

ÉCOLE DOCTORALE MSII

ICube – UMR 7357

THÈSE présentée par :

Cédric Girerd

soutenue le : **30 janvier 2018**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline/ Spécialité : Robotique

**Conception de robots à tubes concentriques
et application à l'inspection des cellules
olfactives**

THÈSE dirigée par :

Pierre Renaud

Professeur, ICube – INSA de Strasbourg

et co-encadrée par :

Kanty Rabenoroosa

Maître de conférences, FEMTO-ST – ENSMM

RAPPORTEURS :

Jérôme Szewczyk

Professeur, ISIR – Université Pierre et Marie Curie

Etienne Dombre

Directeur de Recherche Emérite CNRS – LIRMM

EXAMINATEUR :

Jocelyne Troccaz

Directrice de Recherche CNRS – TIMC-IMAG

Remerciements

Au moment d'achever ce manuscrit, je prends la mesure du chemin emprunté depuis mon enfance. Une partie de notre identité se forge par de multiples rencontres clés, avec des individus qui nous inspirent, nous ouvrent de nouveaux horizons, et nous enthousiasment. Ce fut mon cas, avec des personnes qui m'ont donné le goût du travail, et m'ont fait partager leurs passions. Les amis et collègues que j'ai cotoyés durant ce travail de thèse en font partie, par le partage de leur savoir scientifique et de leur vision de la robotique. Bien plus que de simples compétences techniques, leurs qualités humaines ont été également un facteur important de la réussite de ce travail : patience, attention, constance dans l'encadrement et la relecture des travaux, sont les maîtres-mots pour mener un travail de doctorat à bien.

Mes premiers remerciements vont à Pierre Renaud, mon directeur de thèse, qui m'a accueilli à Strasbourg pendant la première moitié de ma thèse, et accompagné durant trois années avec une qualité et une constance sans égal. Je le remercie également de m'avoir permis de travailler sur un projet aussi intéressant. Il en est de même pour Kanty Rabenorosoa, mon co-encadrant, pour m'avoir accueilli durant la seconde moitié de ma thèse à Besançon, et accompagné durant ces trois années. Je souhaite également saluer le travail des ingénieurs qui m'ont aidé dans la mise en oeuvre pratique de mes travaux, notamment Lucile Zorn et Benoît Wach à Strasbourg, et Patrick Rougeot à Besançon.

Je tiens également à remercier Jérôme Szewczyk et Etienne Dombre, rapporteurs de ces travaux, pour leurs retours pertinents sur mon manuscrit, ainsi que Jocelyne Troccaz, examinatrice, qui a accepté de présider mon jury de soutenance. Je remercie également Brahim Tamadazte, Laurent Tavernier, et Luc Marlier, membres invités, pour leurs apports durant ces travaux, et leur participation active lors de la soutenance.

Aussi, l'ambiance dans un laboratoire est un facteur important de la réussite d'un travail. Je tiens donc à remercier chaleureusement l'ensemble des doctorants et stagiaires, à la fois sur les sites de Strasbourg et de Besançon, avec lesquels j'ai eu la chance de pouvoir travailler. Nos échanges constructifs sur notre travail et en dehors ont sans aucun doute apporté une contribution très largement positive à mes travaux.

Pour terminer, je tiens à remercier ma famille et mes proches, pour leur soutien inconditionnel.

Résumé

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre du projet ANR NEMRO, visant à étudier le lien entre déficit olfactif et maladies neurodégénératives. Pour étudier cette possible corrélation, une biopsie optique de l'épithélium olfactif, tissu nerveux situé dans la partie supérieure de la fosse nasale, doit être effectuée. Des moyens d'imagerie, comme les sondes OCT, permettent, aujourd'hui, d'observer la structure de tissus en trois dimensions, avec la résolution souhaitée. L'accès au site est cependant très contraint en terme de dimensions et de formes, et inatteignable, aujourd'hui, avec les outils conventionnels. Pour résoudre ce problème, nous proposons l'utilisation d'un robot à tubes concentriques (RTC) porté par le sujet, et associé à un déploiement ALFI (A La File Indienne, traduction de "follow-the-leader").

Après la proposition d'un scénario d'inspection, des données anatomiques nouvelles de la fosse nasale sont tout d'abord extraites et mises en forme, afin de caractériser l'espace de travail du robot. Nous nous intéressons ensuite à la modélisation des RTC, à l'étude de leur stabilité et aux variables de conception dans le cadre d'un déploiement ALFI. Cette étude conduit à un premier niveau de synthèse pour calculer la géométrie des tubes d'un robot permettant, après assemblage, d'obtenir une forme de robot souhaitée. Par la suite, une méthode de synthèse des RTC à partir de données anatomiques est présentée. Cette méthode présente plusieurs originalités par rapport à l'état de l'art. Tout d'abord, elle est réalisée dans le cadre d'un déploiement ALFI. Ensuite, elle permet de prendre en compte la variabilité inter-sujet afin de proposer un dispositif unique pour un nombre élevé de sujets. Enfin, les critères de stabilité sont intégrés à notre méthode, conduisant à la synthèse d'un robot dont le comportement est validé à ce niveau. Pour terminer, nous proposons des solutions pour la réalisation du mécanisme d'actionnement permettant de manipuler les tubes identifiés du robot. Celui-ci devant être léger et compact, des technologies de fabrication additive multimatériaux sont considérées. Il implémente également un nouveau concept de saisie des tubes, que nous appelons PSM pour Point de Saisie Mobile, permettant de maximiser la stabilité du robot. L'évaluation préliminaire d'un déploiement ALFI et des éléments de technologie clés a permis de valider l'approche retenue dans NEMRO et sa faisabilité.

Mots clés : Robotique médicale, robots à tubes concentriques, déploiement à la file indienne, biopsie optique, épithélium olfactif.

Abstract

This PhD thesis is part of the ANR NEMRO project, whose goal is to study the possible link between olfactory deficiency and neurodegenerative diseases. In order to study this hypothetical correlation, an optical biopsy of the olfactory epithelium, a thin mucosa that covers the top part of the nasal cavity and contains neurons, must be performed. Some imaging probes, whose resolutions are compatible with the size of the objects to be observed, exist today, and allow the acquisition of detailed 3D images of a tissue. However, no conventional tool can reach the olfactory cleft, to bring the probe in the area of interest. To overcome this limitation, we propose to use a concentric tube robot (CTR), directly mounted on the subject, that deploys in a so-called FTL (Follow-The-Leader) manner.

First of all, an inspection scenario is proposed. Then, new 3D anatomical data of the nasal cavity are reconstructed to characterize the workspace of the robot. The modeling of such robots is addressed, as well as their stability, and design variables, in the case of a follow-the-leader deployment. This study leads to a first synthesis level, where the lengths and curvatures of a set of tubes are determined to obtain a given shape after assembly. Then, a second synthesis level allows to determine a suitable robot shape from medical images. The proposed method has noticeable differences from the state of the art. First of all, it is developed in the case of a follow-the-leader deployment strategy. Second, it takes into account the subject inter-variability, to propose a unique robot for a high ratio of the targeted population to inspect. To finish, it takes into account the stability criteria, to obtain a robot whose behavior is known. Finally, we propose a solution for the actuation of the tubes that compose the robot. As the device is mounted on the subject, it has to be compact and lightweight. To respect these constraints, a multimaterial additive manufacturing process is chosen. It also implements a new concept to grab and manipulate the tubes, that we call Mobile Fixation Point (MFP), which allows to maximize the robot stability during deployment. An experimental assessment of FTL deployment and of the key technological components of the device leads to a validation of the approach adopted in the NEMRO project, and its feasibility.

Keywords : Medical robotics, concentric tube robots, follow-the-leader deployment, optical biopsy, olfactory epithelium.

Table des matières

Introduction	1
1 Contexte et positionnement	5
1.1 Le projet NEMRO	6
1.2 Caractéristiques et intérêt des robots à tubes concentriques	10
1.3 Un scénario d'inspection des cellules olfactives	14
1.4 Besoins et contributions de la thèse	23
2 Analyse de l'anatomie de la cavité nasale	25
2.1 Anatomie de la cavité nasale	26
2.2 Reconstruction 3D	27
2.3 Caractérisations dimensionnelles et observations	32
2.4 Synthèse du chapitre 2	38
3 Déploiement ALFI de robots à tubes concentriques	41
3.1 Présentation	42
3.2 Déploiement "à la file indienne" : contraintes	43
3.3 Modèles géométriques	45
3.4 Stabilité	54
3.5 Synthèse géométrique pour un déploiement ALFI	59
3.6 Variables de conception des robots à tubes concentriques	60
3.7 Synthèse du chapitre 3	67
4 Synthèse des robots à tubes concentriques à partir de données...	69
4.1 État de l'art	70
4.2 Proposition d'une méthode de synthèse	74
4.3 Application	79
4.4 Validations expérimentales	88
4.5 Synthèse du chapitre 4	93

Table des matières

5 Actionnement pour les RTC en déploiement ALFI : proposition et...	95
5.1 Validation de l'approche en boucle ouverte avec recalage	96
5.2 Actionnement des robots à tubes concentriques : état de l'art	98
5.3 Actionnement à point de saisie mobile	102
5.4 Synthèse d'une unité d'actionnement pour le déploiement ALFI avec point de saisie mobile	106
5.5 Conception mécanique	110
5.6 Validation des éléments fonctionnels	114
5.7 Synthèse du chapitre 5	125
Conclusions et perspectives	127
Liste des publications	133

Table des figures

1.1	Principales dépenses restant à la charge du patient d'Alzheimer, issues de [France Alzheimer 2017].	7
1.2	Détail de la zone à explorer, située dans la partie haute de la cavité nasale. Cette dernière est tapissée par l'EO, muqueuse contenant des neurones permettant la reconnaissance des odeurs. Figure adaptée de [Lynch 2006].	8
1.3	Concept du projet, sous la forme d'une sonde OCT fibrée intégrée à l'intérieur d'un RTC pour atteindre et balayer l'EO.	9
1.4	Concept du projet, sous la forme d'une sonde OCT fibrée intégrée à l'intérieur d'un RTC pour atteindre et balayer l'EO.	10
1.5	Représentation schématique d'un RTC composé de 3 tubes sortant d'un fourreau situé à sa base, avec illustration de l'actionnement en translation et rotation pour chacun de ses 3 tubes [Dupont 2010].	11
1.6	Illustration du dispositif utilisé pour l'évacuation d'hémorragies intracérébrales, extrait de [Burgner 2013a].	12
1.7	Comparaison d'approches utilisant un outil conventionnel droit (a) et le RTC présenté (b) pour rejoindre les points A, B et C situés au fond de l'oeil [Lin 2015].	12
1.8	Illustration du dispositif utilisé pour la chirurgie de la prostate, issus de [Hendrick 2014]. (a) illustration du dispositif dans son ensemble, (b) de l'extrémité distale de l'endoscope avec les différents canaux, et (c) de l'unité d'actionnement.	13
1.9	Décomposition fonctionnelle du robot, avec une section de navigation destinée au déploiement dans le vestibule nasal, et une section d'exploration destinée au déploiement dans la fente olfactive.	16
1.10	Illustration des deux stratégies de balayage du toit de la fente olfactive, avec (a), (c) balayage par translation et rotation, et (b), (d) balayage par translation et courbure du tube de la section d'exploration. Sur la Figure (d), la zone hachurée 1 correspond à la zone morte due à la courbure maximale du tube, et la zone hachurée 2 au rayon du tube. Dans les deux cas, les flèches noires indiquent les points extrêmes pointés par la sonde.	17

Table des figures

1.11 (a) Décomposition du dispositif en un masque, une cale réglable intermédiaire, une unité d'actionnement, et le jeu de tubes, et (b) représentation de ces différentes pièces assemblées pour former le dispositif complet.	18
1.12 Vue d'ensemble des différentes étapes du scénario.	19
1.13 Les phases de préparation du dispositif.	20
1.14 Installation du sujet, recalage et installation de l'ensemble masque et cale intermédiaire.	21
1.15 Installation de l'ensemble unité d'actionnement et RTC.	21
1.16 Correction de la pose du RTC.	22
1.17 Déploiement de la section de navigation.	22
1.18 Balayage par avance et rotation de la section d'exploration.	23
2.1 Mécanisme de l'olfaction, de l'inspiration d'air contenant des molécules odorantes jusqu'à la transmission du message nerveux au cerveau.	27
2.2 L'anatomie des fosses nasales, avec (a) le détail de leurs tissus, adapté de [Human Anatomy Diagram 2017], et (b) le détail de leurs parties osseuses et cartilagineuses, adapté de [Human Anatomy System 2017].	28
2.3 Méthodologie de reconstruction 3D en 3 étapes, avec la segmentation des images, reconstruction 3D des volumes présents, puis extraction des fosses nasales.	30
2.4 Représentation des tissus mous (en orange) et des parties cartilagineuses et osseuses (en vert) avec le logiciel InVesalius.	31
2.5 Déviation du septum nasal observée pour l'un des sujets.	33
2.6 Déviation de la fente olfactive observée pour l'un des sujets.	33
2.7 Courbure du vestibule nasal observée pour l'un des sujets.	34
2.8 Histogramme normalisé représentant la courbure de la partie antérieure de la fosse nasale, au niveau du vestibule nasal, pour les 20 sujets de l'étude.	34
2.9 Fermeture locale de la fente olfactive sur l'une des 10 fosses nasales (vue dans un plan sagittale).	35
2.10 Déviation du toit de la fente olfactive sur un des sujets de l'étude.	35
2.11 Histogramme normalisé représentant la déviation du toit de la fente olfactive, pour les 20 sujets de l'étude.	36
2.12 Représentation des zones de mesure au niveau du vestibule nasal (en bleu) et de la fente olfactive (magenta), avec (a) vue de côté, et (b) vue de face de la cavité nasale.	36
2.13 Graphique représentant la largeur de la fosse nasale au niveau des points de mesure localisés au niveau du vestibule nasal et de la fente olfactive, et représentés sur la Figure 2.12.	37
2.14 Histogramme normalisé représentant la largeur de la fente olfactive, pour les 20 sujets de l'étude.	38
2.15 Boîte de Tukey montrant la distribution des largeurs pour les fentes olfactives de chacun des 20 sujets de l'étude.	39

Table des figures

3.1	Représentation d'un RTC, comprenant la partie effective et les longueurs de transmission. Les portions de tubes droites sont représentées en bleu, et les portions précourbées en blanc.	42
3.2	Séquence d'actionnement dans le cas d'un déploiement ALFI de 3 tubes. Étape 1 : les trois tubes se déploient avec leurs extrémités distales bout à bout, étape 2 : les tubes 1 et 2 se déploient avec leurs extrémités distales toujours bout à bout, puis étape 3 : le tube 1 se déploie seul.	44
3.3	Paramétrage d'un RTC dans le cas d'un assemblage de 3 tubes.	45
3.4	Représentation du découpage en fonctions élémentaires permettant de réaliser la modélisation d'un RTC, issu de [Webster 2010].	46
3.5	Illustration de la courbure résultante d'un assemblage de 3 tubes.	48
3.6	Illustration du paramétrage d'une section à courbure constante du robot.	49
3.7	Illustration des différentes solutions obtenues avec les modèles géométriques présentés, et en considérant le jeu de tubes dont les paramètres sont donnés dans le Tableau 3.1.	53
3.8	Évolution de l'angle des tubes du robot le long de leurs abscisses curvilignes, dans le cas de la solution sans torsion et avec torsion n°1.	54
3.9	Illustration de la solution triviale instable et des deux solutions stables dans le cas de 2 tubes en opposition, avec les caractéristiques données dans le Tableau 3.1	56
3.10	Illustration de la courbure résultante d'un assemblage de 3 tubes.	59
3.11	Illustration de la forme de motif utilisée pour la structuration des tubes d'un RTC.	61
3.12	Forme de robot identifiée permettant de rejoindre la fente olfactive à partir de l'entrée de la narine, sans collision avec la fosse nasale : (a) vue en perspective et (b) vue de face.	62
3.13	Forme des robots pour différentes valeurs de λ	63
3.14	Graphique montrant l'évolution de $\det(\mathbf{W}_2)$ pour différentes valeurs de λ	63
3.15	Illustration des points de saisie aux extrémités proximales des tubes lors d'un déploiement ALFI.	65
3.16	Forme des robots pour différentes valeurs de λ	66
3.17	Graphique montrant l'évolution de $\det(\mathbf{W}_2)$ pour différentes valeurs de λ	66
4.1	Synthèse de RTC pour la chirurgie transnasale [Burgner 2013b], avec (a) accès à l'hypophyse avec le robot, (b) approximation de l'espace de travail requis pour la tâche, et (c) paramétrisation de l'espace de travail.	71
4.2	Découpage du robot en une section de navigation et une section de manipulation [Bedell 2011].	72
4.3	(a) Extension télescopique de la section de navigation depuis le point d'insertion (repère E) jusqu'à l'entrée du site (repère A), (b) Déploiement de la section de manipulation pour rejoindre les cibles (repères B_i) [Bergeles 2015].	73
4.4	Structure de la méthode de synthèse des RTC proposée.	75
4.5	Structure de l'approche par recherche de formes de robots.	76

Table des figures

4.6	Illustration d'une configuration de RTC sans contact avec une section de navigation et une section d'exploration.	80
4.7	Représentation du problème géométrique posé.	81
4.8	Illustration des situations avec : (a) un nombre élevé (sujet n°2) et (b) faible (sujet n°2) de solutions pour la section de navigation, avec respectivement 950 et 3 solutions.	82
4.9	Séquence de déploiement ALFI avec le paramétrage des longueurs des tubes.	86
4.10	Évolution de $\det(W_2)$ durant toute la phase de déploiement du robot.	88
4.11	Banc de test utilisé pour les validations expérimentales.	89
4.12	Banc de test utilisé pour les validations expérimentales.	90
4.13	(a) et (b) : trace (en magenta) laissée par l'extrémité distale du robot durant déploiement, superposée à la configuration totalement déployée, et (c) et (d) : graphiques montrant l'erreur correspondante entre la trace laissée par l'extrémité du RTC et la forme finale adoptée par le robot. Les figures (a) et (c) correspondent à la vue de dessus, et les figures (b) et (d) à la vue de côté.	91
4.14	Illustration du dispositif expérimental utilisé pour la mesure du débattement angulaire en bout de section d'exploration.	92
4.15	Superposition des positions extrêmes obtenues pour le balayage par rotation avec la section d'exploration, et mesure de l'amplitude correspondante.	92
4.16	(a) Illustration du dispositif expérimental utilisé pour la mesure du déplacement fin en bout de section d'exploration, et (b) résolution en translation obtenue en extrémité distale du robot, pour un pas d'avance du tube intérieur de $20 \mu\text{m}$	93
5.1	Position du marqueur central par rapport à la pose de la section de navigation, avec (a) vue dans le plan du robot, et (b) vue de côté.	97
5.2	Unités d'actionnement pour la manipulation simultanée de plusieurs assemblages de tubes avec (a) 4 jeux manipulés [Swaney 2012], et (b) 1 jeu manipulé [Su 2015].	100
5.3	Illustration d'architectures d'unités d'actionnement : (a) parallèle [Li 2013], et (b) série [Sophocleous 2012].	101
5.4	Illustration d'une séquence de déploiement ALFI avec principe de point de saisie mobile (PSM).	104
5.5	Valeurs du déterminant de la matrice W_2 pour le cas d'un déploiement avec PSF et PSM.	105
5.6	Séquence à suivre pour le déploiement ALFI conventionnel de 3 tubes.	106
5.7	Illustration des 3 étapes à réaliser pour déployer un RTC avec une stratégie ALFI dans le cadre conventionnel.	106
5.8	Séquence à suivre pour le déploiement ALFI de 3 tubes dans le cas de l'utilisation d'un actionneur en translation et de mors de blocage.	107
5.9	Illustration des 6 étapes élémentaires permettant de réaliser le déploiement ALFI du RTC, dans le cas d'utilisation d'un actionneur en translation et de systèmes de blocage.	108

Table des figures

5.10 Séquence à suivre pour le déploiement ALFI de 3 tubes dans le cas de l'utilisation d'un actionneur en translation et de mors de blocage, avec la section 1 du robot déjà déployée.	109
5.11 Illustration des 4 étapes élémentaires permettant le déploiement ALFI du RTC, avec utilisation d'un actionneur en translation, de systèmes de blocage, dans la cas d'une première section du RTC déjà déployée.	109
5.12 Actionneur inchworm pneumatique, avec (a) vue 3D, et (b) vue en coupe (illustrations issues d'un document interne).	111
5.13 Illustration des 6 étapes élémentaires permettant de réaliser un cycle d'avance de l'objet manipulé, issu de [Bruyas 2015].	111
5.14 Illustration des 6 étapes élémentaires permettant de réaliser un cycle d'avance de l'objet manipulé, adapté de [Bruyas 2015].	112
5.15 Mors de blocage conçu, avec (a) vue en perspective globale, et (b) vue en coupe.	114
5.16 Dispositif expérimental utilisé pour caractériser l'effort nécessaire au glissement relatif des tubes.	116
5.17 Caractéristiques entre la force et le déplacement pour des vitesses d'avance de 10 et 100 μm par seconde.	116
5.18 Dispositif expérimental mis en place pour tester les performances du système de blocage.	117
5.19 Vitesse de glissement entre le tube et le mors : (a) dans le cas d'un jeu radial de 100 μm (diamètre de tube de 1.01 mm), et (b) 65 μm (diamètre de tube de 1.08 mm).	118
5.20 Dispositif expérimental utilisé pour la caractérisation du pas d'avance des tubes, avec et sans charge.	119
5.21 Position de l'extrémité supérieure gauche du tube durant son déploiement et déplacement associé dans le cas : (a), (c) d'un tube sans charge, et (b), (d) d'un tube avec une charge de 2.3 N.	120
5.22 Dispositif expérimental utilisé pour la mesure des mouvements transverses du tube durant son déploiement.	121
5.23 Résultats expérimentaux sans charge, avec : (a), (b) visualisation de la position de l'extrémité du tube pour les caméras 1 et 2, et : (c), (d) mouvements transverses observés par les mêmes caméras.	121
5.24 Résultats expérimentaux avec charge, avec : (a), (b) visualisation de la position de l'extrémité du tube pour les caméras 1 et 2, et : (c), (d) mouvements transverses observés par les mêmes caméras.	122
5.25 Illustration du dispositif expérimental mis en place pour la mesure du pas d'avance fin requis pour le balayage de l'EO.	123
5.26 Déplacements des tubes obtenus en fonction du temps, pour : (a) un tube sans charge avec une pression de 0.05 bar, et (b) un tube avec une force résistante de 2.3 N à sa base et une pression de 0.35 bar.	124

Table des figures

5.27 Illustration des 6 étapes élémentaires permettant de réaliser un cycle d'avance de l'objet manipulé, avec mise en évidence du phénomène d'affaissement des mors de saisie PF et PM.	124
--	-----

Liste des tableaux

2.1	Description de la population sélectionnée pour l'étude avec âge, sexe, et résolution des lots d'images. Les seuils utilisés pour la segmentation des images sont également notés.	32
3.1	Caractéristiques des tubes utilisés pour la comparaison des deux modèles géométriques introduits.	53
3.2	Caractéristiques des tubes du robot après synthèse à partir de la forme identifiée.	62
3.3	Valeurs de l'erreur de position mesurée entre la forme reconstruite des robots et la configuration de référence pour différentes valeurs de λ	63
3.4	Valeurs de l'erreur de position mesurée entre la forme reconstruite des robots et la configuration de référence pour différentes valeurs de λ	66
4.1	Valeurs minimales et maximales des sections 1, 2 et 3 des formes de robots retenues avec une courbure de 0.04 mm^{-1} pour la portion courbée.	83
4.2	Valeurs minimales et maximales de l_1 , l_2 and l_3 pour les cavités nasales droite et gauche de chaque sujet, en fonction de la courbure c_2 de la section de navigation. Aucune valeur n'est reportée si aucune solution sans contact n'est identifiée pour la section de navigation, ce qui signifie également que la section d'exploration ne peut pas être identifiée.	84
4.3	Caractéristiques des tubes employés pour le robot, et courbures correspondantes.	85
4.4	Longueurs déployées des tubes pour les différentes étapes du déploiement ALFI.	86
4.5	Caractéristiques des tubes employés pour le robot, et courbures correspondantes.	89
5.1	Valeurs maximales de l_3 pour les cavités nasales droite et gauche de chaque sujet, sans erreur de recalage et de reconstruction, puis avec ces erreurs. Aucune valeur n'est reportée si aucune solution sans contact n'est identifiée pour la section de navigation, ce qui signifie également que la section d'exploration ne peut pas être identifiée. Le pourcentage de perte de configuration de robot est donné. Il correspond au pourcentage de poses admissibles conservées pour le RTC après introduction des erreurs, sans qu'il n'y ait contact.	99

Liste des tableaux

5.2 Synthèse des unités d'actionnement existantes, sur la base de [Boushaki 2016a] et complétées.	103
5.3 Niveaux de pression nominaux utilisés dans le cadre de l'utilisation pour l'insertion d'aiguilles (issu d'un document interne).	111
5.4 État des actionneurs en fonction du temps (issu d'un document interne).	112
5.5 Caractéristiques des tubes employés pour les validations expérimentales du concept proposé.	115

Introduction

L'odorat est l'un des cinq sens dont est doté l'être humain avec l'ouïe, la vue, le goût et le toucher. Celui-ci présente un intérêt tout particulier pour les neurosciences, car les récepteurs olfactifs sont constitués de neurones en communication directe avec le cerveau à travers le bulbe olfactif. Ces neurones, capables de se régénérer [Costanzo 2007], sont contenus dans une muqueuse qui tapisse la partie supérieure de la cavité nasale, appelée Epithélium Olfactif (EO dans la suite). Il s'agit du seul tissu nerveux du corps humain en contact avec l'extérieur. Les neurones le composant peuvent donc potentiellement être observés de manière non invasive, contrairement à ceux de notre cerveau, ce qui offre la perspective d'inspections *in vivo*.

