

Design et conception d'une console de téléopération pour un robot d'assistance à la microchirurgie

Mémoire présenté par
Robin EL RAGHIBI , Julien PASSAU

en vue de l'obtention du grade de Master
Ingénieur Civil Mécanicien

Promoteurs
Paul FISSETTE, Benoît HERMAN

Lecteurs
Jérôme DUISIT, Léna VANTHOURNHOUT

Année Académique 2017-2018

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier les deux promoteurs de ce mémoire : Paul Fiset et Benoît Herman. Leurs nombreux conseils nous ont été précieux et nous ont permis de progresser dans la bonne direction.

Nous remercions également Léna Vanthournhout, pour sa grande disponibilité et pour la qualité de son aide. Merci de nous avoir fait confiance et de nous avoir aiguillés tout en nous laissant une grande liberté.

Nous tenons également à remercier Jérôme Duisit pour nous avoir mis en contact avec le personnel médical des cliniques universitaires de St-Luc. Nos remerciements vont également à l'ensemble de ce personnel qui nous a accueilli le temps d'une journée dans l'hôpital afin d'assister à une opération de microchirurgie.

Nous remercions également les techniciens de l'atelier mécanique, et en particulier Axel Jottard, pour la réalisation d'une de nos pièces.

Nos remerciements se tournent également vers nos familles et nos proches pour leur indéfectible soutien, leur avis critique et leurs nombreuses relectures.

Finalement, nous remercions encore une dernière fois l'ensemble de nos promoteurs et de nos lecteurs pour l'intérêt qu'ils portent à notre mémoire et au temps consacré à sa lecture.

Abstract

As part of reconstructive surgery operations for breast cancer, one of the most common methods is the DIEP (Deep Inferior Epigastric Perforator). During this operation, the surgeon must perform a microanastomosis, that is to say the suture of two blood vessels a few millimeters in diameter.

In order to facilitate and improve the work of the surgeon, microsurgical robotic assistance has emerged. In most cases, the assistance systems are composed of two parts. On the one hand, a teleoperation master console is placed in the surgeon's hands. On the other hand, a slave robot reproduces the movements of the console. Between these two elements, a computer allows their coordination, while scaling the movements and filtering the tremors, therefore increasing the surgeon performances.

The goal of this thesis is to design a master console to go with the robot developed by the Université Catholique de Louvain. To better meet the needs of the surgeon and the robot, the console must offer 6 degrees of freedom to a stylus, 3 in translation and 3 in orientation. It must also comply with a busy environment, consisting of a user, a robot, a microscope and a patient. The console must apply gravity compensation and be as transparent as possible when in use. Finally, the console must offer a resolution of 50 μm at the end-effector.

The console consists of two separate parts. A first part, the *arm*, manages the position of the stylus while the second, the *wrist*, is in charge of its orientation.

Résumé

Dans le cadre des opérations de chirurgie reconstructive pour le cancer du sein, une des méthodes les plus courantes est la DIEP (Deep Inferior Epigastric Perforator). Lors de cette opération, le chirurgien doit réaliser une microanastomose, c'est-à-dire la suture de deux vaisseaux sanguins de quelques millimètres de diamètre.

Afin de faciliter et d'améliorer le travail du chirurgien, la robotique d'assistance à la microchirurgie a vu le jour. Dans la plupart des cas, les systèmes d'assistance sont composés de deux parties. D'un côté, une console de téléopération, dite maître, est placée dans les mains du chirurgien. De l'autre côté, un robot, dit esclave, reproduit les mouvements de la console quasiment à l'identique. Entre ces deux éléments, un ordinateur permet leur coordination, la mise à l'échelle des mouvements et la filtration des tremblements afin d'augmenter les performances du chirurgien.

Ce travail a pour objectif la conception d'une console qui serait utilisée conjointement avec le robot d'assistance à la microchirurgie développé par l'Université Catholique de Louvain.

Afin de respecter au mieux les besoins du chirurgien et du robot, la console doit offrir 6 degrés de liberté à un stylet, 3 en translation et 3 en orientation. Celle-ci doit également s'intégrer au sein d'un environnement chargé, composé d'un utilisateur, d'un robot, d'un microscope et d'un patient. La console doit disposer d'une compensation de la gravité et être la plus transparente possible lors de son utilisation. Finalement, la console doit offrir une résolution en bout de stylet de 50 μm .

La console, ainsi développée, est composée de deux parties distinctes. Une première partie, le *bras*, est responsable du positionnement du stylet tandis que la deuxième, le *poignet*, est responsable de son orientation.

Table des matières

1 Introduction	1
1.1 La chirurgie reconstructive pour le cancer du sein	1
1.2 La microanastomose et les gestes du chirurgien	2
1.3 L'assistance robotisée en chirurgie et à l'UCL	4
1.4 Objectifs et contributions personnelles	6
1.5 Structure du mémoire	7
2 Analyse du besoin	9
2.1 État de l'art des consoles de téléopération	9
2.2 Utilisation conjointe de la console avec le robot	12
2.3 Intégration dans l'environnement	12
2.4 Performances attendues	13
2.5 Contraintes non intégrées au prototype	14
3 Design cinématique	15
3.1 Critères de sélection	15
3.1.1 Découplage cinématique entre la position et l'orientation	15
3.1.2 Transparence de la console lors de son utilisation	17
3.1.3 Performances des mesures de la position de la console	17
3.1.4 Encombrement et espace de travail	18
3.1.5 Compensation de la gravité	18
3.2 Configuration du <i>bras</i>	19
3.2.1 Choix préliminaires	19
3.2.2 Configuration cartésienne	21
3.2.3 Configuration anthropomorphique	22
3.2.4 Configuration SCARA	25
3.2.5 Conclusion et choix de la configuration du <i>bras</i>	27
3.3 Configuration du <i>poignet</i>	28
3.4 Configuration finale	33
3.5 Lien entre dimension et résolution	34
4 Prototype et modèle CAO	39
4.1 Partie position — <i>Bras</i>	41
4.1.1 Articulation 1 — Glissière	42
4.1.2 Articulation 2 — Pivot A	43
4.1.3 Articulation 3 — Pivot B	44

4.1.4	Articulation 4 — Pivot C	45
4.1.5	Transmission de la rotation avec deux courroies	46
4.1.6	Châssis reliant les articulations entre elles	47
4.1.7	Encodeurs et mesure de la position	49
4.2	Partie orientation — <i>Poignet</i>	54
4.2.1	Connexion entre les modules C et D	56
4.2.2	Connexion entre les modules B et C	57
4.2.3	Connexion entre les modules A et B	59
4.2.4	Intégration des potentiomètres sur les pivots	60
4.3	Intégration dans l'environnement	62
5	Discussion et perspectives	63
5.1	Discussion et critique par rapport au prototype réalisé	63
5.2	Perspectives d'amélioration pour une version future	64
5.2.1	Ajout d'un degré de liberté supplémentaire lié à la préhension	64
5.2.2	Transmission de la rotation avec deux courroies	65
5.2.3	Limitation de l'espace de travail	66
5.2.4	Motorisation de la console	67
5.2.5	Optimisation du poids et réduction de l'inertie	69
6	Conclusion	71
	Appendices	73
A	Éléments commercialisés	75
B	Plan du profilé de support	77
C	Spécifications techniques de l'impression 3D	79
D	Impression 3D via la Mark two	81
D.1	Châssis 1	81
D.2	Châssis 2	82
D.3	Châssis 3	83
D.4	Module A	84
D.5	Module C	85
D.6	Plaque du système de mise en tension	86
D.7	Pièces sans renfort	87
E	Fiches techniques des capteurs <i>Sick</i> et <i>Bourns</i>	89

Table des figures

1.1	Étapes générales d'une opération DIEP	2
1.2	Passage d'une aiguille dans les vaisseaux lors de la microanastomose	3
1.3	Position d'une aiguille par rapport aux vaisseaux lors de la microanastomose	3
1.4	Disposition des intervenants lors d'une opération de type DIEP	3
1.5	Représentation des éléments intervenant lors d'un acte de chirurgie	4
1.6	Robot d'assistance à la microchirurgie développé par l'UCL	5
1.7	Console <i>Geomagic Touch</i> utilisée pour la téléopération du robot	6
2.1	Consoles de téléopération disponibles sur le marché	10
2.2	Vue aérienne de l'environnement médical lors d'une opération	12
2.3	Vue aérienne de l'environnement expérimental lors des phases de test	13
2.4	Schématisation des deux espaces de travail de la console	14
3.1	Schématisation de la notion de découplage cinématique	16
3.2	Représentations d'un robot en série et d'un robot en parallèle	19
3.3	Représentations des 5 configurations robotiques les plus courantes	20
3.4	Représentation de l'espace de travail d'une configuration cartésienne	22
3.5	Représentation des variables d'une configuration anthropomorphique	22
3.6	Représentation de l'espace de travail d'une configuration anthropomorphique	23
3.7	Évolution de la manipulabilité d'une configuration anthropomorphique	24
3.8	Représentation des variables d'une configuration SCARA	25
3.9	Principe de transmission de la rotation au sein d'une configuration SCARA	25
3.10	Représentation de l'espace de travail d'une configuration SCARA	26
3.11	Évolution de la manipulabilité d'une configuration SCARA	27
3.12	Schéma cinématique du poignet du robot	29
3.13	Possibilités de positionnement de la main du chirurgien sur la console	30
3.14	Exemples de <i>poignet</i> en série et en parallèle	30
3.15	Photos des deux prototypes du <i>poignet</i> imprimés en 3D	31
3.16	Plans des deux prototypes du <i>poignet</i> imprimés en 3D	32
3.17	Schéma cinématique complet de la console de téléopération	33
3.18	Position en bout de <i>bras</i> fonction des variables	34
3.19	Résolution spatiale dans le plan XY	35
3.20	Évolution de la résolution spatiale et de la manipulabilité	37
4.1	Plan complet la console réalisée	40
4.2	Plan de la partie <i>bras</i> de la console	41

4.3 Plans de la glissière	42
4.4 Plans du pivot A	43
4.5 Plans du pivot B	44
4.6 Plans du pivot C	45
4.7 Transmission de la rotation avec deux courroies	46
4.8 Mise en tension des courroies	47
4.9 Plans des trois châssis imprimés en 3D	48
4.10 Sections transversales des châssis et renforts en fibre de verre	49
4.11 Plans de l'encodeur à câble et des encodeurs rotatifs	49
4.12 Montage de l'encodeur à câble	50
4.13 Montage des encodeurs rotatifs	51
4.14 Évolution de la manipulabilité et de la résolution spatiale	52
4.15 Évolution de la manipulabilité et de la résolution spatiale dans le plan XY	53
4.16 Plans du <i>poignet</i> de la console	54
4.17 Montage en cascade des 4 modules du <i>poignet</i>	55
4.18 Assemblage entre le module C et le module D	56
4.19 Assemblage entre le module B et le module C	57
4.20 Double configurations du <i>poignet</i> pour une même orientation du stylet	58
4.21 Limitation de la rotation du deuxième pivot	58
4.22 Assemblage entre le module A et le module B	59
4.23 Montage des 3 potentiomètres sur le <i>poignet</i> de la console	60
4.24 Détail du montage des potentiomètres	60
4.25 Passage des câbles des trois potentiomètres	61
4.26 Intégration de la console dans l'environnement	62
4.27 Intégration de la console dans l'environnement - Vue du haut	62
5.1 Ajout d'un outil de préhension	64
5.2 Système de mise en tension symétrique	65
5.3 Intégration d'un double parallélogramme sur la console	66
5.4 Ajout d'un blocage externe sur le <i>poignet</i> de la console	67
5.5 Intégration d'une structure en parallélogramme sur la console	68
5.6 Répartition de la masse de la console	69

Chapitre 1

Introduction

1.1 La chirurgie reconstructive pour le cancer du sein

En Europe et à travers le monde, le cancer est une des causes de décès les plus fréquentes avec une mort sur quatre qui y est liée. Avec le vieillissement de la population, la fréquence de cancer à travers le monde est en constante augmentation [1]. Le cancer atteint ses victimes sous de multiples formes mais celle qui reste la plus dévastatrice pour la femme est le cancer du sein. Chaque année, près de 10 000 nouveaux cas sont recensés [2] et il est responsable de près de 16% des décès liés au cancer chez la femme [3].

Le traitement le plus souvent utilisé dans le cas du cancer du sein est une ablation limitée [4]. En effet, si la tumeur maligne est de petite taille, alors elle peut être enlevée et la patiente peut conserver la partie saine de sa poitrine. Cependant dans 25% des cas [5], lorsque la tumeur est trop grande ou dans un souci de prévention, le sein sera entièrement prélevé. Dans ce dernier cas, la patiente peut faire appel à la chirurgie reconstructive.

La chirurgie reconstructive n'est en aucun cas obligatoire, elle permet cependant à la femme de mieux surmonter cette ablation et de récupérer une silhouette plus harmonieuse. Elle se déroule généralement en plusieurs interventions. La première a pour but de recréer la forme de la poitrine alors que les suivantes viseront à la symétriser ainsi qu'à recréer l'aréole et le mamelon [6]. Dans le cas de cette première intervention, plusieurs méthodes sont disponibles : l'utilisation d'une prothèse, d'un lambeau abdominal ou encore d'un lambeau dorsal. Les patientes ont tendance à privilégier l'utilisation d'un lambeau au vu de sa sensation plus naturelle. Celui-ci suivra par exemple les changements de température et de poids de la patiente.

Dans le cas de la reconstruction via un lambeau abdominal, une procédure qui devient de plus en plus répandue est la méthode Deep Inferior Epigastric Perforator (DIEP) [7]. Celle-ci consiste à prendre un lambeau de peau et de graisse sous-cutanée du bas du ventre (ainsi que ses vaisseaux et nerfs) et de le repositionner dans la cicatrice de l'ablation du sein, rendant ainsi son volume et sa forme au sein amputé. La procédure de la DIEP est schématisée à la Figure 1.1 et suit les étapes suivantes :

1. À la suite d'un cancer, le sein a dû être amputé.
2. Un morceau composé de peau, de tissus adipeux et des vaisseaux sanguins est prélevé à partir de l'abdomen.
3. Le lambeau libre est transplanté au niveau du sein amputé et les vaisseaux sanguins sont reconnectés.
4. Un nouveau sein est ainsi formé et la plaie au niveau de l'abdomen est refermée.
5. Le téton est reconstruit.

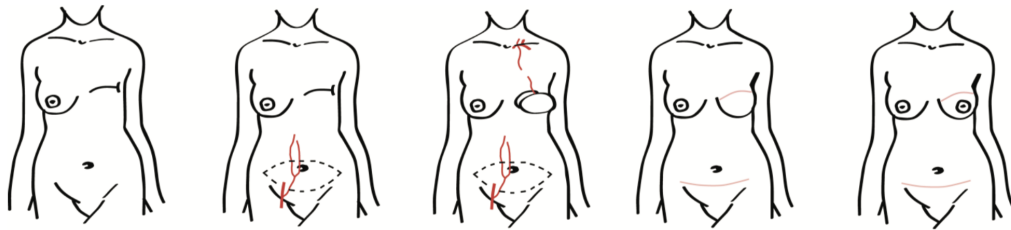


Figure 1.1/ Étapes générales d'une opération de chirurgie reconstructive dans le cas du cancer du sein. L'opération représentée ici est la méthode Deep Inferior Epigastric Perforator (DIEP). Tirée de [8]

Un des grands avantages de la DIEP est qu'elle n'entraîne aucun déficit musculaire abdominal puisque seules la peau et la graisse sont prélevées. Cependant, la taille minime des vaisseaux à suturer implique l'utilisation de la microchirurgie et augmente fortement la durée et la difficulté de l'opération [9]. Dans le cas où les vaisseaux ne seraient pas correctement rattachés, le lambeau peut mourir et laisser la patiente avec des séquelles non seulement au sein mais également à l'abdomen. La qualité de la DIEP est donc directement dépendante de la dextérité du chirurgien pratiquant l'opération.

1.2 La microanastomose et les gestes du chirurgien

Une opération de microchirurgie nécessite une grande concentration et un contrôle de soi conséquent. L'espace de travail est réduit au point que l'utilisation d'un microscope devienne obligatoire. Celui-ci permet au chirurgien d'avoir une image précise de l'opération mais avec une zone focale réduite à un ou deux millimètres de profondeur. Les instruments que le chirurgien manipule doivent y suivre une trajectoire précise et maîtrisée.

Les vaisseaux à recoudre sont maintenus en place par des forceps. Ils sont alignés et suturés 5,5 fois en moyenne [10]. Comme présenté sur la Figure 1.2; la forme de l'aiguille est telle qu'une seule rotation de celle-ci permet de passer à travers les deux vaisseaux. Dès lors, afin d'obtenir le meilleur geste, la rotation de l'aiguille doit se faire selon l'axe longitudinal de la pince. La distance, présentée sur la Figure 1.3, qui sépare l'entrée de la sortie de l'aiguille, doit être égale à trois fois le diamètre du vaisseau recousu [11].

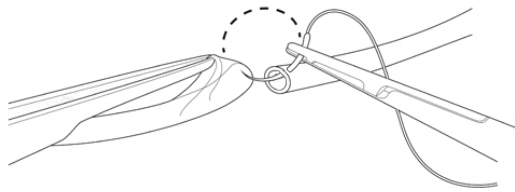


Figure 1.2/ L'aiguille passe à travers les deux extrémités des vaisseaux lors d'un geste circulaire autour de l'axe longitudinal de la pince. Tirée de [8]

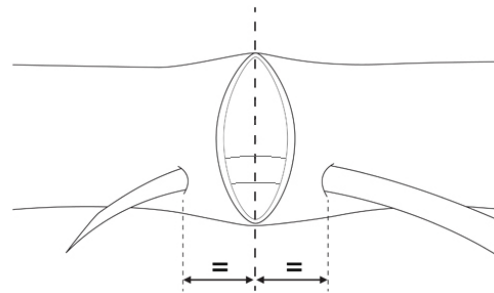


Figure 1.3/ L'aiguille doit pénétrer de façon équidistante des deux extrémités des vaisseaux et sur une longueur égale à trois fois le diamètre des vaisseaux. Tirée de [8]

Un forceps (sur la gauche de la Figure 1.2) participe également à la suture. Il permet à la fois de maintenir le vaisseau de gauche mais également de faire office de point d'appui pour perforer plus facilement celui-ci. Le chirurgien doit donc être stable et habile des deux mains [12].

Le chirurgien et son équipe sont généralement installés comme le montre la Figure 1.4. Le chirurgien, dans une position assise et ergonomique, est entouré d'un chirurgien assistant, également assis, et du reste de l'équipe : les anesthésistes et les infirmiers.

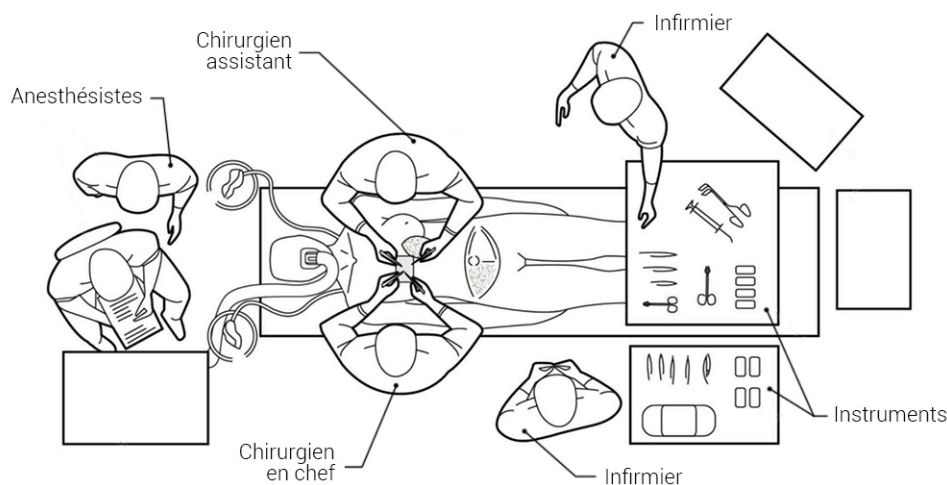


Figure 1.4/ Disposition générale des différents intervenants dans une salle d'opération lors d'une DIEP. Adaptée de [8]

1.3 L'assistance robotisée en chirurgie et à l'UCL

La microchirurgie impose tout un panel de techniques supplémentaires à apprendre, même pour un chirurgien qui pratique déjà. Ce sont des opérations qui demandent énormément de concentration ainsi que des mouvements précis de très faibles amplitudes. Les opérations sont généralement très longues et fatigantes [13] alors que la précision à atteindre est excessivement élevée et est directement liée à la qualité du chirurgien.

Au vu des capacités motrices limitées de l'être humain, il devient difficile pour un chirurgien d'opérer sur des vaisseaux plus petits qu'un millimètre de diamètre. Les tremblements physiologiques d'un opérateur entraîné se situent aux alentours de 15 à 35 μm [14], ce qui n'est pas négligeable. De plus, la précision qu'il peut atteindre diminue constamment avec la durée de l'opération [15] et le stress [16]. C'est pourquoi, sur l'ensemble des chirurgiens pratiquants, seul un faible nombre d'entre eux sont capables de réaliser les opérations les plus délicates.

L'assistance robotisée pour des opérations de microchirurgie représente ainsi une solution qui permet de réduire la difficulté des opérations tout en augmentant la performance et l'efficacité du chirurgien. Elle diminue les risques d'échec de l'opération, actuellement dans les alentours de 3% [17], en réduisant par exemple les tremblements ou en améliorant la précision du chirurgien. L'assistance robotisée permet également à celui-ci de se mettre dans une position optimale et d'être au maximum de ses capacités. La Figure 1.5 représente l'impact de cette assistance lors d'un acte de chirurgie. Finalement, via l'utilisation d'outils plus fins ou moins invasifs, l'assistance robotisée permet à l'opérateur d'atteindre des positions initialement inaccessibles [18] et d'offrir un rétablissement plus rapide pour le patient.

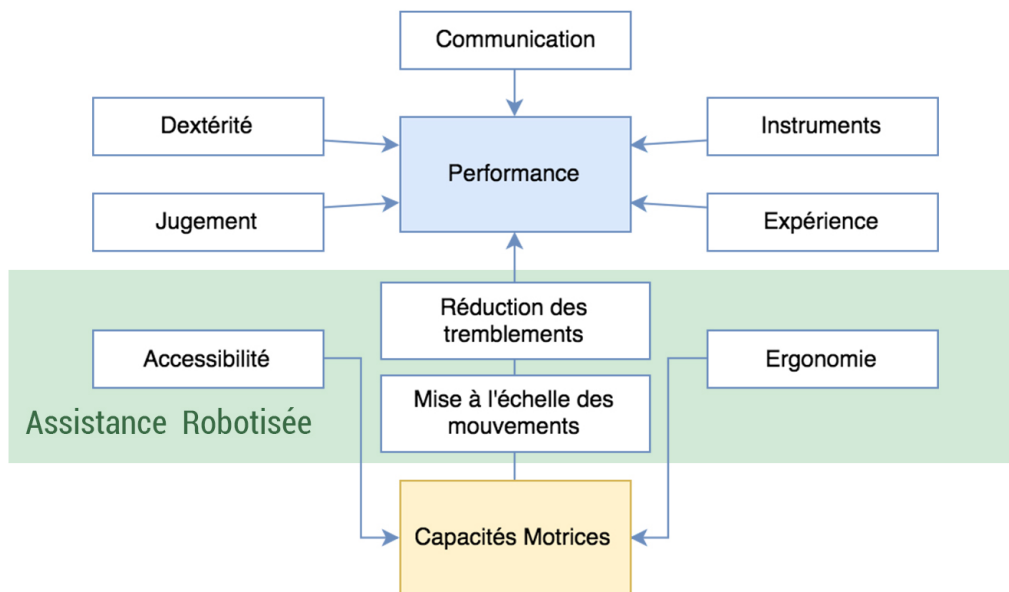


Figure 1.5/ Représentation des éléments intervenant lors d'un acte de chirurgie et mise en évidence de l'impact de l'assistance robotisée sur ceux-ci.

Dans le cadre de sa thèse de doctorat à l'Université Catholique de Louvain, intitulée *Assistance robotisée pour l'augmentation de la précision des gestes de chirurgies reconstructives*, un robot d'assistance à la microchirurgie (ci-après désigné "robot") a été réalisé par Léna Vanthournhout. Celui-ci permet le mouvement d'une aiguille selon 6 degrés de liberté. Une configuration cartésienne, composée de 3 glissières, assure les 3 degrés de liberté en position. Les 3 derniers degrés de liberté en orientation sont atteints via un système composé de 3 pivots. Dans la suite de son développement, le robot comprendra un septième et dernier degré de liberté correspondant à l'ouverture et la fermeture d'une pince.

Comme représenté sur la Figure 1.6, le robot ainsi conçu ne constitue que la partie droite du système complet mais a été imaginé de manière à pouvoir être utilisé avec un homologue gauche. Ce dernier est actuellement finalisé par Léna Vanthournhout.

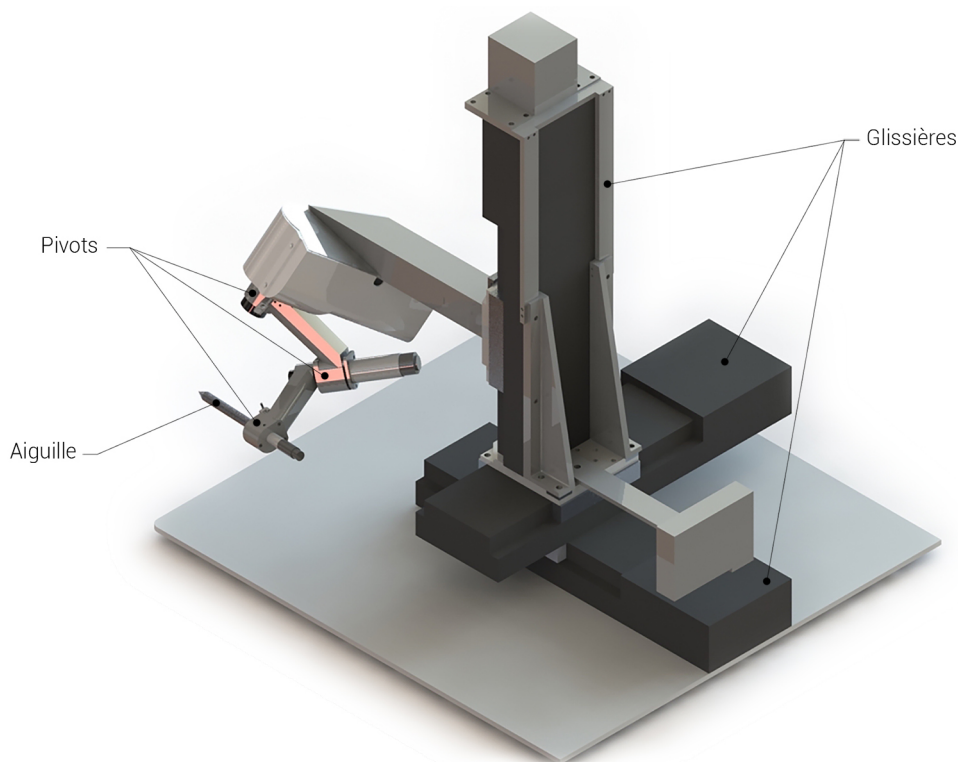


Figure 1.6/ Robot d'assistance à la microchirurgie développé dans le cadre de la thèse de Léna Vanthournhout. *Adaptée de* [19]

Actuellement, la téléopération du robot se fait par le biais d'une console achetée auprès de la société *3D System* : le *Geomagic Touch* (Figure 1.7). Lorsque l'opérateur réalise un mouvement avec le stylet du *Geomagic Touch*, ce mouvement est transmis au robot qui le reproduit de façon presque identique. Les mouvements de translation du stylet sont répliqués au niveau du robot mais à une échelle plus petite, variant de x30 à x50. Cette particularité permet à l'utilisateur d'effectuer des mouvements bien plus précis : un mouvement de 1 ou 2 centimètres du côté de la console se traduit par un mouvement de quelques dixièmes de millimètre au niveau du robot. Les mouvements de rotation du stylet ne subissent pas de mise à l'échelle et sont reproduits identiquement par le robot.



Figure 1.7/ Console *Geomagic Touch* actuellement utilisée pour téléopérer le robot d'assistance à la microchirurgie. Tirée de [20]

Malgré le fonctionnement actuel de l'ensemble, l'utilisation de cette console ne convient pas complètement au cadre de la microchirurgie. Entre autres, le *Geomagic Touch* dispose d'un espace de travail qui n'est pas adapté, offre une résolution trop faible et engendre, dans certaines positions, un blocage entre le styilet, sa structure et la main de l'utilisateur.

1.4 Objectifs et contributions personnelles

Afin de répondre à la problématique liée à la console actuelle, une solution a été imaginée dans l'optique d'offrir une console qui correspond davantage aux attentes de microchirurgie et qui s'adapte en particulier pour une utilisation conjointe avec le robot.

L'objectif principal de ce mémoire est de concevoir un prototype mécanique. Celui-ci représente une première version qui sera utilisée pour vérifier si la solution correspond bien aux besoins et qui servira de base pour de futures améliorations.

C'est en effet uniquement la partie mécanique du prototype qui est réalisée. La connexion électrique entre la console et le robot en passant par un ordinateur n'est pas réalisée. Cependant, les capteurs ont été choisis et la console adaptée pour pouvoir directement les intégrer sur le prototype.

En résumé, la liste de nos contributions personnelles est la suivante :

Contribution 1 : Détermination précise des besoins d'une console spécifiquement adaptée pour son utilisation conjointe avec le robot.

Contribution 2 : Étude et choix d'un modèle cinématique de la console optimisé pour une utilisation conjointe avec le robot et une intégration dans l'environnement.

Contribution 3 : Réalisation d'un modèle CAO¹ et construction d'un prototype mécanique.

1. CAO est l'acronyme de *Conception Assistée par Ordinateur*

Il est important de spécifier que le prototype sera toujours en cours de construction au moment de la remise de ce mémoire mais sera bien terminé pour le jour de la défense orale.

1.5 Structure du mémoire

Afin de retracer au mieux la réflexion qui a orienté le design du prototype, ce travail est structuré comme suit :

Le *chapitre* 2 introduit les besoins liés au projet. Un léger état de l'art des consoles de téléopération dans le domaine médical est réalisé et permet d'avoir une vue d'ensemble de ce qui est actuellement présent sur le marché. Ensuite, les attentes et les contraintes de la console à réaliser sont précisément définies.

Le *chapitre* 3 a pour objectif de définir la cinématique de la console. En premier lieu, les contraintes énoncées dans le chapitre 2 sont retranscrites en termes de critères de sélection. La console est séparée en deux ensembles, une partie *bras* et une partie *poignet* qui sont étudiées séparément.

Le *chapitre* 4 décrit en détail la réalisation du modèle CAO imaginé sur base de la cinématique définie dans le chapitre 3. Le chapitre se décompose également en deux parties, correspondant au *bras* et au *poignet*. L'ensemble des assemblages mécaniques y est décrit.

Le *chapitre* 5 prend du recul par rapport à l'ensemble du travail. Plusieurs critiques sont posées sur la solution réalisée et des perspectives d'amélioration sont explorées. L'objectif principal de ce chapitre est de faire évoluer la console lors de sa prochaine itération de conception.

Finalement, le *chapitre* 6 résume brièvement l'ensemble du travail réalisé tout au long de cette année.

Chapitre 2

Analyse du besoin

Abstract/ La console de téléopération du robot doit offrir 6 degrés de liberté à un stylet, 3 en translation et 3 en rotation. Celle-ci doit s'intégrer au sein d'un environnement restreint, disposer d'une compensation de la gravité et être la plus transparente possible lors de son utilisation.

Ce chapitre se décompose en deux parties. Premièrement, un léger état de l'art est présenté. Ensuite, les besoins spécifiques sont définis de manière à ce que la console fonctionne conjointement avec le robot, qu'elle s'intègre sans conflit dans son environnement et qu'elle réponde aux exigences de performance attendue.

2.1 État de l'art des consoles de téléopération

De nombreuses consoles de téléopération sont disponibles dans le domaine médical. Cette section reprend quelques-unes des plus pertinentes, les décrit brièvement et les compare entre elles avec un tableau récapitulatif (voir Tableau [2.1](#)).

Geomagic Touch

Développé par *3D Systems*, le *Geomagic Touch* est la console utilisée à l'heure actuelle par l'UCL pour son robot. Comme présentée sur la Figure [2.1](#) (a), elle offre six degrés de liberté à partir de 6 pivots. L'espace de travail ainsi créé est adapté pour des mouvements du poignet. Le stylet est modifiable et peut offrir un degré de liberté supplémentaire grâce à un bouton. Il existe également des plug-ins sur le marché pour remplacer le stylet et ainsi créer un système de préhension plus proche des outils utilisés par le chirurgien. Cependant, son espace de travail ainsi que sa résolution sont tous les deux insuffisants.

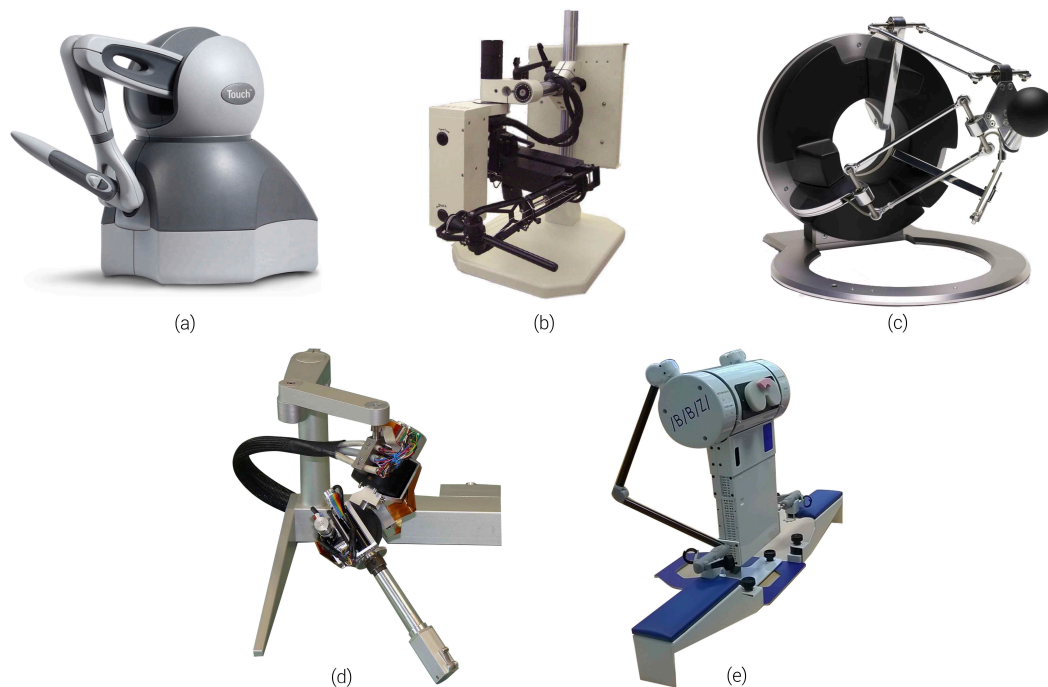


Figure 2.1/ Consoles de téléopération disponibles sur le marché. (a) Geomagic touch (tiré de [20]), (b) Freedom 6s [21], (c) Delta 6 [22], (d) Sofie [23], (e) Actaeon [24].

