. Dans notre cas le courant de base est remplacé par l'intensité lumineuse. Pour chaque courant  $I_B$ , il existe une caractéristique  $V_{CE} - I_C$  associée. Nous pouvons distinguer 3 régions de fonctionnement :

- **Mode actif normal** :  $I_C$  est proportionnel à  $I_B$  ;

- **Régime de saturation** :  $V_{CE}$  est très faible ;
- **Régime de blocage** :  $I_C$  est négligeable.

Sur le schéma électrique illustré sur la figure 7.5, la tension  $V_{CE}$  est mesuré par le contrôleur. Une tension de 0 V serait obtenu en régime de saturation avec  $V_{CE}$  quasi nulle et, au contraire, une tension de 5 V serait obtenu en régime de blocage où  $I_C$  est quasi nul. Ces deux états représentent respectivement, l'absence ou non du tube.

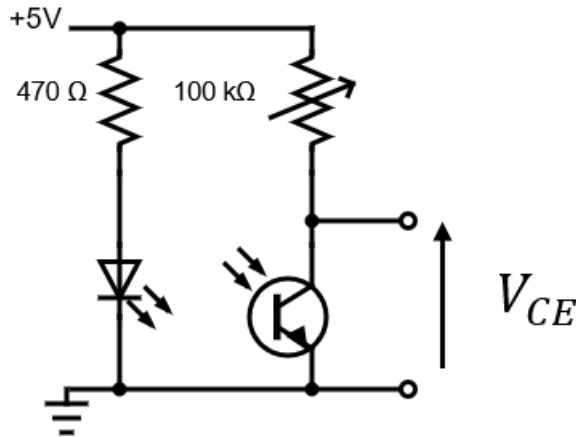


FIGURE 7.5 – Circuit de conditionnement

Dans un premier temps, il est nécessaire d'étudier la droite de charge. Celle-ci est définie par la tension  $V_{CC}$  qui vaut 5 V et la résistance au collecteur qui pour les besoins du prototype et des tests est variable. D'après les spécifications du constructeur, un courant maximal  $I_C$  de 350  $\mu\text{A}$  est atteignable dans une configuration optimale. En supposant que le capteur ne soit jamais dans ce cas par son emplacement, Le courant est supposé de 100  $\mu\text{A}$ . Ainsi, il faut une résistance,  $R = V/I$ , de 50 k $\Omega$  pour le transistor et par conséquent une résistance variable de 100 k $\Omega$  a été choisie. La variation de la résistance permet de réagir différemment pour une même intensité lumineuse. Ainsi, plus la droite de charge est raide, moins elle est sensible aux petites variations de lumière mais permet une plus grande plage d'intensité lumineuse avant de saturer.

Dans un second temps, la lumière incidente au phototransistor dépend de trois facteurs :

- **Intensité du courant dans la LED ;**
- **Surface réfléchissante ;**
- **Taux d'occupation du tube au niveau de l'ouverture.**

Pour déterminer des valeurs correctes pour ces paramètres, une sorte de banc d'essai a été imprimée où plusieurs encoches avec différentes ouvertures ont été réalisées comme illustré la figure 7.6. Après plusieurs tests, la détection du tube était possible, cependant, elle n'était pas comme espérée.

Il a été remarqué que la tension variait avec le changement de section. La largeur des ouverture est fixée par celle des canaux (1.5 mm), celle-ci se doit d'être la plus grande possible pour que les deux cellules aient une vision sur le tube. La nature légèrement transparente des tubes et le taux d'occupation variant entre 60 et 80 % en fonction de

la section amène une obstruction imparfaite et donc un retour d'une fraction des rayons vers le transistor. Ce résultat rend quasi impossible le passage dans le régime de blocage.

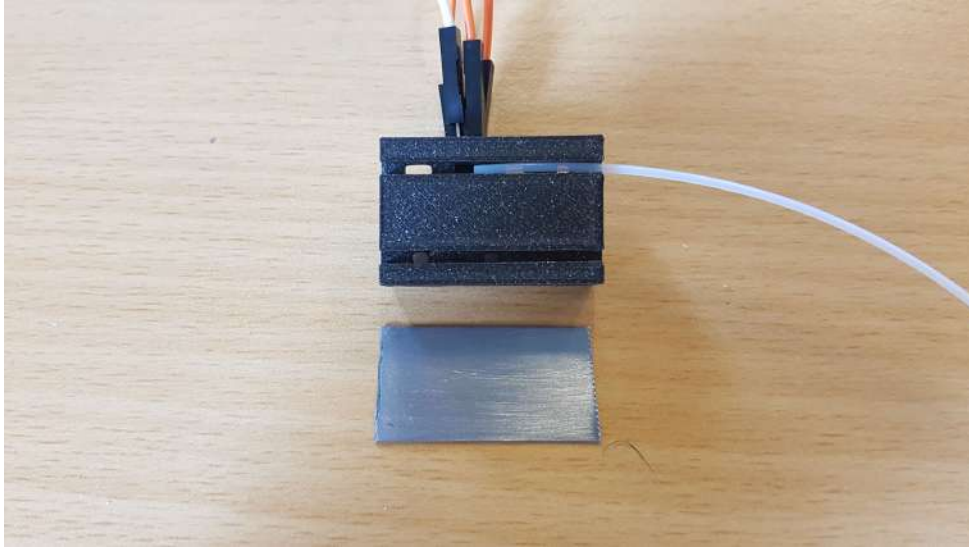


FIGURE 7.6 – Test sur les ouvertures du capteur

La manière la plus fiable de détecter le tube a été de rester dans le mode actif normal et de mesurer la tension analogique  $V_{CE}$  afin de comparer les valeurs entre la présence ou non du tube. Au niveau du contrôleur, une entrée analogique est utilisée pour convertir le signal sur 10 bits à savoir 1023 valeurs possibles.

Un bon compromis entre les différents paramètres est une largeur de 1.5 mm, une longueur de 2 mm, un courant de 15 mA à travers la diode et la surface réfléchissante est de l'adhésif aluminium. Dans cette configuration, une différence de 1.5 V est possible entre un canal vide et la partie étirée du tube.

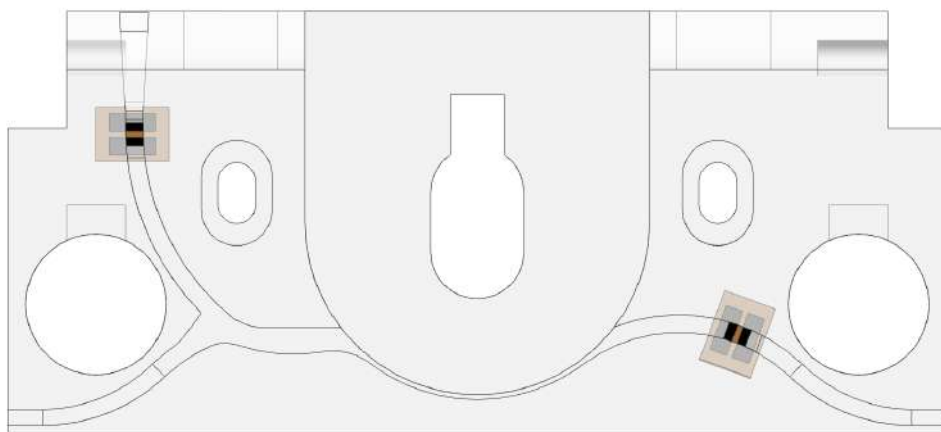


FIGURE 7.7 – Emplacement des capteurs

Grâce à son volume compact, il était possible de rapprocher le capteur au plus près de la roue d'entraînement tel qu'illustré sur la figure 7.7.

Un second capteur est visible sur ce modèle, celui-ci est placé après la roue dans le canal de sortie de droite. Ce capteur a été rajouté dans le but d'adapter le déroulement à un chargement manuel du tube puisque la liaison avec l'étireuse n'avait pas été conçue. Chaque tube est chargé dans le canal d'acheminement de différentes manières à différentes vitesses. Donc, le temps nécessaire pour le tube de se déplacer entre le premier capteur et son début d'entraînement par la roue est variable. Ainsi, la détection du second capteur permet de se fixer une nouvelle référence sur l'extrémité du tube et de le dérouler d'une longueur connue à l'avance vers la première plaque.

Ce nouveau capteur est aussi utilisé dans l'éjection du tube lorsque celui-ci manque son déroulement. En effet, si l'absence du tube est détectée, la roue peut s'arrêter de tourner en attendant la validation par l'utilisateur.

La position des capteurs étant fixée, il était nécessaire d'introduire les surfaces réfléchissantes au niveau de la tête d'extrusion. Ceux-ci sont nécessairement sur le couvercle. Pour les premiers essais, le couvercle était recouvert d'un adhésif en aluminium pour obtenir un fonctionnement rapide et fiable. Par la suite, des lames en acier ont été collées sur le couvercle pour améliorer le système de dégagement du tube. Il a été imaginé de poncer et polir ces lames pour les rendre plus réfléchissantes et ainsi remplacer l'adhésif. Cependant, les résultats n'étaient pas convaincants donc il a été décidé de conserver la première solution.

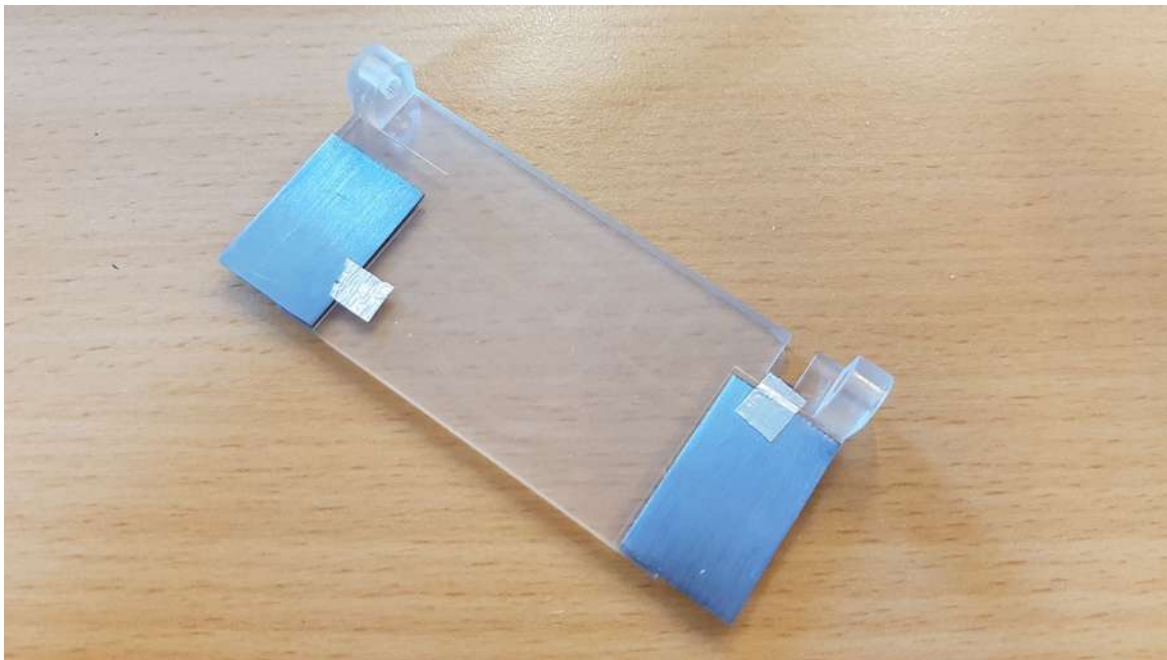


FIGURE 7.8 – Emplacement des surfaces réfléchissantes

Afin de pouvoir exploiter les données provenant des capteurs, il est nécessaire de déterminer la différence de tension analogique entre la présence ou non du tube. Le graphique de la figure 7.9 illustre le comportement du capteur en fonction de ce qui se présente devant lui. Au début, le couvercle est soulevé et la tension mesurée est convertie sur une valeur entière sur 10 bits, à savoir 850. Par la suite, le couvercle est fermé et donc la surface réfléchissante est face au capteur où une valeur d'environ 40 est observée. Le tube est chargé et passe devant le capteur où des fluctuations entre 350 et 450 sont observées. Ce

n'est pas du bruit inhérent au capteur, mais bien le mouvement aléatoire du tube dans le canal. Lorsque le tube dépasse le capteur, la valeur est réduite de nouveau à 40.

Il est possible d'appliquer un filtre au niveau du programme, ici de type récursif, afin de limiter les fluctuations tout en limitant son usage sur le processeur [27]. La courbe est lissée, mais reste moins réactive que l'original où il est nécessaire de réaliser un compromis entre la dépendance aux nouvelles données et la réactivité du signal. Afin de limiter la détection trop tardive du tube, les données brutes ont été tout de même conservées où les fluctuations restent relativement bornées.

Au niveau du programme, une équivalence avec une bascule de Schmitt a été implémentée. Une prise de référence du capteur est réalisée à chaque nouveau tube en mesurant la valeur à vide. Si une différence de plus de 150 se produit entre la valeur en cours et la référence, il est supposé que le tube arrive au capteur. Au contraire, une différence de moins de 50 suppose un passage complet du tube.

