



Université de Liège  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département d'Aérospatiale & Mécanique



# Automatisation d'un processus d'assemblage intégrant un robot collaboratif

Sous la direction du Professeur O. BRÜLS

Mémoire présenté par Corentin FELTEN  
en vue de l'obtention du grade de Master en ingénieur civil mécanicien

Année académique 2016-2017





Université de Liège  
Faculté des Sciences Appliquées  
Département d'Aérospatiale & Mécanique



# Automatisation d'un processus d'assemblage intégrant un robot collaboratif

Auteur :	Corentin FELTEN
Superviseur académique :	Oliver BRÜLS
Superviseur industriel :	Henri DECLoux
Membres du jury :	Davide RUFFONI Tristan GILET

Année académique 2016-2017

# Remerciements

Je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes ayant permis la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, je remercie la société Medi-Line pour son accueil durant ces 5 mois. Elle m'a donné l'opportunité de réaliser ce projet et a fourni équipements et conseils tout au long du projet. Je voudrais particulièrement remercier le directeur Monsieur Henri Decloux qui a partagé son espace de travail et son expérience avec moi ainsi que le responsable R&D Monsieur Patrick Merkens et l'ensemble du personnel du bureau de production ainsi que les autres départements de la société.

Je remercie également l'Université de Liège, ses professeurs, assistants et techniciens pour les différents enseignements qui ont jalonné ma formation et plus particulièrement mon maître de stage, le Professeur Olivier Brûls, qui m'a fait découvrir le domaine de la robotique et m'a accompagné dans l'élaboration de ce travail de fin d'études.

Merci également à Monsieur Arthur Lismonde et au laboratoire de mécanique pour leur disponibilité lors des différents tests sur les robots.

Enfin merci à mes proches, famille et amis, pour leur soutien et leur temps consacré à la relecture de ce travail.

# Résumé

## Contexte :

L'automatisation industrielle connaît une révolution depuis l'introduction des robots collaboratifs.

Ces robots sont capables de travailler directement avec les employés, leur programmation est rapide et intuitive, ils ne requièrent pas de gros investissements et sont accessibles aux petites entreprises.

La société Medi-Line, experte en dispositifs à usage médical, est une PME qui voit, dans ces robots collaboratifs, un moyen de renforcer le confort de ses employés.

## Réalisation :

L'objectif du projet est de concevoir un système automatisé intégrant le robot collaboratif qui assemblera un tube transparent et flexible avec deux connecteurs rigides.

Les grandes étapes du travail se composent de l'analyse fonctionnelle du besoin, du choix des différentes solutions techniques, du fonctionnement du système global, de l'analyse de risques et de la simulation 3D des trajectoires du robot.

## Résultats :

Le robot choisi est le YUMI de la société ABB. Ce robot à deux bras permet de travailler simultanément sur les tubes et les connecteurs, réduisant le temps de cycle.

Les bras sont munis d'effecteurs personnalisés. Plusieurs systèmes optiques sont utilisés pour le "pick and place" des connecteurs et pour le contrôle à 100% des pièces. Enfin, le dépôt est réalisé sur un peigne métallique qui permet à l'opérateur de récupérer le produit fini.

# Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Contexte et description du projet</b>	<b>9</b>
2.1	Le contexte : les cobots . . . . .	9
2.2	Le projet . . . . .	12
2.3	Les intervenants . . . . .	13
2.4	Méthodologie de résolution du problème . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Normes et sécurité</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>Analyse fonctionnelle</b>	<b>23</b>
4.1	Définition du besoin . . . . .	23
4.2	Environnement . . . . .	24
4.3	Faisabilité . . . . .	27
4.4	Fonctions de service . . . . .	29
4.5	Contraintes . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Solutions techniques</b>	<b>32</b>
5.1	Diagramme FAST . . . . .	32
5.2	Robot collaboratif . . . . .	35
5.3	Choix du type de préhenseur . . . . .	36
5.4	Gestion de l'arrivée du tube . . . . .	39
5.5	Détection des extrémités du tube . . . . .	45
5.6	Gestion de l'arrivée des connecteurs . . . . .	47
5.7	Réalisation de l'assemblage . . . . .	51
5.8	Contrôle de l'assemblage . . . . .	53
5.9	Dépôt des tubes assemblés . . . . .	54
5.10	Comptage du nombre de tubes conformes . . . . .	57

<b>6</b>	<b>Expérimentations</b>	<b>58</b>
6.1	Essais à l'Université de Liège . . . . .	58
6.2	Essais chez ABB . . . . .	60
6.3	Essais chez Médi-Line . . . . .	60
6.4	Essais chez les différents fournisseurs . . . . .	61
6.5	Plans de conception . . . . .	62
<b>7</b>	<b>Solution globale</b>	<b>63</b>
7.1	Récapitulatif des composants . . . . .	63
7.2	Étapes de fonctionnement . . . . .	64
7.3	Fonctionnement journalier . . . . .	67
7.4	Estimation du coût . . . . .	67
<b>8</b>	<b>Analyse de risques</b>	<b>69</b>
<b>9</b>	<b>Modélisation et trajectoire du robot</b>	<b>74</b>
9.1	Modélisation 3D . . . . .	74
9.2	Simulation des trajectoires . . . . .	75
<b>10</b>	<b>Conclusion</b>	<b>76</b>
<b>A</b>	<b>Annexes</b>	<b>81</b>

# Table des figures

1.1	Robot collaboratif . . . . .	6
2.1	Robots collaboratifs . . . . .	10
2.2	Comparaison du taux de chômage et du nombre de robots . . . . .	12
2.3	Tubes en silicone munis de connecteurs . . . . .	13
2.4	Médi-Line : Salle de production . . . . .	14
2.5	Robots utilisés à l'Université de Liège . . . . .	15
2.6	Méthode en cascade . . . . .	16
2.7	Méthodes agiles . . . . .	16
2.8	Méthode de résolution du problème . . . . .	18
3.1	Représentation des normes relatives à la sécurité . . . . .	20
3.2	Limites biomécaniques du corps humain . . . . .	21
4.1	Environnement du système . . . . .	24
4.2	Problèmes dus à l'adhérence du tube . . . . .	25
4.3	Machine à découper . . . . .	26
5.1	Robot YUMI de chez ABB . . . . .	35
5.2	Préhenseurs du Robot YUMI, ABB . . . . .	39
5.3	Coefficient de frottement en fonction du type de matériaux . . . . .	42
5.4	Buse pneumatique permettant d'aspirer le tube . . . . .	44
5.5	Illustration du choix pour la gestion des connecteurs (ici système Flexibowl)	51
6.1	Etude des configurations du tube lors de l'assemblage . . . . .	61
6.2	Essais réalisés par les fournisseurs . . . . .	62
9.1	Modélisation 3D des éléments de l'environnement du robot . . . . .	74
9.2	Modélisation des trajectoires effectuées par les bras du robot . . . . .	75

# Chapitre 1

## Introduction

De nos jours, un grand nombre de sociétés et notamment de PME refusent d'investir dans la robotisation. Elles sont conscientes que les robots industriels jouent un rôle indéniable dans nos entreprises modernes pour faire face à la concurrence. De plus, la robotique industrielle séduit par sa puissance, sa rapidité et son efficacité de production. Cependant, les coûts en termes d'étude, d'intégration et d'achat des robots industriels découragent rapidement ces petites sociétés qui se retranchent sur des méthodes de production pas ou peu automatisées.

Pourtant, une technologie abordable a vu le jour ces dernières années. Il s'agit de la robotique collaborative.

Ce travail de fin d'études est porté par l'entreprise Medi-Line, fournisseur en dispositifs à usage médicale. Il consiste à concevoir un système automatisé permettant de réaliser un assemblage. Le système développé a la particularité d'inclure un robot collaboratif, c'est-à-dire un robot capable d'évoluer dans le même espace de travail qu'un homme. Pour la société, la finalité du projet est de se familiariser avec cette nouvelle technologie et d'accroître le confort de ses employés.



FIGURE 1.1 – Robot collaboratif

Le chapitre 2 est consacré à l'explication du projet, son origine et son but. Conjointement, il fixe le cadre dans lequel s'est déroulée la conception. Il décrit les différents intervenants qui ont permis de développer le système final et fixe la stratégie adoptée pour résoudre le projet.

L'aspect de sécurité est un point important de la robotique collaborative. C'est pourquoi un résumé des normes de sécurité à respecter est établi dans le chapitre 3. Il a pour but de saisir l'ensemble des contraintes que l'entreprise devra prendre en compte suite à l'utilisation de ce type de robot.

Le chapitre 4 marque le début de la résolution du problème à proprement parler. La résolution commence par la description du besoin qui se doit d'être exhaustive, claire et non équivoque.

La seconde étape expliquera l'analyse fonctionnelle et traduira ce besoin en termes de fonctions à réaliser. Il est important que cette analyse fonctionnelle fasse abstraction de toute solution technique.

Suite à cette dernière, le cahier des charges fonctionnel sera, lui aussi, dressé et validé avec le client.

Pour chacune des fonctions, et des sous-fonctions le cas échéant, un examen des solutions techniques capables d'y répondre est effectué dans le chapitre 5. Elles sont ensuite comparées entre elles, et un choix est réalisé par un raisonnement logique et chiffré si nécessaire.

Afin de valider les choix effectués, plusieurs expériences ont été réalisées à l'Université de Liège, au sein de l'entreprise Médi-Line ainsi que chez différents fournisseurs. Ces différents essais sont résumés dans le chapitre 6.

L'étape suivante est la sélection de la solution globale. Une fois l'ensemble des solutions techniques choisi, le système est considéré dans sa globalité et une attention plus particulière est portée sur l'interaction, la communication et le contrôle des différents composants.

Un Grafset est dressé. Il permet d'illustrer de manière claire le fonctionnement du système.

La solution n'est cependant pas encore définitive. En effet, une analyse de risque est réalisée et va ajouter et/ou modifier des éléments du système. Cette étape permet de

diminuer la probabilité d'apparition d'une défaillance et/ou de diminuer l'impact de cette défaillance de manière à obtenir un risque global acceptable.

Enfin, la dernière étape se termine avec la modélisation du bloc de production. Une représentation en 3 dimensions des différents éléments est réalisée. Une fois le poste de travail reconstitué, les trajectoires des bras du robot sont simulées virtuellement. Cette modélisation est réalisée via deux logiciels : Catia qui permet de dessiner les composants dans l'espace et Robotstudio qui intègre ces éléments permettant de reconstituer les mouvements du robot et de récupérer un grand nombre de données de fonctionnement virtuel (signaux du robot, consommation, temps de cycle, etc.).

# Chapitre 2

## Contexte et description du projet

### 2.1 Le contexte : les cobots

Le projet porté par ce travail de fin d'études est le témoin d'une nouvelle progression dans le monde de l'industrie. Plus particulièrement, il est représentatif d'une évolution dans le monde de l'automatisation industrielle.

*Définition* Automatisation : l'étape d'un progrès technique où apparaissent des dispositifs techniques susceptibles de seconder l'homme, non seulement dans ses efforts musculaires, mais également dans son travail intellectuel de surveillance et de contrôle. [19]

L'automatisation s'est naturellement imposée pour les productions en grandes séries durant lesquelles le travail à réaliser est répétitif et où les temps de cycle sont primordiaux. Les grands volumes en jeu ont permis des investissements coûteux dans des systèmes à haute cadence. Ce type d'automatisation est peu flexible. La réalisation du produit est décomposée en une succession de tâches élémentaires qui sont chacune réalisée par un automate. Si le produit ou une des tâches sont modifiés, il convient d'adapter le système automatisé.

Cette solution va à l'encontre du besoin rencontré dans les petites sociétés dont les volumes de productions sont faibles et les variations de produits nombreuses.

Dans ce cas, il n'est pas possible de changer d'automate pour chaque modification de produit.

C'est suite à ce besoin de flexibilité à moindre coût des industries que le monde de la robotique a évolué ces dernières années, avec l'apparition de robots de petites dimensions

parmi lesquels les **robots collaboratifs** ou **cobots**.

**Définition** Cobot : de l'anglais "collaborative robot". Un robot collaboratif est un robot conçu pour travailler dans une zone commune avec l'opérateur en phase de production. Il intègre des fonctions de sécurité (sécurité intrinsèque, capteurs, caméras, ...) permettant de limiter, voire supprimer la mise en place d'enceinte grillagée et de fluidifier l'interaction homme-robot. [7]

Les cobots, tout comme les robots industriels classiques, permettent de réaliser la partie dangereuse, fatigante et/ou répétitive d'une tâche de manière à soulager le travailleur. Ils offrent également une meilleure gestion de la qualité du produit grâce à leur haute répétabilité lors de la réalisation d'une tâche.



FIGURE 2.1 – Robots collaboratifs  
[3]

Il y a plusieurs différences entre un robot industriel classique et un cobot. Premièrement, le coût d'investissement ; celui-ci est divisé par 10 entre un robot industriel et un cobot. Ensuite, la sécurité ; alors qu'un robot industriel évolue dans une zone fermée interdite de présence humaine, le cobot interagit avec l'homme sans le mettre en danger. Enfin, une différence importante réside dans sa valeur ajoutée. Là où le robot industriel est performant en termes de vitesse de production et de réduction des coûts, le cobot se démarque par sa flexibilité et sa capacité à coopérer avec l'employé pour augmenter son confort de travail. Il n'est généralement pas source d'une réduction des coûts ou du temps d'exécution des tâches.

L'automatisation des tâches est souvent mal perçue par le personnel qui considère le robot comme une concurrence déloyale. Et pour cause, un cobot est généralement amorti en moins de 3 ans. La crainte du remplacement de l'homme par le robot est donc bien réelle pour toute une série de postes facilement automatisables. La conséquence sur l'emploi total fait cependant débat.

Les pessimistes brandissent des chiffres alarmants sur la perte du nombre d'emplois due aux robots. [38] Selon ces derniers, les bas revenus sont principalement touchés, accentuant encore les écarts entre riches et pauvres. Une deuxième conséquence est la diminution du salaire moyen qui, par effet boule de neige, engendre un rétrécissement de la demande et accentue le besoin de licenciement. [40]

Les optimistes, de leur côté, tiennent un discours opposé. Selon eux, un cobot entre peu en concurrence avec l'employé. Le cobot n'est pas ou peu plus rapide qu'un humain ; c'est pourquoi il ne va remplacer ce dernier que pour les tâches où la répétabilité est un facteur primordial. Il sera cependant utilisé dans toute une série d'autres tâches pour accompagner le travail de l'employé en l'aidant à augmenter la qualité finale du produit tout en améliorant son confort de travail. Dans ce cas, le cobot s'apparente davantage à un outil intelligent qu'à un système remplaçant le travail de l'ouvrier (certains glossaires définissent d'ailleurs le cobot comme un robot qui ne remplace pas l'homme dans sa tâche). [41]

De plus, même en automatisation classique, les chiffres issus de l'industrie allemande nous montrent qu'en moyenne, investir dans des systèmes robotisés améliore la santé des entreprises. A court terme, une baisse du nombre d'employés est à prévoir. A moyen et à long terme en revanche, cette tendance s'inverse. Les sociétés s'agrandissent grâce à l'augmentation des bénéficiaires et de nouveaux postes apparaissent générant globalement une augmentation du nombre d'employés.

L'effet réel sur l'emploi se trouve entre les deux tendances. En premier lieu, il dépend de l'échelle à laquelle on se place. A quel niveau spatial ou structurel l'effet de l'automatisation est-il observé ? Parle-t-on des conséquences sur l'emploi au sein de PME, de multinationales ou au niveau planétaire ?

Et quels seraient les effets observés sur l'emploi en termes de durée ? Parle-t-on en mois, années, dizaines d'années, ou pour les générations futures ?

Que doit-on prendre en considération ? La diminution ou l'augmentation du nombre d'emplois, l'augmentation de valeur ajoutée, ou encore le bien-être des employés ? [27]

Ainsi, en se projetant à long terme, d'autres facteurs tels que la maintenance, les enjeux économiques, sociaux et politiques viendront influencer les conséquences de l'utilisation de robots. Tous ces éléments diminuent la pertinence de la prévision.

Le futur est déjà bien tracé avec le développement de l'industrie dite 4.0. Dans ce contexte, la place des cobots ne fait aucun doute. Les robots collaboratifs ont l'avantage de permettre une collecte systématique des données de production. Ainsi, la numérisation de l'industrie permettra une meilleure adaptabilité des entreprises, une gestion de production

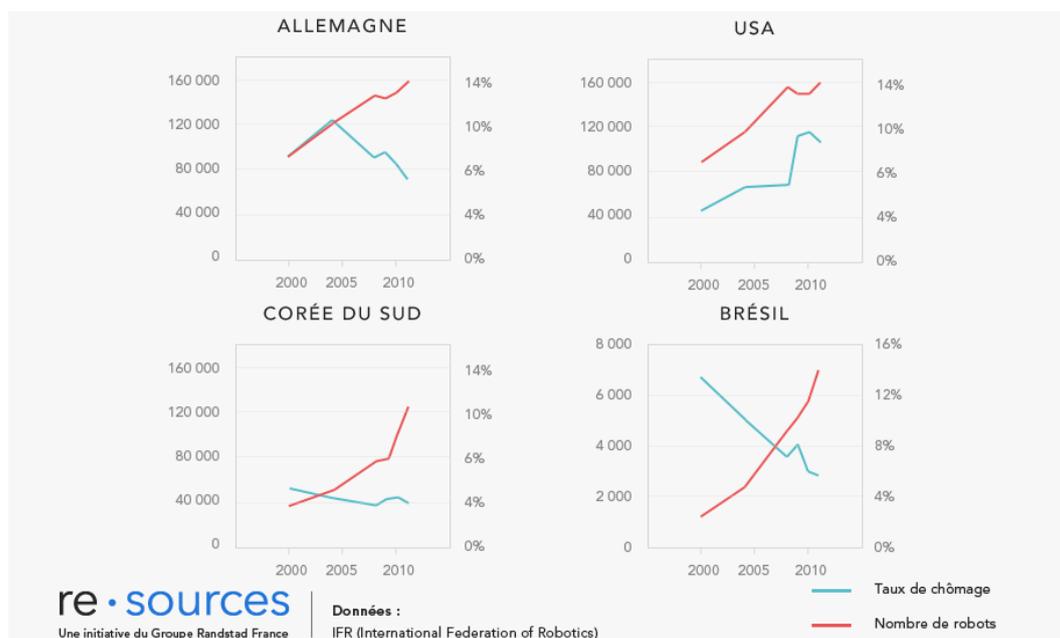


FIGURE 2.2 – Comparaison du taux de chômage et du nombre de robots [33]

et d'allocation de ressources facilitée, une capacité d'autodiagnostic... [25] Selon certains experts, l'automatisation suit un comportement analogue à celui de l'informatique. Au départ uniquement disponible par des investissements coûteux dans les grosses entreprises, le matériel informatique a diminué en taille et en prix pour passer petit à petit vers une utilisation par les particuliers. De manière analogue, les cobots sont un pas supplémentaire vers la production flexible en volumes réduits avec une programmation simplifiée qui permet une utilisation requérant de moins en moins d'expertises dans le domaine. [37]

## 2.2 Le projet

C'est dans l'optique de s'adapter aux changements qui s'annoncent dans les méthodes de production que le projet porté par la société Medi-Line est né.

Le but de cette entreprise est de se familiariser avec une technologie qui est en adéquation avec ses faibles volumes de production d'une part, et sa grande flexibilité d'autre part. C'est pourquoi, elle a profité de l'opportunité générée par ce travail de fin d'études pour s'essayer à l'utilisation d'un cobot, à la communication avec celui-ci et à l'intégration de la vision (capteur de vision et caméra) dans un processus. La vision est déjà utilisée au sein de l'entreprise mais uniquement pour des opérations de contrôle, jamais directement dans la chaîne de production. L'intérêt du travail de fin d'études a également comme objectif d'apporter un regard neuf au sein de la société, neutre par rapport aux solutions techniques habituellement utilisées par l'entreprise.

Les consignes du projet sont simples : automatiser une opération de production qui consiste à prendre un tube en silicone et à y fixer deux connecteurs en polypropylène.



FIGURE 2.3 – Tubes en silicone munis de connecteurs  
[30]

Les tubes sont de trois longueurs : 120, 140 et 420 mm. Leur diamètre extérieur est de 3 mm et leur diamètre intérieur de 1 ou de 1,5mm.

Les connecteurs sont des pièces régulièrement utilisées dans l'industrie médicale ; ils permettent de fixer hermétiquement différents types d'appareils et de seringues sur des tubes.A

Cette opération d'assemblage tube-connecteurs est actuellement réalisée manuellement par des opérateurs. Elle présente deux inconvénients majeurs.

- C'est une tâche répétitive qui exige de la concentration.
- L'assemblage entraîne des douleurs au niveau des doigts des opérateurs après quelques heures de travail.

## 2.3 Les intervenants

**La société Medi-Line** L'histoire de la société Medi-Line démarre en 1994 avec la conception et la fabrication de matériel médical à usage unique.

Rapidement, le sérieux de l'entreprise séduit et, en 2006, la société décide d'investir dans une infrastructure moderne au Liège Science Park. Ce bâtiment possède 600 mètres<sup>2</sup> d'espace de production et a l'avantage de contenir 2 niveaux de salle blanche (ISO 7 et ISO 8).

Six ans plus tard, le bâtiment s'agrandit pour supporter l'augmentation du personnel.

A l'heure actuelle, les infrastructures sont à nouveau à leur limite de capacité. Le chiffre d'affaire de la société continue de croître, tout comme la demande en produits. Medi-Line est reconnue internationalement pour ses dispositifs médicaux, grâce à son niveau de ser-

vice excellent et son haut degré de formation du personnel.



FIGURE 2.4 – Médi-Line : Salle de production

Leur expertise concerne la production de dispositifs à usage médical. Leurs produits phares sont : [30]

- Le dispositif TOM-Sling  
Développé en partenariat avec le service d'urologie du CHU de Liège et l'Université de Liège, ce dispositif est utilisé pour le traitement de l'incontinence urinaire chez l'homme après une prostatectomie radicale. Le Tom-Sling connaît un succès européen depuis sa mise sur le marché en mai 2014.
- La gamme TVT  
Produit utilisé pour le traitement de l'incontinence urinaire féminine pour le compte d'Ethicon Gynecare.
- Les cassettes Fastlab  
Assemblage de matériel médical utilisé en radio pharmacie pour la réalisation de différents types d'imageries médicales dont le client principal est l'entreprise GE Healthcare.
- Les carpules pour la radio-pharmacie  
Il s'agit d'un système de conditionnement spécifique qui permet à une carpule de contenir une dose individuelle de substances radio-pharmaceutiques. Produit réalisé pour la société TRASIS.
- Les petites séries  
Medi-Line réalise aussi toute une panoplie de produits principalement par assemblage, injection et extrusion de polymère réalisés en salle blanche au sein de l'entre-

prise.

**L'université de Liège** L'université de Liège est intervenue dans ce travail de fin d'études à plusieurs niveaux :

- Un apport en ressources matérielles a été fourni par le département d'aérospatiale et de mécanique. Le robot de la marque ABB IR120, de même que le robot Sawyer de la firme Rethink robotics ont été prêtés à de nombreuses reprises pour permettre différents tests concernant le choix des solutions techniques.
- Différents professeurs et assistants de la faculté ont prodigué conseils et expertise, en particulier grâce à des connaissances approfondies dans le domaine de la robotique.
- L'université a également permis un apport en ressources bibliographiques, aussi bien par des documents papiers que numériques.

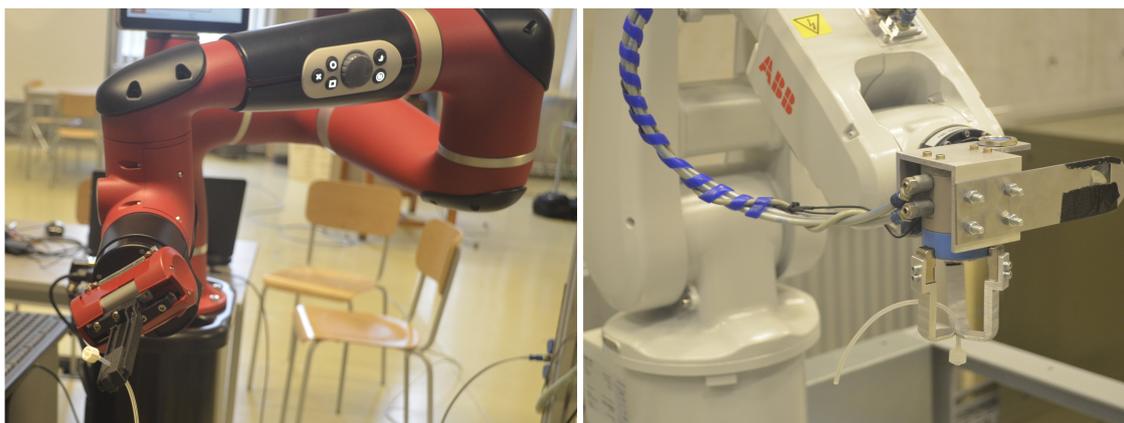


FIGURE 2.5 – Robots utilisés à l'Université de Liège

## 2.4 Méthodologie de résolution du problème

Il existe une panoplie de stratégies pour la résolution de problème de conception. Ces méthodes se distinguent d'après les relations entre client et concepteur, l'importance du projet, la nécessité de réaliser du prototypage ou non, le type de ressources utilisées, l'environnement... Voici, ci-dessous, les principales stratégies envisagées :

- La méthode en cascade  
Cette méthode consiste à réaliser la conception d'un projet étape par étape. Chaque phase ne peut être effectuée que lorsque la précédente est réalisée. Les avantages de cette méthode sont d'abord sa simplicité : décomposer le problème est intuitif et

permet de planifier la résolution du projet. Cette méthode permet de visualiser facilement l'ensemble de la tâche. Cette stratégie est avantageuse lorsque les ressources nécessaires augmentent au fur et à mesure que le projet avance. [39]

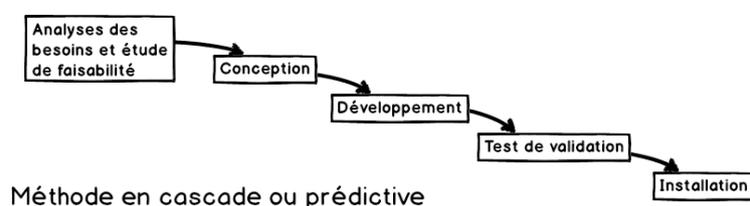


FIGURE 2.6 – Méthode en cascade

– Le cycle en V

Cette technique a été mise au point sur base de la méthode en cascade de façon à permettre une plus grande souplesse par un retour plus aisé en cas d'erreur dans la conception ou d'éléments nouveaux. Elle se compose d'une phase descendante également présente dans la méthode en cascade et d'une phase montante qui permet de renvoyer l'information concernant d'éventuels défauts ou anomalies. [24]

– Méthodes agiles (ou cycle semi-itératif) [14]

Ces méthodes fonctionnent sur le principe de développement itératif. Le projet est décomposé en petits projets définis avec le client appelés itérations. Le principe est de supposer que de nouveaux éléments risquent d'apparaître durant le projet. Plutôt que de planifier l'ensemble du projet, chaque itération est réalisée l'une après l'autre, ce qui permet de s'adapter aux imprévus.