De telles inspections présentent plusieurs intérêts majeurs, à commencer par l'étude des mécanismes de l'olfaction eux-mêmes, qui restent en partie méconnus. L'intérêt existe également en neurologie, pour l'étude du développement du cerveau [Dryer 1994] et des maladies pouvant le toucher [Lavoie 2017]. De plus, la voie nasale peut être un vecteur privilégié de transmission de molécules médicales pour atteindre le système nerveux central [Wen 2011], l'interface sang-cerveau faisant parfois barrière à ces molécules lors d'une administration en intraveineuse. Ce mode d'admission peut alors être étudié. Ensuite, les fentes olfactives d'un même sujet, contenant les récepteurs olfactifs, semblent avoir des fonctions différentes et variables au cours du temps, une propriété qu'il est intéressant d'investiguer [Bojsen-Moller 1971]. Enfin, de récentes découvertes établissent un lien entre la déficience olfactive et les premiers stades de développement des maladies neurodégénératives [Doty 2012, Gopinath 2012, Kalmey 1998, Godoy 2015], avant l'apparition même des problèmes de mémoire ou encore de motricité [Escada 2009]. Une observation objective de la muqueuse olfactive pourrait donc conduire au dépistage précoce des maladies neurodégénératives. Il s'agit là du but principal du projet NEMRO^{1 2}, qui motive ce travail de thèse et en constitue le cadre principal, avec le développement d'un outil d'inspection robotisé. En plus de permettre la conduite de ce type de dépistage, cet outil permettrait la reconnaissance d'addiction aux drogues, ou encore le diagnostic de plusieurs types de dépression, à la fois comme une conséquence de

1. <http://projects.femto-st.fr/projet-nemro/>

2. <http://www.agence-nationale-recherche.fr/Projet-ANR-14-CE17-0013>

la maladie d'Alzheimer, ou comme un syndrome de changement d'humeur unipolaire ou bipolaire. Il pourrait également permettre de suivre l'évolution de déficits cognitifs légers, et de contrôler l'effet de traitements palliatifs ou curatifs contre les maladies neurodégénératives.

Explorer la muqueuse olfactive nécessite de résoudre plusieurs problématiques. Tout d'abord, le périmètre de travail doit être défini de manière précise afin d'adresser à la fois les attentes du projet NEMRO et les problématiques scientifiques sous-jacentes, à portées plus génériques. Pour ce faire, les contraintes et objectifs du projet sont définis, et des premiers éléments de solution sont sélectionnés dans le **chapitre 1**, avec notamment l'usage de robots à tubes concentriques (RTC) [Dupont 2010, Webster 2012], un type particulier de robots continus. Un scénario d'inspection pour les cellules olfactives est défini. Il permet de mettre en lumière les points durs dans sa réalisation, et finalement les problématiques à aborder.

Le **chapitre 2** traite du besoin de données anatomiques 3D, afin de définir l'environnement d'évolution du robot considéré pour la réalisation de la tâche d'inspection. Le robot doit évoluer dans la fosse nasale, une cavité de largeur millimétrique, dont les parois en partie basse sont composées d'os et de cartilage, et de l'EO en partie haute, extrêmement fragile. Tout contact entre le robot et ses différentes zones est interdit pour éviter toute gêne pour le sujet et surtout toute altération irréversible de l'EO. La nécessité d'un déploiement sans contact avec un environnement d'évolution extrêmement contraint requiert alors une description très précise et complète de la fosse nasale. Des métriques sont alors également extraites afin de guider la phase de synthèse du robot.

La description de l'environnement étant réalisée, le **chapitre 3** aborde le comportement des RTC, et les outils de modélisation associés disponibles, notamment pour estimer leur configuration et leur stabilité. Le déploiement recherché des RTC dans notre contexte est particulier, et nous le qualifions dans ce manuscrit comme étant de type ALFI, *i.e.* A La File Indienne, pour traduire un déploiement "Follow-The-Leader" (FTL) [Bergeles 2015, Gilbert 2015] comme décrit dans la littérature anglosaxonne. Les contraintes pour pouvoir effectuer un tel déploiement sont analysées, et une première approche pour la synthèse de RTC introduite. Les variables de conception disponibles sont finalement discutées en envisageant l'exploitation de tubes anisotropes.

Un second niveau de synthèse est présenté dans le **chapitre 4**, avec une recherche de forme de robot à partir des données anatomiques établies dans le chapitre 2. Cette recherche de forme, compatible avec un déploiement ALFI, prend en compte la variabilité inter-sujets, dans le but de proposer un nombre de dispositifs réduit pour l'inspection des cellules olfactives. Les résultats du chapitre 3 sont alors exploités pour réaliser la synthèse des tubes du robot à partir des formes identifiées. Une évaluation de la stabilité du robot est conduite, en tenant compte des portions de tube appelées longueurs de transmission, indispensables à l'actionnement de tout RTC. Cette évaluation permet de garantir la stabilité du robot durant toute sa phase de déploiement.

Le **chapitre 5** valide tout d'abord l'approche en boucle ouverte retenue pour le dispositif, en montrant une robustesse à des erreurs de pose du robot par rapport au sujet et de reconstruction 3D des fosses nasales. Ensuite, nous présentons une démarche de conception assurant un déploiement FTL de RTC, avec un dispositif médical porté par le sujet, dans le cadre d'un examen de routine. Une réflexion est menée sur les opérations élémentaires à réaliser pour déployer le robot. Elle conduit au choix d'éléments technologiques permettant de réaliser les différentes opérations liées aux tâches de déploiement et de balayage. Un nouveau mode de saisie à point mobile est introduit, permettant une meilleure stabilité du robot par rapport aux approches conventionnelles. La réalisation de ces éléments fait appel à la fabrication additive multi-matériaux, offrant la possibilité d'obtention d'un dispositif léger et compact. Une validation et une évaluation des performances des fonctionnalités clés sont finalement présentées.

Enfin, une **conclusion** revient sur les points essentiels du travail, les différentes contributions, et mène à une ouverture quant aux suites de ce travail, à la fois en lien avec le projet NEMRO et de manière plus générale sur les RTC.

1 Contexte et positionnement

"Si j'avais une heure pour résoudre un problème, je passerais cinquante-cinq minutes à définir le problème et seulement cinq minutes à trouver la solution."

Albert Einstein, physicien théoricien

Sommaire du chapitre

1.1 Le projet NEMRO	6
1.2 Caractéristiques et intérêt des robots à tubes concentriques	10
1.3 Un scénario d'inspection des cellules olfactives	14
1.4 Besoins et contributions de la thèse	23

Le but de ce premier chapitre est de situer le contexte de ce travail de thèse, notamment avec le projet NEMRO, dans lequel il s'inscrit. Ce dernier ambitionne d'étudier le lien entre déficience olfactive et maladies neurodégénératives, dans le but à long terme de réaliser des dépistages précoces de ces dernières. Le contexte socio-économique et médical est donc introduit, et la faiblesse des approches actuelles soulignées, ce qui nous amène à l'introduction de l'approche proposée, avec un dispositif robotisé dédié à l'inspection des cellules olfactives, responsables de la détection des odeurs.

Ensuite, les composants clés de notre approche sont présentés, puis des choix préliminaires à la réalisation du geste sont réalisés de manière argumentée. Ils permettent la description complète d'un scénario d'inspection dédié à l'exploration des cellules olfactives. Les points durs à aborder pour résoudre le problème posé sont alors mis en évidence. Ils font l'objet du travail conduit dans les chapitres suivants.

1.1 Le projet NEMRO

1.1.1 Contexte socio-économique

Les maladies neurodégénératives sont des pathologies chroniques invalidantes, à évolution lente et discrète. Comme leur nom l'indique, ces maladies provoquent généralement une détérioration du fonctionnement des cellules nerveuses, en particulier des neurones, pouvant conduire à la mort cellulaire [JPND 2013]. Ces pathologies, dont les plus connues sont les maladies d'Alzheimer et de Parkinson, touchent une part importante et bien souvent vieillissante de la population, et posent un réel problème sanitaire. Ceci les a hissées au premier rang des priorités des systèmes de santé dans les pays développés et en développement, où l'espérance de vie a augmenté ces vingt dernières années. Le "Global Burden of Disease" (GBD), programme de recherche visant à lier les maladies à leurs causes, a développé une métrique connue sous son acronyme DALY (Disability-Adjusted Life Year), représentant le nombre d'années durant lesquelles une personne est frappée par une maladie, un handicap ou une mort précoce [Murray 1994]. Alors que les troubles neurologiques ne représentaient que 92 millions de DALYs dans le monde en 2005, une hausse de 12% est prévue d'ici à 2030, avec 103 millions [Organization 2006]. La maladie d'Alzheimer et autres démences devraient connaître à elles seules une hausse de 66% entre 2005 et 2030 [Aarli 2006]. Si nous nous intéressons maintenant aux statistiques de la France, 850 000 personnes souffrent de la maladie d'Alzheimer actuellement, avec plus de 225 000 nouveaux cas rapportés chaque année. En l'état actuel des choses, le nombre de malades en 2025 est estimé à 1,2 million [France Alzheimer 2017]. La maladie de Parkinson, quant à elle, est la deuxième maladie neurodégénérative en termes de nombre de personnes touchées : 150 000 actuellement en France, avec 8000 nouveaux cas déclarés chaque année [ICM 2017].

Les coûts annuels associés à la prise en charge d'un patient atteint de maladies neurodégénératives sont élevés : environ 16 500 €/an pour la maladie d'Alzheimer, et 11 000 €/an pour la maladie de Parkinson en Europe en 2010 [ICM 2017]. Dans le cas de la maladie de Parkinson, le placement du patient dans des institutions spécialisées est très onéreux, normalement de plus de 3 000 € par mois. Bien qu'une partie des dépenses liées à la maladie soit prise

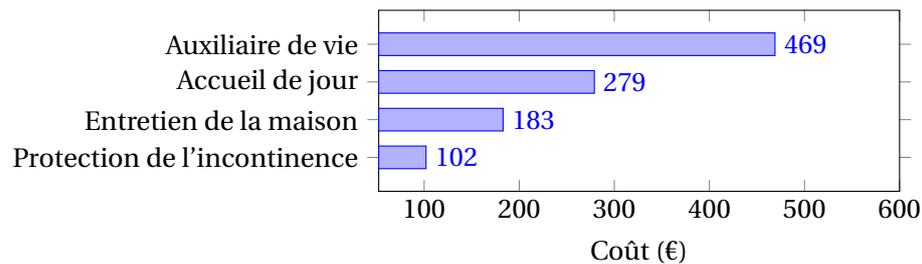


FIGURE 1.1 – Principales dépenses restant à la charge du patient d’Alzheimer, issues de [France Alzheimer 2017].

en charge par les aides de santé, une partie reste à la charge du patient (environ 1050 € par mois, voir Figure 1.1 tirée de [France Alzheimer 2017]). De plus, étant donné les coûts liés au placement dans ces institutions et au nombre de places limité qu’elles offrent, une partie de ces patients est prise en charge par leurs familles, ce qui a des répercussions sur leur mode de vie en général.

Pour finir, notons que le diagnostic des maladies neurodégénératives nécessite des moyens conséquents en termes de ressources matérielles. Ainsi, le diagnostic de la maladie d’Alzheimer nécessite à l’heure actuelle l’utilisation d’un IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) [Johnson 2012, Sørensen 2016]. Ceci est d’une part onéreux pour le patient et/ou l’assurance maladie (environ 300 € par séance), et pour l’hôpital (coût d’achat d’environ 1,6 million d’euros, plus 10% de frais de maintenance annuels). L’accès à l’IRM est par ailleurs difficile, le délai étant d’environ 30 jours actuellement [Imagerie Santé Avenir 2015].

1.1.2 Une approche innovante

Suite à la recrudescence des maladies neurodégénératives, la Haute Autorité de Santé (HAS) a souligné le manque d’efficacité des traitements actuels, qui sont plus palliatifs que curatifs. En effet, les traitements actuellement sur le marché ne permettent pas de guérir la maladie, mais seulement de ralentir son développement. La HAS a également souligné que le dépistage et le diagnostic de ces pathologies ont connu peu de travaux scientifiques et d’innovations technologiques ambitieux et originaux au cours de la dernière décennie. A partir de cet état des lieux dressé par l’HAS, le projet NEMRO, inscrit dans le défi *Santé et Bien-Être* de l’axe *Innovation Biomédicale* de l’ANR, est construit pour développer une approche innovante. Celle-ci se fonde sur de récentes découvertes cliniques établissant un lien entre déficit olfactif et maladies neurodégénératives [Gopinath 2012, Kalmey 1998, Godoy 2015, Doty 2012].

Le déficit olfactif pourrait, en effet, être un signe fiable et précoce du développement des maladies neurodégénératives, avant même l’apparition d’autres symptômes comme la perte de mémoire ou la baisse de la motricité [Escada 2009]. Une méta-analyse de 39 études, incluant des personnes atteintes de la maladie d’Alzheimer, a montré que cette maladie affecte de manière plus importante l’identification et la reconnaissance des odeurs que leur détection [Rahayel 2012]. La perte d’identification et de reconnaissance peut être interprétée comme une baisse des facultés cognitives du patient, alors que la baisse du seuil de sensi-

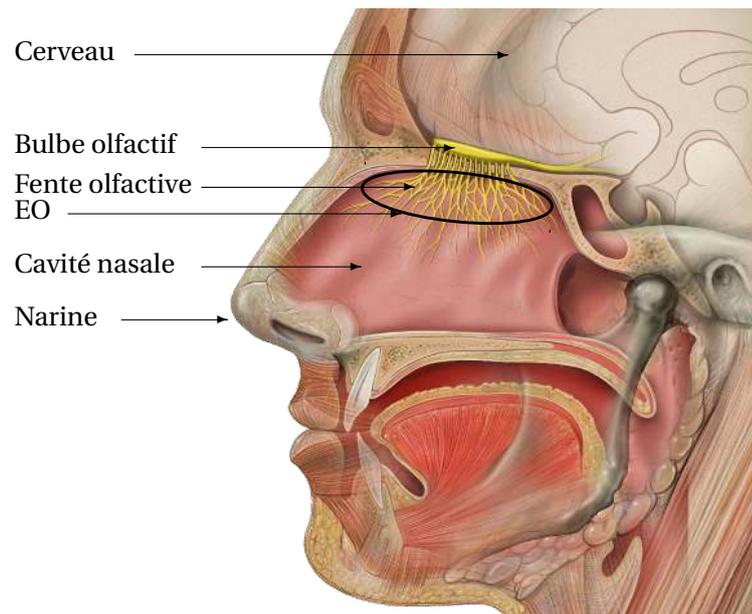


FIGURE 1.2 – Détail de la zone à explorer, située dans la partie haute de la cavité nasale. Cette dernière est tapissée par l'EO, muqueuse contenant des neurones permettant la reconnaissance des odeurs. Figure adaptée de [Lynch 2006].

bilité olfactif pourrait être davantage corrélée à l'état de santé et aux performances de l'EO (Figure 1.2), contenant les récepteurs de l'odorat [Moran 1982, Larsson 2004, Dulay 2008, Hedner 2010]. De plus, la baisse du seuil de détection semble se manifester avant la diminution de la capacité d'identification et de reconnaissance des odeurs [Rahayel 2012], ce qui est cohérent avec l'hypothèse que l'olfaction est le centre de départ des maladies neurodégénératives, qui se propagent ensuite jusqu'au cerveau à travers le bulbe olfactif. En effet, il a été suggéré [Braak 1993, Attems 2005] que le procédé dégénératif de la maladie d'Alzheimer commence tout d'abord au niveau de l'EO, du bulbe olfactif et du cortex entorhinal dont le cortex olfactif (Fig 1.3), avant d'atteindre d'autres structures du lobe temporal, incluant l'hippocampe. Une autre étude dans laquelle des biopsies *ex vivo* d'EO de patients atteints légèrement ou de manière modérée de la maladie d'Alzheimer, et de patients avec de sévères modifications neuropathologiques, a montré que des changements histopathologiques sont présents dès les premiers stades de développement de la maladie [Hock 1998]. Plus récemment, le dépôt d'un agrégat de bêta-amyloïde sur une souris transgénique sur l'EO, ainsi qu'un dysfonctionnement de son système olfactif ont été observés [Wu 2013], annonciateurs du développement de la maladie.

Pour évaluer la corrélation entre déficit olfactif et maladies neurodégénératives, il est donc proposé dans le projet NEMRO d'effectuer une biopsie optique de l'EO, muqueuse située dans la partie haute de cavité nasale, appelée fente olfactive (Figure 1.2).

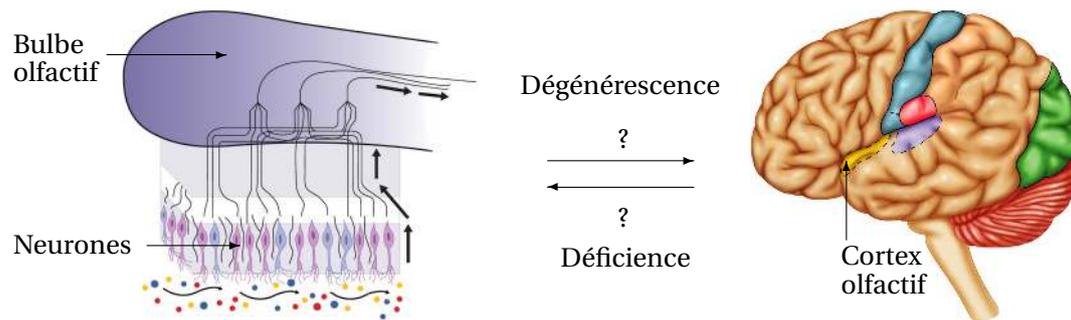


FIGURE 1.3 – Concept du projet, sous la forme d'une sonde OCT fibrée intégrée à l'intérieur d'un RTC pour atteindre et balayer l'EO.

1.1.3 Concept du projet

L'exploration *in vivo* de l'EO d'un sujet, intégrable dans une routine clinique pour le dépistage des maladies neurodégénératives, n'est envisageable que de manière non-invasive et sans contact avec celle-ci. En effet, un geste invasif ne peut être intégré dans un examen de dépistage de routine. En effet, l'EO est une muqueuse extrêmement fine et fragile, située dans la partie supérieure de la cavité nasale, et avec laquelle tout contact est interdit sous peine de l'endommager, et donc d'altérer les fonctions olfactives du sujet [Cavanna 2009]. Une observation à distance, ou encore biopsie optique [Wang 2004], s'avère alors d'intérêt. Des composants d'imagerie à distance, comme les sondes OCT fibrées, permettent aujourd'hui de réaliser des scans en 3D de tissus, avec des résolutions latérales pouvant aller jusqu'à $10\mu\text{m}$ [AGILTRON 2017, Thorlabs 2017], en adéquation avec la taille des cellules olfactives à observer, qui font quelques dizaines de micromètres de diamètre [Flood 1988]. La difficulté réside dans le transport de cette sonde vers la surface à imager. En effet, l'accès à la fente olfactive, tapissée par l'EO, n'est possible aujourd'hui avec aucun instrument conventionnel existant, sa largeur inférieure à 2 mm et la complexité géométrique de la fosse nasale empêchant une progression au-delà du vestibule nasal.

L'utilisation de robots continus, comme les robots à tubes concentriques (RTC) pour embarquer une sonde OCT fibrée et la guider jusqu'à l'EO, devient alors d'intérêt (Fig. 1.4). En effet, ces derniers ont des dimensions caractéristiques compatibles avec les fosses nasales en termes de largeur notamment, avec des tubes ayant un diamètre de l'ordre du millimètre [Dupont 2010, R. J. Webster 2009]. Ils peuvent également adopter des formes complexes, permettant un déploiement dans des structures possédant des géométries variées. De plus, leur structure tubulaire est adaptée au passage d'une sonde fibrée. Enfin, les fosses nasales étant des environnements extrêmement contraints dimensionnellement et géométriquement, un déploiement ALFI ("à la file indienne", couramment appelé "follow-the-leader" dans la littérature), durant lequel le corps du robot suit le chemin emprunté par son extrémité, semble d'intérêt. Cela définit le concept retenu pour le dispositif tel qu'envisagé dans le projet NEMRO.

Un scénario d'utilisation du dispositif doit être précisément associé à cette description de principe. Nous nous y attachons dans la suite. De manière simple, le robot devra tout d'abord

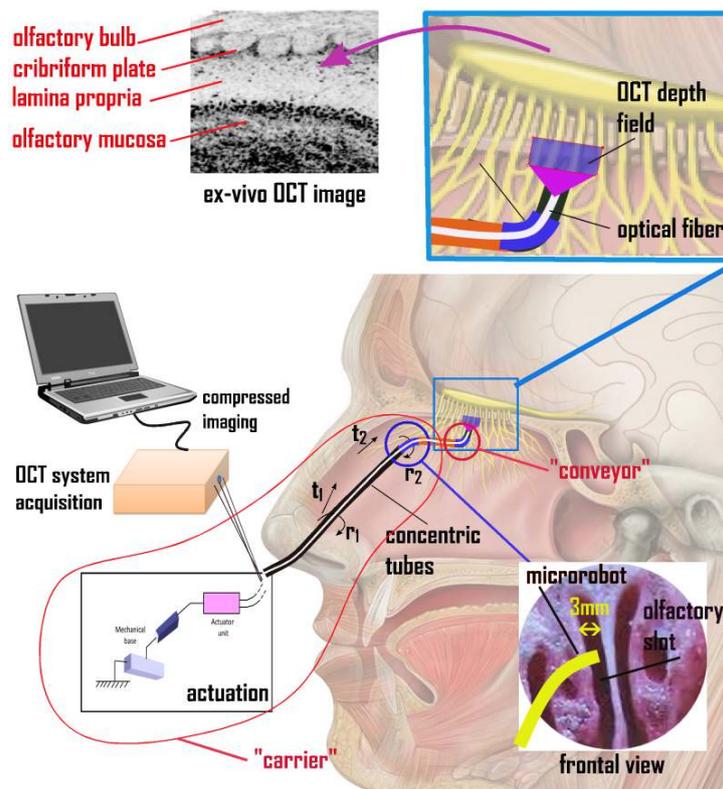


FIGURE 1.4 – Concept du projet, sous la forme d'une sonde OCT fibrée intégrée à l'intérieur d'un RTC pour atteindre et balayer l'EO.

être placé à un point d'insertion identifié au préalable, au niveau de l'orifice de la narine du sujet. A partir de ce point d'entrée, le RTC va se déployer dans le vestibule nasal, jusqu'à l'entrée de la fente olfactive. Il s'agit de la partie du robot identifiée comme le "carrier" sur la Figure 1.4. Ensuite, dans un second temps, le RTC va se déployer dans la fente olfactive, et fera décrire un mouvement de balayage à la sonde située à son extrémité distale, afin d'imager l'EO. Cette partie du RTC est identifiée comme étant le "conveyor" sur la Figure 1.4.