Freedom 6s

Développé par *MPB Technologies*, le *Freedom 6S* (Figure 2.1(b)) a une structure similaire à celle du Geomagic Touch. Il est également agencé en deux parties distinctes, une première composée de trois degrés de liberté en positionnement (pour les mouvements de translation) et une seconde, de trois degrés de liberté en orientation (mouvements de rotation). Il est à noter que la partie de positionnement est composée d'un système à 4 barres afin de rigidifier la structure et diminuer son inertie. Son espace de travail est adapté non plus aux mouvements du poignet mais à ceux de l'avant-bras.

Delta 6

La console *Delta 6* (Figure 2.1(c)) développée par *Force Dimension* suit un schéma cinématique complètement différent des autres consoles puisqu'elle est composée d'un système parallèle permettant de se déplacer en x, y et z . La structure est agencée en trois parallélogrammes espacés de 120° et reliés entre eux par une plateforme. La plateforme peut être déplacée librement dans l'espace tout en restant parallèle à la structure de base. Sur la plateforme, les trois derniers degrés de liberté en orientation sont présents sous la forme d'un joint rotule.

Sofie

Composée de seulement 4 degrés de liberté au lieu de 6, la console de téléopération *Sofie* (Figure 2.1 (d)), développée par l'université d'Eindhoven, est utilisée dans le cadre d'opérations au niveau de l'oeil. Elle est composée de trois degrés de liberté en rotation, d'un degré de translation qui est parallèle au dernier axe de rotation et finalement d'un bouton qui est utilisé pour la préhension. Bien que plusieurs degrés de liberté soient manquants, l'espace de travail est adapté à la fois aux mouvements du poignet et légèrement à ceux de l'avant-bras, ce qui est idéal dans le cadre de ce type d'opérations chirurgicales.

Actaeon

Développée par *BBZ Medical Technologies*, l'*Actaeon* (Figure 2.1(e)) est une console de téléopération conçue pour le robot d'assistance à la chirurgie *Da Vinci* [25]. Elle sert principalement de simulateur pour s'entraîner à l'utilisation de ce dernier. Son schéma cinématique est donc également composé de 6 pivots auxquels s'ajoute un système de préhension sous forme de pince. Bien que son espace de travail soit idéal, sa résolution est limitée. Le *Da Vinci* a en effet une précision d'un millimètre seulement [26].

Tableau 2.1/ Comparaison des caractéristiques principales de plusieurs consoles d'assistance à la microchirurgie.

		Geomagic Touch	Freedom 6S	Delta 6	Sofie	Actaeon
Degrés de liberté		6+1	6	6	4+1	6+1
Encombrement [mm]	x	160	250	700	N.C. ¹	550
	y	203	250	400	N.C.	400
Espace de travail en position [mm]	x	160	170	400	/	350
	y	120	220	400	/	135
	z	170	330	260	15	760
Espace de travail en orientation [°]	ϕ	297	170	40	90	N.C.
	ψ	260	130	40	90	N.C.
	θ	335	340	40	180	N.C.
Résolution [μ m]		55	2	20	50	N.C.
Résolution [°]		N.C.	0.001	0.04	0.3	N.C.
Amplitude de mouvements		poignet	avant-bras	poignet	poignet	poignet & avant-bras

1. Non Communiqué

2.2 Utilisation conjointe de la console avec le robot

La console réalisée doit permettre la téléopération du robot. Dans cette optique, celle-ci doit disposer d'un stylet jouissant des mêmes 6 degrés de liberté qu'offre le robot. Ces 6 degrés de liberté se décomposent en 3 degrés de translation ainsi qu'en 3 degrés d'orientation.

Le robot actuel ne représente que la partie droite du système complet. Un robot homologue gauche est en cours de réalisation et sera, une fois fini, intégré au système. Dans la même idée, la console réalisée correspondra uniquement à la partie de droite mais devra pouvoir fonctionner sans conflit avec un homologue gauche.

Les mouvements et les orientations du stylet de la console sont reproduits par l'aiguille du robot. Ainsi, il faut éviter les situations où le stylet se retrouve dans une configuration que l'aiguille ne peut atteindre. En effet, si ce cas de figure apparaît, le robot cesse de fonctionner et les deux systèmes sont dissociés, on parle de *désolidarisation* entre la console et le robot. Pour reprendre l'opération, le robot devra être calibré à nouveau, allongeant significativement le temps d'opération. La console doit donc être imaginée de manière à éviter au maximum sa *désolidarisation* avec le robot.

2.3 Intégration dans l'environnement

Généralement, dans les opérations de chirurgie téléopérées, des caméras, situées au niveau de la zone d'opération, captent et renvoient l'information visuelle au chirurgien situé à distance du patient. Dans ce cas-ci, l'utilisation d'un microscope binoculaire est préférée, mais entraîne inévitablement une proximité entre le patient et le chirurgien et entre le robot et la console de téléopération.

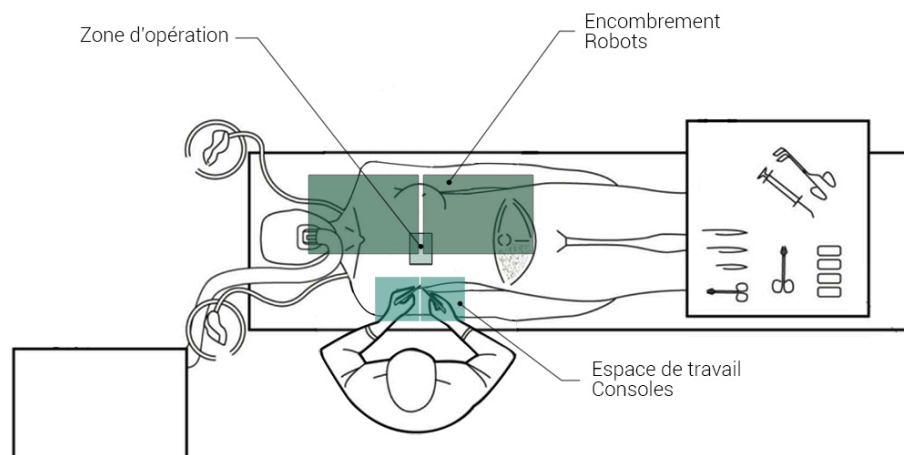


Figure 2.2/ Vue aérienne de l'environnement médical lors d'une opération. Le chirurgien, le patient, la zone d'opération, les robots et la console y sont représentés. *Adaptée de* [\[8\]](#)

Dans un cadre théorique et médical, l'implémentation des deux robots et des deux consoles devrait se faire au sein d'un environnement chargé (voir Figure 2.2). En pratique, l'environnement dans lequel la console s'intégrera, représenté à la Figure 2.3, se compose plus simplement du robot, d'un microscope, de l'utilisateur et d'un setup expérimental. Malgré tout, il est essentiel que la console ne rentre pas en collision avec un autre élément de l'environnement. Ainsi, la réduction de l'encombrement pour un même espace de travail reste un point important du design de la console.

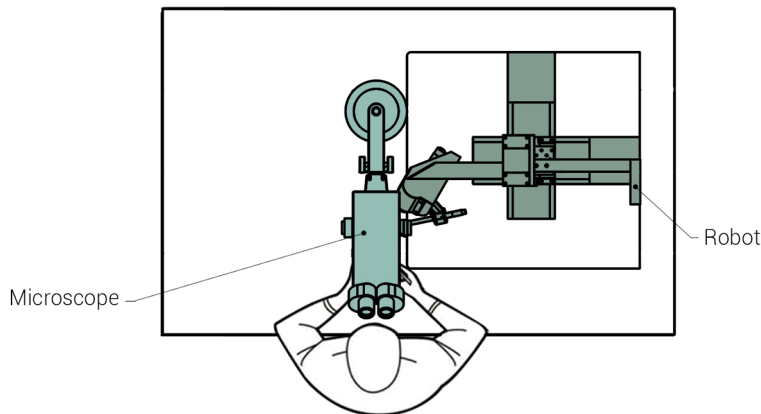


Figure 2.3/ Vue aérienne de l'environnement expérimental lors des phases de test. L'utilisateur, le robot et le microscope y sont représentés. *Adaptée de* [8]

2.4 Performances attendues

En terme de performances, la console doit offrir une résolution de $50\mu\text{m}$ et de 0.1° respectivement pour les mouvements de translation et d'orientation.

L'espace de travail de la console représente celui du robot augmenté du facteur de mise à l'échelle. Ce facteur n'étant pas fixe mais modifiable au cours du temps, l'espace de travail de la console a été défini de la manière suivante. La console doit offrir une première zone dont les dimensions sont équivalentes à celles de l'espace de travail du *Geomagic Touch* (sphère de 16cm diamètre) mais dans laquelle les conditions de résolution citées plus haut sont respectées. Cette zone correspond à *l'espace de travail de précision* de la console dans lequel le chirurgien réalisera les mouvements les plus fins. La console doit également permettre au stylet d'atteindre une deuxième zone, plus large, mais qui n'est pas sujette aux critères de résolution. Cette zone correspond à *l'espace de travail étendu* de la console qui, par exemple, permettra au chirurgien de mettre le stylet de côté ou de tirer un long fil (voir Figure 2.4). Pour la suite de ce mémoire, lorsque l'espace de travail du chirurgien est évoqué, celui-ci fait référence à *l'espace de travail de précision*.

Dans une optique de sécurité du patient et de confort du chirurgien, la console intégrera également un système de compensation de la gravité. Si le chirurgien venait à lâcher le stylet en cours d'opération, ce système permettrait à la console et au robot de rester en place.

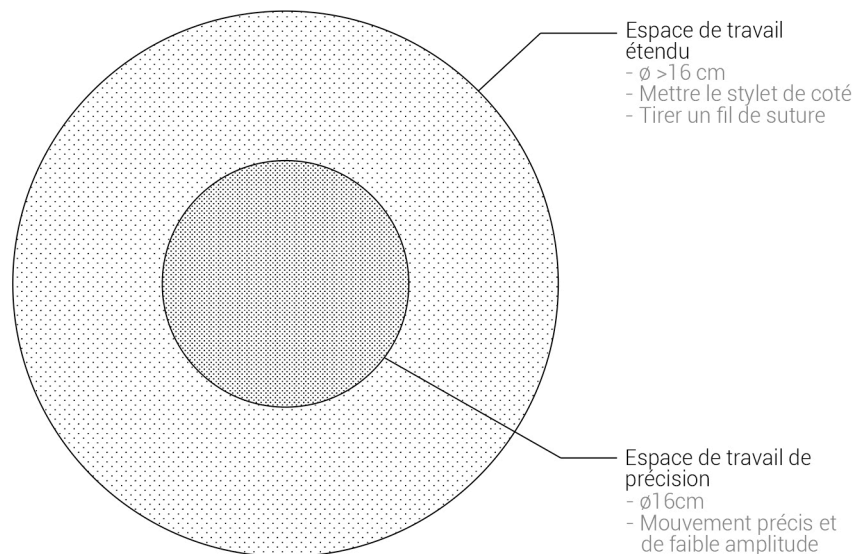


Figure 2.4/ Schématisation des deux espaces de travail de la console.

L'utilisation d'une console de téléopération implique également un besoin de transparence. Cette notion se traduit par la sensation de manipuler le stylet librement, sans force d'opposition, quels que soient les mouvements du stylet. Bien évidemment, rendre l'utilisation de la console totalement transparente est impossible, mais optimiser celle-ci est nécessaire. La réduction du poids, et plus particulièrement de l'inertie, est un aspect important du design. La notion d'isotropie au sein de l'espace de travail représente également un point clé de conception, signifiant ainsi qu'une utilisation du stylet, quelle que soit la direction du mouvement, doit se traduire par une sensation identique pour le chirurgien.

2.5 Contraintes non intégrées au prototype

Dans le cadre de la réalisation d'un premier prototype de console de téléopération, plusieurs critères ont été écartés et ne font pas partie du design :

- Le prototype n'est pas pourvu d'un système haptique, soit un système à retour de force.
- Le prototype n'intègre pas un septième degré de liberté supplémentaire correspondant à la préhension. Cependant, la Section [5.2.1](#), dans les perspectives d'amélioration, s'y intéresse.
- L'échelle entre le mouvement du stylet et celui de la console ne peut pas être modifiée directement depuis la console.
- La console n'est pas sujette à des critères de stérilisation.

Chapitre 3

Design cinématique

Abstract/ Sur base des objectifs de conception, la console de téléopération est séparée en deux parties : un *bras* et un *poignet* assurant respectivement 3 degrés de liberté en translation et 3 en rotation. La cinématique du *bras* est de type SCARA^[1], 2 pivots et 1 glissière placés en série. Le *poignet* est constitué de 3 pivots placés en série et dont les axes interceptent le même point.

Ce chapitre a pour objectif de définir la configuration cinématique de la console de téléopération. Ce résultat servira alors de squelette pour la conception du prototype dans le chapitre suivant.

Pour ce faire, l'approche suivante est utilisée. Premièrement, les critères de sélection sont définis. Ensuite, les deuxième et troisième sections étudient indépendamment les configurations cinématiques du *bras* et du *poignet* et sélectionnent pour chaque partie la solution la plus adaptée. Après avoir défini la cinématique finale, une dernière section permet de déterminer les dimensions des châssis^[2] en fonction de la résolution des encodeurs.

3.1 Critères de sélection

Afin d'orienter la démarche de conception, plusieurs critères sont définis. La console devra répondre au mieux à chacune de ces conditions.

3.1.1 Découplage cinématique entre la position et l'orientation

Le robot réalisé par l'UCL possède la particularité de découpler complètement la position et l'orientation de l'aiguille. La position de celle-ci est définie uniquement par les trois glissières du robot qui sont orientées selon les axes X, Y et Z.

1. SCARA est l'acronyme de Selective Compliance Assembly Robot Arm

2. La notion de châssis fait référence aux corps rigides reliant les articulations entre elles.

L'orientation de l'aiguille est, quant à elle, définie par 3 pivots en série et agencée de manière à ce que la rotation des pivots ne modifie pas la position du bout de l'aiguille.

Pour les raisons qui suivent, il semble plus adapté de concevoir une console qui intègre également ce découplage cinématique entre la position et l'orientation du stylet :

Premièrement, les besoins en position et en orientation ne sont pas les mêmes. La position doit avoir une résolution de $50\mu\text{m}$ et est ensuite mise à l'échelle par un facteur allant de $\times 30$ à $\times 50$. L'orientation, quant à elle, nécessite une résolution de 0.1° et n'est pas sujette à une mise à l'échelle.

Ensuite, ce choix permet de concevoir indépendamment les systèmes pour éviter de sortir de l'espace de travail en position et en orientation et d'éviter de *désolidariser* la console du robot. La *désolidarisation*, précédemment abordée dans la Section 2.2, apparaît lorsque le stylet de la console se trouve dans une position ou une orientation qui n'est pas atteignable par le stylet du robot. Cette action implique de devoir réinitialiser la console et allonge significativement le temps d'opération.

Ainsi, la console réalisée est également séparée en deux parties qui doivent répondre aux conditions suivantes :

1. La position en bout de stylet est définie uniquement par la partie *bras* de la console et est indépendante de la partie *poignet*.
2. L'orientation du stylet est définie uniquement par la partie *poignet* de la console et est indépendante de la partie *bras*.

Le découplage permet ainsi de ne pas avoir d'interaction entre le système de position et le système d'orientation. Il permet de séparer les différents besoins et de les concevoir de manière indépendante.

La Figure 3.1 représente deux cas de figure qui permettent d'illustrer la notion de découplage cinématique. En (a), la position du panneau a une influence sur son orientation. En (b), l'orientation du panneau est indépendante de sa position et représente ainsi une configuration cinématiquement découplée.

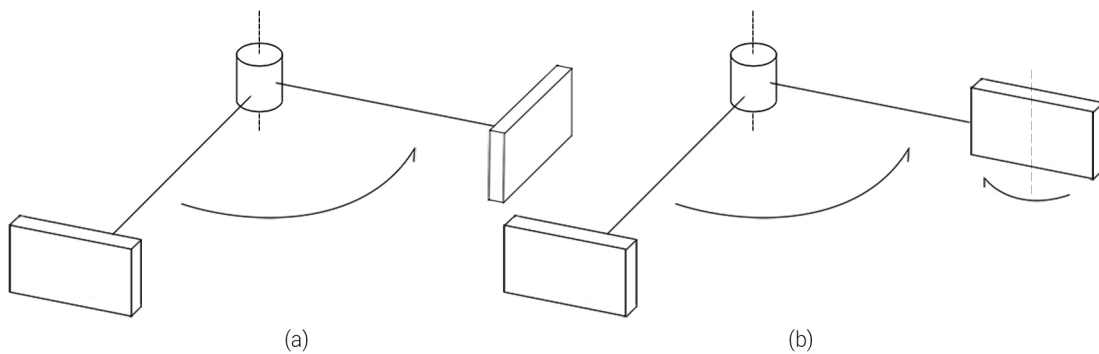


Figure 3.1/ (a) Configuration sans découplage cinématique. (b) Configuration intégrant un découplage cinématique.

3.1.2 Transparence de la console lors de son utilisation

L'utilisation de la console par le chirurgien doit être la plus transparente possible. Cela signifie que l'utilisateur doit presque avoir l'impression de manipuler le stylet dans le vide, sans aucun point d'attache.

Cette transparence se traduit plus précisément par les critères suivants [27] :

Inertie : Il est important pour un dispositif d'avoir la plus petite inertie possible.

Jeu mécanique : Espace qui existe entre deux éléments d'un assemblage mécanique. Le jeu représente une distance sur laquelle un élément peut être déplacé sans appliquer de force ou de mouvement sur l'élément suivant dans la séquence mécanique [28]. Le jeu induit une sensation de zone vide.

Manipulabilité : Concept traduisant la notion d'éloignement par rapport aux singularités et le caractère isotrope d'une configuration [29]. L'indice de manipulabilité est une mesure quantitative et sans unité, établie à partir de la cinématique du système, plus particulièrement via la jacobienne $J = \frac{\partial f(\theta)}{\partial \theta}$ ($f(\theta)$ étant la fonction de position et θ les variables des articulations).

$$\mu = \sqrt{\det(JJ^T)}$$

Pour les sections suivantes, et dans l'objectif de choisir la cinématique de la console, ce sont principalement les notions d'inertie et de manipulabilité qui sont mises en avant. La notion de jeu mécanique est mise de côté pour l'instant mais incluse dans la conception du prototype dans le chapitre 4.

3.1.3 Performances des mesures de la position de la console

Puisque la console sert à téléopérer un robot, un système de mesure de la position et de l'orientation du stylet doit y être intégré. Les performances d'un tel système se traduisent par les éléments suivants [30] :

Résolution : Plus petite valeur du mouvement détectable par les capteurs.

Exactitude et précision : L'exactitude est la mesure de la différence entre la mesure et la valeur réelle. La précision est la mesure de l'étendue de plusieurs mesures d'une même position.

Ces critères ne sont pas utilisés pour départager les différentes solutions entre elles. C'est seulement après avoir sélectionné la cinématique que le critère de résolution est utilisé. Il permet de définir, dans la Section 3.5, les dimensions des châssis³ en fonction de la résolution des appareils de mesure.

3. La notion de châssis fait référence aux corps rigides reliant les articulations entre elles.

3.1.4 Encombrement et espace de travail

Dans un cadre théorique d'utilisation médicale, la console doit pouvoir s'intégrer dans un environnement composé d'un ou deux chirurgiens, de plusieurs assistants, d'un patient, d'un microscope et de deux robots d'assistance à la microchirurgie (voir Figure 2.2). En pratique, et dans l'optique de conception d'un prototype, l'environnement se réduit à un microscope, le robot, l'utilisateur et un équivalent patient (une souris ou une autre installation expérimentale) (voir Figure 2.3). Bien que ce deuxième environnement soit moins saturé, l'encombrement reste un point important. La configuration de la console doit occuper un encombrement minimum tout en offrant un espace de travail suffisant pour le chirurgien.

3.1.5 Compensation de la gravité

L'implémentation d'un système de compensation de la gravité au sein de la console s'intègre dans une démarche de sécurité du patient et de confort d'utilisation par le chirurgien.

Si le chirurgien venait à lâcher le stylet, un système doit être présent afin que la console et le robot restent en place, le robot téléopéré ne blessera ainsi pas le patient. Cette solution est préférée à un arrêt automatique du robot (par exemple suite à une mesure de l'accélération du stylet supérieure à 1G) car elle offre un temps de réaction plus rapide et permet de reprendre directement l'opération sans réinitialiser la console.

L'implémentation de la compensation de la gravité rejoint également l'idée de rendre le travail du chirurgien plus confortable. Un tel système permet au chirurgien de mettre le stylet de côté s'il désire prendre une brève pause, par exemple pour se dégourdir les doigts ou se repositionner sur son siège. Une compensation de la gravité permet également au chirurgien de ne pas devoir porter le poids de la console et diminue la fatigue accumulée au cours de l'opération.

En pratique, la compensation de la gravité peut s'appliquer de deux façons [31] :

- La *compensation active* combine un système motorisé, des capteurs et une boucle de contrôle.
- La *compensation passive* est réalisée à partir d'un système de contre poids ou de ressorts. Le principe est de conserver l'énergie potentielle de la structure tout au long de ses différents mouvements [32].

Lorsque cela est possible, une *compensation passive* est préférée à une *compensation active*. En effet, la présence d'un retour haptique ne faisant pas partie de la liste des objectifs, le prototype conçu ne dispose initialement pas de moteur. Une *compensation de la gravité active* entraîne un ajout de moteur sur la console uniquement à cette fin et est néfaste pour le poids et l'inertie de la console et consomme de l'énergie.

L'implémentation d'un système de compensation de la gravité interfère sur l'objectif de transparence décrit dans la Section 3.1.2. Idéalement, l'ajout d'un tel système ne doit pas entraîner une anisotropie entre la direction z et les autres directions.

3.2 Configuration du *bras*

Cette section vise à définir la cinématique du *bras* de la console. Celui-ci doit permettre les 3 degrés de liberté de position tout en respectant au mieux les objectifs définis plus haut. Après avoir présélectionné plusieurs solutions, celles-ci sont étudiées et comparées entre elles afin de retenir la mieux adaptée.

3.2.1 Choix préliminaires

Pour choisir la configuration du *bras*, deux configurations principales sont possibles : en série ou en parallèle. Les robots en série sont composés de segments reliant la base à l'organe terminal par le biais d'une chaîne cinématique ouverte. Les robots parallèles intègrent plusieurs chaînes séparées entre la base et l'organe terminal, créant ainsi des chaînes cinématiques fermées [33]. Ces deux configurations sont représentées sur la Figure 3.2.

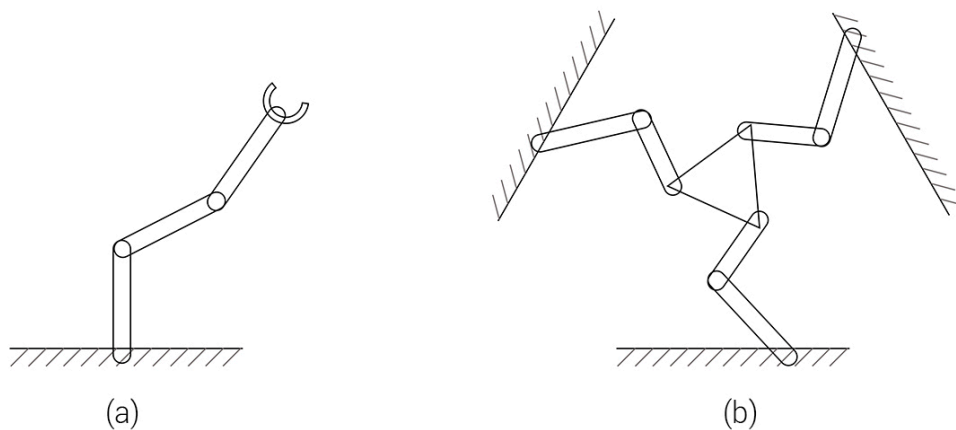


Figure 3.2/ Représentations schématiques d'un robot en série (a) et d'un robot en parallèle (b).

Bien que les robots parallèles présentent plusieurs avantages intéressants, dont une meilleure précision [34], leurs inconvénients majeurs découlent de leur complexité de conception et de commande ainsi que de leur faible rapport espace de travail/encombrement [35]. La configuration de type parallèle est par conséquent écartée.

Les configurations les plus courantes pour un *bras* offrant 3 degrés de liberté sont les suivantes : Anthropomorphique, Sphérique, SCARA, Cylindrique et Cartésien. Ces 5 configurations sont représentées à la Figure 3.3.

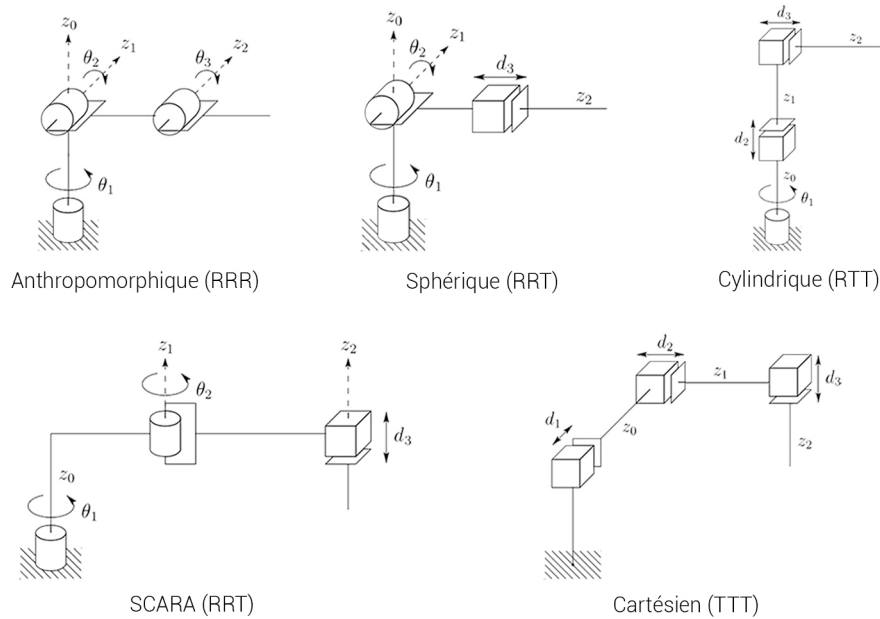


Figure 3.3/ Représentations schématiques des 5 configurations les plus courantes pour un robot en série à 3 degrés de liberté. *Adaptée de [36]*

Trois de ces cinq configurations sont retenues :

- Malgré la présence de trois glissières, **la configuration cartésienne** montre de l'intérêt car elle répond directement à l'objectif de découplage cinématique entre la position et l'orientation. C'est également la même configuration qu'utilise le robot.
- **La configuration anthropomorphique** est retenue car elle se compose de 3 liaisons cylindriques et représente également la configuration la plus récurrente dans l'état de l'art.
- **La configuration Scara** est également retenue car un système de compensation de la gravité peut être intégré seulement sur la liaison prismatique. Il est également possible d'y intégrer un système afin d'assurer le découplage cinématique entre la position et l'orientation.

Les deux configurations restantes sont écartées car elles ne répondent pas suffisamment aux objectifs de conception (présence de deux liaisons prismatiques moins adaptées que les pivots dans ce cadre-ci [37, 38], intégration complexe d'un découplage cinématique entre position/orientation ou rapport espace de travail/encombrement faible).

Les sections suivantes étudient plus en profondeur les configurations cartésienne, anthropomorphique et SCARA par rapport aux critères de conception. Le Tableau 3.1, se trouvant en fin de section, reprend les caractéristiques principales de ces 3 configurations.

3.2.2 Configuration cartésienne

La configuration cartésienne est composée de trois liaisons prismatiques dont les axes de translation sont perpendiculaires entre eux. Cette configuration représente une solution intéressante dans l'optique où elle est identique à celle utilisée par le robot et donc permettrait une coordination d'axe à axe entre le robot et la console.

Découplage cinématique

Les trois glissières permettent d'exécuter directement les 3 mouvements de translation sans modifier l'orientation. Cette configuration offre donc un découplage direct entre la position et l'orientation du stylet. Elle représente la solution la plus adaptée dans le cadre de cet objectif.

Compensation de la gravité

Seule la translation en Z de la configuration entre en compte pour une compensation de la gravité. Cette articulation peut être placée, au choix, en première, deuxième ou en dernière position.

- Dans le cas où la glissière en Z est la première articulation du *bras*, le poids lié au système de compensation de gravité n'intervient pas dans l'inertie ressentie lors des mouvements dans le plan XY . Cependant, ce choix entraîne un poids plus important à compenser.
- Dans le cas où la glissière en Z est la dernière articulation du *bras*, c'est le contraire. Le poids à compenser est plus faible mais le poids du système de compensation de la gravité intervient dans l'inertie ressentie lors des mouvements dans le plan XY .

Dans les deux cas, une compensation de la gravité passive peut être appliquée via un contrepoids ou un ressort à force constante. Étant donné qu'un contrepoids double la masse et l'inertie ressenties, le ressort à force constante est préféré. L'articulation en Z est préférentiellement placée en début de *bras* de manière à ce que le ressort à force constante n'augmente pas le poids de la console.

Encombrement et espace de travail

À cause de ses liaisons uniquement prismatiques, le système cartésien est caractérisé par un rapport espace de travail/encombrement relativement faible. Une représentation schématique de son espace de travail est donnée à la Figure [3.4](#).

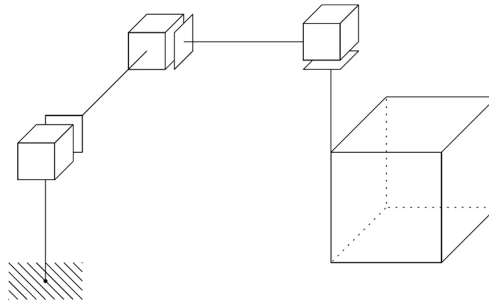


Figure 3.4/ Représentation de l'espace de travail d'une configuration cartésienne. Tirée de [36]

Utilisation et transparence

La configuration cartésienne offre un espace de travail au caractère isotrope. La manipulabilité et la résolution ne varient pas et restent constantes à travers l'ensemble de celui-ci. Cependant, la présence de 3 liaisons prismatiques est néfaste pour l'inertie. La friction générée par ce type de liaison est plus grande que celle générée par des liaisons cylindriques [39].

3.2.3 Configuration anthropomorphique

La configuration anthropomorphique est la plus répandue dans l'état de l'art des consoles médicales. Celle-ci est composée de trois liaisons cylindriques. Les axes de rotation des deux dernières liaisons sont parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe de la première liaison. Elle est représentée à la Figure 3.5.

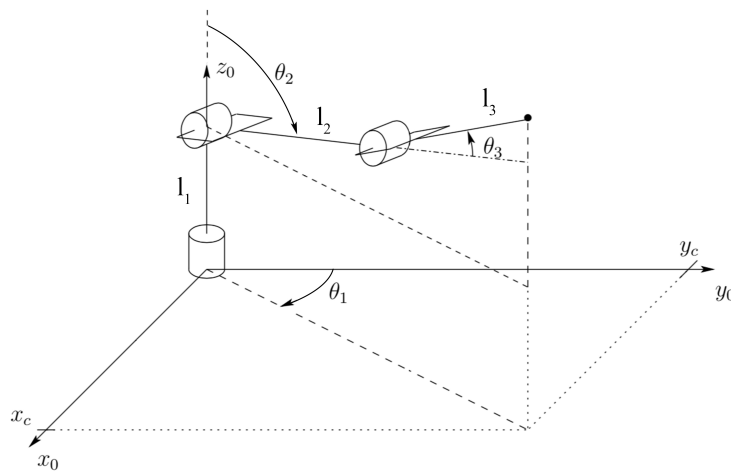


Figure 3.5/ Représentation des différentes variables d'une configuration anthropomorphique. Tirée de [36]

Découplage cinématique

De par la présence des trois liaisons cylindriques, la position du *bras* influence complètement l'orientation du stylet. Un système de compensation de l'orientation est complexe à mettre en œuvre puisqu'il doit compenser à la fois une rotation induite par la première liaison et une rotation induite par les deux dernières liaisons. Cette solution ne permet donc pas, ou difficilement, le découplage cinématique entre la position et l'orientation du stylet.

Compensation de la gravité

Dans la configuration anthropomorphe, une compensation active est plus simple à mettre en place qu'une compensation passive. En effet, la compensation de la gravité doit agir à la fois sur le deuxième et le troisième pivots. Un système de contrepoids ou de ressort est possible mais encombrant et complexe [40]. Une compensation active, par l'ajout d'un moteur sur chacun des deux pivots, est ainsi plus adaptée pour cette configuration-ci [41].

Encombrement et espace de travail

Grâce aux trois pivots, la configuration anthropomorphe offre le meilleur rapport espace de travail/encombrement et explique ainsi pourquoi elle se retrouve si régulièrement sur le marché. Une représentation schématique de son espace de travail est donnée à la Figure 3.6.

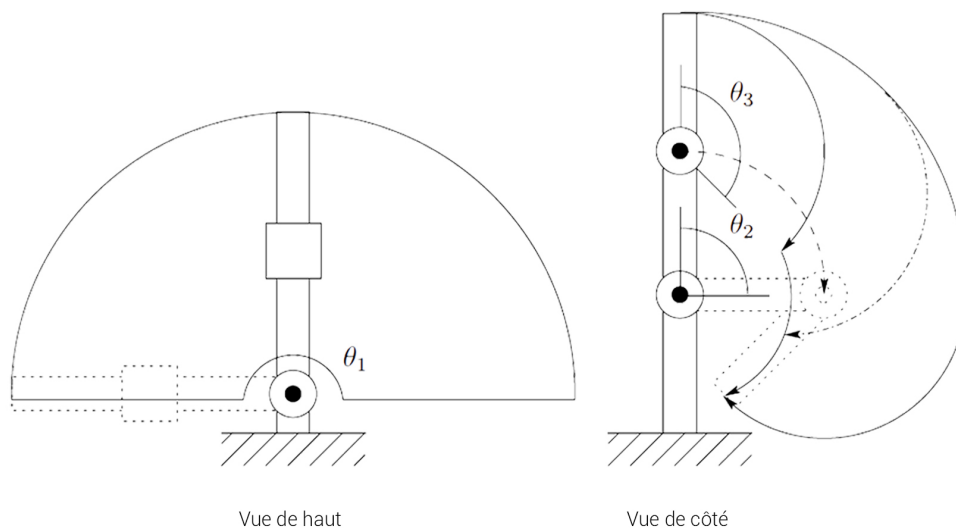


Figure 3.6/ Représentation de l'espace de travail d'une configuration anthropomorphe.
Adaptée de [36]

Utilisation et transparence

Contrairement à la configuration cartésienne, la manipulabilité de la configuration anthropomorphe varie fortement en fonction de la position au sein de l'espace de travail comme le montre la Figure 3.7. En effet, certaines positions sont optimales pour la manipulabilité tandis que d'autres l'annulent, ce sont les positions de singularité (*bras* complètement ouvert ou complètement fermé). La longueur des châssis intervient également dans la manipulabilité : au plus ceux-ci sont longs, au plus la variation de la manipulabilité dans l'espace de travail est faible⁴.