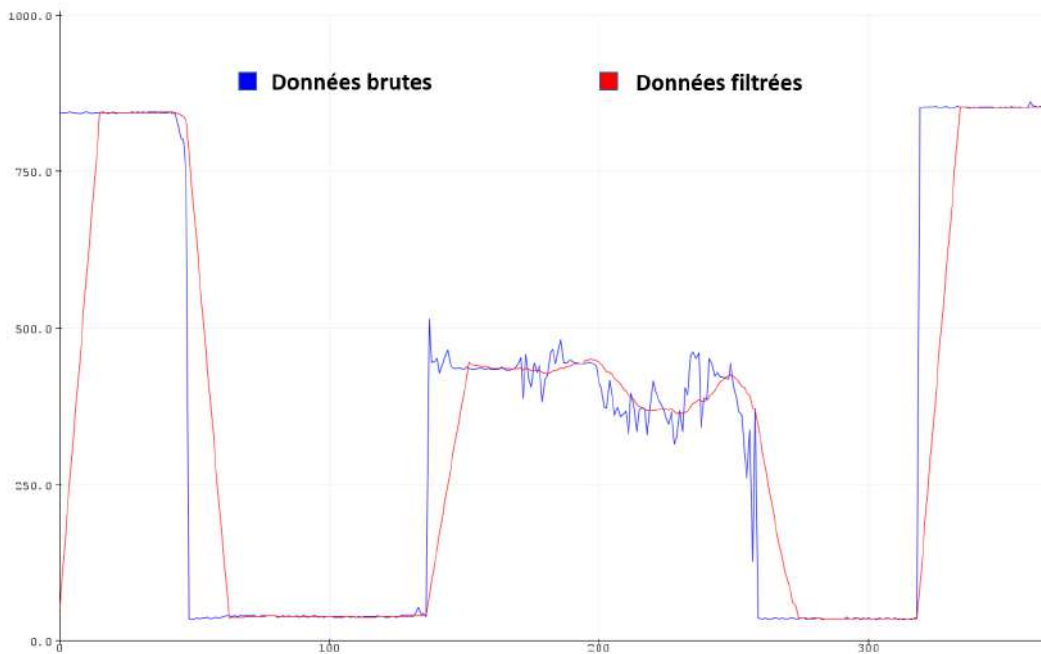


FIGURE 7.9 – Informations provenant du capteur avant et après filtrage

## 1.2 Adaptation aux tubes fins

Cette combinaison de capteur n'a montré aucun signe de faiblesse lors des différentes séquences d'opérations sur les tubes de 1.16 mm. Pour les tubes de 0.65 mm, il est nécessaire de vérifier si la détection est encore fiable. En effet, les dimensions des ouvertures ont été réduites pour s'adapter aux nouveaux canaux et pouvait potentiellement réduire fortement la lumière incidente au transistor.

Dans la pièce imprimée en PLA destinée aux tubes fins, quelques faux positifs de l'arrivée du tube, ont été signalés. La cause est la différence de tensions beaucoup plus faible que celle d'avant avec une valeur de 0.7 V combinée avec des fluctuations non-négligeable.

Lorsque la tête d'extrusion a été fabriquée à partir d'une résine translucide, les capteurs fonctionnaient étonnamment mieux que le modèle précédent avec une différence de tension de plus de 1.2 V dans les meilleurs des cas avec entre autres, la nécessité d'augmenter la résistance en série avec le transistor. Une explication plausible était l'état de surface de l'encoche qui dans une impression FDM est irrégulière à cause des supports utilisés et beaucoup plus lisse par procédé SLA. Ainsi, on pouvait s'imaginer que les rayons de la diode étaient moins diffus dans l'encoche du second cas.

## 2 Capteur de passage de tube

Comme introduit précédemment, la détection du bon déroulement du tube à travers une plaque est impérative afin de rendre la machine robuste aux imprévus. Afin de simplifier le problème et d'éviter de détecter le tube en lui-même, on vérifiera s'il a bien été tiré par le mécanisme de sertissage. En effet, si le tube est tiré, la roue rentrera en rotation bien qu'il est possible d'avoir un léger glissement. Ainsi, le passage du tube est vérifié indirectement par la rotation de la roue.

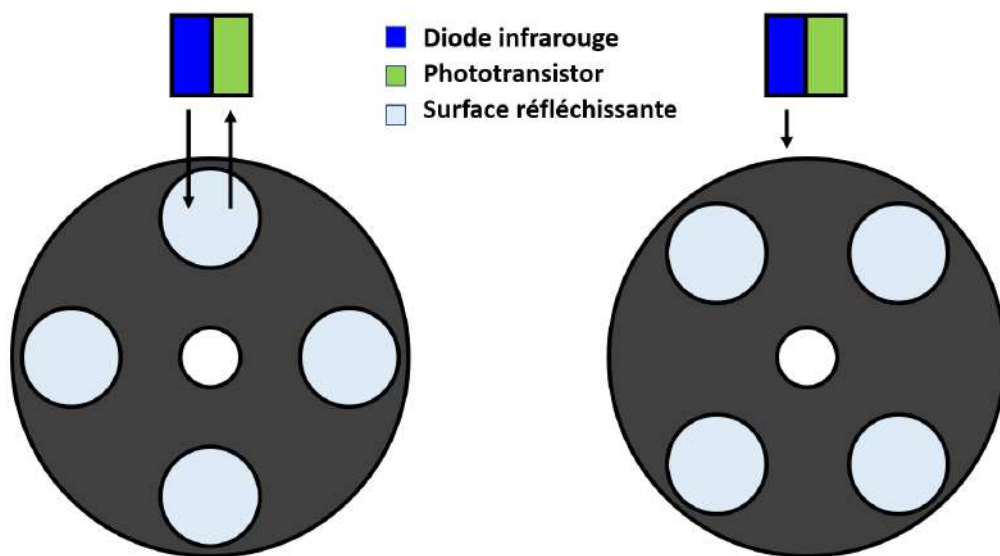


FIGURE 7.10 – Principe de fonctionnement de la détection du sertissage

Dans la pratique, il existe plusieurs techniques pour mesurer un déplacement ou une vitesse angulaire d'un objet en rotation. L'implémentation la plus simple aurait été un encodeur intégré sur le moteur pas-à-pas dont il est possible de connaître un déplacement relatif. Dans notre cas, la solution a été de réutiliser un capteur photoélectrique acquis lors de l'achat de ceux de la tête d'extrusion.

L'implémentation repose sur un changement de réflectivité de la roue qui serait détecté par le capteur. Pour ce faire, 4 encoches ont été réalisées sur l'arrière de la roue où de nouveau de l'adhésif en aluminium a été déposé pour un premier prototype. Le nombre de ces surfaces a été choisi pour assurer un passage complet d'au moins une encoche en face du capteur lors du sertissage afin d'être indépendant d'un éventuel glissement.



Ce capteur est actif durant l'opération de sertissage et non plus au moment du déroulement du tube comme décrit dans la section précédente. Lorsqu'un changement d'état de la roue s'opère, la carte de contrôle sauvegarde cette donnée. Si en fin de sertissage aucun changement n'a été détecté, la séquence de tubage est stoppée et le mode d'éjection du tube se lance.

De base, le fonctionnement était supposé binaire afin de pouvoir brancher le phototransistor à une broche supportant une interruption externe sur la carte de contrôle [28]. Au moment où un changement de valeur s'opère, une variable booléenne serait mise à jour en parallèle du fonctionnement normal de la machine. Cependant, il a été remarqué que la roue peut s'arrêter sur une position angulaire aléatoire où le capteur fait face à la surface réfléchissante et au matériau de la roue. Par conséquent, une valeur aux alentours de 2.5 VDC était possible et le contrôleur oscillait entre une valeur binaire 1 et 0 sans même que le tube soit tiré par la pince.



FIGURE 7.11 – Face arrière de la roue d'entraînement

La solution a été d'implémenter un programme similaire aux capteurs de présence de tubes en vérifiant la différence entre une référence prise juste avant le sertissage et pendant la réalisation de ce dernier. Afin de soulager le programme, l'utilisation d'une routine d'interruption interne par l'intermédiaire de *timers* a été implémentée [29]. L'état de la roue est vérifié à une fréquence de 10 Hz et si une différence de 300 est observée, une variable est mise à jour pour annoncer le bon déroulement du tube.

### 3 Capteur de *Homing*

Afin de pouvoir calibrer les différents axes, il est courant de retrouver des capteurs dit de fin de course ou plus généralement de "homing" afin de définir un point de référence dans le volume de déplacement de la machine.

Il existe un grand choix de capteurs en fonction du matériau à détecter, de la plage de fonctionnement ou encore de sa répétabilité. Dans notre cas, il n'y a aucune contrainte sur le matériau et si besoin un élément peut être rajouté à cet effet. Il suffit d'un seul point de référence, la distance en tant que telle n'a aucun intérêt. Au niveau de la répétabilité, elle rentre en compte pour la précision du placement du tube en face d'une plaque. L'erreur amenée par le capteur est présente tout au long du tubage, mais reste constante.

Pour ce niveau de précision, il existe quatre types de capteurs couramment utilisés :

- **Inductif** : le principe de fonctionnement s'articule autour de la variation de l'inductance du capteur en fonction du matériau métallique à proximité. La sensibilité est meilleure pour des matériaux ferromagnétiques par rapport, par exemple, à de l'aluminium ;
- **Optique** : Celui-ci est similaire aux capteurs photoélectriques où un élément interrompt le flux entre l'émetteur et le récepteur ;
- **Mécanique** : Capteur de fin de course classique où un contact est nécessaire par l'intermédiaire d'un levier sur un bouton.
- **Effet Hall** : La proximité d'un champ magnétique crée une différence de potentielle dans un élément conducteur perpendiculaire au passage du courant.

Tous ces capteurs possèdent leurs avantages et inconvénients, néanmoins, chacun permet une répétabilité inférieure à 50  $\mu\text{m}$  dans l'absolue [30] [31]. Pour une première implémentation, le capteur mécanique sera repris puisqu'il reste le moins cher et le plus simple d'utilisation, mais il est le plus sujet à l'usure.

L'objectif est de placer trois de ces capteurs sur chacun des axes et plus précisément en dehors de la zone de tubage. Au moment du démarrage, le contact est réalisé au moins une fois pour la calibration et le reste du temps les capteurs sont inactifs et préservés de l'usure. Ainsi, l'emplacement des capteurs des axes X et Z se trouve sur l'extrémité d'un des rails de guidage et quant à l'axe Y, il est fixé sur le guide motorisé comme illustré sur la figure 7.12.

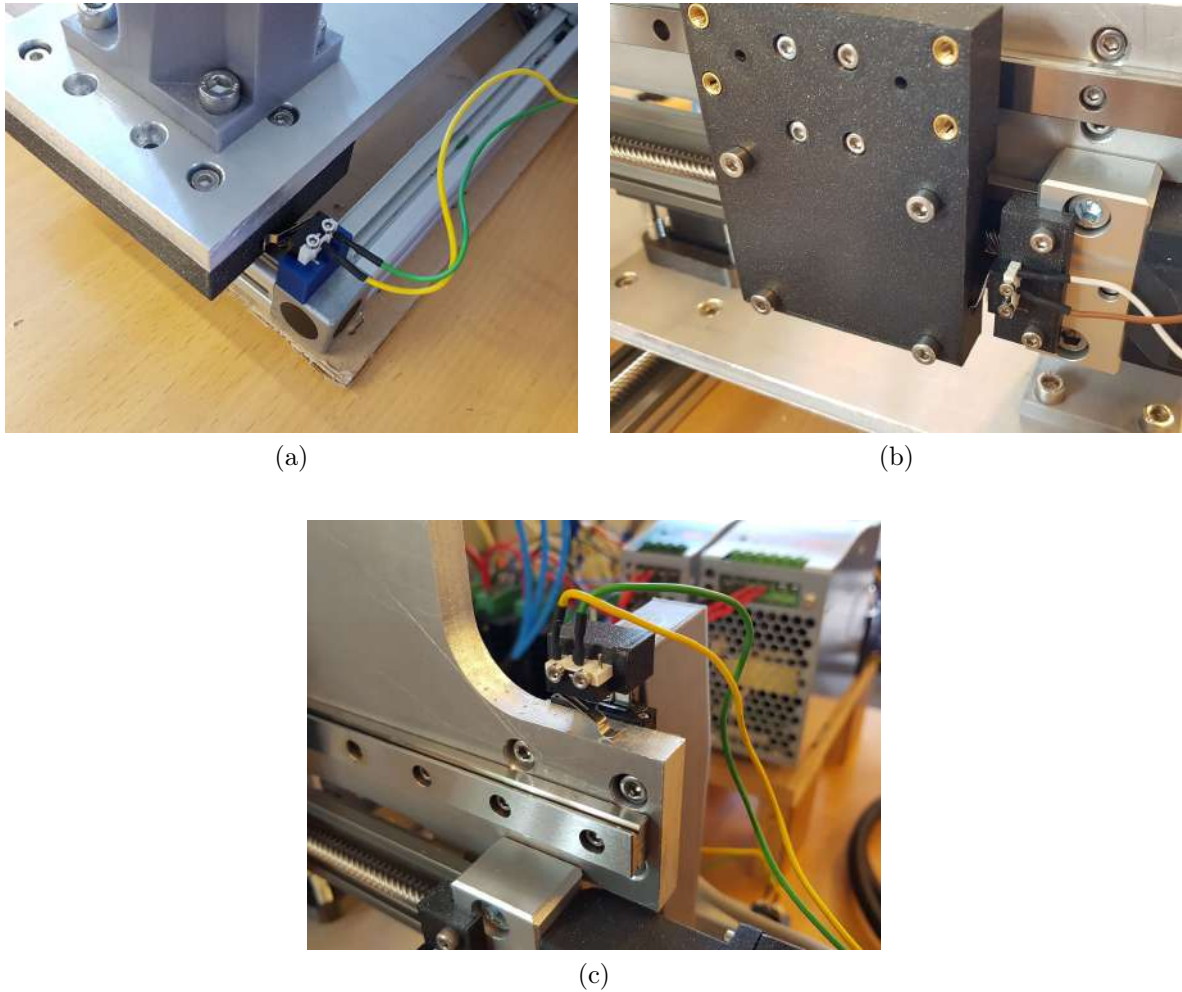


FIGURE 7.12 – Capteur pour (a) : l'axe X, (b) : l'axe Y et (c) : l'axe Z

Lors de la calibration, un par un, les axes ont leur point de référence défini. Chaque élément de contact se rapproche de son capteur à une vitesse assez élevée. Puis, il y a une détection de la commutation du capteur pour arrêter le mouvement. Avec l'inertie, le palier s'est déplacé plus loin que la référence et donc, une seconde passe plus lente est réalisée dans le sens contraire jusqu'à ce que le contact disparaisse.