1.2 Caractéristiques et intérêt des robots à tubes concentriques

Le choix de RTC a été brièvement décrit. Dans ce paragraphe, nous revenons sur leurs propriétés et usages pour voir plus précisément leurs avantages ici.

1.2.1 Description

Les RTC sont une classe particulière de robots continus. Ils sont constitués d'un assemblage concentrique de tubes superélastiques et précourbés sur certaines parties, qui interagissent les uns avec les autres en flexion et en torsion (Fig. 1.5). Ceux-ci sont souvent réalisés en Nitinol, un alliage superélastique composé de nickel et de titane, même si des alternatives avec des tubes en polymère (PEBA, ABS) existent [Morimoto 2016a]. Les tubes composant le

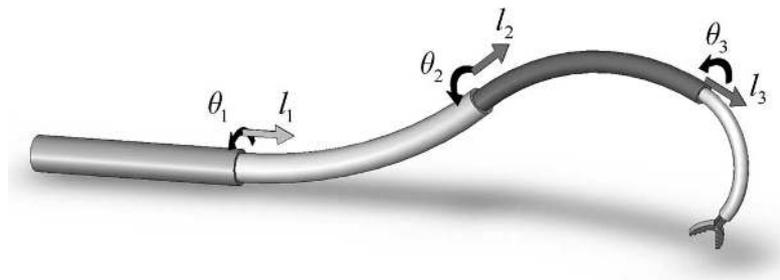


FIGURE 1.5 – Représentation schématique d'un RTC composé de 3 tubes sortant d'un fourreau situé à sa base, avec illustration de l'actionnement en translation et rotation pour chacun de ses 3 tubes [Dupont 2010].

robot sont actionnés de manière individuelle en translation et en rotation à leur base, ce qui permet de modifier la forme du robot.

Contrairement à d'autres robots continus avec actionnement pneumatique [Chen 2013], allié à mémoire de forme [Szewczyk 2011] ou de polymères électroactifs [Chikhaoui 2016b], la partie déployée des RTC ne comporte aucun élément actif ou actionneur embarqué, ce qui leur permet d'offrir d'une grande compacité.

1.2.2 Application des robots à tubes concentriques dans la littérature

L'intérêt des RTC dans notre contexte apparaît en observant leurs usages tels qu'envisagés dans la littérature. Ces robots sont utilisés dans de multiples applications médicales, à savoir :

- l'évacuation d'hémorragies intracérébrales [Burgner 2013a],
- le traitement de l'hydrocéphalie [Butler 2012],
- la chirurgie ophtalmologique [Yu 2013, Lin 2015],
- la chirurgie transnasale [Burgner 2011, Schneider 2013, Yu 2016],
- la chirurgie cardiaque percutanée à coeur battant [Gosline 2012a, Gosline 2012b],
- l'accès et l'intervention dans le poumon [Swaney 2015],
- l'intervention fœtoscopique [Dwyer 2017],
- la chirurgie de la prostate [Dupont 2010, Rucker 2009a, Hendrick 2014].

Nous choisissons ici quelques applications clés pour les détailler, ceci afin de mettre en relief les avantages des RTC dans les contextes cités.

Évacuation d'hémorragies intracérébrales Un dispositif a été proposé [Burgner 2013a] afin de diminuer la pression de la boîte crânienne de manière minimalement invasive, en permettant l'accès au caillot formé après l'hémorragie sans endommager les tissus du cerveau. La compacité des RTC et leur capacité à adopter des formes complexes sont donc mises à contribution. Le RTC utilisé est composé de 2 tubes, et sa structure tubulaire, d'un intérêt non négligeable ici, permet de réaliser un système d'aspiration. Un processus d'optimisation pour calculer la courbure des tubes conduit à un robot permettant d'évacuer entre 83% et 92% du

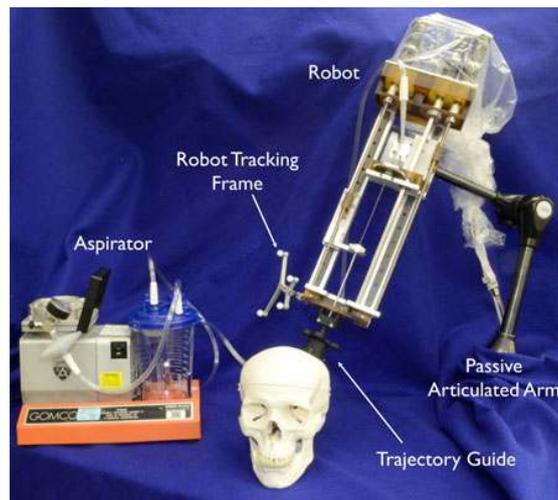


FIGURE 1.6 – Illustration du dispositif utilisé pour l'évacuation d'hémorragies intracérébrales, extrait de [Burgner 2013a].

volume de l'hémorragie. Avant l'intervention, un recalage est réalisé entre le visage du sujet et sa géométrie issue de la reconstruction 3D préliminaire à partir d'images CT, afin de donner au dispositif la pose relative voulue par rapport au sujet. La navigation se déroule ensuite en boucle ouverte par rapport à l'anatomie. Une telle stratégie semble d'intérêt dans notre cas.

Chirurgie ophtalmologique L'application décrite dans [Lin 2015] consiste à atteindre le fond de l'oeil afin de réaliser une chirurgie vitrorétinale. L'avantage offert par l'utilisation des RTC est de pouvoir contourner la cornée, la pupille et le cristallin afin d'éviter tout dommage avec ces différentes zones, en passant par un point d'entrée situé sur la périphérie de l'oeil, comme illustré sur la Figure 1.7. La dextérité du RTC, composé de 2 tubes, lui permet de bénéficier de l'espace de travail nécessaire à la réalisation de sa tâche, tout en respectant les contraintes imposées. Son diamètre réduit est également un avantage pour la réalisation de cette tâche.

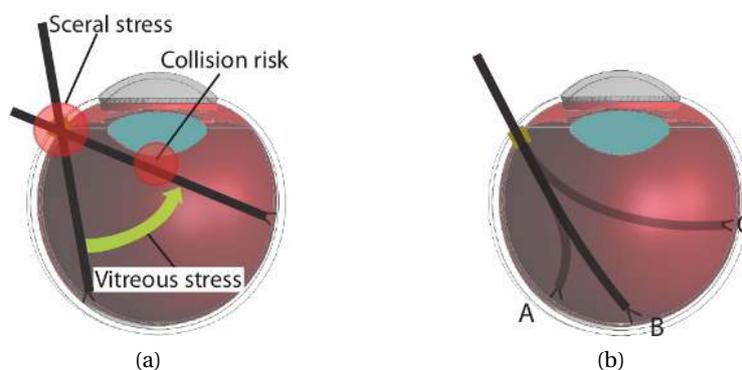


FIGURE 1.7 – Comparaison d'approches utilisant un outil conventionnel droit (a) et le RTC présenté (b) pour rejoindre les points A, B et C situés au fond de l'oeil [Lin 2015].

Chapitre 1. Contexte et positionnement

Chirurgie transnasale Les RTC ont également des applications connues pour la chirurgie transnasale de la base du crâne [Burgner 2011, Schneider 2013]. L'une d'elles consiste à traverser le sinus sphénoïdal au fond de la cavité nasale, afin d'atteindre l'hypophyse. Un processus d'optimisation à partir de modèles 3D permet d'obtenir un RTC composé de 3 tubes. Le tube extérieur droit amène les deux tubes intérieurs directement sur le site de la chirurgie.

Chirurgie cardiaque percutanée à cœur battant L'équipe de recherche de P. Dupont a travaillé sur la chirurgie cardiaque à cœur battant [Gosline 2012a, Gosline 2012b], en s'intéressant à la fermeture de communications anormales entre les atriums du cœur. Le RTC offre alors accès à l'atrium droit en passant par la veine jugulaire, dans la partie basse du cou, et porte un dispositif pour la suture à son extrémité distale. Le RTC est composé de 3 tubes, avec les deux tubes extérieurs permettant la navigation du robot jusqu'au site d'intérêt, et le tube intérieur permettant la réalisation du geste. Une nouvelle fois, la compacité des RTC et leur capacité à suivre des chemins complexes sont mises en avant dans cette application, comme démontré par l'utilisation d'un robot continu naviguant dans les vaisseaux sanguins. Nous notons aussi le découpage du robot, en des tubes dédiés à la navigation sur site, et d'autres destinés à la réalisation du geste. Nous avons retenu cette décomposition au paragraphe 1.3.1.2.

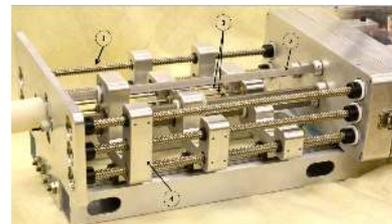
Chirurgie de la prostate Enfin, une dernière application des RTC est la chirurgie de la prostate [Dupont 2010, Rucker 2009a, Hendrick 2014]. Le geste considère la chirurgie transurétrale, très complexe à réaliser, et que peu de chirurgiens savent pratiquer. Un robot est alors proposé afin d'assister ce geste. Il est tubulaire en intégrant 3 canaux, deux d'entre eux étant utilisés



(a)



(b)



(c)

FIGURE 1.8 – Illustration du dispositif utilisé pour la chirurgie de la prostate, issu de [Hendrick 2014]. (a) illustration du dispositif dans son ensemble, (b) de l'extrémité distale de l'endoscope avec les différents canaux, et (c) de l'unité d'actionnement.

pour des RTC, et le troisième pour un retour visuel (voir Figure 1.8). L'un des RTC est muni d'une fibre laser afin de découper les tissus, alors que le second RTC permet de les manipuler, par un système de préhenseur intégré au bout de ce dernier.

Dans les applications précédemment citées, les robots utilisés, au stade de prototypes expérimentaux, mettent à contribution les principaux avantages des RTC. Tout d'abord, comme noté précédemment, ces robots sont très compacts car l'actionnement est déporté à la base des tubes, à l'extérieur du patient. Ensuite, la structure tubulaire des RTC est parfaitement adaptée à l'aspiration ou à l'administration de fluides à l'intérieur du corps humain, ou bien au passage d'outils, et pourrait donc être utilisée pour le passage d'une sonde fibrée. Nous notons aussi que la plupart de ces applications nécessite un guidage précis vers le site d'intervention, qui peut être réalisée par une correction de pose suite à une étape de recalage. Pour ce faire, un scan préliminaire permet de mettre en évidence des chemins admissibles pour le passage des robots, en reconstruisant les zones anatomiques en 3D [Butler 2012]. Pour terminer, les RTC sont compatibles avec des méthodes de déploiement de type ALFI [Gilbert 2015, Bergeles 2015], même si non utilisées dans les applications précédentes, mais qui pourront être avantageusement exploitées dans notre cas.

1.3 Un scénario d'inspection des cellules olfactives

Les RTC semblent donc un choix pertinent pour notre contexte. Il s'agit maintenant d'identifier la manière de les exploiter, via l'établissement d'un scénario d'usage qui va permettre d'évaluer les difficultés liées à sa réalisation.

1.3.1 Réflexion préliminaire

Afin de développer le scénario à partir du concept du projet NEMRO, nous réalisons tout d'abord certains choix préliminaires.

1.3.1.1 Interaction sujet/dispositif

Compensation de mouvements Le dispositif doit être inséré avec précision à l'intérieur de la fosse nasale du sujet. Le système va se trouver extrêmement proche de l'EO à l'intérieur des fentes olfactives, très fragiles. De plus, tout contact avec les autres parois de la cavité nasale peut s'avérer gênant et douloureux. Cela peut donc entraîner des mouvements réflexes de la part du sujet. Des mouvements de plus faibles dynamiques et amplitudes peuvent, par ailleurs, apparaître durant l'inspection, dû à un état de relaxation de la part du sujet. Une compensation des mouvements du sujet durant l'inspection doit donc être assurée. Deux solutions peuvent alors être envisagées pour compenser ces mouvements :

- la première consiste en l'utilisation d'un robot porteur à 6 degrés de liberté piloté de manière active, et placé en face de la narine du sujet. Le suivi de la tête du sujet permet alors de compenser de manière active tout mouvement de sa part. Cependant, en cas de mouvements réflexes de la part de la tête du sujet, la dynamique du robot doit être très importante. Ceci peut alors poser des problèmes de sécurité pour le sujet, ainsi que

des problèmes d'intégrité des zones anatomiques fragiles se trouvant à l'intérieur des fosses nasales.

- la deuxième est celle d'un dispositif directement solidaire du visage du sujet, qui permettrait de réaliser une compensation passive de ses mouvements. Une analogie avec certains dispositifs utilisés en radiologie interventionnelle peut être faite, où l'on exploite parfois des dispositifs solidarisés au sujet [Maurin 2006, Walsh 2008]. C'est ce principe de dispositif directement porté par celui-ci qui est retenu, pour la sécurité intrinsèque qu'il peut apporter.

1.3.1.2 Déroulement de l'examen

Nécessité d'un scan préliminaire Les fosses nasales sont connues pour être des volumes étroits, notamment au niveau de la fente olfactive, de largeur inférieure à 2 mm. Ces volumes ont, par ailleurs, une géométrie variable selon les sujets. Un scan préliminaire de chaque patient semble alors primordial, afin d'identifier la géométrie des fosses nasales de ce dernier avec précision, et d'effectuer une planification de chemin à suivre.

Pilotage du système robotique Étant donné les contraintes liées au contact du robot avec des zones anatomiques fragiles ou douloureuses pour le sujet, la question d'une commande avec des capteurs extéroceptifs se pose logiquement pour le contrôle du robot. En effet, une commande avec capteurs proprioceptifs uniquement demande, de manière préliminaire, un recalage pour ajuster de manière fine la pose du RTC par rapport au sujet avant déploiement, qui restera la même durant le geste. Au contraire, une commande avec des capteurs extéroceptifs permettrait de compenser des défauts de pose durant le déploiement du robot. L'intégration de tels capteurs pourrait être une option, mais elle semble difficile à mettre en place étant donné l'espace disponible dans le RTC, pour respecter une taille de dispositif compatible avec l'application visée. Une approche avec commande par capteurs proprioceptifs est donc préférée. Son adéquation en termes de précision de positionnement sera évaluée et discutée dans la suite du manuscrit.

Pour ajuster la pose du robot par rapport au sujet, nous proposons de travailler avec un dispositif constitué de 2 éléments montés en série pour porter le RTC à proprement parler. L'élément monté sur le sujet sera équipé de marqueurs pour un premier recalage grossier par rapport au visage du sujet. L'élément portant le RTC est également muni de marqueurs, et est solidarisé à l'élément monté sur le sujet par le biais d'une cale réglable, permettant cette fois-ci de recalibrer cet élément par rapport au visage du sujet de manière fine. Cette décomposition sera détaillée dans la suite.

Décomposition fonctionnelle du robot Étant donné la tâche à réaliser, il est possible d'établir un découpage fonctionnel du robot en deux sections distinctes. La première, que nous nommerons *section de navigation* (Figure 1.9), a pour but d'atteindre l'entrée de la fente olfactive en passant par l'orifice de la narine et en traversant le vestibule nasal. La seconde, que nous appellerons *section d'exploration*, portera la sonde OCT fibrée et réalisera un mouvement de balayage afin que cette dernière puisse balayer l'EO. Ce découpage fonctionnel

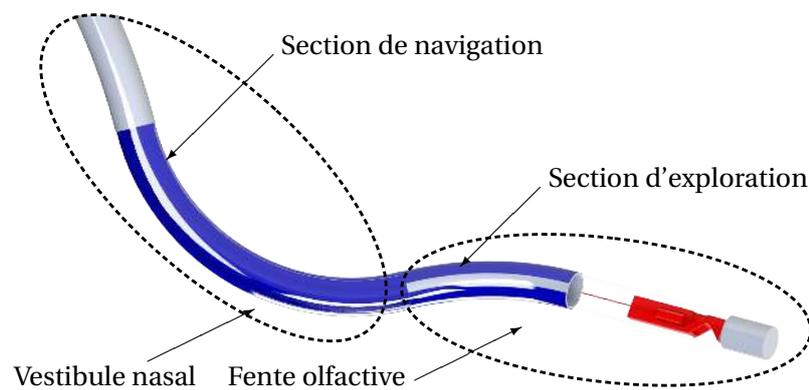


FIGURE 1.9 – Décomposition fonctionnelle du robot, avec une section de navigation destinée au déploiement dans le vestibule nasal, et une section d'exploration destinée au déploiement dans la fente olfactive.

rejoint à la fois le vocabulaire et le découpage réalisé dans [Bergeles 2015] avec une section de navigation et une section de manipulation, ou encore dans [Jones 2006] avec une section de manipulation. Les performances requises pour ces deux éléments sont différentes, avec des contraintes de précision plus importantes pour la réalisation du balayage avec la section d'exploration que pour la section de navigation.

Stratégie de balayage Comme introduit précédemment, une sonde OCT fibrée doit traverser le RTC. Elle va imager les tissus latéralement au niveau de son extrémité distale, plus précisément en bout de section d'exploration. Un mouvement de balayage devra alors être produit pour que la sonde puisse parcourir les tissus à inspecter. Deux stratégies sont possibles afin de réaliser ce mouvement de balayage : une première où le tube portant la sonde réalise un mouvement de translation et de rotation, de manière similaire à des approches comme [Ughi 2016], et une seconde où celui-ci réalise un mouvement de translation et de flexion dans un plan parallèle à celui du toit de la fente olfactive (Figure 1.10).

Utiliser un tube en Nitinol actionné à son extrémité proximale pour réaliser le balayage par translation et rotation n'induit pas d'encombrement supplémentaire. Au contraire, une solution par actionnement embarqué en bout de section d'exploration, avec le recouvrement par un matériau actif comme les EAP [Chikhaoui 2016c], permettant de réaliser la deuxième cinématique, augmenterait l'encombrement. Un balayage par rotation permet, par ailleurs, une imagerie complète du toit de la fente olfactive, la position du tube restant invariante durant le mouvement de balayage (Figure 1.10(c)). Il en est différemment pour un balayage mettant à contribution la courbure du tube. En effet, la sonde réalisant l'acquisition des images 3D se trouvant au centre du tube, une zone morte le long des parois latérales de la fente olfactive apparaît, comme illustré sur la Figure 1.10(d). Elle est due à l'incapacité physique de la sonde de balayer cette zone, à cause du diamètre du tube qui l'entoure. De plus, la courbure limitée de la section d'exploration fait apparaître une seconde zone morte en sortie de la section de navigation, celle-ci ne permettant pas l'imagerie du voisinage immédiat. La première stratégie

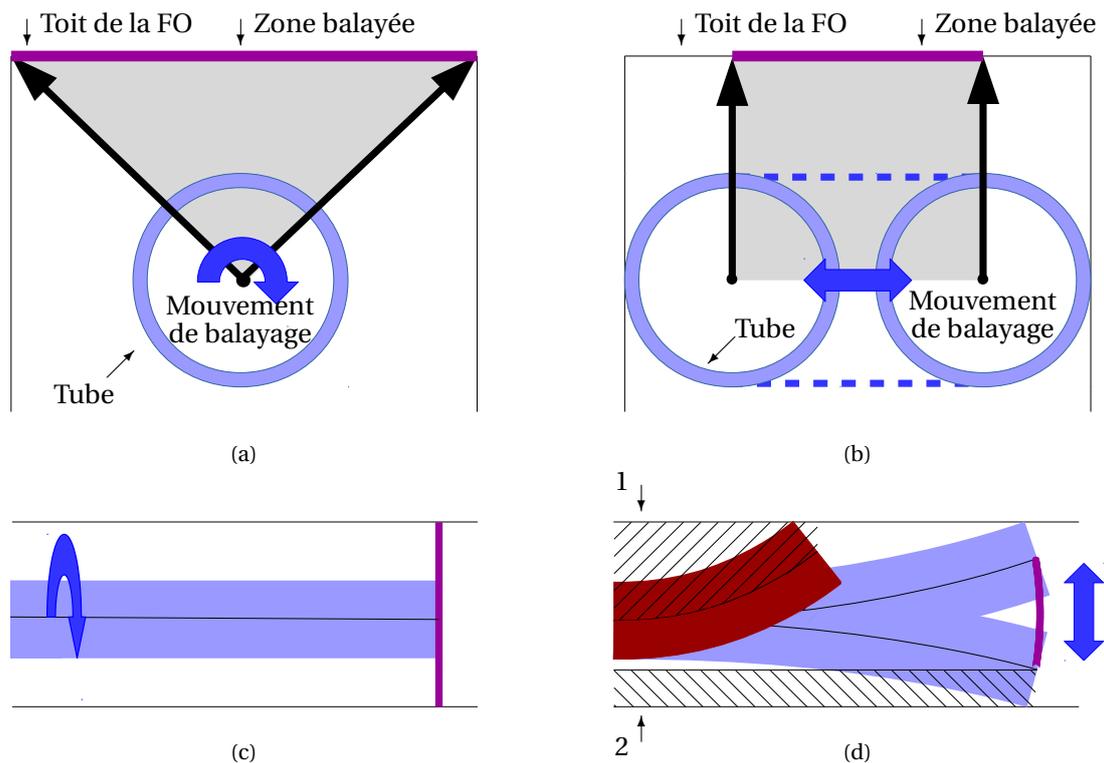


FIGURE 1.10 – Illustration des deux stratégies de balayage du toit de la fente olfactive, avec (a), (c) balayage par translation et rotation, et (b), (d) balayage par translation et courbure du tube de la section d’exploration. Sur la Figure (d), la zone hachurée 1 correspond à la zone morte due à la courbure maximale du tube, et la zone hachurée 2 au rayon du tube. Dans les deux cas, les flèches noires indiquent les points extrêmes pointés par la sonde.

permet alors, non seulement, d’imager une plus grande partie de la muqueuse, mais offre également une sécurité accrue. En effet, le tube de la section d’exploration peut rester plus éloigné des parois de la fente olfactive. Ainsi, la première stratégie est donc sélectionnée pour notre dispositif.

Décomposition du dispositif Afin d’assurer les fonctions d’installation sur le sujet, de recalage et de déploiement du robot, le dispositif est décomposé en sous-ensembles présentés sur la Figure 1.11, avec le jeu de tubes, l’unité d’actionnement dédiée à la manipulation des tubes, une cale intermédiaire, et un masque. Tout d’abord, la fonction de fixation sur le visage du sujet est assurée par le masque, qui est solidarisé avec la tête du sujet par un système de brides, et qui va porter le reste du dispositif. Le masque sera porté par le sujet durant le scan préliminaire. Ainsi, nous aurons la possibilité de déterminer précisément, pendant la planification de chemin à suivre, la pose relative attendue du RTC par rapport au masque. Une cale de montage, désignée dans la suite comme la cale intermédiaire, située entre le masque et le système d’actionnement du jeu de tubes, sera alors produite en conséquence, à façon, pour installer de manière optimale le RTC. Le remontage du masque peut conduire à une erreur de

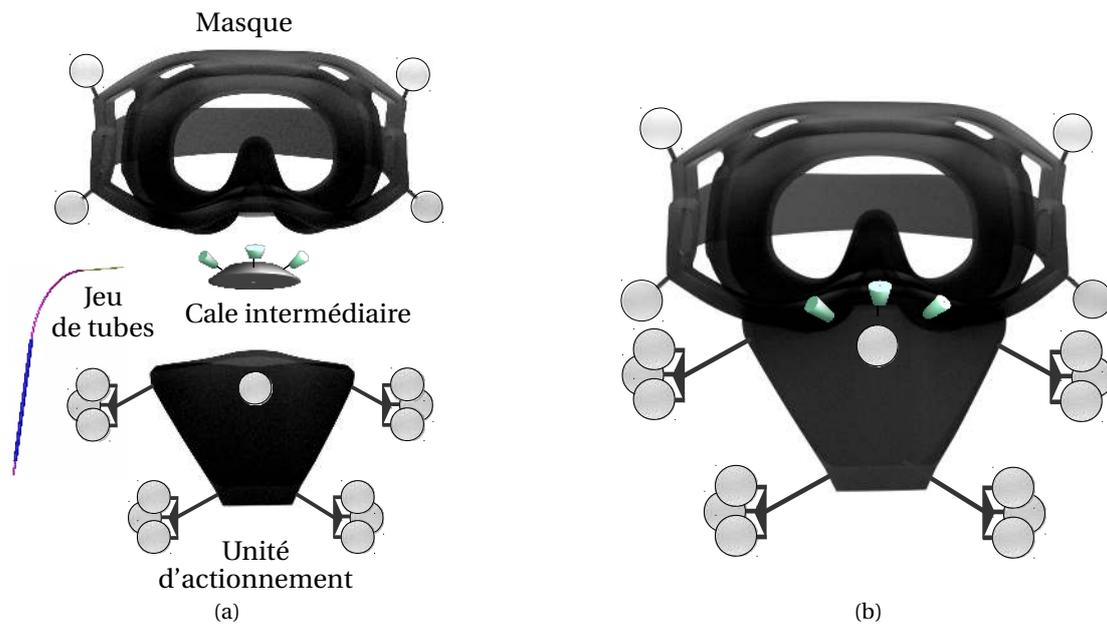


FIGURE 1.11 – (a) Décomposition du dispositif en un masque, une cale réglable intermédiaire, une unité d'actionnement, et le jeu de tubes, et (b) représentation de ces différentes pièces assemblées pour former le dispositif complet.

pose de ce dernier par rapport au sujet. Pour y remédier, nous équipons d'une part le masque de marqueurs pour vérification, et d'autre part, la cale est munie d'un système d'ajustement pour que la base du RTC adopte effectivement la pose identifiée par rapport au sujet. Durant cette dernière étape, des marqueurs sur l'unité d'actionnement permettent un recalage entre celle-ci et le visage du sujet. L'intérêt de cette décomposition est de limiter l'amplitude du réglage de la base du RTC que constitue l'unité d'actionnement. On peut ainsi espérer limiter le volume, la masse du système de réglage, et le temps d'ajustement.