L'expression de la jacobienne de la configuration anthropomorphe est la suivante :

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} -s_1(l_2s_2 + l_3s_{23}) & c_1(l_2c_2 + l_3c_{23}) & c_1l_3c_{23} \\ c_1(l_2s_2 + l_3s_{23}) & s_1(l_2c_2 + l_3c_{23}) & s_1l_3c_{23} \\ 0 & -(l_2s_2 + l_3s_{23}) & -l_3s_{23} \end{bmatrix}$$

Où, entre autres, s_1 et c_{23} signifient respectivement $\sin(\theta_2)$ et $\cos(\theta_2 + \theta_3)$. L'expression de la manipulabilité $\mu = \sqrt{\det(JJ^T)}$ vaut alors [42] :

$$\mu = l_2l_3 * | (l_2\sin(\theta_2) + l_3\sin(\theta_2 + \theta_3)) * \sin(\theta_3) |$$

l_1 , l_2 , l_3 et θ_1 , θ_2 , θ_3 représentent respectivement les longueurs des châssis et les angles de rotation des pivots de la figure 3.5. l_1 et θ_1 n'influencent pas la valeur de la manipulabilité. Pour un même espace de travail, soit $l_2 + l_3 = cste$, le choix $l_2 = l_3$ maximise la valeur de la manipulabilité.

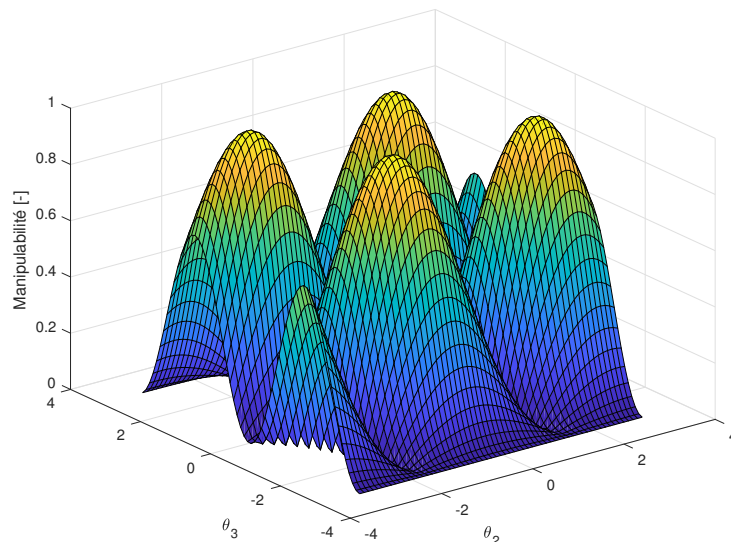


Figure 3.7/ Évolution de la manipulabilité d'une configuration anthropomorphe en fonction des variables de ses articulations.

4. Cette notion est approfondie dans la Section 3.5

3.2.4 Configuration Scara

Sur le marché de la robotique, la configuration SCARA est utilisée principalement pour des opérations de *Pick and Place*. Celle-ci est composée de deux liaisons cylindriques et d'une liaison prismatique. Les axes de rotation ou de translation des trois liaisons sont tous parallèles entre eux. Cette configuration est représentée à la Figure 3.8.

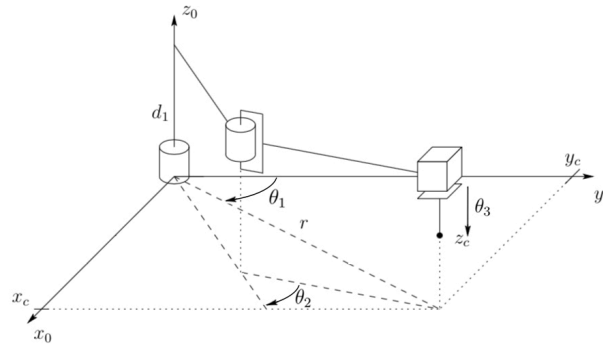


Figure 3.8/ Représentation des différentes variables d'une configuration SCARA. Tirée de [36]

Découplage cinématique

Initialement, la configuration SCARA n'offre pas directement un découplage entre la position et l'orientation. En effet, l'orientation du stylet est influencée par la rotation des deux liaisons cylindriques. Cependant, cette influence n'intervient qu'autour de l'axe Z puisque les axes de rotation des deux pivots sont parallèles entre eux. Un système de transmission de la rotation peut facilement être mis en place afin de compenser la rotation induite par la position du bras et ainsi permettre le découplage cinématique. Un tel système peut être réalisé à partir de plusieurs poulies et courroies placées entre les pivots et le bout du bras (voir Figure 3.9).

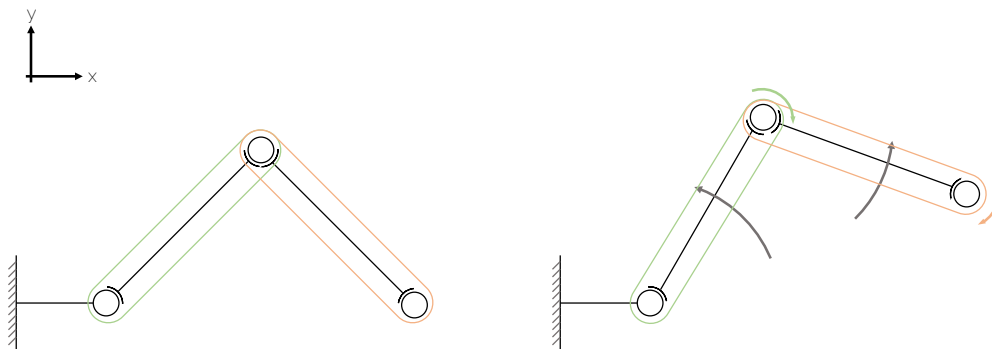


Figure 3.9/ Principe de transmission de la rotation au sein d'une configuration SCARA.

Compensation de la gravité

Tout comme dans la configuration cartésienne, seule la translation en Z de la configuration entre en compte pour une compensation de la gravité. L'articulation correspondante peut être placée soit en première ou en dernière position. La discussion sur ces deux possibilités est identique à celle de la Section 3.2.2.

Ainsi, l'articulation en Z est préférentiellement placée en début de *bras* avec un ressort à force constante.

Encombrement et espace de travail

De par la présence d'une glissière et de deux pivots, le rapport encombrement/espace de travail de la configuration SCARA est meilleur que celui de la configuration cartésienne et se rapproche de celui de la configuration anthropomorphique. Une représentation schématique de son espace de travail est donnée sur la Figure 3.10.

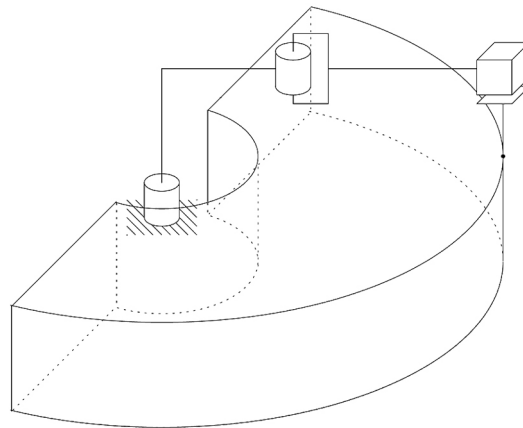


Figure 3.10/ Représentation de l'espace de travail d'une configuration SCARA. *Tirée de* 36

Utilisation et transparence

La configuration SCARA distingue les mouvements dans la direction de l'axe Z des mouvements dans le plan XY. Les premiers sont uniquement dépendants de la glissière et la manipulabilité est donc constante dans cette direction. Les deuxièmes dépendent des deux pivots et, par conséquent, la manipulabilité qui y est liée évolue au sein de l'espace de travail.

L'évolution de la manipulabilité est représentée sur la Figure 3.11. De nouveau, la longueur des châssis intervient dans cette expression : au plus ceux-ci sont longs, au plus la variation de la manipulabilité dans l'espace de travail est faible⁵.

5. Cette notion est approfondie dans la Section 3.5

L'expression de la jacobienne de la configuration SCARA est la suivante :

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} & l_2 c_{12} & 0 \\ -l_1 s_1 - l_2 s_{12} & -l_2 s_{12} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

L'expression de la manipulabilité vaut alors [42] :

$$\mu = l_1 l_2 | \sin(\theta_2) |$$

Dans cette expression, l_3 , θ_1 et θ_3 n'ont pas d'influence. Seule la rotation θ_2 intervient sur la valeur de la manipulabilité. Pour un même espace de travail, soit $l_1 + l_2 = cste$, la manipulabilité maximale est atteinte lorsque $l_1 = l_2$ et $\theta_2 = 90^\circ$.

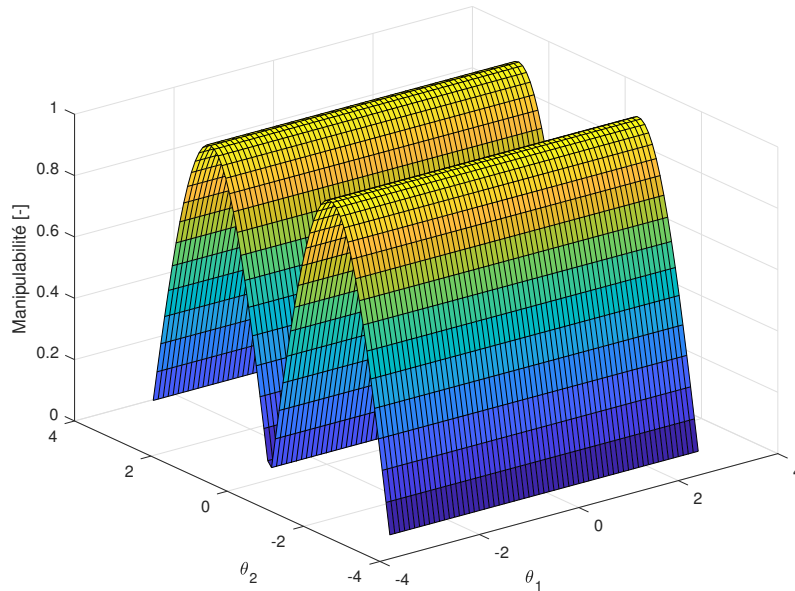


Figure 3.11/ Évolution de la manipulabilité d'une configuration SCARA EN FONCTION DES VARIABLES DE SES ARTICULATIONS.

3.2.5 Conclusion et choix de la configuration du *bras*

Le Tableau 3.1 reprend les différentes caractéristiques de chacune des 3 solutions étudiées. Pour faire un choix parmi celles-ci, la démarche suivante est adoptée. Premièrement, la configuration anthropomorphique est écartée car il est plus complexe d'y intégrer le découplage cinématique entre l'orientation et la position ainsi qu'une compensation de la gravité. Ensuite, c'est la configuration cartésienne qui est mise de côté. Bien qu'elle ait l'avantage d'offrir un comportement isotrope dans tout l'espace de travail, son encombrement est trop important et la présence des 3 glissières n'est pas optimale pour la transparence. Finalement, la configuration SCARA est retenue. Avec 2 pivots et 1 glissière, celle-ci représente le meilleur compromis par rapport aux différents critères fixés.

	Cartésien	Anthropomorphique	SCARA
Découplage cinématique	Direct	Possible mais complexe	Possible
Compensation de la gravité	Passive sur une glissière	Active sur deux pivots	Passive sur une glissière
Ratio encombrement/ espace de travail	Important	Optimal	Bon
Manipulabilité	Identique dans tout l'espace de travail	Dépendante de la rotation de 2 pivots	Dépendante de la rotation d'un pivot
Inertie	Élevée (3 glissières)	Faible (3 pivots)	Moyenne (2 pivots + 1 glissière)

Tableau 3.1/ Caractéristiques principales de 3 configurations de *bras* robotiques : cartésienne, anthropomorphique et SCARA.

3.3 Configuration du *poignet*

Cette section vise à définir la cinématique du *poignet* de la console. Celui-ci doit permettre les 3 degrés de liberté en orientation. Les critères de conception restent les mêmes que pour la partie *bras* à l'exception du critère de compensation de la gravité. Maintenir le stylet en position est crucial afin d'éviter que l'aiguille ne rentre dans le patient si le chirurgien lâche le stylet. Cependant, maintenir le stylet en orientation ne représente pas une réelle plus-value pour la console. De plus l'intégration d'un système de compensation de la gravité sur le *poignet* se traduit par une augmentation importante de son poids et de sa complexité.

Contrairement à la partie *bras* où la sélection de la cinématique s'est faite sur base d'un comparatif, la sélection de la cinématique du *poignet* est réalisée étape par étape jusqu'à une solution finale.

Découplage cinématique

Comme cité plus haut, un des principaux objectifs de la console est le découplage cinématique entre la position et l'orientation. Dans la section précédente, le choix de la cinématique du *bras* s'est réalisé de manière à ce que l'orientation du stylet soit indépendante de la position du *bras*. Afin de pouvoir appliquer le découplage complet, la cinématique du *poignet* est définie de manière à ce que la position en bout de stylet soit indépendante de l'orientation de celui-ci.

Afin de remplir cette condition, le *poignet* possède un *centre de rotation déporté* (RCM)⁶. Tous les axes de rotation du *poignet* interceptent le même point. Ce point correspond au bout du stylet. Ainsi, un mouvement de rotation du *poignet* ne peut pas modifier la position du bout du stylet.

6. RCM est l'acronyme de Remote Center of Motion en anglais.

Cette configuration particulière est utilisée dans le poignet du robot afin d'assurer le découplage entre la position et l'orientation. La Figure 3.12 représente la cinématique du poignet du robot et permet de visualiser le concept de RCM.

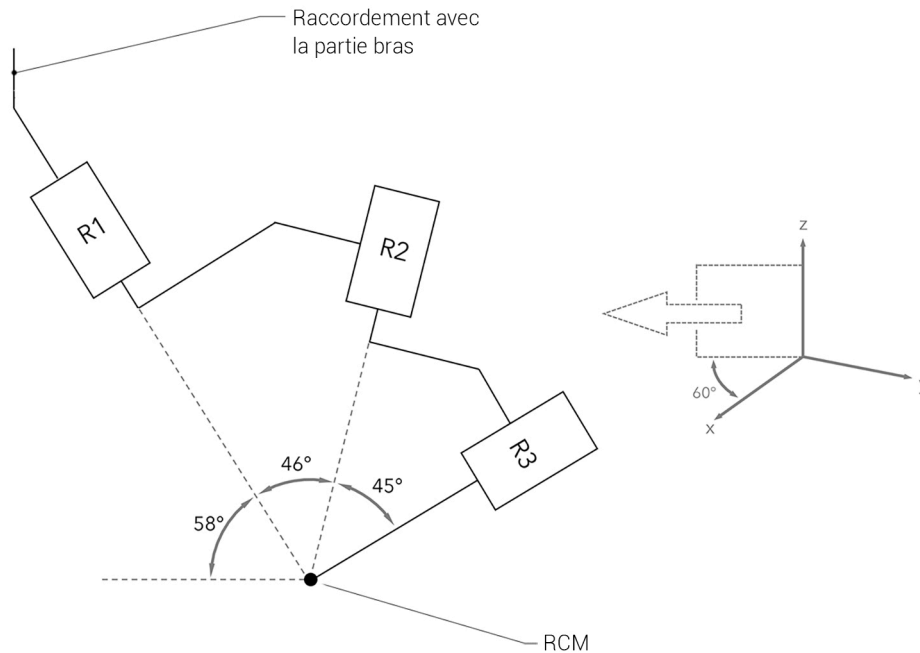


Figure 3.12/ Schéma cinématique du poignet du robot. Les axes de rotation des 3 pivots interceptent le même point, créant ainsi un RCM. Les angles entre chacun des axes ainsi que les angles de positionnement du premier axe sont représentés.

Position de la main du chirurgien sur le stylet

Deux arrangements sont possibles en ce qui concerne la position relative entre la main du chirurgien et le point d'attache du stylet. Le premier choix correspond au cas où la main tient le stylet entre le RCM et le point d'attache du stylet. Le second choix, quant à lui, correspond au cas où la main tient le stylet au-dessus du RCM et du point d'attache. Ces deux configurations sont représentées à la Figure 3.13.

Le premier arrangement entraîne directement un encombrement plus important, une augmentation du poids et donc de l'inertie. Le deuxième arrangement réduit l'inertie et l'encombrement mais est plus facilement sujet à une limitation de l'espace de travail par contact entre les éléments du *poignet* dans certaines orientations. Cependant, cela ne pose pas trop de problèmes dans la mesure où l'espace de travail en orientation du robot est également limité pour éviter le contact entre les éléments du robot. C'est donc l'arrangement inférieur (point d'attache en dessous de la main) qui est retenu.

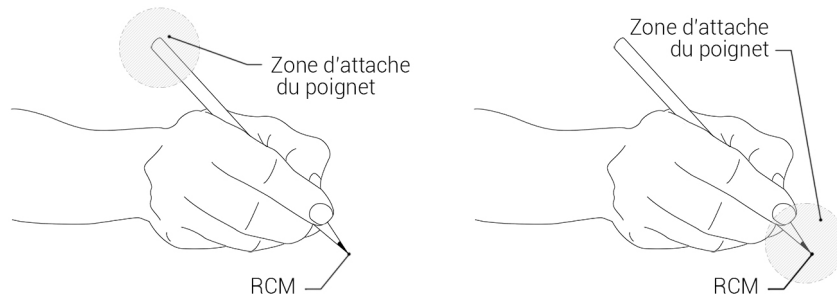


Figure 3.13/ Deux possibilités de positionnement de la main du chirurgien sur la console. À gauche, la main se situe entre la zone d'attache et le RCM. À droite, la main se trouve au-dessus de l'attache et du RCM.

Configuration en série ou en parallèle

Deux possibilités de cinématique sont possibles pour le *poignet*, en parallèle ou en série. Deux exemples de ces configurations sont représentés sur la Figure 3.14. Malgré une précision plus élevée des systèmes parallèles, ceux-ci sont trop encombrants. Le choix de la cinématique se tourne vers une configuration en série, plus récurrente dans l'état de l'art des consoles de téléopération.

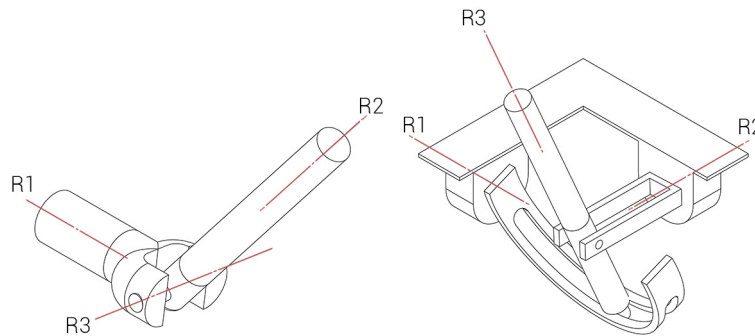


Figure 3.14/ Exemples d'une cinématique en série, à gauche, et en parallèle, à droite, pour la partie *poignet* de la console.

Limitation de l'espace de travail

Tels que représentés sur la Figure 3.12, les 3 axes de rotation du poignet du robot ne sont pas écartés de 90° l'un par rapport à l'autre. Le premier et le deuxième axes de rotation sont écartés de 46° tandis que le deuxième et le troisième sont écartés de 45° . De plus, le premier axe est initialement orienté d'un angle de 58° par rapport au plan horizontal. Ces angles particuliers ont été définis en fonction de contraintes (espace de travail nécessaire au chirurgien, pas de collision avec l'environnement, ne pas passer dans le champ visuel du chirurgien) et optimisés sur base de critères de performance (dextérité, distance avec l'environnement, espace disponible pour un deuxième robot) [19]. Cette cinématique particulière restreint les orientations atteignables par le stylet.

Afin d'éviter de sortir de l'espace de travail du robot et donc de *désolidariser*⁷ la console du robot, il est idéal que la console soit également limitée de la même façon en terme d'orientation. La solution la plus simple pour atteindre cet objectif est de reprendre la configuration du poignet du robot et de l'appliquer sur le *poignet* de la console. Pour vérifier le ressenti d'une telle configuration, deux prototypes ont été imaginés et réalisés en impression 3D. Les photos et les plans des prototypes se trouvent respectivement aux Figures 3.15 et 3.16. Le premier, désigné prototype A, est caractérisé par une cinématique similaire à celle du poignet du robot. Le deuxième, désigné prototype B, est caractérisé par une cinématique où les 3 axes de rotation sont écartés de 90 degrés entre eux. Ce dernier possède une cinématique qualifiée de classique. En effet, celle-ci se retrouve en majorité dans l'état de l'art des consoles et permet d'atteindre toutes les orientations possibles. Le prototype B sert ainsi de modèle standard qui permet de vérifier si la cinématique du prototype A n'est pas contraignante lors de son utilisation.

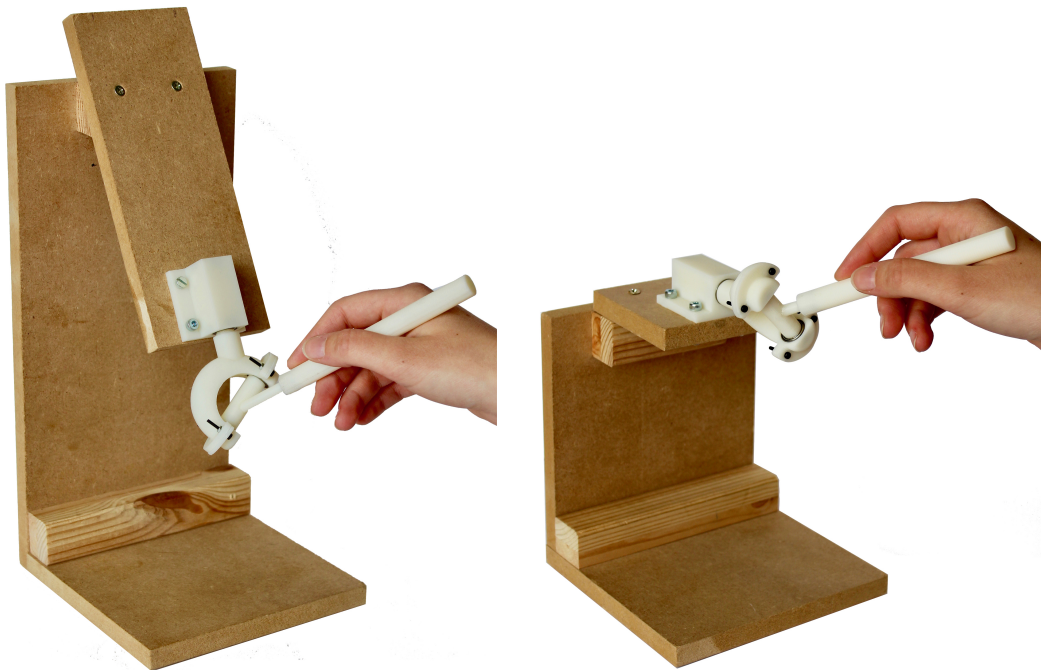


Figure 3.15/ Photos de deux prototypes du *poignet* imprimés en 3D. Le prototype A, à gauche, est décrit par une configuration identique à celle du poignet du robot. À droite, les 3 axes de rotation du prototype B sont chacun écartés de 90°.

Après plusieurs essais sur chacun des deux prototypes, aucune différence n'a été ressentie entre leurs utilisations. Seule une gêne est présente dans le prototype A, lorsque le stylet se rapproche d'une position de singularité, c'est-à-dire lorsque le stylet est complètement ouvert et que l'axe R3 se trouve à 91° de l'axe R1.

7. La désolidarisation apparaît lorsque la console se trouve dans une position ou une orientation qui n'est pas atteignable par le robot. La console et le robot ne sont alors plus solidaires et une réinitialisation est nécessaire afin de les coupler.

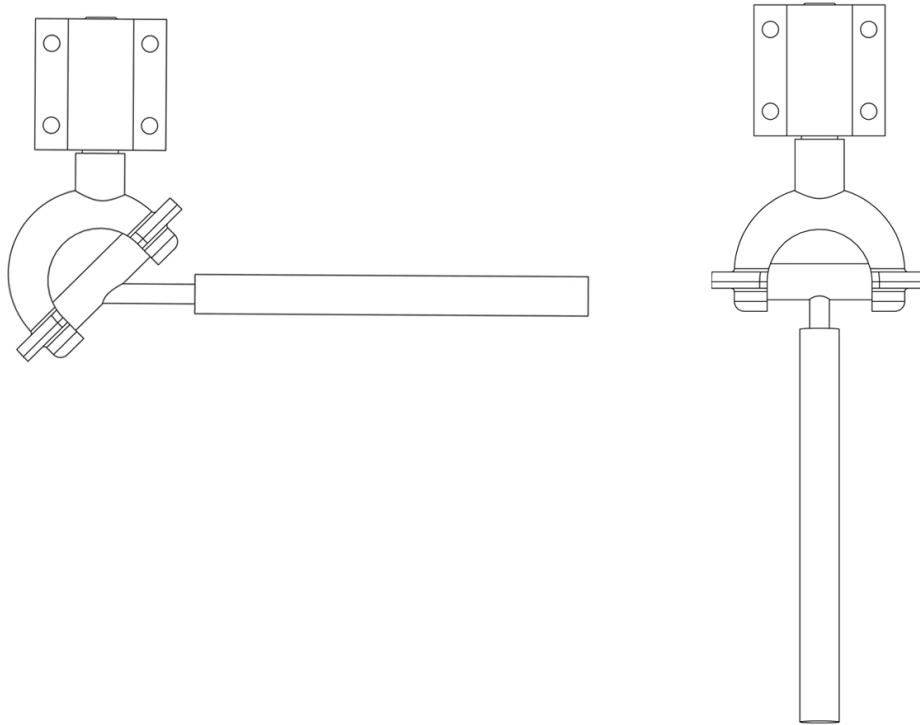


Figure 3.16/ Plans de deux prototypes du *poignet* imprimés en 3D. Le prototype A, à gauche, est décrit par une configuration identique à celle du poignet du robot. À droite, les 3 axes de rotation du prototype B sont chacun écartés de 90° .

Cependant, ces gênes ressenties ne sont pas problématiques. En effet, le poignet du robot a été conçu de manière à ce que les configurations de singularité du poignet se situent le plus loin possible des orientations les plus courantes d'une pince manipulée par un chirurgien. Lors de la prise en main du *poignet* de la console, l'utilisateur ne devrait donc pas se rapprocher des positions de singularité.

Finalement, une butée peut être intégrée sur le deuxième axe de rotation du *poignet* afin de limiter la rotation du deuxième pivot et d'empêcher, mécaniquement, le *poignet* d'atteindre la position de singularité. La Section [4.2.2](#) présente plus en détail l'intégration de cette butée dans la console.

La cinématique $46^\circ/45^\circ$ est donc retenue, car cette solution permet au stylet d'éviter de sortir de l'espace de travail défini par le robot, et ce, sans ajout de moteur à retour de force sur la console.

Conclusion et choix de la configuration du *poignet*

En résumé, la cinématique du *poignet* de la console est identique à celle présentée à la Figure [3.12](#). Seul un blocage mécanique est ajouté sur le deuxième pivot afin de limiter son orientation.

3.4 Configuration finale

Sur base des Sections [3.2](#) et [3.3](#) les configurations suivantes sont retenues afin de constituer la cinématique finale de la console :

- La configuration SCARA est retenue pour la partie *bras* de la console. En effet, cette configuration représente le meilleur compromis par rapport aux critères de conception. La glissière est la première articulation du *bras* et assure le mouvement selon l'axe Z. C'est également au niveau de cette liaison que s'effectue la compensation de la gravité. Les deux liaisons suivantes sont des pivots qui permettent les mouvements dans le plan XY. Afin que la position n'ait pas d'influence sur la rotation, un troisième pivot est placé en bout de *bras* et est relié à un système de deux courroies.⁸
- Au niveau de la partie *poignet* de la console, une configuration en série est retenue. Le *poignet* est composé de 3 liaisons cylindriques dont les axes interceptent le même point et forment un RCM. Ces 3 pivots sont positionnés l'un par rapport à l'autre selon des angles définis par le poignet du robot (voir Figure [3.12](#)) et la rotation du deuxième pivot est limitée par une butée. Finalement, l'utilisateur vient positionner sa main au-dessus de l'ensemble du système à 3 pivots.

La combinaison de ces configurations donne le résultat représenté sur la Figure [3.17](#)

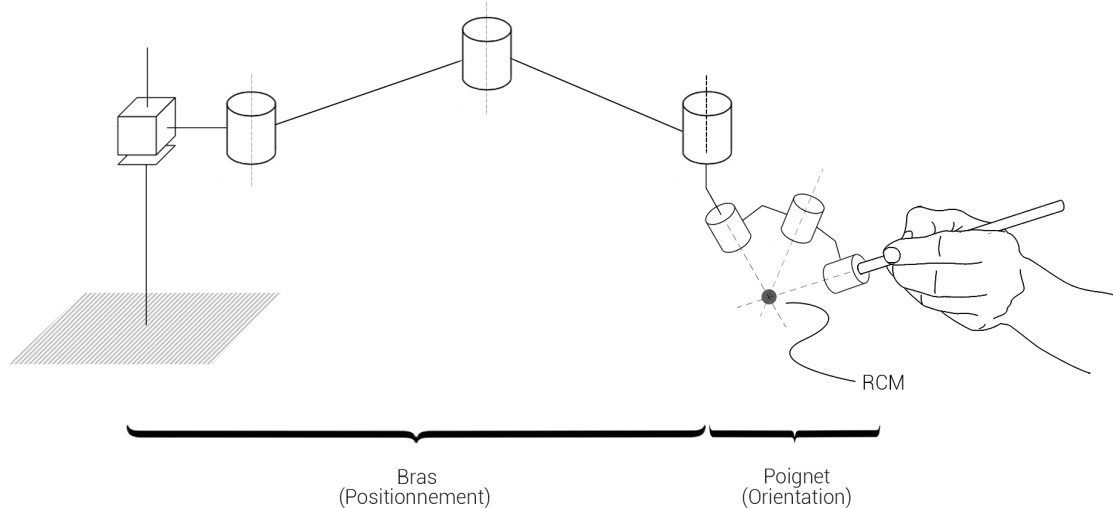


Figure 3.17/ Schéma cinématique complet de la console de téléopération.

8. La compensation de la rotation par le système de deux courroies est expliquée avec plus de précision dans la Section [4.1.5](#)

3.5 Lien entre dimension et résolution

Dans le cas d'une configuration SCARA, les mouvements selon l'axe Z ne seront perçus que par un seul encodeur relatif à la translation de la glissière. Les mouvements dans le plan XY seront, quant à eux, perçus par le biais de deux encodeurs, placés au niveau des deux pivots. La section qui suit s'intéresse au lien entre les longueurs des châssis, c'est-à-dire les distances séparant les articulations entre elles, et la résolution des ces deux encodeurs. Les coordonnées $(X; Y)$ de la position du stylet dépendent de la rotation des deux pivots et de la longueur des deux châssis. À partir de la Figure 3.18, elles sont calculées selon l'expression suivante :

$$\begin{cases} X = f_1(\theta_1, \theta_2) = b * (\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2 - \theta_1)) \\ Y = f_2(\theta_1, \theta_2) = b * (\sin(\theta_1) - \sin(\theta_2 - \theta_1)) \end{cases}$$

Les longueurs des deux châssis sont identiques, car c'est le choix qui maximise la manipulabilité (voir Section 3.2.4). Pour connaître la valeur des angles θ_1 et θ_2 , deux encodeurs rotatifs doivent être placés sur les arbres des deux pivots. Les deux capteurs mesurent ainsi les rotations des deux châssis par rapport à leur fixation et la position (X, Y) du stylet peut facilement être déduite.

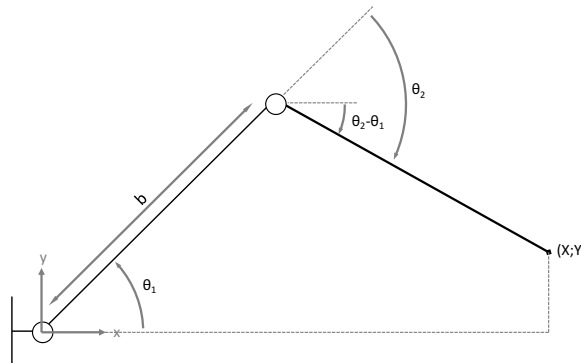


Figure 3.18/ Position en bout de *bras* en fonction la rotation des deux pivots et de la longueur des châssis.

À ce niveau, deux types de résolution doivent être différenciés. La *résolution angulaire* des encodeurs représente le plus petit incrément d'angle qui peut être détecté par un encodeur. La *résolution spatiale* représente le plus petit mouvement en bout de *bras* et dans le plan XY qui peut être détecté par au moins un des deux encodeurs. Bien évidemment, la *résolution spatiale* est dépendante de la *résolution angulaire*, mais également de la longueur des châssis. Si ceux-ci sont courts, un même déplacement dans le plan XY sera perçu par une plus grande rotation des pivots, entraînant une meilleure résolution spatiale. Au contraire, si les châssis sont longs, la résolution spatiale sera moins bonne mais la manipulabilité au sein de l'espace de travail sera plus élevée, traduisant un comportement plus isotrope (voir les graphiques de la Figure 3.20).

Afin de calculer la *résolution spatiale* au sein de l'espace de travail, l'approche suivante est appliquée : la combinaison des deux encodeurs rotatifs engendre une résolution spatiale en forme de *damier*, représentée sur la Figure 3.19.