Lors de divers tests, la mesure de la répétabilité du capteur a été réalisée en comparant la différence du nombre d'impulsions envoyé au moteur pour un aller-retour. Bien évidemment, le jeu mécanique avait été déduit précédemment et soustrait du résultat. Ainsi, le capteur, malgré l'utilisation du levier, amène une erreur maximale entre 15-20  $\mu\text{m}$  qui reste tout à fait acceptable.

## 4 Déplacement des axes linéaires

### 4.1 Profil de vitesse

Les mouvements de la tête d'extrusion selon les trois axes linéaires se doivent d'être précis et les plus rapides possible afin de maximiser le temps de tubage. L'implémentation la plus simple reste l'envoi d'un train d'impulsion à une fréquence constante aux différents

moteurs où le nombre d'impulsions sur un intervalle donné est proportionnel au déplacement linéaire effectué. Toutefois, cette solution reste peu adaptée lorsque l'inertie des paliers est non négligeable. Ainsi, des profils de vitesse trapézoïdaux ont été implémentés afin d'avoir des mouvements plus souples au démarrage et à l'arrêt.

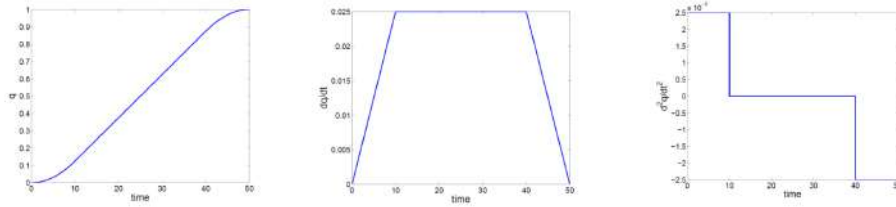


FIGURE 7.13 – Profils de position, vitesse et accélération [32]

Ce type de profils est adapté lorsque les vitesses et accélérations sont limitées. Dans notre cas, la vitesse d'exécution de la carte de contrôle et le microstepping limite davantage les performances par rapport aux limitations physiques des moteurs.

L'avantage avec les cartes Arduino est qu'il existe une multitude de bibliothèques qui implémentent déjà ce type de contrôle sur les moteurs pas-à-pas. Dans notre cas, la bibliothèque **AccelStepper.h** a été utilisée [33].

## 4.2 Ordre de tubage d'une plaque

L'ordre de tubage avait été introduit dans la section 3 où chaque rangée est tubée complètement avant de pouvoir passer à la suivante. Cette séquence se doit d'être implémentée dans le programme où deux solutions ont été étudiées.

La solution la plus simple pour décrire la séquence d'orifice d'une plaque est une liste des positions successives selon l'axe X et l'axe Z où celle en Y est constante. Néanmoins, il faut stocker pour chaque plaque prédéfinie un tableau d'un maximum de 2x192 valeurs. En fonction du type de variable utilisé dans le code, la mémoire de la carte peut vite être saturée avec moins d'une dizaine de plaques enregistrées. Si le nombre de plaques à retenir venait à être trop grand, il serait possible de stocker les données dans une carte SD par exemple et d'utiliser un module complémentaire à la carte Arduino.

Dans le cas de ce prototype, une autre implémentation a été proposée pour alléger le code. La disposition des orifices des deux plaques est assez régulière pour tuber une plaque entièrement à l'aide de seulement la position de l'orifice précédent et de la géométrie de la plaque. En effet, la majorité des points sont obtenus par simple décalage selon X du précédent mise à part ceux en fin de rangée où il est nécessaire de considérer un décalage en X et en Z. Cette solution est plus longue à développer, mais elle n'utilise que des opérations arithmétiques en fonction de l'état d'avancement du tubage.

## 5 Gestion des ressources électriques

Jusqu'à maintenant, trois tensions d'alimentation ont été nécessaires au bon fonctionnement de la machine :

- **5 VDC** : alimente les phototransistors, diodes infrarouges, les différents relais et les sorties digitales de la carte ;
- **12 VDC** : alimente l'Arduino et les électroaimants ;
- **24 VDC** : alimente les distributeurs pneumatiques et les drivers des moteurs pas-à-pas.

L'alimentation en 5 VDC provenait de la broche correspondante sur la carte de contrôle par l'intermédiaire de son régulateur de tension interne. Avec l'avancement du projet, les tests ont commencé à devenir plus complets et à ce moment, la carte exhibait des comportements indésirables. L'Arduino stoppait son fonctionnement et redémarrait sa séquence. Deux causes sont à l'origine du problème à savoir le courant demandé à la carte trop grand et la désactivation des relais qui sera traité dans la section suivante.

Lorsqu'on additionne les différents courants quittant la carte dans une configuration normale, on obtient une valeur de 395 mA. Si l'Arduino est alimenté par du 12V avec une diode de protection en entrée, le régulateur voit une puissance  $P = VI$  :

$$(12 - 5 - 1.2) \times 0.395 = 2.29 \text{ [W]} \quad (7.1)$$

Le régulateur interne de la carte ne peut dépasser une puissance de 1W d'après ses spécifications à cause de la chaleur dégagée. Si la puissance vient à dépasser ce seuil pendant un certain temps, la carte se met en sécurité.

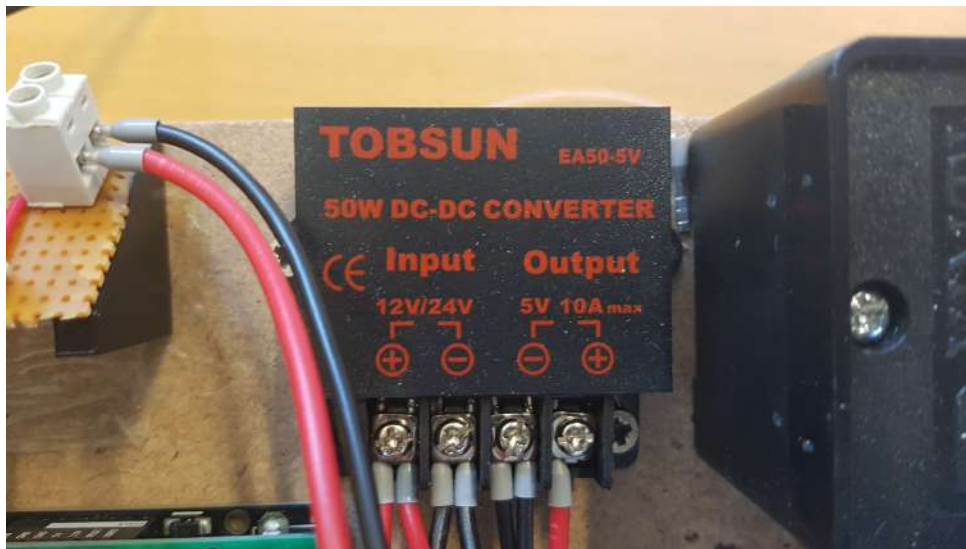


FIGURE 7.14 – Convertisseur DC-DC

Pour résoudre le problème, il était nécessaire de séparer les courants de commande à ceux de puissance par une autre source. Le choix s'est porté sur un convertisseur DC-DC ou *buck* afin de réduire les tensions 12 ou 24 VDC déjà présentes à du 5 VDC (voir figure 7.14).

Par la suite, il était nécessaire de remplacer les alimentations de laboratoire par un branchement direct au 220 VAC par l'intermédiaire de blocs transformateurs de tension alternatif/continu. Après discussion sur les spécifications requises, on m'a proposé les blocs d'alimentation industriels **NDR-120-12** et **SDR-240-24** du fabricant **Mean Well** où leur documentation est disponible en Annexe C.9. Ces alimentations sont illustrées sur la figure 7.15 et délivrent une puissance largement suffisante pour la configuration actuelle



de la machine et suffiront si par exemple des moteurs doivent fonctionner en parallèle. Enfin, un interrupteur bipolaire a été placé en amont de tout le réseau électrique dans le but d'éteindre complètement la machine.



FIGURE 7.15 – Bloc d'alimentations 12 et 24 VDC

## 6 Relais avec charge inductive

Lorsque le courant circulant dans la bobine d'un relais était interrompu subitement, il arrivait que le microcontrôleur stoppe son exécution et redémarrait la séquence d'opérations.

Le phénomène s'apparente à un comportement typique d'une charge inductive où une surtension  $v$  est générée et opposée à la variation brusque de courant  $i$  :

$$v = -L \frac{di}{dt} \quad (7.2)$$

où  $L$  est l'inductance de la bobine.

Cette tension peut perturber voire détériorer le fonctionnement de l'organe de contrôle. Cependant, ce comportement n'est pas logique puisque les bobines de relais possèdent un circuit de protection contre ce type de phénomène. De plus, lorsque les distributeurs ou électroaimants sont débranchés, aucun problème n'est apparu par la suite.

Le point commun des éléments contrôlés par les relais est que toutes sont aussi des charges inductives. S'il existe une force contre-électromotrice lorsque le circuit est ouvert par le relais, l'isolation entre les deux circuits devrait protéger celui de commande. Toutefois, la mise en place d'une diode en parallèle de la charge pour laisser circuler le courant à l'ouverture des contacts a permis de résoudre le problème.



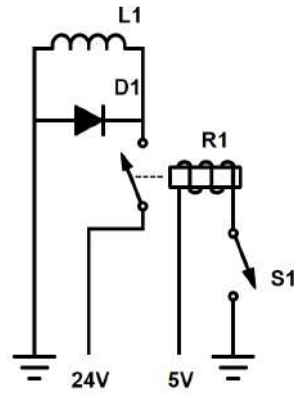


FIGURE 7.16 – Schéma électrique d'un relais avec une charge inductive

## 7 Montage électrique

Le schéma électrique complet de la machine à tuber est disponible en Annexe B. Les différents éléments de commandes électriques ont été simplement placés à l'arrière de la machine sur une planche en aggloméré comme illustré sur la figure 7.17. Les câbles liés à la machine sont tous regroupés et présentent du mou afin de pallier aux mouvements de la tête d'extrusion. On aurait pu opter pour un coffret électrique par souci de rangement, néanmoins, la machine restera fixe dans les locaux de l'entreprise et donc, on peut se permettre de laisser le montage tel qu'il est.

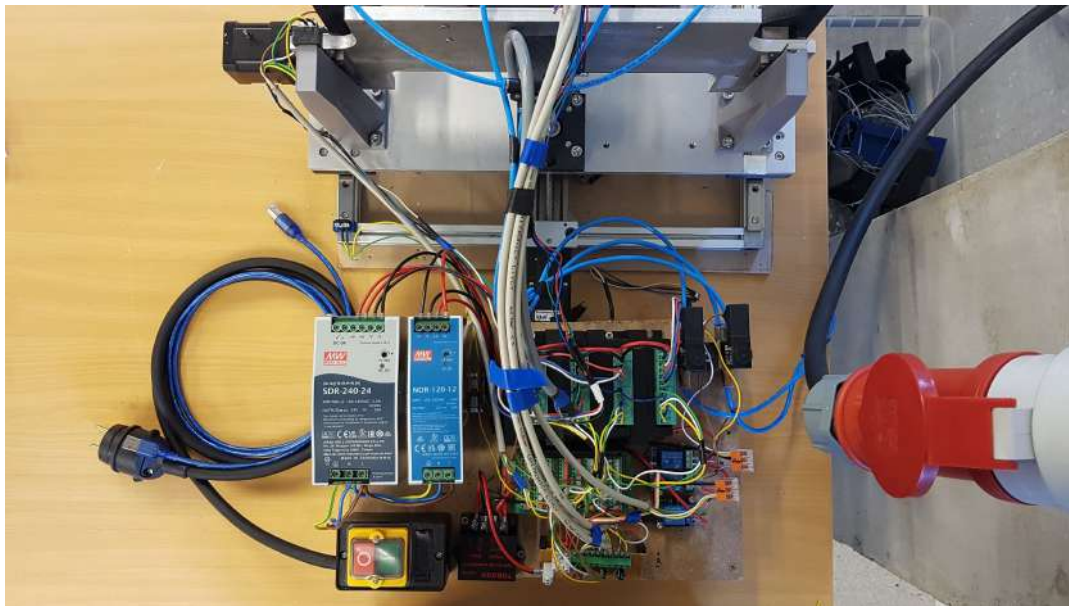


FIGURE 7.17 – Branchement de la machine

Afin de faciliter le branchement des composants tels que les capteurs et les résistances, un circuit imprimé a été réalisé pour remplacer une *breadboard* présente depuis le début de la conception comme illustré sur la figure 7.18.