Nettoyage du dispositif S'agissant d'un dispositif médical, des mesures d'hygiène sont à respecter avant utilisation. Pour une inspection de la fente olfactive, une procédure de décontamination est suffisante. Les tubes du robot seront donc à décontaminer, ainsi que les éléments de l'unité d'actionnement entrant en contact avec eux.

1.3.2 Scénario

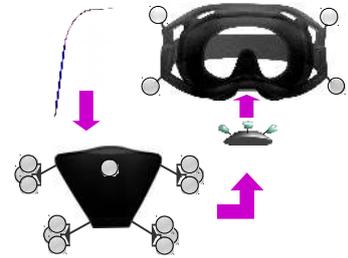
Nous proposons finalement le scénario suivant pour réaliser l'inspection de l'EO proposée à des fins de recherche médicale. Chaque étape est décrite et, par ailleurs, schématisée sur la Figure 1.12, avec toutes les étapes du scénario dans leur ensemble. Celles-ci sont décrites en détail par la suite.



(a) Imagerie pré-inspection



(b) Planification de chemin



(c) Préparation du dispositif



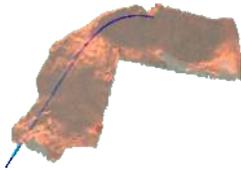
(d) Installation du sujet, de l'ensemble masque et cale intermédiaire, et recalage



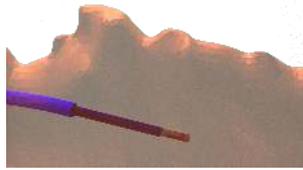
(e) Installation de l'ensemble unité d'actionnement et RTC



(f) Correction de la pose de l'ensemble unité d'actionnement et RTC



(g) Déploiement de la section de navigation



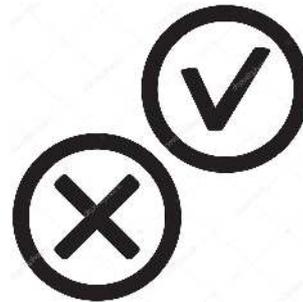
(h) Balayage par avance et rotation de la section d'exploration



(i) Retrait du robot et du dispositif complet



(j) Traitement des informations



(k) Détection ou non d'une maladie neurodégénérative

FIGURE 1.12 – Vue d'ensemble des différentes étapes du scénario.

1.3.2.1 Imagerie pré-inspection

Une imagerie de pré-inspection est réalisée, durant laquelle le sujet porte le masque introduit précédemment et illustré sur la Figure 1.11, dans une position qui lui semble naturelle et confortable. Dans le cadre d'une utilisation en recherche médicale, un imageur CT est sélectionné, car ce dernier assure une grande résolution. Le but de cette imagerie est triple :

- connaître précisément la géométrie des fosses nasales,
- connaître la pose relative entre le sujet et le masque, qui sera utilisée plus tard pour l'impression sur mesure de la cale intermédiaire,
- réaliser l'identification des tissus mous de la narine pour lesquels les contacts sont permis.

1.3.2.2 Planification de chemin à suivre

L'étape de planification du chemin à suivre consiste à identifier un chemin permettant un déploiement du robot. Le chemin doit permettre d'atteindre la fente olfactive du sujet en évitant tout contact avec l'EO, les parties osseuses ou cartilagineuses. Les configurations de robot sans collision avec les tissus mous de la narine, avec lesquels ils sont possibles, sont à privilégier, de manière à rendre l'inspection la moins désagréable possible pour le sujet. Si aucune configuration satisfaisante sans collision n'est trouvée, alors les contacts sont tolérés. Une fois qu'un chemin satisfaisant est trouvé, la pose du robot par rapport au visage du sujet est calculée, ce qui permet l'impression de la cale intermédiaire faisant la liaison entre le masque et l'unité d'actionnement du RTC.

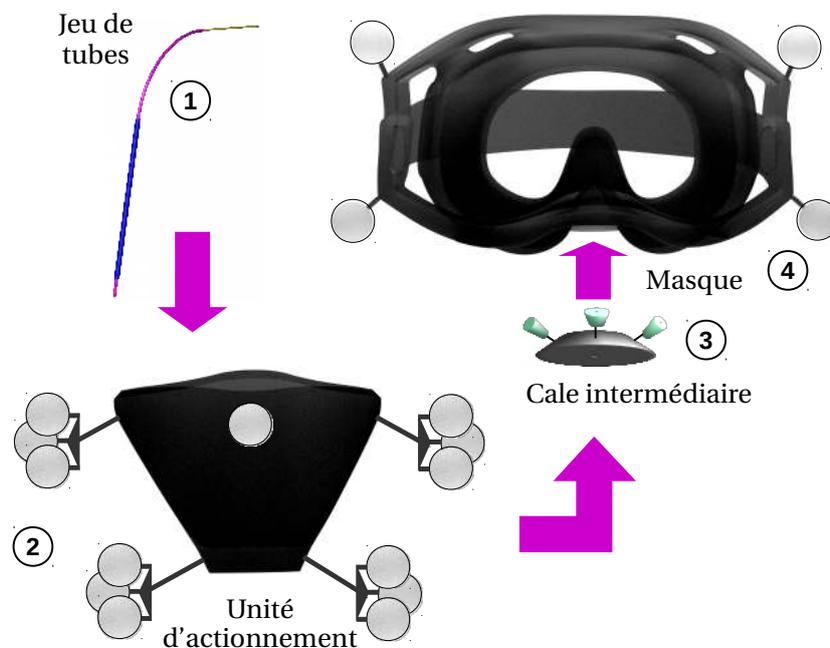


FIGURE 1.13 – Les phases de préparation du dispositif.

1.3.2.3 Préparation du dispositif

Durant cette étape, représentée sur la Figure 1.13, l'assemblage de tubes (1) est monté sur l'unité d'actionnement (2) après décontamination de ces deux éléments. Parallèlement, la cale intermédiaire (3) est produite et assemblée sur le masque (4).

1.3.2.4 Installation du sujet, recalage et installation de l'ensemble masque et cale intermédiaire

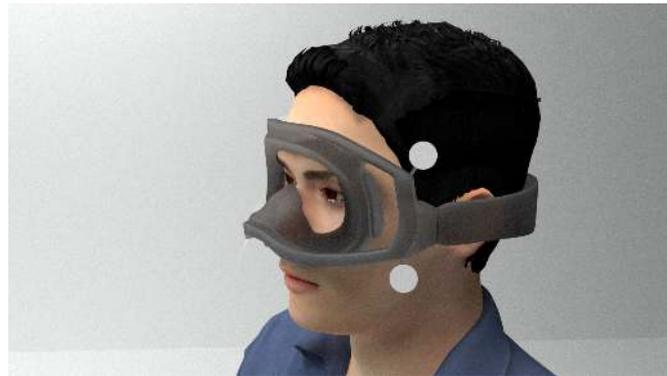


FIGURE 1.14 – Installation du sujet, recalage et installation de l'ensemble masque et cale intermédiaire.

Le sujet s'installe en position assise. Ensuite, l'ensemble masque et cale intermédiaire est solidarisé sur le visage du sujet, en cherchant à reprendre la position adoptée durant le scan préliminaire, comme représenté sur la Figure 1.14. Pour ce faire, un recalage pourra être effectué entre des points remarquables du visage du sujet, et les marqueurs présents sur le masque, ceci dans le but de guider et d'assister le praticien dans l'ajustement de la position du masque sur le visage du sujet.

1.3.2.5 Installation du RTC



FIGURE 1.15 – Installation de l'ensemble unité d'actionnement et RTC.

Chapitre 1. Contexte et positionnement

Une fois le masque et la cale intermédiaire fixés sur le visage du sujet, le RTC est solidarisé à l'ensemble. Cette étape est représentée sur la Figure 1.15.

1.3.2.6 Correction de la pose du RTC



FIGURE 1.16 – Correction de la pose du RTC.

Cette étape est réalisée en s'appuyant sur la mesure à l'aide d'un localisateur de la pose relative entre l'unité d'actionnement et la tête du sujet (Figure 1.16). Le praticien ajuste alors la pose de l'unité d'actionnement via la cale intermédiaire réglable, en disposant d'un retour visuel sur écran pour l'aider dans cette tâche.

1.3.2.7 Déploiement de la section de navigation

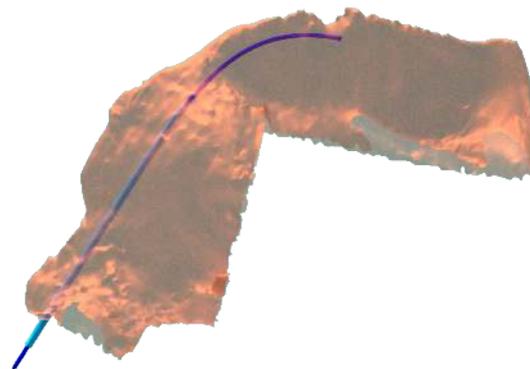


FIGURE 1.17 – Déploiement de la section de navigation.

Durant cette étape, schématisée sur la Figure 1.17, la première partie du robot nommée section de navigation, et destinée à rejoindre l'entrée de la fente olfactive, est déployée ALFI à l'intérieur de la fosse nasale du sujet.

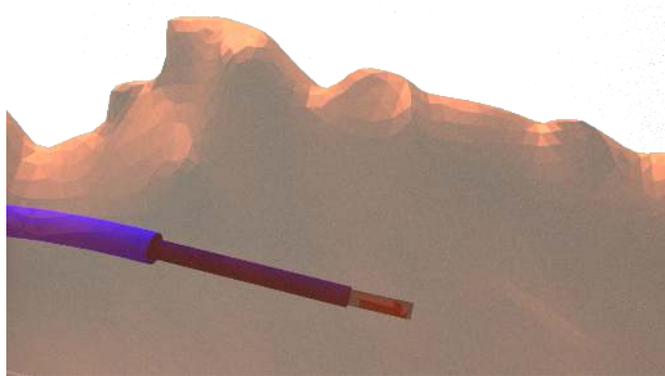


FIGURE 1.18 – Balayage par avance et rotation de la section d’exploration.

1.3.2.8 Balayage par déploiement de la section d’exploration

Cette étape illustrée sur la Figure 1.18 consiste en la réalisation de la seconde étape du déploiement, avec un mouvement de balayage par translation et rotation de la section d’exploration.

1.3.2.9 Retrait du robot

Une fois la phase d’inspection terminée, le robot est retiré de la fosse nasale du sujet. Le RTC est ensuite désolidarisée du masque, par l’intermédiaire de la cale. Le masque est ensuite ôté de la tête du sujet.

1.3.2.10 Traitement des informations

Pour terminer, les informations issues de la sonde OCT sont mises en forme afin d’être facilement exploitables par le praticien. Elles peuvent être présentées de manière brute, par visualisation de coupes 2D. Des algorithmes peuvent également faciliter la lecture des données en mesurant, par exemple, la densité de neurones, l’épaisseur ou la structure de l’EO.

1.3.2.11 Détection ou non d’une maladie neurodégénérative

A partir de l’analyse automatique pouvant être faite des données et de l’expertise du praticien, un bilan est dressé sur la détection ou non d’une maladie neurodégénérative chez le sujet ayant suivi l’examen.

1.4 Besoins et contributions de la thèse

Le scénario d’inspection robotisée des cellules olfactives a été décrit. Il soulève des problématiques que nous décrivons ci-après. Il faut noter que ces points durs sont à la fois présents dans le contexte de ce projet et de manière plus générique pour l’usage des RTC. Les résoudre peut donc permettre de rendre possible le geste visé dans le cadre du projet NEMRO, mais également potentiellement d’autres gestes où les RTC sont d’intérêt.

Tout d’abord, les contraintes liées au contact avec des zones sensibles comme l’EO pose la

nécessité d'**une connaissance de données anatomiques précises de la fosse nasale**. Celle-ci peut varier de manière significative d'un sujet à l'autre. L'étude de la géométrie de la fosse nasale de plusieurs sujets permet, dans un premier temps, de mesurer la variabilité inter-sujets de la fosse nasale, dans le but de proposer un dispositif apte à inspecter l'ensemble de la population visée. Dans un second temps, et une fois le dispositif identifié, les données anatomiques des sujets, pour lesquels une inspection de l'EO est envisagée, sont recueillies de la même manière, dans le but de sélectionner le meilleur chemin pour le déploiement du RTC. Le besoin de données anatomiques a donc une utilité double. L'analyse anatomique, présentée dans la suite de ce travail de thèse, se décompose en deux parties, avec tout d'abord l'obtention de modèles 3D de fosses nasales à partir d'images médicales, permettant de représenter de manière globale la géométrie des fosses nasales. Ensuite, la mise en place de métriques permet de caractériser plus précisément certaines parties de la fosse nasale, jugées d'intérêt, afin de guider la phase de synthèse du RTC.

Ensuite, les outils de modélisation des RTC et d'évaluation de leur stabilité sont détaillés. Les différentes variables de conception disponibles pour la synthèse de RTC sont recensées. Les outils introduits sont utilisés pour évaluer le cas considéré du déploiement ALFI. L'impact d'une variable spécifique, l'anisotropie des tubes, est évalué en particulier pour assurer la stabilité du robot. Parallèlement à **la modélisation des RTC, au choix des variables de conception utilisées, une méthode de synthèse simple est présentée, permettant de calculer la géométrie des tubes pour obtenir une forme de robot donnée**, dans le cadre d'un déploiement ALFI.

Une méthode de synthèse de RTC à partir de données anatomiques, indispensable dans ce contexte, est ensuite présentée. Celle-ci est établie sur un nombre important de sujets, dans le but d'intégrer leur inter-variabilité. Ce point démarque notre démarche de l'état de l'art, où la synthèse est réalisée de manière spécifique pour chaque sujet. De plus, elle est réalisée en respectant une contrainte de déploiement de type ALFI, nécessaire étant donnée l'application visée. Bien que les contraintes associées à la géométrie, à l'arrangement des tubes du RTC ainsi qu'à leur séquence d'actionnement soient connues pour un déploiement ALFI, aucune méthode de synthèse n'est actuellement proposée. Enfin, la méthode introduite intègre une analyse de stabilité afin de proposer un dispositif sûr, un point crucial ici et qui n'a pas encore été intégré aux méthodes de synthèse existantes. La méthode développée a alors été appliquée, et a conduit à des validations expérimentales avec la caractérisation du mouvement de déploiement et de balayage.

Pour terminer, une fois la géométrie du robot identifiée, nous validons l'approche en boucle ouverte retenue en introduisant des erreurs de pose et de reconstruction 3D des fosses nasales. Puis, nous proposons **un nouveau principe d'actionnement pour les RTC, ainsi que des éléments spécifiques pour leur pilotage**. Nos propositions permettent de répondre aux spécificités de notre projet en termes d'actionnement. En effet, le dispositif doit être léger, car porté directement par le sujet. Ensuite, celui-ci doit également être compact, afin de ne pas impressionner le sujet et de le mettre en confiance. Les éléments technologiques introduits sont testés séparément afin d'évaluer leurs performances et leur adéquation avec notre cahier des charges, et d'assurer la faisabilité de l'approche proposée.

2 Analyse de l'anatomie de la cavité nasale

"Là où les fondements sont peu solides,
l'édifice ne reste pas longtemps sur
pied."

Proverbe islandais

Sommaire du chapitre

2.1 Anatomie de la cavité nasale	26
2.2 Reconstruction 3D	27
2.3 Caractérisations dimensionnelles et observations	32
2.4 Synthèse du chapitre 2	38

Le but de ce second chapitre est de répondre au besoin de données caractérisant la géométrie de la cavité, formulé dans le chapitre précédent. La zone d'intérêt, qui est la fosse nasale, est tout d'abord introduite, afin de présenter son fonctionnement, ses différentes zones anatomiques, ainsi que le vocabulaire associé. Un état de l'art est ensuite dressé sur les informations dimensionnelles et géométriques la caractérisant. Les lacunes constatées nous conduisent alors au développement d'une méthodologie pour la reconstruction 3D de la cavité nasale. Une différenciation de ses tissus est également réalisée, afin de repérer les tissus mous de la narine, avec lesquels des contacts avec un outils sont autorisés. Enfin, des métriques sont choisies et extraites des ces modèles 3D. Elles permettent par la suite de guider la synthèse du robot. Le but de ce second chapitre est de répondre au besoin de données caractérisant la géométrie de la cavité formulé dans le chapitre précédent. La zone d'intérêt qu'est la fosse nasale est tout d'abord introduite, afin de présenter son fonctionnement, ses différentes zones anatomiques, ainsi que le vocabulaire associé. Un état de l'art est ensuite dressé sur les informations dimensionnelles et géométriques la caractérisant. Les lacunes constatées nous conduisent alors au développement d'une méthodologie pour la reconstruction 3D de la cavité nasale. Une différenciation de ses tissus est également réalisée, afin de repérer les tissus mous de la narine, avec lesquels des contacts avec un outil sont autorisés. Enfin, des métriques sont choisies et extraites de ces modèles 3D. Elles permettent par la suite de guider la synthèse du robot.

2.1 Anatomie de la cavité nasale

Dans le chapitre précédent, un besoin en données anatomiques précises et complètes a été exprimé, afin de garantir un déploiement sans contact du RTC dans les fosses nasales. Pour bien cibler ce besoin, commençons par détailler l'anatomie de la cavité nasale et le fonctionnement de l'olfaction. Cela permet d'introduire également le vocabulaire associé, utile dans la suite.

Le fonctionnement du système olfactif est illustré sur la Figure 2.1. Tout d'abord, notons que l'on possède deux fosses nasales, une fosse nasale droite et une fosse nasale gauche, chacune étant en communication avec une narine dans la partie antérieure, et se rejoignant dans la partie postérieure au niveau du nasopharynx (voir Figure 2.2(a)). Ces deux fosses nasales sont séparées par une cloison médiane appelée septum nasal, composée d'os et de cartilage (voir Figure 2.2(b)). Le flux d'air inspiré traverse chacune des deux narines en passant par leur vestibules nasals respectifs. Une partie de ce flux est amenée vers les parties supérieures de la cavité nasale, appelées fentes olfactives, grâce à trois niveaux de cornets (voir Figure 2.2(a)). Les fentes olfactives sont couvertes par l'EO, contenant des neurones permettant de capter les molécules odorantes. Des nerfs traversant la plaque criblée (os supérieur perforé par de multiples petits trous), relaient l'information entre ces neurones et le bulbe olfactif de chaque fosse nasale, qui ensuite la transmettent au cerveau.

Plusieurs remarques peuvent être faites concernant la structure anatomique de la cavité nasale. Les tissus sont détaillés sur la Figure 2.2(a) qui représente une seule fosse nasale, avec l'orifice de la narine, les cornets inférieur, moyen et supérieur. Le vestibule nasal, ainsi que

la fente olfactive contenant l'EO à imager, sont également repérés sur cette figure. La fente nasale est la zone la plus mince de la cavité nasale, avec une largeur inférieure à 2 mm. Sa longueur est d'environ 30 mm, de sa jointure avec le vestibule nasal jusqu'au sinus sphénoïdal. Concernant les parties osseuses et cartilagineuses, elles sont illustrées sur la Figure 2.2(b), avec le plancher des fosses nasales, qui sépare la cavité buccale de la cavité nasale. Le septum nasal est également représenté. Il est composé du cartilage septal dans sa partie antérieure et de la lame perpendiculaire de l'ethmoïde dans sa partie supérieure. En partie supérieure, on retrouve la lame criblée, qui sépare la fente olfactive de la cavité cérébrale.

2.2 Reconstruction 3D

2.2.1 Nécessité d'une approche 3D

Quelques approches et données sont disponibles concernant la géométrie des fosses nasales [Savvateeva 2010, Elwany 2010]. Cependant, les informations extraites sont seulement partielles et non globales, les mesures étant effectuées en des points précis. Cela n'est pas satisfaisant pour notre besoin, la géométrie et les dimensions de la cavité nasale pouvant potentiellement varier de manière brutale entre les points de mesure. De plus, il s'agit d'informations 2D, les mesures étant réalisées dans le plan des images radiographiques, alors que les informations recherchées sont 3D. En effet, la valeur de largeur de la cavité nasale en un point donné ne se situe pas nécessairement dans le plan des images acquises. L'inadéquation des données proposées dans la littérature avec notre besoin justifie alors l'élaboration d'une méthodologie nous permettant d'obtenir les données recherchées, ceci en passant par une

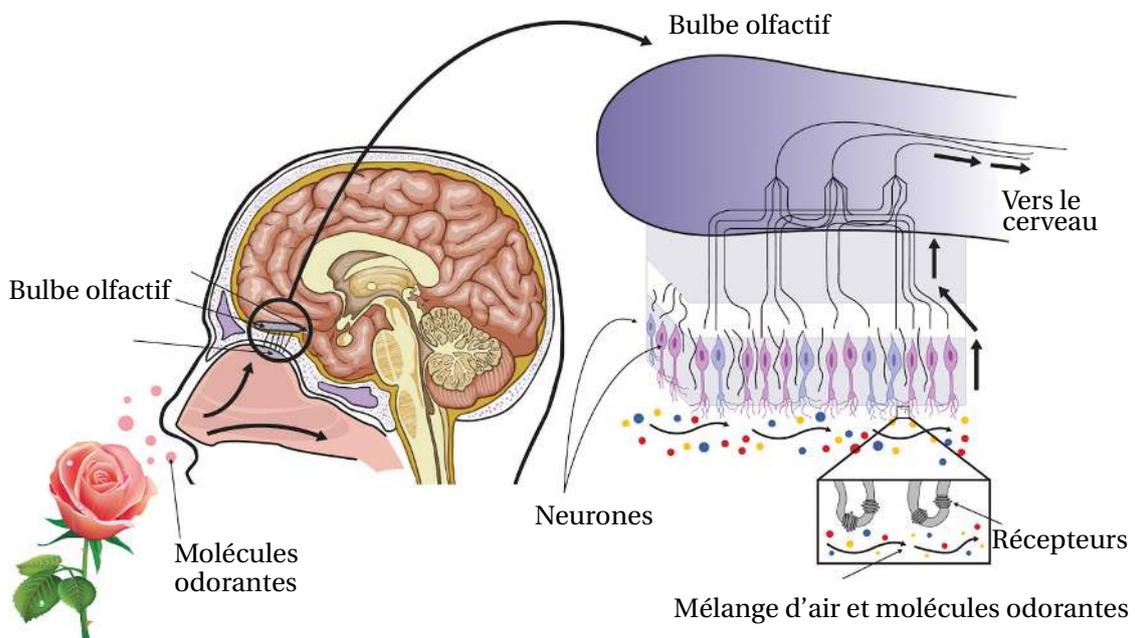


FIGURE 2.1 – Mécanisme de l'olfaction, de l'inspiration d'air contenant des molécules odorantes jusqu'à la transmission du message nerveux au cerveau.