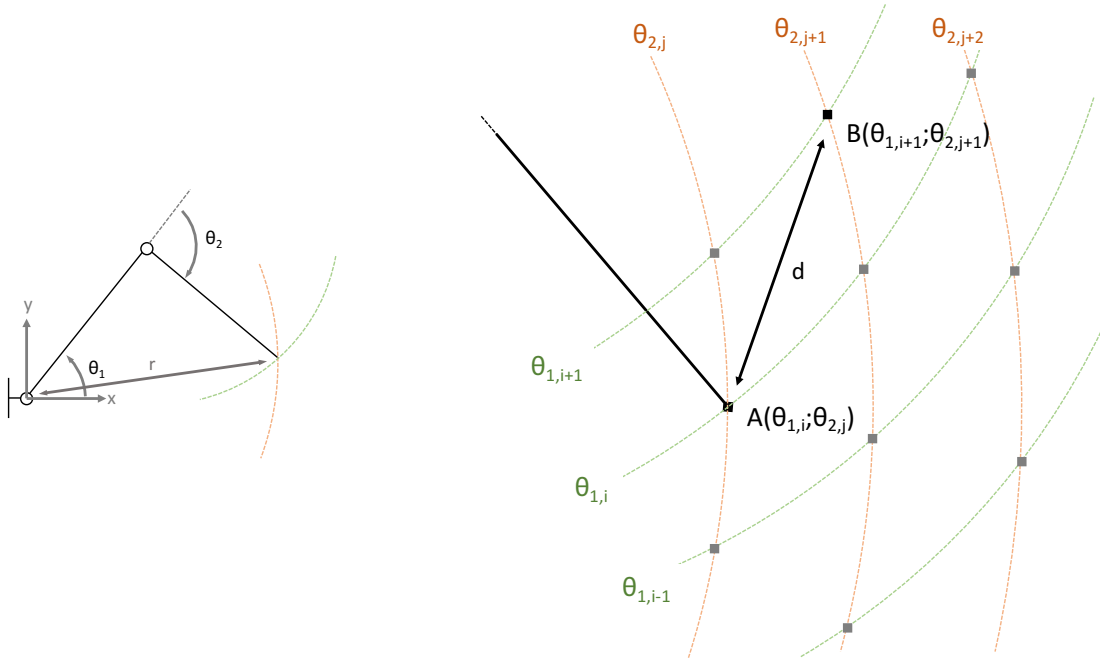


Figure 3.19/ Résolution spatiale dans le plan XY. La combinaison des deux encodeurs rotatifs engendre une résolution spatiale en forme de *damier*.

Tout mouvement du stylet qui reste à l'intérieur d'une même case du damier ne sera pas perçu par l'un ou l'autre encodeur. La *résolution spatiale* est définie alors par la mesure de la diagonale d reliant la position $A(\theta_{1,i}; \theta_{2,j})$ et la position $B(\theta_{1,i+1}; \theta_{2,j+1})$. Soit,

$$d = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2}$$

$$d = \sqrt{(f_1(\theta_{1,i}, \theta_{2,j}) - f_1(\theta_{1,i+1}, \theta_{2,j+1}))^2 + (f_2(\theta_{1,i}, \theta_{2,j}) - f_2(\theta_{1,i+1}, \theta_{2,j+1}))^2}.$$

En plus de la longueur des châssis et de la *résolution angulaire* des encodeurs, la *résolution spatiale* dépend également de la position (X_A, Y_A) du stylet dans le plan. Plus simplement, celle-ci ne dépend en fait que de la distance r par rapport au premier pivot (voir Figure 3.19). En effet, due à la cinématique de la configuration SCARA, la valeur de θ_1 n'a pas d'influence sur le comportement en bout de *bras*, que ce soit pour la résolution ou pour la manipulabilité.

En résumé, la *résolution spatiale* est une fonction de la *résolution angulaire* des encodeurs, de la longueur b des châssis et la distance r par rapport au premier pivot du *bras*.

Les graphiques de la Figure 3.20 montrent l'évolution de la *résolution spatiale* en fonction de ces différentes variables.

L'axe des abscisses représente la distance entre le bout du *bras* et le premier pivot, elle correspond à la distance r sur la Figure 3.19.

Les lignes bleues représentent l'évolution de la *résolution spatiale* en bout de *bras* en fonction de la distance r . Plusieurs courbes sont représentées pour différentes résolutions des encodeurs⁹. Au plus la distance r augmente, au plus la résolution spatiale devient mauvaise. Le trait pointillé noir définit la limite de résolution spatiale souhaitée.

La ligne orange correspond à l'évolution de la manipulabilité en fonction de la distance r . Celle-ci est maximum lorsque le *bras* se trouve en angle droit et devient nulle lorsqu'il est complètement fermé ou ouvert.

Finalement, chacun des graphiques représente une situation avec une longueur de châssis différente, variant de 15 à 40 cm. D'un côté, plus les châssis sont longs, plus la résolution des encodeurs doit être élevée pour offrir une résolution spatiale suffisante. De l'autre, plus les châssis sont courts, plus la manipulabilité varie fortement.

La démarche de sélection de la taille des châssis se fait de la manière suivante. Sur base du budget autorisé, un encodeur rotatif sera sélectionné. La *résolution angulaire* de celui-ci, souvent dépendante de son prix, permet alors de choisir la longueur des châssis qui maximise la manipulabilité dans la zone de travail tout en respectant la *résolution spatiale* requise.

L'objectif étant d'obtenir une console offrant une résolution spatiale de $50\mu\text{m}$, la limite théorique est fixée à $30\mu\text{m}$ afin d'avoir une marge d'erreur suffisante. En effet, les pièces réalisées peuvent présenter des erreurs dimensionnelles et les assemblages entraîner la présence de jeux mécaniques. Ces deux aspects ainsi que les méthodes pour les réduire sont présentés au début du Chapitre 4. Ce même chapitre présente également les encodeurs choisis, la longueur des châssis et les résultats de manipulabilité et de *résolution spatiale* ainsi obtenus.

9. Les résolutions des encodeurs sont spécifiées en nombre d'impulsions par tour. Pour connaître la *résolution angulaire*, elles doivent être multipliées par 4 dus au déphasage de 90° électrique des deux signaux des encodeurs.

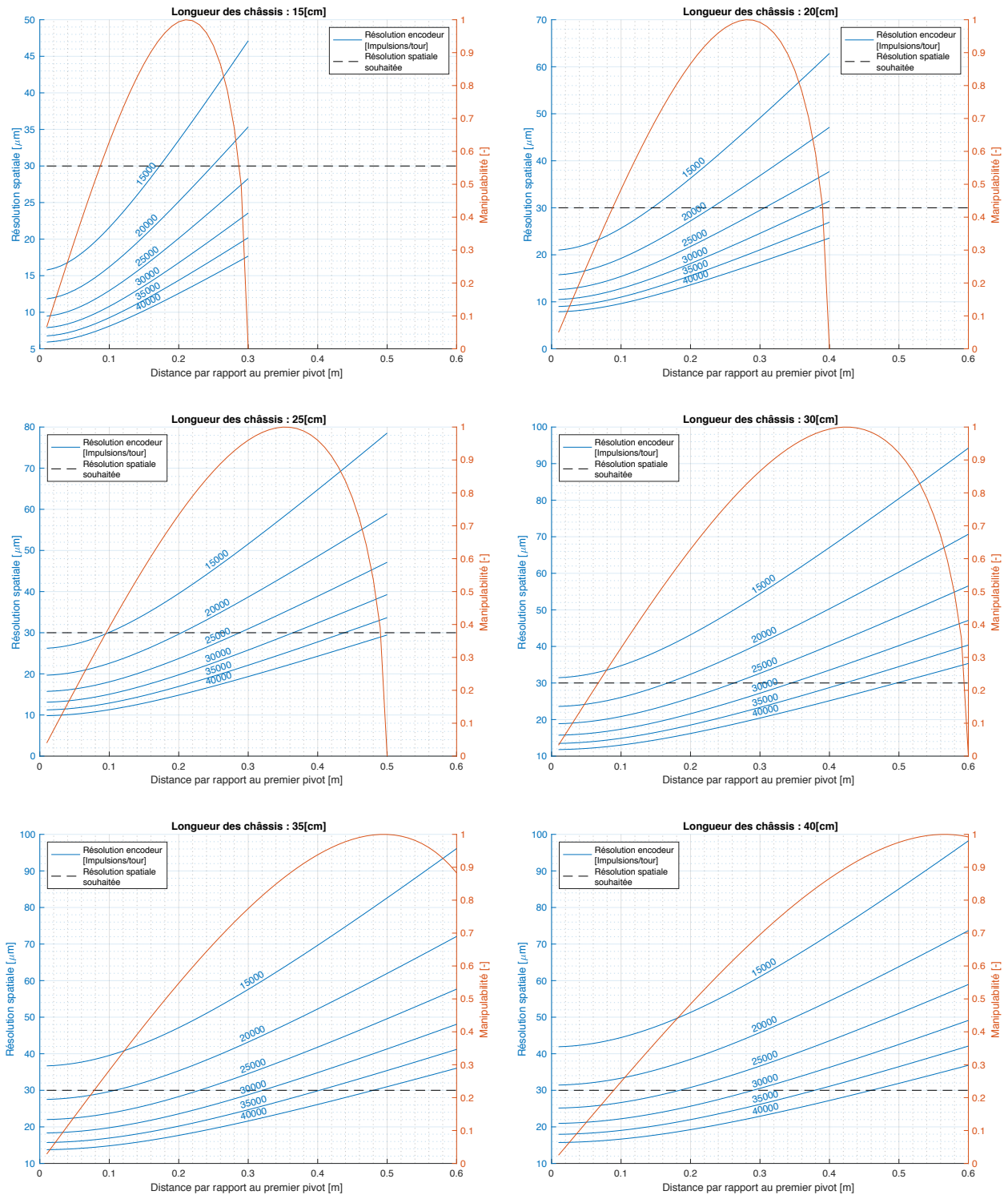


Figure 3.20/ Évolution de la résolution spatiale et de la manipulabilité en fonction de la résolution angulaire des encodeurs, de la longueur des châssis et la distance par rapport au premier pivot du bras

Chapitre 4

Prototype et modèle CAO

Abstract/ À partir de la cinématique définie dans le chapitre 3, un prototype de la console est réalisé en modèle CAO. Celui-ci se compose d'un *bras* et d'un *poignet*. La première partie est composée en majorité de pièces usinées et permet d'y fixer 3 encodeurs. La deuxième partie est principalement composée de pièces réalisées en impression 3D et intègre 3 potentiomètres. Finalement, un profil en aluminium est réalisé afin de soutenir la console.

Ce chapitre présente le prototype réalisé à partir de la cinématique définie dans le chapitre précédent. La console imaginée est représentée à la Figure [4.1](#).

Le chapitre se décompose en 3 sections qui décrivent respectivement, le *bras*, le *poignet* et l'intégration de la console dans son environnement. Dans les deux premières sections, l'ensemble des éléments constituant la console ainsi que les assemblages mécaniques sont présentés. L'intégration des différents capteurs y est également décrite. La troisième section montre la façon dont la console s'intègre aux côtés du robot, du microscope et du chirurgien.

Le prototype est en majeure partie composé de pièces commercialisées. Les autres pièces, nécessitant une géométrie spécifique, sont réalisées directement en impression 3D et leur design est adapté de manière à être utilisées avec les pièces commandées en ligne. Ces deux choix, l'impression 3D et la commande en ligne, s'intègrent parfaitement dans la démarche de réalisation d'un prototype puisqu'ils vont réduire à la fois les coûts et les temps de production des pièces par rapport à un usinage traditionnel en atelier.

La fabrication additive offre également plusieurs avantages tels que la conception de structures creuses et l'utilisation de matériaux à la fois rigides et légers. Cependant, les pièces imprimées en 3D possèdent une précision moins élevée qu'un usinage traditionnel. Les erreurs dimensionnelles des pièces ne sont fondamentalement pas critiques. Elles entraînent une erreur de mesure de la position de la console qui peut être compensée par calibration du modèle réel ou intuitivement par le chirurgien. La présence de jeu au sein d'un assemblage est plus problématique car il est variable et ne peut être compensé en aval de la console. C'est pourquoi la démarche générale de conception du prototype vise à rattraper au maximum les jeux qui peuvent apparaître dans les assemblages.

Pour la réalisation de ce prototype, les pièces d'assemblage (roulements, arbres, vis de serrage, ...) viennent du fabricant *Misumi*. Les capteurs utilisés sur le système sont des encodeurs optiques de la marque *Sick* ainsi que des potentiomètres de la marque *Bourns*. Une fiche technique en Annexe [A](#) reprend l'ensemble des références des pièces commandées en ligne. L'imprimante utilisée pour l'impression 3D est la *Mark Two* commercialisée par *Markforged* tandis que les matériaux d'impression sont de l'*Onyx* et des renforts en fibre de verre dont les caractéristiques sont listées en Annexe [C](#).

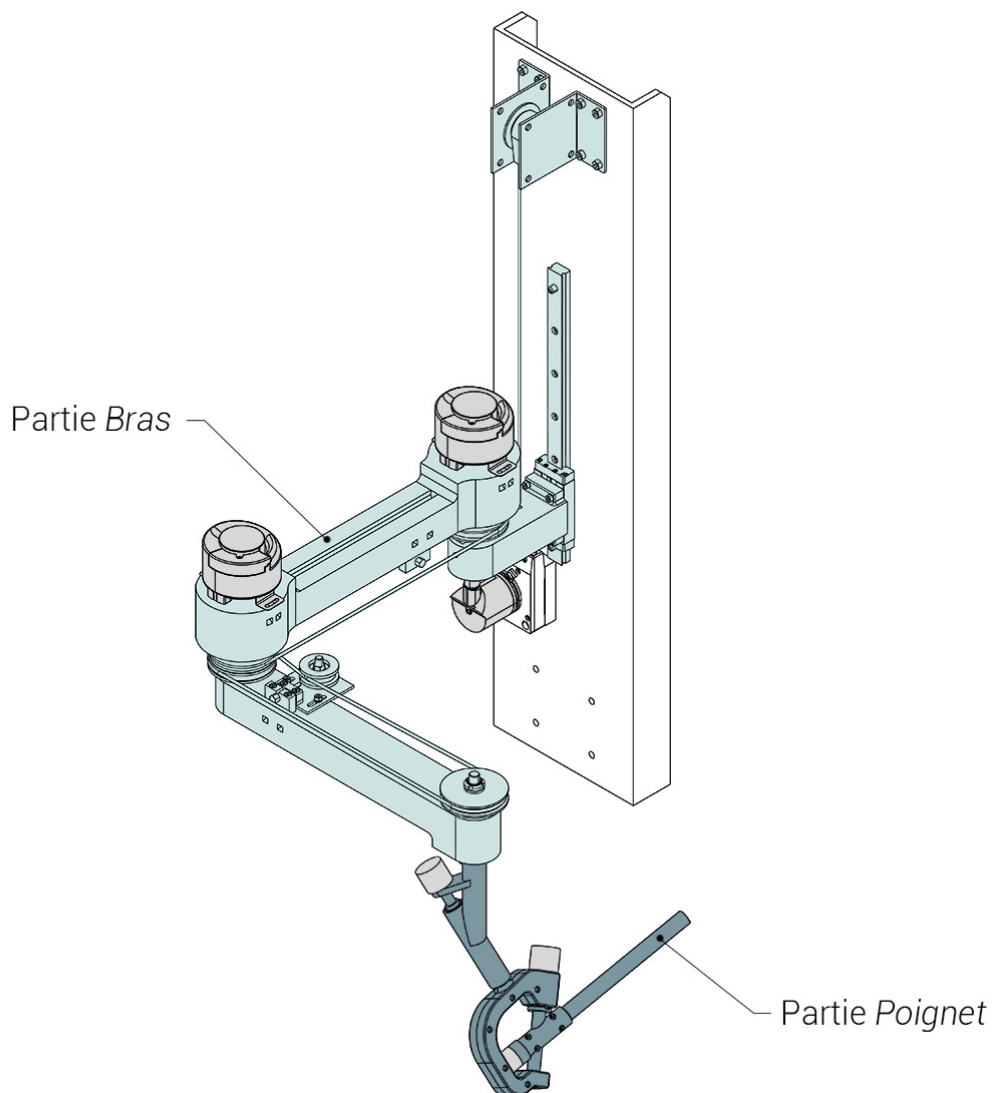


Figure 4.1/ Plan du prototype réalisé. La console se décompose en deux parties principales : la partie *bras*, en bleu, et la partie *poignet*, en gris. Les capteurs ainsi que le support sont également représentés, sans couleur.

4.1 Partie position — *Bras*

La Figure 4.2 représente l'assemblage de différents éléments du *bras* de la console. Ceux-ci sont listés brièvement ci-dessous et décrits plus en détails dans les sections suivantes.

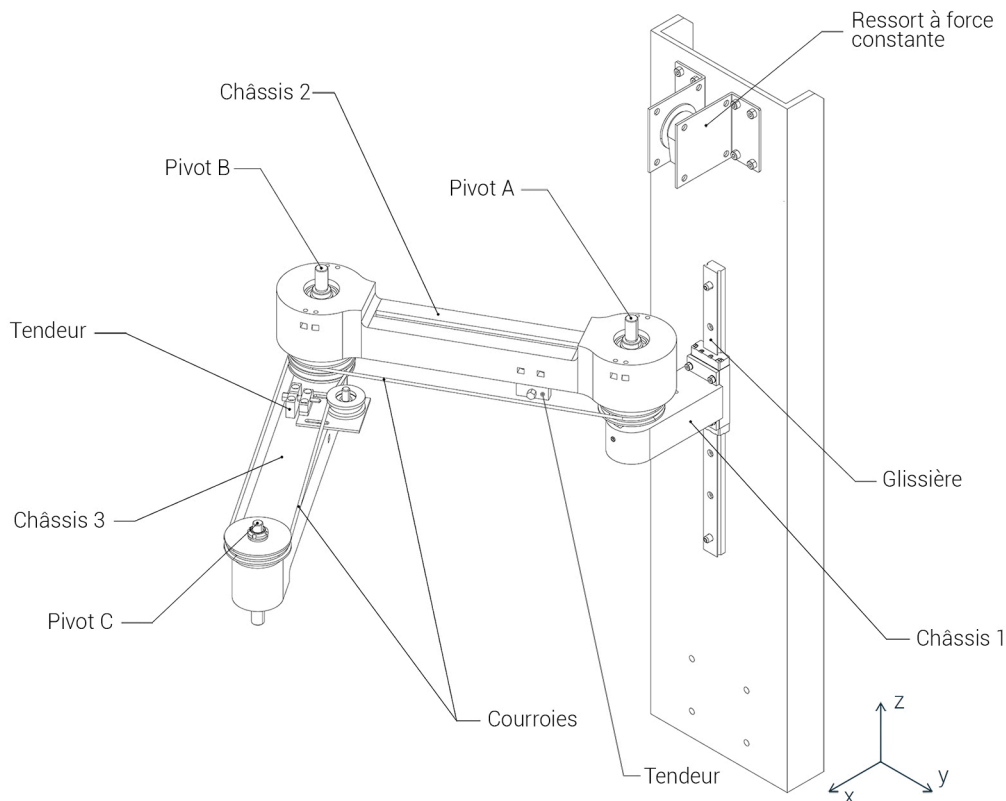


Figure 4.2/ Principaux éléments constituant la partie *bras* de la console. Les encodeurs ne sont pas représentés sur ce plan.

1. La première articulation est une glissière qui permet le mouvement en Z . Un encodeur à câble mesure le déplacement de la glissière et un ressort à force constante assure la compensation de la gravité.
2. La deuxième et la troisième articulations sont des pivots (A et B) qui permettent les mouvements dans le plan XY . Un codeur optique rotatif est monté sur chacun de ces deux pivots afin de mesurer leur orientation et en déduire la position dans le plan XY .
3. La quatrième articulation, en bout de *bras*, est un pivot qui permet de modifier l'orientation du *poignet* qui y sera attaché. Aucun codeur rotatif n'est monté sur ce pivot.
4. Un système composé de quatre poulies et de deux courroies entraîne une rotation du dernier pivot afin d'assurer l'objectif de découplage cinématique entre la position et l'orientation.
5. Deux tendeurs permettent d'assurer une tension suffisante dans les courroies.
6. Trois châssis, imprimés en 3D, relient les quatre articulations entre elles.

4.1.1 Articulation 1 — Glissière

La première articulation de la console est une glissière qui relie le châssis 1 à un profilé de support servant de support à la console. Les plans de ce profilé sont disponibles en Annexe [B](#). Cette articulation est représentée sur le plan de la Figure [4.3](#). Le châssis 1 est fixé sur le chariot de la glissière tandis que le rail est fixé sur le profilé de support. Afin d'éviter que le chariot ne sorte du rail, deux butées sont intégrées à la glissière.

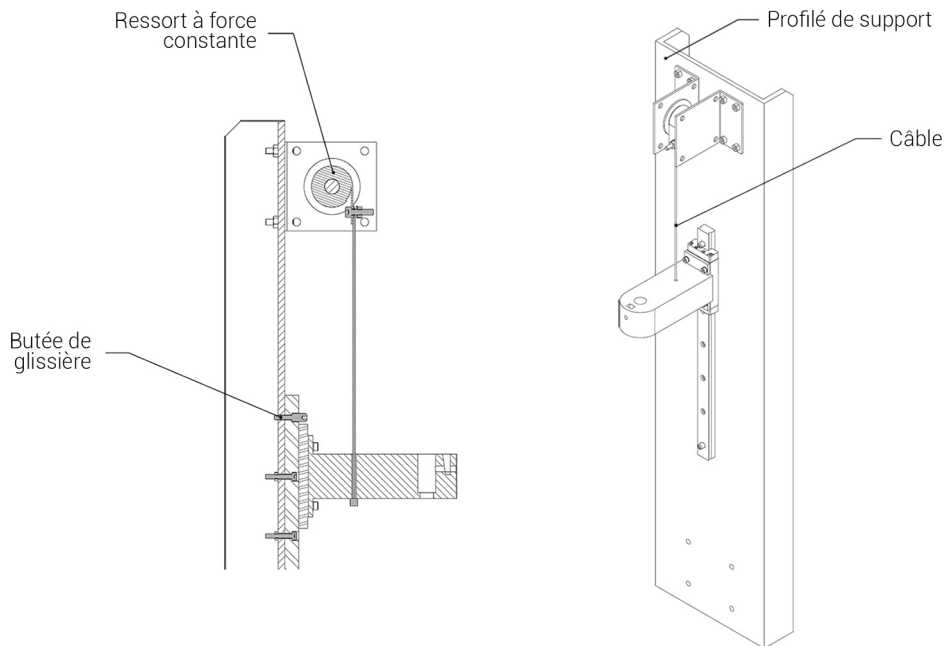


Figure 4.3/ Vues en coupe et en 3D de la glissière. Cette articulation relie le châssis 1 au profilé de support et assure le mouvement dans la direction Z. Un encodeur à câble est monté par la suite mais n'est pas représenté sur cette figure.

Ressort à force constante pour la compensation de la gravité

Un trou à travers le châssis 1 permet d'y passer un câble qui assure la liaison avec le ressort à force constante. D'un côté, le câble retient le support grâce à un embout plus large que le diamètre du trou. De l'autre, il est fixé au ressort via une vis, un écrou, et une rondelle.

Le profilé de support a été adapté pour le montage de 3 différents ressorts à force constante permettant l'application d'une charge de 1.8, 2.0 ou 2.2 kgf¹. Sans prendre en compte les capteurs et le rail de la glissière, la masse du prototype équivaut à 1.9 kg et le ressort de 2.2 kgf est choisi. Pour les premiers tests du prototype, sans capteurs, des masses additionnelles totalisant 300 [g] seront ajoutées afin d'équilibrer le système. Lors d'une future amélioration, si le poids de la console est réduit (voir Section [5.2.5](#)), le profilé de support sera adapté pour le montage d'un des deux autres ressorts.

1. Kilogramme-force

4.1.2 Articulation 2 — Pivot A

Cette articulation est représentée sur le plan de la Figure 4.4. Un arbre plein traverse, de haut en bas, le châssis 2, une poulie ainsi que le châssis 1 attaché à la glissière. Le châssis 2 est mobile par rapport à l'arbre grâce à une paire de roulements à billes à contact oblique tandis que la poulie et le châssis 1 sont tous les deux fixes par rapport à l'arbre grâce à deux vis de serrage. L'arbre possède un méplat au niveau de l'application des deux vis de serrage afin de ne pas endommager sa cylindricité et rendre impossible le montage/démontage des roulements par la suite.

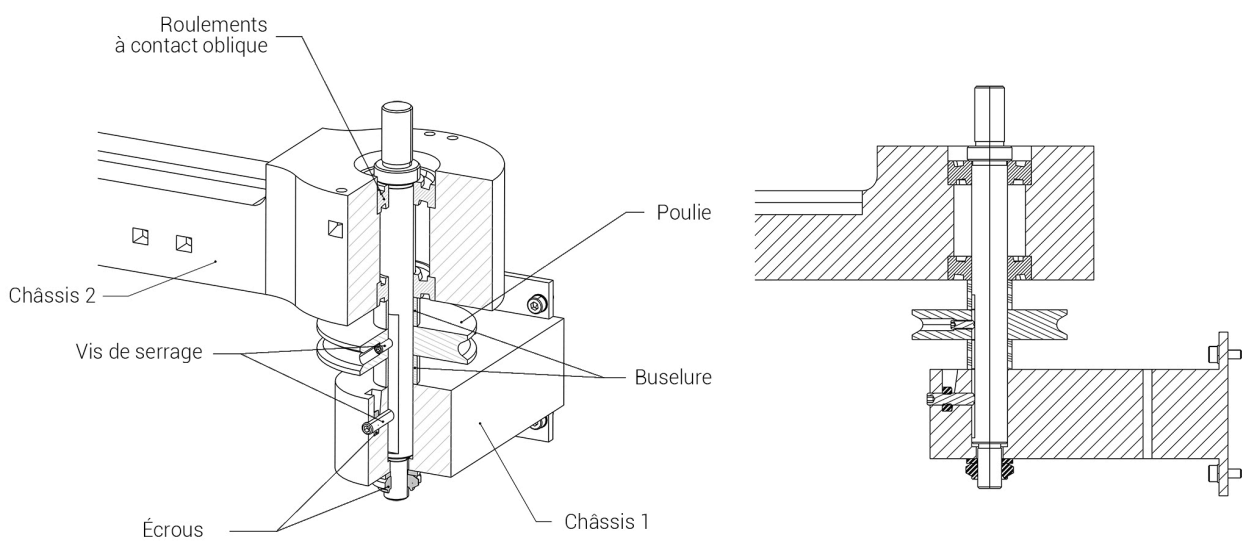


Figure 4.4/ Vue écorchée (à gauche) et vue en coupe (à droite) du pivot A. Cette articulation relie le châssis 1 au châssis 2. Un encodeur rotatif est monté par la suite sur le haut du pivot mais n'est pas représenté sur cette figure.

Le montage s'effectue par le bas en glissant successivement les pièces autour de l'arbre.

1. Le premier roulement à billes est bloqué contre l'épaulement dans le haut de l'arbre.
2. Le châssis 2 est alors glissé et bloqué sur le premier roulement à billes.
3. Le deuxième roulement à billes est ensuite monté et bloqué contre l'épaulement dans l'alésage du châssis 2.
4. Une première buselure, la poulie et une deuxième buselure sont glissées. La poulie est fixée à l'arbre grâce à une vis de serrage à tête plate et orientable qui vient s'appuyer sur un méplat de l'arbre.
5. Le châssis 1 est ajouté au montage et est également fixé à l'arbre grâce à une vis de serrage.
6. Finalement, une rondelle et un écrou de serrage sont montés sur la partie filetée de l'arbre et viennent serrer l'assemblage. Ce serrage permet de rattraper le jeu axial qui pourrait apparaître dans l'assemblage.

Les roulements à billes sont à contact oblique afin de reprendre les efforts axiaux (serrage du montage et poids des éléments suivants de la console) et s'intègrent dans l'assemblage par un montage en O.

Lorsqu'un élément est fixé sur une pièce imprimée en 3D, un logement est prévu dans la pièce afin d'y intégrer un écrou noyé. C'est notamment le cas pour fixer le châssis 1 et la poulie à l'arbre via une vis de serrage.

Les buselures jouent simplement un rôle d'espacement entre deux pièces glissées sur l'arbre, tout comme le ferait un épaulement.

4.1.3 Articulation 3 — Pivot B

Cette articulation est représentée sur le plan de la Figure 4.5. Un arbre plein traverse, de haut en bas, le châssis 2, une double poulie ainsi que le châssis 3. De manière presque identique à l'articulation précédente, le châssis 2 est mobile par rapport à l'arbre grâce à une paire de roulements à contact oblique et le châssis 3 est fixe grâce à une vis de serrage. La différence avec le pivot précédent apparaît au niveau de la double poulie qui n'est plus fixe par rapport à l'arbre mais bien mobile. Le mouvement relatif est permis grâce à un roulement à billes directement intégré au sein de la double poulie. Le montage se fait également par le bas en glissant successivement les pièces. Il est identique à celui présenté dans la section 4.1.2.

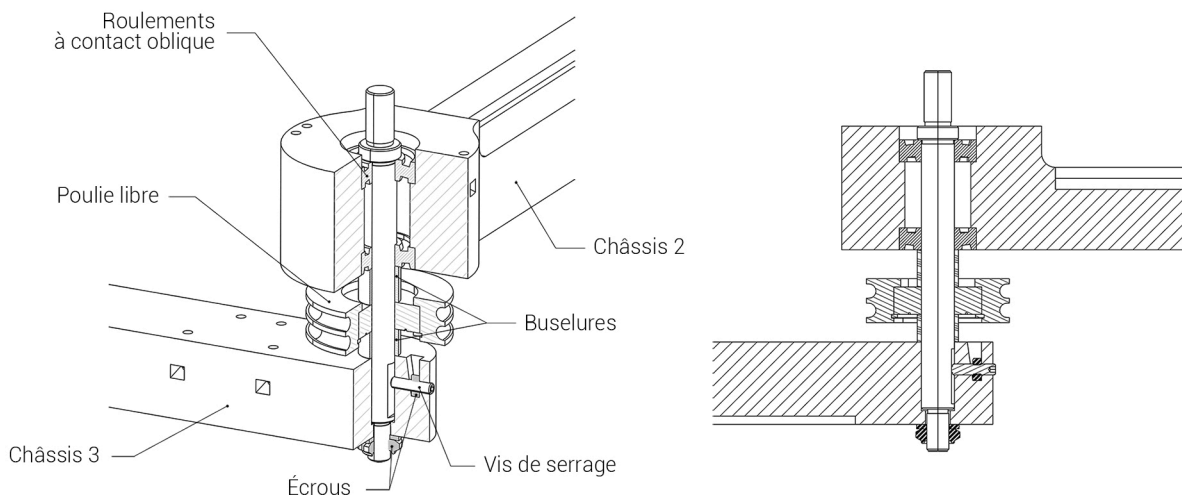


Figure 4.5/ Vue écorchée (à gauche) et vue en coupe (à droite) du pivot B. Cette articulation relie le châssis 2 au châssis 3. Un encodeur rotatif est monté par la suite sur le haut du pivot mais n'est pas représenté sur cette figure.

Les dimensions de plusieurs pièces diffèrent également par rapport au pivot précédent. La double poulie du pivot B, plus large que la simple poulie du pivot A, amène à sélectionner un arbre plus long.

4.1.4 Articulation 4 — Pivot C

Cette articulation est représentée sur le plan de la Figure 4.6. Celle-ci est différente des pivots A et B sur deux points. Premièrement, le pivot C permet le mouvement relatif entre le châssis 3 et le *poignet* de la console qui est fixé sur l'arbre. Ensuite, l'arbre du pivot C possède la même géométrie que les deux autres arbres mais est monté dans l'autre sens.

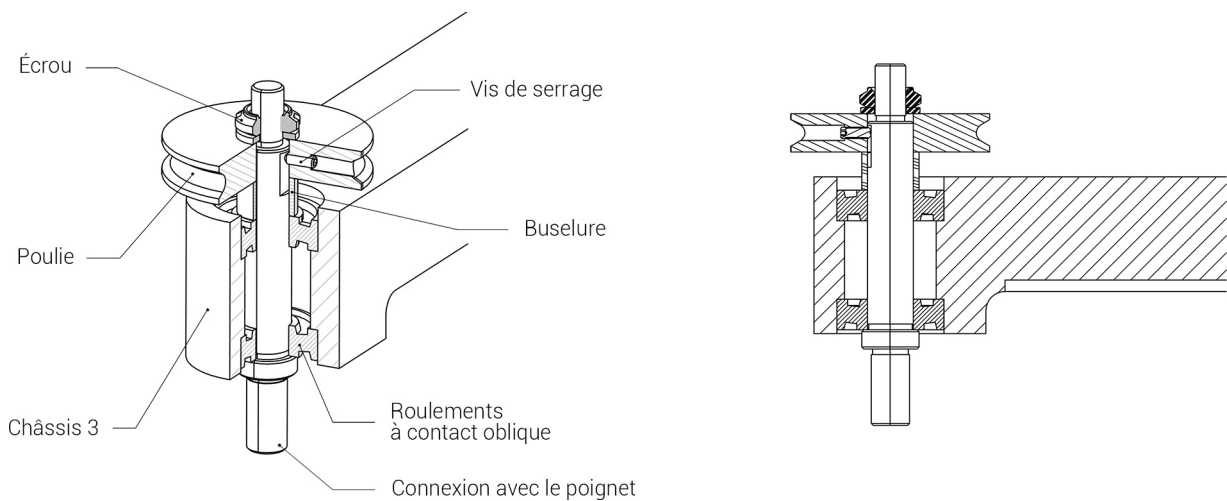


Figure 4.6/ Vue écorchée (à gauche) et vue en coupe (à droite) du pivot C. Cette articulation relie uniquement le châssis 3 au *poignet* de la console. Cette dernière n'est pas représentée sur cette figure.

Ainsi le montage est réalisé par le haut en glissant successivement les pièces autour de l'arbre :

1. Le premier roulement à billes est bloqué contre l'épaule dans le bas de l'arbre.
2. Le châssis 3 est alors glissé et bloqué sur le roulement.
3. Le deuxième roulement à billes est ensuite monté jusqu'à buter contre l'épaule de l'alésage du châssis 3.
4. La buselure et la poulie sont ensuite glissées. La poulie est fixée à l'arbre grâce à une vis de serrage à tête plate et orientable. Tout comme dans les arbres des autres pivots, un méplat est présent afin de ne pas endommager la cylindricité de l'arbre.
5. Une rondelle ainsi qu'un écrou de serrage sont montés sur la partie filetée de l'arbre et viennent serrer l'assemblage. Ce serrage permet de rattraper le jeu axial.
6. L'embout du *poignet* de la console est ensuite monté sur l'arbre par le bas. Celui-ci vient buter contre l'épaule avant d'être maintenu par une vis de serrage. Cette étape n'est pas représentée sur la Figure 4.6.

4.1.5 Transmission de la rotation avec deux courroies

Afin de respecter l'objectif de découplage cinématique entre la position et l'orientation du stylet de la console, un système est mis en place afin de conserver, quelle que soit la position du *bras*, une orientation initiale du *poignet*. Dans cette optique, le *bras* intègre un système de transmission composé de poulies et de courroies, représenté à la Figure 4.7.

Une première poulie se trouve au niveau du pivot A et est reliée par le biais d'une courroie à une deuxième poulie placée sur le pivot B. La première poulie est fixe par rapport à la base alors que la deuxième est libre. Ainsi, un mouvement de rotation du premier châssis va entraîner l'enroulement de la courroie autour de la première poulie et engendrer une rotation de la deuxième poulie.

Un système identique se trouve au niveau du deuxième châssis avec une troisième et une quatrième poulies. La deuxième et la troisième poulies, au niveau du pivot B, sont ensuite solidarisiées entre elles afin d'accumuler les rotations des deux châssis. La quatrième poulie est finalement solidarisiée avec le *poignet*.