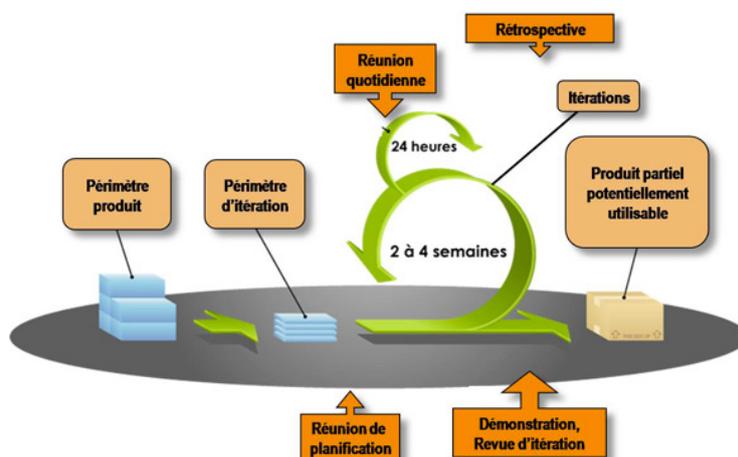


FIGURE 2.7 – Méthodes agiles

– Cycle en spirale

Il consiste à réaliser plusieurs boucles de méthode en V de manière à obtenir une

conception de plus en plus précise, adaptée et complète. Une phase d'analyse de risque est ajoutée pour empêcher une régression de la conception au cycle suivant. [42]

– Cycle itératif

Cette méthode est composée de 6 étapes : le besoin qui initialise la méthode, le déploiement qui l'arrête et les 4 étapes du cycle, à savoir la spécification, le développement, la validation et l'évaluation. Une étape du cycle ne dure jamais plus de 8 semaines, ce qui permet d'avoir rapidement un aperçu du produit final. Le nombre de cycles, par contre, n'est pas limité et continue jusqu'à ce que le produit corresponde aux besoins du client. A nouveau, cette technique a été créée pour permettre d'obtenir rapidement des informations susceptibles d'apparaître en fin de conception. Cependant, même pour une ébauche de conception, il faut aller jusqu'au bout développement. Cela implique des coûts. C'est pourquoi cette méthode est largement utilisée dans le développement de logiciel qui ne nécessite pas ou peu d'achats importants. [13]

– Cycle en Y

Cette technique fonctionne sur la dissociation des parties technique et fonctionnelle. Ces deux branches fusionnent lors de la phase de réalisation. [16]

– Méthode X, l'Idef0, la méthode TRIZ, L'ontologie de conception (FBS), méthode d'Ashby, etc.

Ces méthodes sont plus complexes. Elles s'inspirent des stratégies de base et les améliorent pour s'adapter à leur contexte d'utilisation. Elles sont fréquemment utilisées pour le développement de logiciels. [28]

Le temps pour réaliser la conception est court, les méthodes en cycles prennent trop de temps à se mettre en place et ne conviennent pas à ce projet. Les différentes fonctions sont interdépendantes ; réaliser entièrement des parties du système n'est pas faisable. Les méthodes qui scindent le projet en sous-projets sont donc rejetées. De plus, seule la conception théorique doit être effectuée, ce qui élimine une grande partie des stratégies. Enfin, certaines méthodes exigent des équipes allant d'une poignée de personnes jusqu'à une société au complet. Ces méthodes ne sont pas applicables à une conception par un concepteur unique.

Il reste la méthode en V ou en cascade. L'avantage qu'il faut exploiter est l'interaction régulière avec le client. Cette interaction n'apparaît dans aucune des deux méthodes. Pour en profiter, la stratégie utilisée sera une méthode traditionnelle en cascade améliorée. Voici son schéma de résolution :

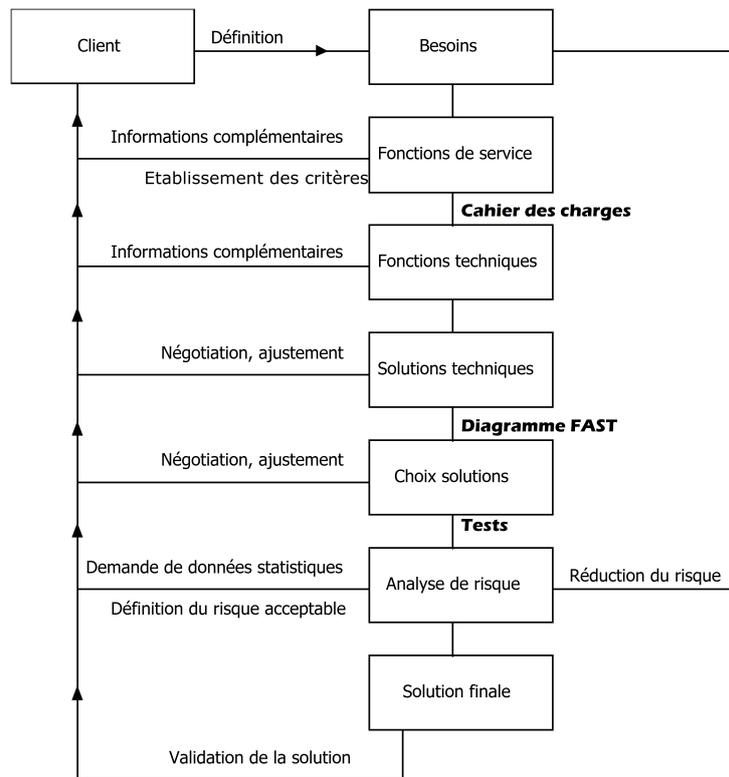


FIGURE 2.8 – Méthode de résolution du problème

# Chapitre 3

## Sécurité et normes pour la collaboration homme robot

L'industrie a libéré petit à petit les robots de leur cage. Jadis entièrement enfermés, certains systèmes ont d'abord remplacé la barrière physique par des capteurs de zones permettant aux robots de ralentir ou de s'arrêter selon la zone dans laquelle l'ouvrier est détecté. Désormais, les robots collaboratifs se détachent de ces mesures pour permettre un fonctionnement en synergie avec l'homme. Ils permettent un contact direct entre l'utilisateur et la machine. Il devient possible d'exploiter au mieux les compétences des deux parties.

La définition même du cobot le décrit par son interaction avec l'homme et le partage du même espace de travail. Il est donc évident que des règles se mettent en place pour garantir la sécurité des employés.

Différentes lois et normes sont consultables concernant les robots collaboratifs. Tout d'abord, que l'on parle d'un robot classique ou d'un robot collaboratif, l'acte juridique européen en vigueur est la Directive "Machines" 2006/42/CE. Elle succède à la Directive machine de 1989 et est entrée en application fin décembre 2009. Elle a pour but de définir des exigences en matière de santé et de sécurité communes à toute l'Europe. Elle vise également à harmoniser le droit au sein des Etats membres et tend à faciliter la libre circulation au sein de l'Union Européenne.

Il existe également deux normes ISO (normes ISO 10218-1 et 10218-2) qui sont équivalentes à la Directive européenne. Elles donnent "présomption de conformité" mais c'est bien la Directive "Machines 2006/42/CE" qui fait foi en matière juridique.

Les robots collaboratifs sont spécifiquement mentionnés dans la Directive. Elle impose, d'une part, des limites concernant les forces de contact et, d'autre part, une limite



FIGURE 3.1 – Représentation des normes relatives à la sécurité [11]

en termes d'énergie d'impact définie par l'INRS ED 6122.

**Définition** INRS : L'Institut national de recherche et de sécurité est une association sans but lucratif qui a pour but la prévention des maladies professionnelles et des accidents du travail. Elle offre des méthodes pour l'appréciation et la réduction des risques. [8]

Contrairement à ce qui se laisse entendre, il n'y a pas de limitation de la vitesse imposée au robot. Les constructeurs ont donc la liberté de jouer sur la surface de contact et les masses en mouvement pour définir la vitesse maximale du robot. Ainsi, les robots collaboratifs les plus rapides sont très légers et possèdent une peau souple permettant d'augmenter la surface de contact en cas de collision. Les arêtes vives sont éliminées et le robot présente un design tout en rondeur.

Le robot choisi respecte déjà ces normes. Mais la manière de l'utiliser peut engendrer de nouveaux risques. C'est pourquoi une analyse de risque est un élément indispensable à réaliser une fois la solution technique déterminée.

Un élément à consulter par l'entreprise est le *Code de la propriété intellectuelle* qui rassemble les articles relatifs aux droits d'auteur et à leurs exploitations.

Les règles peuvent se compliquer légèrement dans le cas où on parle de la création par un robot intelligent ou d'une création par collaboration entre un robot et un humain.

ISO/TS 15066:2016(E)

Table A.2 — Biomechanical limits

Body region	Specific body area		Quasi-static contact		Transient contact	
			Maximum permissible pressure <sup>a</sup> $P_S$ N/cm <sup>2</sup>	Maximum permissible force <sup>b</sup> N	Maximum permissible pressure multiplier <sup>c</sup> $P_T$	Maximum permissible force multiplier <sup>c</sup> $F_T$
Skull and forehead <sup>d</sup>	1	Middle of forehead	130	130	not applicable	not applicable
	2	Temple	110		not applicable	
Face <sup>d</sup>	3	Masticatory muscle	110	65	not applicable	not applicable
Neck	4	Neck muscle	140	150	2	2
	5	Seventh neck muscle	210		2	
Back and shoulders	6	Shoulder joint	160	210	2	2
	7	Fifth lumbar vertebra	210		2	2
Chest	8	Sternum	120	140	2	2
	9	Pectoral muscle	170		2	
Abdomen	10	Abdominal muscle	140	110	2	2
Pelvis	11	Pelvic bone	210	180	2	2

FIGURE 3.2 – Limites biomécaniques du corps humain [9]

Dans ce dernier cas, la jurisprudence a affirmé que "une oeuvre de l'esprit même créée à partir d'un système informatique peut bénéficier des règles protégeant les droits d'auteur, à condition qu'elle laisse apparaître même de façon minime l'originalité qu'a voulu apporter son concepteur". [1] Un robot seul ne possède pas de personnalité juridique. Or, la loi prévoit qu'en l'absence de preuve d'une personnalité et donc de l'existence d'une conscience chez l'être artificiel, aucun droit d'auteur ne peut être réclamé même en cas d'oeuvre jugée exemplaire. [32]

Les droits d'auteur peuvent également s'appliquer sur l'ensemble des bases de données collectées par le robot. Ce droit est régi par la Directive 96/9 du 11 mars 1996. Le code de la propriété intellectuelle traite également de tout ce qui est brevet en robotique. Un traitement juridique différent est appliqué entre la partie software et hardware du robot.

Le système conçu devra répondre au *Code sur le Bien-être au Travail*. Code qui rassemble toute une série de documents et d'arrêtés royaux. En font notamment partie les transpositions de la Directive Européenne sociale 89/655/CEE "concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé pour l'utilisation par les travailleurs au travail

d'équipements de travail" (AR du 12 août 1993). La Directive machine est également transposée dans le Code du travail par le décret n°2008-116 du 7 novembre 2008, relatif aux équipements de travail et aux équipements de protection individuelle.

# Chapitre 4

## Analyse fonctionnelle

### 4.1 Définition du besoin

L'étape cruciale de la conception est aussi la première : définir le besoin. Plusieurs entretiens et observations sur le terrain ont permis de récolter et d'interpréter les informations provenant du client. Le besoin du client a, de cette façon, pu être déterminé précisément.

Il débouche sur la construction du cahier des charges fonctionnel qui peut s'interpréter comme le contrat qui lie le client au développeur. Dans le contexte de ce projet, le client n'est pas totalement dissocié du développeur puisqu'il y a une constante interaction entre les deux parties durant la totalité du temps de conception. De ce fait, le cahier des charges est un point moins crucial puisqu'une validation de la part du client est réalisée au fil du développement du système.

Pour définir un besoin, tout commence avec cette faculté primordiale qu'est l'écoute. L'écoute est fondamentale et se distingue de la compréhension par une absence totale d'interprétation. Cette étape consiste à de la retranscription pure. Elle est plus difficile à réaliser qu'il n'y paraît et indispensable pour limiter les erreurs de traduction de l'information. Une fois l'ensemble des éléments verbaux, croquis et écrits retranscrits, la difficulté est de déceler les besoins non définis explicitement. Il peut s'agir de sous-entendus, de besoins non exprimés ou inhérents à d'autres exigences mentionnées.

Seul un client (Medi-Line) interagit avec un concepteur (l'étudiant). Cette situation est idéale. En effet, elle limite la chaîne de traduction à un seul maillon. Les risques d'erreur d'interprétation sont limités aux échanges entre les deux parties. De plus, le concepteur étant seul, il possède une vue globale de l'entièreté du projet. L'obtention d'un retour de la part du client sur la compréhension du besoin est également facilitée. La transcription du besoin a donc toute les chances d'être réalisée de manière concrète, factuelle et fidèle.

Cependant, le faible nombre d'intervenants représente également un danger. En effet, le concepteur aura plus de difficultés à repérer l'influence des solutions techniques imaginées par le client sur l'expression qu'il donne du besoin. Il convient donc de rester prudent en prenant du recul par rapport aux différents échanges avec le client.

Résoudre le mauvais problème est l'erreur la plus dangereuse à ce stade de la conception. Une compréhension exacte à 100 % n'est possible que dans les cas triviaux. Des erreurs sont donc inévitables. Afin d'empêcher leur propagation, la traduction du besoin en termes de fonctions de service, sera suivie d'une vérification et d'une validation par le client, ou à défaut d'une correction, avant d'avancer dans la réalisation du projet.

## 4.2 Environnement

Le besoin s'exprime à différents niveaux, celui de l'utilisateur, des produits, des composants...

Il y a, d'une part, l'ensemble des éléments qui compose le système et, d'autre part, les parties qui entrent en interaction avec celui-ci. Différents éléments extérieurs au système vont l'influencer en lui imposant toute une série de contraintes auxquelles il devra se plier. Ces éléments sont appelés l'**environnement** du système.

Les entrées du système en font bien entendu parties. Il s'agit des tubes en silicone et des connecteurs en polypropylène. L'environnement est représenté dans le diagramme suivant :

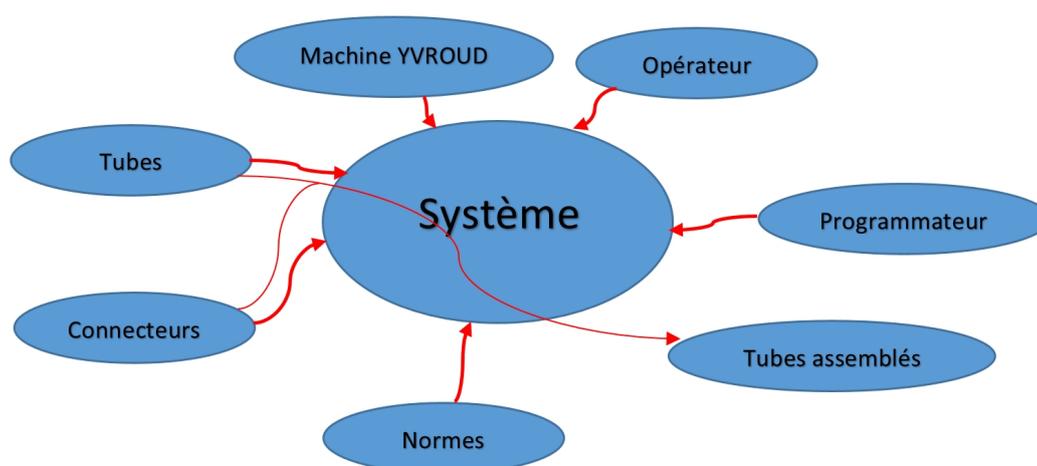


FIGURE 4.1 – Environnement du système

**Les tubes** sont réalisés en silicone médical de haut niveau de pureté catalysé au platine. La catalysation au platine permet de ne pas avoir de peroxyde résiduel relargué.

Le silicone est plus stable; il présente un taux de composés organiques volatiles très faible et il est compatible avec l'industrie agroalimentaire, médicale et pharmaceutique. Ces propriétés sont idéales du point de vue de la santé. En revanche, les différentes observations en salle blanche ont permis de souligner le caractère capricieux de ce matériau du point de vue mécanique. Il possède un grand coefficient de frottement, ce qui lui permet d'adhérer facilement aux surfaces avec lesquelles il rentre en contact. Cela pose notamment des problèmes au niveau du déroulage en amont du système, puisque la tension dans la bobine varie fortement en fonction de la force d'adhésion générée par le tube de silicone non découpé.



FIGURE 4.2 – Problèmes dus à l'adhérence du tube

Le problème majeur est que cela pose des soucis en sortie de la machine à découper puisque les tubes peuvent rester collés entre eux (bien que la découpe soit parfaitement réalisée), ou adhérer aux parois en sortie et former un bouchon. Une autre particularité est leur fort potentiel à se charger en électricité statique. Ce phénomène rend les tubes extrêmement attractifs aux poussières et autres particules indésirables. Chaque tube est de ce fait nettoyé avant emballage dans la suite de la production.

Une autre caractéristique est sa grande flexibilité qui permet la création d'une force de rappel importante si le tube est étiré. L'ensemble de ces propriétés fait que les tubes de silicone sont sensibles à manipuler et que leur comportement est difficile à prévoir dans une chaîne de production. Les tubes de silicone arrivent un à un depuis la machine à découper grâce à un guide.

La deuxième entrée est moins capricieuse à manipuler. Il s'agit **des connecteurs** en polypropylène. Ils présentent une excroissance à l'avant qui leur permet de s'insérer à l'intérieur des tubes. Cette excroissance présente un cône qui permet de maintenir le contact et de garantir l'herméticité. L'arrière de chaque connecteur, est muni d'un pas de vis qui lui permet d'être fixé à différentes seringues et autres appareils médicaux. Leurs dimensions sont toujours identiques (plans disponibles en annexe). La seule variable est la couleur. Les connecteurs sont translucides dans la majorité des cas mais peuvent potentiellement être blancs. Ils sont doublement emballés comme l'exigent les normes de salle

blanche et sont disponibles en vrac par sachet de 1000. C'est un opérateur qui, à l'aide de gants, manipule les sachets.

Un autre élément de l'environnement, déjà mentionné, est **la machine à découper**. Cette machine entraîne un tube en silicone selon une vitesse définie par un opérateur en début de production et coupe le tube au fur et à mesure. Pour garantir la bonne longueur, le tube est entraîné par deux tapis roulants. Ces deux tapis agissent de part et d'autre du tube pour le faire avancer en évitant de l'allonger. Un guide de 5mm de long est présent avant et après la lame de manière à garantir le bon positionnement du tube durant la découpe. C'est la vitesse des deux tapis qui détermine la longueur des tubes. Lorsque que les tapis s'arrêtent, la lame descend puis remonte et les tapis se remettent en marche. Le tube n'est pas manipulé en sortie de découpe et tombe dans le vide.

Lors de l'assemblage manuel, la vitesse de découpe a été fixée à 13 secondes par tube. Il est souhaité que cette vitesse ne soit pas diminuée et il est préférable que le temps de cycle soit inférieur à ces 13 secondes. La vitesse maximale théorique de découpe est de 130 mm/s, soit plus ou moins 10 tubes par seconde pour les petits tubes. Notons que cette vitesse n'a jamais été testée et ne doit pas être atteinte. La demande du client est "d'atteindre un temps d'assemblage par tube égal ou inférieur à 13 secondes". Cette machine a été fabriquée sur mesure, les plans sont disponibles en fin de document A. La sortie du tube est partiellement encombrée par couloir.

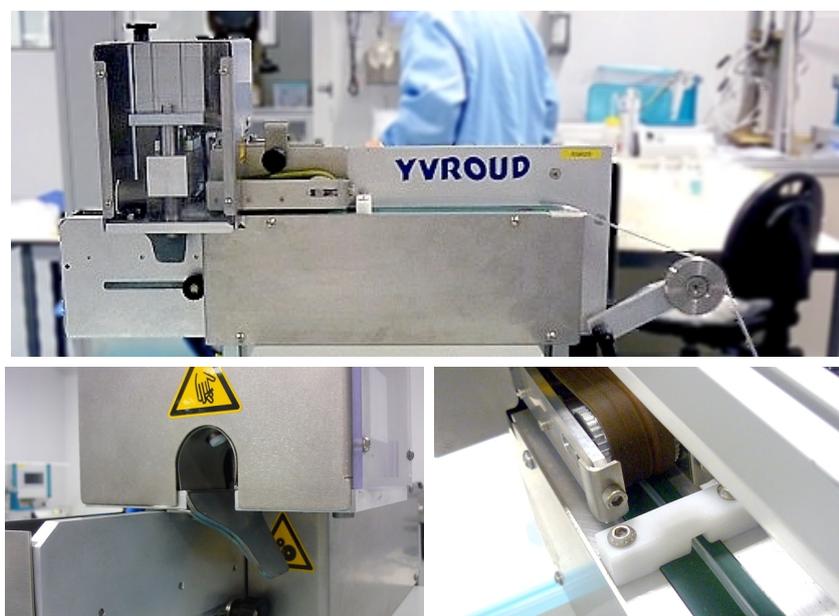


FIGURE 4.3 – Machine à découper

**L'opérateur**, déjà mentionné, fait aussi partie de l'environnement. C'est lui qui lance

la production, apporte les connecteurs et récupère les tubes assemblés en sortie du système. L'opérateur ne partage pas en permanence l'espace de travail du système, mais il y pénètre de manière ponctuelle. L'opérateur est un technicien formé qui suit à la lettre une procédure sans prendre d'initiative. Les erreurs qu'il pourrait commettre occasionnellement sont reprises dans l'analyse de risques.

La deuxième personne qui va interagir avec le système, de manière plus occasionnelle, sera **le responsable de la maintenance et de la programmation**. Il agira sur le système lors de sa mise en marche et lorsqu'elle est hors production. Il doit être capable de reprogrammer le système pour s'adapter à divers changements d'entrée ou de sortie et d'effectuer des maintenances d'urgence ou préventives.

L'élément suivant de l'environnement est la sortie du système, c'est-à-dire **les tubes assemblés** composés de deux connecteurs fixés sur un tube en silicone. Ces tubes sont stockés par lot de 50 et doivent être accessibles par un opérateur. Ces tubes doivent être placés les uns à côté des autres de manière à ce qu'ils puissent être dépoussiérés à l'aide d'une lingette imbibée de produit nettoyant.

La sortie du système peut éventuellement être composée d'assemblages ratés qu'il faudra également stocker à part.

Enfin, les derniers éléments sont **les normes** internes, externes et la loi. La déontologie et la vision de l'entreprise pourraient également apparaître dans ces derniers éléments. Le système évolue dans une salle blanche et manipule des dispositifs à usage médicale, ce qui implique une responsabilité morale, des contraintes de propreté, des précautions lors de la manipulation et diverses exigences en termes de contrôle de la qualité.

Il s'agit des éléments principaux nécessaires à la conception du système. D'autres éléments d'impact moins important ont également été pris en considération mais agissent de manière plus implicite. Il s'agit des sources d'énergie disponibles, de l'éclairage, des horaires de travail, des compétences internes de l'entreprise, etc.

### 4.3 Faisabilité

Le problème est posé et la grande majorité des informations nécessaires à la conception sont réunies. Toutefois, avant de commencer le développement du système, il convient de vérifier si ce dernier est réalisable.

Tous les projets sont possibles pour autant que les ressources et le temps soient disponibles

indéfiniment. Bien entendu, ce n'est jamais le cas en pratique.

Cela implique de vérifier la faisabilité d'un projet. Pour ce faire, il faut analyser les ressources disponibles en termes de personnel, de compétence, de finance, d'infrastructure... En ce qui concerne **le temps**, il correspond à la durée du stage. C'est-à-dire de début février à fin juin, soit 5 mois.

**Les ressources financières**, elles sont à négocier avec le client, mais il est possible de fixer un plafond. Si le système fonctionne parfaitement, l'entreprise devrait être capable d'économiser l'équivalent d'un salaire d'un ouvrier temps plein sans enfants à charge pendant 3 ans. Soit, l'estimation pour un système fonctionnant 6 heures par jour, 251 jours par an et travaillant à la même vitesse qu'un opérateur ; alors, en prenant un coût horaire brut de la main d'oeuvre de 23 €/h, le système sera totalement amorti en 3 ans s'il coûte moins de 104 000 €.

En plus du bénéfice financier, d'autres avantages peuvent également être pris en compte dans les négociations du budget. L'ajout de nouvelles compétences est par exemple un bénéfice notable mais difficilement quantifiable, la création de partenariats avec de nouveaux fournisseurs en est un autre, etc.

Le projet est donc réalisable financièrement mais, le budget n'étant pas infini, il limitera l'ensemble des solutions techniques envisageables.

Au niveau de la **faisabilité législative**, l'entreprise a le droit de créer le système. Il est à noter que les solutions techniques potentielles seront limitées par la loi et les normes en vigueur dans la société.

Il est courant d'automatiser ce type de tâche dans l'industrie (câbles électriques, tube pneumatique...). Bien que les composants soient différents et les volumes plus petits, la **faisabilité technologique** est donc également respectée.