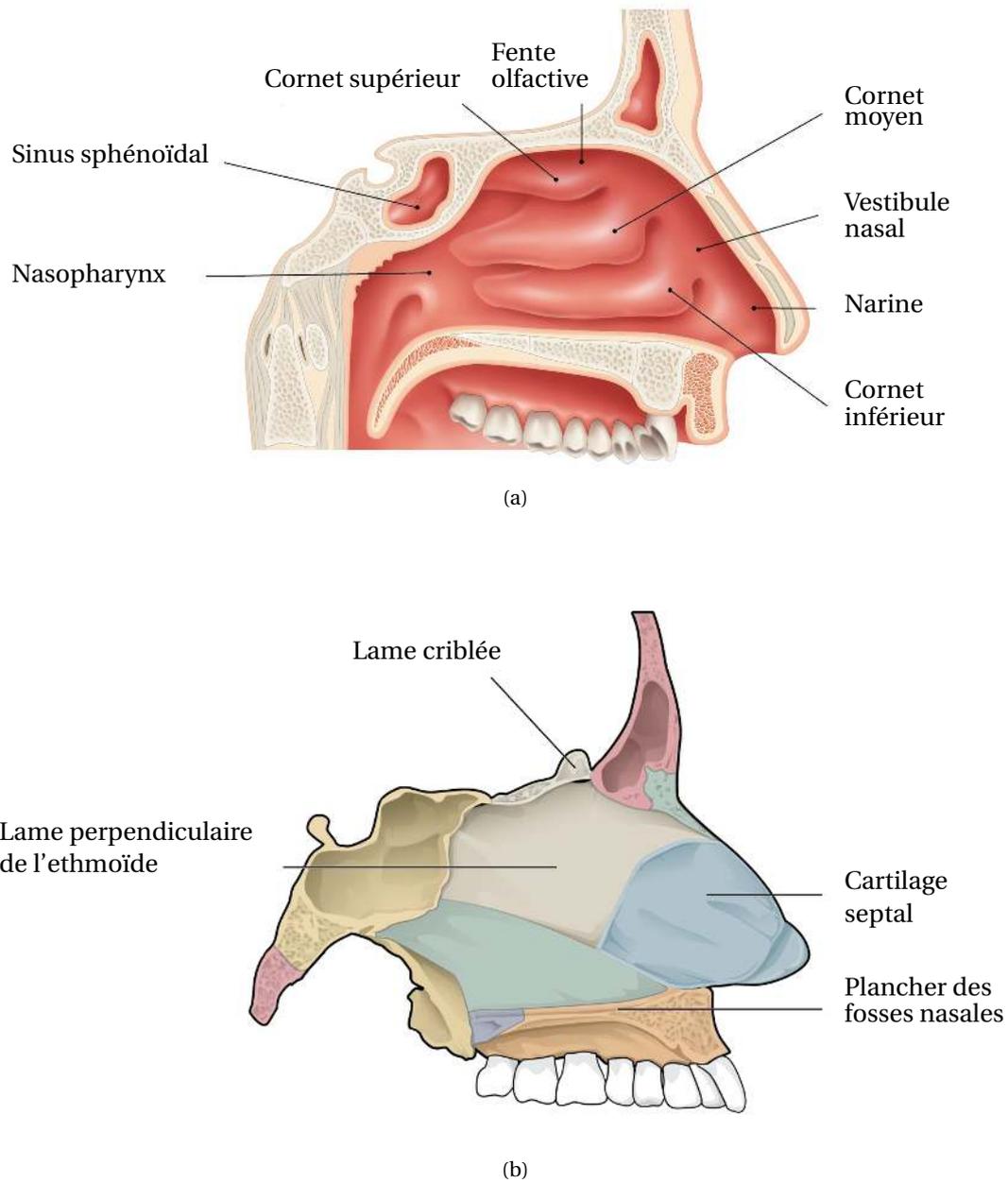


FIGURE 2.2 – L'anatomie des fosses nasales, avec (a) le détail de leurs tissus, adapté de [Human Anatomy Diagram 2017], et (b) le détail de leurs parties osseuses et cartilagineuses, adapté de [Human Anatomy System 2017].

modélisation 3D de la fosse nasale.

2.2.2 Expression du besoin

2.2.2.1 Population ciblée

La population visée par notre étude correspond à la population pour laquelle le dispositif médical est destiné. Il s'agit donc principalement d'adultes et de personnes âgées. Un âge minimum a été fixé à 18 ans, âge en dessous duquel la cavité nasale peut encore connaître des modifications structurelles liées à la croissance de l'individu. Il n'y a pas de borne supérieure envisagée pour l'âge de la population. La population doit être représentée de femmes et d'hommes à parts égales, les pathologies touchant les deux genres. Pour les besoins de notre étude, nous écartons tout sujet ayant eu des antécédents pouvant interférer avec l'objet de notre étude en modifiant la forme de la cavité nasale, comme des sinusites, cancers, ou antécédents de chirurgie.

2.2.2.2 Informations recherchées

Le besoin peut être exprimé de manière simple : les parois de la cavité nasale, de l'orifice de la narine jusqu'à l'extrémité postérieure de la fente olfactive, à proximité des sinus sphénoïdaux, doivent être reconstruites avec précision. Le but est de permettre la définition de l'environnement dans lequel le robot va se déployer, pour éviter toute collision avec celui-ci. Une information globale est donc recherchée ici. En plus de la simple information dimensionnelle et géométrique, une différenciation des tissus semble nécessaire. Celle-ci doit permettre de mettre en évidence les tissus mous de la narine, avec lesquels des contacts sont possibles avec le robot, même si non souhaités. Au contraire, des contacts avec les parties osseuses et cartilagineuses du septum nasal pourraient occasionner une gêne chez le sujet. Une interaction physique avec l'EO pourrait par ailleurs être critique pour le sujet, entraînant des altérations potentiellement irréversibles.

2.2.3 Méthodologie proposée

Comme nous recherchons la forme de la cavité nasale, une méthodologie a été mise en place pour permettre l'obtention de maillages dont les surfaces représentent la frontière entre les tissus de la cavité nasale et l'air qu'elle contient. Cette méthodologie est composée de 3 étapes : la segmentation d'images radiographiques, la reconstruction 3D, puis l'extraction du volume d'intérêt, comme illustré sur la Figure 2.3.

Les images sont, dans un premier temps, segmentées. Il n'y a aucune corrélation anatomoradiologique permettant de savoir quel seuil dans l'image correspond à l'interface entre les tissus et l'air. Une segmentation manuelle est donc réalisée, basée sur les niveaux de gris des images. Le seuil de segmentation est alors défini visuellement, comme celui matérialisant le mieux cette interface. Chaque seuil, associé à un sujet, est fixé au cas par cas, les niveaux de gris sur les images pouvant varier d'un sujet à l'autre, et aucun seuil standard ne pouvant alors être adopté.

Une fois les images d'un sujet segmentées, les volumes représentés sur celles-ci sont reconstruits en 3D sous forme de maillage, puis les fosses nasales sont extraites de ces vo-

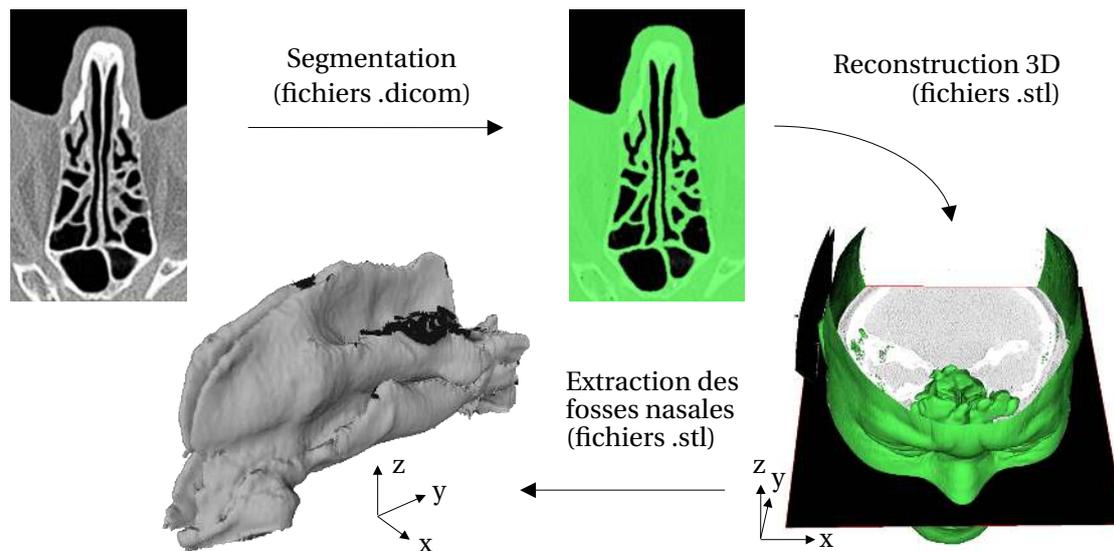


FIGURE 2.3 – Méthodologie de reconstruction 3D en 3 étapes, avec la segmentation des images, reconstruction 3D des volumes présents, puis extraction des fosses nasales.

lumes. Les algorithmes utilisés pour la reconstruction 3D sont l'algorithme des Marching Cubes [Lorenson 1987], suivi d'un algorithme de lissage contextuel de maillage [Moench 2011]. Le logiciel libre InVesalius [Amorim 2015], implémentant ces algorithmes, est sélectionné pour réaliser les étapes de segmentation et de reconstruction 3D.

Enfin, le logiciel libre Meshlab [Cignoni 2008] permet d'extraire les fosses nasales des volumes reconstruits.

Le seuil de segmentation étant fixé visuellement par un opérateur, il est dépendant de sa capacité à déterminer avec exactitude cette interface. Afin d'évaluer la variabilité induite par l'opérateur, 10 personnes se sont livrées à l'expérience de détermination du seuil de segmentation pour un même sujet. Deux maillages ont ensuite été reconstruits : le premier est reconstruit avec un seuil de segmentation qui est égal à la moyenne des seuils recueillis. Le second, quant à lui, est reconstruit avec un seuil égal à la moyenne des seuils recueillis, auquel est ajouté l'écart type de la distribution de seuils. L'erreur quadratique moyenne correspondant à la distance séparant les deux maillages est alors égale à 0.04 mm. Cette erreur est considérée comme suffisamment faible pour valider l'approche de segmentation manuelle du maillage.

Parallèlement, une différenciation des tissus est effectuée, réalisée également avec InVesalius. Ce dernier offre la possibilité d'effectuer la segmentation automatique des parties osseuses et cartilagineuses présentes sur les images médicales. Ceci permet de mettre en évidence la paroi externe de la narine, dénuée de tissus rigides, dont la déformation est accompagnée d'une sensation de gêne mineure chez le sujet. Cette différenciation est représentée sur la Figure 2.4.

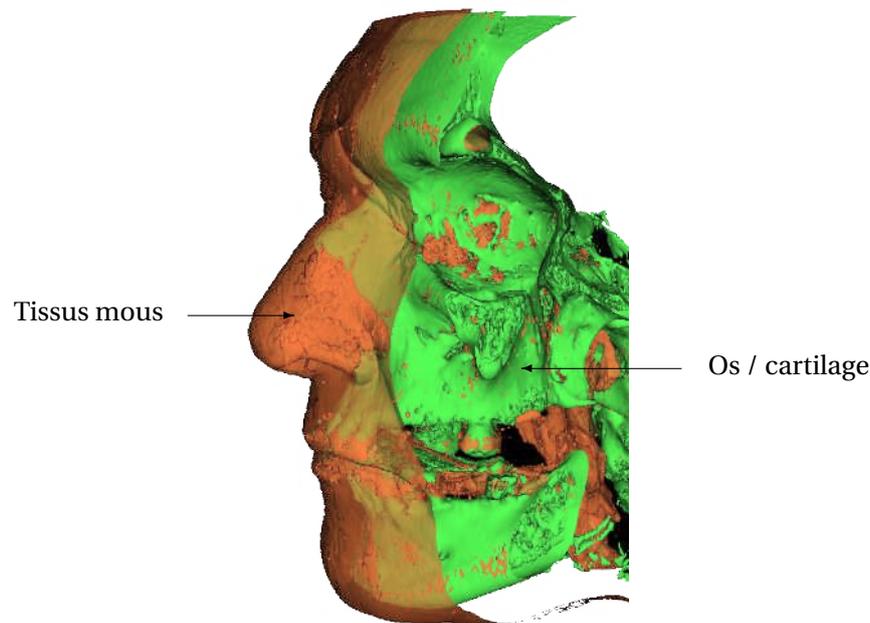


FIGURE 2.4 – Représentation des tissus mous (en orange) et des parties cartilagineuses et osseuses (en vert) avec le logiciel InVesalius.

2.2.4 Application et résultats

La méthodologie a été appliquée à un ensemble de 20 sujets, dont les images médicales ont été fournies par le CHRU (Centre Hospitalier Régional Universitaire) de Besançon. L'exploitation des images médicales de ces 20 sujets a été soumise à l'envoi d'une demande de non-opposition aux sujets concernés, et a fait l'objet de démarches auprès de la CNIL (Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés). Les images médicales, prises dans un plan transverse, ont alors été anonymisées avant d'être exploitées pour les besoins de ce travail. Celles-là sont issues d'un seul scanner CT de marque SIEMENS, modèle SOMATOM Definition AS+. Les 20 sujets sont répertoriés dans le Tableau 2.1 avec leur sexe, leur âge, et la résolution des images. Les seuils de segmentation pour les jeux d'images des 20 sujets, déterminés visuellement sur le logiciel InVesalius, sont également répertoriés dans le Tableau 2.1. L'application de la méthodologie conduit à un ensemble de 40 modèles numériques 3D de fosses nasales.

Concernant la différenciation des tissus, une première zone constituée de tissus mous est mise en évidence, suivie d'une partie cartilagineuse et osseuse pour tout le reste de la fosse nasale, comprenant à la fois les os du septum nasal, et les cornets nasaux présents sur la paroi opposée des fosses nasales. La Figure 2.4 illustre cette différenciation, avec les parties osseuses et cartilagineuses représentées en vert, et les tissus mous représentés en orange. L'EO se trouvant également en partie haute, au niveau des zones osseuses, seule la partie basse au niveau du vestibule nasal, constituée de tissus mous, peut être sujette à des contacts avec un dispositif d'inspection.

Sujet	Sexe	Âge (années)	Résolution 2D (mm)	Espacement des images (mm)	Seuil de segmentation
1	femme	23	0.3027	1	-60
2		78	0.3945	1	-60
3		84	0.2520	0.60	-40
4		59	0.2676	0.60	-70
5		84	0.2891	0.60	-40
6		58	0.3730	1	-90
7		73	0.2813	1	-90
8		81	0.2676	0.60	-50
9		66	0.3027	1	-70
10		48	0.3496	0.60	-50
11	homme	52	0.3105	1	-80
12		68	0.3105	0.75	-90
13		50	0.2852	0.60	-30
14		27	0.3223	0.60	-40
15		70	0.3164	1	-90
16		80	0.3320	0.60	-50
17		85	0.3789	1	-80
18		79	0.3730	1	-60
19		64	0.2637	1	-90
20		81	0.2988	1	-90

Tableau 2.1 – Description de la population sélectionnée pour l'étude avec âge, sexe, et résolution des lots d'images. Les seuils utilisés pour la segmentation des images sont également notés.

2.3 Caractérisations dimensionnelles et observations

Plusieurs observations et caractérisations dimensionnelles peuvent être faites sur les modèles 3D reconstruits. Elles permettent de bien comprendre l'anatomie de la région étudiée et, de manière complémentaire aux modèles 3D, de disposer de métriques permettant par la suite de réaliser des choix préliminaires et de guider la phase de synthèse du RTC.

2.3.1 Déviation du septum nasal

Tout d'abord, il est visible que le septum nasal, cloison séparant les fosses nasales droite et gauche d'un même sujet, n'est pas toujours plan. Ce phénomène, connu pour être présent pour environ 80% de la population [webMD 2016], se retrouve dans ces proportions pour les 20 sujets de notre étude. Cette déviation du septum peut être observée à deux niveaux : au niveau du vestibule nasal dans sa zone cartilagineuse, et dans sa partie supérieure osseuse appelée lame perpendiculaire de l'ethmoïde, au niveau de la fente olfactive.

2.3.1.1 Au niveau du vestibule nasal

La figure 2.5 illustre le phénomène de déviation au niveau de la zone cartilagineuse, présente au niveau du vestibule nasal. Le vestibule nasal n'est donc pas parfaitement plan, mais peut présenter une courbure. Cependant, étant donné sa largeur, il permet tout de même aujourd'hui un accès par des outils droits, dont les diamètres sont plus faibles que sa largeur.

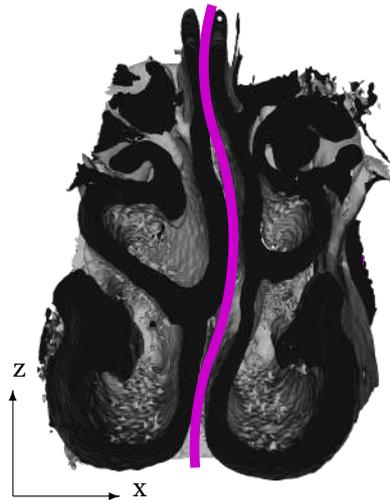


FIGURE 2.5 – Déviation du septum nasal observée pour l'un des sujets.

2.3.1.2 Au niveau de la fente olfactive

La déviation du septum nasal se poursuit dans sa partie supérieure appelée lame perpendiculaire de l'ethmoïde, au niveau de la fente olfactive (Fig. 2.6). La fente olfactive présentant une largeur inférieure à 2 mm, une déviation importante de celle-ci peut potentiellement empêcher l'accès d'un outil droit sur la totalité de sa longueur.

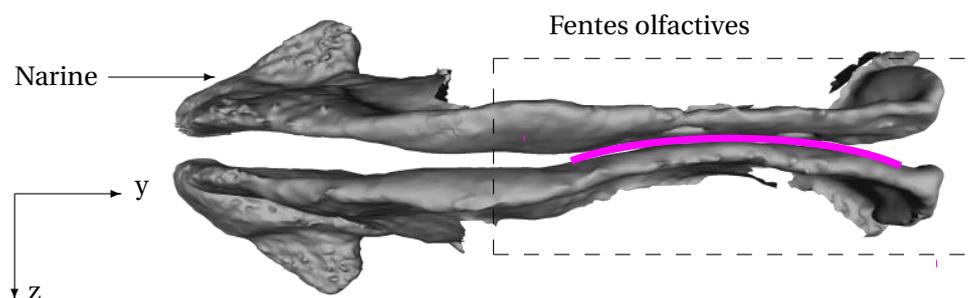


FIGURE 2.6 – Déviation de la fente olfactive observée pour l'un des sujets.

2.3.2 Courbure du vestibule nasal

Le vestibule nasal, partie antérieure de la fosse nasale, présente une courbure caractéristique visible sur la Figure 2.7. Il est intéressant d'identifier cette courbure, car elle marque la

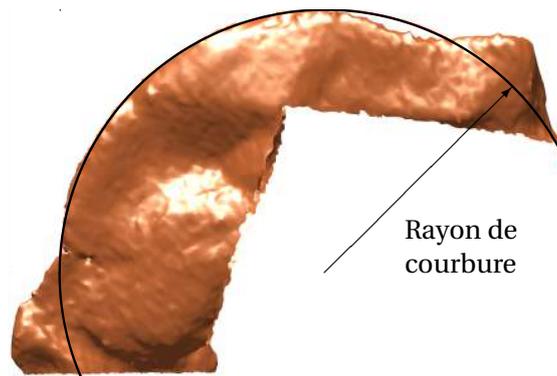


FIGURE 2.7 – Courbure du vestibule nasal observée pour l'un des sujets.

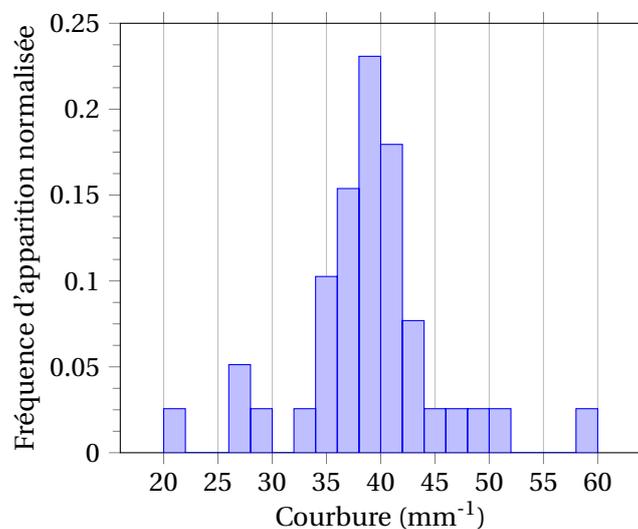


FIGURE 2.8 – Histogramme normalisé représentant la courbure de la partie antérieure de la fosse nasale, au niveau du vestibule nasal, pour les 20 sujets de l'étude.

frontière antérieure de la fosse nasale, et donc la zone dans laquelle le RTC pourra évoluer. Celle-ci est extraite en projetant les points le long de l'arête antérieure du vestibule nasal sur le plan médian des fosses nasales, contenant le vestibule nasal. La figure 2.8 est un histogramme qui reporte les mesures effectuées pour les 40 fosses nasales de nos 20 sujets d'étude. Les valeurs minimale, maximale et quadratique moyenne constatées sont respectivement de 21.3, 58.6 et 39.4 mm^{-1} . Ces valeurs peuvent contraindre la forme du robot, qui peut potentiellement se déployer à proximité de cette arête.

2.3.3 Fermeture locale de la fente olfactive

En ce qui concerne maintenant la fente olfactive, des zones de fermeture locale sont visibles le long de celle-ci, comme illustré sur la Figure 2.9. Ce phénomène est présent pour 10 fosses nasales sur 40. Il s'agit là d'une observation importante, car cela signifie qu'aucune inspection de l'EO ne peut être faite à ces endroits, les surfaces de la fente olfactive se rejoignant

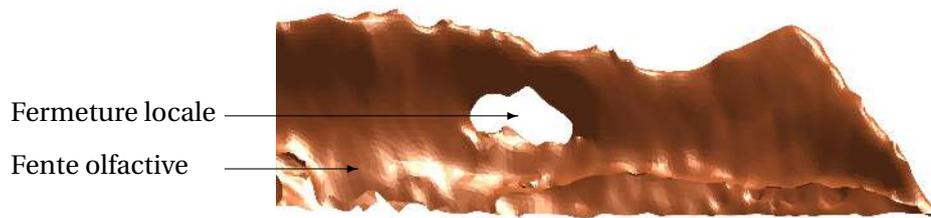


FIGURE 2.9 – Fermeture locale de la fente olfactive sur l'une des 10 fosses nasales (vue dans un plan sagittale).

et ne laissant aucune place pour l'introduction d'un dispositif. Il est également important de noter que cette zone doit alors être contournée pour poursuivre les observations de l'EO de l'autre côté de la zone de fermeture.

2.3.4 Déviation du toit de la fente olfactive

Il est, par ailleurs, visible pour l'ensemble des sujets que le toit de la fente olfactive présente une forme courbée. Une mesure de cette déviation a été réalisée pour l'ensemble des 40 fosses nasales, en mesurant la distance entre le point le plus bas et les deux points les plus élevés de leur toit. La Figure 2.10 illustre la mesure réalisée, et la Figure 2.11 est un histogramme montrant la distribution des valeurs de déviation. Les valeurs minimale, maximale et quadratique moyenne de cette déviation sont respectivement égales à 0.3, 6.4 et 2.7 mm. Elles sont à mettre en regard de la distance de travail de la sonde OCT envisagée, qui varie de 0 à 6 mm pour les sondes de chez Agiltron [AGILTRON 2017]. Une déviation du toit de la fente olfactive supérieure à 6 mm signifie, donc, qu'une partie de la fente olfactive ne pourra pas être imagée, dans le cas d'un déplacement de la sonde en ligne droite. Ce cas apparaît très fréquemment.

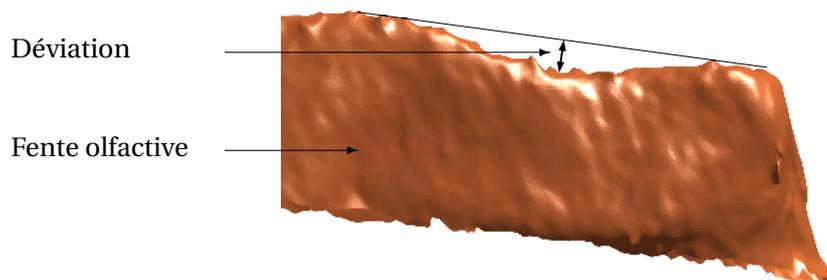


FIGURE 2.10 – Déviation du toit de la fente olfactive sur un des sujets de l'étude.