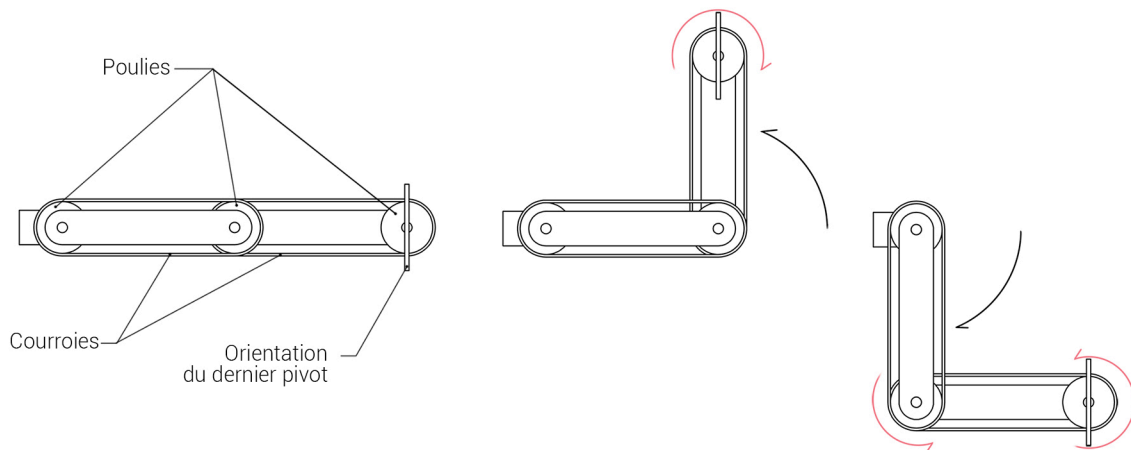


Figure 4.7/ Conservation de l'orientation initiale du dernier pivot via l'utilisation d'un système de transmission à deux courroies.

Avec ce système, quels que soient les mouvements des deux châssis, le *poignet* sera compensé en rotation. Ainsi, l'orientation du *poignet* est indépendante de la position du *bras* et respecte l'objectif de découplage cinématique.

Mise en tension des courroies

Afin d'assurer une tension nécessaire dans les courroies, un système de tendeur est fixé sur chacun des châssis. Ceux-ci sont composés d'une petite poulie, d'une vis de réglage et d'un bloc butoir. Lors du montage, le support pour la vis de réglage est fixé sur le châssis et la courroie est placée sur la petite poulie. La rotation de la vis de serrage permet alors de déplacer le bloc butoir et la poulie. Une fois que la tension désirée dans la courroie est atteinte, le bloc butoir est alors fixé sur le châssis. Ce système de mise en tension des courroies est représenté à la Figure 4.8.

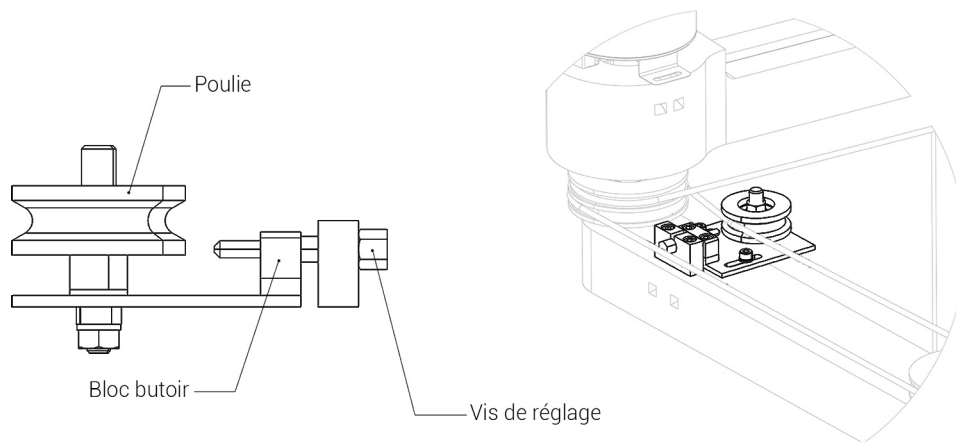


Figure 4.8/ Mise en tension des courroies via l'utilisation d'un système de tendeur.

Ces deux systèmes sont placés au plus près de la base du *bras* afin de réduire l'inertie des mouvements de rotation des deux premiers pivots.

Lors de l'assemblage de la console, l'étape de tension des courroies précédera toujours celle du montage du *poignet* sur le dernier pivot du *bras*. En effet, le système étant asymétrique, la mise en tension peut entraîner la rotation d'une poulie. S'il s'avère que cette manœuvre est trop contraignante, une solution alternative, qui permet une mise en tension symétrique, est présentée dans la Section 5.2.2.

4.1.6 Châssis reliant les articulations entre elles

Trois structures permettent de relier les quatre articulations entre elles. Ces structures, désignées châssis 1, 2 et 3, sont imprimées en 3D avec de l'*Onyx* et des renforts en fibre de verre. Les plans de la Figure 4.9 donnent la géométrie et les dimensions principales de ces 3 châssis.

Le châssis 1 relie la glissière au pivot A. Un trou le traverse de haut en bas et permet d'y passer un câble qui soutiendra le châssis au ressort à force constante. Un rebord percé à 4 endroits permet de fixer le châssis au chariot de la glissière. Une poche est présente au niveau de l'alésage afin d'y insérer un écrou noyé sur lequel vient prendre une vis de serrage.

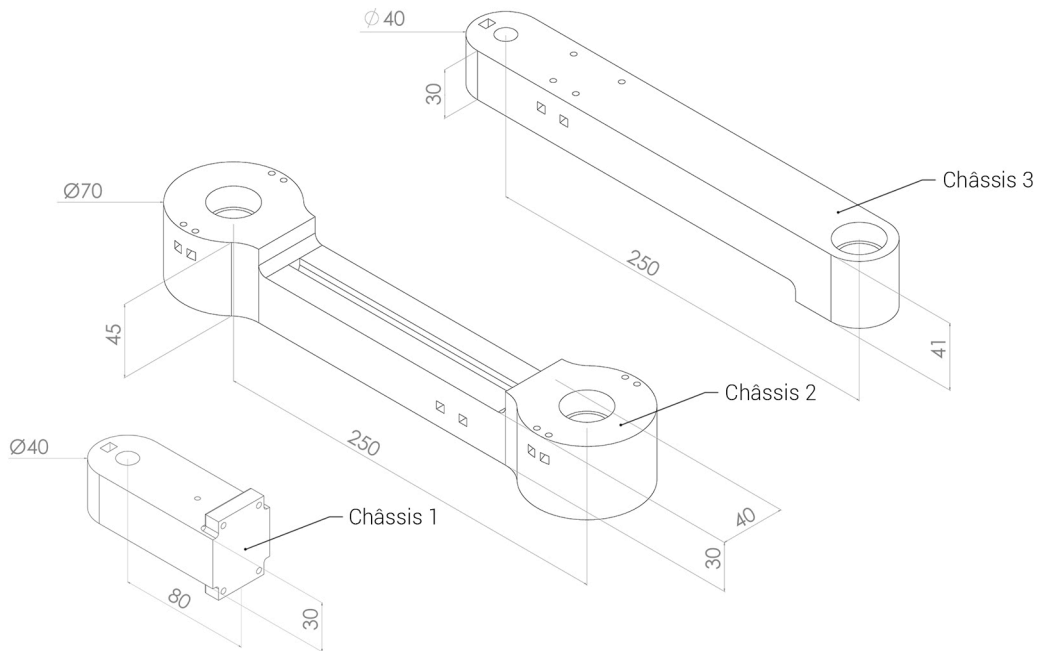


Figure 4.9/ Plans des 3 châssis. Ces trois structures permettent de relier les 4 articulations du *bras* entre elles et sont réalisées par impression 3D.

Le châssis 2 est le plus imposant des 3. Au niveau des deux alésages, la pièce est plus large et plus haute. Plus large pour permettre la fixation des encodeurs rotatifs et plus haute pour assurer une meilleure perpendicularité entre la pièce et l'axe de l'arbre du pivot. Plusieurs poches sont présentes afin d'y accueillir des écrous et permettre la fixation des deux encodeurs rotatifs et du système de mise en tension de la courroie. Une rainure est également intégrée afin d'y enfouir les câbles des différents encodeurs.

Le châssis 3 relie les pivots B et C. Plusieurs encoches sont également présentes afin d'y accueillir des écrous. Ceux-ci sont utilisés pour la fixation du système de tension des courroies et pour une vis de serrage permettant de fixer le châssis 3 à l'arbre du pivot B. De nouveau, au niveau de l'alésage du pivot C, la pièce est plus haute afin d'assurer une meilleure perpendicularité. Finalement une rainure est présente sous la pièce afin d'y enfouir les câbles issus des potentiomètres du *poignet*.

Paramètres d'impression

Pour chacun des châssis, la section transversale est rectangulaire. La section n'est pas complètement creuse et le taux de remplissage est fixé à 50%. Des renforts en fibre de verre sont intégrés lors des impressions, mais ceux-ci diffèrent entre les trois châssis puisque les contraintes qui y sont appliquées sont différentes. En effet, le châssis 3 est uniquement soumis à de la flexion tandis que les châssis 1 et 2 sont également sujets à de la torsion lorsque le *bras* n'est pas complètement étendu. La Figure [4.10](#) représente comment les deux différents types de renfort ont été intégrés dans les châssis.

La liste détaillée des paramètres d'impression est reprise dans l'Annexe [D](#).

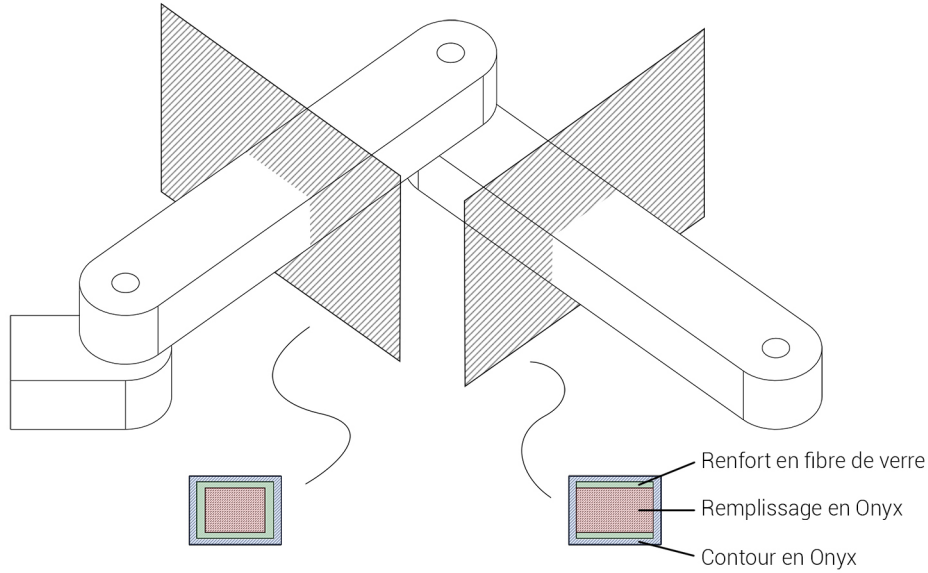


Figure 4.10/ Sections transversales des châssis. Les renforts en fibre de verre sont différents en fonction des contraintes appliquées à l'un ou l'autre châssis.

4.1.7 Encodeurs et mesure de la position

Trois encodeurs sont présents dans le *bras* de manière à pouvoir mesurer la position ($X; Y; Z$). Ces instruments de mesures sont représentés sur la Figure [4.11](#).

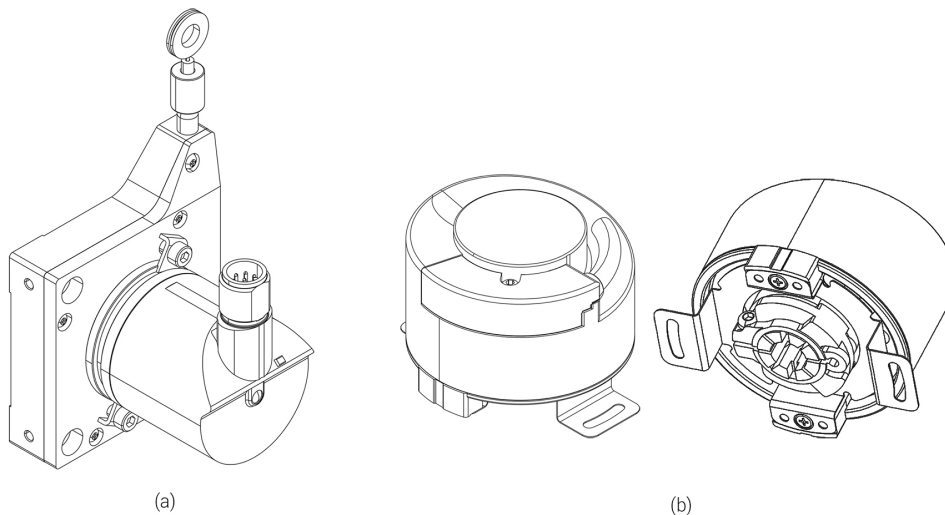


Figure 4.11/ (a) Encodeur à câble permettant de mesurer la position en Z du *bras*. Cet encodeur est monté sur le profilé de support et connecté à la glissière. (b) Encodeur rotatif permettant de mesurer la position dans le plan XY du *bras*. Deux encodeurs de ce type sont présents dans l'assemblage et sont montés sur le pivot A et B.

Le premier (Figure 4.11 (a)), placé au niveau de la glissière permet de mesurer la position en Z. C'est un codeur à câble dont la résolution est de $20\mu\text{m}$. La fiche technique de ce produit se trouve en Annexe E.

Les deuxième et troisième encodeurs (Figure 4.11 (b)) permettent de mesurer la position dans le plan XY. Ce sont des encodeurs rotatifs incrémentaux. Ceux-ci possèdent 31 400 impulsions par tour et offrent une résolution angulaire de $\pm 0,002^\circ$. Ces encodeurs sont caractérisés par un axe creux non traversant. La fiche technique de ces produits se trouve également en Annexe E.

Montage des encodeurs

L'encodeur à câble relie le profilé de support au chariot de la glissière. D'un côté, le boîtier de l'encodeur est fixé sur le profilé grâce à 4 boulons. Une plaque est ajoutée entre le boîtier et le profilé et permet d'aligner verticalement le câble avec son point d'attache. Pour fixer l'extrémité du câble sur le chariot, celle-ci est insérée entre le chariot et la vis de serrage. Ce montage est représenté sur la Figure 4.12.

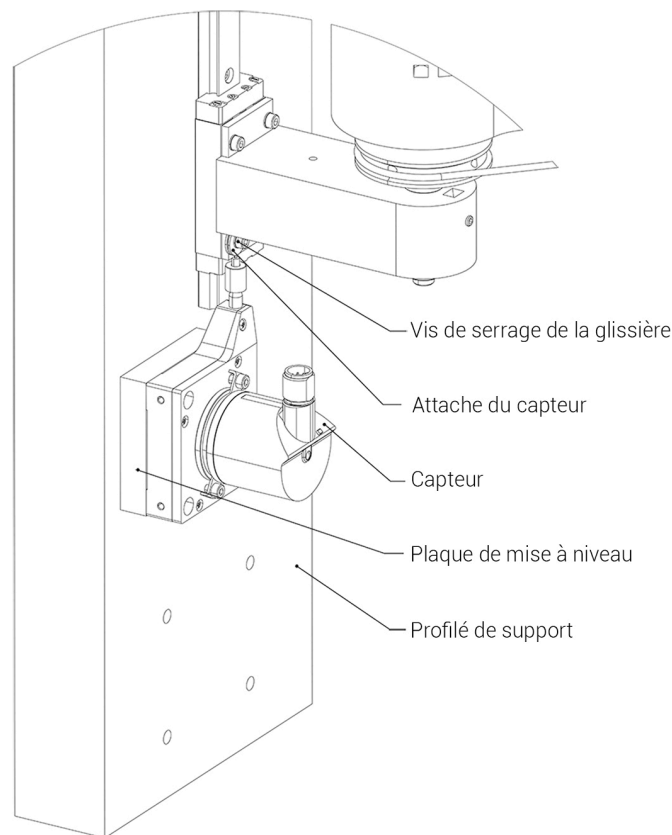


Figure 4.12/ Montage de l'encodeur à câble. Le boîtier est fixé sur le profilé de support et l'extrémité du câble sur le chariot de la glissière.

Le montage des encodeurs rotatifs se fait en deux temps. Premièrement, l'axe creux de l'encodeur est glissé sur l'arbre du pivot. Ensuite, pour fixer l'encodeur sur le châssis, 4 boulons sont montés autour des deux rainures de l'encodeur. Ce montage est représenté à la Figure 4.13.

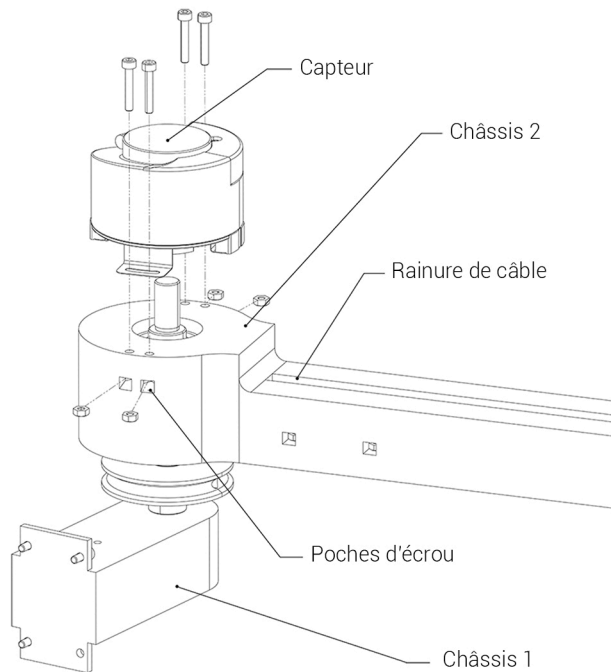


Figure 4.13/ Montage des encodeurs rotatifs. L'arbre du pivot est inséré dans l'axe creux de l'encodeur qui est ensuite fixé sur le châssis.

Résolution et manipulabilité en bout de stylet

La configuration du *bras*, une cinématique de type SCARA², dissocie les mouvements dans la direction Z des mouvements dans le plan XY. Dès lors, la résolution et la manipulabilité du système diffèrent entre ces deux types de mouvements.

Dans le cas des mouvements dans la direction Z, seul l'encodeur à câble entre en compte. La résolution, fixée à $20\mu\text{m}$ par l'encodeur, et la manipulabilité dans cette direction sont toutes les deux constantes à travers l'ensemble de l'espace de travail.

Les mouvements dans le plan XY sont dépendants des encodeurs rotatifs, et plus précisément de leur *résolution angulaire*³, mais également de la longueur des châssis 2 et 3. La manipulabilité et la *résolution spatiale*⁴ en bout de stylet varient donc toutes les deux au travers de l'espace de travail. Cette relation a été abordée dans la Section 3.5).

2. SCARA est l'acronyme de Selective Compliance Assembly Robot Arm

3. La *résolution angulaire* des encodeurs représente le plus petit incrément d'angle qui peut être détecté par un encodeur.

4. La *résolution spatiale* représente le plus petit mouvement en bout de *bras* et dans le plan XY qui peut être détecté par au moins un des deux encodeurs.

Les deux encodeurs rotatifs choisis offrent une *résolution angulaire* de 31 400 impulsions par tour et la distance entre les deux axes de chacun des châssis est de 25 centimètres. La résolution spatiale et la manipulabilité au sein de l'espace de travail qui sont obtenues avec ces deux paramètres sont représentées sur les Figures [4.14](#) et [4.15](#).

La Figure [4.14](#) montre l'évolution de la manipulabilité (en orange) et de la *résolution spatiale* (en bleu) en fonction de la distance qui sépare le bout du *bras* et le premier pivot. La droite horizontale pointillée représente la résolution spatiale désirée, à savoir $30\ \mu\text{m}$. L'espace de travail du chirurgien dans le plan XY est délimité par les lignes verticales bleues. Le centre se situe à 34 cm de l'axe du premier pivot tandis que les limites inférieures et supérieures se trouvent à 26 et 42cm de celui-ci. Le centre de l'espace de travail ne se trouve pas au maximum de manipulabilité mais a légèrement été décalé vers la gauche afin de conserver une manipulabilité supérieure à 0.9 dans presque tout l'espace de travail.

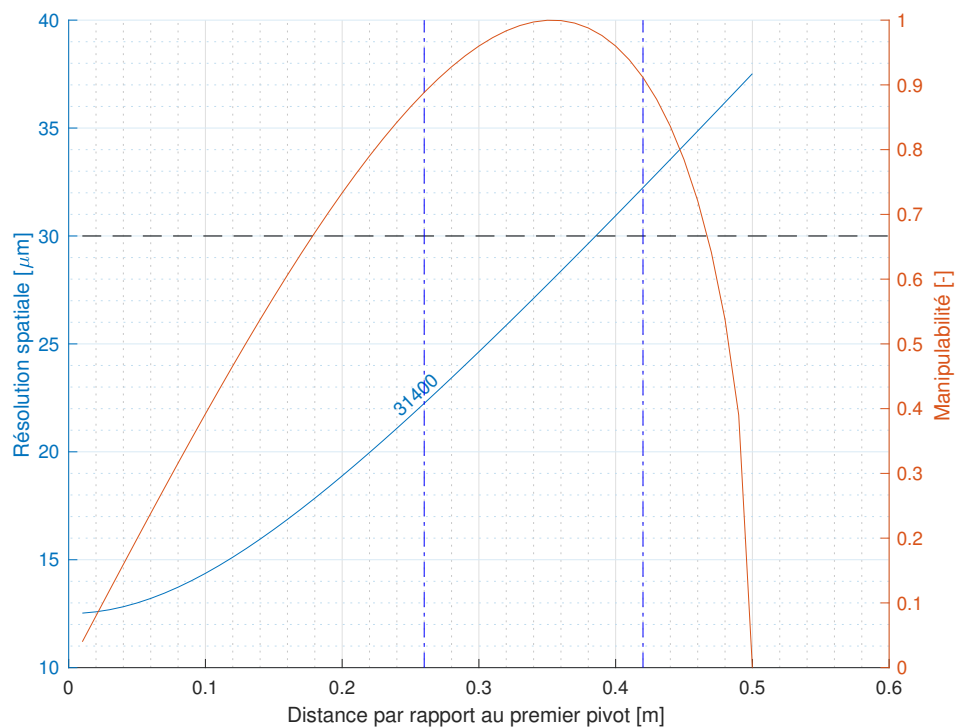


Figure 4.14/ Évolution de la manipulabilité et de la *résolution spatiale* en fonction de la distance par rapport au premier pivot.

La Figure [4.14](#) fait ressortir la présence d'une partie de l'espace de travail du chirurgien qui possède une *résolution spatiale* supérieure à $30\ \mu\text{m}$. Ceci reste acceptable car cette zone correspond seulement à un cinquième de l'espace de travail et se trouve à l'extrémité de celui-ci. De plus, la résolution dans cette zone est presque complètement inférieure à $32\ \mu\text{m}$.

La Figure 4.15 représente également l'évolution de la manipulabilité et de la *résolution spatiale* dans l'espace de travail sous forme de courbes isométriques.

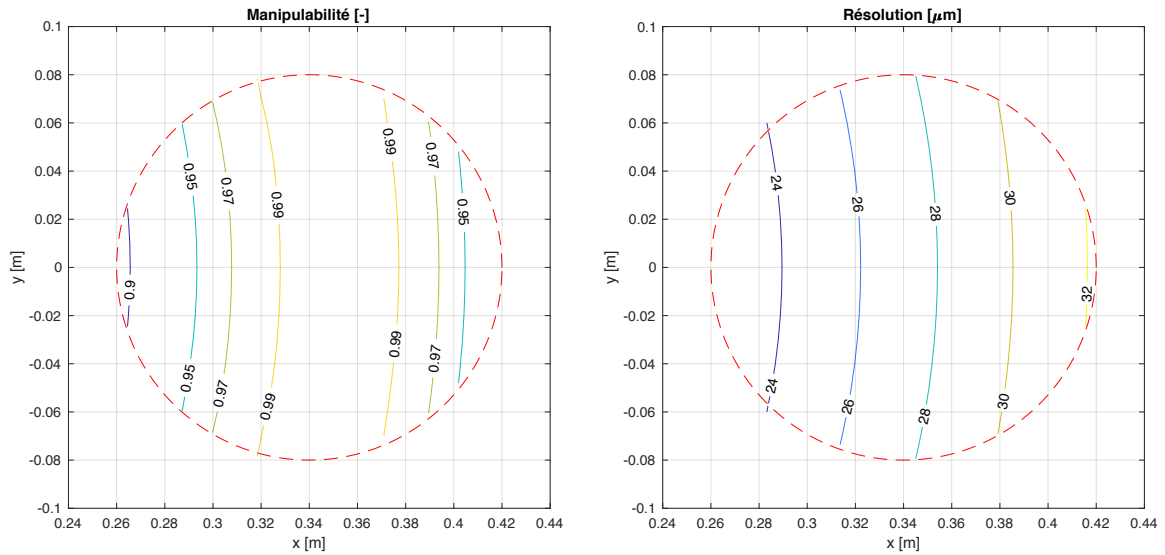


Figure 4.15/ Évolution de la manipulabilité (à gauche) et de la *résolution spatiale*(à droite) au sein de l'espace de travail. L'espace de travail du chirurgien est représenté par le cercle en traits rouges.

Le Tableau 4.1 associe les valeurs de manipulabilité et de *résolution spatiale* à la proportion de l'espace de travail qu'elles représentent. Ainsi, la solution proposée est un compromis idéal entre la manipulabilité et la *résolution spatiale*. 97,8% de l'espace de travail possèdent une manipulabilité supérieure à 0,9 tandis que 81,3% de l'espace de travail offrent une résolution spatiale inférieure à 30 μm .

Tableau 4.1/ Relations entre les valeurs de manipulabilité/résolution et leur proportion au sein de l'espace de travail.

Proportion de l'espace de travail [%]	97.8	77.8	63.6	37.8	-
dont la manipulabilité est supérieure à [-]	0.9	0.95	0.97	0.99	-
Proportion de l'espace de travail [%]	97.8	81.3	58.7	34.2	12
dont la <i>résolution spatiale</i> est inférieure à [μm]	32	30	28	26	24

4.2 Partie orientation — *Poignet*

Le *poignet* de la console suit une cinématique composée de 3 pivots placés en série et dont les axes interceptent le même point (voir section 3.3). Grâce à ce choix de conception, l'orientation du *poignet* n'influence pas la position en bout de stylet. Mis à part les roulements à billes, la visserie et les potentiomètres, l'ensemble des pièces est imprimé en 3D. L'assemblage du *poignet* est représenté à la Figure 4.16 et peut être décomposé en 4 modules :

1. Le module A est composé de deux alésages cylindriques. Le premier assure la liaison avec le dernier pivot du *bras* et le deuxième accueille l'arbre du module suivant. Le module A permet également d'orienter initialement l'axe du premier pivot.
2. Le module B assure la liaison entre le premier et le deuxième axe. Il est composé d'un côté, d'un arbre et de l'autre, d'un alésage cylindrique. L'arbre s'insère dans le module A et l'alésage accueille l'arbre du module suivant. Afin de rendre le montage possible, ce module est divisé en deux parties symétriques.
3. Le module C assure la liaison entre le deuxième et le troisième axe. Il est également composé d'un arbre et d'un alésage. L'arbre s'insère dans le module B et l'alésage accueille l'arbre du module suivant. Ce module est également divisé en deux parties symétriques.
4. Le module D est composé de deux parties. La première est un arbre qui traverse le module C et en ressort de manière à pouvoir y fixer la deuxième partie. Cette dernière est un stylet que le chirurgien tient en main et avec lequel il manipule la console.

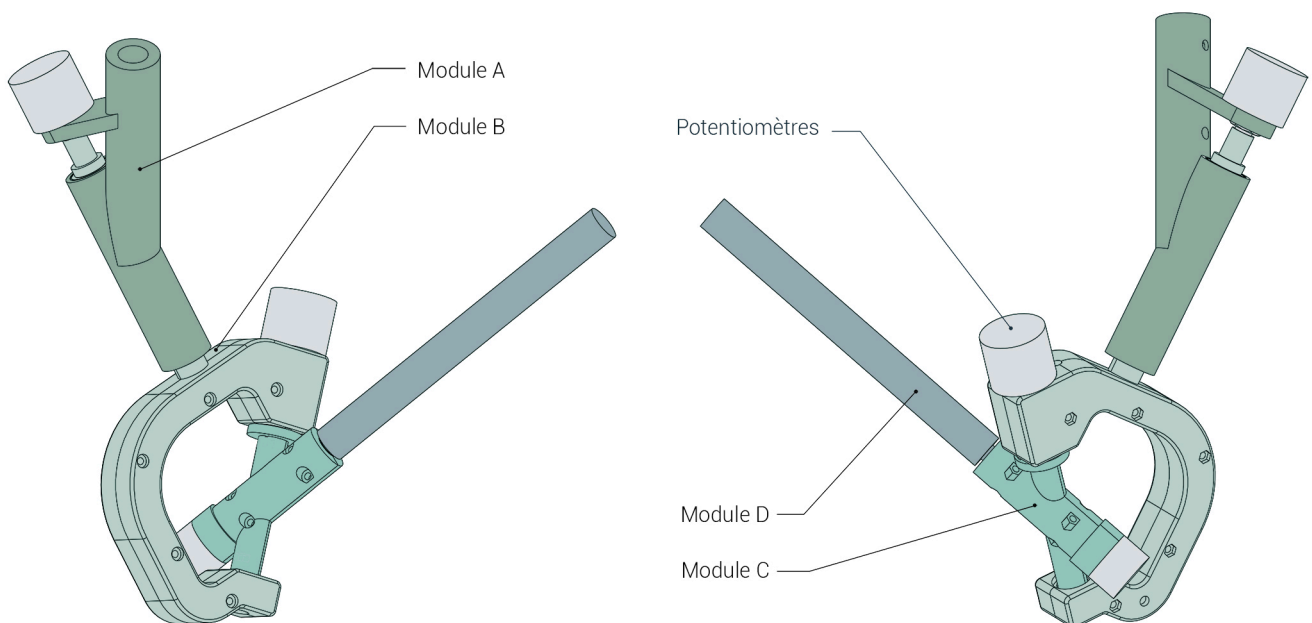


Figure 4.16/ Plans du *poignet* de la console. L'assemblage est décomposé en 4 modules et 3 potentiomètres. Ces éléments sont représentés par des couleurs différentes.

Le montage des différents modules est relativement complexe et suit un ordre précis décrit par la Figure 4.17. Premièrement, les deux parties du module C sont refermées autour du module D. Ensuite, les deux parties du module B sont refermées autour du module C. Finalement, le module B est glissé dans le module A. Une fois le montage du *poignet* terminé, celui-ci est attaché sur le dernier pivot du *bras* de la console.

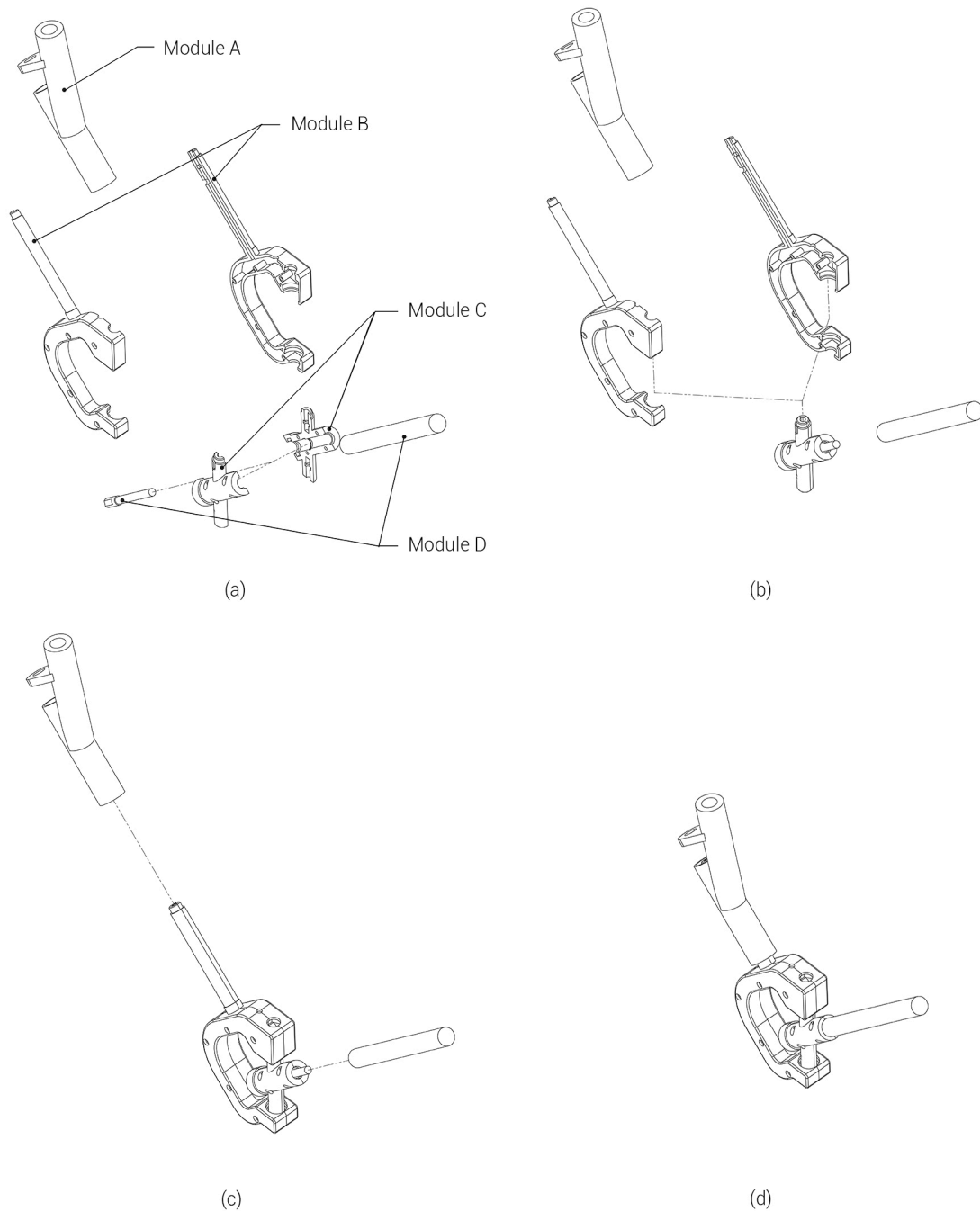


Figure 4.17/ Montage en cascade des 4 modules du *poignet*.

Les sections suivantes décrivent en détail les assemblages des modules entre eux ainsi que le montage des 3 potentiomètres.