Cependant, le temps de conception est limité à 5 mois avec une seule personne assignée au développement du système. Le temps d'assemblage n'est pas à négliger, de plus le délai de livraison du cobot est de plusieurs mois. La réalisation du projet n'est, par conséquent, pas réalisable dans le temps imparti. Le projet sera limité à la conception et ne comprendra pas l'assemblage réel du système ni, a fortiori, toutes les étapes postérieures à celui-ci (la mise en place, les essais, la calibration, la validation, la maintenance, le manuel d'utilisation, ..., la fin de vie du système).

## 4.4 Fonctions de service

Le besoin doit être traduit en termes de fonction de service.

**Définition** Fonction de service : Action attendue d'un produit (ou réalisée par lui) pour répondre au besoin d'un utilisateur donné. Dans une étude donnée, leur énumération et leur formulation résultent de l'analyse du besoin à satisfaire et le décrivent d'une manière nécessaire et suffisante. [2]

Les fonctions de service sont issues de l'analyse fonctionnelle du besoin. Cette première partie de l'analyse fonctionnelle ne prend pas et ne doit pas prendre en compte de solution technique. Un élément est déjà sélectionné puisque le client exige l'utilisation d'un robot collaboratif dans le système. L'analyse fonctionnelle du besoin aurait pu être légèrement modifiée pour tenir compte de ce fait ; néanmoins, il a été choisi de respecter la méthode et de ne pas tenir compte de la solution technique sélectionnée pour le moment.

La méthode utilisée pour l'analyse fonctionnelle est réalisée selon la norme française *NF X50-100* fournie par l'entreprise Medi-Line.

Le cahier des charges fonctionnel reprend cette traduction en fonctions de service. Ces fonctions sont hiérarchisées selon leur importance. Un ou plusieurs critères permettent de spécifier le champ d'action des fonctions. De plus, une flexibilité rend compte de la tolérance accordée au respect de ces critères. Au besoin, un ou plusieurs commentaires peuvent être ajoutés pour expliciter chaque fonction.

Ce cahier des charges est véritablement le contrat de conception. Il est consultable en annexeA. Dans ce projet, ce contrat n'est pas aussi primordial que dans d'autres situations. En effet, comme déjà mentionné, le client interagira avec le concepteur durant toute la durée du développement du système. Ce cahier des charges peut donc sans problème être modifié si le client juge que cela ne correspond plus exactement à ses besoins.

Huit fonctions de service et 7 contraintes ont été extraites de l'analyse fonctionnelle. Une contrainte signifie une exigence qui ne se traduit pas par l'ajout d'une fonction au système mais qui le contraint dans son mode de fonctionnement.

Dans le cas présent, il s'agit de :

- FS1 : Gestion de l'arrivée des tubes
  
- FS2 : Manipulation du tube
  
- FS3 : Gestion de l'arrivée des connecteurs

- FS4 : Manipulation du connecteur
- FP1 : Assemblage tube-connecteur
- FS5 : Contrôle de la qualité de l'assemblage
- FS6 : Dépôt du tube assemblé
- FS7 : Comptage du nombre d'assemblages réalisés

Les fonctions de service ne peuvent pas être influencées par une solution technique. La fonction "Gestion de l'arrivée du tube" par exemple traduit le fait que le tube arrive de la machine à découper et que le système doit s'y adapter. Elle n'implique pas un moyen d'arriver à résoudre le besoin.

## 4.5 Contraintes

- C1 : Le système doit pouvoir s'adapter en cas de modifications des dimensions des tubes et connecteurs en entrée
- C2 : Le système respecte la législation et les normes
- C3 : Le système doit s'intégrer dans la chaîne de production existante
- C4 : Le système respecte le budget limité
- C5 : La durée de vie du système doit être suffisante
- C6 : La durée de cycle du système doit être inférieure ou égale à 13 secondes

La contrainte C1 est délicate à gérer puisqu'il n'est pas possible de quantifier la contrainte. Le système doit être flexible et pouvoir travailler lors de l'assemblage avec d'autres composants, encore inconnus du client lui-même. Il a été négocié avec le client de poser cette contrainte de la manière suivante :

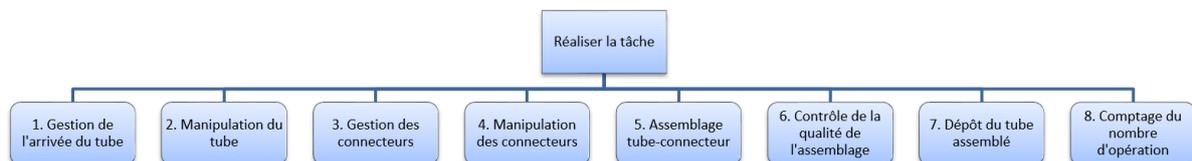
Le système doit pouvoir réaliser l'assemblage de pièces similaires (en termes de dimension, de poids et de comportement des matériaux) moyennant si nécessaire des modifications légères du système et pour un assemblage du même type (assemblage par translation

d'une pièce par rapport à l'autre). Toutefois, le système devra pouvoir fonctionner sans modification à un changement de longueur des tubes (dans une gamme spécifiée), à un changement du diamètre interne des tubes (1,5 ou 1) et à un changement de couleur des connecteurs (blanc ou transparent).

Les contraintes C2 et C3 correspondent aux normes respectées par l'entreprise. Les points C4 et C5 s'appliquent à la quasi totalité des systèmes, ils doivent néanmoins être définis. La contrainte C6, en revanche, est propre à la tâche à réaliser. Elle est imposée par le client qui exige d'avoir une cadence de production minimale acceptable.

# Chapitre 5

## Solutions techniques



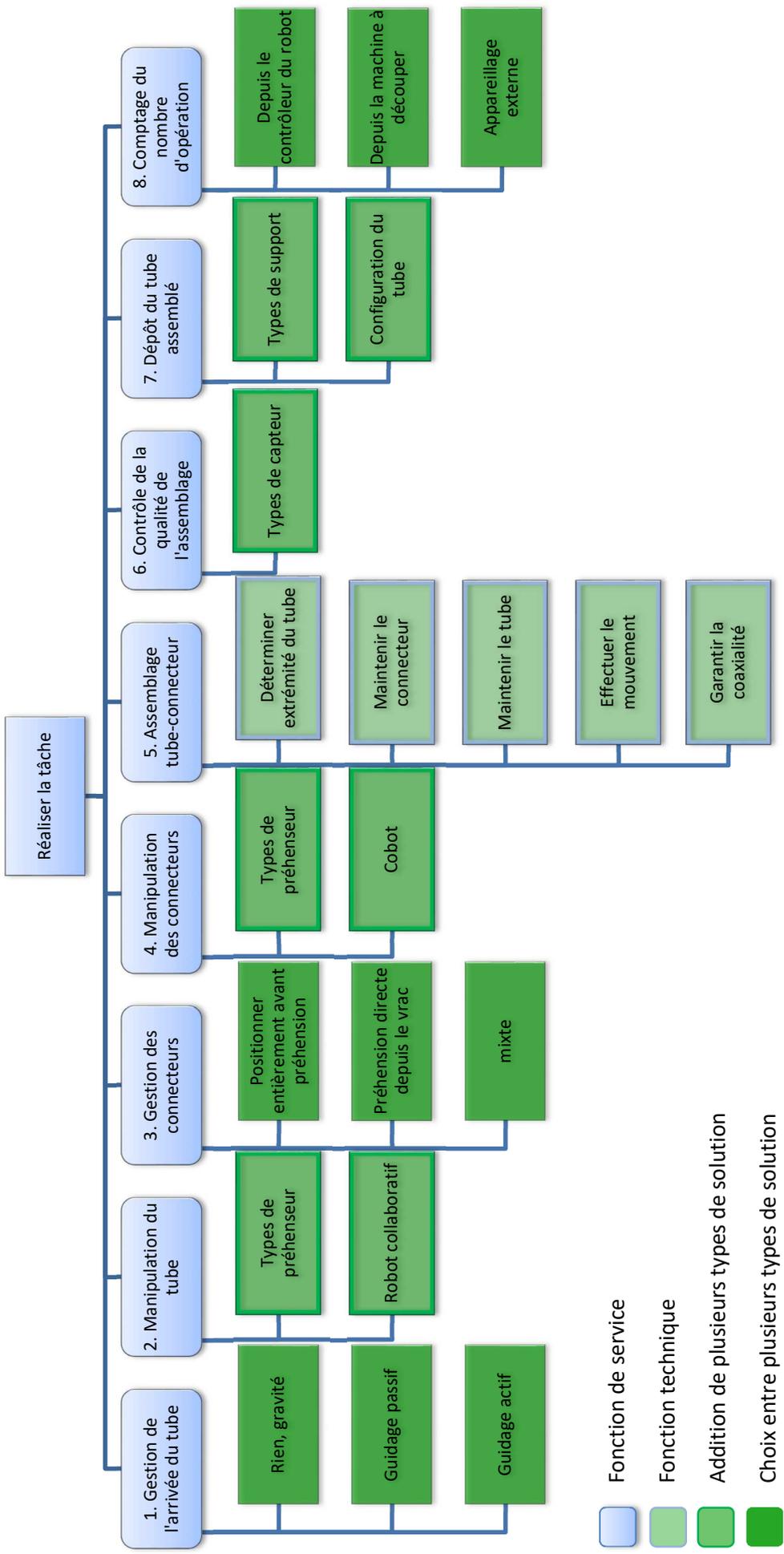
Les fonctions et contraintes qui devront être satisfaites par le système étant définies, il est désormais nécessaire de lister les types de solutions techniques envisageables qui pourront y répondre.

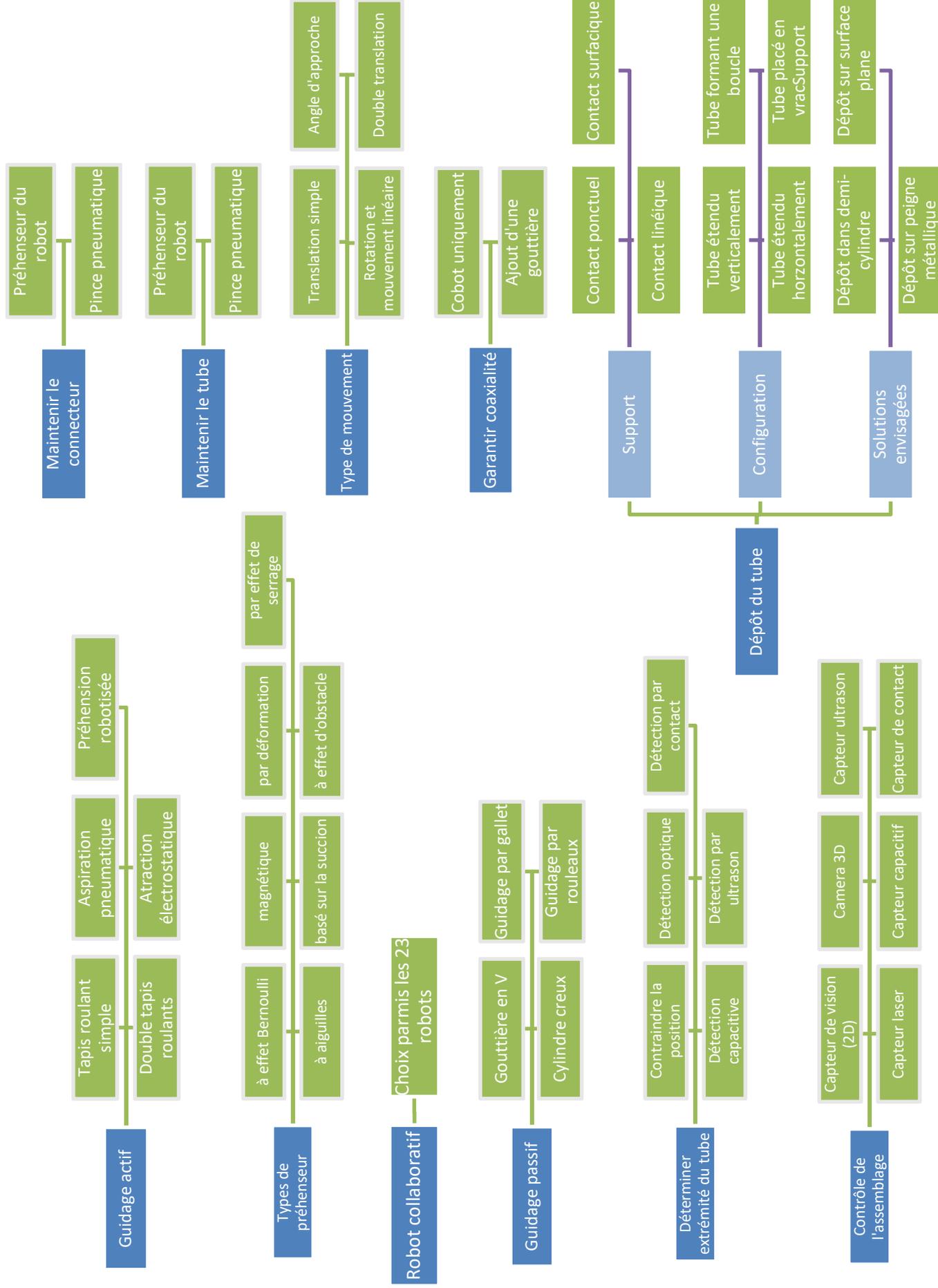
La sélection des différents composants sera également présentée composant par composant. En pratique, certains choix sont interdépendants. On peut facilement imaginer que la façon dont on gère l'arrivée du tube va influencer la manière dont le robot le manipulera et, conséquemment, influencer le type d'effecteur à utiliser.

### 5.1 Diagramme FAST

Dans un souci de clarté, ces solutions techniques sont rassemblées dans un diagramme FAST ci-dessous. Le détail des différentes solutions envisagées est expliqué dans la suite du document.

# Diagramme FAST





## 5.2 Robot collaboratif

La première recherche concerne le choix du robot collaboratif. Elle a été effectuée en comparant 23 robots disponibles sur le marché. Il n'a pas été évident de récolter l'ensemble des informations étant donné que le marché du cobot est encore à ses débuts. Certains robots envisagés ne possédaient qu'une fiche technique très sommaire et n'étaient, après recherche, pas encore disponibles à l'achat immédiat.

Un tableau récapitulatif des données collectées est disponible en Annexe A

La sélection du robot a été réalisée par analyse multi-critères, de manière à pouvoir combiner les informations qualitatives (facilité de programmation, sécurité...) avec les informations quantitatives (prix, vitesse maximale...). Chaque classe d'informations est associée à un coefficient représentant l'importance de cette dernière.

**Choix** Le robot sélectionné par l'analyse multi-critères est le robot ABB Yumi. Ce robot rassemble plusieurs qualités essentielles : un coût relativement peu élevé, deux bras permettant de diminuer le temps de cycle. De plus, il est d'une précision suffisante pour l'application qu'il devra effectuer et un siège de la marque est implanté à Zaventem. Ces différentes qualités correspondent aux critères les plus importants pour le client ; il est donc logique que le choix de ce robot se soit imposé.

Il est intéressant de remarquer que l'ensemble des caractéristiques du processus d'assemblage correspond parfaitement au domaine d'application de ce type de cobot qui excelle dans le maniement précis de pièces légères.



FIGURE 5.1 – Robot YUMI de chez ABB

### 5.3 Choix du type de préhenseur

Le second composant sélectionné et probablement un des plus décisifs dans le fonctionnement du système est le ou les types de préhenseur à utiliser.

Il en existe une multitude ; chacun étant adapté à un type d'objet, de poids, de précision ou d'environnement. Le but n'est pas d'établir une liste exhaustive qui balayerait l'ensemble des techniques de préhension. Mais il a été jugé nécessaire d'étudier avec attention les différentes possibilités. Il faut cependant garder à l'esprit que le préhenseur sera utilisé en production et ne doit pas être un prototype de laboratoire.

**Préhenseur à effet Bernoulli** Technique de préhension basée sur la dépression créée par les fluides en mouvement.

De l'air est éjecté sur la pièce à saisir, il s'en suit une aspiration sans contact.

Ce type de préhenseur est particulièrement utilisé pour les pièces fragiles, sales ou à surface poreuse là où les autres techniques sont moins efficaces. [29]

**Contre-arguments :**

L'absence de contact n'est pas justifiée pour la manipulation des différents composants. De plus, cette technique est d'une précision limitée. Enfin, les effecteurs par effet Bernoulli sont utilisés pour le levage des pièces et sont donc inadaptés à un assemblage qui exige une force horizontale.

**Préhenseur à aiguilles** Ce type de préhenseur est utilisé pour manipuler des pièces souples et poreuses (textiles, matières fibreuses, mousses). Le principe est d'actionner pneumatiquement des aiguilles qui vont s'insérer dans la matière et permettre la manipulation de l'objet. [5]

**Contre-arguments :**

Ce type de préhenseur est totalement inadapté aux objets à manipuler. Il n'est pas concevable d'autoriser une intrusion d'aiguille dans les composants à assembler.

**Préhenseur magnétique ou à électroaimants** En exploitant la force magnétique, ces préhenseurs permettent de manipuler des matériaux ferromagnétiques, quelle que soit la forme de l'objet. [4]

**Contre-arguments :**

Ce type de préhenseur est également inadapté aux objets à manipuler puisque les composants sont constitués de polymères.

**Préhenseur basé sur le vide ou la succion** Dans ce cas-ci, des ventouses sont utilisées pour saisir les objets. Elles créent un espace hermétique à l'air dans lequel une dépression est réalisée pour créer une force d'aspiration. Il existe une grande gamme de

ventouses selon la taille des pièces à manipuler, le type de surface, etc. [35]

**Contre-arguments :**

Les pièces à manipuler sont souples et de petites dimensions, ce qui n'est pas l'idéal avec ce type de préhenseur. De plus, un des avantages des systèmes de succion est de pouvoir saisir une pièce même si cette dernière est légèrement décalée. Dans notre cas, l'axe de symétrie des tubes comme des connecteurs doit être connu précisément pour pouvoir réaliser l'assemblage. Plus le préhenseur sera tolérant dans la configuration de saisie, plus l'assemblage devra être souple dans les paramètres d'entrée.

Il est opportun pour ce type de préhenseur d'analyser les deux composants à manipuler séparément. En ce qui concerne les tubes, la position de l'axe de symétrie est connue en sortie de la machine à découper. Il est préférable de ne pas perdre cette information et de disposer d'un préhenseur plus rigide par rapport à la position de la pièce. De plus, le comportement des tubes flexibles en silicone soumis à une dépression est à déterminer.

En ce qui concerne les connecteurs, la position de l'axe de symétrie n'est pas forcément connue avec une grande précision, cela va dépendre de la solution technique sélectionnée pour gérer l'arrivée des composants. Un système plus flexible peut alors avoir une valeur ajoutée. Cependant, il doit être couplé à un moyen de correction de la configuration avant l'assemblage, par exemple au moyen d'un guide qui va imposer l'orientation de la pièce.

Pour résumer, la précision de la position et de l'orientation des pièces engendrées par le système de succion peuvent être un argument de rejet de ce type de préhenseur.

**Préhenseur par déformation** Parfois appelés préhenseurs universels, ils sont formés d'une membrane élastique qui contient un matériau fluide ou granulaire. La préhension des objets se déroule en deux phases. Dans la première phase, le préhenseur est capable de se déformer grâce à sa flexibilité et au comportement fluide de son contenu. Au cours de la deuxième phase, le préhenseur adopte un comportement solide dû à une dépression qui modifie le comportement de la paroi et/ou de son contenu. [18]

**Contre-arguments :**

Cette technologie en n'est toujours à ses débuts. Ce genre de préhenseur est encore très peu utilisé en pratique. Sa valeur ajoutée réside dans sa flexibilité quant à la forme des objets à saisir. Or, dans le système étudié, les composants ont des dimensions connues qui varient très peu et qui sont fixes dans un même lot à produire.

**Préhenseur par effet d'obstacle** Type de préhenseur qui permet d'effectuer un mouvement de l'objet en restreignant le mouvement relatif entre l'effecteur et l'objet. [34]

**Contre-arguments :**

En ce qui concerne les connecteurs, les positionner est possible, mais la précision devra être améliorée au moyen d'un système de guide. De plus, ce système ne peut déplacer que les composants et non les saisir ; le préhenseur deviendrait inutile au moment de l'assemblage.

En ce qui concerne le tube en silicone, le problème demeure. Le silicone possède un grand coefficient de frottement et son comportement risque d'être difficile à contrôler par glissement. Encore une fois, il semble difficile d'obtenir une précision suffisante au niveau du positionnement et le préhenseur est inadapté au maintien du tube.

**Préhenseur par effet de serrage ou de frottement** Préhenseur qui vient maintenir l'objet en le serrant, générant une force qui fixe l'objet à l'effecteur. Il existe différents types selon la source d'énergie (Pneumatique, hydraulique, électrique), le nombre de doigts et la cinématique de préhension.

Ce système est adapté à la tâche, les désavantages sont un risque de contamination des pièces et le risque d'abîmer les pièces par un serrage inadéquat.

**Le choix** C'est la technologie de préhenseur par effet de serrage qui sera sélectionnée pour le système. Il convient, étant donné le panel de pinces disponibles, de recentrer quelque peu la solution.

*Source d'énergie :* Il est opportun de rappeler que l'assemblage a lieu en salle blanche. De ce fait, l'actionnement hydraulique sera rejeté pour éviter des risques de contamination et parce qu'aucune infrastructure n'est actuellement pas disponible chez le client pour travailler avec un préhenseur hydraulique.

En ce qui concerne l'actionnement pneumatique, un système d'air contrôlé (analysé, asséché, filtré) est disponible et déjà utilisé dans d'autres applications au sein de l'entreprise. Cependant, un système pneumatique fonctionne en "tout ou rien". Au niveau des connecteurs, cela ne pose pas de problème. Par contre, cela est plus délicat au niveau des tubes flexibles, puisqu'il ne faut pas risquer d'écraser le conduit. Étant donné que la force nécessaire pour maintenir le tube dépend de l'épaisseur de ce dernier, celle-ci varie selon les entrées. La dernière source d'énergie, les préhenseurs électriques, permettent un serrage en position qui peut s'avérer précieux pour la manipulation des tubes.

*Le nombre de doigts :* Plus le nombre de doigts augmente, plus la complexité et le prix du préhenseur grandissent. Il convient de rester le plus simple possible. Sachant que les pièces manipulées sont des cylindres, le choix se limite à deux cas : soit avec 2 doigts, soit avec 3 doigts.

L'ajout d'un troisième doigt à l'avantage de pouvoir réaliser un centrage des pièces et

donc de définir la position de l'axe de symétrie.

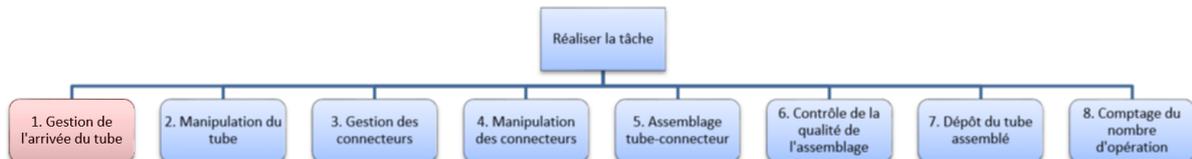
Un système à 2 doigts permet uniquement de positionner l'axe de symétrie sur une droite. Le tout est de savoir si le degré de liberté supplémentaire fixé par un système à 3 doigts est une valeur ajoutée ou non. La position de l'axe de symétrie du tube est connue au moment de la coupe grâce au guide de la machine YVROUD.

Si la position de l'axe de symétrie est conservée ou si elle peut être récupérée avant d'effectuer la préhension, une pince à 3 doigts ne sera pas nécessaire.



FIGURE 5.2 – Préhenseurs du Robot YUMI, ABB

## 5.4 Gestion de l'arrivée du tube



Les tubes sont achetés sous forme de bobines dans un double emballage pour éviter les contaminations. Une bobine est déballée, puis fixée à la machine à découper. Le tube est ensuite déroulé, débarrassé de son électricité statique et mis à longueur. Avant d'être découpé, le tube est entraîné entre deux tapis, ce qui permet de ne pas l'étirer avant la coupe. Un guide est présent 5 millimètres avant et après la coupe pour garantir une coupe dans le plan de la section. Chaque tube est à l'arrêt au moment de la coupe puis est poussé dans le vide par le tube suivant. Comme expliqué dans l'environnement du système 4.2, le comportement du silicone est assez capricieux, c'est pourquoi la gestion de l'arrivée du tube est un problème à considérer entièrement.

Différents tests ont été réalisés en aval de la machine à découper. Durant ces tests, l'avance du tube a été perturbée et l'effet sur la coupe et le comportement du tube a été observé. Ces tests ont mis en lumière trois éléments :

La gravité n'est pas suffisante pour garantir que le tube se déplacera verticalement vers le bas.

Quand le tube touche une surface, le comportement du tube varie d'une fois à l'autre. Il est parfois nécessaire d'appliquer une force très faible pour détacher deux tubes consécutifs. Plusieurs solutions techniques ont été envisagées pour satisfaire la fonction de service :

**Aucun guidage post-découpe** La solution la plus simple est de ne rien faire. En effet, laisser le tube pendre dans le vide est la méthode actuellement utilisée lors de l'assemblage manuel. Le tube se laisse tirer vers le bas par la gravité et tombe dans un bac de réception après la coupe. L'opérateur vient alors saisir le tube dans ce bac. Cette solution a l'avantage d'être économique. De plus, elle permet au système d'assemblage de fonctionner indépendamment de la machine à découper. En effet, un stockage temporaire est possible. Cela autorise l'opérateur à attendre que du stock soit disponible avant de commencer la tâche, s'il est plus rapide que la machine à découper, ou d'être plus lent que la machine et de continuer la tâche lorsque tous les tubes sont découpés.

Pour le système automatisé, ne rien mettre en sortie de coupe peut se résumer par deux solutions. Soit, l'avantage de l'indépendance du temps de cycle est conservé. Dans ce cas, le système devra être capable de manipuler les tubes en vrac dans le réservoir. Soit, le système respecte la cadence imposée par la machine à découper et vient saisir le tube lorsqu'il pend. La préhension doit alors être effectuée avant la coupe de la seconde extrémité du tube.