2.3.5 Largeur du chemin d'accès

Il est possible enfin d'extraire la largeur des fosses nasales le long de chemins d'accès potentiels. L'estimation de cette largeur, le long d'un chemin d'évolution, est importante, car elle va permettre d'estimer les diamètres des tubes qui vont composer le robot. Cette mesure de largeur, implémentée à partir de la méthode présentée dans [Cignoni 1998], est réalisée de la manière suivante : un nuage de points est repéré sur l'une des surfaces des fosses nasales,

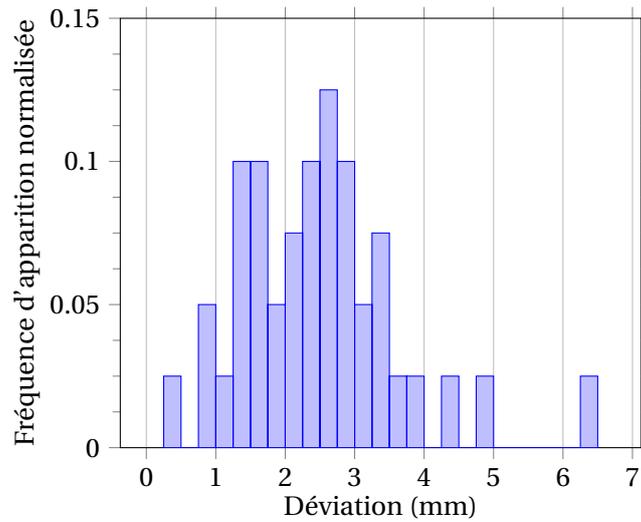


FIGURE 2.11 – Histogramme normalisé représentant la déviation du toit de la fente olfactive, pour les 20 sujets de l'étude.

et un relevé de la distance la plus courte entre ces points et la surface opposée est réalisé. Le nuage de points est repéré sur la surface se trouvant contre le septum nasal. Celui-ci se décompose en deux zones distinctes : une première située au niveau du vestibule nasal, et une seconde située au niveau de la fente olfactive.

En ce qui concerne le nuage se situant au niveau du vestibule nasal, nous choisissons qu'il joigne de manière directe le centre de l'orifice de la narine à l'entrée de la fente olfactive. Il a

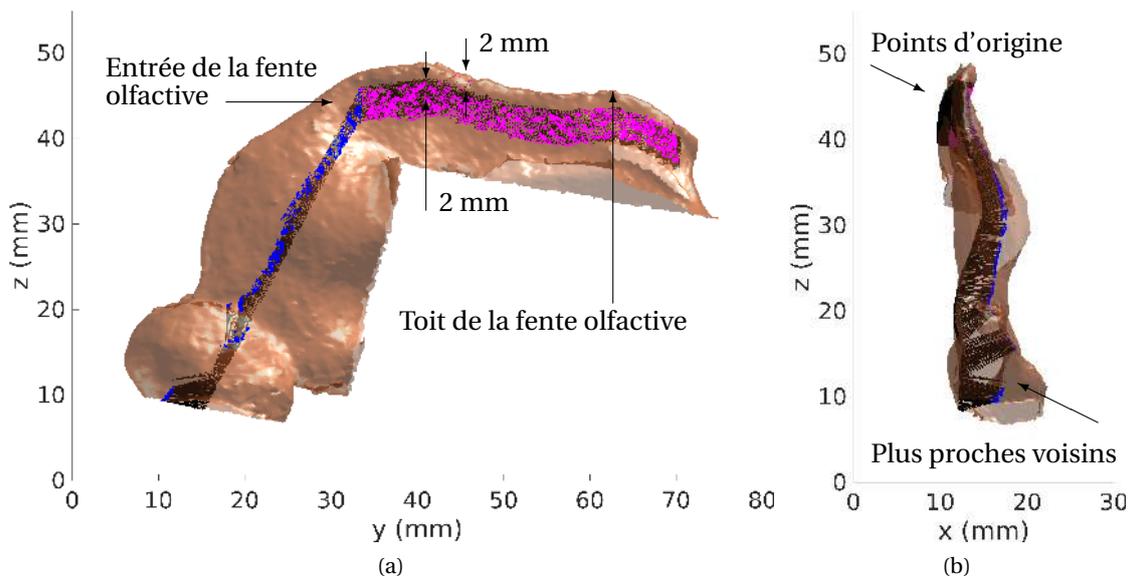


FIGURE 2.12 – Représentation des zones de mesure au niveau du vestibule nasal (en bleu) et de la fente olfactive (magenta), avec (a) vue de côté, et (b) vue de face de la cavité nasale.

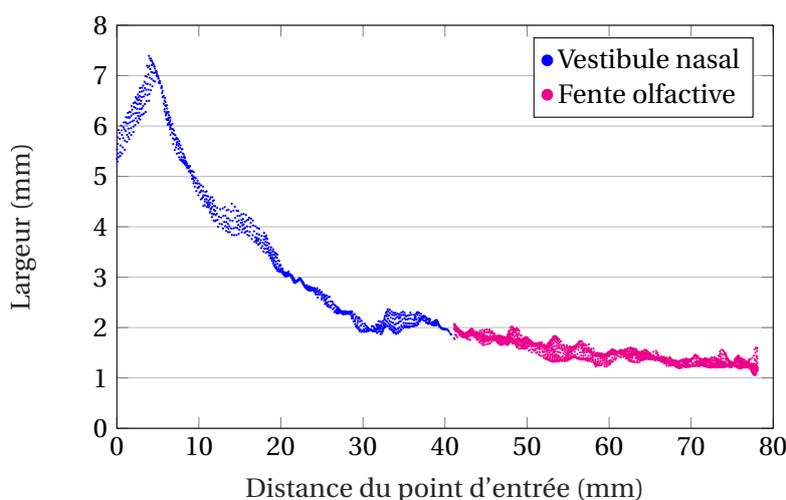


FIGURE 2.13 – Graphique représentant la largeur de la fosse nasale au niveau des points de mesure localisés au niveau du vestibule nasal et de la fente olfactive, et représentés sur la Figure 2.12.

une épaisseur de 2 mm, et se trouve à une distance de 2 mm du toit de la fente olfactive dans sa zone d'arrivée.

Concernant le nuage de points se situant dans la fente olfactive, celui-ci a également une épaisseur de 2 mm, et est choisi à une distance de 2 mm du toit des fentes, sur toute leur longueur. Cette épaisseur de 2 mm a été sélectionnée, car elle correspond à la plage de distance de travail pour la sonde OCT envisagée. Les zones de fermeture de la fente olfactive ont été évitées, aucune exploration de l'EO n'étant possible à ces endroits. La Figure 2.12 présente deux vues illustrant la méthode de mesure 3D sur l'un des modèles de fosses nasales reconstruites. La Figure 2.13 est un graphique montrant l'évolution de la largeur de la fosse nasales le long du chemin d'accès considéré sur un des sujets.

Il est visible, sur ces figures, que la largeur décroît de manière significative, de 7 mm au niveau de la narine, pour atteindre 2 mm à l'entrée de la fente olfactive. Il est également visible que la zone la plus contrainte dimensionnellement est la fente olfactive, pour laquelle la largeur décroît pour passer de 2 mm à son extrémité antérieure, à 1 mm à son extrémité postérieure.

2.3.6 Mesures supplémentaires : largeur de la fente olfactive

Une étude plus approfondie a été menée sur la largeur de la fente olfactive, la zone la plus contrainte de toute la fosse nasale. Suite aux constatations faites sur les mesures de largeur de la fosse nasale, une étude statistique a été menée pour l'ensemble des sujets de notre étude. La zone de mesure reste la même, s'étendant sur toute la longueur de la fente olfactive, avec une épaisseur de 2 mm et un retrait constant de 2 mm par rapport au toit de la fente olfactive. Pour la réalisation de ces mesures, les zones de fermeture ont une nouvelle fois été évitées, aucune exploration n'étant possible à ces endroits. La distribution de largeur pour les 40 fosses

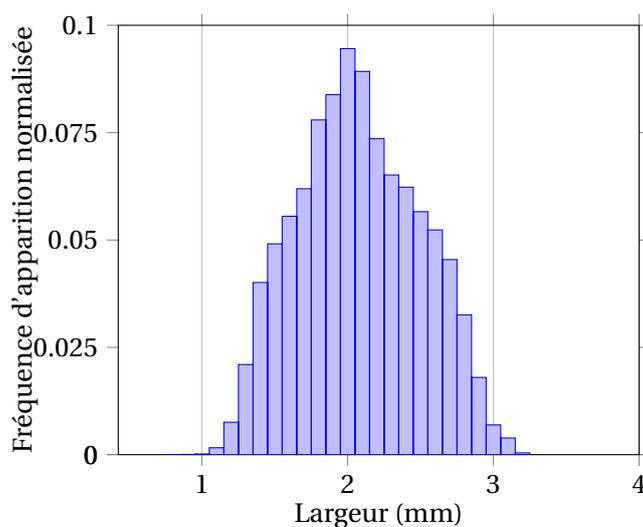


FIGURE 2.14 – Histogramme normalisé représentant la largeur de la fente olfactive, pour les 20 sujets de l'étude.

nasales sous forme d'un histogramme est visible sur la Figure 2.14. Il apparaît clairement sur cet histogramme qu'une limite inférieure de 1 mm peut être établie pour la largeur de la fente olfactive. En effet, seules 0.05% des mesures de largeur se trouvent en dessous de ce seuil. Une analyse complémentaire au cas par cas est proposée sous la forme d'une boîte de Tukey [Le Guen 2001], Figure 2.15. Pour cette représentation, les bordures supérieures et inférieures de chaque "boîte" sont respectivement les 25^{ème} et 75^{ème} centiles des échantillons. Les sujets 1 à 10 représentent la population féminine de nos sujets d'études, et les sujets 11 à 20 la population masculine. Il est visible que des valeurs de largeur inférieures à 1 mm ne sont présentes que pour 3 fosses nasales seulement, et ce pour un nombre très limité de situations. Le seuil de 1 mm est donc retenu.

2.4 Synthèse du chapitre 2

Dans ce chapitre, le besoin en termes d'informations sur les dimensions et la géométrie des fosses nasales a tout d'abord été exprimé. Une analyse de la littérature a permis de mettre en évidence une inadéquation entre nos besoins et les informations disponibles. Une méthodologie a donc été mise en place afin de combler ce besoin. Celle-ci se décompose en deux parties : une première a consisté en la reconstruction 3D de fosses nasales sous forme de modèles maillés. Ces modèles portent en eux une information globale, ceux-ci représentant de manière précise et complète la géométrie des fosses nasales. Dans un second temps, des métriques ont permis de quantifier les dimensions et la géométrie des fosses nasales. Ces indicateurs, complétés par des observations, guident dans les chapitres suivants la phase de synthèse du robot.

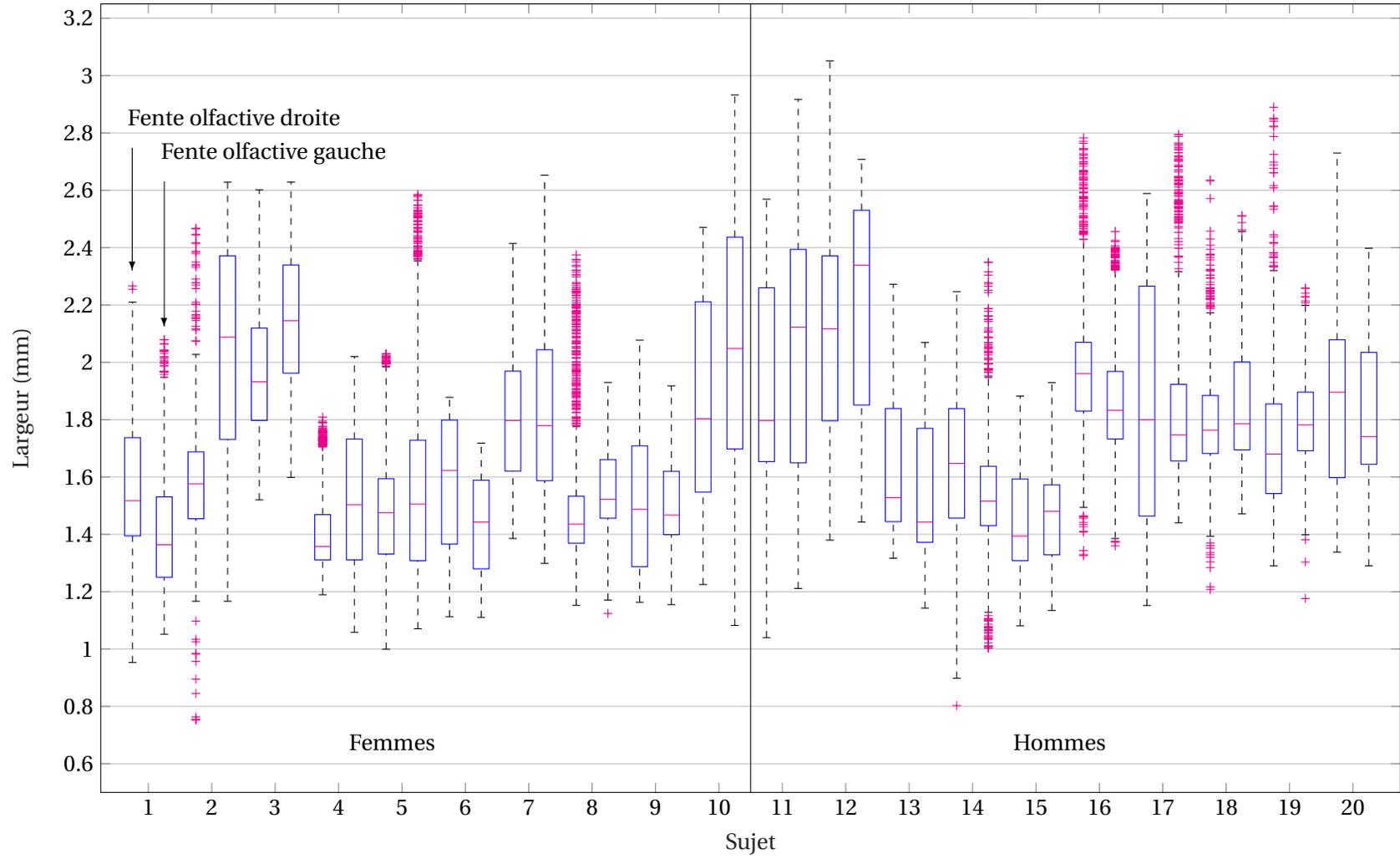


FIGURE 2.15 – Boîte de Tukey montrant la distribution des largeurs pour les fentes olfactives de chacun des 20 sujets de l'étude.

3 Déploiement ALFI de robots à tubes concentriques

"Ce qui se conçoit bien s'énonce clairement,
Et les mots pour le dire viennent aisément."

Nicolas Boileau, poète, écrivain et critique français

Sommaire du chapitre

3.1	Présentation	42
3.2	Déploiement "à la file indienne" : contraintes	43
3.3	Modèles géométriques	45
3.4	Stabilité	54
3.5	Synthèse géométrique pour un déploiement ALFI	59
3.6	Variables de conception des robots à tubes concentriques	60
3.7	Synthèse du chapitre 3	67

Dans ce troisième chapitre, nous nous focalisons maintenant sur le comportement des RTC. Les conditions pour le déploiement ALFI, qui s'impose étant donné l'espace disponible dans la cavité nasale, sont extraites de la littérature et présentées. Suite à cela, deux modèles géométriques directs d'intérêt, dans le cadre du déploiement considéré, sont détaillés. Le premier permet d'obtenir la forme d'un RTC se déployant de manière ALFI, tandis que le second permet de qualifier le comportement sur le plan de la stabilité, avec prise en compte des longueurs de transmission. Les outils analytiques associés sont alors extraits de la littérature et présentés. Suite à cela, une méthode de synthèse de RTC destinée à un déploiement ALFI est introduite. Elle permet un premier niveau de synthèse, dans le sens où la géométrie des tubes d'un RTC peut être déterminée pour obtenir une forme de robot souhaitée. Enfin, les variables de conception des RTC sont recensées, et l'intérêt d'exploiter l'anisotropie des tubes est discuté.

3.1 Présentation

Commençons ce chapitre par une présentation détaillée des RTC, dont le principe de fonctionnement a été brièvement énoncé dans le chapitre 1. Les RTC sont composés de tubes assemblés de manière télescopique. Ceux-ci ont des propriétés de superélasticité, généralement en exploitant le Nitinol. Avant assemblage, les tubes sont, au préalable, courbés sur certaines parties. Pour ce faire, nous imposons leur forme en les plaçant dans des moules. Le tout est placé dans un four à 600° durant 20 minutes, puis subit une trempe. Les tubes sont alors retirés de leurs moules. Après assemblage, ils interagissent les uns avec les autres, et l'obtention d'un état d'équilibre de l'assemblage résulte en une forme complexe dans l'espace 3D. Afin de modifier cette forme, les tubes sont actionnés à la fois en translation et en rotation à leurs bases, comme schématisé sur la Figure 3.1.

Un élément important pour la suite est la présence de 2 zones distinctes dans un RTC. Une première zone constitue la partie utile du robot, déployée sur le site d'intérêt dans le but de réaliser une tâche. La géométrie de cette partie est variable. La seconde, quant à elle, comporte les portions de tube dénommées longueurs de transmission, qui se trouvent à l'intérieur d'un mécanisme dédié à leur manipulation, et appelé unité d'actionnement. Les tubes dans cette

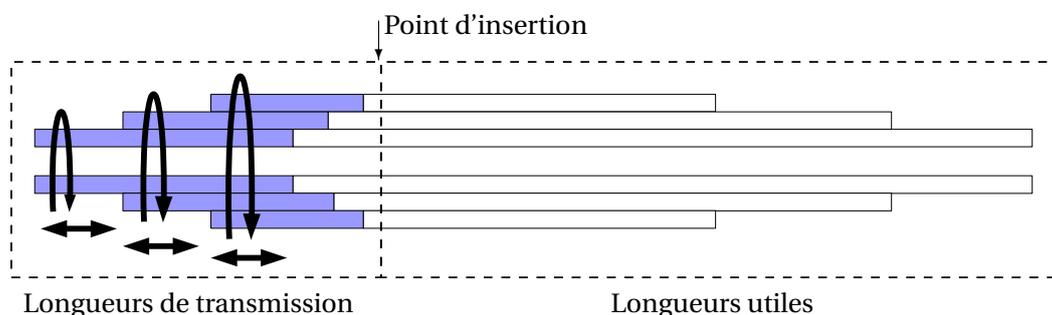


FIGURE 3.1 – Représentation d'un RTC, comprenant la partie effective et les longueurs de transmission. Les portions de tubes droites sont représentées en bleu, et les portions précourbées en blanc.

seconde portion sont contraints à rester droits, quelles que soient leurs courbures initiales. En effet, leurs bases sont en liaison pivot-glissant autour d'un même axe avec le bâti de l'unité d'actionnement, et ces tubes quittent l'unité d'actionnement à travers un trou de guidage.

3.2 Déploiement "à la file indienne" : contraintes

Nous nous concentrons sur le mode de déploiement ALFI ("A La File Indienne"). Ce type de déploiement va conditionner le choix des outils présentés par la suite, afin de modéliser le comportement de ces RTC. Comme son nom l'indique, il s'agit d'un déploiement durant lequel le corps du robot suit le chemin parcouru par son extrémité distale, connu également sous le terme "tip following" dans la littérature anglophone [Palmer 2014]. Ce mode de déploiement a été sélectionné suite à l'analyse de l'anatomie de la cavité nasale, et à la confirmation que les fentes olfactives sont très minces et laissent relativement peu de place à la navigation d'un robot. Un état de l'art est tout d'abord dressé sur cette méthode de déploiement spécifique, avec la présentation des conditions devant être réunies. En effet, un RTC quelconque ne peut pas être déployé de cette manière : des contraintes sur la géométrie de ces tubes sont à respecter. Il en est de même concernant la séquence de déploiement, qui doit être ordonnée.

3.2.1 Géométrie des tubes

En ce qui concerne tout d'abord la géométrie des tubes, il est montré [Bergeles 2015, Gilbert 2015] que les robots capables de réaliser un déploiement de type ALFI doivent être composés de tubes à courbure constante, et ne subissant pas d'effets de torsion. Deux cas sont alors décrits, réunissant ces conditions :

- Un premier avec des tubes à courbure constante arrangés dans un plan, qui ont donc leurs courbures alignées ou en opposition,
- Un second où le robot est composé de tubes en forme d'hélice, possédant la même torsion initiale mais pas nécessairement la même courbure. Comme précédemment, les courbures des tubes doivent être à leur base soit alignées, soit en opposition.

De manière générale, des tubes plans sont plus faciles à réaliser que des tubes ayant une forme tridimensionnelle spécifique. Par ailleurs, nous avons constaté au chapitre 1 que la forme de la cavité nasale est quasi planaire. Le premier cas est donc considéré, avec des tubes plans à courbure constante assemblés de manière concentrique pour former un robot plan.

3.2.2 Séquence de déploiement

La séquence d'actionnement des tubes permettant un déploiement ALFI est commune aux deux cas décrits au paragraphe précédent. Elle fait appel à des mouvements de translation entre les tubes. Le processus de déploiement est simple, et repose sur le fait que i tubes situés à l'intérieur d'un tube d'index $i + 1$ doivent être déployés ensemble, avec leurs extrémités distales alignées. Lorsque le tube d'index i atteint sa longueur maximale déployée, le processus se répète pour les $i - 1$ tubes situés à l'intérieur de ce tube d'index i . Cette séquence de déploiement est illustrée sur la Figure 3.2 dans le cas de 3 tubes. Dans un premier temps,

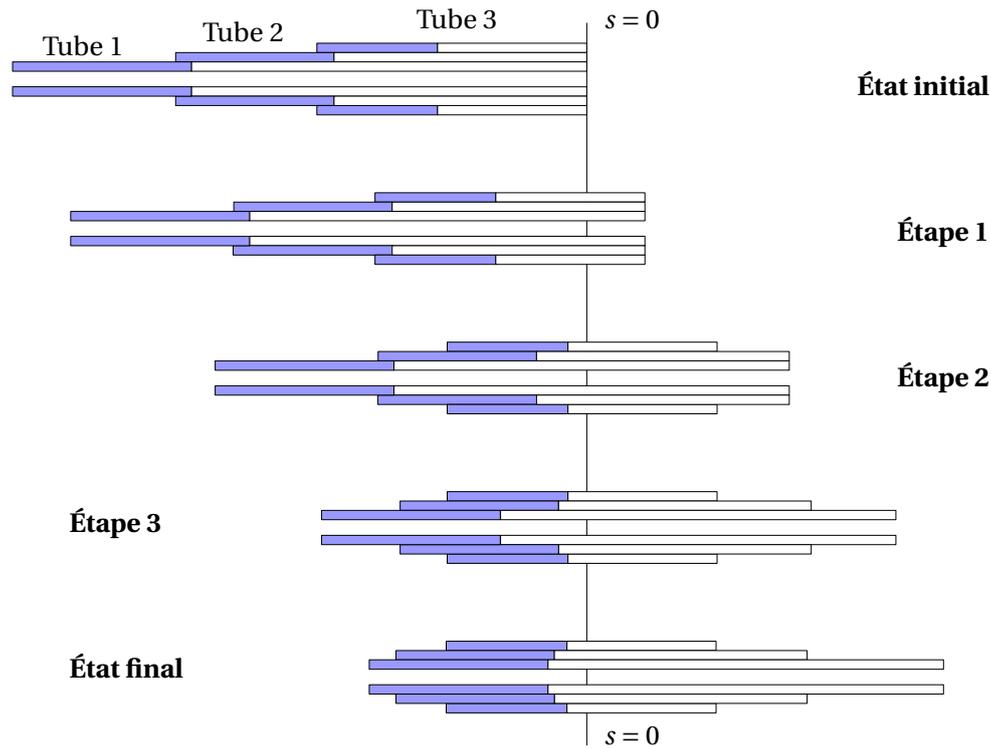


FIGURE 3.2 – Séquence d'actionnement dans le cas d'un déploiement ALFI de 3 tubes. Étape 1 : les trois tubes se déploient avec leurs extrémités distales bout à bout, étape 2 : les tubes 1 et 2 se déploient avec leurs extrémités distales toujours bout à bout, puis étape 3 : le tube 1 se déploie seul.

les 3 tubes se déploient ensemble, avec leurs extrémités distales alignées. Une fois que le tube 3 atteint sa position finale, les tubes 1 et 2 poursuivent leur déploiement, toujours avec leurs extrémités distales alignées. Une fois que le tube 2 atteint la course souhaitée, le tube 1 poursuit son déploiement seul.