4.2.1 Connexion entre les modules C et D

La connexion entre les modules C et D correspond au troisième axe de rotation du *poignet*. Cet assemblage est représenté sur la Figure 4.18.

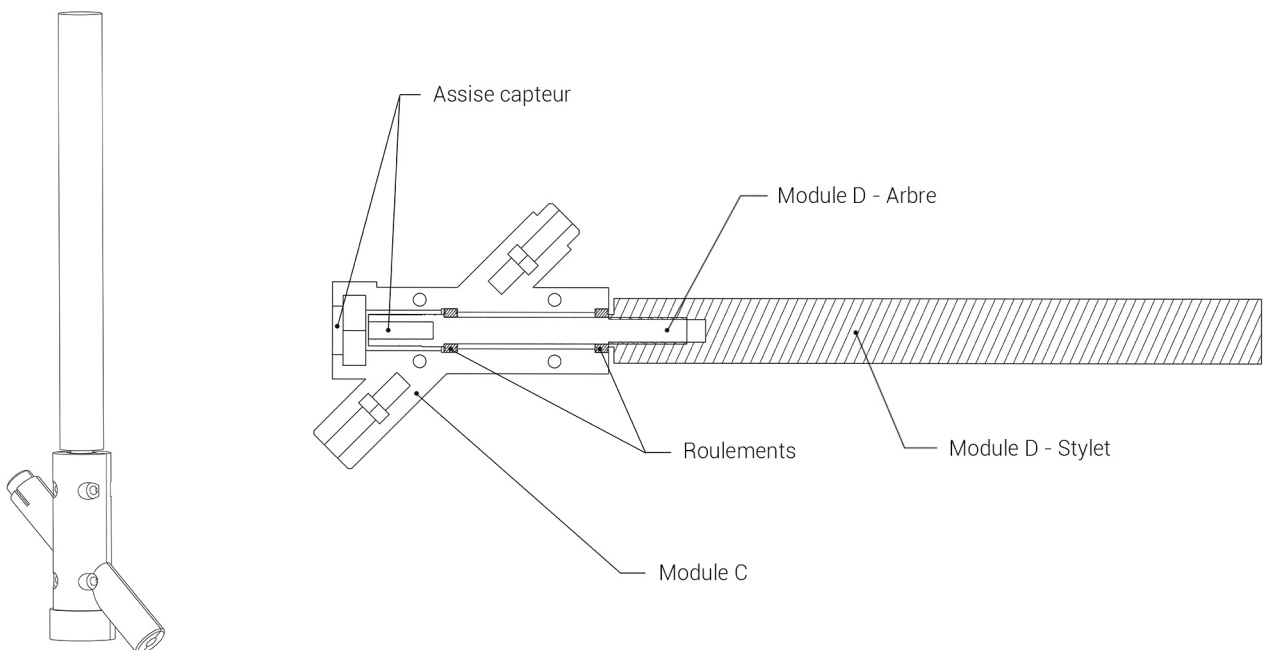


Figure 4.18/ Assemblage entre le module C et le module D. Le module C est composé de deux parties symétriques et le module D de deux parties (arbre et stylet).

Pour rappel, le module C est composé de deux parties symétriques et le module D est composé d'un arbre et d'un stylet. Le montage suit les étapes suivantes :

1. Le roulement à billes de gauche est monté par la droite (sur le dessin) sur l'arbre du module D jusqu'au niveau de l'épaulement.
2. Les deux parties du module C viennent encapsuler l'arbre et sont maintenues ensemble grâce à 4 boulons.
3. Le deuxième roulement est monté sur l'arbre par la droite jusqu'au niveau de l'épaulement dans l'alésage du module C.
4. Le stylet, taraudé, est ensuite vissé sur le bout de l'arbre, fileté. Deux méplats présents sur la gauche de l'arbre (qui n'apparaissent pas dans la coupe) permettent de maintenir l'arbre avec une pince lors du vissage. Le stylet vient alors appuyer contre le roulement de droite et permet de serrer l'assemblage.
5. Finalement, le capteur est monté sur la gauche de l'arbre. La section 4.2.4 donne plus de détails sur le montage des potentiomètres.

4.2.2 Connexion entre les modules B et C

La connexion entre les modules B et C correspond au deuxième axe de rotation du *poignet*. Cet assemblage est représenté sur la Figure 4.19. Pour rappel, le module B et le module C sont tous les deux composés de deux parties symétriques. Étant donné la géométrie en forme de X du module C, le montage se fait en glissant les éléments par la gauche et par la droite. Il suit les étapes suivantes :

— Montage par la gauche

1. Le *limiteur* est glissé sur le module C et est maintenu grâce à une rainure et une clavette. L'utilité et le montage de cet élément sont expliqués en détail dans la Section 4.2.2
2. Le premier roulement à billes est glissé sur la buselure en forme de H puis celle-ci est glissée sur l'arbre.
3. Un écrou est glissé dans la poche prévue à cet effet et une vis est insérée à travers l'arbre afin de prendre dans l'écrou et d'appliquer un serrage axial.
4. Un potentiomètre est ensuite ajouté au montage. La Section 4.2.4 donne plus de détails sur le montage des potentiomètres.

— Montage par la droite :

1. Le deuxième roulement est glissé sur le module C jusqu'au niveau de l'épaulement du module B.
2. Un écrou est glissé au niveau dans la poche prévue à cet effet et une vis est insérée à travers l'arbre et une rondelle afin de prendre appui dessus et d'appliquer un serrage axial.

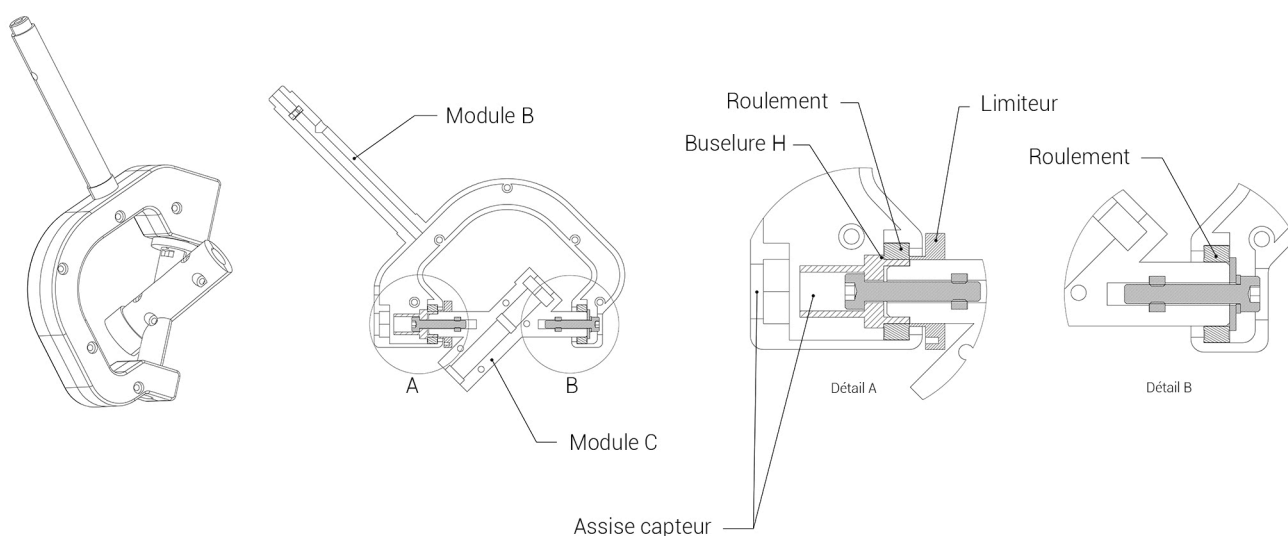


Figure 4.19/ Assemblage entre le module B et le module C. Les deux modules sont chacun composés de deux parties symétriques.

Limitation de la rotation du deuxième pivot

Les conceptions cinématiques particulières des *poignets* du robot et de la console permettent d'avoir deux configurations possibles pour une même orientation. Le robot fonctionne toujours selon la configuration de gauche sur la Figure 4.20.

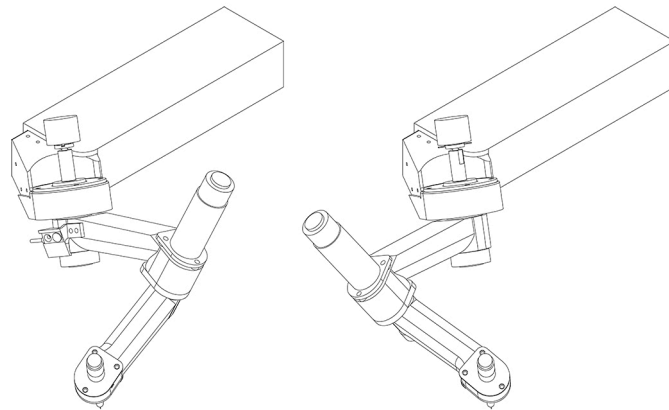


Figure 4.20/ Pour une même orientation voulue, deux configurations du poignet sont possibles. Seule celle de gauche est admissible sur le robot.

Afin d'assurer que le *poignet* de la console se trouve toujours bien dans la même configuration que celui du robot, la rotation du deuxième pivot doit être limitée. Celle-ci ne doit jamais atteindre une valeur supérieure à 180° . Le poignet du robot impose aussi une rotation minimum du deuxième axe afin d'éviter la collision entre le premier et le dernier pivot. Une pièce mécanique, le *limiteur* est intégré sur le module C (voir Figure 4.21). Celle-ci dispose d'une rainure dans laquelle s'insère une butée liée au module B (rainure avec accès pour rendre le montage possible). La rainure limite ainsi la rotation du module C par rapport au module B et empêche la console de se *désolidariser*⁵ du robot.

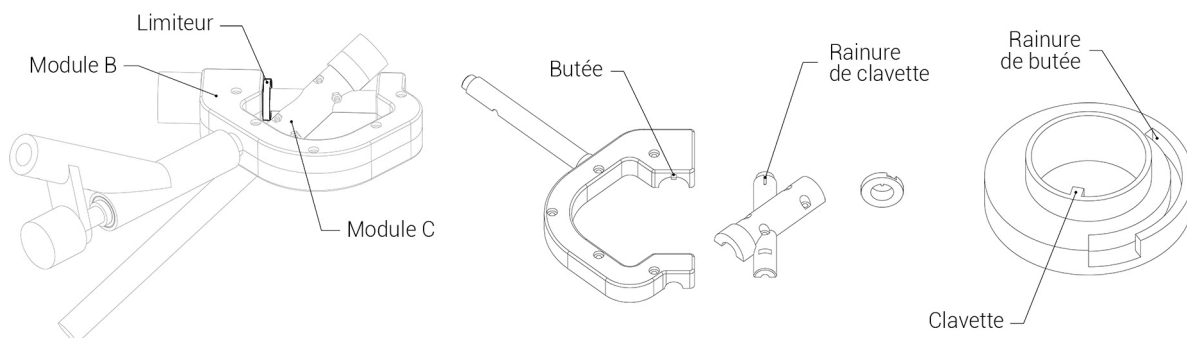


Figure 4.21/ Limitation de la rotation du deuxième pivot. Un blocage est intégré sur le module C.

5. La désolidarisation apparaît lorsque la console se trouve dans une position ou une orientation qui n'est pas atteignable par le robot. La console et le robot ne sont alors plus solidaires et une réinitialisation est nécessaire afin de les coupler.

4.2.3 Connexion entre les modules A et B

La connexion entre les modules A et B correspond au premier axe de rotation du *poignet*. Cet assemblage est représenté sur la Figure 4.22.

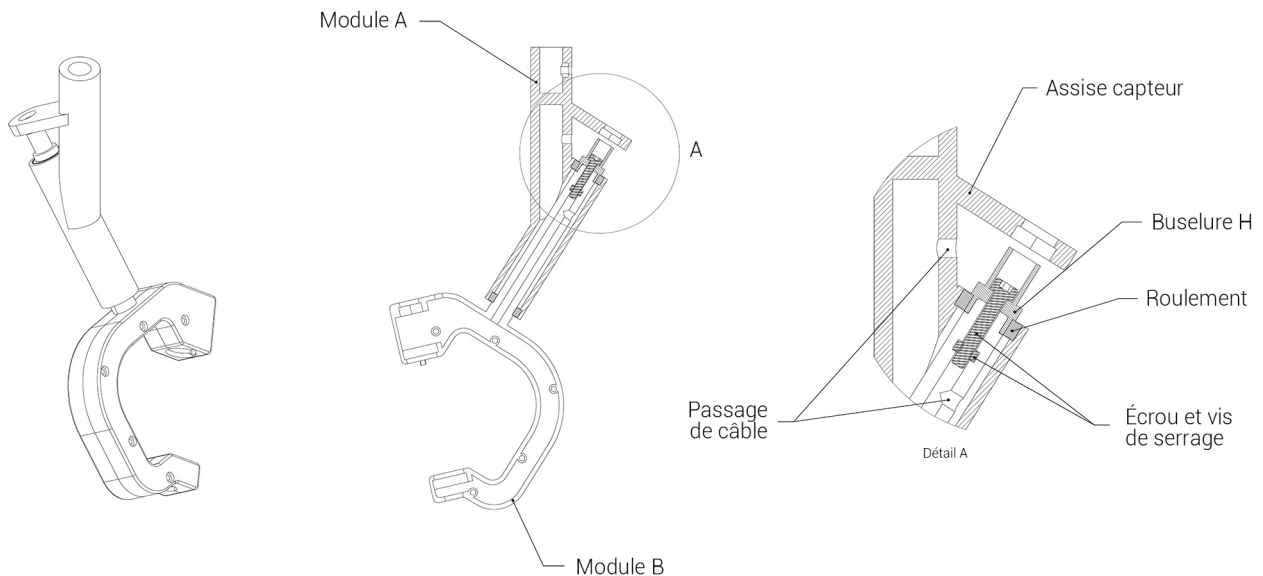


Figure 4.22/ Assemblage entre le module A et le module B. Le module B est composé de deux parties symétriques et le module A est en une seule pièce.

Pour rappel, le module A est une pièce creuse unique tandis que le module B est composé de deux parties symétriques. Le montage est réalisé en glissant successivement les éléments autour de l'arbre du module B par le haut :

1. Un premier roulement à billes est monté sur l'arbre du module B jusqu'au niveau de l'épaulement.
2. Le module A est glissé sur le module B.
3. Le deuxième roulement est glissé sur la buselure en forme de H puis celle-ci est montée sur l'arbre.
4. Un écrou est glissé dans la poche prévue à cet effet et une vis est insérée à travers l'arbre afin de prendre dans l'écrou et d'appliquer un serrage axial sur l'assemblage.
5. Un potentiomètre est ensuite ajouté au montage. La section 4.2.4 donne plus de détails sur le montage des potentiomètres.
6. Une fois ce montage terminé, l'ensemble du *poignet* est complètement assemblé. Pour le fixer sur le *bras* de la console, le haut du module A est inséré sur le dernier pivot du *bras* et maintenu grâce à une vis de serrage.

4.2.4 Intégration des potentiomètres sur les pivots

Montage des potentiomètres

La Figure 4.23 montre l'emplacement des 3 potentiomètres. Ceux-ci sont montés sur chacun des 3 pivots du *poignet*. Les fiches techniques des potentiomètres choisis se trouvent à l'Annexe E.

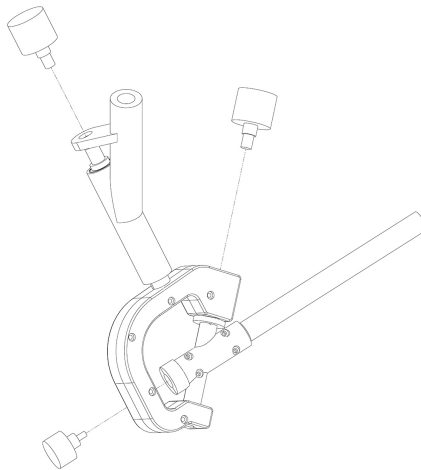


Figure 4.23/ Montage des 3 potentiomètres sur le *poignet* de la console.

la Figure 4.24 détaille en particulier le montage d'un potentiomètre sur le premier pivot. Les montages des deux autres potentiomètres sont similaires. La buselure en forme de H permet d'accueillir le rotor du potentiomètre tandis que le stator possède une partie filetée qui vient se visser à travers un écrou.

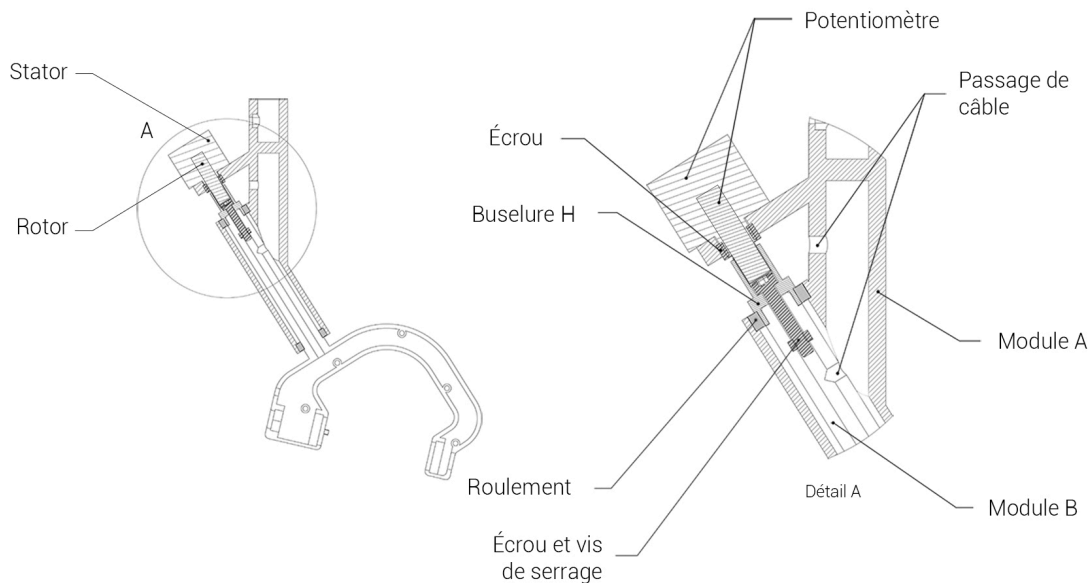


Figure 4.24/ Vue en coupe et détail du montage d'un potentiomètre sur le premier pivot.

Passage des câbles

Les modules ont été réalisés de manière à pouvoir y passer les câbles des potentiomètres. Ceux-ci remontent le *poignet* et sont ensuite reliés au *bras* de la console. La Figure 4.25 représente les trajets empruntés par les câbles connectés à chacun des 3 potentiomètres. Étant donné que la distance entre les modules varie avec l'orientation du *poignet*, suffisamment de jeu est laissé dans les câbles. En particulier entre le potentiomètre 3 et son entrée dans le module B et au niveau du passage du module B au A.

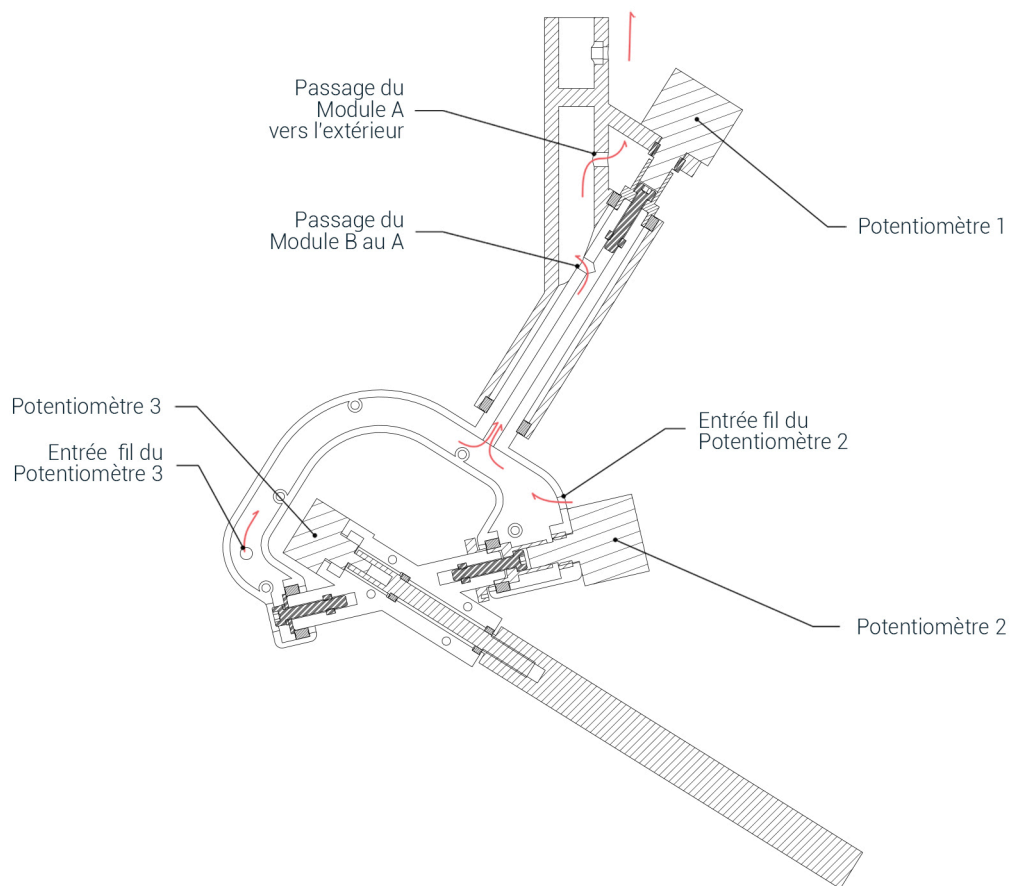


Figure 4.25/ Passage des câbles des 3 potentiomètres. À la sortie de leur potentiomètre, les câbles sont enfouis dans les différents modules et remontent le *poignet*.

4.3 Intégration dans l'environnement

L'intégration de l'ensemble de la console au sein de son environnement est représentée sur la Figure 4.26. Le robot ainsi qu'un utilisateur y sont intégrés et permettent d'avoir une idée de l'ordre de grandeur de ces différents éléments.

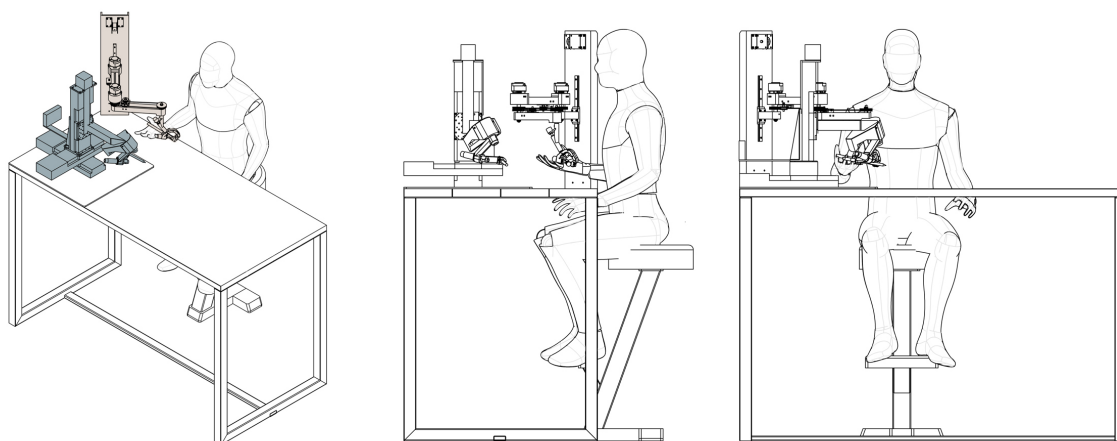


Figure 4.26/ Intégration de la console au sein de l'environnement. Le robot, en bleu, la console, en gris, et l'utilisateur y sont représentés

La Figure 4.27 donne une vue du haut de cet environnement. Tel qu'il est représenté sur ces différents plans, le stylet se trouve à sa position initiale, au centre de l'espace de travail du chirurgien. Dans cette position, le bout du stylet et le bout de l'aiguille se trouvent à peu près dans le même plan. Le bras est positionné de la manière suivante, les châssis 1 et 2 sont alignés afin de réduire la torsion dans le châssis 1, et les châssis 2 et 3 sont perpendiculaires afin d'offrir une manipulabilité maximum au centre de l'espace de travail du chirurgien.

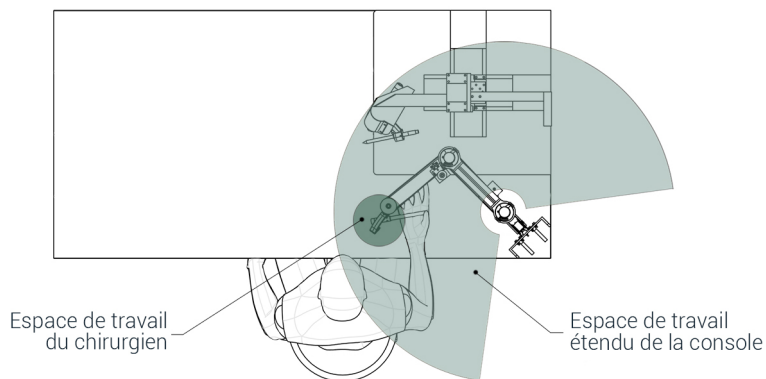


Figure 4.27/ Intégration de la console dans l'environnement. Vue du haut et représentation de l'espace de travail du chirurgien et l'espace de travail étendu de la console.

Chapitre 5

Discussion et perspectives

Abstract/ Un regard critique est porté sur la solution proposée. Des perspectives d'amélioration sont présentées dans l'optique d'améliorer la console lors de futures itérations de conception. Celles-ci s'intéressent à l'ajout d'une préhension, à la modification du système de deux courroies, à la limitation de l'espace de travail ainsi qu'à la motorisation de la console.

5.1 Discussion et critique par rapport au prototype réalisé

Comme présenté dans l'introduction de ce mémoire, seule la partie mécanique du prototype a été réalisée. L'implémentation des capteurs au sein de la console et la connexion électrique avec le robot sont laissées à une étude future. Ainsi, le prototype construit servira principalement à tester la tenue mécanique de notre solution, la solidité des structures imprimées en 3D, la présence de jeu dans les montages, le choix des pièces commandées en ligne ou usinées et l'inertie ressentie à travers les différents mouvements du stylet. Ces tests permettront d'orienter les modifications lors d'un futur design. Cependant des essais intégrant la connexion de la console avec le robot sont nécessaires afin de poser un avis complet sur la solution proposée.

En ce qui concerne la cinématique de la console, la configuration retenue, SCARA¹ a été définie sur base d'un compromis entre les différents besoins. Toute la conception mécanique s'est ensuite réalisée autour de cette cinématique. Il est dès lors possible que la solution proposée ne représente pas la solution optimale, si toutes les pistes avaient été explorées avec plus de profondeur. Un test complet du prototype en connexion avec le robot devra être réalisé afin de choisir si la piste du SCARA doit continuer à être développée ou si une autre configuration doit être étudiée. De plus, la perspective de motorisation de la console, présentée dans la Section 5.2.4, peut amener à modifier les critères de conception du Chapitre 2 et éventuellement proposer une cinématique plus adaptée.

1. SCARA est l'acronyme de Selective Compliance Assembly Robot Arm

5.2 Perspectives d'amélioration pour une version future

Dans l'idée d'améliorer la console lors de futures itérations de conception, plusieurs perspectives sont explorées : l'ajout d'une préhension, la modification du système de deux courroies, la limitation de l'espace de travail et finalement la motorisation de la console.

5.2.1 Ajout d'un degré de liberté supplémentaire lié à la préhension

La première perspective d'amélioration se situe au niveau du stylet de la console. Actuellement, celui-ci est un simple cylindre mais pourrait intégrer un septième degré de liberté de préhension. Celui-ci correspondrait typiquement à l'ouverture et la fermeture d'une pince qui serait également ajoutée à l'aiguille du robot. Afin d'atteindre cet objectif, plusieurs adaptations du stylet sont possibles :

- La solution la plus simple consiste à ajouter un bouton sur le stylet faisant office d'interrupteur pour l'ouverture et la fermeture de la pince sur le robot. Cette solution, bien que facile à mettre en place, est trop catégorique. Le degré d'ouverture de la pince dans le cadre d'une opération ne se résume pas à deux positions uniquement. De plus, au niveau du ressenti, l'utilisation d'un interrupteur s'éloigne fortement de l'utilisation d'une pince de microchirurgie et est donc contre-intuitive pour le chirurgien.
- L'utilisation d'un bouton à pression continu représente alors une alternative intéressante afin d'offrir une continuité dans le mouvement de fermeture de la pince. Un système avec deux boutons continus, situés de chaque côté du stylet, un au niveau du pouce et l'autre au niveau de l'index, permet ainsi de se rapprocher de la sensation d'utilisation d'une pince. Au besoin, un retour de force pourrait également être intégré dans ces boutons afin de simuler le ressenti d'une pince de microchirurgie.
- Finalement, afin de se rapprocher du ressenti réel, un mécanisme de pince peut être intégré directement sur le stylet. Celui-ci peut soit être un système de scratch autour du pouce et de l'index, soit une partie ou la totalité d'une pince de microchirurgie. Cela complique légèrement le design mais offre un meilleur ressenti au chirurgien.

La Figure 5.1 représente schématiquement ces trois solutions.

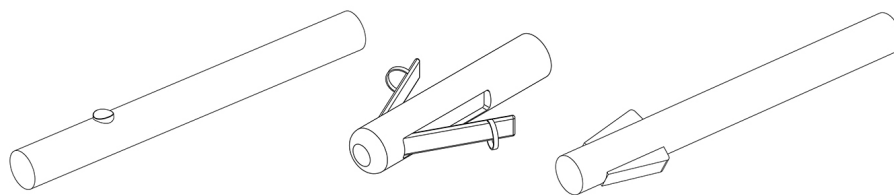


Figure 5.1/ Représentation des différentes possibilités pour l'implémentation d'un outil de préhension.

Pour implémenter un tel système au sein de la console, seules des modifications au niveau des modules C et D, imprimés en 3D, devront être réalisées. Les deux modules devront en effet être repensés de manière à intégrer le câble relié à ce nouveau système de préhension. À partir du module B, le câble peut rejoindre le trajet des câbles des potentiomètres.

5.2.2 Transmission de la rotation avec deux courroies

Deux pistes sont proposées afin d'améliorer le système de deux courroies réalisé.

La première consiste à modifier le système de mise en tension des courroies (voir Section 4.1.5) pour que celui-ci soit symétrique tel que représenté sur la Figure 5.2. Il possède une poulie supplémentaire et une fermeture *parapluie*, permettant le serrage simultané des deux côtés de la courroie. Cette solution offre l'avantage d'assurer un serrage symétrique qui n'entraînera pas une rotation non voulue de la poulie suivante (et donc du *poignet*). La conception des châssis a été pensée de manière à pouvoir passer facilement sur cette solution.

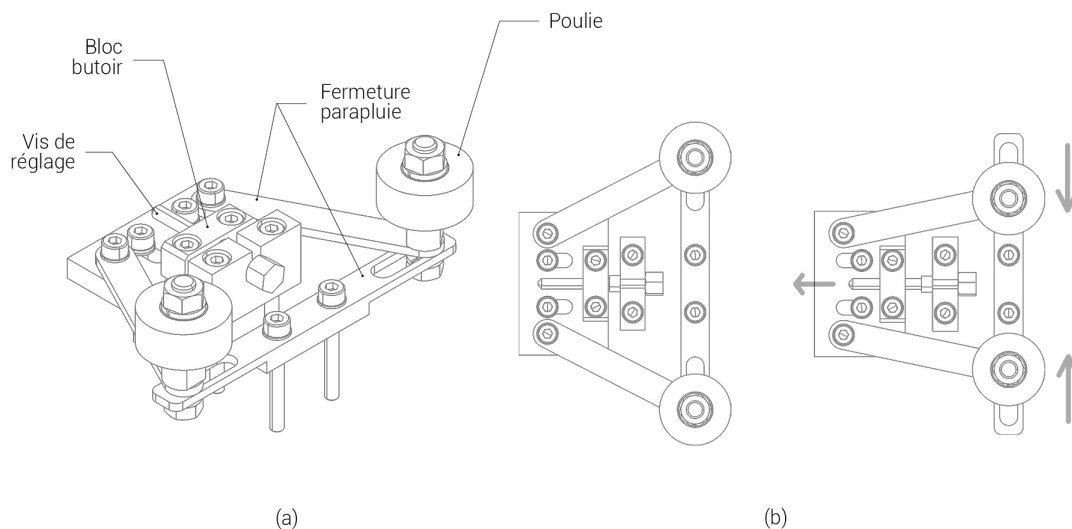


Figure 5.2/ Système de mise en tension des courroies avec un serrage symétrique.

La deuxième piste, présentée sur la Figure 5.3, consiste à modifier complètement le système de deux courroies en lui-même. En effet, le système actuellement proposé possède un inconvénient : du glissement peut apparaître entre la courroie et la poulie et donc ne pas transmettre correctement la rotation du *poignet*. Deux parallélogrammes peuvent être intégrés au *bras* afin de remplacer le système de deux courroies. Cette solution assure une orientation initiale et constante du *poignet* et rigidifie la structure du *bras*. Cependant, elle ajoute du poids et les structures en parallélogramme peuvent limiter les rotations des pivots du *bras*.

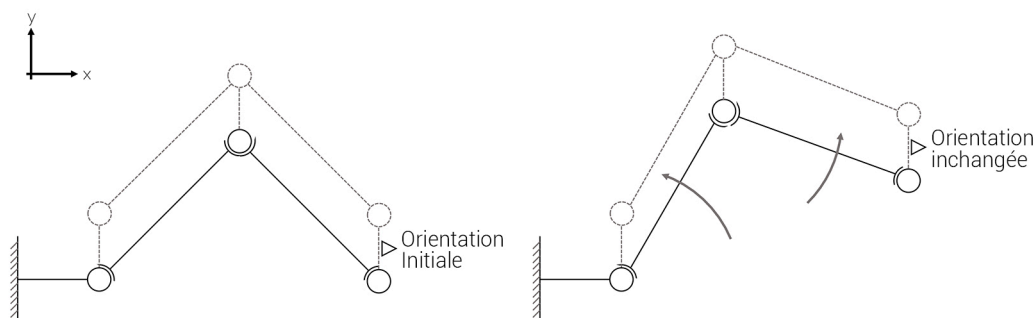


Figure 5.3/ Intégration d'un double parallélogramme (traits pointillés) à la cinématique de la console. Ce système permet de rendre l'orientation en bout de *bras* indépendante de la position.

5.2.3 Limitation de l'espace de travail

Un des objectifs de la console est d'assurer que le stylet ne se trouve pas dans une position que l'aiguille du robot ne peut atteindre.