La première solution a l'avantage de rendre le système plus flexible puisqu'il n'est plus adapté spécifiquement à la machine à découper. Cependant, choisir de laisser tomber les tubes en vrac équivaut à perdre le guidage du tube en amont. Les informations sur la position et l'orientation du tube seront perdues. De plus, comme expliqué précédemment 4.2, le comportement des tubes en silicone est difficile à gérer. Les tubes transparents se collent entre eux et se replient sur eux-mêmes lorsqu'ils tombent dans le réservoir après la coupe, ce qui rend la tâche ardue pour un système automatique. Cette solution risque d'être complexe et d'engendrer des coûts, ce qui est en opposition avec l'apparente simplicité de laisser jouer la gravité.

La seconde solution est d'utiliser la gravité pour positionner verticalement le tube vers le bas et de venir le saisir avant la coupe. Etant donné que la longueur de tube est connue, il est facile d'estimer la position de l'extrémité du tube. Cependant, différentes observations en salle blanche ont réfuté cette affirmation. La gravité n'est pas suffisante pour garantir la verticalité du tube, les tubes étant trop légers, ils ne suivent pas une ligne droite. De plus, il arrive fréquemment que, par frottement avec la fin du guide, les tubes ne suivent pas la gravité et partent dans une autre direction. Il est donc difficile

d'anticiper la position de l'extrémité. Enfin, le client aimerait que le système ne perturbe pas la coupe. Une saisie du tube avant la coupe pourrait comprimer ou allonger le tube et perturber la mise à longueur du tube. Cette solution est donc rejetée.

**Guidage passif** Il est possible de prolonger le guide en sortie de découpe. Cela permet de conserver la linéarité et de potentiellement récupérer la position des extrémités du tube. Deux problèmes se posent cependant, le premier est que le tube a tendance à se compresser dû au frottement. De plus, cette compression varie d'un tube à l'autre et engendre une imprécision sur la position de l'extrémité. Pour donner un ordre de grandeur, une expérience a été menée. Un guide en polyoxyméthylène présentant une gorge rectangulaire de 4,5 mm de large sur 4 mm a été juxtaposé au guide de fin de coupe. Une série de 20 tubes de 100 mm de long a été découpée. Une variation de  $\pm 5,5$  mm sur la position de l'extrémité du tube a été mesurée.

Cette imprécision est déjà importante et pourrait atteindre plusieurs centimètres pour les tubes de 420 mm dont la tolérance est de  $\pm 10$  mm.

Le second problème est la création de boucle. Lors de l'expérience précédemment citée, il est arrivé qu'un tube sorte du guide. Les forces de frottement sont vite suffisantes pour engendrer du flambement. Au lieu d'avancer, le tube génère alors une boucle. Ce type de configuration n'est pas compatible avec une gestion simple et efficace de l'arrivée du tube. Il faut dès lors que le guide soit suffisamment fermé pour empêcher au tube de sortir.

Des tests réalisés avec un guide cylindrique de diamètre intérieur de 4 mm se sont révélés très prometteurs. Ils ont permis un maintien de la linéarité et un guidage du tube sans constater de problème. La force de frottement générée pour déplacer les tubes de 100 mm a été mesurée à 0.03N, ce qui est acceptable pour une faible perturbation de la coupe. Le guide a également été réalisé en polyoxyméthylène.

Pour diminuer le frottement en cas de perturbation de la coupe (notamment avec les tubes de 420 mm), il est possible d'effectuer des traitements de surfaces. Le développement de la nanotechnologie a permis la création ou l'amélioration de nombreuses techniques comme, par exemple, le dépôt sous vide de parylène, la revêtement DLC, l'implantation ionique, etc. [20]

Il faut veiller à ce que le traitement ne puisse pas contaminer les tubes d'une quelconque manière et qu'il soit compatible avec les méthodes de nettoyage du matériel comme mentionné dans la section 7.

Il est également possible de choisir un meilleur matériau. Une étude a été réalisée à l'aide du logiciel *CES*, logiciel dédié à la sélection des matériaux. Voici les résultats obtenus :

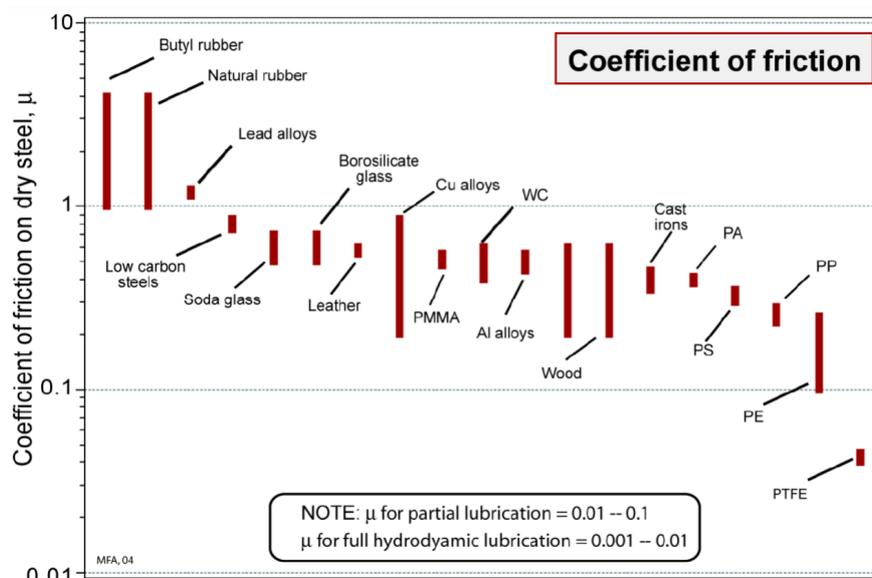


FIGURE 5.3 – Coefficient de frottement en fonction du type de matériaux [15]

On remarque que le PTFE (téflon) est le plus adéquat. Il est suivi du polyester et du polypropylène. Le PMMA est assez loin derrière, bien que son coefficient de frottement soit du même ordre de grandeur que celui du polypropylène.

Un problème notable est cependant constaté expérimentalement. Lors de la coupe d'une succession de tubes, il est nécessaire d'appliquer une force pour séparer les tubes les uns des autres. Un système de guidage passif ne réalise pas cette fonction.

**Guidage actif** Une autre solution consisterait à venir guider dynamiquement le tube. Plusieurs méthodes sont possibles. Un système de tapis roulant similaire à ce qui est déjà disponible en amont de la coupe peut être installé. Ce système est déjà validé et fonctionne parfaitement. Dans les désavantages, il faut citer la complexité nettement augmentée par rapport au guidage passif puisqu'il faut une source d'énergie et la présence d'un mécanisme. Enfin, il faut tenir compte de la géométrie de la machine à découper qui présente un couloir A. Le matériel placé en sortie de coupe doit donc être peu volumineux.

Un autre moyen d'obtenir le détachement des tubes est d'effectuer la préhension par le robot juste après le signal de coupe du tube. La préhension du tube ne doit cependant pas empêcher l'avance du tube suivant. Pour contrer ce problème, la préhension peut se faire entre la coupe et la remise en marche des tapis roulants. La fenêtre pour agir n'est pas très large, de l'ordre d'une seconde, et dépend des paramètres d'entrée (longueur des tubes et vitesses d'avance). La préhension pourrait s'effectuer à la première extrémité, ce qui nécessite de savoir où elle se trouve 5.5. Alternativement, la préhension peut se faire

sur la deuxième extrémité, côté machine. L'avantage est que la position de cette extrémité est connue très précisément. Cependant, la géométrie de la machine à découper limite la taille de l'effecteur et sa position lors de la saisie. De plus, étant donné la présence du guide après la coupe, la préhension ne peut être effectuée qu'à 15mm de l'extrémité.

Une autre solution serait la préhension en commandant le robot pour qu'il avance à la même vitesse (voire plus rapidement) que le tube. Il est certainement possible de récupérer le signal de mise en marche des tapis roulants. Cependant, le client aimerait éviter d'ouvrir la machine à découper pour ne pas risquer de perturber son fonctionnement. De plus, la synchronisation avec l'avancement du tube pourrait être une opération délicate. La vitesse d'avance du tube est un paramètre et l'imprécision sur la position de l'extrémité est également à prendre en considération.

Une autre idée est d'utiliser la tendance des tubes à se charger en électricité statique pour attirer et séparer chaque tube en sortie de coupe. De cette manière, les difficultés liées au frottement du tube pourraient être évitées. Néanmoins, le comportement d'un tube chargé n'est pas des plus aisés à gérer. D'une part, cela favorise l'attraction des poussières sur le tube, d'autre part, cela rend plus difficile le nettoyage, l'emballage et surtout la manipulation des tubes qui se fixent volontiers à la moindre surface capable d'attirer le tube chargé. Une barre antistatique est d'ailleurs présente avant la coupe. Enfin la dernière solution envisagée est l'utilisation d'un jet d'air pour aspirer le tube par effet Venturi.

**Définition** Effet Venturi : En mécanique des fluides, pour des vitesses d'écoulement subsoniques, phénomène où les particules gazeuses ou liquides se retrouvent accélérées à cause d'un rétrécissement de leur zone de circulation. Ce phénomène est utilisé dans de nombreuses applications pour augmenter une poussée ou créer une aspiration.

Le signal de coupe peut être directement récupéré depuis la machine *YVROUD*. Ce signal peut activer une buse pneumatique ; le tube est alors entraîné par un jet d'air et projeté sur une paroi. De cette manière, la position d'une des extrémités est connue et le tube est détaché de son successeur.

L'avantage de cette solution est qu'elle limite les surfaces en contact et donc les frottements lors de l'aspiration. En effet, le jet d'air est provoqué par une buse pneumatique cylindrique qui reçoit de l'air depuis sa section intérieure provenant de 6 trous placés symétriquement sur la section circulaire (A). Ce type de buse est généralement utilisé pour convoyer des graines ou autres petits objets au travers de conduites.

Un désavantage est le risque de charger le tube par frottement avec le jet d'air. De plus, la flexibilité du système est limitée par le diamètre de la buse. Enfin, ce système nécessite le branchement à un système pneumatique qui doit être présent sur place.

**Le choix** Après la réalisation des tests sur le guidage et après confrontation des idées avec le client et le département R&D, la solution retenue consiste à utiliser le système d'aspiration par effet Venturi. Ce choix n'est possible que parce que l'entreprise possède déjà une installation pour appareils pneumatiques à air sec. Dans le cas contraire, des frais d'installation doivent être pris en compte. Les tests réalisés en laboratoires se sont avérés concluants. Non seulement les tubes sont correctement aspirés et acheminés jusqu'à la surface de référence pour la phase suivante mais ils ne se chargent pas (ou de manière négligeable) durant l'opération. Au cas où des charges poseraient problème, la machine à découper utilise déjà de l'air désionisé qui peut également être employé par la buse pneumatique. Le diamètre de la buse utilisée est de 6,4 mm. A S'il est vrai que cela limite le type de tube en entrée, il faut noter que la machine à découper n'accepte elle-même qu'une taille de tube maximale de 6mm.

Le prix de la buse étant abordable 7.4, le client accepte la contrainte de devoir commander une taille de buse supérieure dans le cas où elle ne fonctionnerait pas avec des tubes de diamètres supérieurs.

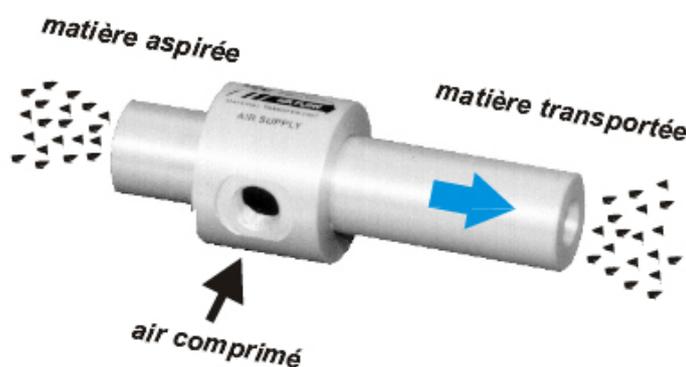
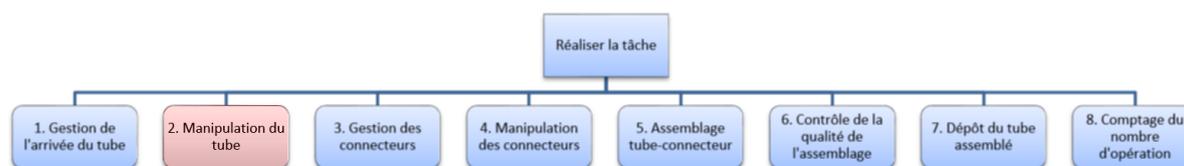


FIGURE 5.4 – Buse pneumatique permettant d'aspirer le tube  
[12]



## 5.5 Détection des extrémités du tube

Artificiellement traitée séparément, la détection des extrémités du tube est un élément qui a influencé la gestion de son arrivée. Elle est aussi influencée par les sections suivantes, comme par exemple la réalisation de l'assemblage 5.7. En effet, plusieurs moments sont envisageables pour effectuer la détection de l'extrémité. Il est possible de la détecter dès l'arrivée du tube, avant même la mise à longueur de ce dernier. La difficulté est alors de conserver l'information pour ne pas que la détection ait été vaine. Il est possible de trouver l'extrémité juste avant l'assemblage. De cette manière, il ne faut pas s'inquiéter de conserver la position de la fin du tube. Et bien entendu, il est possible d'effectuer la recherche n'importe quand entre ces deux moments limites, comme par exemple juste après la coupe, ce qui présente l'avantage d'avoir un tube immobile.

Contrairement à la sélection du préhenseur, le type de matériau sera directement pris en compte avant d'évoquer les solutions envisagées. Les capteurs qui ne fonctionnent que pour les métaux (inductifs, magnétiques) sont directement rejetés.

**Contraindre la position** Avant même de chercher comment détecter la fin du tube, il est possible de contraindre celui-ci de manière à ce que l'extrémité soit toujours au même endroit.

La difficulté provient des composants à manipuler. Les tubes sont capricieux, il n'y a aucune garantie à ce qu'ils s'alignent dans une encoche en V et il est très facile de les étirer, les comprimer ou les faire fléchir. Par conséquent, contraindre la position des extrémités peut s'avérer complexe.

**Détection capacitive** Le grand avantage des capteurs capacitifs est qu'ils peuvent être utilisés pour quasiment tous types de matériaux. Le tube de silicone non métallique et transparent est donc parfaitement détectable avec ce type de capteur.

Le principe est simple : le capteur émet un champ électromagnétique grâce à des condensateurs. La présence d'un objet perturbe ce champ en modifiant la valeur de la capacité. Cela engendre l'ouverture ou la fermeture d'un circuit électrique, et permet de repérer l'objet sans avoir de contact entre le capteur et la pièce. Cela évite toute une série de désagréments telle que l'usure, la contamination...

Les capteurs capacitifs sont efficaces pour la détection d'objets denses, même au travers

d'une paroi. Ils peuvent fonctionner sur des installations à hautes cadences. Ils sont régulièrement utilisés pour contrôler le remplissage de bouteilles.

Les capteurs capacitifs fonctionnent à distance réduite, ce qui limite leur utilisation en pratique. Ils peuvent également être perturbés par un environnement humide ou la présence de vapeur. [6]

**Détection optique** La détection optique peut se faire via l'utilisation de différents capteurs. Le principe est toujours le même, détecter un signal lumineux et en déduire la présence ou l'absence de l'objet. Ils peuvent également être utilisés pour d'autres tâches (détecter l'intensité lumineuse, la chaleur, la couleur, etc.)

Pour la tâche à accomplir, il existe trois classes de capteurs :

Premièrement, les barrières simples. Dans ce cas, un émetteur génère la source lumineuse et un récepteur indépendant la reçoit. Si l'objet coupe la source lumineuse, un signal est envoyé.

Ensuite, les barrières réflex qui possèdent un émetteur et un récepteur contenus dans le même boîtier. Un réflecteur est employé pour renvoyer le faisceau lumineux. A nouveau, lorsque l'objet passe entre l'émetteur et le réflecteur, la lumière reçue varie et l'objet est repéré.

Enfin, les détecteurs directs (énergétiques ou à triangulation). Dans ce cas, c'est la pièce elle-même qui réfléchit la source lumineuse, celle-ci est alors captée par le récepteur.

Le défaut de ces capteurs est qu'ils peuvent être perturbés par une pollution lumineuse, la présence de particules dans l'air ou par l'aspect des objets (état de surface, couleur, transparence, etc.). Toutefois, cet effet est limité si le signal est assez puissant comme avec les capteurs laser par exemple. [21]

**Détection par ultrasons** Le principe des détecteurs à ultrasons se base sur l'émission d'ondes ultra-sonores. Cette onde va être réceptionnée et la présence ou l'absence de la pièce va être déduite en déterminant le temps nécessaire au retour de l'onde. Ce système possède également tous les avantages des détecteurs sans contact. De plus, il permet de repérer tous types de matériaux (métalliques, non métalliques, transparents, réfléchissants, fragiles, poreux, ...) hormis les absorbants phoniques. Ils opèrent sur une large gamme de distances et sont peu sensibles à l'environnement industriel. Le désavantage majeur de ce type de capteur est leur coût qui limite leur utilisation en pratique. [31]

**Détection par contact** La détection s'effectue mécaniquement, le contact permet de fermer ou d'ouvrir un circuit électrique. Le signal peut alors être récupéré.

Ces capteurs sont utilisés très fréquemment car ils sont peu coûteux, fiables, intuitifs, faciles à installer et sont utilisables dans un grand nombre d'environnements.

Le contact en lui-même peut être source d'usure et se révèle incompatible avec certaines pièces fragiles. Il en existe de nombreux types : à poussoir latéral ou en bout, à galet, à levier, à ressort, etc.

La tête du capteur qui va réaliser le contact doit être choisie en fonction de l'objet à contrôler, de la précision exigée et du mouvement relatif entre l'objet et le capteur. [23]

**Le choix** Parfois sous-estimé parce que moins coûteux, la sélection d'un capteur est un élément primordial. Sans lui, le système est aveugle et ne peut plus réaliser la tâche. La grande majorité des pannes d'automatisme provient d'ailleurs des détecteurs. [36]

Au vu du choix effectué dans la section précédente 5.4, détecter l'extrémité du tube interviendra à deux moments :

d'abord au moment de la gestion de l'arrivée du tube, la position de l'extrémité est directement déterminée "mécaniquement" puisque le tube est mis en contact avec une surface de référence et guidé par le système Venturi.

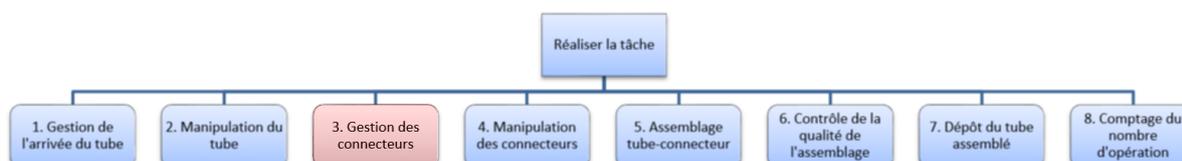
Le moment pour réaliser la deuxième recherche de l'extrémité est imposé par la méthode sélectionnée pour effectuer cette recherche. En effet, il a été choisi de parcourir le tube à l'aide du préhenseur et de détecter la fin de ce dernier via un système laser (détecteur direct).

Cette solution est motivée par deux expériences. La première a été réalisée à l'Université de Liège 6 ; la seconde par un fournisseur en capteur de vision, qui a testé l'efficacité de leur capteur laser sur les tubes transparents. Il va de soi que ces expériences ont toutes les deux été concluantes.

Les capacités du cobot sélectionné sont largement suffisantes pour réaliser ce type de tâche et l'ajout d'un capteur laser est une solution robuste qui peut s'adapter à un changement dans le type de tube utilisé.

Cependant, cette solution exige qu'un bras soit disponible. La deuxième détection de l'extrémité aura donc lieu juste après le premier assemblage. La recherche de la seconde extrémité augmentera directement le temps de cycle puis qu'elle ne sera pas effectuée en parallèle à l'assemblage.

## 5.6 Gestion de l'arrivée des connecteurs



Les connecteurs, qu'ils soient blancs ou transparents, arrivent sous forme de sachet de 1000 pièces. Un opérateur est chargé d'apporter et de déballer les connecteurs.

Les pièces sont uniquement disponibles en vrac et il est indispensable, pour pouvoir réaliser l'assemblage, de connaître leur position et orientation.

Le problème de l'arrivée des connecteurs peut se décomposer en plusieurs sous-fonctions. Il faut d'abord pouvoir réceptionner les pièces en vrac, livrées par sachet de 1000.

Une première sous-fonction est la capacité à stocker une quantité de connecteurs. Il est possible de se fixer un ordre de grandeur pour le nombre de connecteurs à stocker, en se basant sur la définition du besoin A. Selon celui-ci, le système doit pouvoir fonctionner sans être rechargé en connecteurs pendant une journée. Pour obtenir une estimation, le temps d'assemblage est supposé égal au temps réalisé actuellement. Le temps total de fonctionnement sur une journée est fixé à 16 heures de manière à garantir une marge de sécurité. Chaque assemblage comprend deux connecteurs, soit :

$$2 * 16 * 60 * 60 / 16 \simeq 8862$$

Un sachet de 1000 unités représente un volume de 1600 cm<sup>3</sup>.

Le réservoir devra donc avoir un volume supérieur à 14 200 cm<sup>3</sup>, soit 14,2 litres.

Il est important de noter qu'un opérateur restera en permanence à proximité du système pour effectuer l'emballage et pour réapprovisionner la machine à découper en bobine. Si nécessaire, cet opérateur pourrait également effectuer un réapprovisionnement en connecteurs.

Outre la sous-fonction de stockage, l'étape cruciale de la gestion de l'arrivée des connecteurs est le passage du vrac à une position et une orientation déterminée, nécessaire à l'assemblage qui va suivre.

Pour ce faire, plusieurs solutions sont envisageables. Il y a deux types de stratégie, soit faire en sorte que les composants s'orientent et se positionnent de façon prédéterminée, soit que le système fonctionne, peu importe la configuration dans laquelle se trouve le connecteur. Certaines stratégies se positionnent entre les deux.

Comment orienter le connecteur ? Il est possible d'utiliser un ensemble de guides qui va restreindre les pièces dans une position unique. Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir une énergie qui permettra le mouvement des connecteurs. Cette énergie peut être la gravité. En faisant chuter les pièces en vrac, il est possible de leur imposer une configuration. L'avantage est que cette énergie est gratuite. L'inconvénient est que le comportement lors de la chute de plusieurs pièces proches les unes des autres est difficile à anticiper. La principale difficulté est de garantir qu'aucune pièce ne puisse se bloquer lors de la chute. En

effet, la gravité agit toujours dans le même sens, les pièces seraient donc bloquées indéfiniment, et une intervention externe devra être utilisée. Une autre solution, très largement utilisée dans l'industrie, est d'opter pour un système mécanique de tri, tel que les bols vibrants, convoyeurs verticaux, etc.

L'avantage de ces systèmes est leur fiabilité. Ils sont testés depuis de nombreuses années et adaptés aux pièces qui ne sont ni fragiles, ni de géométrie complexe. Ils présentent toutefois un inconvénient : leur manque de flexibilité par rapport aux changements du besoin. Ces systèmes sont conçus pour positionner un seul type de pièces. Ils peuvent être légèrement modifiés pour s'adapter à une modification des dimensions, mais rien ne peut permettre de prédire s'ils seront capables de s'adapter à un nouveau composant. Leur prix tourne en général autour de 10 000 €.

Ces solutions permettent de positionner et d'orienter les connecteurs de manière à ce que le robot collaboratif vienne toujours au même endroit saisir les connecteurs. La stratégie opposée est de laisser la position et l'orientation des connecteurs aléatoire et de permettre au robot de s'adapter à la position et l'orientation de chacun. Pour ce faire, il doit pouvoir percevoir les connecteurs via l'utilisation d'un capteur.

Le capteur le plus performant pour ce genre de tâche est un capteur optique. Une caméra 3D permet de repérer des composants en vrac et de transmettre les coordonnées des pièces et leur orientation au robot.

Un exemple de ce genre de solution peut être celui du robot ABB *YUMI* qui, en utilisant le système *Pick-it 3D robot vision* réalise la préhension en vrac et l'assemblage d'un tube de mascara et de sa brosse. [10]

La préhension reste une étape difficile au niveau 3D. Premièrement, parce qu'il y a un mouvement des pièces lors de la préhension. Les différentes vidéos explicatives de ce genre d'application montrent en général des réservoirs très petits avec un mouvement relatif entre les différentes pièces très limité. Ce ne sera pas le cas ici. De plus, même en cas de pièces immobiles, la préhension n'est pas toujours possible pour toutes les configurations. Le fait que les pièces soient agglutinées entre elles rend difficile, voire impossible, l'approche du préhenseur. C'est un problème récurrent dans l'industrie.

Un mixte de ces deux stratégies est de prédisposer les composants tout en garantissant une flexibilité sur la position et/ou sur l'orientation des pièces.

Il y a plusieurs solutions techniques possibles selon l'importance que l'on octroie à cette flexibilité. Plus le positionnement est faible, plus le capteur devra être puissant ; à l'inverse, plus le positionnement et l'orientation seront précis, plus le capteur pourra être basique. Il est possible de positionner les composants en rang d'oignon et d'utiliser un simple capteur

de présence, ou bien de positionner les connecteurs à plat et espacés et de recourir à de la vision 2D.

**Positionnement total** Une solution envisageable et largement utilisée dans l'industrie est d'installer un système vibrant (bol, tapis, etc.). Le client est très réticent quant à l'installation d'un tel système pour des raisons d'inconfort du personnel, dû au bruit. De plus, la vitesse de production étant relativement faible, le système n'a pas besoin d'avoir une haute cadence. Enfin, il est bon de remarquer que les systèmes vibrants peuvent entraîner des charges électrostatiques qui pourraient éventuellement créer des problèmes.

**Capteur de position et d'orientation** L'autre solution est de recourir à un système visuel permettant de repérer chaque connecteur un à un. Ces systèmes utilisent une ou plusieurs caméras et, par un traitement d'image(s), détectent la position et l'orientation des pièces. Cette solution est souvent utilisée quand plusieurs types de pièces sont mélangés ou lorsque les pièces sont de formes identiques mais présentent des différences en surface (couleur, étiquette, code barre, etc.).

L'importance du software est primordial dans ces systèmes.