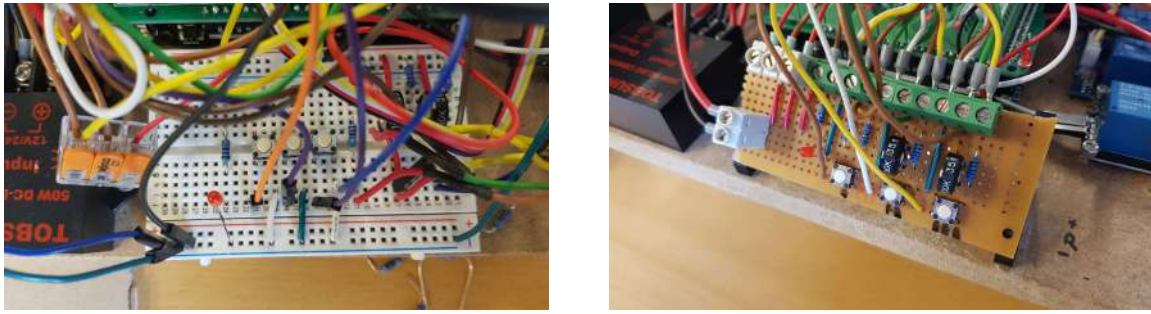


FIGURE 7.18 – Intégration d'un PCB entre l'environnement extérieur et la carte de contrôle

# Chapitre 8

## Mise en marche complète de la machine

### 1 Montage complet

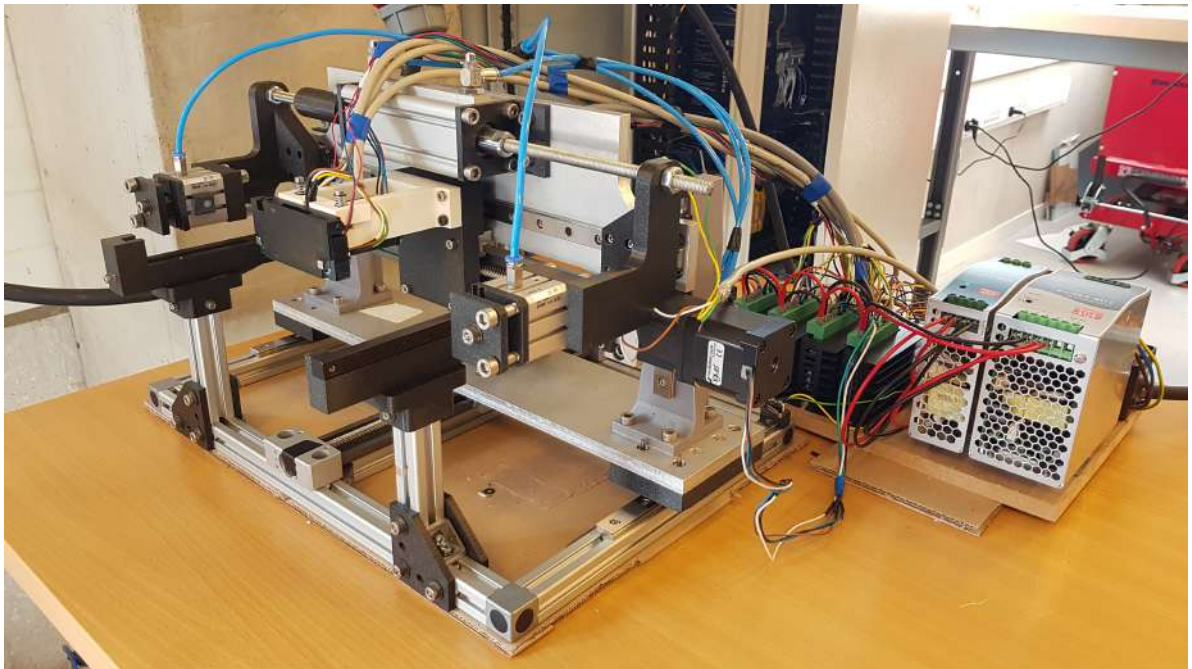


FIGURE 8.1 – Vue d'ensemble sur la machine

### 2 Premiers résultats

Chaque partie de la machine avait été testée indépendamment afin d'en valider le fonctionnement. Ainsi, il était temps de tester complètement la machine sur une succession de plusieurs tubes afin d'en souligner les principaux problèmes avant de pouvoir compléter entièrement la paire de plaques en tant que telle.

#### 2.1 Perte de précision

Durant les premiers essais sur les déplacements de la machine, une erreur sur la position de la tête d'extrusion s'accumulait selon les axes X et Y. À l'aide d'un comparateur micrométrique, il s'est avéré qu'un décalage d'environ 20  $\mu\text{m}$  s'ajoutait à chaque inversion

du sens du mouvement, équivalent à 2 pas moteurs et proportionnel au microstepping. Le jeu mécanique précédemment décrit ne peut donner de tels résultats par son erreur non cumulable. Après quelques investigations sur le circuit intégré du driver et la bibliothèque **AccelStepper** deux problèmes en étaient la cause :

- Le train d'impulsion au driver doit débuter par un front descendant dans un montage où les broches PUL+, ENA+ et DIR+ du driver sont connectées au 5 VDC ;
- La bibliothèque avait une fréquence d'impulsions par défaut beaucoup trop rapide équivalente à 1  $\mu$ s où le driver n'accepte au minimum 10  $\mu$ s. Dans notre cas, la valeur a été fixée à 20  $\mu$ s par sécurité.

Après les modifications nécessaires, aucune accumulation notable d'erreurs sur le positionnement n'a été détectée.

## 2.2 Nouvelle matrice d'éjection

La matrice d'éjection à le défaut de ne pas posséder de chanfrein autour de ses orifices et obligeait ainsi une précision de 50  $\mu$ m. Après considération de toutes les sources d'erreurs, la position selon X de l'extrémité du tube dépasse sûrement cette valeur malgré l'hypothèse d'un tube contraint en sortie de canal. Ainsi, il était plus facile de dérouler le tube dans le séparateur de faisceaux de tube que dans la matrice. Le tube se heurtait sur la surface et n'avancait plus par certains moments. De plus, l'opération de sertissage amenait le tube à légèrement s'effriter au niveau de l'entrée des orifices avec la vitesse de traction et le manque de chanfrein. Ce phénomène se remarquait notamment avec la présence de fibre de PTFE sur le pourtour de l'orifice tubé.

Puisqu'il n'était pas possible de modifier la section du canal à sa sortie de la tête d'extrusion, il a été demandé d'obtenir une nouvelle paire de plaques ou de pouvoir modifier la matrice. La deuxième solution a été retenue de manière à avoir un chanfrein sur chaque orifice de la plaque en question. Il est tout à fait possible pour l'entreprise de réaliser cet ajout à la fabrication déjà présent sur le reste des plaques.

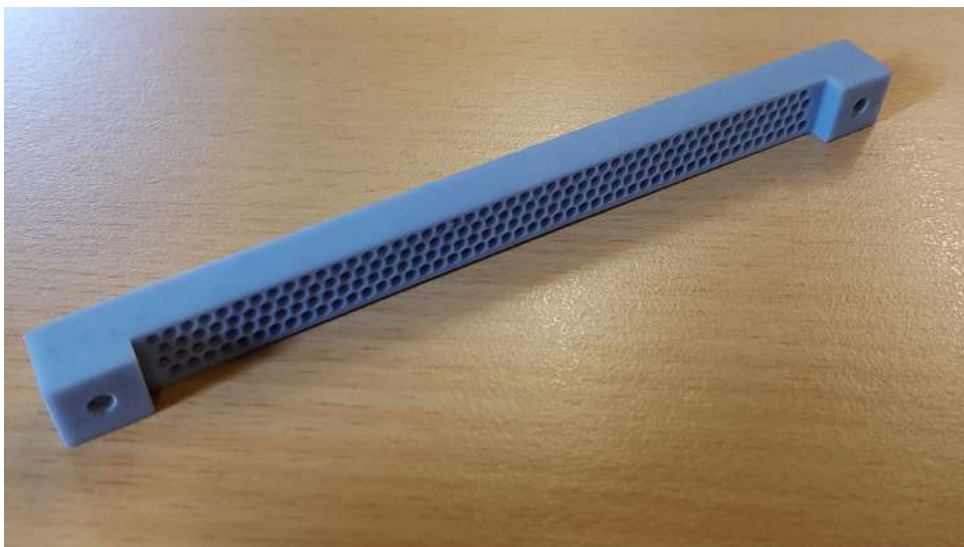


FIGURE 8.2 – Nouvelle matrice d'éjection

Afin de pouvoir réaliser des essais sans attendre l'usinage de la nouvelle pièce, il a été



décidé de réaliser la matrice d'éjection de nouveau en résine (voir figure 8.2). Le constat est clair, les tubes traversent plus facilement la matrice. La pièce reste légèrement gondolée dû à la méthode de fabrication sans pour autant gêner le tubage où le positionnement des orifices est respecté.

### 2.3 Premiers cycles de tubages

Dans un premier temps, les premiers cycles complets ont été réalisés à l'aide de tubes étirés manuellement, mais très vite, ceux-ci ont montré des mauvais déroulements à travers les plaques. Sur 28 tubes, 1 a manqué sur la matrice d'éjection et 7 sur la seconde plaque. Par la suite, des tubes de la machine à étirer ont été chargés dans la tête d'extrusion. Cette fois-ci, sur 48 tubes, 1 a manqué sur la matrice et 2 sur la seconde plaque. La jonction entre le canal d'acheminement et le canal de sortie de gauche présente une zone délicate pour le tube qui peut se courber et se plier au vu de l'élargissement du canal. Ce phénomène se présente pour des extrémités trop étirées et ainsi, explique le nombre de ratés sur la seconde plaque avec des tubes conditionnés manuellement.

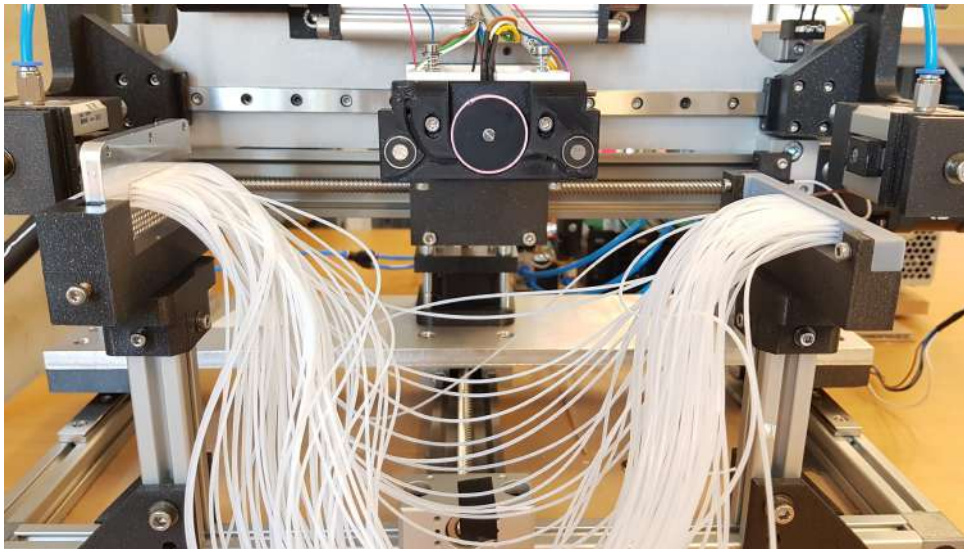


FIGURE 8.3 – Première réalisation de plusieurs cycles de tubages

Durant les tests, un espace de 500  $\mu\text{m}$  entre la sortie de la tête d'extrusion et une plaque a été imposé. Cette configuration permet de limiter les erreurs de positionnement du tube en lui laissant une marge de manoeuvre avant d'atteindre l'orifice. De plus, un déroulement à distance limite les effets de désalignement et évite potentiellement une détérioration à cause du contact de la tête sur la plaque.