Au niveau du *bras*, cette condition n'est pas remplie. Le facteur d'échelle entre la position de l'aiguille du robot et le stylet de la console peut être modifiable en fonction des besoins. Ainsi, il n'est pas possible d'intégrer une limitation mécanique des mouvements de translation comme c'est le cas pour les mouvements de rotation (où il n'y a pas de mise à l'échelle). Deux solutions sont proposées :

1. La première consiste à intégrer un signal qui permettrait de prévenir l'utilisateur qu'il se rapproche de la limite de l'espace de travail du robot. Ce signal peut être sous forme lumineuse, sonore ou combinant les deux et serait donné par l'ordinateur reliant la console au robot.
2. La deuxième solution s'appuie sur l'utilisation de moteur au sein de la console et plus particulièrement au niveau des articulations du *bras*. En effet si celui-ci est motorisé, un retour de force peut être appliqué à la limite de l'espace de travail afin de créer un blocage.

Au niveau du *poignet*, la solution proposée remplit cet objectif grâce à la reproduction de la cinématique du robot (voir Section 3.3). Cependant, la limitation du deuxième pivot, via le *limiteur* présenté à la Section 4.2.2, ne suffit pas complètement à empêcher le poignet du robot d'entrer en collision avec l'enveloppe de son premier pivot. Dès lors, il pourrait être intéressant de fournir un blocage externe au deuxième pivot du *poignet* de la console, monté au niveau du module A, et de la même forme que l'enveloppe du robot. Cette solution est présentée sur la Figure 5.4.

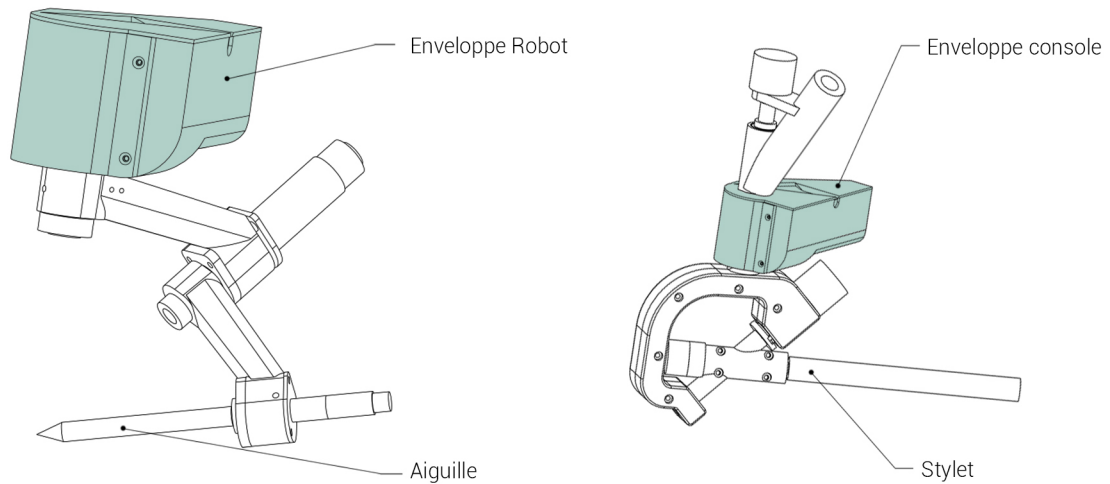


Figure 5.4/ Intégration d'une enveloppe sur le premier axe du *poignet*. L'enveloppe ajoutée sur la console, de géométrie semblable à celle présente sur le robot, permet de limiter de la même façon les orientations des deux *poignets*.

5.2.4 Motorisation de la console

L'ajout de moteurs au sein de la console représente une étape d'amélioration importante. Ceux-ci peuvent être intégrés au niveau des articulations et permettent l'implémentation des éléments suivants :

1. Les moteurs permettent d'intégrer une *interface haptique* à la console. Ainsi, lors de l'utilisation du stylet, le chirurgien peut ressentir un retour de force qui s'oppose à certains mouvements. Deux sources peuvent nécessiter ce retour haptique. La première est la limitation de l'espace de travail. La deuxième est liée à un contact entre le robot et le corps du patient. Dans ce cas, l'intégration du retour de force passe en premier lieu par une mesure du contact au niveau du robot.
2. Le ressort à force constante, utilisé pour le prototype, peut être changé afin d'utiliser une *compensation de la gravité* active. Une force constante (ou un couple équivalent) est appliquée au niveau de la glissière. Cette solution permet de modifier la force de compensation en fonction du poids exact de la console. Dans le cas de l'utilisation du ressort à force constante, ce dernier doit être changé à chaque fois que la masse d'un élément de la console est modifiée.
3. Le découplage cinématique entre la position et l'orientation du stylet peut également être atteint via un moteur. En fonction de la position du *bras*, le moteur responsable du découplage compense la rotation induite et maintient le *poignet* dans une orientation initiale. Cette solution évite de devoir intégrer un système mécanique de deux courroies ou de deux parallélogrammes mais ajoute une masse supplémentaire sur la console.

Pour implémenter des moteurs au sein de la console, les modifications suivantes doivent être réalisées.

En ce qui concerne la partie *bras*, 4 articulations peuvent intégrer un moteur. Les 3 pivots peuvent facilement accueillir un moteur puisqu'il suffit d'augmenter la longueur des arbres et de glisser les moteurs sur ceux-ci. Le but des moteurs des deux premiers pivots est de fournir un retour de force sur la position du stylet. Le but du dernier pivot est de maintenir l'orientation du *poignet* fixe, quelle que soit la position du *bras*. Finalement, pour intégrer un moteur au sein de la glissière, le système doit être modifié afin de permettre l'intégration d'un pignon et d'une crémaillère. L'objectif du moteur de cette articulation est lié au retour de force mais également à la compensation de la gravité.

Afin de diminuer l'inertie liée à l'ajout du moteur sur le deuxième pivot, il est possible d'intégrer une structure en parallélogramme sur la console (voir Figure 5.5). Celle-ci permet de rapprocher le moteur du deuxième pivot près de la base et ainsi de diminuer l'inertie ressentie lors des mouvements dans le plan XY. Cependant, il devient difficile d'intégrer à cette solution les deux parallélogrammes présentés dans la Section 5.2.2.

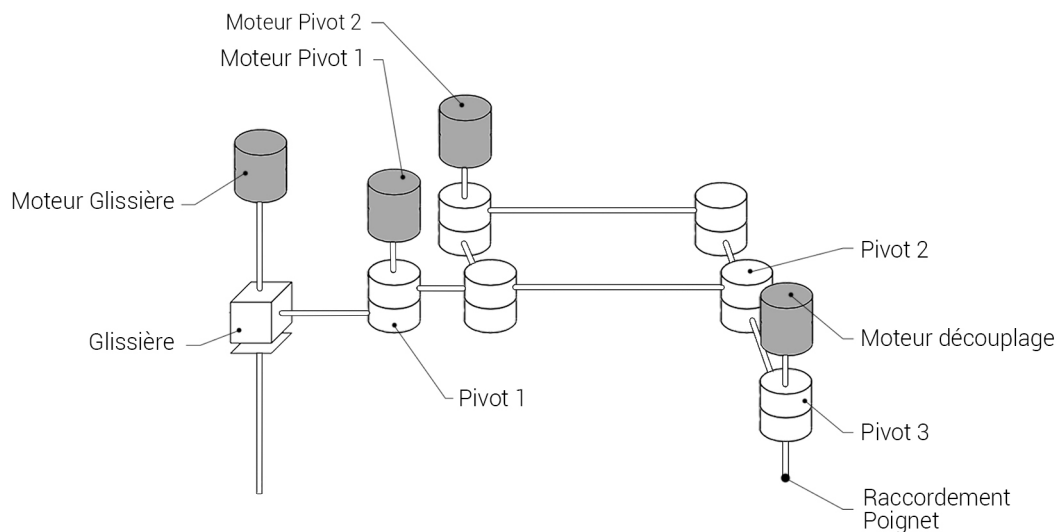


Figure 5.5/ Intégration d'une structure en parallélogramme permettant de rapprocher le moteur du deuxième pivot vers la base du *bras*.

La partie *poignet* est moins sujette à l'intégration de moteur. La cinématique est déjà réalisée de manière à éviter que le *poignet* ne sorte de l'espace de travail défini par le poignet du robot. Cependant, si un outil de préhension est intégré à la console, alors il peut être intéressant d'y ajouter un moteur pour fournir un retour de force. Une pince et un système de mesure doivent alors être incorporés sur le robot. L'insertion d'un tel système sur le robot a été étudiée dans le mémoire réalisé par A. Vanhaver et A. Mathy [16].

5.2.5 Optimisation du poids et réduction de l'inertie

Finalement, d'un point de vue général, chacun des éléments de la console peut être optimisé afin de réduire son poids. Le design des châssis, imprimés en 3D, peut être retravaillé de manière à fournir des pièces qui, pour les mêmes contraintes, sont moins volumineuses et plus légères. Les pièces commandées en ligne peuvent être réalisées à partir d'un matériau plus léger.

La Figure 5.6 présente les éléments qui interviennent dans la masse de la console qui vaut 1905 g (sans encodeurs). Les trois plus grandes contributions sont les systèmes de poulies, les châssis du *bras* imprimés en 3D et les arbres des pivots du *bras*. Ces ensembles constituent, à eux trois, 75% de la masse totale de la console. La réduction de l'inertie de la console doit donc principalement s'effectuer en intervenant sur ces 3 domaines.

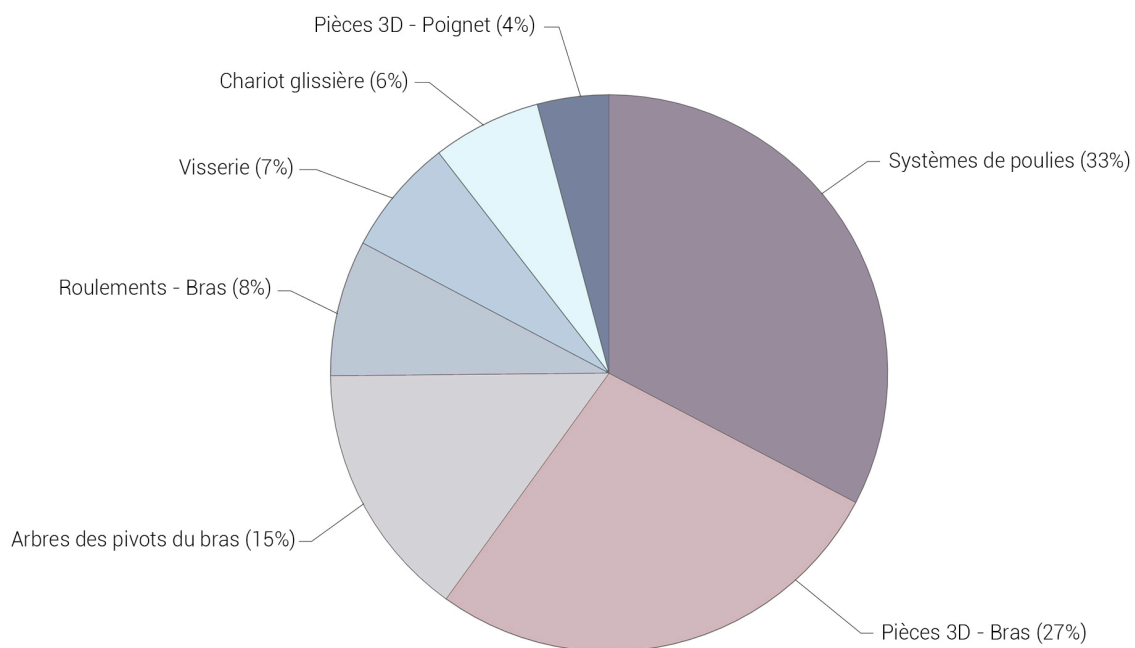


Figure 5.6/ Répartition de la masse de la console

Les encodeurs rotatifs choisis ont une masse de 200g, et augmentent ainsi de 400g la masse de la console. Pour un budget supérieur, il est possible de trouver des encodeurs avec la même résolution mais qui sont plus compacts et plus légers.

Chapitre 6

Conclusion

Dans le cadre des opérations de chirurgie reconstructive pour le cancer du sein, une des méthodes les plus courantes est la DIEP (Deep Inferior Epigastric Perforator). Lors de cette opération, le chirurgien doit réaliser une microanastomose, c'est-à-dire la suture de deux vaisseaux sanguins de quelques millimètres de diamètre.

Afin de faciliter et d'améliorer le travail du chirurgien, la robotique d'assistance à la microchirurgie a vu le jour. Dans la plupart des cas, les systèmes d'assistance sont composés de deux parties. D'un côté, une console de téléopération, dite *maître*, est placée dans les mains du chirurgien et sur laquelle il effectue ses mouvements. De l'autre côté, un robot, dit *esclave*, reproduit les mouvements de la console quasiment à l'identique. Entre ces deux éléments, un ordinateur permet leur coordination, la mise à l'échelle des mouvements et la filtration des tremblements afin d'augmenter les performances du chirurgien.

Dans le cadre de sa thèse de doctorat intitulée *Assistance robotisée pour l'augmentation de la précision des gestes de chirurgie reconstructive*, Léna Vanthournhout a réalisé la partie *esclave* d'un système d'assistance robotisé. Celui-ci est composé de 6 degrés de liberté dont 3 de positionnement et 3 d'orientation. Dans le cadre de cette thèse, l'Université Catholique de Louvain (UCL) a également fait l'achat d'une console *maître* : le *Geomagic Touch*. Malgré le fonctionnement actuel de l'ensemble, l'utilisation du *Geomagic Touch* comme console ne convient pas complètement au cadre de la microchirurgie. Une solution a donc été imaginée dans l'optique d'offrir une console qui correspond davantage aux attentes de microchirurgie et qui s'adapte en particulier pour une utilisation conjointe avec le robot.

Pour répondre aux différents besoins, la console doit offrir 6 degrés de liberté à un stylet, 3 en translation et 3 en orientation, tout comme le robot. Celle-ci doit également s'intégrer au sein d'un environnement chargé, composé d'un utilisateur, d'un robot, d'un microscope et d'un patient. La console doit disposer d'une compensation de la gravité et être la plus transparente possible lors de son utilisation. Finalement, la console doit offrir une résolution en bout de stylet de $50\mu\text{m}$.

Après avoir défini la configuration cinématique de la console, un modèle en Conception Assistée par Ordinateur (CAO) ainsi qu'un prototype mécanique ont été réalisés.

La console se décompose de deux parties distinctes. Une première partie, le *bras*, est responsable du positionnement du stylet tandis que la deuxième, le *poignet*, est responsable de son orientation. Cette dissociation permet de satisfaire un objectif de découplage cinématique, c'est à dire de réaliser indépendamment deux solutions qui répondent aux besoins de ces deux types de mouvements.

Le *bras* est composé de 4 articulations placées en série selon une configuration SCARA. La première articulation est une glissière qui permet le déplacement selon l'axe vertical et qui intègre la compensation de la gravité. Les deux articulations suivantes sont des pivots qui permettent les mouvements à travers le plan horizontal. La quatrième articulation est également un pivot qui permet de dissocier le positionnement de l'orientation du stylet. Ce dernier pivot est relié d'un côté au *poignet* et de l'autre à un système de transmission sous forme de courroies qui compense les rotations induites par les mouvements du *bras*. Trois châssis, réalisés en impression additive, relient les articulations entre elles.

Le *poignet* est quant à lui composé de 3 pivots placés en série et dont les axes de rotation interceptent le même point. La cinématique du *poignet* de la console est la même que celle du poignet du robot afin de pouvoir réaliser une coordination axe à axe de l'orientation du stylet. 4 modules, imprimés en 3D, relient les articulations entre elles et avec le *bras*. Chacun des modules est connectés avec le suivant jusqu'au stylet, manipulé par l'utilisateur.

Ces différents choix de conception ont permis d'obtenir une solution qui répond aux besoins définis par le robot de l'UCL. Les premières modélisations sont prometteuses et un essai combiné avec le robot devrait confirmer ces choix et/ou fournir des pistes d'amélioration futures.

Les deux parties, *poignet* et *bras*, sont aménagées de manière à pouvoir y inclure des encodeurs et des potentiomètres qui permettront respectivement la mesure de la position et de l'orientation du stylet. Cependant, seule la partie mécanique du prototype a été construite. Les capteurs ont été sélectionnés, mais l'implémentation de ceux-ci au sein de la console et la connexion électrique avec le robot sont laissées à une étude future.

Suite à la réalisation de ce prototype, un regard critique est porté sur la solution proposée. Dans l'idée d'améliorer la console lors de futures itérations de conception, plusieurs perspectives sont brièvement explorées telles que l'ajout d'un système de préhension ou encore la motorisation de la console.

En résumé, un prototype d'une console de téléopération, offrant 6 degrés de liberté a été réalisé. Une série de tests, en connexion avec le robot, doivent encore être réalisés de manière à valider la solution et à orienter les démarches d'amélioration future.

Appendices

Annexe A

Éléments commercialisés

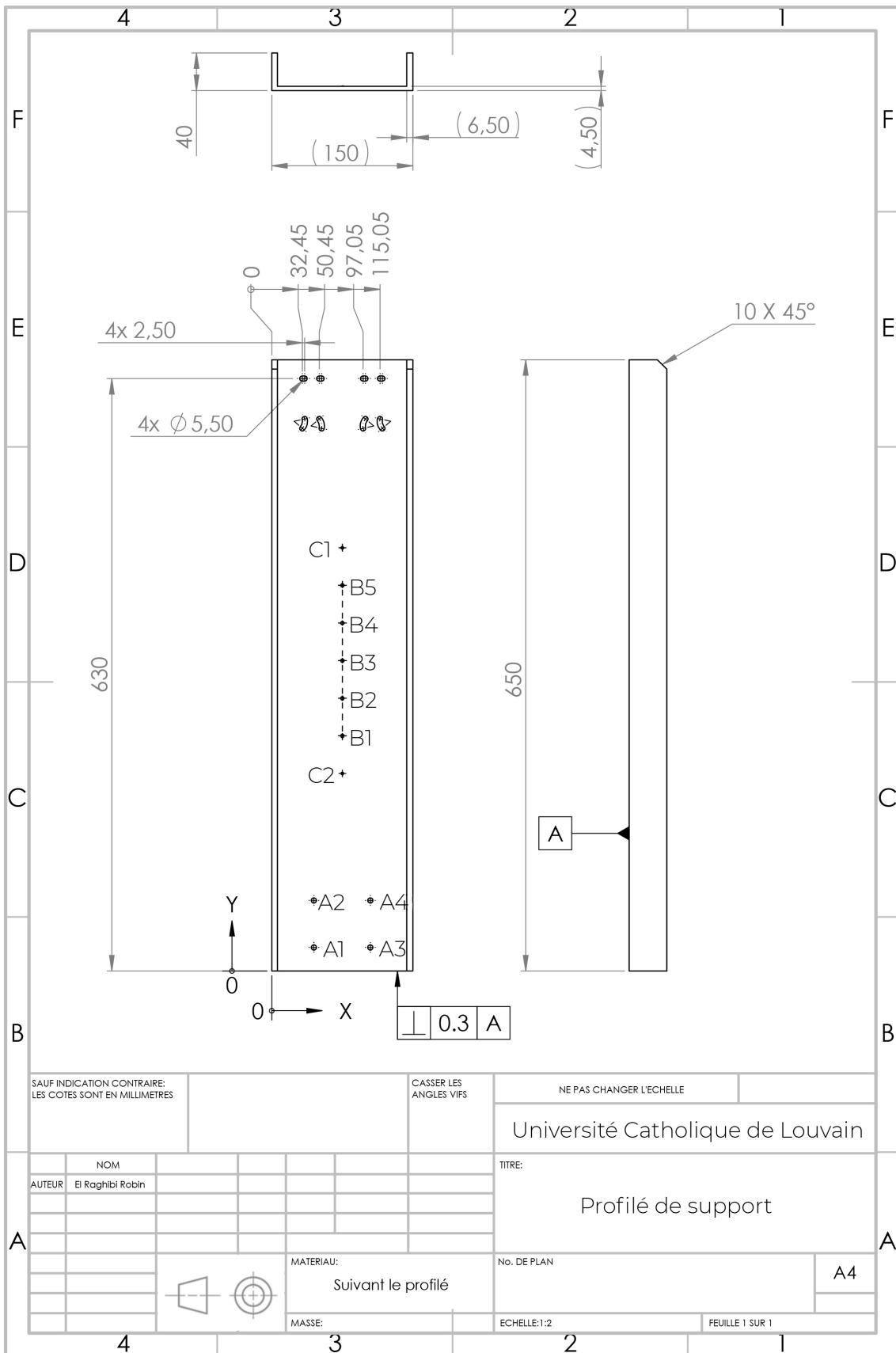
Référence	Type	Occurrence	Prix à l'unité [€]	Prix total [€]	Délai [jours]
Bras					
KZFN12_94_5_T5_P10_LA20_Q8_LB15_MB13_WD2_GD10_AC0	Arbre pivot	1	49,1	49,1	8
KZFN12_138_T5_P10_LA20_Q8_LB15_MB13_WD2_GD20_AC0	Arbre pivot	1	53,9	53,9	8
KZFN12_135_T5_P10_LA20_Q8_LB15_MB13_WD2_GD48_AC0	Arbre pivot	1	53,9	53,9	8
FUNT8	Écrou de serrage	3	7,4	22,2	1
KNCLB12_15_10	Buselure sélectionnable	5	2,78	13,9	1
MBRF50_2_5_P12	Poulie	2	15	30	6
MBXS50_2_6	Poulie libre	1	22,7	22,7	6
FSM6_16	Vis de serrage	2	1,9	3,8	1
B7001	Roulement oblique	6	7	42	1
MBT5-653	Courroie	2	8,9	17,8	8
MSSK3-8	Vis de serrage	2	0,96	1,92	1
Translation					
SSECB16_270	Glissière	1	73,52	73,52	20
SBLT3-12-10	Vis butée	2	6,9	13,8	1
RBBA60-100-10	Gousset	2	15,98	31,96	6
Tendeurs					
MBG28_2_5	Poulie libre	2	9,6	19,2	6
AJKC3_10	Bloc butoir	2	7	14	4
AJST3_15	Boulon de réglage	2	3	6	5
FXCC6_6_F3_G7_MA4	Arbre	1	21,28	21,28	6
FXCC6_9_F3_G7_MA4	Arbre	1	21,28	21,28	6
SMBK6-3	Buselure	2	0,6	1,2	1
TSBB3_5	Bloc de réglage	2	13,44	26,88	4
Compensation de la gravité					
CFS2_2	Ressort à force constante	1	17,9	17,9	1
CFSB2_2	Attache du ressort	1	14,2	14,2	1

Annexe B

Plan du profilé de support

Tableau B.1/ Table de perçage du profilé

Repère	Position X	Position Y	Taille
A1	44,75	25	ø5,5 à travers tout
A2	44,75	75	ø5,5 à travers tout
A3	104,75	25	ø5,5 à travers tout
A4	104,75	75	ø5,5 à travers tout
B1	75	250	ø3,5 à travers tout
B2	75	290	ø3,5 à travers tout
B3	75	330	ø3,5 à travers tout
B4	75	370	ø3,5 à travers tout
B5	75	410	ø3,5 à travers tout
C1	75	210	ø2,5 à travers tout M3-6H à travers tout
C2	75	450	ø2,5 à travers tout M3-6H à travers tout



Annexe C

Spécifications techniques de l'impression 3D



Figure C.1/ Imprimante Mark Two développée par Markforged. *Adaptée de* [43](#)

MATERIAL SPECIFICATIONS COMPOSITES



PLASTIC MATRIX	Test (ASTM)	Onyx	Nylon	
Tensile Modulus (GPa)	D638	1.4	0.94	Dimensions and Construction of Plastic Test Specimens: <ul style="list-style-type: none"> Tensile test specimens: ASTM D638 type IV beams Flexural test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H) Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B) All Markforged machines are equipped to print Onyx. Nylon is a specialized material that can only be printed on the Mark Two and X7. Machines that print Onyx cannot also print Nylon due to machine conditioning. Markforged parts are primarily composed of plastic matrix. Users may add one type of fiber reinforcement in each part, enhancing its material properties. 1. Measured by a method similar to ASTM D790. Thermoplastic-only parts do not break before end of Flexural Test.
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	36	31	
Tensile Strain at Yield (%)	D638	25	27	
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	30	54	
Tensile Strain at Break (%)	D638	58	260	
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	81	32	
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	2.9	0.84	
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145	49	
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330	1000	
Density (g/cm ³)	—	1.2	1.1	

FIBER REINFORCEMENT	Test (ASTM)	Carbon	Kevlar®	Fiberglass	HSHT FG
Tensile Strength (MPa)	D3039	700	610	590	600
Tensile Modulus (GPa)	D3039	54	27	21	21
Tensile Strain at Break (%)	D3039	1.5	2.7	3.8	3.9
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	470	190	210	420
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	51	26	22	21
Flexural Strain at Break (%)	D790 ¹	1.2	2.1	1.1	2.2
Compressive Strength (MPa)	D6641	320	97	140	192
Compressive Modulus (MPa)	D6641	54	28	21	21
Compressive Strain at Break (%)	D6641	0.7	1.5	—	—
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	105	105	105	150
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	960	2000	2600	3100
Density (g/cm ³)	—	1.4	1.2	1.5	1.5

Dimensions and Construction of Fiber Composite Test Specimens:

- Test plaques used in these data are fiber reinforced unidirectionally (0° Plies)
- Tensile test specimens: 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.048 in (W) (CF composites), 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.08 in (W) (GF and Kevlar® composites)
- Compressive test specimens: 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.085 in (W) (CF composites), 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.12 in (W) (Kevlar® and GF composites)
- Flexural test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H)
- Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)

Tensile, Compressive, Strain at Break, and Heat

Deflection Temperature data were provided by an accredited 3rd party test facility. Flexural data were prepared by Markforged, Inc. The above specifications were met or exceeded.

Markforged tests plaques are uniquely designed to maximize test performance. Fiber test plaques are fully filled with unidirectional fiber and printed without walls. Plastic test plaques are printed with full infill. To learn more about specific testing conditions or to request test parts for internal testing, contact a Markforged representative.

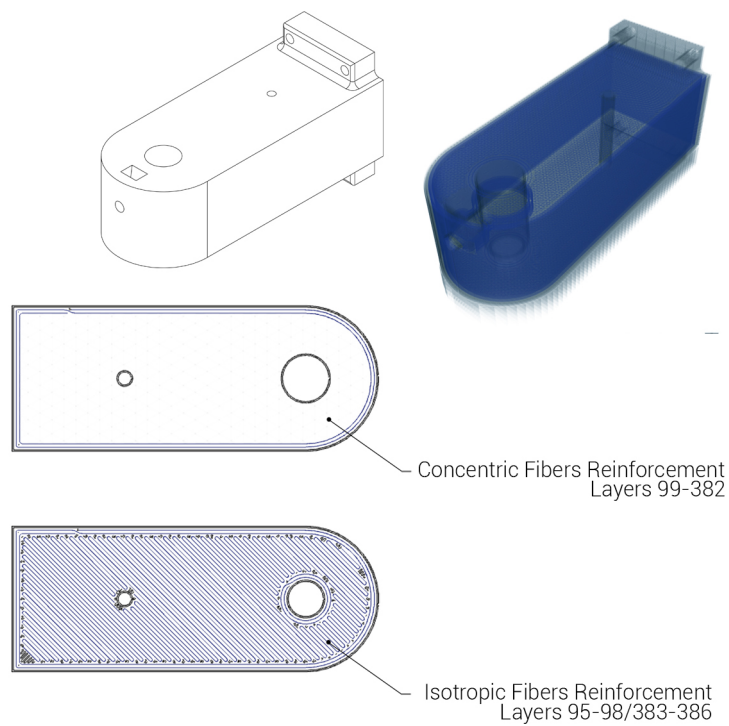
Part and material performance will vary by fiber layout design, part design, specific load conditions, test conditions, build conditions, and the like.

This representative data were tested, measured, or calculated using standard methods and are subject to change without notice. Markforged makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement; and assumes no liability in connection with the use of this information. The data listed here should not be used to establish design, quality control, or specification limits, and are not intended to substitute for your own testing to determine suitability for your particular application. Nothing in this sheet is to be construed as a license to operate under or a recommendation to infringe upon any intellectual property right.

Annexe D

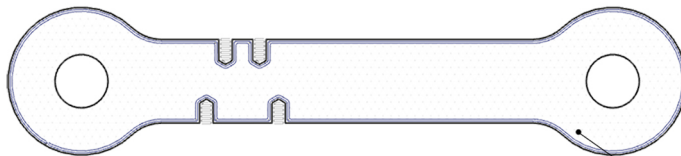
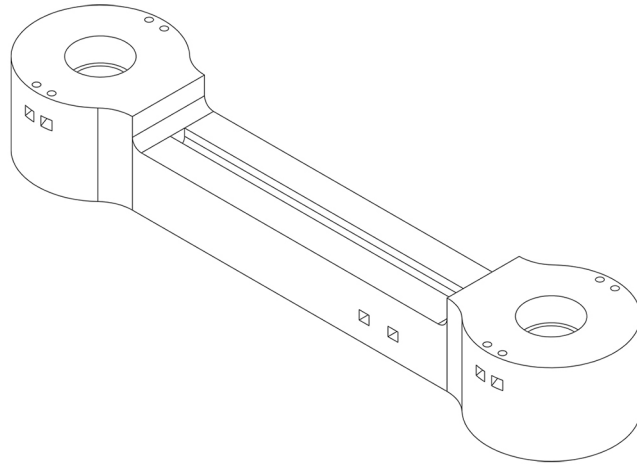
Impression 3D via la Mark two

D.1 Châssis 1

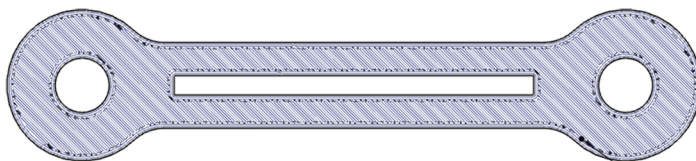


Dimensions [mm]	Print Time	Cost [\$]	Mass [g]	Fill Pattern
40x100x48	15h58	38.78	85.27	Triangular
Fill Density [%]	Layers	Roof & Floor Layers	Wall Layers	Reinforcement
50	480	4	2	Yes

D.2 Châssis 2



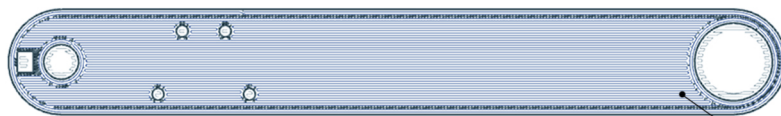
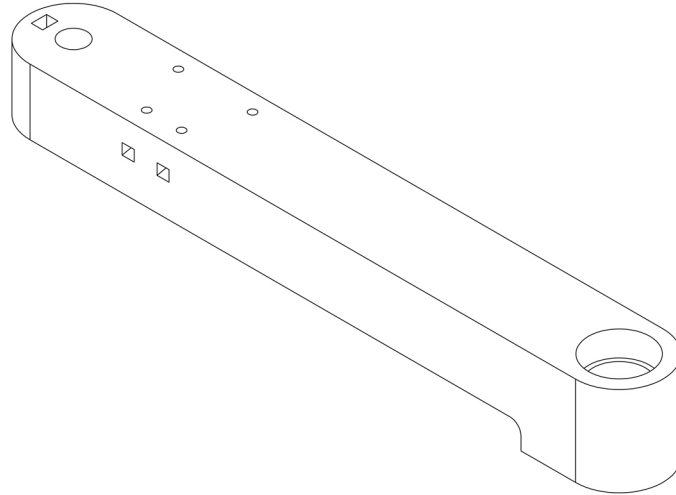
Concentric Fibers Reinforcement
Layers 9-292



Isotropic Fibers Reinforcement
Layers 5-8/293-296

Dimensions [mm]	Print Time	Cost [\$]	Mass [g]	Fill Pattern
319.7x69.9x45	1d23h	120.90	326.35	Triangular
Fill Density [%]	Layers	Roof & Floor Layers	Wall Layers	Reinforcement
50	450	4	2	Yes