Les contraintes sur la géométrie des tubes et sur la séquence de déploiement sont maintenant connues. Nous procédons alors à une analyse de la littérature, afin de disposer des outils de modélisation nécessaires. Pour ce faire, nous nous concentrons dans un premier temps sur les modèles géométriques, afin de pouvoir construire des formes de robots. Les tubes ne devant pas être soumis à des effets de torsion pour respecter les contraintes de déploiement ALFI, un premier modèle est détaillé, modélisant seulement les interactions en flexion entre les tubes. Cependant, il est connu dans la littérature [Dupont 2010, Rucker 2010, Xu 2014b, Xu 2014b, Hendrick 2015, Gilbert 2016] que les RTC de ce type peuvent bifurquer vers des configurations où des effets de torsion entre les tubes apparaissent. Des critères analytiques permettent de savoir, pour un RTC donné, si ce comportement va se produire. Un second modèle géométrique est alors extrait de la littérature et présenté. Il modélise les interactions en torsion entre les tubes en plus des interactions en flexion, afin de quantifier les défauts de forme du RTC le cas échéant. Des critères analytiques de stabilité peuvent y être associés, qui sont présentés également par la suite.

Les frottements entre les tubes ont également un impact sur la forme des RTC, et un modèle présent dans la littérature tente de modéliser ces phénomènes [Lock 2011]. Il intègre le passif d'actionnement du RTC, les frottements induisant une torsion des tubes lors de leur rotation, rendant la forme du RTC dépendante du sens de rotation précédent des tubes. Cependant, cette modélisation reste insuffisante et conduit à des erreurs encore significatives, des paramètres importants comme le jeu entre les tubes influençant la localisation des zones de contact entre ceux-ci n'étant pas pris en compte, ainsi que d'autres comme l'état de surface des tubes, difficiles à estimer. Nous choisissons alors d'écarter ce modèle des outils sélectionnés. Notre choix est d'autant plus justifié que la rotation des tubes n'est pas utilisée lors d'un déploiement ALFI, ce qui fait perdre tout intérêt au modèle présenté dans [Lock 2011] dans notre cas.

3.3 Modèles géométriques

Dans le but d'introduire des notations nécessaires à leur écriture, la Figure 3.3 présente un paramétrage des longueurs des tubes, avec les longueurs totales L_i , les longueurs de transmission β_i , et les longueurs des portions déployées l_j . Nous notons que l'inégalité $L_n \leq \dots \leq L_i \leq \dots \leq L_1$ doit être respectée, pour que les tubes se déploient de manière échelonnée et puisse être saisis à leurs bases par un système de manipulation.

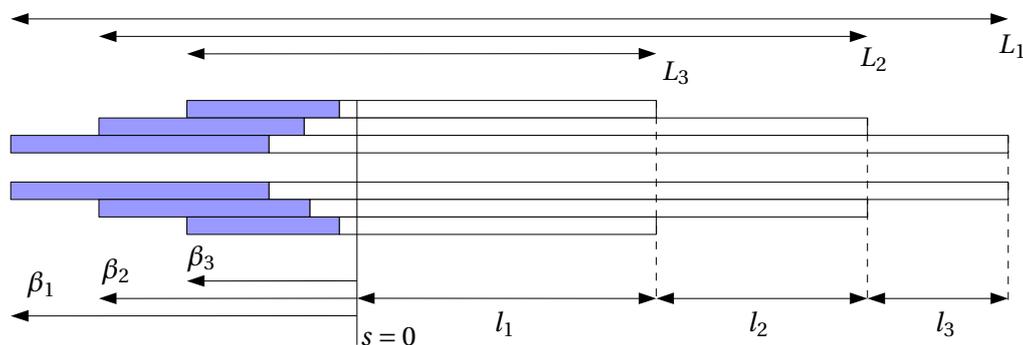


FIGURE 3.3 – Paramétrage d'un RTC dans le cas d'un assemblage de 3 tubes.

3.3.1 Modèle géométrique avec prise en compte des interactions en flexion

Commençons par présenter le modèle modélisant les interactions en flexion uniquement [Webster 2010, Dupont 2010]. Son écriture peut se décomposer en 2 étapes (Figure 3.4), la première permettant de passer de l'espace des actionneurs avec les variables de commandes q jusqu'à l'espace des configurations avec la connaissance de la courbure des sections du robot γ_j , le plan de courbure de ces portions ϕ_j , ainsi que la longueur de ces sections l_j comme illustré sur la Figure 3.6. La seconde permet ensuite de passer de l'espace des configurations à l'espace opérationnel, avec la connaissance des coordonnées 3D de la fibre neutre du robot dans l'espace. Ces deux étapes de la modélisation sont présentées dans les parties suivantes.

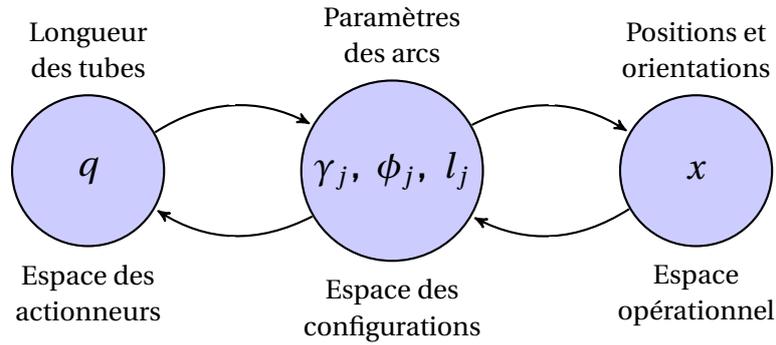


FIGURE 3.4 – Représentation du découpage en fonctions élémentaires permettant de réaliser la modélisation d'un RTC, issu de [Webster 2010].

3.3.1.1 De l'espace des actionneurs à l'espace des configurations

Courbure d'un tube Commençons tout d'abord par décrire la courbure d'un tube. Chaque tube étant considéré avec une torsion initiale nulle, sa courbure est alors donnée par (3.1).

$$\boldsymbol{\kappa}_i^{F_i(s)}(s) = \begin{bmatrix} \kappa_{ix}(s) \\ \kappa_{iy}(s) \\ 0 \end{bmatrix}_{F_i(s)} \quad (3.1)$$

dans son repère de Frenet $F_i(s)$, où s représente l'abscisse curviligne mesurée le long du tube. L'axe z de ce repère est tangent au tube qui lui est associé en tout point, et ne subit pas de rotation autour de cet axe. Après assemblage, le vecteur de courbure du tube d'index i est noté

$$\tilde{\boldsymbol{\kappa}}_i^{F_i(s)}(s) = \begin{bmatrix} \tilde{\kappa}_{ix}(s) \\ \tilde{\kappa}_{iy}(s) \\ 0 \end{bmatrix}_{F_i(s)} \quad (3.2)$$

Il est possible de réécrire ce vecteur de courbure dans un repère de Frenet commun à tous les tubes, et noté $F_0(s)$. Les repères $F_i(s)$ et $F_0(s)$ sont décalés d'une rotation $\psi_i(s)$ autour de l'axe du tube. Le vecteur de courbure du tube i dans ce nouveau repère devient alors

$$\tilde{\boldsymbol{\kappa}}_i^{F_0(s)} = \mathbf{R}_z(\psi_i(s)) \tilde{\boldsymbol{\kappa}}_i^{F_i(s)} \quad (3.3)$$

avec

$$\mathbf{R}_z(\psi_i(s)) = \begin{bmatrix} \cos(\psi_i(s)) & -\sin(\psi_i(s)) & 0 \\ \sin(\psi_i(s)) & \cos(\psi_i(s)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Le vecteur de courbure d'un tube, exprimé dans un repère commun à tous les tubes, est alors déterminé.

Vecteur courbure d'un assemblage de tubes

Pour exprimer la courbure d'un assemblage de tubes, trois relations sont nécessaires : la valeur d'un moment de flexion généré dans un tube, l'équilibre des moments de flexion, et la compatibilité des déformations des tubes.

Moment de flexion d'un tube : il est exprimé en fonction de la variation de courbure subie par le tube durant l'assemblage et de son tenseur de rigidité, pouvant s'écrire de manière classique $\mathbf{K}_i = \text{diag}(E_i I_i, E_i I_i, G_i J_i)_{F_0(s)}$ [Dupont 2010]. Il prend alors la forme (3.5)

$$\mathbf{m}_i^{F_0(s)}(s) = \mathbf{K}_i \left(\tilde{\boldsymbol{\kappa}}_i^{F_0(s)}(s) - \boldsymbol{\kappa}_i^{F_0(s)}(s) \right) \quad (3.5)$$

Équilibre des moments de flexion : selon le principe fondamental de la statique, si l'on isole le robot à l'équilibre, en l'absence de toute interaction avec son environnement, la somme des moments de flexion appliqués dans une section s du robot est nulle. La relation qui apparaît est donc la suivante :

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{m}_i^{F_0(s)}(s) = 0 \quad (3.6)$$

avec n le nombre de tubes en interaction.

Compatibilité des déformations : la conformation de tous les tubes assemblés les contraint à avoir un même vecteur de courbure final, que nous notons alors $\boldsymbol{\gamma}^{F_0(s)}(s)$.

$$\tilde{\boldsymbol{\kappa}}_1^{F_0(s)}(s) = \tilde{\boldsymbol{\kappa}}_2^{F_0(s)}(s) = \dots = \tilde{\boldsymbol{\kappa}}_i^{F_0(s)}(s) = \dots = \tilde{\boldsymbol{\kappa}}_n^{F_0(s)}(s) = \boldsymbol{\gamma}^{F_0(s)}(s) \quad (3.7)$$

En associant (3.5), (3.6), et (3.7), l'équation (3.8) est alors obtenue :

$$\boldsymbol{\gamma}^{F_0(s)}(s) = \left(\sum_{i=1}^n \mathbf{K}_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n \mathbf{K}_i \boldsymbol{\kappa}_i^{F_0(s)}(s) \quad (3.8)$$

Cette relation permet de calculer la courbure du robot le long de son abscisse curviligne s , en fonction de la courbure initiale des tubes, comme illustré sur la Figure 3.5. L'ensemble des relations peut être exploité en considérant tous les n tubes présents, et en écrivant que le tenseur de rigidité du tube i vaut $\mathbf{K}_i = \text{diag}(0, 0, 0)$, s'il n'est pas présent à une abscisse curviligne donnée.

Dans le cas de tubes à courbure constante par portion, nous remarquons que l'assemblage résulte en un robot constitué également de portions à courbure constante. Pour un déploiement ALFI avec des tubes à courbure constante sur toutes leurs longueurs, nous remarquons que le nombre de sections à courbure constante m du robot est alors égal au nombre de tubes n . Le vecteur $\boldsymbol{\gamma}^{F_0(s)}(s)$ est donc variable le long de l'abscisse curviligne du robot, et se décompose en une succession de n valeurs constantes notées $\boldsymbol{\gamma}_j^{F_0(s)}(s)$, où j désigne une portion à courbure constante du RTC.

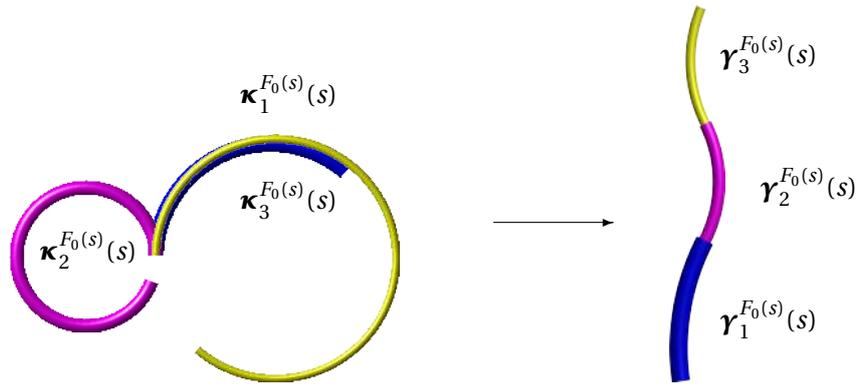


FIGURE 3.5 – Illustration de la courbure résultante d'un assemblage de 3 tubes.

Le vecteur de courbure d'une portion à courbure constante d'index j du robot est donné par (3.9),

$$\boldsymbol{\gamma}_j^{F_0(s=s_j)} = \begin{bmatrix} \gamma_{jx} \\ \gamma_{jy} \\ 0 \end{bmatrix}_{F_0(s=s_j)} \quad (3.9)$$

avec s_j tel qu'on se situe sur cette portion à courbure constante d'index j . Ces portions étant à courbure constante, la courbure de l'arc de cette portion du robot de longueur l_j peut être écrite sous forme d'un scalaire, donnée par (3.10),

$$\gamma_j = \sqrt{(\gamma_{jx})^2 + (\gamma_{jy})^2} \quad (3.10)$$

et l'angle d'équilibre ϕ_j dans lequel se situe cette portion à courbure constante est donné par (3.11).

$$\phi_j = \arctan\left(\frac{\gamma_{jy}}{\gamma_{jx}}\right) \quad (3.11)$$

Les paramètres l_j , γ_j et ϕ_j sont visibles sur la Figure 3.6, qui illustre le paramétrage d'une section du RTC.

3.3.1.2 De l'espace des configurations à l'espace opérationnel

A partir des valeurs de courbure et d'angle d'équilibre des arcs à courbure constante formant le robot, il est alors possible de décrire la position de tout point situé sur la fibre neutre du robot dans le repère d'origine $F_0(0)$. On utilise pour cela la relation (3.12), qui exprime la matrice de transformation ${}^{j-1}T_W^j$ entre les tubes $j-1$ et j .

Dans le cas d'une portion courbée, la transformation s'exprime sous la forme (3.12),

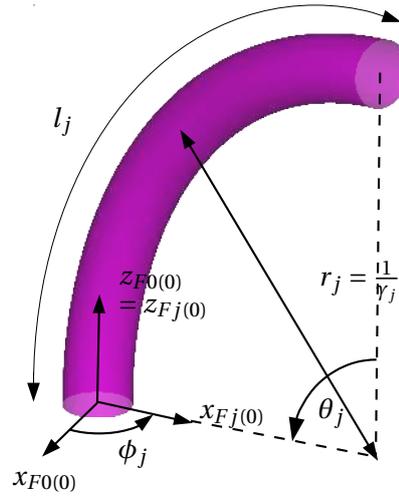


FIGURE 3.6 – Illustration du paramétrage d'une section à courbure constante du robot.

sachant que $\theta_j = \kappa_j l_j$, et avec $a = \cos(\theta_j) - 1$ et l_j est la longueur curviligne de la portion d'index j .

$${}^{j-1}\mathbf{T}_{Wj} = \begin{bmatrix} \cos^2(\phi_j)a + 1 & \sin(\phi_j)\cos(\phi_j)a & \cos(\phi_j)\sin(\gamma_j l_j) & \frac{-\cos(\phi_j)a}{\gamma_j} \\ \sin(\phi_j)\cos(\phi_j)a & -\cos^2(\phi_j)a + \cos(\gamma_j l_j) & \sin(\phi_j)\sin(\gamma_j l_j) & \frac{-\sin(\phi_j)a}{\gamma_j} \\ -\cos(\phi_j)\sin(\gamma_j l_j) & -\sin(\phi_j)\sin(\gamma_j l_j) & \cos(\gamma_j l_j) & \frac{\sin(\gamma_j l_j)}{\gamma_j} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Dans le cas d'une portion à courbure nulle ($\gamma_j = 0$), la transformation est donnée par (3.13).

$${}^{j-1}\mathbf{T}_{Wj} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

La pose de l'effecteur du robot peut alors être obtenue par l'application de (3.14).

$$\mathbf{X}_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^n {}^{j-1}\mathbf{T}_{Wj} \quad (3.14)$$

3.3.2 Modèle avec prise en compte des interactions en flexion et en torsion

Pour prendre en compte la torsion, l'approche proposée dans la littérature est une approche énergétique [Rucker 2009b, Rucker 2010, R. J. Webster 2009, Rucker 2011]. Pour des

coordonnées articulaires q données du robot, l'interaction entre les tubes est telle qu'elle doit conduire à un extremum d'énergie.

3.3.2.1 Energie stockée dans le robot

Exprimons l'énergie stockée par un tube d'index i , entre les points d'abscisses curvilignes σ_1 et σ_2 . L'énergie dépend du vecteur de courbure initial $\mathbf{u}_i^*(s)$ et final $\mathbf{u}_i(s)$ du tube d'index i , ainsi que de son tenseur de rigidité K_i . Elle est donnée par l'équation (3.15).

$$E = \frac{1}{2} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} (\mathbf{u}_i(s) - \mathbf{u}_i^*(s))^T \mathbf{K}_i (\mathbf{u}_i(s) - \mathbf{u}_i^*(s)) ds, \quad (3.15)$$

Dans le cas d'un assemblage de n tubes, l'énergie de l'ensemble s'exprime par (3.16).

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} (\mathbf{u}_i(s) - \mathbf{u}_i^*(s))^T \mathbf{K}_i (\mathbf{u}_i(s) - \mathbf{u}_i^*(s)) ds, \quad (3.16)$$

Connaissant la relation (3.17), représentant à la fois la différence angulaire due à la rotation d'un angle ψ_i entre le tube d'index i et le tube 1 et l'effet de la torsion s'appliquant sur ce tube le long de son abscisse curviligne, avec $\mathbf{e}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$,

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{R}_{\psi_i}^T \mathbf{u}_1 + \psi_i \mathbf{e}_3, \quad (3.17)$$

l'équation représentant l'énergie stockée dans une portion de robot délimitée par les points d'abscisse curviligne σ_1 et σ_2 peut alors être mise sous la forme

$$E = \frac{1}{2} \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} (\mathbf{u}(s) - \boldsymbol{\alpha}(s))^T \mathbf{K} (\mathbf{u}(s) - \boldsymbol{\alpha}(s)) + C ds, \quad (3.18)$$

avec

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}(s) &= \mathbf{K}^{-1} \sum_{i=1}^n \mathbf{K}_i \bar{\mathbf{u}}_i^*(s), & \mathbf{K} &= \sum_{i=1}^n \mathbf{K}_i, \\ \bar{\mathbf{u}}_i^*(s) &= \mathbf{R}_{\psi_i} \mathbf{u}_i^* - \psi_i(s) \mathbf{e}_3, & C(s) &= \sum_{i=1}^n \bar{\mathbf{u}}_i^{*T}(s) \mathbf{K}_i \bar{\mathbf{u}}_i^*(s) - \boldsymbol{\alpha}^T(s) \mathbf{K} \boldsymbol{\alpha}(s), \end{aligned} \quad (3.19)$$

et en notant \mathbf{u} la courbure du tube d'index $i = 1$.

3.3.2.2 Minimisation de l'énergie stockée

Ayant formulé l'expression de l'énergie stockée dans l'assemblage de n tubes entre les abscisses curvilignes σ_1 et σ_2 , nous cherchons maintenant la valeur de \mathbf{u} correspondant à un extremum. Ce vecteur de courbure est bien entendu le même pour tous les tubes, ceux-ci étant assemblés et donc contraints à adopter la même courbure. Tout d'abord, nous constatons que l'expression de l'énergie exprimée en (3.18) fait intervenir deux grandeurs indépendantes de

la courbure \mathbf{u} des tubes, à savoir $\boldsymbol{\alpha}(s)$ et $C(s)$. L'extremum d'énergie stockée dans le RTC est alors atteint pour

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\alpha} = \mathbf{K}^{-1} \sum_{i=1}^n \mathbf{K}_i (\mathbf{R}_{\psi_i} \mathbf{u}_i^* - \psi_i \mathbf{e}_3) \quad (3.20)$$

Connaissant l'expression de \mathbf{u} minimisant l'énergie stockée dans le robot, il reste à trouver les fonctions $\psi_1 \cdots \psi_n$ intervenant dans son expression. Pour ce faire, l'équation d'Euler-Lagrange

$$\frac{\partial f}{\partial \psi_i} - \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial f}{\partial \dot{\psi}_i} \right) = 0$$

est appliquée n fois à l'expression qui se trouve dans l'intégrale de (3.18). Dans le cadre de tubes à courbure constante, les expressions de $\psi_1 \cdots \psi_n$ sont alors données par n équations du second ordre (3.21).

$$G_i J_i \ddot{u}_{iz} = \begin{cases} \frac{E_i I_i}{EI} \sum_{j=1}^n E_j I_j \kappa_i \kappa_j \sin(\psi_i - \psi_j), & \text{si } 0 \leq s_i(s) \leq L_i \quad (1) \\ 0, & \text{sinon.} \quad (2) \end{cases} \quad (3.21)$$

Ce système de n équations du second ordre peut-être réécrit en un système de $2n$ équations du premier ordre donné en (3.22).

$$\begin{cases} \dot{\psi}_i = u_{iz} \\ \dot{u}_{iz} = \frac{E_i I_i}{E I G_i J_i} \sum_{j=1}^n E_j I_j \kappa_i \kappa_j \sin(\psi_i - \psi_j) \end{cases} \quad (3.22)$$

Ce système de $2n$ équations est associé à des conditions limites mixtes, contraignant les fonctions $\psi_1 \cdots \psi_n$ au niveau du point d'abscisse curviligne $s = 0$ et leurs dérivées $\dot{\psi}_1 \cdots \dot{\psi}_n$ à l'extrémité distale de chacun des tubes, située à l'abscisse curviligne $s = l_i$. En effet, les angles par lesquels sont orientés les tubes au point d'abscisse curviligne $s = 0$ sont connus, et reliés aux angles par lesquels ils sont orientés en bout de longueur de transmission, à l'abscisse curviligne $s = \beta_i$. Ces relations sont données par l'équation (3.23), qui décrit alors les conditions initiales sur les fonctions ψ_i .

$$\psi_i(0) = \alpha_i - \beta_i u_{iz}(0), \quad (3.23)$$

Quant aux conditions finales sur les dérivées $\dot{\psi}_i$, elles correspondent au fait que la torsion des tubes à leur extrémité distale est nulle, celles-ci étant libres. Elles sont données par

l'équation (3.24).

$$u_{iz}(L_i - \beta_i) = 0, \quad (3.24)$$

D'un point de vue pratique, la résolution du système d'équations (3.22) associé aux conditions mixtes (3.23) et (3.24) peut être faite par exemple sous Matlab, qui propose une fonction nommée *bvp5c* (pour Boundary Value Problem). Une initialisation des solutions est nécessaire pour les fonctions $\psi_i(s)$ ainsi que pour leurs dérivées $\dot{\psi}_i(s)$.

Le cas considéré avec le système (3.22) est celui d'une portion contenant n tubes à courbure constante, qui se recouvrent entièrement sur la portion considérée. Dans le cas général, un robot est constitué d'une succession de portions de ce type, où le nombre de tubes change sur chaque portion. Afin de trouver les variables $\psi_i(s)$ et $\dot{\psi}_i(s)$ pour chacun des tubes et sur toutes leurs longueurs, un système d'équations tel que (3.22) est écrit pour chacune des portions du robot, et la continuité des solutions entre les différentes portions donnée pour chacune d'entre elles.