### 2.4 Nouvel adaptateur de la matrice d'éjection

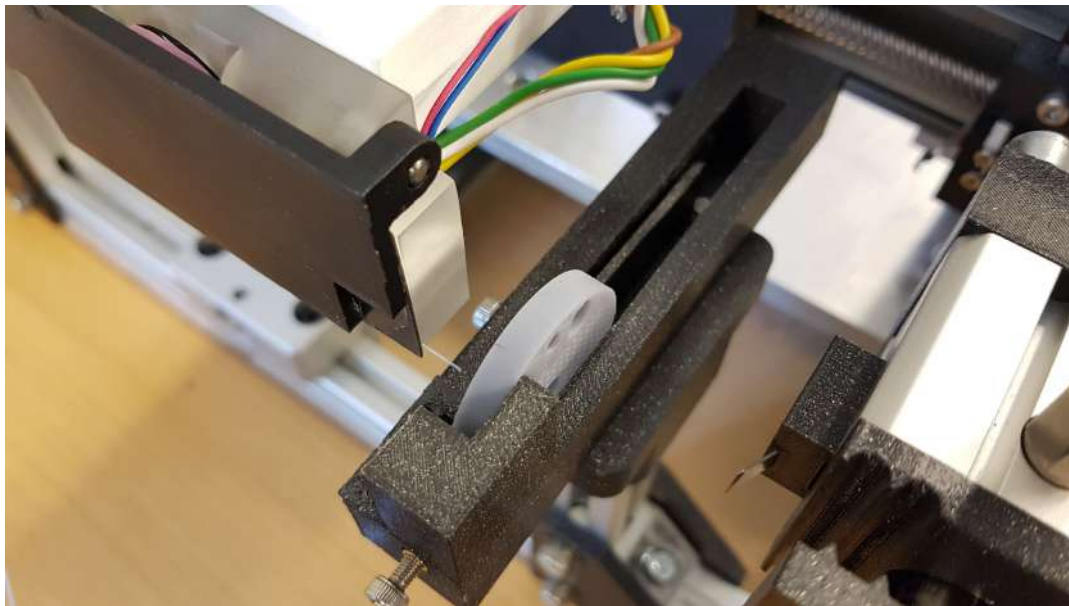
Lorsque la tête d'extrusion s'approchait des premiers orifices de chaque rangée de la matrice d'éjection, le palier de l'axe Y rentrait en contact avec l'adaptateur de la plaque comme illustré sur la figure 8.4a. Afin de résoudre ce problème, il était possible d'allonger le porte-à-faux du support de la tête ou de modifier légèrement l'adaptateur de la plaque. La seconde solution a été implémentée comme illustrée sur la figure 8.4b.



FIGURE 8.4 – Modification de l'adaptateur de la matrice d'éjection

## 2.5 Passage des tubes fins à travers sa plaque d'interface

Afin de valider le prototype pour le déroulement des tubes de 0.65 mm, quelques tests ont été réalisés avec les matrices adéquates. Ces tests sont restés simples pour se concentrer sur les tubes classiques où simplement le passage du tube a été réalisé comme illustré sur la figure 8.5.

FIGURE 8.5 – Test du déroulement d'un tube fin dans une plaque adaptée<sup>1</sup>

## 3 Résultats finaux

### 3.1 Tubage complet de la paire donnée

L'ultime test a été réalisé sur la paire utilisée depuis le début où sur 192 tubes, 22 sont impossibles à placer sur la matrice d'éjection à cause de sa géométrie comme expliquée précédemment. Le montant de droite sera associé à la matrice d'éjection et celle de gauche

1. [https://drive.google.com/drive/folders/1NsHYbh-\\_1r0gRAmFBKXoFlgAotMjc00w?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1NsHYbh-_1r0gRAmFBKXoFlgAotMjc00w?usp=sharing)



à la plaque de séparateurs de faisceaux de tubes. Diverses vidéos de démonstrations sont disponibles par le lien en bas de page<sup>2</sup>.

La position des premiers orifices des plaques a été soigneusement sauvegardée auparavant et le lancement de la machine pouvait débuter avec la calibration. La tête d'extrusion placée à l'origine des axes, le tubage pouvait commencer jusqu'au dernier orifice disponible. Les tubes possédaient une longueur de 45 cm entre deux plaques espacées de 25 cm. L'opération a été longue néanmoins, plusieurs observations ont permis de cibler les problèmes de la machine et le résultat final est illustré sur la figure 8.6.

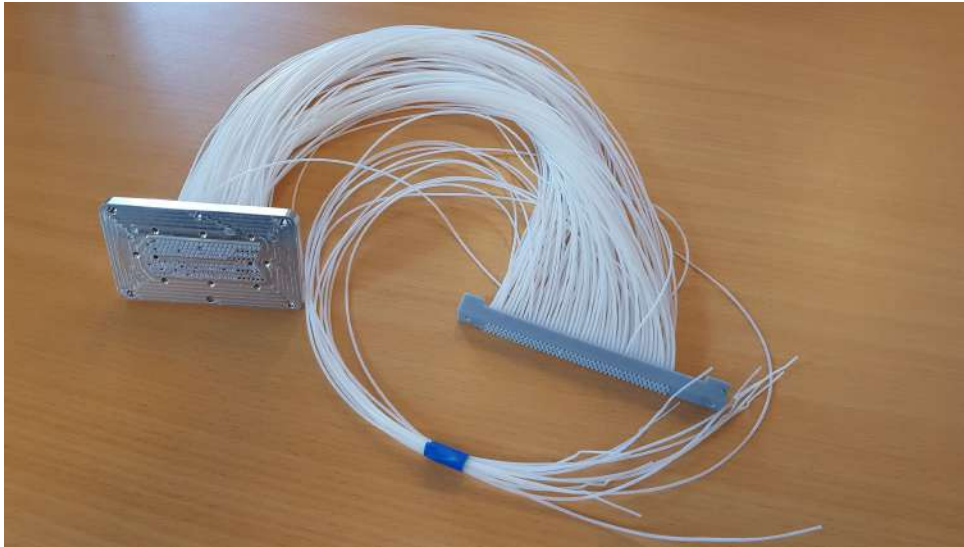


FIGURE 8.6 – Tubage quasi complet de la paire de plaques

Comme illustré sur la figure 8.7, la matrice d'éjection est complètement tubée à l'exception des tubes inaccessibles. Quatre tubes ont manqué leur première tentative, mais grâce à la détection du sertissage, la séquence a pu être adaptée pour recharger un nouveau tube. La découpe est constante qui prouve le bon alignement de la plaque avec les axes. Néanmoins, la découpe est restée grossière afin d'éviter tout risque de contact de la lame avec la matrice. Il est tout à fait possible de terminer manuellement la découpe à l'aide d'une autre lame afin de valider la plaque.

---

2. [https://drive.google.com/drive/folders/1F690u\\_RewNDZhUDPkYjZdZs1p66wvpM4?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1F690u_RewNDZhUDPkYjZdZs1p66wvpM4?usp=sharing)



FIGURE 8.7 – Tubage de la matrice d'éjection

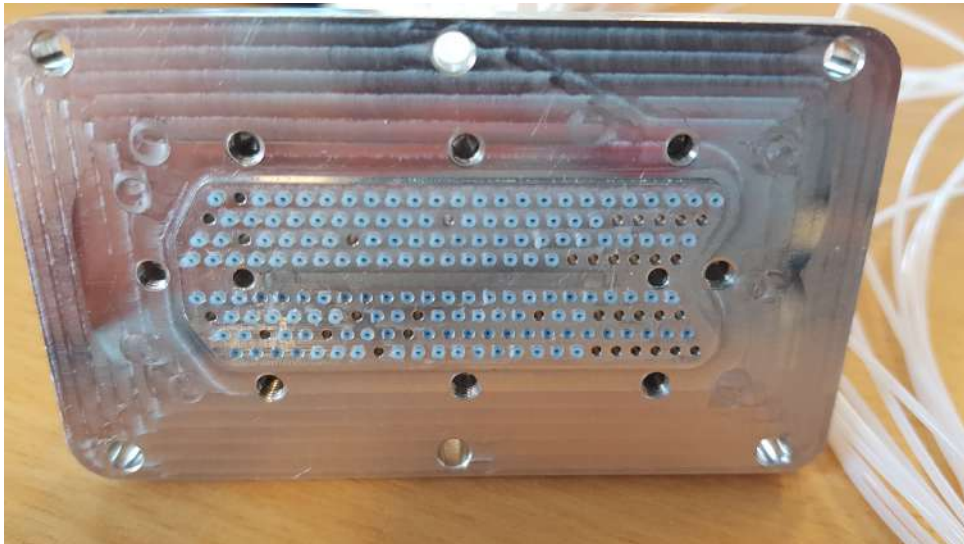


FIGURE 8.8 – Tubage de la plaque de séparateurs de faisceaux de tubes

Le cas de la plaque de séparateur de faisceaux de tube est différent puisqu'il n'est plus possible de recommencer le déroulement si le tube venait à manquer son passage. Outre les 22 orifices associés à ceux de la matrice d'éjection, 13 extrémités de tube n'ont pas pu être serties. Trois tubes ont manqué leur passage à cause du capteur dans le canal d'acheminement dont la fixation était mal réalisée. Par conséquent, des faux positifs étaient perçus par le contrôleur sur le dépassement du tube et le changement de direction était réalisé trop tôt où le tube était encore présent dans le premier canal.

Le reste des déroulements manqués sont simplement les extrémités des tubes qui ne sont pas parvenues à traverser la plaque. Le désalignement à la sortie des canaux rentrait en compte, néanmoins, aucune accumulation d'erreur n'était notable puisque les derniers orifices ont été tubés sans encombre. De plus, deux lots de 100 tubes ont été réalisés à l'aide la machine à étirer. La majorité des défauts de tubages sont arrivés avec le second lot où les paramètres de la machine en question avaient été modifiés entre-temps puisque celle-ci

présentait un mal fonctionnement. Une différence sur le conditionnement des tubes a été observée avec une diminution de 50 à 100  $\mu\text{m}$  du diamètre de l'extrémité. À première vue, ce rétrécissement apporterait un déroulement plus facile à travers la plaque. Cependant, l'extrémité, devenue plus souple, a tendance à se plier au niveau de la jonction des canaux à la moindre contrainte tel le chanfrein des orifices.

### 3.2 Vitesse d'exécution

Le temps nécessaire au tubage n'a jamais été spécifié où il était juste question d'une simple autonomie de la machine qui pouvait tuber sur plusieurs heures s'il le fallait. En moyenne, un tube est complètement serti en 55 secondes et donc, on obtient un tubage complet d'une paire de plaques en un peu moins de 3 heures si tous se déroulent sans encombre. Ce temps nécessaire n'est pas définitif surtout dans le cadre d'un prototype où tous les mouvements sont assez lents afin d'étudier le comportement à proximité des plaques. Les mouvements de la tête d'extrusion constituent la majeure partie du temps de tubage où les vitesses sont limitées par la carte de contrôle autour de 3200 pas par seconde. La conversion en une vitesse linéaire donne 30 mm/s dans le plan XY et 2 mm/s selon l'axe Z. Ces vitesses restent relativement faibles pour l'ensemble des mouvements et plus spécialement au niveau de l'axe vertical.

Par la suite, il a été testé un fonctionnement en parallèle afin d'obtenir des mouvements diagonaux. Cependant, la carte de contrôle et la bibliothèque **AccelStepper.h** ne sont pas adaptés pour ce genre de configurations surtout avec la mise en place de rampes d'accélération. Les mouvements devaient être deux fois plus lents puisqu'il fallait envoyer un train d'impulsion sur deux moteurs.

### 3.3 Comportement du tube

Le passage à la seconde plaque obligeait le tube à être complètement déroulé afin de réaliser le changement de direction. Le problème reste que le tube n'était plus guidé à l'extérieur de la tête et son comportement était imprévisible dans le volume de travail de la machine. Le tube pouvait se retrouver derrière la première plaque au lieu de simplement se laisser tomber vers le bas. Sans une intervention manuelle, le corps du tube pouvait être agrippé par une pince et se détériorer. Ce phénomène s'accroît lorsque le tube devient long et les plaques sont fort rapprochées où le tube peut présenter plusieurs boucles et se positionner derrière la machine.

Lorsque plusieurs tubes sont déjà sertis, il est possible que celui en cours ne puisse traverser une plaque à cause du précédent qui se positionnait devant l'orifice en cours d'opération. En effet, le dernier mouvement est selon l'axe Y dont le rapprochement à la plaque est normal à sa face d'entrée. Il est quasi impossible de décaler ou de pousser les tubes selon ce mouvement où la tête d'extrusion écrase les tubes sur la plaque d'interface comme illustrée sur la figure 8.9. Par conséquent, il était indispensable de manuellement pousser les tubes vers le bas à chaque libération.

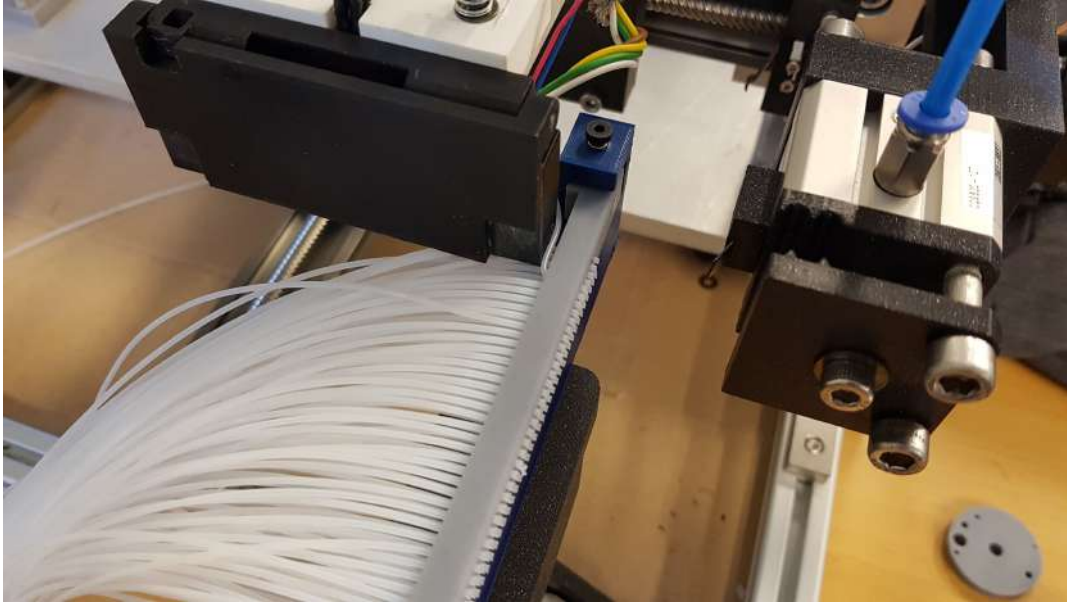


FIGURE 8.9 – Écrasement du tube précédemment serti par le mouvement de la tête d'extrusion

### 3.4 Roue d'entraînement

La roue d'entraînement avec un revêtement en silicone n'avait pas montré de signes de faiblesse jusqu'à maintenant. Cependant, après quelques centaines de tubes, le pourtour de la roue a commencé à se dégrader au niveau de l'arête en contact avec le tube (voir figure 8.10) où des morceaux de silicones étaient arrachés et entraînés dans les canaux.