**Système mixte** Il est possible de mixer les deux solutions en prédisposant les pièces sur une surface puis en réalisant une détection optique de leur position. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de trouver une solution pour passer du sachet à la disposition à plat de tous les connecteurs. L'opérateur peut éventuellement recevoir une consigne pour disposer lui-même les connecteurs, mais cette opération ne doit pas prendre plus d'une minute.

**Choix** Le choix s'est effectué en discutant avec le client. Un système de bol vibrant était le plus robuste et le moins coûteux. Cependant, il est peu flexible à un changement des connecteurs. De plus, l'entreprise souhaite diversifier ses compétences et a déjà en son sein les compétences pour utiliser un système de bol vibrant. Le bénéfice apporté par l'utilisation d'un système de vision est difficilement quantifiable et l'avis du client était indispensable.

Le système qui satisfait au mieux le besoin du client est un système comprenant une trémie vibrante, une table vibrante et une caméra externe.

La caméra a comme fonction de repérer si des connecteurs sont disponibles, c'est-à-dire à plat sur la table vibrante. Si c'est le cas, elle communique l'information au robot, sinon elle active la trémie et ou la table vibrante. Le fonctionnement détaillé sera explicité plus loin dans le document 7.2.

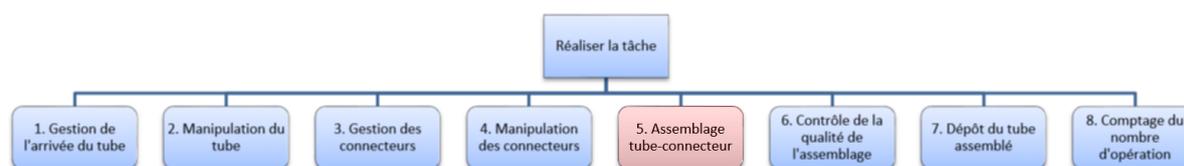
Ce système permet de pouvoir s'adapter à un changement du type de pièces très facilement. De plus, il peut fonctionner en parallèle au robot, ce qui diminue le temps de cycle. Enfin, il permet d'utiliser un capteur de vision et donc d'augmenter les possibilités

d'interactions entre le cobot et son environnement.



FIGURE 5.5 – Illustration du choix pour la gestion des connecteurs (ici système Flexibowl)

## 5.7 Réalisation de l'assemblage



La volonté du client est de se familiariser avec les robots collaboratifs. Ainsi, l'assemblage aura lieu en utilisant le robot sélectionné. Différents tests de faisabilité ont été réalisés pour déterminer dans quelle mesure le robot collaboratif va pouvoir réaliser seul la tâche et dans quelle mesure il doit être accompagné par des composants extérieurs.

**Maintenir les composants** Un mouvement relatif entre le tube et le connecteur doit être réalisé. Pour ce faire, il y a trois possibilités. Soit le connecteur est fixe et le tube mobile, soit le tube est fixe et le connecteur mobile, soit les deux composants sont mobiles et se dirigent l'un vers l'autre. Dans tous les cas, ces deux pièces doivent être maintenues pour résister à la force de réaction qui interviendra durant l'assemblage.

Les préhenseurs du robot peuvent réaliser cette tâche. Dans le cas où une autre pince serait nécessaire, il y a toujours possibilité d'ajouter une pince pneumatique contrôlée directement par le robot. Le reste des actions est réalisé par le robot collaboratif.

**Garantir la coaxialité** L'étape cruciale qui a été expérimentalement observée pour réaliser l'assemblage est de garantir la coaxialité. Il est impératif, à la fin du mouvement, que l'axe du connecteur et celui du tube coïncident. Pour ce faire, le système peut se

débrouiller sans aide. Il est également possible qu'un guide, une gouttière ou une encoche en V soient nécessaires. Il convient cependant de faire attention au fort coefficient de frottement du silicone qui lui permet de se coller à une paroi malgré la gravité. De plus, toutes les surfaces en contact avec le produit doivent être nettoyées avant et après chaque début de procédure.

Au niveau des connecteurs, aucun problème n'est remarqué pour le bon positionnement de la pièce dans le guide. La seule contrainte est que l'assemblage doit être effectué au niveau du sol.

**Mouvement à réaliser** Différents mouvements ont été testés expérimentalement pour faciliter l'insertion du connecteur dans le tube. Deux d'entre eux obtenaient un taux de réussite plus élevé.

La première méthode consiste à aligner l'axe du tube et celui du connecteur avant l'insertion. Cette méthode autorise une imprécision assez grande sur la position dans la direction de l'axe mais est très sensible aux erreurs dans le sens de la coupe. Elle nécessite une faible tolérance sur l'erreur de coaxialité. Lors de l'enfoncement, le tube s'étend autour du cône d'entrée du connecteur et la force nécessaire à son extension crée une compression du tube. Cette compression peut être compensée par une marge de sécurité, c'est-à-dire une longueur de tube assignée à l'enfoncement majorée. Une augmentation de cette longueur accroît la probabilité de flambement et donc réduit encore les tolérances sur la coaxialité. Elle peut également être compensée par la réalisation du mouvement en deux temps. Le premier mouvement va permettre de passer le cône d'entrée, tandis que le deuxième va réaliser l'enfoncement du tube jusqu'au connecteur. De cette manière, la longueur de tube à manipuler peut être réduite.

La deuxième technique consiste en une approche du cône d'entrée avec un angle de 45 degrés. De cette manière, l'expérimentation a montré que l'assemblage était réalisé sans encombre, pour autant que le bord du cône arrivait dans le creux du tube. Autrement dit, la tolérance autorisée équivaut à la moitié du diamètre intérieur, c'est-à-dire  $\pm 0.5$  mm au minimum. Ensuite, un mouvement de quelques millimètres est nécessaire pour empêcher le cône de ressortir du tube, un redressement est alors réalisé et l'enfoncement peut être mené avec les axes qui coïncident.

Cette technique peut éventuellement être couplée à un deuxième enfoncement de sécurité. Si le tube est enfoncé excessivement, une force de rappel se crée et le tube se repositionne de lui-même dans la bonne configuration.

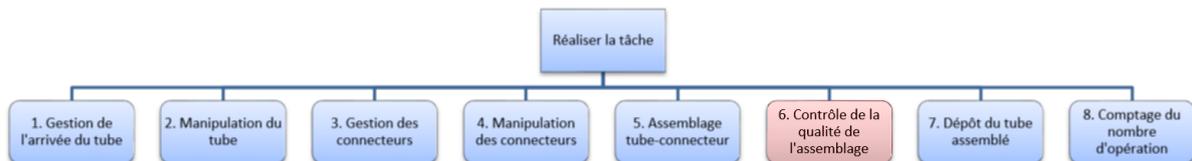
**Choix** C'est une nouvelle fois sur base des expérimentations que le choix a été effectué. Les connecteurs seront fixés dans une pince pneumatique. Plus précisément, chacun des

connecteurs sera centré à l'aide d'une encoche en V qui garantira le positionnement du cône de fixation du connecteur. Cela garantira que la cible pour le robot est toujours fixe et parfaitement connue (voir la représentation du système pneumatique A).

Le bras droit du robot s'occupera de l'assemblage. Grâce à son effecteur adapté, il positionnera l'extrémité du tube en face du connecteur. Le mouvement à réaliser est constitué d'un simple mouvement dans l'axe du connecteur, puis le préhenseur desserre sa prise sur le tube, se décale de 5mm en arrière, saisit à nouveau le tube et effectue une deuxième avance. Le tube est légèrement comprimé en fin d'opération mais la force de rappel générée dans le tube en silicone permet aux contraintes de se relâcher d'elles-mêmes.

Les expériences ont montré que ce mouvement permettait un assemblage valide. Il a été préféré aux autres techniques d'assemblage pour sa simplicité et son temps de cycle réduit. Cependant, le mouvement effectué par le robot peut être modifié si nécessaire.

## 5.8 Contrôle de l'assemblage



Au sein de la chaîne de production doit avoir lieu un contrôle à 100%. Cela signifie que la totalité des pièces doivent être contrôlées. Ce système permettra de vérifier si le connecteur est bien enfoncé des deux côtés du tube.

L'action à réaliser est une vérification du contact entre le tube et le connecteur (bien qu'un léger jeu est toléré) ou, de manière alternative, un test de présence du tube au niveau du connecteur.

De manière similaire à la recherche de l'extrémité du tube 5.5, il existe une panoplie de capteurs de présence permettant de vérifier s'il y a bien contact entre le connecteur et le tube.

Il est possible de réaliser la détection par contact, dans ce cas, le capteur doit être activé par le passage du tube sans empêcher celui-ci de se fixer correctement au connecteur. Il est possible de placer un tel capteur sur l'extrémité du tube (capteur fixé sur le préhenseur éventuellement) et de détecter la présence du connecteur lors de l'assemblage.

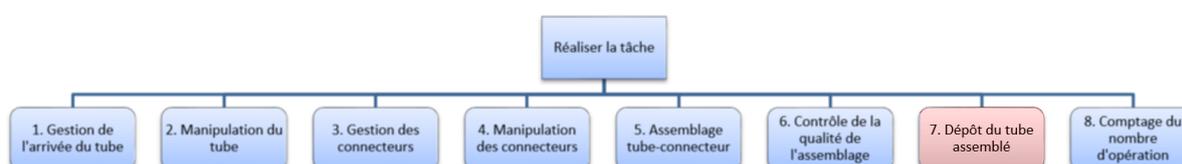
En plus des problèmes déjà cités pour les capteurs fonctionnant sur le contact (usure, contamination, risque d'abîmer le produit), leur précision dépend fortement de la position relative entre le capteur et les composants. De ce fait, il y a un risque de non détection en cas d'erreur de positionnement.

Dans les capteurs sans contact, on comparera à nouveaux les capteurs optiques (lumière

visible, infra-rouge, laser), à ultrasons ou capacitifs.

**Choix** La solution sélectionnée est un système de contrôle visuel. Ce choix a l'avantage d'être rapide, insensible à la flexibilité des matériaux et permet un contrôle même en cas d'imprécisions dans le positionnement des pièces à contrôler. Un avantage de ces systèmes est qu'ils peuvent fonctionner indépendamment du robot. Ce dernier pourrait se consacrer à la préhension des composants et à l'assemblage sans être mobilisé pour le contrôle.

## 5.9 Dépôt des tubes assemblés



Le dépôt des tubes doit être effectué par lot de 50, en décomptant les échantillons et les assemblages non conformes.

Les tubes doivent être relativement parallèles par lot et avoir leurs extrémités proches de manière à ce qu'un opérateur puisse venir essayer les éventuelles poussières sur le lot de 50 sans que les tubes ne soient emmêlés.

La solution technique est déjà orientée par le choix de l'utilisation d'un cobot. Par conséquent, la conception se limite à définir le type de support qui va contenir les tubes assemblés et la manière dont ceux-ci seront disposés.

**Support** Une première caractéristique de l'élément contenant les tubes assemblés est la manière dont les ceux-ci seront stockés.

Idéalement, les tubes devraient être tous parfaitement alignés et former un groupe compact pour faciliter le nettoyage. Un espace suffisant doit être disponible pour que la main de l'utilisateur puisse entourer le lot de tubes en une seule fois.

Il a déjà été noté à quel point le comportement des tubes est contraignant et qu'il est compliqué de garantir un bon alignement.

Toutefois, la pièce à manipuler n'est plus un tube en silicone, mais bien un tube assemblé. Il est possible d'utiliser les deux connecteurs pour faciliter le travail à condition de ne pas mettre l'assemblage en péril.

La première chose à remarquer est que le poids du connecteur accentue l'effet de la gravité. Cela permet un allongement du tube facilité verticalement.

Le second avantage exploitable est la facilité de manipuler le connecteur.

**Configuration** Trois éléments sont à prendre en compte pour le choix de la configuration de stockage :

- D’abord, les contraintes liées à l’utilisateur, c’est-à-dire la saisie facile des lots de tubes et le nettoyage aisé
- Ensuite, les forces appliquées au tube, c’est-à-dire, la gravité (qui agit verticalement) et la réaction du support sur le tube
- Enfin, le robot qui ne peut effectuer des opérations que dans son espace de travail

Le tube peut être placé de manière à être bien droit, peut former une boucle ou avoir une configuration aléatoire.

Un tube aligné est l’idéal pour permettre le nettoyage ; il est recommandé que le lot de tubes soit dans cette configuration ou qu’il soit aisé pour l’opérateur de les étendre lui-même. Les tubes peuvent avoir plusieurs orientations. La première idée est de déposer les tubes horizontalement, ce qui a l’avantage de permettre à ceux-ci de reposer de tout leur long sur une surface ou un guide. Cependant, le robot ne peut étendre horizontalement les tubes que si l’entièreté de ceux-ci se trouve dans l’espace de travail. La perte de place qui en découle n’est pas négligeable. Le stockage doit pouvoir contenir jusqu’à 1000 tubes assemblés. A Soit 20 lots de 50 tubes qui, même s’ils ne mesurent que 3mm de large, peuvent potentiellement faire 420 mm de long.

La deuxième idée est d’utiliser la gravité comme moteur pour attirer les tubes assemblés en dehors de l’espace de travail et ainsi libérer de l’espace. Pour ce faire, il est possible de laisser tomber les tubes, de les faire glisser ou rouler via l’utilisation d’un guide.

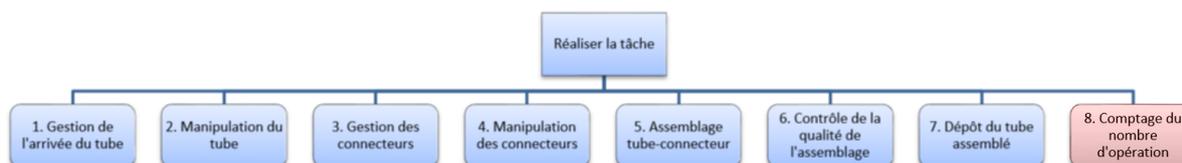
**Choix du support de dépôt** Le système choisi consiste en la construction d’un peigne dont chaque paire de dents sera suffisamment longue pour contenir la largeur de 10 connecteurs. Ce peigne sera disposé en oblique. De cette manière, si le tube assemblé est déposé au début d’une paire de dents, il glisse le long du peigne et se place à la suite des tubes précédemment déposés.

Le cobot sera chargé d’apporter un à un les tubes assemblés en les maintenant par un connecteur. Le glissement aura lieu grâce à un contact entre le connecteur et les dents du peigne. Les tubes sont suspendus et pendent verticalement. Ce système a été testé expérimentalement au laboratoire de l’entreprise. Il permet de limiter l’espace de travail utilisé pour le stockage. De plus, la taille des tubes n’influence pas le mode de stockage puisque la seconde extrémité des tubes est dans le vide, ce qui permet au système d’être

plus flexible dans le cas où la dimension des tubes serait modifiée.

Le fait d'avoir une très faible surface de contact (2 contacts linéiques en théorie) limite les problèmes de force de frottement et facilite la préhension des lots. En revanche, les tubes ne sont guidés que par leur point de support au niveau du connecteur et par la gravité. Leur alignement est donc relatif.

## 5.10 Comptage du nombre de tubes conformes



Le comptage du nombre d'opérations est aisé. En effet, le signal de la machine à découper peut être détecté, et, par conséquent, il est possible de connaître le nombre de tubes produits. Deux problèmes sont à relever :

1. Il faut retirer de ce nombre tous les tubes assemblés non conformes (dont le contrôle a donné un résultat négatif).

2. Il faut retirer de ce nombre tous les tubes qui ont été prélevés pour les échantillons. Il ne faut pas oublier que, hormis le contrôle réalisé pendant la production, il est possible qu'un contrôle supplémentaire soit réalisé par l'opérateur. Et, que certains tubes soient extraits des lots finaux.

Pour ce faire, l'opérateur a plusieurs options :

Soit, les tubes prélevés sont ceux déjà assemblés et déposés sur le peigne. L'opérateur prélève directement dans les lots. Ceux-ci comprendront un nombre insuffisant de tubes assemblés.

Soit, l'opérateur a la possibilité de le signaler au robot qu'il souhaite des échantillons via un bouton externe. Le robot place alors le tube suivant à part et cela n'affecte pas le nombre de tubes dans les lots.

Il n'y a pas de vérification du nombre de tubes après le dépôt. Si l'utilisateur prélève un tube dans le peigne, il y va de sa responsabilité de le remplacer.

# Chapitre 6

## Expérimentations

Les différents choix sont provisoires. Ils doivent être étayés par des faits. A cette fin, plusieurs tests ont été menés dans divers établissements.

### 6.1 Essais à l'Université de Liège

Les six premiers tests réalisés ont eu lieu à l'Université de Liège. Le robot ABB IR120, muni d'un préhenseur à trois doigts, a été utilisé de manière à étudier différentes méthodes d'assemblage. Chacun des tests a été réalisé sur les tubes de diamètre intérieur 1 et 1,5 mm et sur les trois longueurs de tube.

**Test n°1 :** Ce test avait pour but d'observer l'enfoncement, par le robot Sawyer, d'un connecteur dans un tube fixé dans un étau.

Le connecteur est maintenu dans par le more à trois doigts et réalise un mouvement horizontal jusqu'au tube.

**Observation du test n°1 :** La majorité des essais sont concluants mais les tubes de diamètre intérieur de 1mm sont beaucoup plus sensibles à une erreur sur la position de l'extrémité du tube. La longueur de tube en dehors de l'étau influence l'assemblage. En dessous de 3mm, le connecteur n'est pas enfoncé jusqu'au bout. Au dessus de 8mm, les tubes se plient lors du mouvement et l'assemblage est raté.

**Test n°2 :** Cette fois, toujours en utilisant le robot Sawyer, c'est le connecteur qui est fixe et le tube qui est maintenu par le robot. Le cône d'entrée du connecteur est placé vers le haut et le robot descend le tube verticalement.

**Observation du test n°2 :** L'assemblage réussit pour autant que le tube est bien saisi par le préhenseur. Il serait utile de pouvoir maintenir le tube moins serré. Les tubes de diamètre intérieur de 1mm fléchissent plus souvent que les autres.

**Test n°3 :** Jusqu'ici, le mouvement réalisé par le préhenseur était une simple translation.

Lors de ce test, le connecteur est fixé dans un étau et le tube est manipulé par la pince à 3 doigts. Le mouvement est décomposé en plusieurs phases. La première est une approche linéaire rapide. Une fois le tube en contact avec le connecteur, le robot continue le mouvement plus lentement et ajoute une rotation selon l'axe du connecteur.

**Observation du test n°3 :** l'effet escompté était une amélioration du taux de réussite en effectuant ce mouvement de vissage du tube sur le connecteur.

Il n'en est rien, les tubes ont tendance à se plier davantage qu'auparavant.

**Test n°4 :** Un autre mouvement est testé pour l'assemblage. Le tube est une nouvelle fois manipulé par le robot et le connecteur est maintenu par un étau.

Le mouvement se décompose en une première phase d'approche rapide, mais cette fois l'axe du tube arrive avec un angle de  $45^\circ$  par rapport à l'axe du connecteur. Puis le robot avance selon cette direction sur 2 mm avant d'aligner le tube sur l'axe du connecteur et d'effectuer l'enfoncement.

**Observation du test n°4 :** Le fait d'approcher le connecteur avec un angle de  $45^\circ$  diminue le nombre de tubes qui se plient. Le taux de réussite augmente, surtout pour les tubes de 1mm de diamètre intérieur.

Une deuxième batterie de tests a été effectuée à l'Université de Liège, en utilisant le robot Sawyer et une pince à deux doigts.

**Test n°5 :** Pour ce test, un connecteur est placé sur le tube. Ce connecteur est ensuite fixé dans un étau. Le robot vient saisir fermement le tube proche du connecteur puis s'ouvre légèrement et effectue un mouvement horizontal.

**Observation du test n°5 :** L'objectif était de voir s'il était possible de parcourir le tube de manière à chercher son extrémité à l'aide d'un capteur. Les conclusions de cette expérience est qu'il est tout à fait possible de jouer sur la force de serrage pour parcourir le tube sans risquer de l'arracher du connecteur.

**Test n°6 :** La seconde expérience consiste à venir déposer 10 tubes assemblés sur un peigne métallique.

**Observation du test n°6 :** Cette tâche est réalisée sans problème par le robot. Les tubes s’emmêlent légèrement mais il est aisé d’extraire le lot. Aucun problème de non glissement n’a été constaté.

## 6.2 Essais chez ABB

Trois autres essais ont été réalisés à Zaventem, chez le fournisseur ABB, de manière à tester le robot sélectionné.

Trois points ont été vérifiés :

- Le premier était la détection des connecteurs. Ceux-ci ont été disposés sur une surface irrégulière noire et soumis à deux lumières : une naturelle latéralement et une artificielle provenant du plafond.
- Le deuxième test vérifiait la préhension des connecteurs par le robot.
- Le dernier test était l’assemblage en lui-même. Un bras du robot maintenait un connecteur tandis que l’autre bras tenait l’extrémité du tube.

**Observations :** Les deux premiers tests étaient concluants. En quelques minutes, la caméra a été paramétrée (luminosité, image de référence, tolérance, etc.). Malgré les conditions non optimales, la main du robot YUMI a été capable de repérer la position et l’orientation des connecteurs et de venir les saisir.

La main a aussi été capable de détecter l’extrémité des tubes.

Le dernier test, en revanche, n’a pas été correctement réalisé par le robot. La position à atteindre par le robot n’était pas suffisamment précise pour réaliser l’assemblage. Soit le tube s’est plié lors de l’enfoncement du connecteur, soit le connecteur passait à côté du tube. Il faudra donc veiller à être précis pour définir les positions.

## 6.3 Essais chez Médi-Line

Toutes les observations sur le comportement des tubes et sur le fonctionnement de la machine à découper ont été réalisées chez Médi-Line.

Les différentes configurations lors de l’assemblage ont été analysées comme illustré ci-dessous. Ces observations ont été utilisées pour définir les tolérances sur la coaxialité lors

de l'assemblage et ont donc été importantes pour le choix du cobot. En effet, l'assemblage n'est effectué correctement que si une partie du cône d'entrée du connecteur est en face du trou du tube. Il faut donc une erreur inférieure à 0.75 mm sur la coaxialité.A

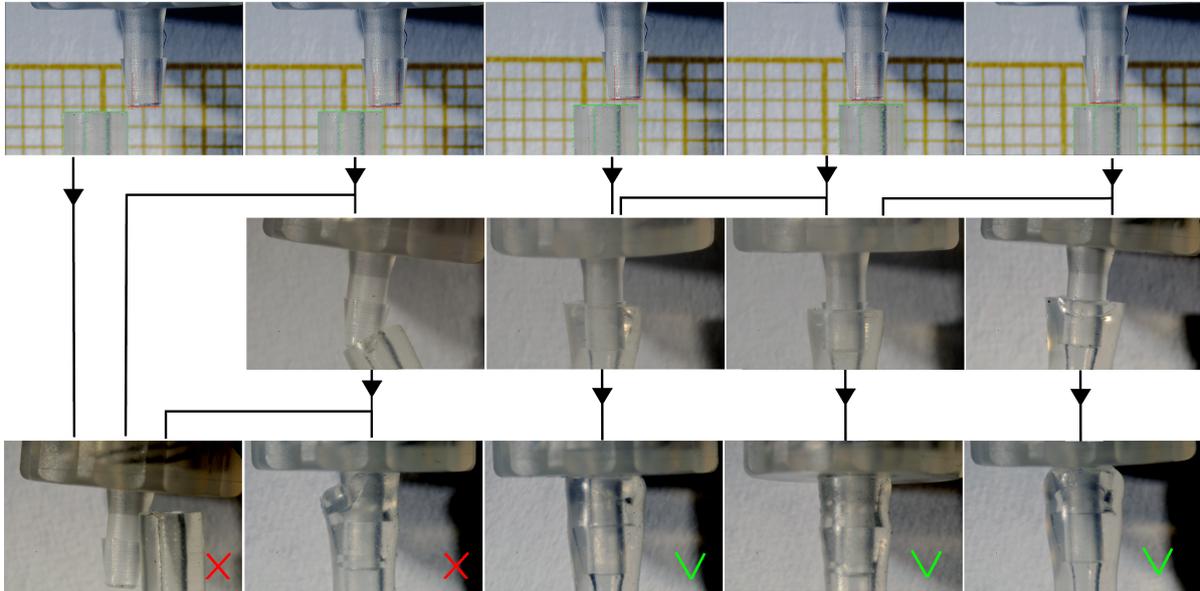


FIGURE 6.1 – Etude des configurations du tube lors de l'assemblage

## 6.4 Essais chez les différents fournisseurs

Enfin, différents tests ont été réalisés par des personnes extérieures. Cinq fournisseurs, Balluff, Turck, Fortop, Keyence et Vistalink sont repartis avec des échantillons pour tester différents capteurs et caméras de manière à vérifier quels dispositifs fonctionnaient pour les trois tâches suivantes :

Le repérage des connecteurs

La détection de l'extrémité d'un tube

Le contrôle de l'assemblage

**Observations :** Chacun des fournisseurs a répondu de la même manière aux problèmes. Selon eux, la façon la plus simple pour réaliser le contrôle de l'assemblage est d'utiliser un capteur de vision 2D. Certains préconisent différents accessoires (système "backlight", ajout d'un objectif sur le capteur, support réglable, écran de visualisation externe, etc.). Le mode de détection du contact varie cependant d'un fournisseur à l'autre. Certains détectent une épaisseur, d'autre un contour, d'autre encore l'aire d'une surface. Il a également été montré qu'un capteur laser est adapté à la détection des tubes en silicone.