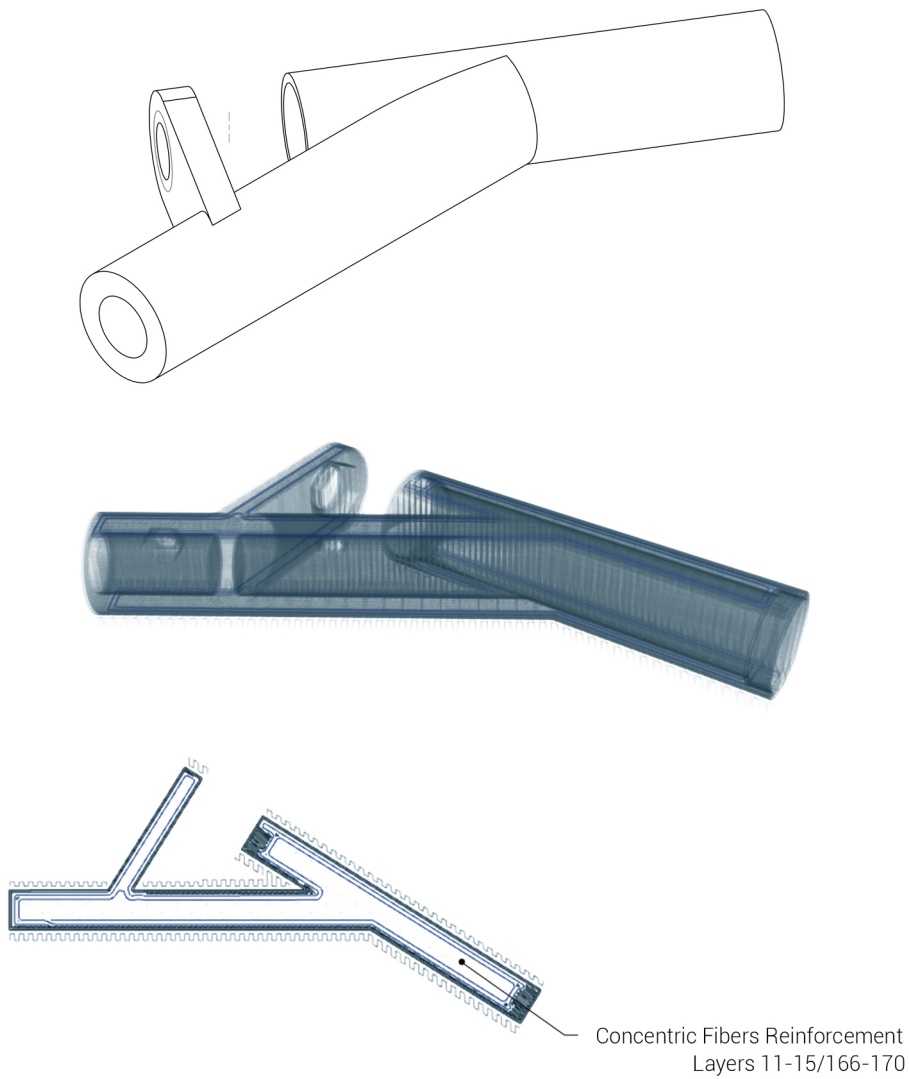
D.3 Châssis 3



Isotropic Fibers Reinforcement
Layers 5-8/293-296

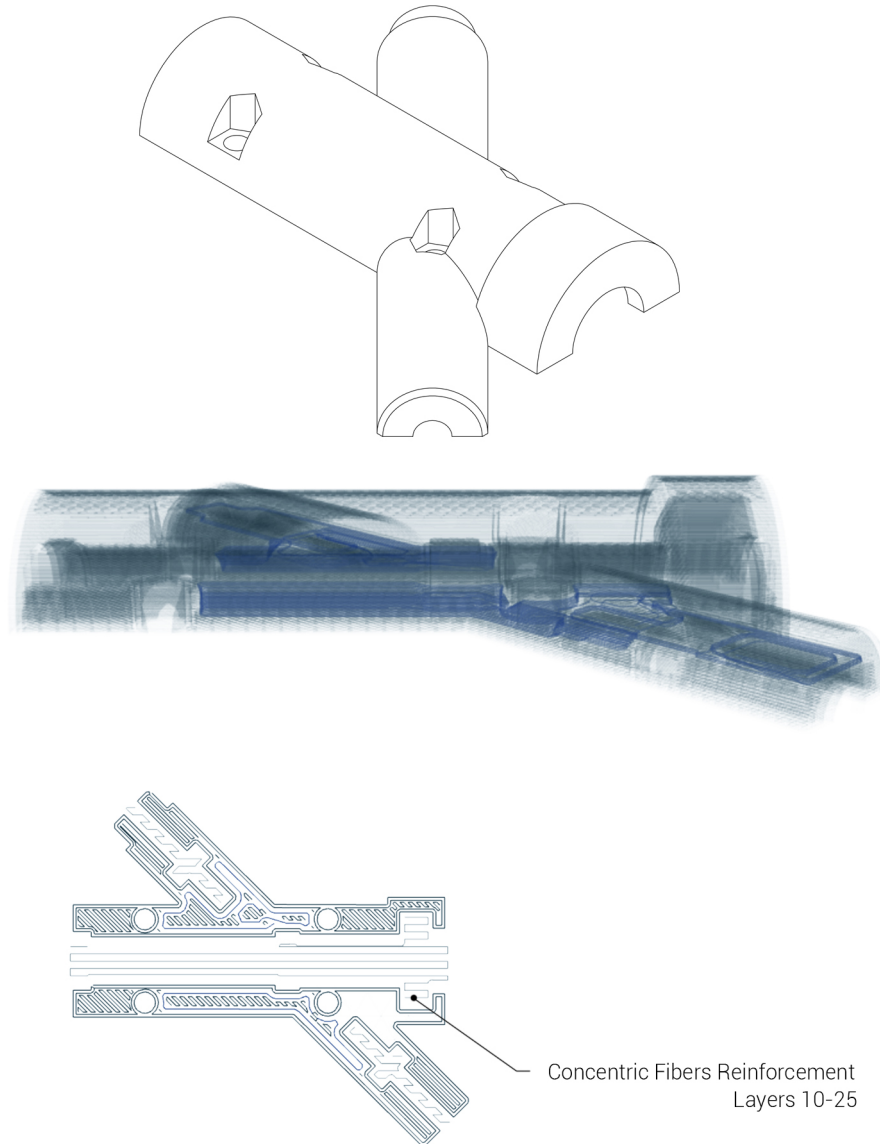
Dimensions [mm]	Print Time	Cost [\$]	Mass [g]	Fill Pattern
290x40x41	1d3h	45.28	184.67	Triangular
Fill Density [%]	Layers	Roof & Floor Layers	Wall Layers	Reinforcement
50	410	4	2	Yes

D.4 Module A



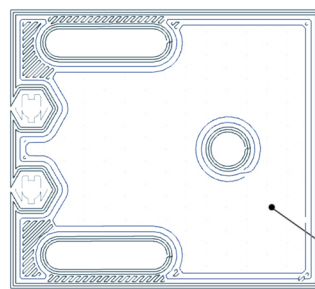
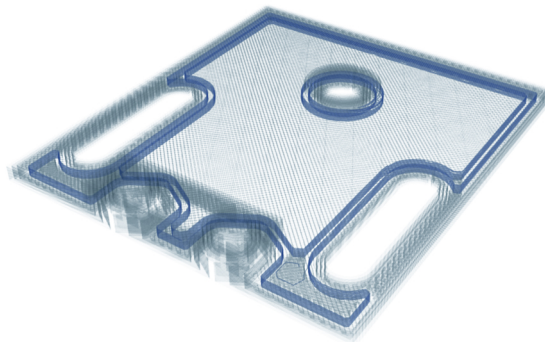
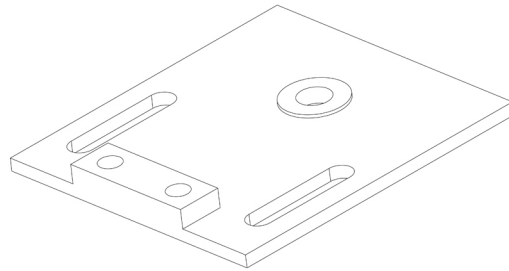
Dimensions [mm]	Print Time	Cost [\$]	Mass [g]	Fill Pattern
64x118.7x18	6h28	6.29	21.17	Triangular
Fill Density [%]	Layers	Roof & Floor Layers	Wall Layers	Reinforcement
50	180	4	2	Yes

D.5 Module C



Dimensions [mm]	Print Time	Cost [\$]	Mass [g]	Fill Pattern
54.6x49.1x9	1h47	1.55	5.86	Triangular
Fill Density [%]	Layers	Roof & Floor Layers	Wall Layers	Reinforcement
50	90	4	2	Yes

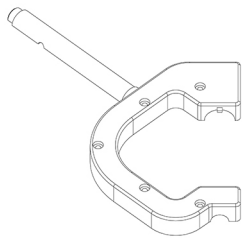
D.6 Plaque du système de mise en tension



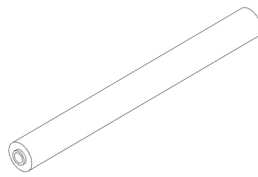
Concentric Fibers Reinforcement
Layers 5-16

Dimensions [mm]	Print Time	Cost [\$]	Mass [g]	Fill Pattern
45x50x5	1h15	1.62	5.23	Triangular
Fill Density [%]	Layers	Roof & Floor Layers	Wall Layers	Reinforcement
50	50	4	3	Yes

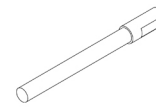
D.7 Pièces sans renfort



Module B



Module D - 1

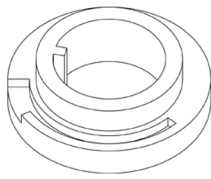


Module D - 2

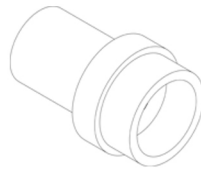
Limiteur				
Dimensions [mm]	Print Time	Cost [\$]	Mass [g]	Fill Pattern
18x18x5.3	16m	0.14	0.69	Triangular
Fill Density [%]	Layers	Roof & Floor Layers	Wall Layers	Remark
50	53	4	2	/

Buselure H				
Dimensions [mm]	Print Time	Cost [\$]	Mass [g]	Fill Pattern
11.3x11.3x17	28m	0.16	0.64	Triangular
Fill Density [%]	Layers	Roof & Floor Layers	Wall Layers	Remark
50	170	4	2	/

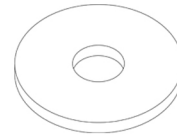
Rondelle				
Dimensions [mm]	Print Time	Cost [\$]	Mass [g]	Fill Pattern
11.3x11.3x1	5	0.02	0.12	Triangular
Fill Density [%]	Layers	Roof & Floor Layers	Wall Layers	Remark
50	10	5	2	/



Limiteur



Buselure H



Rondelle

Module D - 1				
Dimensions [mm]	Print Time	Cost [\$]	Mass [g]	Fill Pattern
12x12x121	3h11	2.61	13.05	Triangular
Fill Density [%]	Layers	Roof & Floor Layers	Wall Layers	Remark
70	1210	4	3	Tapped

Module D - 2				
Dimensions [mm]	Print Time	Cost [\$]	Mass [g]	Fill Pattern
6x6x59	1h17	0.33	1.58	Triangular
Fill Density [%]	Layers	Roof & Floor Layers	Wall Layers	Remark
100	590	4	3	Threaded

Module B				
Dimensions [mm]	Print Time	Cost [\$]	Mass [g]	Fill Pattern
138x101x100	2h53	3.22	14.46	Triangular
Fill Density [%]	Layers	Roof & Floor Layers	Wall Layers	Remark
70	1000	4	2	/

Annexe E

Fiches techniques des capteurs *Sick et Bourns*



Figure E.1/ Photos des encodeurs *Sick* et des potentiomètres *Bourns* proposés dans le cadre de ce travail. Tirée de [44, 45]

Référence	Type	Occurrence	Application	Prix [] €
DFS60A-BDEK31400	Codeur rotatif	2	Mesure les rotations des pivots A et B	173,47
BCG05-A1NM0155	Codeur à câble	1	Mesure les mouvements de la glissière	368,70
Bourns 6637	Potentiomètre	2	Mesure les rotations des modules B et C	31,01
Bourns 3590	Potentiomètre	1	Mesure la rotation du module D	17,23

DFS60A-BDEK31400 | DFS60

CODEURS INCRÉMENTAUX

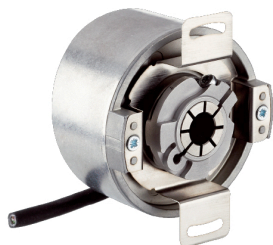


illustration non contractuelle



Informations de commande

Type	Référence
DFS60A-BDEK31400	1036707

Autres modèles d'appareil et accessoires → www.sick.com/DFS60

Caractéristiques techniques détaillées

Performance

Impulsions par tour	31.400
Pas de mesure	90° électrique/impulsions par tour
Écart du pas de mesure pour nombres de traits non binaires	± 0,002°
Limites d'erreur	± 0,03°
Durée d'initialisation	40 ms

Caractéristiques électriques

Interface électrique	10 V ... 32 V, HTL/Push pull
Mode de raccordement	Câble, 8 fils, universel, 1,5 m
Courant de service	40 mA
Puissance absorbée	≤ 0,5 W (sans charge)
Courant de charge	≤ 30 mA
Fréquence de sortie	≤ 820 kHz
Signal de référence, nombre	1
Signal de référence, position	90°, liaison électrique, logique avec A et B
Protection contre l'inversion de polarité	✓
Protection contre les courts-circuits des sorties	✓ ¹⁾
MTTFd : temps moyen avant défaillance dangereuse	300 années (EN ISO 13849-1) ²⁾

¹⁾ Court-circuit contre un autre canal US ou GND admissible pour 30 s max.²⁾ Ce produit est un produit standard et non un composant de sécurité au sens de la directive machines. Calculé sur la base d'une charge nominale des composants, d'une température moyenne de 40 °C, d'une fréquence d'utilisation de 8760 h/a. Toutes les défaillances électroniques sont considérées comme des défaillances dangereuses. pour plus d'informations, voir le document n° 8015532.

Caractéristiques mécaniques

Version mécanique	Axe creux non traversant
Diamètre de l'axe	10 mm
Poids	0,2 kg

¹⁾ Tenir compte d'un autoréchauffement de 3,3 K par 1.000 min⁻¹ lors de la détermination de la plage de température de fonctionnement.

DFS60A-BDEK31400 | DFS60

CODEURS INCRÉMENTAUX

Matériau, arbre	Métal
Matériau, bride	Aluminium
Matériau, boîtier	Aluminium moulé sous pression
Couple de démarrage	0,8 Ncm (+20 °C)
Couple de fonctionnement	0,6 Ncm (+20 °C)
Mouvement admissible de l'axe, axial statique / dynamique	± 0,5 mm / ± 0,01 mm
Mouvement admissible de l'arbre, radial statique / dynamique	± 0,3 mm / ± 0,05 mm
Vitesse de fonctionnement	≤ 6.000 min ⁻¹ ¹⁾
Moment d'inertie du rotor	40 gcm ²
Durée de stockage	3,6 x 10 ¹⁰ tours
Accélération angulaire	≤ 500.000 rad/s ²

¹⁾ Tenir compte d'un autoréchauffement de 3,3 K par 1.000 min⁻¹ lors de la détermination de la plage de température de fonctionnement.

Caractéristiques ambiantes

CEM	Selon EN 61000-6-2 et EN 61000-6-4
Indice de protection	IP67, côté boîtier départ de câble (selon CEI 60529) IP65, côté arbre (selon CEI 60529)
Humidité relative admissible	90 % (condensation du balayage optique inadmissible)
Plage de température de fonctionnement	-40 °C ... +100 °C ¹⁾ -30 °C ... +100 °C ²⁾
Plage de température de stockage	-40 °C ... +100 °C, sans emballage
Résistance aux chocs	100 g, 6 ms (selon EN 60068-2-27)
Résistance aux vibrations	30 g, 10 Hz ... 2.000 Hz (selon EN 60068-2-6)

¹⁾ En position fixe du câble.

²⁾ En position mobile du câble.

Classifications

ECI@ss 5.0	27270501
ECI@ss 5.1.4	27270501
ECI@ss 6.0	27270590
ECI@ss 6.2	27270590
ECI@ss 7.0	27270501
ECI@ss 8.0	27270501
ECI@ss 8.1	27270501
ECI@ss 9.0	27270501
ETIM 5.0	EC001486
ETIM 6.0	EC001486
UNSPSC 16.0901	41112113

BCG05-A1NM0155 | EcoLine

CODEURS À CÂBLE

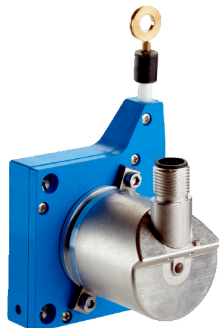


illustration non contractuelle



Informations de commande

Type	Référence
BCG05-A1NM0155	1068864

Autres modèles d'appareil et accessoires → www.sick.com/EcoLine

Caractéristiques techniques détaillées

Performance

Plage de mesure	0 m ... 1,25 m
Reproductibilité	≤ 0,2 mm ¹⁾
Linéarité	≤ ± 2 mm ¹⁾
Hystérésis	≤ 0,4 mm ¹⁾
Résolution (câble + codeur)	0,02 mm ^{2) 3)}

¹⁾ La valeur se rapporte au mécanisme à câble.²⁾ Pour les valeurs indiquées, il s'agit d'une valeur arrondie.³⁾ Exemple de calcul pour BCG08 avec PROFINET : 230 mm (longueur de câble par rotation - voir les caractéristiques mécaniques) : 262.144 (nombre de pas par rotation) = 0,001 mm (résolution de la combinaison câble + codeur).

Interfaces

Codeurs	Codeurs absolus
Interface électrique	SSI
Mode de raccordement	Connecteur mâle M12, 8 pôles, universel ¹⁾
Fréquence d'horloge	2 MHz
Kit (réglage électronique)	H actif (L ≡ 0 - 3 V, H ≡ 4,0 - Us V)
Signaux d'interface	Clock +, Clock -, Data +, Data-
Type de code pour la valeur absolue	Gray, binaire

¹⁾ Uniquement avec le AHM36 SSI.

Caractéristiques électriques

Durée d'initialisation	¹⁾
Tension d'alimentation	4,5 V ... 32 V

¹⁾ Après ce temps, il est possible de lire des positions valides.²⁾ Ce produit est un produit standard et non un composant de sécurité au sens de la directive machines. Calculé sur la base d'une charge nominale des composants, d'une température moyenne de 40 °C, d'une fréquence d'utilisation de 8760 h/a. Toutes les défaillances électroniques sont considérées comme des défaillances dangereuses. pour plus d'informations, voir le document n° 8015532.³⁾ La valeur se rapporte uniquement au codeur monté.

Puissance absorbée	1,5 W
MTTFd : temps moyen avant défaillance dangereuse	270 années ^{2) 3)}

¹⁾ Après ce temps, il est possible de lire des positions valides.

²⁾ Ce produit est un produit standard et non un composant de sécurité au sens de la directive machines. Calculé sur la base d'une charge nominale des composants, d'une température moyenne de 40 °C, d'une fréquence d'utilisation de 8760 h/a. Toutes les défaillances électroniques sont considérées comme des défaillances dangereuses. pour plus d'informations, voir le document n° 8015532.

³⁾ La valeur se rapporte uniquement au codeur monté.

Caractéristiques mécaniques

Poids (y compris codeur)	200 g
Poids (système mécanique)	80 g
Matériau, câble de mesure	Fil d'acier hautement flexible acier inoxydable 1.4401 V4A
Poids (pièce de mesure)	0,58 g/m
Matériau, boîtier du mécanisme de câble	Plastique, Noryl
Longueur de câble par tour	150 mm
Force de retour du ressort	Env. 1 N ... env. 1,4 N ¹⁾
Durée de vie du mécanisme de câble	Typ. 1 millions de cycles ^{2) 3)}
Longueur réelle du câble	1,45 m
Câble de mesure diamètre	0,45 mm
Accélération du câble	10 m/s ²
Vitesse de déplacement	4 m/s
Codeur monté	AHM36 SSI
Nombre de pas par tour	8.192
Référence codeur	1068328
Mécanisme monté	MRA-G055-101D4
Référence mécanisme	5324019

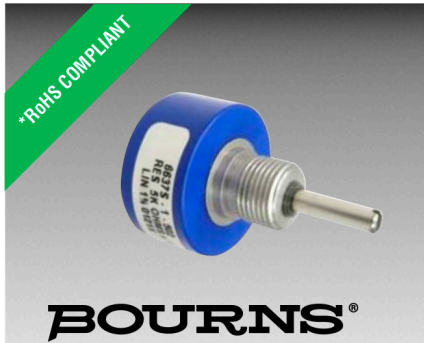
¹⁾ Ces valeurs sont mesurées à une température ambiante de 25 °C. Il peut y avoir des divergences à d'autres températures.

²⁾ Un cycle se compose d'une course de sortie et d'une course d'entrée de câble.

³⁾ La durée de vie dépend du type de sollicitation. Les facteurs d'influence sont : les conditions ambiantes, la situation de montage, la plage de mesure utilisée, la vitesse de déplacement ainsi que l'accélération.

Caractéristiques ambiantes

CEM	Selon EN 61000-6-2 et EN 61000-6-3
Indice de protection du codeur	IP66 / IP67, côté boîtier (selon CEI 60529) IP66 / IP67, côté arbre (selon CEI 60529)
Indice de protection du mécanisme	IP50
Résistance aux chocs	100 g, 6 ms (selon EN 60068-2-27)
Plage de fréquence de la résistance aux vibrations	20 g, 10 Hz ... 2.000 Hz (selon EN 60068-2-6)
Plage de température de fonctionnement (codeur)	-30 °C ... +70 °C
Plage de température de fonctionnement (mécanique)	-30 °C ... +70 °C
Plage de température de fonctionnement (combinaison)	Est défini par la valeur supérieure minimale et la valeur inférieure maximale de la plage de température de fonctionnement du codeur et de la mécanique
Humidité relative/condensation	90 % (condensation du balayage optique inadmissible)



Features

- Bushing mount
- Excellent resolution
- High rotational life
- Non-standard features and specifications available

6637 - Precision Potentiometer

Electrical Characteristics¹

Standard Resistance Range.....	1 K to 100 K ohms
Total Resistance Tolerance.....	±10 %
Independent Linearity.....	±1 %
Effective Electrical Angle.....	340 ° ±3 °
End Voltage.....	0.5 % maximum
Output Smoothness.....	0.1 % maximum
Dielectric Withstanding Voltage (MIL-STD-202, Method 301) Sea Level.....	750 VAC minimum
Power Rating (Voltage Limited By Power Dissipation or 300 VAC, Whichever is Less) +70 °C.....	1 watt
+125 °C.....	0 watt
Insulation Resistance (500 VDC).....	1,000 megohms minimum
Resolution.....	Essentially infinite

Environmental Characteristics¹

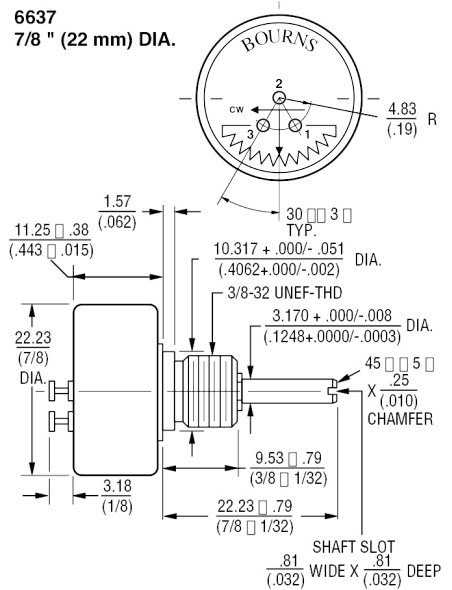
Operating Temperature Range.....	-40 °C to +125 °C
Storage Temperature Range.....	-65 °C to +125 °C
Temperature Coefficient Over Storage Temperature Range.....	±500 ppm/°C maximum
Vibration.....	15 G
Wiper Bounce.....	0.1 millisecond maximum
Total Resistance Shift.....	±5 % maximum
Voltage Ratio Shift.....	±0.5 % maximum
Shock.....	50 G
Wiper Bounce.....	0.1 millisecond maximum
Total Resistance Shift.....	±5 % maximum
Voltage Ratio Shift.....	±0.5 % maximum
Load Life.....	1,000 hours, 1 watt
Total Resistance Shift.....	±10 % maximum
Rotational Life (No Load).....	10,000,000 shaft revolutions
Total Resistance Shift.....	±10 % maximum
Moisture Resistance (MIL-STD-202, Method 106) Total Resistance Shift.....	±15 % maximum
IP Rating.....	IP 40

Mechanical Characteristics¹

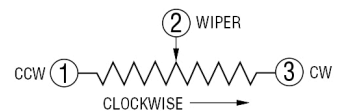
Mechanical Angle.....	Continuous
Torque (Starting & Running).....	0.40 N-cm (0.5 oz.-in.) maximum
Mounting.....	170-200 N-cm (15-18 lb.-in.) maximum
Shaft Runout.....	0.025 mm (0.001 in.) T.I.R.
Shaft End Play.....	0.13 mm (0.005 in.) T.I.R.
Shaft Radial Play.....	0.13 mm (0.005 in.) T.I.R.
Backlash.....	0.1 ° maximum
Weight.....	16 gm
Terminals.....	Rear turret type
Soldering Condition Manual Soldering.....	96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu solid wire or no-clean rosin cored wire 370 °C (700 °F) max. for 3 seconds
Wave Soldering.....	96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu solder with no-clean flux 260 °C (500 °F) max. for 5 seconds
Wash processes.....	Not recommended
Marking.....	Manufacturer's name and part number, resistance value and tolerance, linearity tolerance, wiring diagram, and date code.
Ganging (Multiple Section Potentiometers).....	1 up maximum
Hardware.....	One lockwasher (H-37-2) and one mounting nut (H-38-2) is shipped with each potentiometer.

¹At room ambient: +25 °C nominal and 50 % relative humidity nominal, except as noted.

Product Dimensions



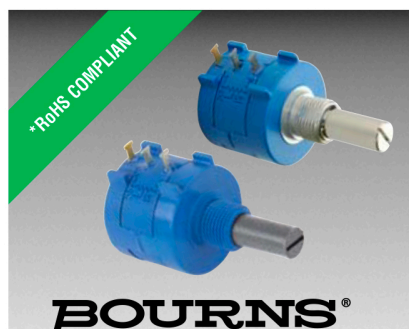
NOTE: SHAFT SUPPORTED BY FRONT SLEEVE BEARING.



Recommended Part Numbers

Part Number	Resistance (Ω)
6637S-1-102	1,000
6637S-1-502	5,000
6637S-1-103	10,000

BOLDFACE LISTINGS ARE IN STOCK AND READILY AVAILABLE THROUGH DISTRIBUTION.
FOR SERVO MOUNT VERSION AND OTHER OPTIONS CONSULT FACTORY.



Features

- Bushing mount
- Optional AR pin feature
- Plastic or metal shaft and bushings
- Wirewound
- Solder lugs or PC pins
- Sealable (Full body seal)
- Designed for use in HMI applications

- RoHS compliant*

3590 - Precision Potentiometer

Electrical Characteristics¹

Standard Resistance Range.....	200 to 100 K ohms
Total Resistance Tolerance.....	±5 %
Independent Linearity.....	±0.25 %
Effective Electrical Angle.....	3600 ° +10 °, -0 °
Absolute Minimum Resistance.....	1 ohm or 0.1 % maximum (whichever is greater)
Noise.....	100 ohms ENR maximum
Dielectric Withstanding Voltage (MIL-STD-202, Method 301)	
Sea Level.....	1,500 VAC minimum
Power Rating (Voltage Limited By Power Dissipation or 450 VAC, Whichever is Less)	
+40 °C.....	2 watts
+125 °C.....	0 watt
Insulation Resistance (500 VDC).....	1,000 megohms minimum
Resolution.....	See recommended part numbers

Environmental Characteristics¹

Operating Temperature Range.....	-40 °C to +125 °C
Storage Temperature Range.....	-55 °C to +125 °C
Temperature Coefficient Over Storage Temperature Range ²	±50 ppm/°C maximum/unit
Vibration.....	15 G
Wiper Bounce.....	0.1 millisecond maximum
Shock.....	50 G
Wiper Bounce.....	0.1 millisecond maximum
Load Life.....	1,000 hours, 2 watts
Total Resistance Shift.....	±2 % maximum
Rotational Life (No Load).....	1,000,000 shaft revolutions
Total Resistance Shift.....	±5 % maximum
Moisture Resistance (MIL-STD-202, Method 103, Condition B)	
Total Resistance Shift.....	±2 % maximum
IP Rating	
Sealed Versions (-3, -4, -7, and -8).....	IP 65
Unsealed Versions (-1 -2, -5, and -6).....	IP 40

Mechanical Characteristics¹

Stop Strength.....	45 N-cm (64 oz.-in.) minimum
Mechanical Angle.....	3600 ° +10 °, -0 °
Torque (Starting & Running).....	0.35 N-cm (0.5 oz.-in.) maximum (unsealed) 1.1 N-cm (1.5 oz.-in.) maximum (sealed)
Mounting.....	55-80 N-cm (5-7 lb.-in.) (plastic) 90-113 N-cm (8-10 in.-lb.) (metal)
Shaft Runout.....	0.13 mm (0.005 in.) T.I.R.
Lateral Runout.....	0.20 mm (0.008 in.) T.I.R.
Shaft End Play.....	0.25 mm (0.010 in.) T.I.R.
Shaft Radial Play.....	0.13 mm (0.005 in.) T.I.R.
Pilot Diameter Runout.....	0.08 mm (0.003 in.) T.I.R.
Backlash.....	1.0 ° maximum
Weight.....	Approximately 19 G
Terminals.....	Solder lugs or PC pins
Soldering Condition	
Manual Soldering.....	96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu solid wire or no-clean rosin cored wire; 370 °C (700 °F) max. for 3 seconds
Wave Soldering.....	96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu solder with no-clean flux; 260 °C (500 °F) max. for 5 seconds
Wash processes.....	Not recommended
Marking.....	Manufacturer's name and part number, resistance value and tolerance, linearity tolerance, wiring diagram, and date code.
Ganging (Multiple Section Potentiometers).....	1 cup maximum
Hardware.....	One lockwasher and one mounting nut is shipped with each potentiometer.

NOTE: For Anti-rotation pin add 91 after configuration dash number. Example: -2 becomes -291 to add AR pin.

¹At room ambient: +25 °C nominal and 50 % relative humidity nominal, except as noted.

²Consult manufacturer for complete specification details for resistances below 1k ohms.

Bibliographie

- [1] Dr Jean-Benoît Burrion. Préventions et dépistages du cancer du sein. *Bordet News 120, Toute l'actualité sur le cancer du sein*, 2017.
- [2] Belgian Cancer Registry. Belgium : Females, number of invasive tumours by primary site and age group in 2015. *Seminars in Plastic Surgery*, 2017.
- [3] Eurostat. Le cancer, toujours responsable d'1 décès sur 4 dans l'ue, 3 février 2016.
- [4] Fondation contre le cancer du sein. Cancer du sein, traitements. <https://www.cancer.be/les-cancers/types-de-cancers/cancer-du-sein/traitements>. Accessed : 2018-04-25.
- [5] Isabelle Frenay. Cancer du sein : les freins à la reconstruction mammaire. http://www.doctissimo.fr/html/dossiers/cancer_sein/articles/15111-cancer-sein-freins-reconstruction-mammaire.htm. Accessed 2018-04-16.
- [6] Nadine Blachet et al. La reconstruction du sein après un cancer. *La ligue contre le cancer*, 2008.
- [7] Moustapha Hamdi et Alanna Rebecca. The deep inferior epigastric artery perforator flap (dieap) in breast reconstruction. *Seminars in Plastic Surgery*, 2006.
- [8] R. Cau. *Design and realization of a master-slave system for reconstructive microsurgery*. PhD thesis, TUE : Department of Mechanical Engineering, 2014.
- [9] Yohann Derhy. Reconstruction mammaire par lambeau diep. <https://drderhy.com/traitements/chirurgie-seins/reconstruction-mammaire/reconstruction-mammaire-par-lambeau-diep/>. Accessed 2018-05-13.
- [10] Q Qassemyar and Raphael Sinna. From microsurgery to supermicrosurgery : Experimental feasibility study and perspectives. *Annales de chirurgie plastique et esthétique*, 56 :518–27, 12 2011.
- [11] S.R. Sabapathy R. Acland. Acland's practice manual for microvascular surgery - third edition 2008. *Indian Journal of Plastic Surgery*, 41, 01 2008.
- [12] M. Patkin. Ergonomics and the operating microscope. *Adv Ophthalm*, 37, 1978.
- [13] Association pour la reconstruction du sein par DIEP. 10 questions au professeur laurent lantieri. <http://www.diep-asso.fr/content/10-questions-au-professeur-laurent-lantieri>, 2008.
- [14] John Lubahn, Brian G Dickson, and Timothy Cooney. Effect of timolol vs. a postural orthotic on hand tremor during microsurgery. *Microsurgery*, 22 :273–6, 01 2002.

- [15] Coulson C.J. Ma X. et al. Slack, P.S. The effect of operating time on surgeon's hand tremor. *Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 2009.
- [16] A. Vanhaver et A. Mathy. *Etude et réalisation d'instruments à retour de force pour robot d'assistance à la microchirurgie*. Master thesis, Ecole polytechnique de Louvain, 2015.
- [17] Association pour la reconstruction du sein par DIEP. Entretien avec le professeur laurent lantieri. <https://www.youtube.com/watch?v=ZUZl8jAKZ4g>, 2016.
- [18] M.G.W. van den Heuvel and René Hulst. Robotic assistance in microvascular surgery, 01 2008.
- [19] J. Duisit F.Château J. Szewczyk B. Lengelé L. Vanthournhout, B. Herman and B Raucent. Requirements analysis and preliminary design of a robotic assistant for reconstructive microsurgery. University Poster, 2016.
- [20] 3D Systems. 3d systems touch. <https://fr.3dsystems.com/haptics-devices/touch>. Accessed : 2018-09-30.
- [21] MPB Technologies. Freedom 6s haptic device. <http://www.cim.mcgill.ca/~haptic/pictures/Freedom.html>. Accessed : 2018-09-30.
- [22] Force Dimension. Delta.6 haptic device, force feedback interface. <http://www.forcedimension.com/downloads/specs/specsheet-delta.6.pdf>, 2016.
- [23] R. Hendrix. *Robotically assisted eye surgery : a haptic master console*. PhD thesis, TUE : Department of Mechanical Engineering, 2011.
- [24] BBZ Technologies. Bbz "actaeon" training system for robot assisted surgery. <http://www.forcedimension.com/products/delta-6/overview>. Accessed : 2018-09-30.
- [25] BBZ. Actaeon robotic surgery training console. <http://www.bbzsrl.com/actaeon.html>. Accessed 2018-03-12.
- [26] J. Duisit F. Château J. Szewczyk B. Lengelé L. Vanthournhout, B. Herman and B. Raucent. Requirements analysis and preliminary design of a robotic assistant for reconstructive microsurgery, 2015.
- [27] MPB technologies. *How do you choose a haptic device ?*, 2009.
- [28] V.S. Bagad Subhash L. Gadhave. *Mechatronics (4th revised ed.)*. Pune : Technical Publications, 2009.
- [29] Heimburger A. & Sydhoff P. Engardt, M. Manipulability index optimization for a planar robotic arm. University Dissertation, 2012.
- [30] Pi : Process Instruments. Technical note 10 : Accuracy, precision, reproductibility, repeatability & resolution. what do they mean?
- [31] Vigen Arakelian. Gravity compensation in robotics. *Advanced Robotics*, 30 :1–18, 11 2015.
- [32] Qi Lu, Carlos Ortega, and Ou Ma. Passive gravity compensation mechanisms : Technologies and applications. *Recent Patents on Engineering*, 5 :32–44, 04 2011.
- [33] Julien Hubert. *Static analysis of parallel manipulators singularities*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, September 2010.
- [34] Sébastien Briot and Ilian Bonev. Are Parallel Robots More Accurate than Serial Robots? *CSME Transactions*, 31(4) :445–456, November 2007.

- [35] Feng Gao, Weimin Li, Xianchao Zhao, Zhenlin Jin, and Hui Zhao. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-dof parallel manipulator designs. *Mechanism and Machine Theory*, 37 :1395–1411, 11 2002.
- [36] Seth Hutchinson Mark W. Spong and M. Vidyasagar. *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [37] Saurabh Pandey and Sunil Agrawal. Path planning of free floating prismatic-jointed manipulators. *Multibody System Dynamics*, 1 :127–140, 03 1997.
- [38] Karim Abdel-Malek and Burton Paul. Criteria for the design of manipulator arms for a high stiffness-to-weight ratio. *Journal of Manufacturing Systems*, 17(3) :209 – 220, 1998.
- [39] Emil M. Petriu. Manipulator arms. *University of Ottawa*, 2017. University Lecture.
- [40] Dar-Zen Chen Ya-Yun Lee. Determination of spring installation configuration on statically balanced planar articulated manipulators. *Mechanism and machine theory*, 74, 01 2014.
- [41] Ahmad Mashayekhi, Ali Nahvi, Mojtaba Yazdani, Majid Mohammadi Moghadam, Mohammadreza Arbabtafti, and Mohsen Norouzi. Virsense : A novel haptic device with fixed-base motors and a gravity compensation system. *Industrial Robot : An International Journal*, 41, 01 2014.
- [42] Tsuneo Yoshikawa. Manipulability of robotic mechanisms. *The International Journal of Robotics Research*, 4 :3–9, 06 1985.
- [43] Industrial grade printing, marktvo. <https://markforged.com/>. Accessed : 2018-06-03.
- [44] Incremental encoders. <https://www.sick.com/>. Accessed : 2018-06-03.
- [45] Bourns series precision potentiometers. be.farnell.com/Bourns. Accessed : 2018-06-03.