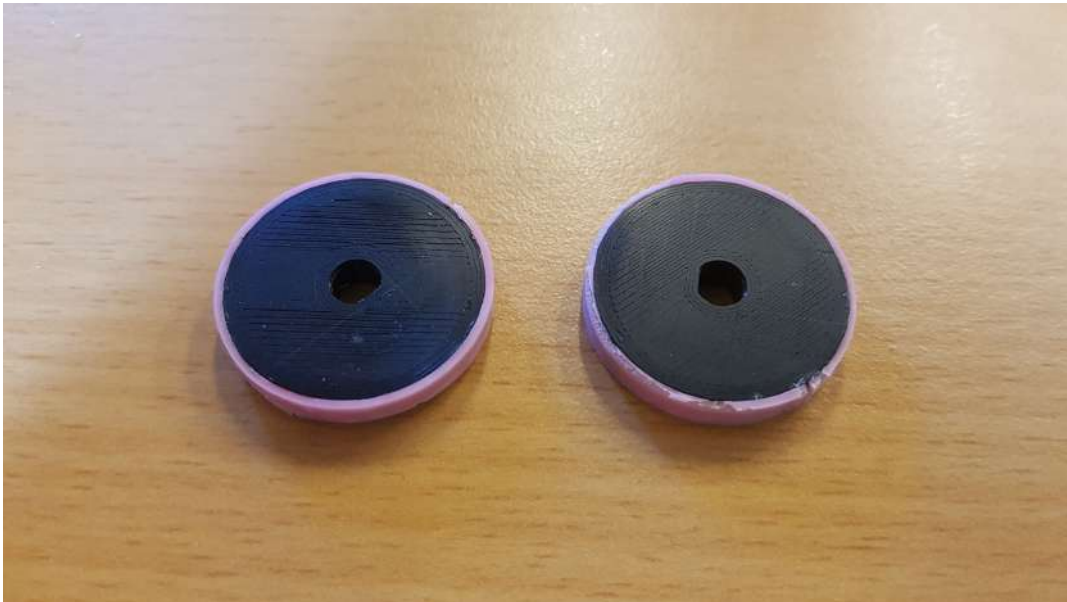


FIGURE 8.10 – Roue saine (à droite) et abîmée (à gauche)

La conséquence d'un tel changement apportait un mauvais entraînement et la cause la plus plausible est l'adhérence entre le tube et la roue. En effet, le tube est déroulé dans les plaques d'une longueur supérieure à ce qu'il est nécessaire pour ne pas considérer les possibles glissements. Dans ce cas, la section nominale arrive en butée avant que la roue

n'ait terminé sa rotation. Puisqu'il existe une très bonne adhérence entre les deux, la roue, vibre, et continue légèrement sa rotation en se dégradant progressivement à cause de la friction.

Ainsi, il a fallu changer la roue en cours d'opération toutefois, ce type de changement apporte une légère modification au niveau des paramètres dont l'impact peut avoir une conséquence sur l'efficacité du tubage.

### **3.5 Dégradation du tube**

Lorsqu'un tube circule dans la machine étirer où les canaux de la tête d'extrusion, il existe une légère dégradation de celui-ci sans réelle conséquence pour son utilisation. Néanmoins, chaque tube laisse des microfibrilles de PTFE dans les canaux et ceux-ci s'accumulent avec le temps. Avec le mouvement des tubes, ces microfibrilles se déplacent dans les cavités de la pièce et plus spécialement dans les ouvertures des capteurs. La conséquence d'un tel phénomène est l'apparition d'une mauvaise détection du tube où les fibres empêchent la transmission des rayons infrarouges.

Ce phénomène s'est présenté principalement sur le premier capteur où l'entrée du canal d'acheminement était mal imprimée et possède des arêtes trop vives pour la circulation du tube. Dans une version finale de la tête, il serait recommandé d'avoir des canaux les plus lisses possible même aux endroits moins critiques.

# Chapitre 9

## Liaison avec la machine à étirer

Le dernier point restant du cahier des charges est la liaison de la tête d'extrusion avec la machine à étirer. Cette liaison éviterait le placement manuel du tube en entrée du canal d'acheminement qui fait toujours défaut par la présence constante d'une personne physique.

La liaison aurait pu être un simple flexible légèrement plus large que le tube en PTFE entre la découpe de la machine à étirer et l'entrée du canal d'acheminement. Le système d'entraînement de la première machine aurait suffi à emmener le tube jusqu'à la détection du premier capteur et à lancer la rotation de la roue de la tête d'extrusion. Tant que le tube serait sur les deux systèmes d'entraînement, il aurait été nécessaire de synchroniser les vitesses tangentielles des différentes roues jusqu'au moment où le tube quitte la première machine.

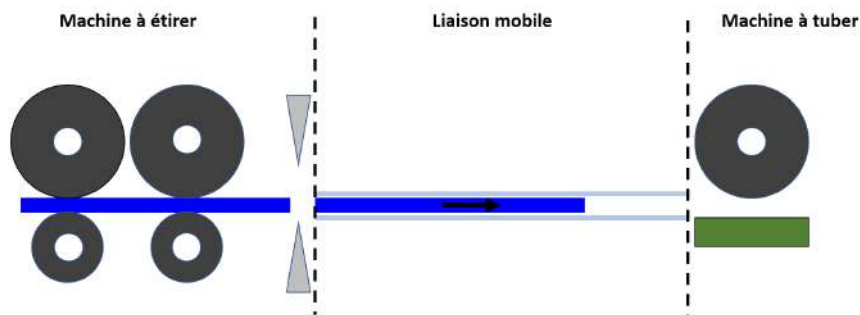


FIGURE 9.1 – Tube arrêté à mi-chemin sans pouvoir être entraîné

Cependant, cette implémentation n'aurait fonctionné que si le tube était assez long pour que celui-ci soit toujours déroulé par au moins un des deux systèmes. En effet, la liaison aurait eu une certaine longueur entre ses deux points d'attache et elle se devrait d'être mobile avec les déplacements de la tête. Si les machines étaient côte à côte, il aurait fallu une longueur d'au moins 50 cm. Par conséquent, si un tube était plus court que cette longueur, il aurait fini sa course dans la liaison avec aucun autre moyen de l'entraîner



comme présenté sur le schéma de la figure 9.1. Ainsi, cette solution restreint la longueur minimale du tube en PTFE dont la valeur avait été fixé à 20 cm précédemment.

On pourrait s’imaginer une succession de points d’entraînement le long de la liaison afin qu’il y ait toujours au moins un contact avec le tube. Toutefois, la liaison reste toujours mobile et les mécanismes d’entraînement sont trop complexes pour permettre leur mise en place sur un simple tube libre de se déplacer.

Ainsi, l’idée était venue de pousser un tube par un autre en implémentant une chaîne tant que celui de tête n’atteignait pas la roue d’entraînement. Pour ce faire, il est impératif que le tube de liaison soit plus grand que le diamètre nominal du tube, mais plus petit que deux fois le diamètre de la partie étirée. De cette manière, les extrémités ne se chevaucheront jamais. Dans le cas du tube classique, il fallait un diamètre entre 1.16 mm et 1.6 mm où la solution a été d’utiliser un autre tube en PTFE avec un diamètre interne de 1.34 mm. La figure 9.2 illustre l’implémentation ce flexible de liaison.

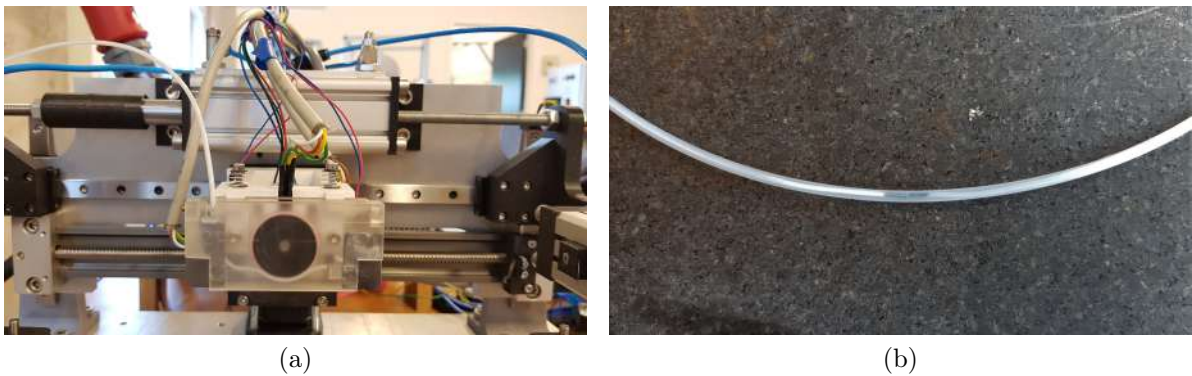


FIGURE 9.2 – Tube de liaison avec la poussée d’un tube sur un autre

Divers tests ont été réalisés en fonction du nombre de tubes dans la liaison et le constat est que la poussée nécessaire en amont augmente avec la quantité de tubes qui circulent. De plus, les différents rayons de courbure de la liaison rajoutent du frottement dépendant des déplacements de la machine. À partir de 4 tubes, il était difficile d’apporter un mouvement à la chaîne ce qui diminue la longueur minimale à 15-20 cm. Au-delà, il est possible que les extrémités se déforment et empêchent le bon passage du tube à travers une plaque.

Afin de pouvoir implémenter un tel système, un dernier mécanisme d’entraînement était nécessaire juste après la découpe du tube par la machine à étirer. La chaîne de tube est possible si seulement il n’y a aucun chevauchement dans tout le réseau et plus particulièrement au niveau du mécanisme d’entraînement où des larges espaces peuvent être présents aux alentours de la roue par exemple.



# Chapitre 10

## Perspectives d'améliorations

Le prototype a pu montrer un tubage quasi-complet d'une paire typique rencontrée dans l'assemblage d'une tête d'impression. Avant de pouvoir conclure ce travail, plusieurs points peuvent être encore améliorés dans le but que la machine soit complètement autonome. Quelques idées sont décrites dans ce chapitre dont l'implémentation n'a pas été réalisée par manque de temps ou nécessitait des changements trop importants sur la machine.

### 1 Assemblage

La machine a prouvé qu'il n'était pas impératif d'avoir une qualité d'assemblage élevée pour les fonctions à réaliser. Néanmoins, la machine à tuber reste majoritairement réaliser à l'aide de pièces imprimées qui n'apportent pas un alignement naturel de la tête par rapport aux plaques. Du bâti à la tête d'extrusion, les différents éléments peuvent être usinés ou, dans le cas de pièces complexes, fabriqués par d'autres procédés d'impression 3D.

### 2 Tête d'extrusion

La tête d'extrusion actuelle a été conçue de manière à rester la plus simple possible dans son fonctionnement et ainsi garder un volume compact de dimensions 80 X 35 x 10 mm. L'entraînement reste efficace, néanmoins, la précision en sortie des canaux n'était pas celle escomptée.

Afin de limiter les différentes courbures dans les canaux et donc, limiter les frottements, il est possible de placer le contact entre la roue et le tube plus bas que les sorties comme illustrées sur la figure 10.1. La présence de matières au niveau de la rangée inférieure ne poserait pas de soucis à une telle distance des plaques avec une géométrie aussi régulière. On pourrait s'imaginer aussi une lame d'une épaisseur de moins d'un millimètre et peu adhérente qui serait formée de telle sorte à rejoindre les deux faces latérales de la pièce. Dans une telle configuration, la largeur des canaux pourraient être réduit à 1.3 mm voire moins sur tout le long afin de limiter le plissement du tube au maximum.