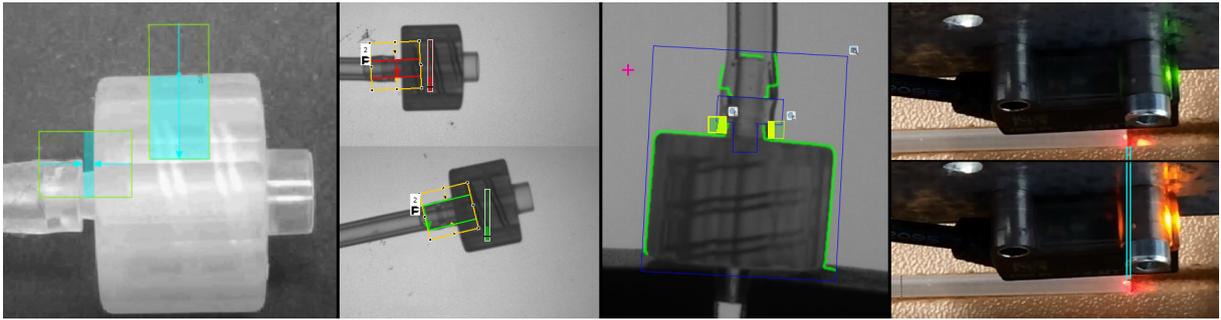


FIGURE 6.2 – Essais réalisés par les fournisseurs

## 6.5 Plans de conception

Lors des différents tests, certains éléments ont dû être usinés. Cette étape a été réalisée au sein de l'entreprise Medi-Line. Il s'agit des doigts du préhenseur de l'IR120, des guides, des éléments permettant la vérification du système Venturi et des plaques pour la pince du robot Saywer. Les plans de ces différentes pièces sont disponibles en Annexes A.

# Chapitre 7

## Solution globale

### 7.1 Récapitulatif des composants

L'ensemble des choix est réalisé, les composants du système sont :

- Le **cobot à deux bras YUMI** qui permettra la manipulation des connecteurs et des tubes grâce à **deux pinces électriques** présentant deux doigts personnalisés.
- La gestion de l'arrivée du tube sera réalisée grâce à **une buse pneumatique** fixée sur un **statif**, le tube sera projeté sur une surface de référence liée à un **vérin pneumatique rotatif**. La présence du tube sera contrôlée par un **capteur laser**. Le vérin rotatif permettra de dégager l'espace pour faciliter l'extraction du tube.
- Lors de l'assemblage, les connecteurs seront placés un à un dans deux **vérins pneumatiques linéaires**.
- La recherche de la seconde extrémité sera réalisée par le robot, pour ce faire, un second **capteur laser** sera fixé sur le préhenseur du bras droit.
- L'assemblage sera contrôlé par un **capteur de vision**, un seul capteur est suffisant pour effectuer le contrôle des deux extrémités. Celui-ci est fixé sur un **support**.
- Les connecteurs sont stockés dans une **trémie vibrante**. Lorsqu'il n'y a plus de connecteur, elle disperse une dizaine de connecteurs sur une **table vibrante**. Une **caméra 2D** fixée sur son **support** active la trémie et la table lorsqu'il n'y a pas de connecteur disponible.
- Si l'assemblage est défectueux, le tube mal assemblé est déplacé dans un **bac** prévu

à cet effet. Si l'assemblage s'est bien déroulé, en revanche, les tubes sont déposés par le bras gauche sur un **peigne métallique**.

- Enfin, un élément nécessaire au système n'a pas encore été évoqué. Il s'agit de la **table** sur laquelle seront fixés les différents supports.

## 7.2 Étapes de fonctionnement

Le fonctionnement du système est repris de manière schématique dans un Grafcet, réalisé en se basant sur la référence [26]

Le grafcet peut se lire en trois parties majeures : la partie manipulation du tube (en vert), la partie manipulation des connecteurs (en bleu), la partie alimentation des connecteurs (en orange).7.2

**Manipulation du tube :** L'action démarre par la préparation du bras droit à la gestion de l'arrivée du tube. Si un signal de coupe est émis et que le bras est en position, la buse pneumatique se met en marche et aspire le tube qui est projeté sur une surface de référence. Un capteur laser vérifie si ce tube est bien détecté. Si c'est le cas, le bras droit du robot saisit le tube. Le vérin rotatif libère alors la surface de référence. Le bras droit déplace le tube et, si le connecteur est en position, réalise le premier assemblage. Il s'en suit un contrôle par le capteur de vision externe qui informe le système si l'opération peut continuer ou si le bras droit doit placer le tube dans le bac des rebuts.

Si l'assemblage est validé, le bras se déplace le long du tube et un capteur laser placé sur son préhenseur détecte la deuxième extrémité.

Pour autant que le deuxième connecteur soit en place, le bras réalise le second assemblage. Celui-ci est également contrôlé et le bras droit peut retourner en position initiale. Le résultat du contrôle commande le bras gauche qui va, soit placer le tube dans le bac des rebuts, soit le déposer sur le peigne et incrémenter le nombre de tubes assemblés.

**Manipulation des connecteurs** La première étape commence par la saisie d'un connecteur qui ne peut être effectuée que si un connecteur est présent sur la table vibrante.

Une fois l'opération effectuée, le bras gauche déplace le connecteur et vient le placer dans la pince pneumatique 1. Le bras repart et le système ferme la pince pneumatique. Pour autant qu'un deuxième connecteur soit disponible sur la table, le bras gauche le saisit, se déplace vers la pince pneumatique 2 et l'y dépose.

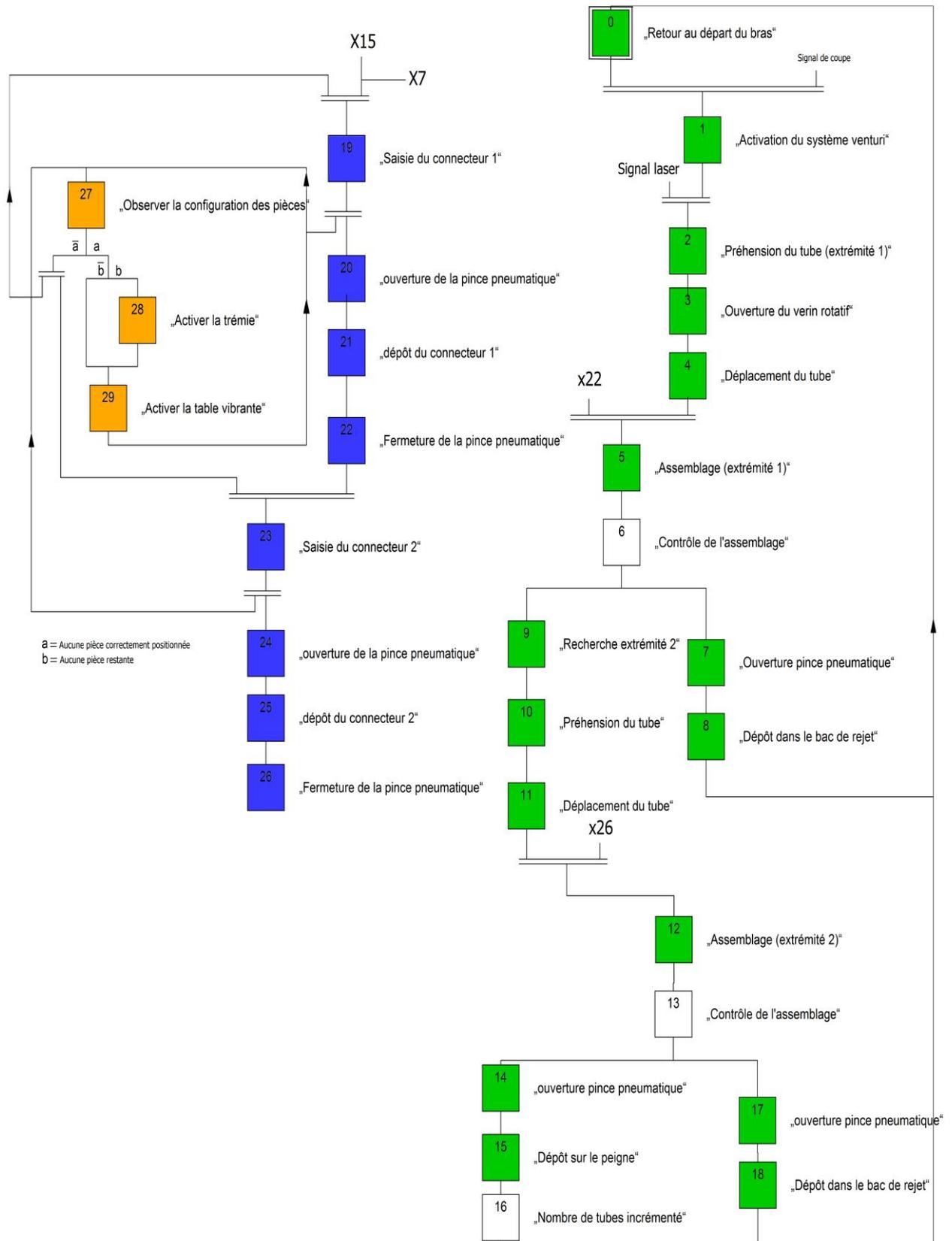
A nouveau, il libère l'espace et la pince pneumatique se referme. Après cette étape, le bras gauche est disponible pour déplacer le tube assemblé vers le peigne ou le bac à rebuts. Une fois le tube déposé, le bras peut recommencer le cycle.

**Alimentation en connecteurs** L'alimentation en connecteur fonctionne en système de boucle assez simple. A chaque début de cycle du bras gauche et à chaque fois qu'un connecteur est saisi par celui-ci, le sous-système vérifie si un connecteur est disponible sur la table vibrante. Si ce n'est pas le cas mais que des connecteurs sont présents sur la table, il active la table vibrante pour repositionner les connecteurs et vérifie si un de ceux-ci est désormais disponible. S'il n'y a plus de connecteur, le sous-système active la trémie puis vérifie si un connecteur est disponible. La boucle s'effectue jusqu'à ce qu'un connecteur soit trouvé. Après 20 boucles, un signal d'erreur peut être émis.

**Autres sous-systèmes** Le contrôle est effectué par un capteur de vision qui transmet une information digitale lorsque le contrôleur lui demande si l'assemblage est correctement réalisé. Le nombre de tubes assemblés est, quant à lui, déterminé par le software lors du dépôt sur le peigne.

**Contrôle** La dernière étape consiste en une réflexion sur le contrôle et la partie électronique du système. Le contrôleur utilisé est celui du cobot. Il permet de contrôler les deux bras simultanément et de recevoir 8 entrées et 8 sorties digitales. Ces ports de communication permettent de communiquer avec les deux caméras (pour le contrôle des tubes et pour le repérage des connecteurs). Ils permettent également de recevoir le signal de coupe de la machine à découper, mais pas de la commander.

# Grafcet du système



### 7.3 Fonctionnement journalier

Différentes options sont envisageables pour le fonctionnement global journalier : soit, la machine à découper produit en continu et le robot travaille en continu également, ce qui sous-entend qu'un opérateur doit venir vider les stocks avant que le peigne ne soit totalement rempli. Pour éviter les oublis, un signal sonore ou lumineux peut être ajouté de manière à rappeler à l'opérateur qu'il vienne récupérer les tubes. Ce dernier pourra signaler au robot que les stocks ont été vidés en appuyant sur un bouton.

Soit, la machine à découper fonctionne en continu mais le robot s'arrête après avoir produit sa capacité maximale (1000 tubes), dans ce cas, les tubes tombent dans un bac et devront être assemblés manuellement.

Soit, la machine à découper et le robot produisent l'équivalent de 1000 tubes puis s'arrêtent. Dans ce cas, l'opérateur devra relancer les deux machines une fois la production terminée. Il prendra également soin de vider le peigne et de réapprovisionner le système en connecteurs si besoin.

### 7.4 Estimation du coût

L'estimation du prix des composants a été réalisée sur base des devis envoyés par différents fournisseurs potentiels. Les prix des composants étaient très semblables d'une offre à l'autre. Le suivi après-vente et le degré d'assistance à l'installation, en revanche, étaient fort variables selon les fournisseurs. Dans l'estimation du coût, seul le prix des composants sera comptabilisé. En effet, l'entreprise possède suffisamment de compétences internes pour l'assemblage, l'installation et la mise en place du système.

Voici un tableau récapitulatif reprenant les différents composants, leur prix et le nom du fournisseur. Les prix sont fixés hors TVA et le transport est inclus.

Nom du composant	Prix en €	Fournisseur suggéré
Robot YUMI	39 980	ABB A
Buse pneumatique	323,90	ALPHA AUTOMATISMES Sarl
Fixation du Venturi	24,42	sordalab
Pinces électriques	10 750	ABB
Doigts personnalisés	60	Médi-Line
Vérin rotatif	217,30	SMC
2 Vérins linéaires	362.98	SMC
Capteur de vision	800	Balluf A
Support capteur	100	Balluf
2 capteurs laser	200	Balluf
Trémie vibrante	1690	TUMAC A
Table vibrante	1420	TUXEL
Caméra 2D	7500	Cognex
Support caméra	20	Médi-Line
Peigne métallique	120	Médi-Line
Bac alimentaire	10	Manutan
Câbles divers	100	Balluf
Table	400	pulsiva
Total :	63 000	<i>approximation</i>

Les éléments fabriqués par l'entreprise Médi-Line ont été estimés en fonction du temps d'usinage et du volume de matière. Les pinces électriques sont capables d'aspirer des pièces et l'une d'entre elles possède une caméra intégrée. Ces fonctionnalités supplémentaires augmentent le prix des préhenseurs et ont été ajoutées à la demande du client pour augmenter la gamme de tâches que pourra effectuer le robot.

Comme mentionné précédemment, seul le prix des composants a été pris en compte. A cela s'ajoute le coût du personnel lors de l'installation, la mise en route et la validation du système. Il est probable qu'une formation du personnel sur le logiciel du robot vienne également augmenter le coût total (3 x 2 250€).

# Chapitre 8

## Analyse de risques

L'analyse de risques a été dressée avec la solution technique sélectionnée. Cette analyse prend en considération, d'une part, les dégâts potentiels sur le produit et le système d'assemblage, d'autre part, les dommages que pourrait subir le personnel. La méthode utilisée pour l'analyse de risques est la méthode AMDEC (analyse des modes de défaillance, de leur effet et de leur criticité). Le fonctionnement est basé selon la norme **NF EN 60812** d'août 2006. [22] Chaque composant du système est responsable d'une ou plusieurs fonctions. Chacune de ces fonctions possède des risques de pannes potentielles causées par plusieurs causes possibles (d'origine humaine, environnementale ou à cause de problème au niveau des composants). Chacune de ces causes a ensuite un effet qui peut être situé au niveau du système, du produit ou de la sécurité des opérateurs.

Il est alors possible de quantifier les risques. Tout d'abord, la probabilité de chaque cause est estimée. Cette étape est délicate puisque bien souvent les données font défaut. Les nombres avancés ont pour origine l'historique des défaillances qui sont déjà apparues chez Medi-Line. Quand cette valeur est absente, les nombres ont été fixés pour aller dans le sens de la sécurité.

L'étape suivante est la quantification de la dangerosité de la défaillance selon une échelle propre à la société.

La combinaison de ces deux informations est synthétisée par l'indice de criticité. Si cet indice dépasse une valeur seuil définie par une échelle interne, le système est invalide et des solutions pour diminuer la gravité ou la probabilité d'occurrence de la défaillance doivent impérativement être mises en place. Il faut en plus veiller à ce que ces solutions n'engendrent pas de risques supplémentaires. Une fois l'ensemble des risques qualifié d'acceptable, le système peut être mis sur pied.

Étape de réalisation de l'analyse :

1. Listing de toutes les étapes du processus.
2. Identification des dangers potentiels.

3. Pour chaque danger, identification des causes potentielles.
4. Estimation de la probabilité d'apparition de chaque danger.
5. Estimation du degré de sévérité de chaque danger.
6. Mesure du risque en combinant la probabilité et la sévérité du danger.
7. Pour chaque risque non acceptable, établissement d'une mesure de réduction du risque.
8. De manière itérative, pour chaque nouvelle mesure introduite, les points 2 à 7 sont répétés à nouveau jusqu'à ce que tous les risques du processus soient acceptables.

Toutes les échelles de risques sont propres au système.

Overall Use Risk Management of Prototype V0.7 for clinical study

Legal Manufacturer Medi-Line

Rues des Gardes-Frontière 5  
4031 Angleur



Overall Use Risk Management of the assembling tube-connector system

N°	Intended use / Characteristics	Known/foreseeable hazard identification (source of the risk)	Potential cause	Estimation of the risk for hazardous situation (effect of the hazard)	OC C V	Risk evaluation	Risk control measure	Recording of the appropriate measure	O C V	SE C V	Acceptability of the residual risk	New hazard?	O C V	SE C V	Evaluation of the overall residual risk	Production/post-prod information	#	
<b>Ce système a pour but l'assistance à l'assemblage tube-connecteur</b>																		
1																		
2	Utilisation liée à une procédure normale de l'assemblage tube-connecteur	Risques liés à une procédure normale de l'assemblage tube-connecteur	Toutes les causes d'une procédure normale de l'assemblage tube-connecteur	Toutes les conséquences d'une procédure normale de l'assemblage tube-connecteur	NA NA	NA	Maitrise du risque par l'expérience et la formation de l'opérateur	formation de l'opérateur et opération de contrôle	N NA A	NA NA A	NA	No	N NA A	NA NA A	NA			Pas capable évaluer ce risque- donné à titre informatif. Ne fait pas partie du device
3	Coupe du tube par la machine Yvroud	Mauvais type de tube	Erreur de sélection du tube en amont	Ensemble du lot non-conforme	2 8	16	Risque acceptable	Vérification systématique de la bobine utilisée en début d'opération	1 8	8	8	No	N NA A	NA NA A	NA			
4	Coupe du tube par la machine Yvroud	Coupe partielle	Problème de lame ou d'actionnement de la lame	Tube non détaché, production d'unités non-conformes	2 8	16	Vérification de la coupe sur un échantillon test avant le démarrage du lot	Doit savoir exécuter une coupe à la machine Yvroud	1 8	8	8	No	N NA A	NA NA A	NA			
5	Coupe du tube par la machine Yvroud	Erreur de longueur du tube	Glissement du tube sur les tapis, imprécision du système de découpe	Tube non conforme	3 7	21	Estimation de la longueur du tube sera réalisée lors de la recherche de la seconde extrémité	Estimation de la longueur des tubes par le système	3 5	15	15	No	N NA A	NA NA A	NA			
6	Coupe du tube par la machine Yvroud	Pas de sortie du tube	Bobine terminée, nœud dans les tubes créant un blocage, autre	Arrêt de l'activité	3 6	18	Risque acceptable. Toutefois, un signal d'alarme sera émis pour prévenir l'opérateur de l'arrêt du système. Ce signal sera envoyé suite à la non-détection des tubes par le système optique.	Détection de la présence des tubes par le système après la coupe (réalisé dans la gouttière)	3 5	15	15	No	N NA A	NA NA A	NA			
7	Coupe du tube par la machine Yvroud	Présence d'un doigt de l'opérateur lors de la coupe	Opérateur ne suit pas les consignes de sécurité et blocage de la machine	Coupe modérée potentielle	1 8	8	Risque acceptable. L'accessibilité à l'endroit de coupe est fortement réduite		1 8	8	8	No	N NA A	NA NA A	NA			
8	Réception du tube	Réception ratée	Tube mal positionné, système robot mal positionné	Tube pend ou tombe, opération dans le vide, unité comptabilisée non produite	3 7	21	Système optique permettra de vérifier la présence du tube dans les opérations suivantes.	Détection de la présence des tubes par le système après la réception (réalisé dans la gouttière)	3 5	15	15	No	N NA A	NA NA A	NA			
9	Réception du tube	Mauvaise réception	Tube mal positionné, système robot mal positionné	Tube mal positionné pour la suite de l'opération	3 7	21	Risque acceptable. La gouttière corrigera le positionnement erroné en grande partie.	Présence d'une gouttière	2 7	14	14	No	N NA A	NA NA A	NA			
10	Réception du tube	Présence d'un doigt de l'opérateur lors de la préhension du tube	Opérateur vient volontairement mettre son doigt ou chute malencontreusement à ce moment	Pincement léger du doigt	1 4	4	Risque acceptable.	Risque acceptable.	1 4	4	4	No	N NA A	NA NA A	NA			

Overall Use Risk Management of Prototype V0.7 for clinical study

11	Retrait du tube hors de la buse	Mauvais retrait	Tube mal positionné, système robot mal positionné	Tube griffé à l'extérieur	2	7	14	Risque acceptable.		2	7	14	No	N/A	N/A	NA
12	Retrait du tube hors de la buse	Contact entre le système robot et l'opérateur	Opérateur ne suit pas les consignes de sécurité et chute malencontreusement à ce moment	Choc léger contre la machine, perturbation du système	2	5	10	Risque acceptable.		2	5	10	No	N/A	N/A	NA
13	Fixation du premier connecteur	Fixation ratée	Tube mal positionné, système robot mal positionné, connecteur mal positionné	Connecteur non évacué avec le tube, tube non fixé pour la suite de l'opération, assemblage raté	2	7	14	Risque acceptable. Si fréquence d'erreur plus importante, ajouter étape de contrôle visuel de la présence du connecteur.		2	7	14	No	N/A	N/A	NA
14	Fixation du premier connecteur	Fixation incomplète	Tube mal positionné, système robot mal positionné, connecteur mal positionné	Assemblage non-conforme	2	7	14	Risque acceptable. Un contrôle rapide sera réalisé lors du nettoyage	Vérification rapide de l'enfoncement des tubes lors du nettoyage par l'opérateur	2	5	10	No	N/A	N/A	NA
15	Fixation du premier connecteur	Coincement d'un doigt de l'utilisateur	Opérateur vient volontairement mettre son doigt ou chute malencontreusement à ce moment	Pincement léger du doigt	1	4	4	Risque acceptable.		2	7	14	No	N/A	N/A	NA
16	Détection de la deuxième extrémité	Non détection de l'extrémité	Tube absent ou mal positionné, système de vision défectueux	Arrêt de l'activité	3	6	18	Risque acceptable. Envoi d'un signal d'alarme pour prévenir l'opérateur		3	5	15	No	N/A	N/A	NA
17	Détection de la deuxième extrémité	Détection erronée de l'extrémité	Système de vision défectueux	Préhension du tube au mauvais endroit ou préhension dans le vide et tube non évacué, suite des opérations compromise	2	7	14	Risque acceptable. Si fréquence d'erreur plus importante, ajustage des paramètres du système de vision		2	7	14	No	N/A	N/A	NA
18	Détection de la deuxième extrémité	Choc de l'opérateur	Opérateur ne suit pas les consignes de sécurité et chute malencontreusement à ce moment	Perturbation du système et dommage superficiel potentiel	1	7	7	Risque acceptable.		1	7	7	No	N/A	N/A	NA
19	Détection du connecteur	Non détection du connecteur	Connecteurs absents, système de vision défectueux	Arrêt de l'activité	2	6	12	Risque acceptable. Envoi d'un signal d'alarme pour prévenir l'opérateur		2	5	10	No	N/A	N/A	NA
20	Détection du connecteur	Détection erronée du connecteur	Système de vision défectueux	Mauvaise préhension du connecteur ou préhension dans le vide, suite des opérations compromise	2	7	14	Risque acceptable. Les erreurs de préhension seront partiellement corrigées lors du positionnement du connecteur.		2	7	14	No	N/A	N/A	NA
21	Positionnement du connecteur	Mauvais positionnement du connecteur	Mauvaise préhension du connecteur ou imprécision du système robot	Assemblage tube-connecteur compromis	3	7	21	Positionnement guidé mécaniquement pour palier aux erreurs de précision		2	7	14	No	N/A	N/A	NA
22	Fixation du deuxième connecteur	Fixation ratée	Tube mal positionné, système robot mal positionné, connecteur mal positionné	Connecteur non évacué avec le tube, tube non fixé pour la suite de l'opération, assemblage raté	2	7	14	Risque acceptable. Si fréquence d'erreur plus importante, ajout d'une étape de vérification de l'évacuation du connecteur.		2	7	14	No	N/A	N/A	NA

Overall Use Risk Management of Prototype V0.7 for clinical study

23	Fixation du deuxième connecteur	Fixation incomplète	Tube mal positionné, système robot mal positionné, connecteur mal positionné	Assemblage non-conforme	2	7	14	Risque acceptable. Un contrôle rapide sera réalisé lors du nettoyage	Vérification rapide de l'enfoncement des tubes lors du nettoyage par l'opérateur	2	5	10	No	N/A	NA	
24	Fixation du deuxième connecteur	Coïncement d'un doigt de l'utilisateur	Opérateur vient volontairement mettre son doigt ou chute malencontreusement à ce moment	Pincement léger du doigt	1	4	4	Risque acceptable.		2	7	14	No	N/A	NA	
25	Contrôle de l'assemblage	Faux positif	Erreur du système de contrôle	Tube rejet alors qu'il était conforme	2	5	10	Risque acceptable.		2	5	10	No	N/A	NA	
26	Contrôle de l'assemblage	Faux négatif	Erreur du système de contrôle	Tube accepté alors qu'il est non-conforme	2	7	14	Risque acceptable. Toutefois, l'opérateur effectuera un contrôle visuel rapide lors du nettoyage pour diminuer cette probabilité	Vérification rapide de l'enfoncement des tubes lors du nettoyage par l'opérateur	2	7	14	No	N/A	NA	
27	Dépôt du tube	Perte du tube durant le déplacement	Mauvaise préhension du tube	Tube tombe, unité non conforme et unité comptabilisée non produite	2	7	14	Risque acceptable. Si cette probabilité augmente, ajout d'une étape de comptage par l'opérateur		2	7	14	No	N/A	NA	
28	Dépôt du tube	Tubes connectés emmêlés	Torsion des tubes au moment du dépôt	Difficulté supplémentaire de la suite des opérations	2	5	10	Risque acceptable.		2	5	10	No	N/A	NA	
29	Nettoyage des tubes	Chute d'un ou de plusieurs tubes	tube emmêlés, opérateur distrait	Perte d'unité, production conforme mais détecté	1	7	7	Risque acceptable.		1	7	7	No	N/A	NA	
30	Nettoyage des tubes	Mauvais nettoyage, résidu présent sur les tubes	Mauvais produit nettoyant, produit contaminé, lingette contaminée	Lot de produits non-conforme et non-détecté	2	7	14	Risque acceptable. Si probabilité augmente, formation de l'opérateur plus poussée sur l'étape de nettoyage.		2	7	14	No	N/A	NA	
31	Nettoyage des tubes	Produit dans l'œil ou ingestion de produit	Chute de l'opérateur ou comportement irresponsable	Risque de dommage relativement important pour l'opérateur	1	8	8	Risque acceptable. Si probabilité augmente, formation de l'opérateur plus poussée sur l'étape de nettoyage.		2	7	14	No	N/A	NA	
32	Emballage tube dans un double emballage	Mauvais choix des emballages	Identification des emballages erroné	Lot de produit non-conforme et non-détecté	1	8	8	Risque acceptable. Sensibilisation de l'opérateur sur cette étape.		1	8	8	No	N/A	NA	

Author: C.Felten 22/02/2017  
Review: /

Update: C. Felten 23/05/2017, édition 1.8

# Chapitre 9

## Modélisation et trajectoire du robot

### 9.1 Modélisation 3D

La modélisation des différents éléments est utile de plusieurs manières. Elle permet tout d'abord d'avoir une bonne représentation du système via une vue d'ensemble. Cela permet également de vérifier si aucune erreur flagrante n'a été commise au niveau des dimensions.