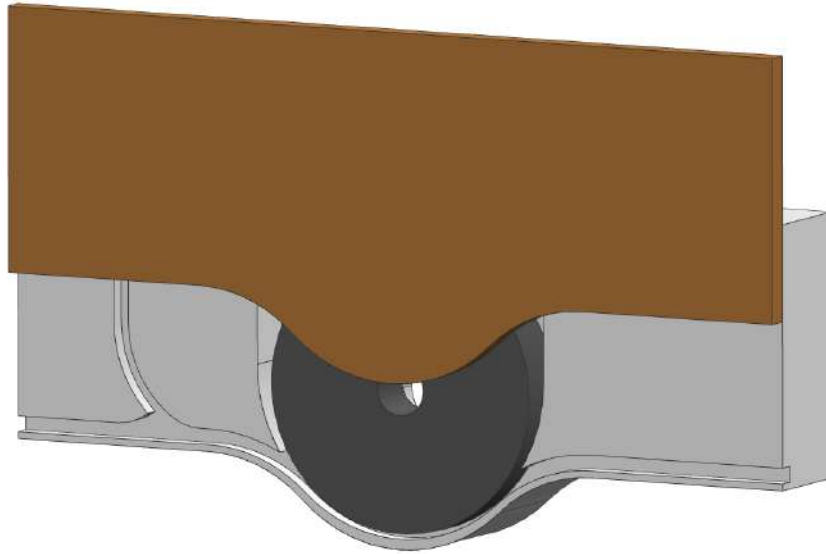


FIGURE 10.1 – Nouveau concept de la tête d'extrusion

Toutefois, cette nouvelle géométrie des canaux rendrait le tube d'autant plus libre en sortie puisqu'il ne serait plus naturellement poussé vers la surface inférieure du canal. L'hypothèse que le chanfrein présent sur chaque orifice des plaques à tuber suffise à contraindre le tube à traverser l'orifice a donné quelques ratés durant les différents tests. Néanmoins, la tête d'extrusion restait imprimée en PLA où la géométrie de la section est moins respectée que la pièce imprimée en résine. Ainsi, si la méthode de fabrication permet une précision de l'ordre du dixième, il serait encore possible de conserver le design actuel des canaux avec une largeur de sortie entre 1.2 et 1.3 mm.

Si un problème de précision persistait, la seule solution resterait le changement de géométrie de la sortie en fonction de la section du tube. L'idée était venue d'avoir un couvercle avec un mouvement vertical dont le contrôle serait assuré par le biais d'une vis sans fin ou d'une crémaillère (voir figure 10.1). Le bas du couvercle aurait une géométrie particulière afin de pouvoir s'adapter à la section du tube mais seulement sur les derniers millimètres des canaux avant les sorties comme illustrées sur la figure 10.2.



FIGURE 10.2 – Variation de la forme de la section en sortie de canal

La libération du tube serait d'autant plus aisée puisqu'il suffirait de translater le couvercle vers le haut afin d'ouvrir complètement le canal sans devoir imposer au tube de le soulever.

Il en est de même pour l'extraction du tube après avoir détecté un mauvais déroulement à travers une des plaques. En effet, la combinaison de canaux horizontaux et de la translation commandée du couvercle apporte aux tubes aucune contrainte et pourraient tomber par eux-même à l'aide de la gravité. Bien évidemment, la roue d'entraînement devrait de nouveau dérouler le tube au maximum.

Le problème reste la complexité du mécanisme à intégrer dans la tête sans gêner les autres éléments. Le contrôle de la hauteur est délicat et doit être réalisé sur quelques centaines de micromètres afin d'éviter de bloquer le tube et de le guider précisément. Un autre défaut potentiel est le contrôle simultané des deux sorties par un même couvercle. En effet, au moment du passage sur la seconde plaque, la sortie de gauche doit être réduite afin de guider l'extrémité. Cependant, sur celle de droite, la sortie doit laisser passer la section nominale du tube et donc, il n'est pas possible d'implémenter ce mécanisme à moins d'avoir une asymétrie au niveau des canaux avec l'un plus haut que l'autre.

### 3 Optimisation du temps

Il est clair que le temps consacré pour un tube peut être minimisé. Les différents mouvements de la tête pourraient être réalisés en parallèle dans certains cas tel que l'approche vers une plaque. Un fonctionnement en parallèle requiert une vitesse de calcul supérieure du processeur ou une bibliothèque plus optimisée comme **FastAccelStepper** [34]. Il existe aussi des modules indépendants permettant de générer une fréquence de pulsation eux même en évitant ainsi l'utilisation intensive du processeur de la carte.

Ainsi, des mouvements diagonaux pourraient être effectués dont l'avantage est une plus grande liberté sur les mouvements. De plus, ces nouveaux mouvements permettraient aussi d'approcher les plaques de façon à pousser les tubes de la rangée inférieure et celui serti précédemment comme illustré sur la figure 10.3. De cette manière, il ne serait plus possible d'avoir un autre tube qui gênerait le déroulement en se plaçant entre la tête et une plaque. La nouvelle séquence serait un déplacement selon Y dans un premier temps et puis un mouvement diagonal dans le plan XZ serait effectué.

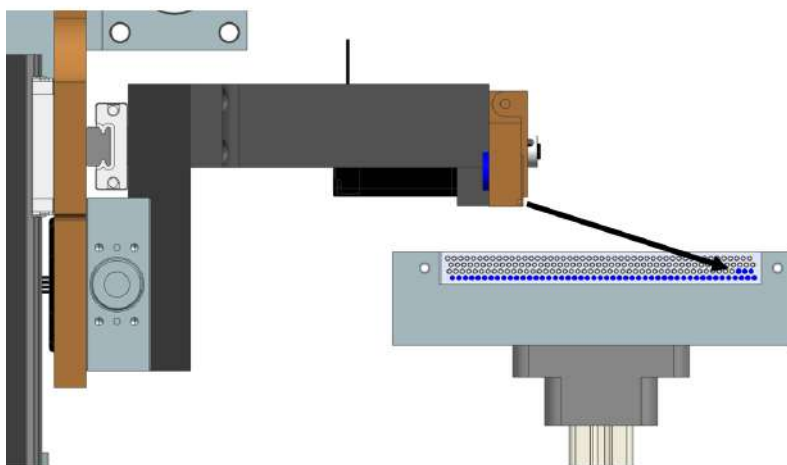


FIGURE 10.3 – Déplacement en diagonal de la tête

Au final, plusieurs autres opérations pourraient fonctionner en parallèle tels que l'éloignement de la tête pour la découpe pendant le sertissage ou bien le déroulement du tube pour le changement de direction en même temps que le mouvement vers l'orifice de la deuxième plaque sans phase d'arrêt.

La distance à parcourir pourrait être réduite en rapprochant les supports de plaques du centre. Ce rapprochement permettrait d'accepter des tubes plus courts puisqu'il est nécessaire que leur longueur soit légèrement plus grande que la distance entre deux plaques. Néanmoins, si la machine doit dérouler des tubes relativement longs entre deux plaques fort proches, il en résultera un placement chaotique du tube avec la présence de plusieurs boucles.

## 4 Communication avec l'extérieur

La machine à tuber et celle à étirer implémentent deux contrôles indépendants par l'intermédiaire de deux cartes différentes. Soit l'intégralité du contrôle reste sur une seule carte ou soit il y a une communication entre les deux machines. En effet, la machine à tuber restera toujours plus lente que la première et doit pouvoir indiquer le moment où un chargement de tube est attendu.

L'interface utilisateur permet de faire la communication entre la machine et le personnel sur la configuration ou sur l'état d'avancement du tubage. Dans le cadre de ce travail, l'interface est restée minimaliste à l'aide de trois boutons-poussoir et la communication série avec un ordinateur.



FIGURE 10.4 – Centralisation de la commande au niveau de l'interface de l'étireuse

À terme, il sera possible de choisir entre plusieurs paires de plaques en affichant un nom associé sur un écran LCD par exemple. Le cas idéal serait d'utiliser l'interface de la machine à étirer pour centraliser toutes les commandes avec le choix de la longueur de tube (voir figure 10.4). Le nombre de tubes à conditionner serait connu à l'avance par le type de paire à réaliser. L'arrêt prématuré et la pause des machines peut être ajoutés

si un imprévu se présentait durant leur fonctionnement ou tout simplement voulu par le personnel.

## 5 Modes de déplacement

Le mouvement selon l'axe X de la tête d'extrusion amène la majorité de la machine à se déplacer aussi selon ce même axe. Il est possible d'imposer uniquement le mouvement aux supports de plaques et de garder les montants du mouvement vertical fixes. L'avantage aussi d'une telle configuration est le mouvement des tubes pneumatiques et câbles électriques fortement réduit. Ainsi, on évite de déplacer sur de longues distances un amas de faisceaux à l'arrière de la machine.

Le mouvement selon l'axe Z est beaucoup trop lent, à cause, du pas de la vis. Une bonne configuration serait l'utilisation de deux moteurs en parallèle sur l'axe Z afin d'augmenter la vitesse tout en conservant une force de poussée suffisante. Ces moteurs seront placés à proximité des rails de guidages pour limiter au maximum le basculement de la plaque verticale autour de l'axe X.

## 6 Mécanisme de sertissage

Le mécanisme de sertissage reste abouti dans son fonctionnement où les pinces et les lames procurent une solution simple pour sertir de manière fiable les tubes. Le seul changement qui serait intéressant est le remplacement du vérin double effet central par deux vérins simple effet commandés indépendamment l'un de l'autre comme illustré sur la figure 10.5. Ainsi, une pince inactive ne serait plus à proximité d'une plaque en laissant davantage de liberté sur les mouvements de la machine.

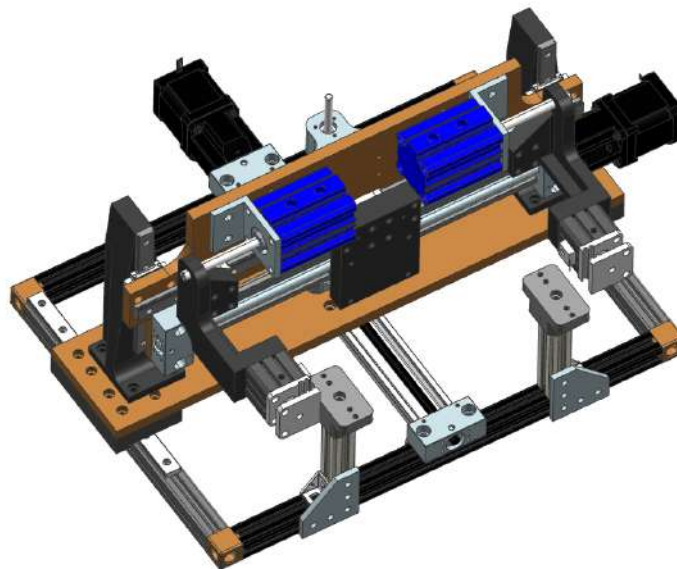


FIGURE 10.5 – Contrôle indépendant du mouvement latéral des pinces

## 7 Chargement du tube

Le chargement du tube reste délicat à réaliser avec une liaison aussi longue dont une certaine souplesse est requise pour considérer les mouvements de la tête. Comme nouveau système, il a été imaginé d'introduire un point de chargement du tube au niveau d'un support de plaque où la tête viendrait en contact afin d'aligner un nouveau canal d'acheminement. Celui-ci aurait son entrée légèrement au-dessus du canal de sortie qui permet d'avoir une géométrie moins restrictive spécialement au niveau de la jonction. Cette jonction pourrait posséder un clapet anti-retour en sachant que la mise en place d'un tel système serait délicate à réaliser.

La liaison entre les deux machines pourraient être réduite à 25 cm environ, néanmoins, il existe tout de même la présence des pinces de sertissage dont le positionnement vertical est solidaire à la tête. Par conséquent, il n'est pas possible d'avoir une liaison rectiligne et rigide, mais bien de nouveau souple qui reste, toutefois, plus courte que la solution précédente.

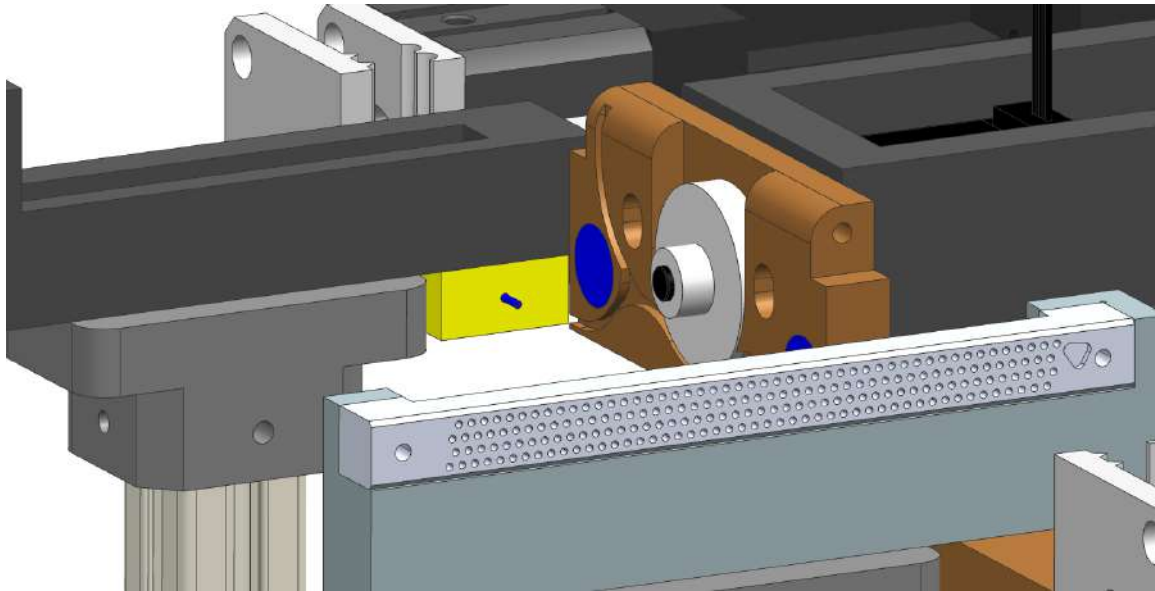


FIGURE 10.6 – Point de chargement possible du tube

Il est même envisageable de complètement abandonner le canal d'acheminement et de simplement garder les canaux horizontaux où le tube serait chargé par l'une des sorties. Néanmoins, il reste de nouveau le problème du contrôle de la géométrie des sorties. L'avantage est que la jonction entre les canaux ne serait plus présente et donc, les deux canaux de sorties seraient identiques où le tube ne serait plus susceptible de se plier.

## 8 Changements imposé par les tubes fins

Les tubes fins ont manqué de tests où la priorité était donnée à ceux présentés en début de conception. À l'avenir, les tubes fins remplaceront progressivement les premiers et donc il aurait fallu vérifier le comportement d'un tubage complet. Le problème reste l'étirement de ces tubes qui n'est pas propre et constant où la machine à étirer a du mal à les conditionner. La souplesse du tube pourrait être problématique d'où la nécessité d'éviter des



ouvertures trop grandes au niveau des canaux de la tête.

La détection du tube reste assez délicate dans le cas du diamètre externe de 0.65 mm. Il serait peut être possible de séparer le récepteur du transmetteur en plaçant l'un dans le bloc de la pièce et l'autre sur le couvercle. Le couvercle pourrait posséder une épaisseur plus importante sur son centre où les parties latérales resteraient assez fines. Le problème resterait l'acheminement des câbles sur le couvercle dont le mouvement vertical pourrait être gênant.

## 9 Conception finale de la machine à tuber

En parallèle de ce travail, la conception d'un modèle plus aboutie a été initiée par l'un des employés de l'équipe R&D, M. Florent Lempereur. Après avoir discuté ensemble sur les améliorations précédemment décrites, une nouvelle machine a vu le jour où la figure 10.7 présente le début de l'assemblage.

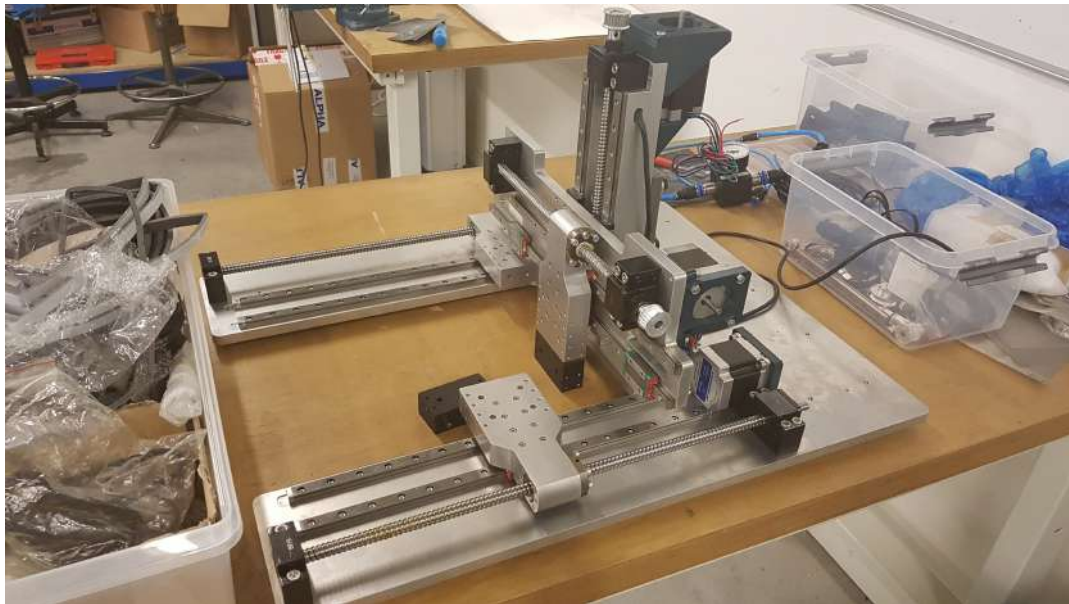


FIGURE 10.7 – Début du montage de la version finale de la machine

# Chapitre 11

## Conclusion

Le cadre de ce travail s'est articulé autour de la technologie innovante de tête d'impression sur lit de poudre de la société Aerosint. L'objectif était d'améliorer l'assemblage de leurs produits et plus particulièrement, le réseau pneumatique nécessaire à l'éjection des poudres. Ce réseau se compose de faisceaux de tubes sertis dans des plaques et les opérations nécessaires étaient réalisées manuellement où ceux-ci occupaient une ou plusieurs personnes sur plusieurs heures pour une seule tête d'impression. Ainsi, il a été demandé de développer un prototype fonctionnel sur la réalisation d'un tubage automatisée d'une paire de plaques donnée.

Dans un premier temps, les besoins de l'entreprise ont été étudiés afin de pouvoir dresser un cahier des charges sur les spécifications dont la machine devait présenter. Sur base d'un TFE antérieur, la conception a pu rapidement s'orienter sur des phases de tests sur base de plusieurs études sur les éléments structurels et mécanismes.

La tête d'extrusion permet un déroulement précis grâce à son nouveau système d'entraînement, compact et robuste basé sur le simple glissement du tube. Quant à l'éjection du tube, elle est simple à réaliser par la rotation libre d'un couvercle dépendant du mouvement de recul de la tête. L'opération reste indépendante de la longueur du tube entre les deux plaques et n'a jamais failli durant les différents essais.

Les déplacements de la tête d'extrusion se devaient d'être précis afin de se positionner en face des différents orifices des plaques. Ainsi, il a été décidé de conserver des rails linéaires à vis sur chacun des axes où le contrôle est assuré par des moteurs pas-à-pas. Le montage de la machine a été revisité afin de limiter le désalignement de la tête en respectant un montage correct des rails de guidages et en introduisant un nouveau bâti.

Un nouveau mécanisme de sertissage a été implémenté afin de pouvoir tirer de manière fiable le tube dans une quelconque situation. La préhension se base sur un vérin compact plus puissant que la solution précédente et accompagnée d'une lame de découpe qui apporte la robustesse du mécanisme afin de tirer un seul tube à la fois.

Des essais complets ont été réalisés où un taux proche de 95% de réussite sur le sertissage du tube a été observé en moyenne sur les deux plaques. Le principal défaut se produit sur la seconde plaque où un plissement du tube est visible dans la jonction entre deux canaux de la tête d'extrusion. Ce défaut se présente plus facilement sur une extré-

mité de moins de 900  $\mu\text{m}$  lorsqu'elle devient trop souple. L'hypothèse posée en début de conception présente tout de même des limites où le jeu en sortie des canaux reste assez élevé pour assurer à coup sûr le déroulement à travers une plaque, et ce, avec la présence d'un chanfrein.

Plusieurs améliorations ont été proposées dans le but de pallier les différents problèmes rencontrés tout au long de ce travail. De là, une future machine sera réalisée où sa liaison avec la machine à étirer permettra d'un tubage complet d'une paire donnée sans aucune intervention manuelle.

Au final, ce travail a été une source d'apprentissage des plus enrichissantes et passionnantes. La pluridisciplinarité du sujet a permis d'élargir mes connaissances sur différents points où il a été question de confronter une démarche jusque là académique à celle du monde de l'entreprise.

# Bibliographie

- [1] AEROSINT. *Selective Powder Deposition for powder bed fusion 3D printing*. Mai 2022. URL : <https://aerosint.com/selective-powder-deposition/>.
- [2] ACONITY3D. *Selective Powder Deposition for powder bed fusion 3D printing*. Mai 2022. URL : <https://aconity3d.com/products/aconity-midi-plus/>.
- [3] Fabien GUISSSEN. “Conception d’un système de tubage automatisé de séparateurs de faisceaux de tubes”. Mém. de mast. HelMo Gramme, 2021.
- [4] *PTFE tubing*. Mai 2022. URL : <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Specialty-Products/Tubing-and-Hose/PTFE-Tubing>.
- [5] *PTFE (Unfilled)*. Mai 2022. URL : <https://www.polytechindustrial.com/products/plastic-stock-shapes/ptfe-unfilled>.
- [6] *Friction - Friction Coefficients and Calculator*. Décembre 2021. URL : [https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html).
- [7] *Virgin PTFE - Detailed Technical Information*. Mai 2022. URL : <https://www.theplasticshop.co.uk/ptfe-technical-information.html>.
- [8] Pierre DUYSINX et AL. *Conception mécanique et usinage*. 2019.
- [9] A. MOKHA, Michael CONSTANTINO et Andrei REINHORN. *Teflon Bearings in Aseismic Base Isolation : Experimental Studies and Mathematical Modeling*. Rapp. tech. Jan. 1988.
- [10] Konstantine FETFATSIDIS et al. “Design of an apparatus for measuring tool/fabric and fabric/fabric friction of woven-fabric composites during the thermostamping process”. In : *International Journal of Material Forming* 6 (mars 2011). DOI : 10.1007/s12289-011-1058-3.
- [11] Sandip CHAUDHARI. “Wear Analysis of Polytetrafluoroethylene (PTFE) and it’s Composites under Wet Conditions”. In : *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 8 (jan. 2013), p. 07-18. DOI : 10.9790/1684-0820718.
- [12] *Acide polylactique*. Février 2022. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Acide\\_polylactique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Acide_polylactique).
- [13] *ST2818S1006-A - STEPPER MOTOR – NEMA 11*. Novembre 2021. URL : <https://en.nanotec.com/products/207-st2818s1006-a>.
- [14] *Supermagnete*. Février 2022. URL : [https://www.supermagnete.be/fre/?\\_gl=1\\*bfk623\\*\\_up\\*MQ..\\*\\_ga\\*MTM4NzQ2ODgyLjE2NTM3MzM3ODU.\\*\\_ga\\_43WDMW5ZQJ\\*MTY1MzczMzc4NC4xLjEuMTY1MzczMzgyMi4w&gclid=CjwKCAjw6dmSBhBkEiwA\\_W-EoGoNwQC\\_Tg4tlu6IqcmhbXBPvhKp73o08sSG\\_I-Z3yZ6QCGpPSHNaxoCR2wQAvD\\_BwE](https://www.supermagnete.be/fre/?_gl=1*bfk623*_up*MQ..*_ga*MTM4NzQ2ODgyLjE2NTM3MzM3ODU.*_ga_43WDMW5ZQJ*MTY1MzczMzc4NC4xLjEuMTY1MzczMzgyMi4w&gclid=CjwKCAjw6dmSBhBkEiwA_W-EoGoNwQC_Tg4tlu6IqcmhbXBPvhKp73o08sSG_I-Z3yZ6QCGpPSHNaxoCR2wQAvD_BwE).
- [15] *Guidage compacts Drylin®*. Novembre 2021. URL : <https://www.igus.be/drylin/profile-rail-guide>.

- 
- [16] linear motion TIPS. *Selective Powder Deposition for powder bed fusion 3D printing*. Jan. 2022. URL : <https://www.linearmotiontips.com/>.
  - [17] *L16-P Miniature Linear Actuator with Feedback 140mm 150 :1 12 volts*. Décembre 2021. URL : <https://www.actuonix.com/l16-140-150-12-p/>.
  - [18] *LSA – EXTERNAL LINEAR ACTUATORS*. Janvier 2022. URL : <https://en.nanotec.com/knowledge-base-article/external-linear-actuators>.
  - [19] *Flambage*. Mars 2022. URL : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Flambage>.
  - [20] *What are fixed and floating bearings in the context of linear motion ?d*. Avril 2022. URL : <https://www.linearmotiontips.com/what-are-fixed-and-floating-bearings-in-the-context-of-linear-motion/>.
  - [21] *Miniature Linear Guides/Wide Rails/Long Blocks/Light Preload*. Avril 2022. URL : <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/110302587140/?KWSearch=miniature%5C%20linear%5C%20guide&searchFlow=results2products>.
  - [22] *Motedis*. Janvier 2022. URL : <https://www.motedis.be/shop/index.php>.
  - [23] *Typical Coefficient of Friction Values for Common Materials*. Nov. 2021. URL : <https://mechguru.com/machine-design/typical-coefficient-of-friction-values-for-common-materials/>.
  - [24] *Arduino Store*. Janvier 2022. URL : <https://store.arduino.cc/>.
  - [25] EECA. *Capteur photoélectrique : un outil puissant et efficace*. Nov. 2021. URL : <https://www.eeca.eu/capteur-photoelectrique-un-outil-puissant-et-efficace/>.
  - [26] Benoît VANDERHEYDEN. *Electronique analogique*. 2019.
  - [27] *Three Methods to Filter Noisy Arduino Measurements*. Janvier 2022. URL : <https://www.megunolink.com/articles/coding/3-methods-filter-noisy-arduino-measurements/>.
  - [28] *attachInterrupt()*. Mars 2022. URL : <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/external-interrupts/attachinterrupt/>.
  - [29] *Arduino Timer Interrupts*. Mars 2022. URL : <https://www.instructables.com/Arduino-Timer-Interrupts/>.
  - [30] *Which endstops are most precise ?* Avril 2022. URL : <https://3dprinting.stackexchange.com/questions/1109/which-endstops-are-most-precise>.
  - [31] *Autoleveling on 3D printers : 9 myths and 12 sensors tested!* Février 2022. URL : [https://www.youtube.com/watch?v=il9bNwn66BY&ab\\_channel=ThomasSanladerer](https://www.youtube.com/watch?v=il9bNwn66BY&ab_channel=ThomasSanladerer).
  - [32] Olivier BRÜLS. *Advanced industrial robotics*. 2021.
  - [33] *AccelStepper*. Mai 2022. URL : <https://www.airspayce.com/mikem/arduino/AccelStepper/classAccelStepper.html>.
  - [34] *FastAccelSteppers*. Juin 2022. URL : <https://github.com/gin66/FastAccelStepper>.