L'ensemble des composants a été modélisé via le logiciel *CATIA*, fourni par l'Université de Liège. Ces pièces sont ensuite importées dans le logiciel *Robotstudio* de manière à visualiser le robot dans son environnement.

Voici, à titre illustratif, ce que donne la modélisation.

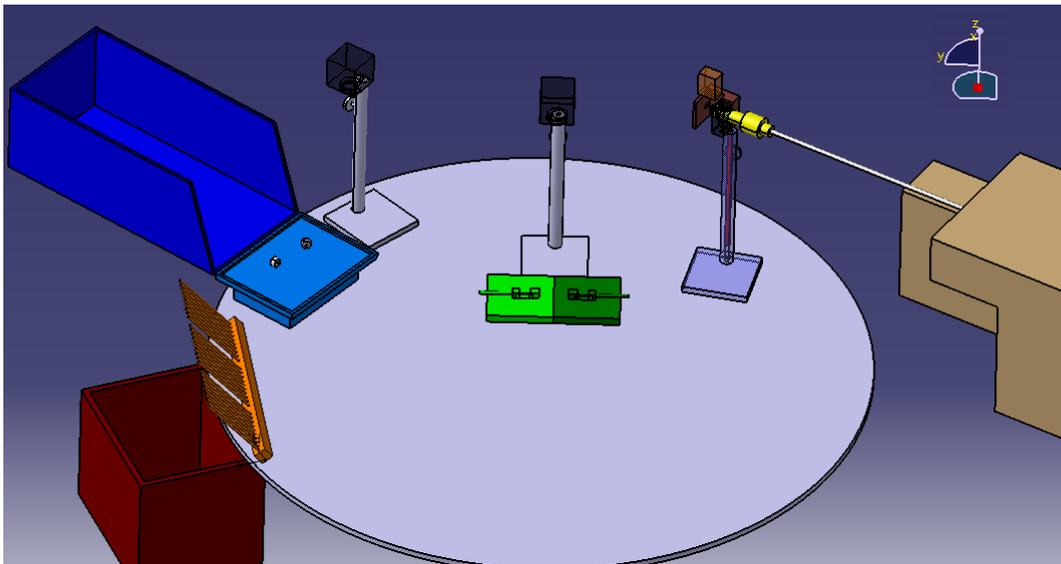


FIGURE 9.1 – Modélisation 3D des éléments de l'environnement du robot

## 9.2 Simulation des trajectoires

Une fois l'environnement du robot créé, le logiciel permet de simuler l'entièreté de la tâche et de pré-programmer les trajectoires que devra effectuer le robot. Plusieurs agencements des composants et plusieurs mouvements du robot ont ainsi été testés virtuellement de manière à faciliter la tâche à accomplir et à éviter les collisions et les singularités.

**Définition** Singularité : Une configuration est singulière si elle correspond à une redondance locale (on perd un ou plusieurs degrés de liberté à l'effecteur). [17]

Il existe une infinité de trajectoires possibles pour réaliser la tâche. Pour déterminer laquelle choisir, le temps de cycle sera utilisé comme critère d'optimisation et la sécurité du système, comme du personnel, fera office de contrainte qui limitera l'ensemble des trajectoires et mouvements possibles du robot.

Les vitesses, les accélérations, la tolérance en position et la méthode d'interpolation entre les points de passage sont autant de paramètres qui vont également faire varier le choix de la solution finale.

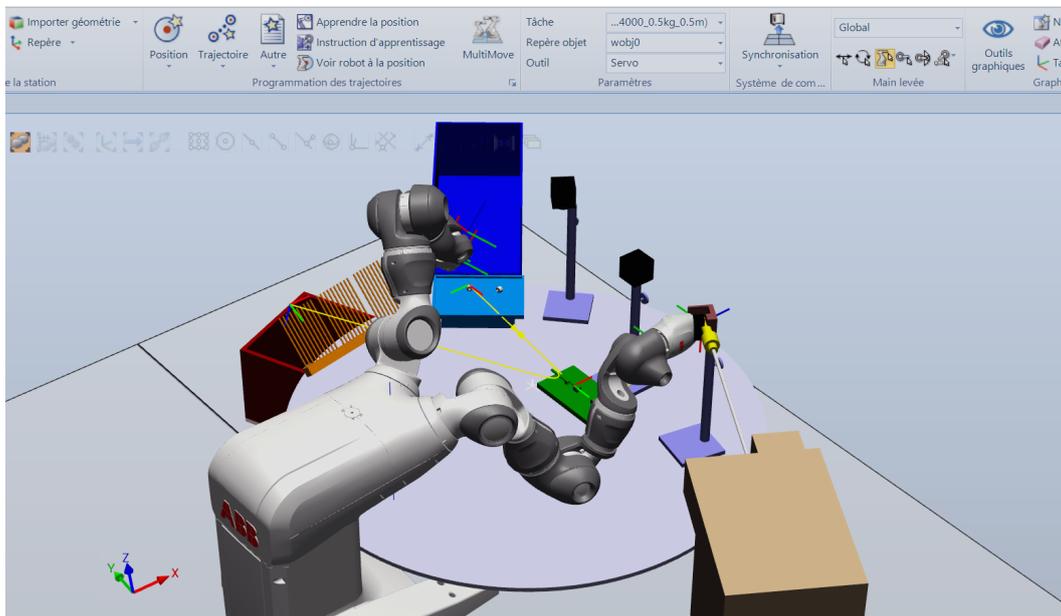


FIGURE 9.2 – Modélisation des trajectoires effectuées par les bras du robot

# Chapitre 10

## Conclusion

La tâche était de concevoir un système qui, moyennant l'utilisation d'un robot collaboratif, permettait l'assemblage automatique d'un tube et de deux connecteurs. Étape par étape, une logique de résolution a permis à la solution de converger vers un système robuste, adapté à son environnement et en accord avec les besoins du client, la société Médi-Line.

Le contexte du projet et la stratégie de résolution sont définis. Le besoin est ensuite explicité. Il permet de traduire le système en termes de fonctions et de contraintes et d'établir la séparation entre éléments du système et éléments faisant partie de son environnement.

Chacune des fonctions et des contraintes seront prises en compte pour déterminer les composants qui formeront la partie hardware du système d'assemblage.

Pour ce faire, un ensemble de solutions techniques envisageables ont été analysées et comparées entre elles. Le choix des composants a été effectué de manière logique, en se basant sur les caractéristiques des différentes solutions ou en se basant sur des essais. Ces tests ont été réalisés à l'Université de Liège, dans les laboratoires de l'entreprise Medi-Line ou chez des fournisseurs de composants.

Le fonctionnement d'ensemble a alors été étudié et synthétisé dans un Grafcet.

Pour respecter les normes internes de l'entreprise et les lois, une analyse de risques a été menée de manière à s'assurer que le système ne puisse mettre en danger ni le personnel, ni le matériel de production, ni les produits.

Enfin, la dernière étape a été la modélisation du système dans un espace à 3 dimensions et la simulation des trajectoires qui devront être effectuées par le robot.

Le système final est constitué d'un robot à deux bras, le *YUMI*. Le bras droit s'occupera de la manipulation des tubes. Ceux-ci sont amenés par aspiration sur une surface de référence, puis saisis par le cobot avant d'être assemblés aux connecteurs. Un système

de contrôle par capteur de vision permettra de vérifier si l'assemblage est conforme aux spécifications du client. Le bras gauche, quant à lui, s'occupera de la manipulation des connecteurs et du dépôt des tubes assemblés. Le fait que les deux bras puissent fonctionner indépendamment diminue considérablement le temps de cycle. L'alimentation en connecteur est gérée en parallèle grâce à une caméra 2D et une table vibrante. Pour finir, les tubes conformes sont placés par rangée de 10 sur un peigne métallique qui facilite leur préhension par l'opérateur.

Différentes améliorations pourraient être effectuées pour perfectionner le projet. Le système ne tient, par exemple, pas compte de la maintenance, ni de la fin de vie du produit. Le nombre de solutions techniques comparées peut également être agrandies aux technologies nouvelles ou moins répandues. Enfin, de nombreux tests n'ont pas pu être effectués ; cela est dû au fait que le robot sélectionné n'a pas pu être amené en salle de production ; pour aller plus loin, une location du robot est doit être envisageable.

Ce travail sera poursuivi dans le futur. En effet, l'entreprise désire que le système soit opérationnel dans le courant de l'année 2018.

Les prochaines étapes à réaliser sont la planification du travail, l'achat du matériel, l'assemblage du système, la validation du système, puis la période de production. Le robot sera reprogrammé pour chaque nouveau type de produit jusqu'à atteindre sa fin de vie et, éventuellement, son recyclage.

# Bibliographie

- [1] CA Bordeaux, 31 janvier 2005, sté Michel Saunier c/ Sté ATEVI, Jurisdata n 2005-262987 ; JCP G, 2007, doct. 101, obs. CH. Caron ; Comm. com. électr. 2005, comm. 84.
- [2] Dictionnaire en ligne. <http://academie-des-sciences-commerciales.org/dictionnaire-new/definition.php?id=3586>.
- [3] Images. <http://www.fanuc.eu/be/fr>, <http://www.rethinkrobotics.com/>, <https://www.kuka.com/>.
- [4] Outillage magnétique, . consulté le 05 mai 2017, [ttp://www.pessa.com/fr/produits/outillage-magn](http://www.pessa.com/fr/produits/outillage-magn)
- [5] Préhenseurs à aiguilles, . consulté le 05 mai 2017, <https://www.schmalz.com/fr/technique-du-vide-pour-l-automation/composants-pour-le-vide/prehenseur-speciaux/prehenseurs-a-aiguilles>.
- [6] Chapitre 8 : Les capteurs, 2010.
- [7] Robotique Collaborative . *Guide pratique de l'Usine du Futur* , 2015.
- [8] Insr qui sommes nous ?, septembre 2016. <http://www.inrs.fr/inrs/identite.html>.
- [9] Pilz automation on tour 2016, 2016. Copyright, 2016 Pilz GmbH Co. KG, Inc., All rights reserved.
- [10] ABB. Démonstration du robot YUMI. consulté le 25 février 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=0-13uh4YsJM>.
- [11] Philippe Charpentier Adel Sghaier. *La problématique de l'utilisation des robots industriels en matière de sécurité*. Annales des Mines - Réalités industrielles. ESKA, 2012.
- [12] Df Alpha. Buse pneumatique. <https://www.techni-contact.com/produits/5443-9105953-buse-pneumatique.html>.
- [13] Amaury. Le cycle itératif, février 2009. <http://www.geek-directeur-technique.com/2009/02/06/le-cycle-iteratif>.
- [14] Laura Angelier. Méthodes agiles, des méthodes modernes, janvier 2015. <https://www.ideematic.com/actualites/2015/01/methodes-agiles-definition/>.
- [15] Mike Ashby. *Material and process charts*. 2010.

- 
- [16] Hicham Ait Baslam. Le cycle en Y, 2005. <https://haitbaslam.wordpress.com/2010/10/05/le-cycle-en-y/>.
- [17] Olivier Bruls. *Chapter 2 : Fundamental Concepts In Robotics*. 2016.
- [18] Jérôme Damelincourt. Saisissantes, ces pinces! *VieArtificielle.com*, mars 2016.
- [19] Van Den Broek Dobrenan. « automatisaion », juin 2017. <http://www.universalis.fr/encyclopedie/automatisation/>.
- [20] Dominique Dubois. Les revêtements dlc : des solutions d’avenir, Octobre 2008. TRA-METAL.
- [21] Educypedia. Les capteurs optiques.
- [22] Jean FAUCHER. *Pratique de l’AMDEC : Assurez la qualité et la sûreté de fonctionnement de vos produits, équipements et procédés*. 2me édition. Dunod, 2009.
- [23] GCE. Les capteurs tout ou rien. consulté le 29 avril 2017, CRTA ? Ple Développement industriel et innovation, <http://crt.a.fr/wp-content/uploads/2013/07/29-Capteurs.pdf>.
- [24] Conny Johansson. *The V-Model*. PhD thesis, IDE, University Of Karlkrona Ronneby, 1999.
- [25] Jérôme Laplace. Vers une robotique agile?, 2016. <http://www.humarobotics.com/vers-une-robotique-agile/>.
- [26] H. LECOCQ. *LES AUTOMATES PROGRAMMABLES*. 2005.
- [27] Anders Sorensen Lene Kromann, Jan Rose Skaksen. *Automation, labor productivity and employment - a cross country comparison*. PhD thesis, CEBR, Copenhagen Business School, 2011.
- [28] Jean Vareille Philippe Le Parc M. Tahan, Amara Touil. *La méthode de d’éveloppement en X, un autre point de vue sur le cycle de vie*. PhD thesis, Lisyc Laboratoire Informatique des Systèmes Complexes, 2011.
- [29] Jean marc Thoualin. ROBOTIQUE : Les Préhenseurs Adaptatifs. *BULLETIN TECHNIQUE N 39*, avril 2014.
- [30] Médi-Line. Médi-Line, Produits, 2010.
- [31] Microsonic. Capteurs à ultrasons. consulté le 29 avril 2017, <http://www.microsonic.de/fr/support/capteurs->
- [32] Nathalie Nevejans. *Traité de droit et d’éthique de la robotique civile*. LEH Edition, 2017.
- [33] International Federation of Robotics. 5 graphiques pour comprendre l’impact de la robotique sur l’emploi, juin 2015. <http://resources.grouperandstad.fr/5-graphiques-pour-comprendre-limpact-de-la-robotique-sur-lemploi/>.

- [34] Fanny Piret. *Analyse et modélisation d'un préhenseur robotisé en vue du tri de déchets métalliques*. PhD thesis, Université de Liège, faculté des Sciences appliquées, 2015-2016.
- [35] Jean-Marcel Polis. La préhension par le vide, 2006. <http://magazinemci.com/2006/04/01/la-prehension-par-le-vide-2/>.
- [36] VALÉRIE PÉREZ. Détecteur de proximité : faites le bon choix.
- [37] Jérôme Robert. La robotique et ses perspectives d'avenir, 2016. <http://www.exploratheque.net/articles/la-robotique-et-ses-perspectives-d-avenir>.
- [38] Jean-Pierre Robin. Robots et nouvelles technologies feront perdre 5 millions d'emplois d'ici à 2020. *Le figaro, économie*, 2016.
- [39] Dr Winston W. Royve. *Managing the development of large softwaer systems*. PhD thesis, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1970.
- [40] Nicolas Le Ru. L'effet de l'automatisation sur l'emploi : ce qu'on sait et ce qu'on ignore. *La note d'analyse, N 49*, 2016.
- [41] Rachel Emma Silverman. The words of tomorrow, janvier 2000. <https://www.wsj.com/millennium/articles/SB944517141695981261.htm>.
- [42] Aravinth Varatharajah. Cycle en spirale. 2016. <https://www.supinfo.com/articles/single/2188-cycle-spirale>.

# Annexe A

## Tableau des abréviations :

TFE	: Travail de fin d'étude
ULg	: Université de Liège
CAO	: Conception assistée par ordinateur
SMIC	: Salaire minimum de croissance
IHM	: interaction homme machine
CAPA	: action corrective et préventive
UML	: Unified Modeling Language
SI	: Système d'information
FAST	: fonctionnal analyses system technique
FS	: fonction secondaire
FP	: fonction principale
C	: contrainte
DLC	: Diamond-like carbon
FBS	: Function Behavior Structure
PP	: Polypropylène
PE	: Polyéthylène
PTFE	: polytétrafluoroéthylène

Nom	Prix	Précision	Sécurité	Interface	Bras	Capteurs	Vitesse
Baxter, Rethink Robotics	22 000	Faible +/- 0.5 mm	Bonne	ROS	2	Vision tête, force	4-2 rad/s
YuMi, ABB	40 000	Très élevée 0.02	Bonne	RoboStudio	2	Vision mains, force	7-3 rad/s
Nextage, Kawada	60 à 90 000	Très élevée 0.03	Elevée	ROS + OpenRTM	2	Vision mains + tête	4-2 rad/s
UR-3, Universal Robots	20 000	Bonne 0.1	Elevée	Tablette tactile + ROS	1	force	6-3 rad/s
liwa LBR, Kuka	80 000	Bonne 0.1	Très élevée	Eclipse+java ROS	1	1 capteur de force par articulation	1m/s
APAS, BOSCH	80 000	Très élevée 0.03	Très élevée	User interface	1	Système de vision dans la main	0.5 à 2.3 m/s
BioRob, Bionic Robotics	26 500	Faible 0.5	Bonne	C/C++ API, ROS	1	/	Lent ( ?rad/s)
P-Rob, F&P robotics	25 000	Bonne 0.1	Très élevée	Python	1	Capteur de force, capteur anti-collision	2.7-1.7 rad/s
CR-35iA, Fanuc	73 500	Elevée 0.08	Bonne	User interface + Fanuc program	1	Capteur de force dans la base, iRvision	0.25 à 2.5 m/s
iZac, MCRobotics	40 000	Bonne 0.1	Elevée	Logiciel open robot (graphique)	1	Tablette open-teach	2m/s
FRANKA Emka KBee AG	11 000	Bonne 0.1	Elevée	« visual & intuitive, dialog-based »	1	Capteur de torque dans chacun des 7 axes	2 m/s

Nom	Prix	Précision	Sécurité	Interface	Bras	Capteurs	Vitesse
Baxter, Rethink Robotics	22 000	Faible +/- 0.5 mm	Bonne	ROS	2	Vision tête, force	4-2 rad/s
YuMi, ABB	40 000	Très élevée 0.02	Bonne	RoboStudio	2	Vision mains, force	7-3 rad/s
Nextage, Kawada	60 à 90 000	Très élevée 0.03	Elevée	ROS + OpenRTM	2	Vision mains + tête	4-2 rad/s
UR-3, Universal Robots	20 000	Bonne 0.1	Elevée	Tablette tactile + ROS	1	force	6-3 rad/s
liwa LBR, Kuka	80 000	Bonne 0.1	Très élevée	Eclipse+java ROS	1	1 capteur de force par articulation	1m/s
APAS, BOSCH	80 000	Très élevée 0.03	Très élevée	User interface	1	Système de vision dans la main	0.5 à 2.3 m/s
BioRob, Bionic Robotics	26 500	Faible 0.5	Bonne	C/C++ API, ROS	1	/	Lent ( ?rad/s)
P-Rob, F&P robotics	25 000	Bonne 0.1	Très élevée	Python	1	Capteur de force, capteur anti-collision	2.7-1.7 rad/s
CR-35iA, Fanuc	73 500	Elevée 0.08	Bonne	User interface + Fanuc program	1	Capteur de force dans la base, iRvision	0.25 à 2.5 m/s
iZac, MCRobotics	40 000	Bonne 0.1	Elevée	Logiciel open robot (graphique)	1	Tablette open-teach	2m/s
FRANKA Emka KBee AG	11 000	Bonne 0.1	Elevée	« visual & intuitive, dialog-based »	1	Capteur de torque dans chacun des 7 axes	2 m/s

	<b>Cahier des charges</b>	Réf. : / Page : 1 / 2 Edition : 1.1 Date : 15/02/2017 File : /
Objet : Automatisation assemblage tube-connecteur Auteur : C. Felten		

<u>Cahier des charges :</u>							
Ident.	Type	Pond.	Libellé	Critère(s)	Niveau(x)	Flexibilité	Remarque(s)
FS1	Second.	80	Gestion de l'arrivée du tube	Fiabilité	100%	F1	Ne peut en aucun cas perturber la découpe qui opère en aval
FS2	Second.	90	Détecte la position et l'orientation du tube	Fiabilité Temps	100% <10s	F1 F4	Imposer des conditions d'utilisation pour garantir la fiabilité Eventuellement utiliser un système pour pré-orienter les tubes
FS3	Second.	90	Capable d'aller tenir le tube	Fiabilité Temps	100% <10s	F1 F4	Vérifier que le tube ne soit pas écrasé
FS4	Second.	90	Détecte la position et l'orientation du connecteur	Fiabilité Temps	100% <10s	F1 F4	Imposer des conditions d'utilisation pour garantir la fiabilité Eventuellement utiliser un système pour pré-orienter les connecteurs (2x)
FS5	Second.	90	Capable d'aller tenir le connecteur	Fiabilité Temps	100% <10s	F1 F4	Ne pas briser les connecteurs (2x)
FP1	Principale	100	Capable d'assembler le tube et le connecteur	Fiabilité Temps	100% <10s	F0 F4	Le tube doit être enfoncé jusqu'au bout

Ref. : /	Edition : 1.1	Date 15/02/2017	Proc. : /	Chap. : /	File : /
----------	---------------	-----------------	-----------	-----------	----------

	<b>Cahier des charges</b>	Réf. : / Page : 2 / 2 Edition : 1.1    Date : 15/02/2017 File : /
Objet : Automatisation assemblage tube-connecteur Auteur : C. Felten		

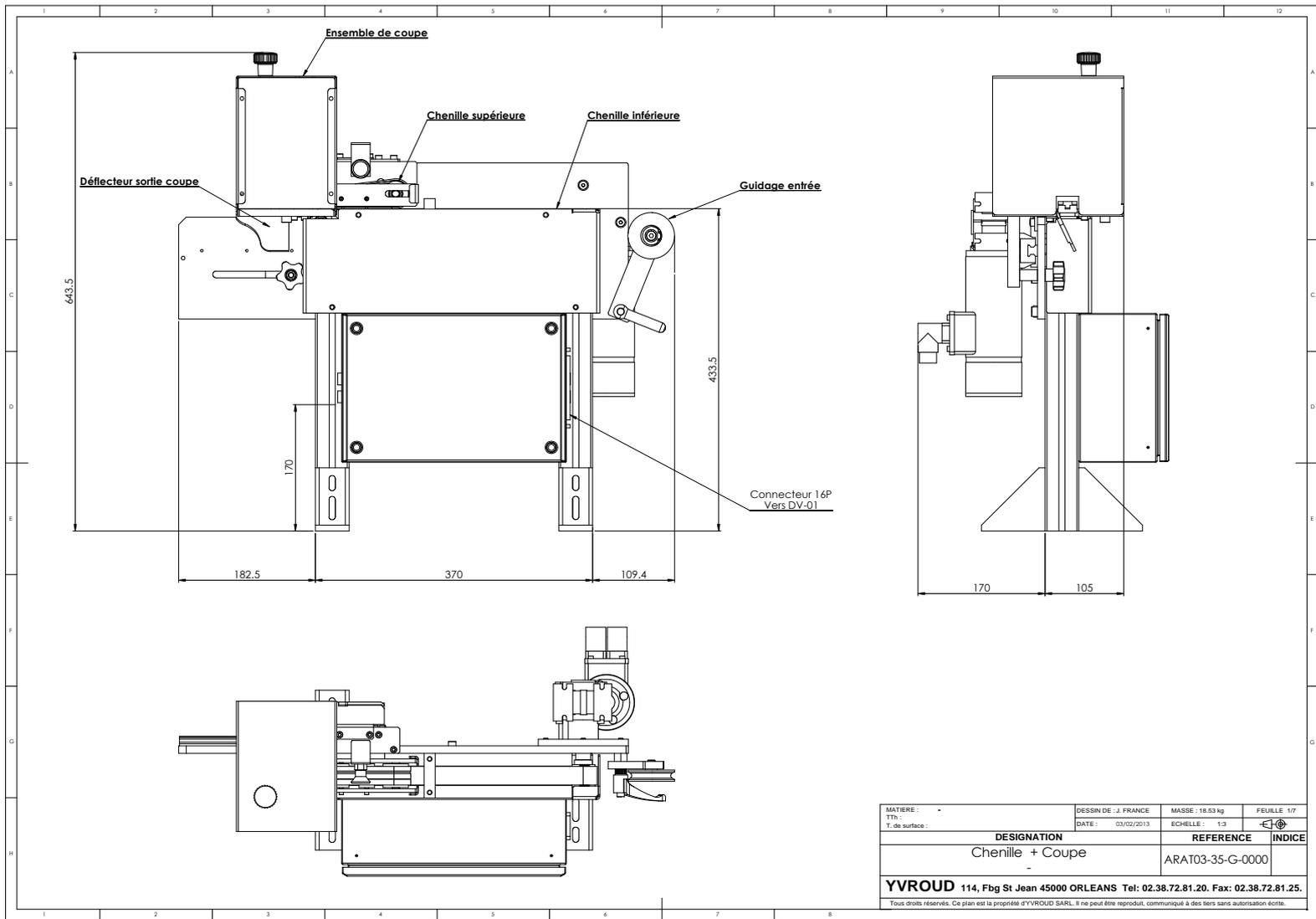
			Fréquence	600000/an	F2	Répond à la demande actuelle Capable de réaliser cette opération sur les 2 extrémités
FS6	Second.	80	Fiabilité Temps	100% <10s	F3 F4	Changer de dépôt tous les 50 tubes + prévoir les tubes utilisés pour les échantillons
FS7	Second.	80	Fiabilité	100%	F3	Tenir compte des échantillons
FS8	Second.	90	Fiabilité	100%	F2	Contrôle de l'enfoncement total des tubes et de l'absence de partie bleue
C1	Contrainte	80	Nbre de fois	>100	F4	
C2	Contrainte	80	Fiabilité	100%	F0	Impératif
C3	Contrainte	80	Fiabilité	100%	F0	(voir ISO 14644)
C4	Contrainte	70	Euros	25000€	F3	Budget à justifier
C5	Contrainte	70	Modification de la chaîne	0 à Faible	F2	Modification à justifier
C6	Contrainte	50	Années	3 ans	F2	Minimum 3 ans, peut éventuellement contenir des consommables

Rigidité du critère : Très rigide = F0 > F1 > F2 > F3 > F4 = Très flexible

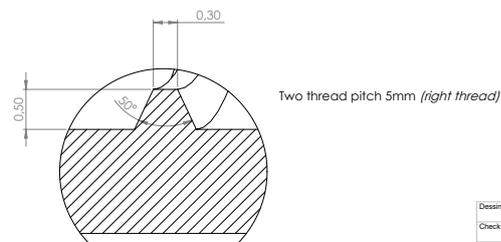
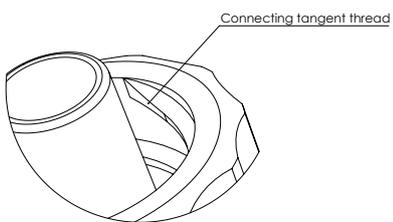
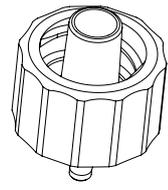
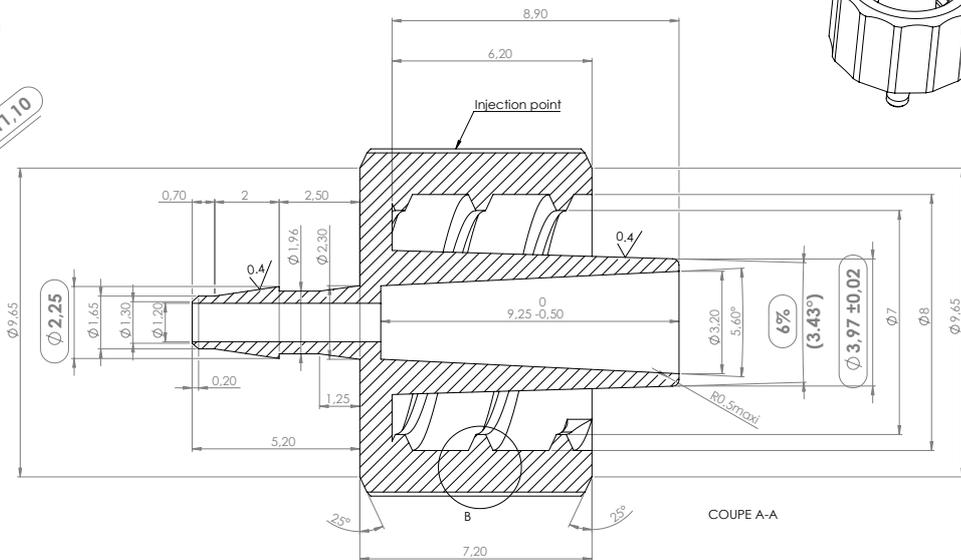
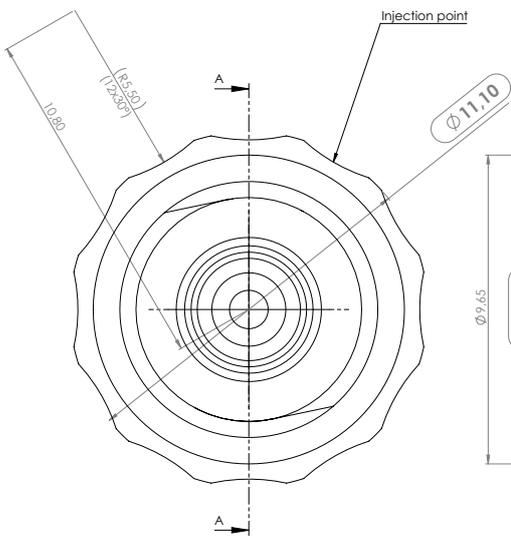
Ref. : /	Edition : 1.1	Date 15/02/2017	Proc. : /	Chap. : /	File : /
----------	---------------	-----------------	-----------	-----------	----------

# Définition du besoin

- Système capable de prendre un tube et d'y fixer un connecteur à chaque extrémité
- Le système doit être placé en salle blanche (contrainte d'hygiène)
- Budget limité (~25 000 €) à discuter et motiver (contrainte financière)
- Le diamètre et la longueur des tubes peuvent varier (contrainte de flexibilité du système)
- Les dimensions de connecteurs sont connues et ne changent pas
- Les dimensions typiques des tubes sont connues et varient dans une gamme déterminée
- Le système doit effectuer la liaison tube connecteur seul, mais ne doit pas forcément travailler sans l'aide d'un opérateur
- Le système doit venir s'implanter dans la chaîne de production existante mais peut, éventuellement la modifier légèrement
- La réalisation de la tâche doit être effectuée entre 1 et 60 s (contrainte de temps)
- Le système doit pouvoir réaliser 600 000 opérations par an
- Le système doit avoir un taux de réussite de l'opération de 100% dans le cas d'une utilisation normale
- Le système ne doit pas blesser les employés ni endommager le matériel (contrainte sécurité)
- Le système doit venir placer les tubes connectés par lot de 50
- Le système doit prendre les connecteurs en vrac
- Le système s'insère à la suite de la machine à découper et ne doit pas perturber son bon fonctionnement
- Le système sera alimenté en composants (tubes et connecteurs) et en énergie
- Le système fonctionne dans un environnement stable et sera soumis à des perturbations extérieures négligeables en cas d'utilisation normale
- Le système devra être capable de coexister avec un opérateur
- Le système doit pouvoir être reprogrammé et ajusté en fonction des usages
- Le système doit pouvoir fonctionner avec des tubes non-bagués dans un premier temps
- Le système n'a, dans un premier temps pas besoin de s'occuper des raccords entre les bobines de tube (raccord bleu)
- Le système doit pouvoir effectuer un contrôle de la qualité
- L'opérateur peut aider au dépôt des connecteurs si cela prend moins d'une minute.
- Le nombre de connecteurs et de tubes devant être stockés est négociable, l'idéal étant un fonctionnement d'une journée sans assistance

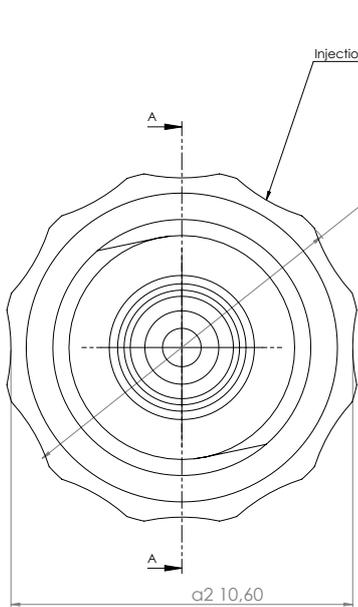


MATIERE : -	DESSIN DE : J. FRANCE	MASSE : 18.53 kg	FEUILLE 1/7
ETG :	DATE : 03/02/2013	ECHELLE : 1:3	
T. de surface :			
<b>DESIGNATION</b>		<b>REFERENCE</b>	<b>INDICE</b>
Chenille + Coupe		ARAT03-35-G-0000	
<b>YVROUD 114, Fbg St Jean 45000 ORLEANS Tel: 02.38.72.81.20. Fax: 02.38.72.81.25.</b>			
<small>Tous droits réservés. Ce plan est la propriété d'YVROUD SARL. Il ne peut être reproduit, communiqué à des tiers sans autorisation écrite.</small>			

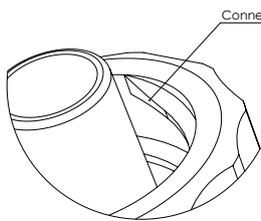
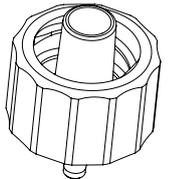
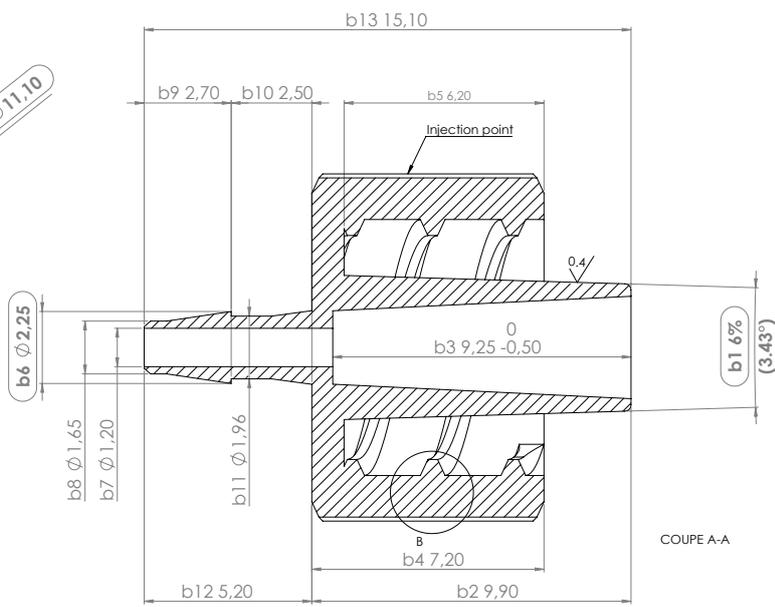


DÉTAIL B  
ECHELLE 30 : 1

Dessiné par : J MA	Surf application contraire : Catalan les arènes	Matériau : Purell RP373R	Traitement :	Qte :
Check AQ :	Chambrin de 0.25x45° sur les trous.	Designation : F0240528 Connecteur ML lock integral Natural PP	Ancien ML200200 (CHC16039)	
Check RD :	Lot fabricant :	Ech : 12/1	Date : 08/07/2014	Format : A4
Check MFG :	Norme :	Edi : 1.0	D0240504 page1	
Check QC :	XXX ±0.01	MED-LINE S.A. rue des Gardes Frontières - B4031 ANGLEUR - BELGIUM - Tel: +32 4 366.02.78		
Check ENG :	XXX ±0.01			

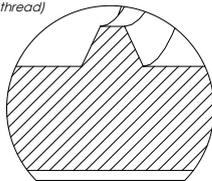


a1  $\phi 11,10$



Connecting tangent thread

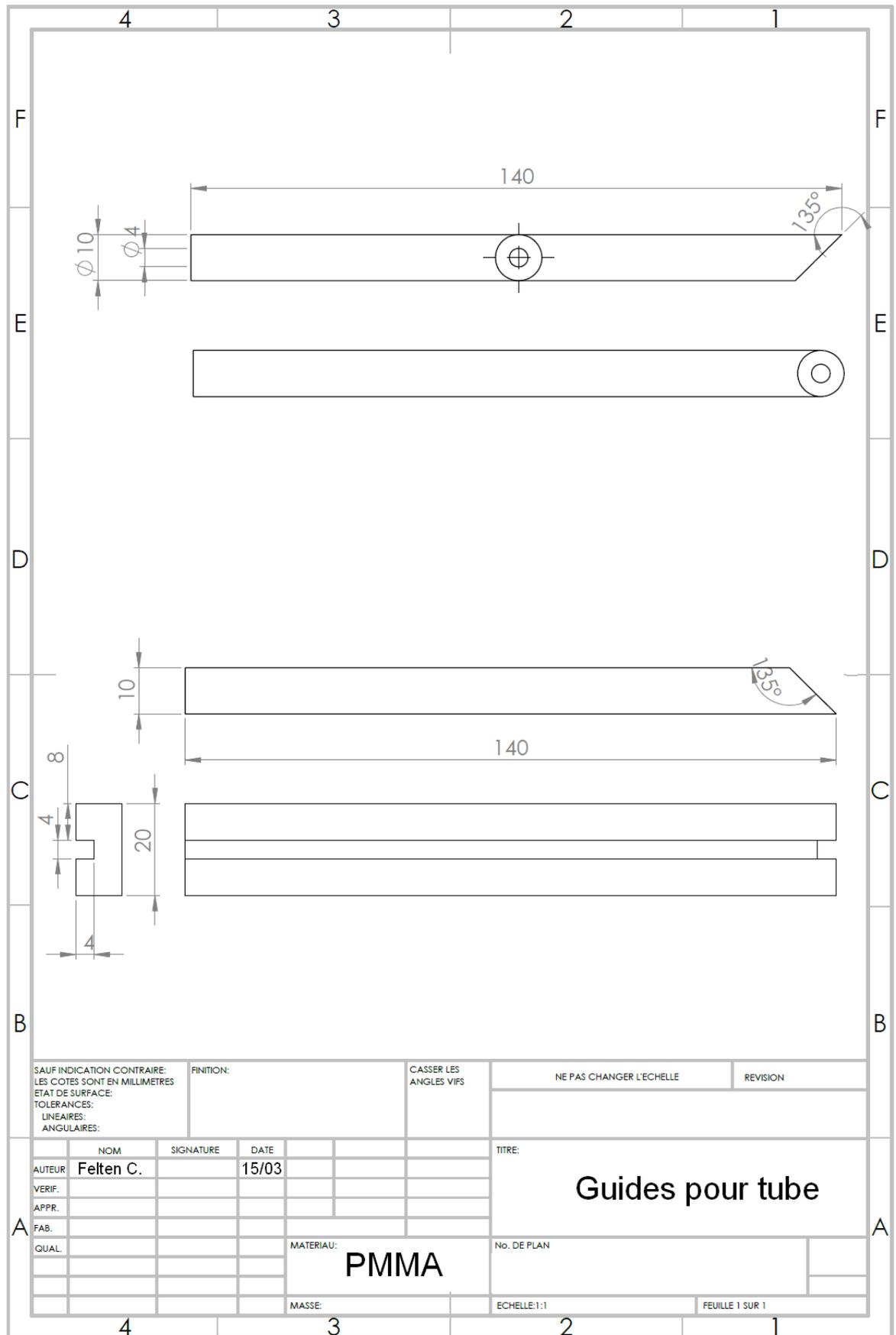
Two thread pitch 5mm (right thread)

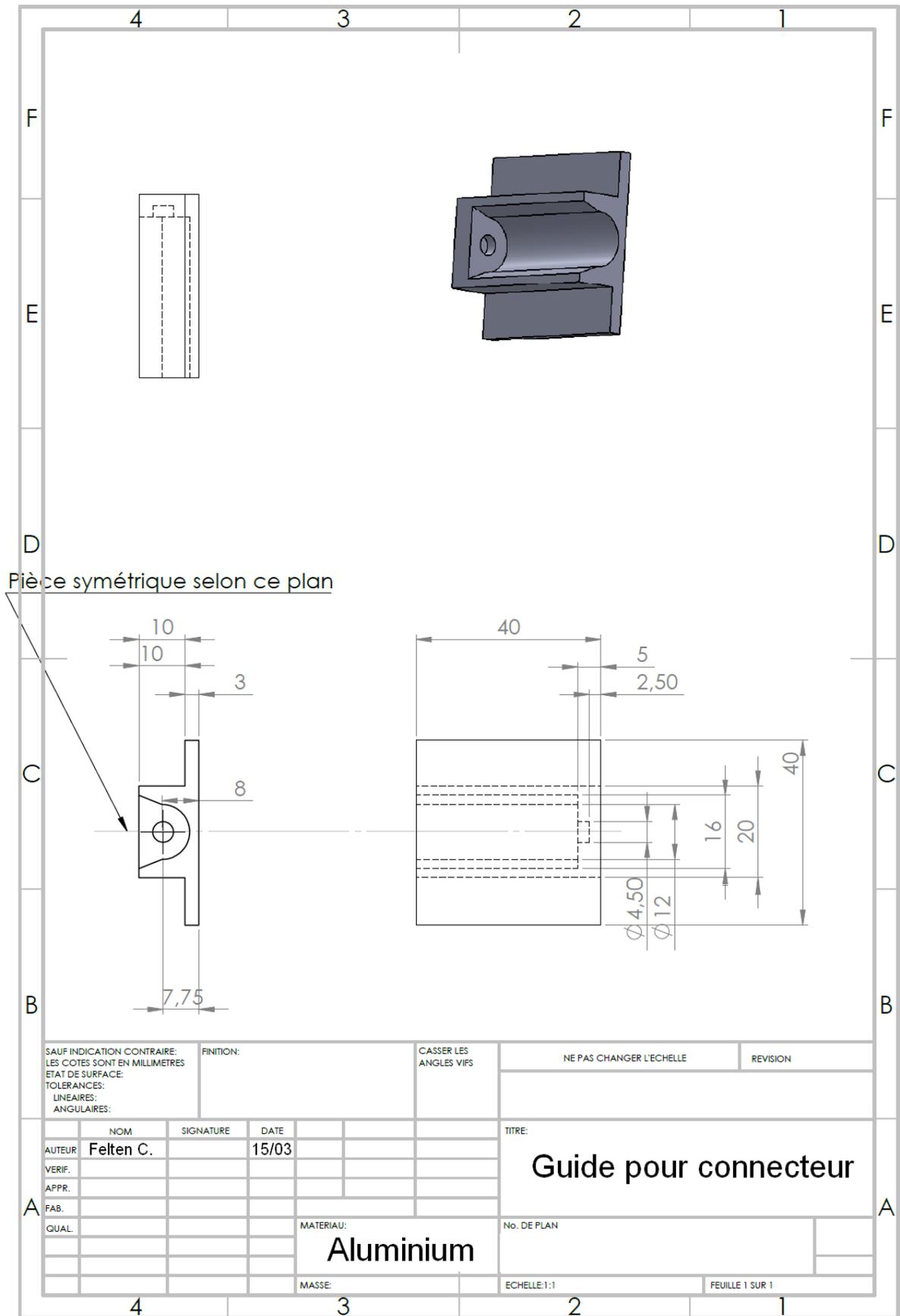


DÉTAIL B  
ECHELLE 30 : 1

- flash (y compris point d'injection) < 0.5 mm
- point noirs <xxx
- pièce complète
- pas de griffe ni de flash sur le cone luer et sur le barb
- tolérance générale dim lin. et dia : EN 16742-TG6
- tolérance sur chanfrein, form, rayon : iso 2768-m-K

Dessiné par : J MA	Sur application contraire : Catalis les arêtes Chanfrein de $0,25 \times 45^\circ$ sur les trous. Lubrification : Angles Diamètre $\pm 0,15$ X $\pm 0,15$ XXX $\pm 0,30$	Matériau : Purell RP373R	Traitement :	Qte :
Check AQ :		Designation : F0240528 Connecteur ML lock integral Natural PP		
Check RD :		Ancien ML200200 (CHC16039)		
Check MFG :	MEDI-LINE	Ech : 12/1	Date : 08/07/2014	
Check QC :		Format : A4	Edition : ed 1.0	
Check ENG :				D0240596 page2
MED-LINE S.A. rue des Gardes Frontières - B4031 ANGLEUR - BELGIUM - Tel: +32 4 366.02.78				







Sarl au capital de 10 000 Euro  
SIRET : 504 679 663 00022  
APE : 4669B  
TVA : FR 48 504 679 663  
Tél : 02 31 21 07 85  
Fax : 02 31 21 07 88  
email : ventes@alpha-automatismes.com

Retrouvez notre documentation sur :  
[www.alpha-automatismes.com](http://www.alpha-automatismes.com)

**DEVIS**  
**Liege Science Park**

Nous vous remercions de votre consultation et proposons comme suit :

**Devis n° : DV 6 352**

**lundi 10 avril 2017**

Référence	Désignation	Quantité	P.U. HT	Montant HT	Délai
DF 2-3	Buse de transport pneumatique - Alésage de Ø 6.3 mm - Alu anodisé	1	309,00	309,00	Stock
PTT	Transport postal	1	14,90	14,90	

Mode de règlement : Facture pro forma

Total net HT : 323,90

Vérins pneumatiques - Vérins sans tige - Vérins à gaz  
Distributeurs pneumatiques - Filtre Régulateur Lubrificateur d'air comprimé  
Buses de transport pneumatique - Buses de soufflage - Venturi et ventouses  
Raccords et tuyaux techniques pneumatiques - Electrovannes  
Gaines de protection et sangles de bottelage de flexibles hydrauliques  
Tout pour la régulation et la mesure de pression ou débit - Interrupteurs pendulaires électriques à flotteur

Balluff sprl  
Researchpark Haasrode 1820  
Interleuvenlaan 62  
3001 Leuven

<http://www.balluff.com>

Telefax / E-mail

Page : 1/2

De :		A :	
Nom	Lirat Mulaj	Société	MEDI-LINE s.a.
Tél.	0499/51.37.70	A l'attn. de	M. Corentin Felten
Fax	016/39.78.09	Dépt.	
E-mail	<a href="mailto:lirat.mulaj@balluff.be">lirat.mulaj@balluff.be</a>	Tél	04/366.02.78
		Fax	
		E-mail	c.felten@mediline.be
Date	24/05/2017	Votre message	Demande de prix système detecteur de vision
Concerne	<b>Offre</b>	Votre réf.	
Notre réf.	MEDI-LINE_240517		
N° fournisseur			

Cher Monsieur Felten,

Nous vous remercions de votre intérêt en nos produits et services  
Nous avons l'avantage de vous proposer le matériel qui suit:

Pos	Qté	Article	Description	Code commande	Prix/pce. Net (€)	Délai
1	1	<a href="#">BOS R020K-PS-RF10-00,2-S49</a>	Détecteur photoélectrique R20K <ul style="list-style-type: none"><li>• Lumière LED rouge, diffuse</li><li>• Interface PNP</li><li>• Focus fixe</li><li>• Connection câble 0,2 m / M8 3-p</li></ul>	BOS021C	86,00	0 Jours
						
2	1	<a href="#">BVS OI-3-001-E</a>	Détecteur de vision BVS E Standard <ul style="list-style-type: none"><li>• Lumière intégrée rouge</li><li>• Objectif : 8 mm</li><li>• Jusqu'à 32 fonctions par inspection</li><li>• Configuration par software ConVis</li><li>• Sorties digitales : 3 (+1 optionnelle)</li></ul>	BVS0003	765,00	0 Jours
						
3	1	<a href="#">BAV BP-PH-00020-01</a>	Kit Balluff BAV avec détecteur BVS E <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Série BVS E Standard inclus</b></li><li>• Objectif 8 mm, lumière rouge</li><li>• Brides de fixation et montage</li><li>• Câbles d'alimentation et paramétrage Ethernet</li><li>• CD d'installation ConVis et notice d'utilisation</li></ul>	SET012M	880,00	2-3 Sem.
						

# BALLUFF

## Conditions des ventes:

Prix : nets en **EURO**.

Livraison : Directement effectuée par notre usine Balluff GmbH

**Les délais spécifiés sont départ usines Balluff GmbH de Neuhausen a.d.F. (Stuttgart)**

- transport normal : UPS Standard (2 jours) : forfait de 11.80 € - franco à partir de 1000 €
- transports spéciaux : UPS Express Saver (24 h) : frais réels portés intégralement en facture

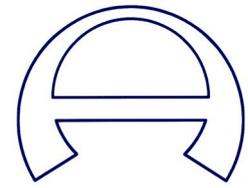
Paiement : ● **anticipé à toute livraison sur base d'une facture proforma dans le cadre d'une toute première commande**  
● 30 jours date facture sous réserve d'approbation de crédits pour les commandes ultérieures

Validité : 1 mois

Nos conditions générales de vente sont disponibles sur simple demande ou en téléchargement [ici](#) au format pdf..

Meilleures salutations,

Lirat Mulaj  
Area Sales Manager



# AUDIMAT

n.v. automation s.a.

**AUTOMATION DISTRIBUTION MATERIAL**

19-21 Theodore Roosevelt str.  
B-1030 Brussels

☎ +32.2.735.38.95. 📠 +32.2.736.33.40.  
www.audimat.be info@audimat.be

*Mediline*

*Monsieur Corentin Felten  
Liège Science Park  
B-4031 ANGLEUR*

*Bruxelles, le 18/05/2017*

**OFFRE Référence : 2017/051809/5354/DK**

*Messieurs,*

*Suite à votre demande, nous vous faisons offre pour :*

*- 1 Trémie de stockage TUMAC de type TR50 en inox.*

*Fourni avec tableau de commande et de réglage TUXEL de type CV6 IP55.  
PRIX UNITAIRE départ Bruxelles : €1.690,00.-*

*- 1 Embase électromagnétique TUXEL de type LEX2, équipé d'un couloir en inox  
304. Dimension : 200x500 mm.*

*Fourni avec tableau de commande et de réglage TUXEL de type CV6 IP55.  
PRIX UNITAIRE départ Bruxelles : €1.420,00.-*

*DELAI : +/- 6 semaines départ Bruxelles.*

*PAIEMENT : 30% à la commande  
70% 30 jours fin de mois date de facture*

*EMBALLAGE : facturé au prix coûtant, perdu et non repris.*

*Pour le reste, veuillez vous référer à nos conditions générales de vente au  
dos de la présente.*

*Nous vous souhaitons bonne réception de la présente et vous prions  
d'agréer, Messieurs, nos salutations les plus distinguées.*

**AUDIMAT automation**

**Olivier DUNAND**



## 1. Objet

Livraison d'un robot Collaboratif ABB YuMi IRB14000.

## 2. YUMI

avec les options en plus de la configuration du robot standard :

Robots			EUR SP	Nr.	EUR tot
Manipulator	435-131	IRB 14000-0.5/0.5 robot with standard options	39.980,00	1	39.980,00
Options			EUR SP	Nr.	EUR tot
Manipulator	1512-1	First gripper Servo	2.580,00	1	2.580,00
Manipulator	1513-1	First gripper Vacuum 1	610,00	1	610,00
Manipulator	1515-1	First gripper Vision	3.410,00	1	3.410,00
Manipulator	1516-1	Second gripper Servo	2.580,00	1	2.580,00
Manipulator	1517-1	Second gripper Vacuum 1	610,00	1	610,00
Basic	1525-1	Mains cable EU, 2m	80,00	1	80,00
RobotWare	603-1	Absolute Accuracy Floor Mounted	800,00	1	800,00
Price				1	50.650,00

la configuration standard du robot est en annexe.

## 3. Formation

A l'achat d'un robot YuMi, il est vivement conseillé de suivre la formation IRC5 pour les connaissances de base du langage Rapid avant la formation YuMi.

### Formation IRC5 Programmation de base

Pos	Description	Pièce	Prix (EUR)	Prix de ligne (EUR)
10	Formation IRC5 Programmation de base	1.00	2.250,00	2.250,00

**2.250,00 EUR**

### Informations Supplémentaires

Programme	: voir annexe
Durée	: 5 jours
Nombre de participants	: minimum 3 personnes, ces personnes peuvent provenir d'autres sociétés
Lieu	: ABB TrainingCenter à Zaventem
Date	: à convenir
Prix	: par personne, manuel, lunch et rafraîchissements sont inclus dans le prix