3.3.2.3 Reconstruction de la forme du robot

Une fois la résolution faite pour les variables $\psi_i(s)$ et $\dot{\psi}_i(s)$ de chaque tube du robot, la forme du robot peut être extraite à partir du vecteur de courbure du tube 1, situé à l'intérieur du robot, en utilisant l'équation (3.20) qui exprime le vecteur de courbure équivalent de l'assemblage des n tubes du robot, le long de son abscisse curviligne. Les fonctions $\psi_i(s)$ et $\dot{\psi}_i(s)$ sont des fonctions continues, mais elles peuvent être approximées à des fonctions constantes par morceaux, ce qui peut faciliter l'expression du vecteur $\alpha = \mathbf{u}$, en calculant un nombre fini de vecteurs \mathbf{u} en fonction de l'abscisse curviligne du robot. Celui-ci est alors approximé à un robot à courbure constante par portions, avec une taille de ces portions qui peut être variable selon le degré de précision souhaité. Connaissant le vecteur de courbure du robot, sa forme, dictée par une suite de points permettant de situer la position de sa fibre neutre, peut être déterminée par le jeu d'équations suivant :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}} = \mathbf{R}\mathbf{e}_3 \\ \dot{\mathbf{R}} = \mathbf{R}\hat{\mathbf{u}} \end{cases} \quad (3.25)$$

L'accent circonflexe désigne la conversion d'un élément de \mathbb{R}^3 en un élément de $\mathfrak{so}(3)$, l'algèbre de Lie du groupe de Lie $SO(3)$. Les conditions initiales pour l'intégration de ces deux équations différentielles sont $\mathbf{R}(0) = \mathbf{R}_z(\psi_1(0))$ pour la matrice de rotation, et $\mathbf{p} = [0 \ 0 \ 0]^T$ pour la position.

3.3.3 Comparaison des modèles

L'impact du choix du modèle dans l'analyse du comportement peut être observé en considérant, par exemple, le RTC présenté dans le Tableau 3.1 et étudié dans la littérature [Rucker 2011, Rucker 2010]. Nous souhaitons analyser des situations de déploiement ALFI. Nous choisissons donc une configuration telle que les tubes aient leurs courbures en opposition.

	Tube 1	Tube 2
Module de Young (GPa)	58	58
Module de cisaillement (GPa)	21.5	21.5
Diamètre intérieur (mm)	0.00	2.01
Diamètre extérieur (mm)	1.60	2.39
Longueur déployée (mm)	200	140
Courbure (mm^{-1})	0.0138	0.0099

Tableau 3.1 – Caractéristiques des tubes utilisés pour la comparaison des deux modèles géométriques introduits.

Dans cette configuration, le modèle géométrique sans torsion retourne une solution unique notée "Solution sans torsion" sur la Figure 3.7.

Le modèle avec prise en compte de la torsion apporte quant à lui deux solutions additionnelles notées "Solution avec torsion n°1" et "Solution avec torsion n°2", en faisant varier les conditions initiales des solutions pour l'angle et la torsion des tubes le long de leurs abscisses curvilignes. Les différences angulaires entre les tubes 1 et 2, mesurées à l'extrémité du robot,

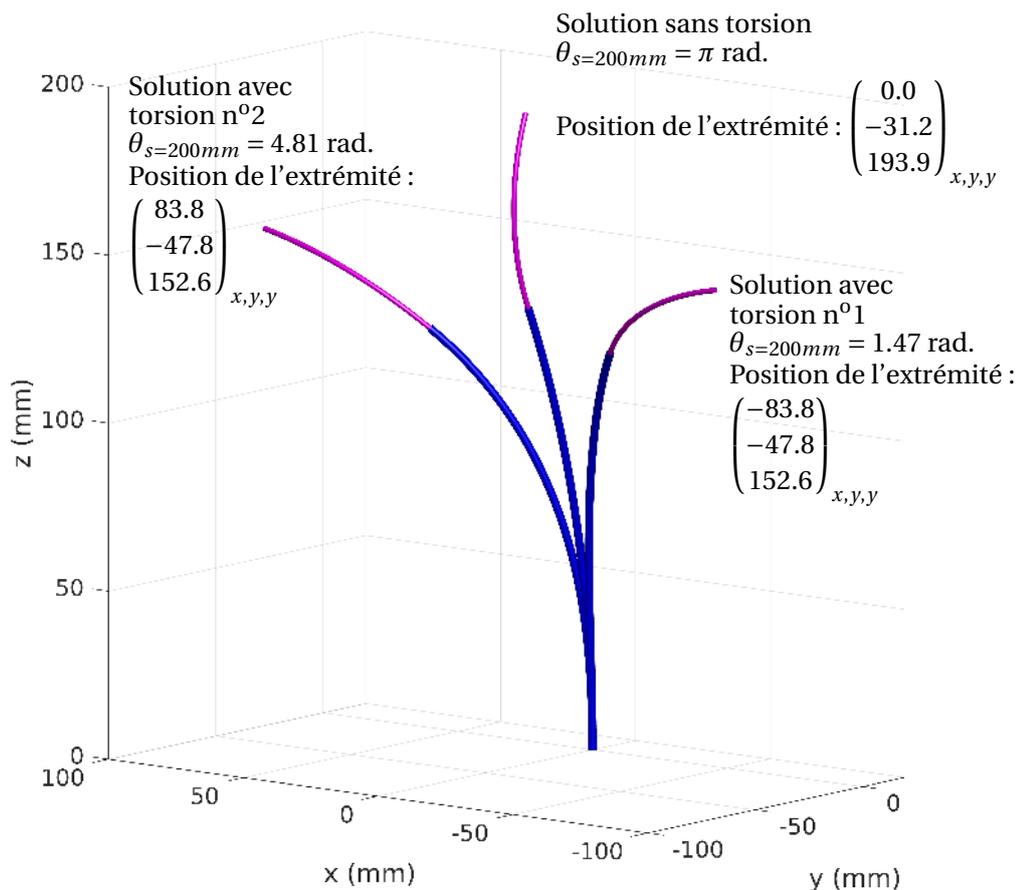


FIGURE 3.7 – Illustration des différentes solutions obtenues avec les modèles géométriques présentés, et en considérant le jeu de tubes dont les paramètres sont donnés dans le Tableau 3.1.

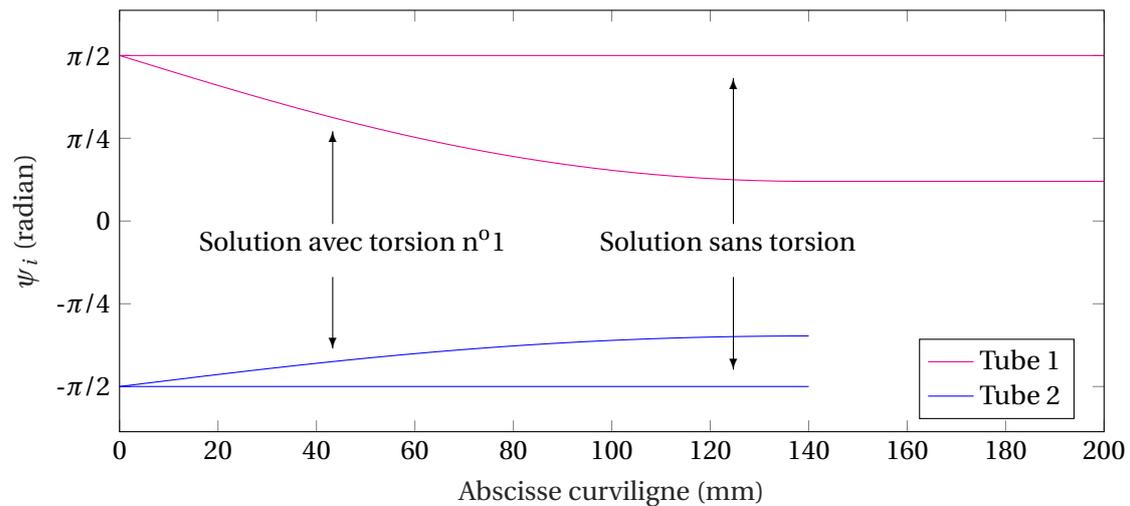


FIGURE 3.8 – Évolution de l'angle des tubes du robot le long de leurs abscisses curvilignes, dans le cas de la solution sans torsion et avec torsion n°1.

sont reportées également sur la Figure 3.7. Un graphique additionnel présenté sur la Figure 3.8 permet de visualiser les différences entre les deux modèles présentés, en considérant l'angle décrit par les tubes le long de leur abscisse curviligne dans le cas des solutions notées "Solution sans torsion" et "Solution avec torsion n°1".

Nous pouvons donc remarquer la multiplicité de solutions au modèle géométrique direct qui peut exister, et poser problème, sachant que seule la configuration pour laquelle le robot reste dans le plan est souhaitée. Cette non unicité est liée par ailleurs étroitement à la question de la stabilité des configurations.

3.4 Stabilité

Il a été noté très tôt dans le développement de prototypes de RTC, que ceux-ci peuvent adopter plusieurs configurations d'équilibre. Ces configurations peuvent être ou non stables, et des critères de stabilité ont donc été mis en place dans la littérature pour qualifier cette dernière. La configuration préférentiellement choisie est, comme dans tout système, celle présentant un minimum d'énergie. Si le robot adopte une branche de configuration ne correspondant pas à un minimum d'énergie, des mouvements rapides durant la manipulation des tubes peuvent se produire, traduisant une libération soudaine de l'énergie stockée dans le robot. Ces relaxations, nommées "snapping" dans la littérature anglosaxonne [Boushaki 2016a], sont permises par une reconfiguration rapide des tubes, correspondant à des modifications de leurs angles le long de leurs abscisses curvilignes, faisant apparaître des phénomènes de torsion. Ils apparaissent lorsqu'un robot comporte au moins 2 tubes courbés. Ce phénomène a tout d'abord été établi dans le cas de 2 tubes [Dupont 2010, Rucker 2010, Xu 2014b, Ha 2014], puis généralisé à n tubes dans un second temps, en prenant en compte leurs longueurs de transmission [Xu 2014b, Hendrick 2015, Gilbert 2016].

3.4.1 Critère analytique à 2 tubes sans longueurs de transmission

Pour un cas simple comme un RTC à 2 tubes, la stabilité a été évaluée de manière analytique [Dupont 2010, Rucker 2010, Xu 2014b, Ha 2014], en linéarisant les équations du modèle avec torsion au point d'équilibre. L'application du système d'équations (3.22), provenant du modèle géométrique avec interaction en flexion et torsion, conduit à un système de deux équations (3.26).

$$\begin{cases} \ddot{\psi}_1 = \frac{E_1 I_1 E_2 I_2}{(E_1 I_1 + E_2 I_2) G_1 J_1} \kappa_1 \kappa_2 \sin(\psi_1 - \psi_2) \\ \ddot{\psi}_2 = \frac{E_2 I_2 E_1 I_1}{(E_1 I_1 + E_2 I_2) G_2 J_2} \kappa_2 \kappa_1 \sin(\psi_2 - \psi_1) \end{cases} \quad (3.26)$$

Par le changement de variable $\theta = \psi_2 - \psi_1$, elles peuvent être réécrites en une seule équation adimensionnelle, donnant (3.27),

$$\ddot{\theta} - \delta \sin(\theta) = 0 \quad (3.27)$$

avec

$$\delta = L^2 \kappa_1 \kappa_2 \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 (G_1 J_1 + G_2 J_2)}{G_1 J_1 G_2 J_2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)} \quad (3.28)$$

Les conditions initiales, associées à cette équation différentielle, sont $\theta(0) = \psi_2(0) - \psi_1(0)$, la différence angulaire des tubes à leur base, et $\dot{\theta}(1) = 0$ représentant l'absence de torsion en bout de robot.

Dans le cas de deux tubes à courbure constante, il est simple d'imaginer que lorsque les courbures de ces deux tubes sont alignées, la configuration ne peut être que stable, et correspond à un minimum d'énergie. Au contraire, des tubes avec des courbures en opposition conduisent à un maximum d'énergie et potentiellement à des instabilités. La multiplicité des solutions du modèle géométrique direct, dans ce cas précis, peut être étudiée en linéarisant l'équation (3.27) autour de la position d'équilibre $\theta = \pi$. Cela conduit à l'équation (3.29),

$$\ddot{\theta} + \delta(\theta - \pi) = 0 \quad (3.29)$$

qui possède une solution connue, de la forme (3.30).

$$\theta(s) = C_1 \cos(\sqrt{\delta}s) + C_2 \sin(\sqrt{\delta}s) + \pi \quad (3.30)$$

L'application de la condition initiale $\theta(0) = \pi$ conduit à $C_1 = 0$, et l'application de la condition finale $\dot{\theta}(1) = 0$ conduit à $C_2 \sqrt{\delta} \cos(\sqrt{\delta}) = 0$. Ainsi, une branche triviale de solution existe

lorsque $C_2 = 0$, et correspond à la solution $\theta(s) = \theta(0) = \pi$. Cette branche triviale correspond à des tubes restant parfaitement en opposition sur toutes leurs longueurs. Mais une seconde branche de solution non triviale existe lorsque l'expression $\sqrt{\delta} \cos(\sqrt{\delta})$ s'annule, c'est-à-dire lorsque $\delta = \delta_0 = \frac{\pi^2}{4}$. L'apparition de cette branche non triviale a pour effet physique une torsion des tubes ayant tendance à aligner leurs courbures, dans le but de diminuer la quantité d'énergie stockée dans le robot.

Le phénomène de seuil sur la valeur δ_0 est remarquable, car pour une valeur $\delta < \delta_0$, l'énergie du robot est stockée sous forme de flexion uniquement, alors que pour $\delta > \delta_0$, elle peut être stockée à la fois sous forme de flexion et de torsion.

Si nous reprenons le jeu de tubes utilisé pour comparer les modèles sans torsion et avec torsion en termes de multiplicité de solutions (voir Tableau 3.1), nous sommes maintenant capables d'évaluer la stabilité des configurations trouvées.

La Figure 3.9 représente le cas où la solution avec des tubes en opposition est instable, et où apparaissent deux solutions stables non triviales où les tubes sont soumis à des effets de torsion. La multiplicité des solutions trouvées indique la présence de solutions non triviales stables où les tubes subissent des effets de torsion, et d'une solution triviale instable, où les

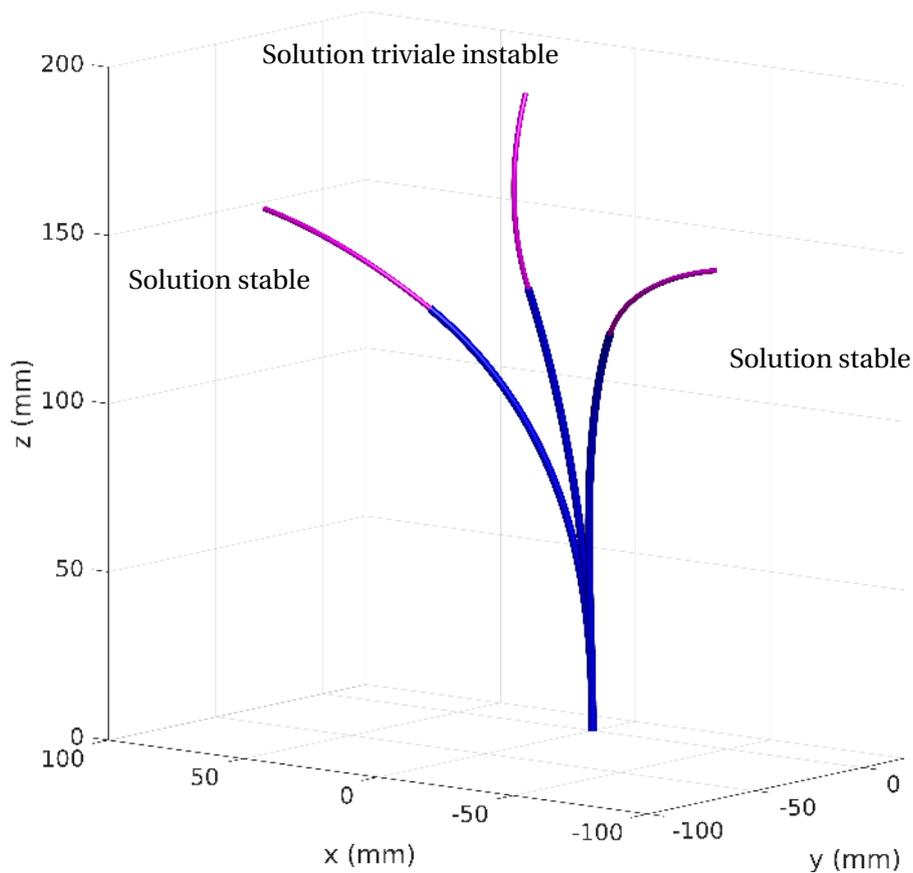


FIGURE 3.9 – Illustration de la solution triviale instable et des deux solutions stables dans le cas de 2 tubes en opposition, avec les caractéristiques données dans le Tableau 3.1

tubes restent en opposition. En pratique, si la configuration du robot est instable, celle-ci va bifurquer vers une des deux configurations stables, ces dernières étant symétriques.

3.4.2 Formulation du critère à n tubes avec longueurs de transmission

Une formulation plus récente et plus complète du critère de stabilité des RTC, permet de considérer un nombre quelconque de tubes à courbure constante [Xu 2014b, Hendrick 2015, Gilbert 2016, Ha 2015], et inclut les longueurs de transmission des tubes, indispensables pour le fonctionnement du robot, et jouant un rôle dans sa stabilité. En effet, ces portions peuvent être soumises à des effets de torsion. Dans la suite de ce paragraphe, nous utilisons le formalisme utilisé dans [Hendrick 2015, Gilbert 2016]. L'écriture de ce critère s'appuie sur la linéarisation du système d'équations (3.21) autour d'un point d'équilibre $\boldsymbol{\psi}_e \in \mathbb{R}^n$, qui nous donne (3.31),

$$\mathbf{K}_t \ddot{\boldsymbol{\psi}} = \mathbf{A}_e(\boldsymbol{\psi} - \boldsymbol{\psi}_e), \mathbf{A}_e = \frac{\partial \mathbf{K}_t \ddot{\boldsymbol{\psi}}}{\partial \boldsymbol{\psi}} \quad (3.31)$$

où $\mathbf{K}_t = \text{diag}(k_{1t}, \dots, k_{nt})$ et la matrice \mathbf{A}_e se construit de la manière suivante,

$$\mathbf{A}_e(i, j) = \begin{cases} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \phi_{ik} c_{ik}, & i = j \\ -\phi_{ij} c_{ij}, & i \neq j \end{cases} \quad (3.32)$$

avec $c_{ij} = \cos(\psi_i - \psi_j)$, $\phi_{ij} = \frac{k_{ib} k_{jb} k_i k_j}{k_b}$ et $k_b = \sum_{i=1}^n k_{ib}$

Le calcul se poursuit par la réécriture du système d'équations (3.31) sous forme d'un système matriciel du premier ordre (3.33)

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\Gamma}_e \mathbf{x} \quad (3.33)$$

avec

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi} - \boldsymbol{\psi}_e \\ \mathbf{K}_t \dot{\boldsymbol{\psi}} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

et

$$\boldsymbol{\Gamma}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{K}_t^{-1} \\ \mathbf{A}_{e_{n \times n}} & \mathbf{0}_{n \times n} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Cette équation différentielle a pour solution

$$\mathbf{x}(s_2) = e^{l_s \Gamma_e} \mathbf{x}(s_1) \quad (3.36)$$

entre deux portions d'abscisses curvilignes s_1 et s_2 . Si nous considérons maintenant un robot composé de n sections de longueurs l_n où le nombre de tubes reste constant, le système d'équations (3.37) est alors obtenu, représentant l'angle et le moment par continuité entre chacune des n portions du robot.

$$\begin{cases} \mathbf{x}(l_1) = e^{l_1 \Gamma_{1,e}} \mathbf{x}(0) \\ \dots \\ \mathbf{x}\left(\sum_{i=1}^j l_i\right) = e^{l_j \Gamma_{j,e}} \mathbf{x}\left(\sum_{i=1}^{j-1} l_i\right) \\ \dots \\ \mathbf{x}\left(\sum_{i=1}^n l_i\right) = e^{l_n \Gamma_{n,e}} \mathbf{x}\left(\sum_{i=1}^{n-1} l_i\right) \end{cases} \quad (3.37)$$

ce qui nous conduit alors à l'équation (3.38) après multiplication et simplification des équations.

$$\mathbf{x}(L) = \mathbf{P} \mathbf{x}(0) \quad (3.38)$$

où $\mathbf{P} = e^{l_n \Gamma_{n,e}} \dots e^{l_i \Gamma_{i,e}} \dots e^{l_1 \Gamma_{1,e}}$ et $L = \sum_{i=1}^n l_i$

Sous forme matricielle, les conditions limites à l'extrémité proximale du robot (3.23) peuvent être réécrites sous la forme

$$\mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} -\mathbf{B} \mathbf{K}_t^{-1} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} (\mathbf{K}_t \dot{\boldsymbol{\psi}})(0) \quad (3.39)$$

où $\mathbf{B} = \text{diag}(\beta_1, \dots, \beta_n)$.

En substituant (3.39) dans (3.38), on obtient alors

$$\mathbf{x}(L) = \mathbf{W} (\mathbf{K}_t \dot{\boldsymbol{\psi}})(0) \quad (3.40)$$

où

$$\mathbf{W} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} -\mathbf{B} \mathbf{K}_t^{-1} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_2 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

avec W_1 et W_2 deux matrices de dimensions $n \times n$. La moitié inférieure de la matrice W , notée W_2 dans la littérature [Hendrick 2015, Gilbert 2016], contient la condition de moment à l'extrémité distale du robot ($s = L$), qui doit être nul pour que le robot soit stable. Afin d'obtenir cette stabilité, la condition $\det(W_2) > 0$ est alors formulée [Hendrick 2015, Gilbert 2016]. Nous disposons donc d'un critère permettant d'évaluer la stabilité d'un RTC durant son déploiement, par l'étude du signe de ce déterminant. Il est directement utilisable dans le cas de RTC se déployant ALFI, et nous permet de juger de la capacité d'un robot à se déployer de cette manière, sans quitter la forme plane souhaitée.

3.5 Synthèse géométrique pour un déploiement ALFI

Dans le cadre d'un déploiement ALFI et en l'absence d'instabilités, le modèle géométrique sans torsion n'introduit aucune approximation dans l'estimation de la forme, et peut donc être exploité pour rechercher la géométrie des tubes d'un RTC, i.e réaliser sa synthèse. Il a été remarqué, lors de la présentation de ce modèle géométrique, que l'assemblage concentrique de n tubes à courbure constante forme un robot composé de n sections à courbure constante. Il s'agit là d'un maximum, atteint lorsque les longueurs des tubes sont différentes. Ces n sections sont échelonnées en nombre de tubes décroissant, la section proximale du robot contenant n tubes et la section distale un seul. Partant de ce constat, nous proposons ici une méthodologie de synthèse simple, pour trouver la géométrie d'un nombre minimal de tubes respectant une forme de robot identifiée à partir des contraintes anatomiques, constituée de portions à courbure constante.

Notons l_j la longueur d'une section à courbure constante du robot et γ_j sa courbure, $j \in [1, n]$ désignant l'index des sections avec $j = 1$ l'extrémité distale et $j = n$ l'extrémité proximale. Notons $L_i + \beta_i$ les longueurs utiles des tubes du robot et κ_i leurs courbures, avec $i \in [1, n]$ désignant l'index des tubes avec $i = 1$ le tube intérieur et $i = n$ le tube extérieur. Ce paramétrage est visible sur la Figure 3.10.

La synthèse peut être réalisée par diamètre de tube croissant, de l'extrémité distale à l'extrémité proximale du robot. Le principe de résolution est le suivant :

- la section distale du robot ne contenant qu'un seul tube, la courbure κ_1 de ce dernier

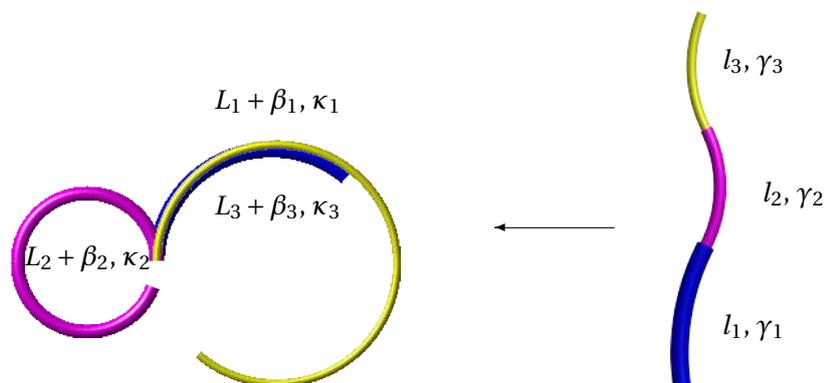


FIGURE 3.10 – Illustration de la courbure résultante d'un assemblage de 3 tubes.

doit alors être égale à la courbure γ_1 de cette première section. Quant à la section suivante, elle est composée des tubes 1 et 2, dont une a été identifiée précédemment. Connaissant la courbure de cette section, il est alors possible de trouver la courbure du tube 2. La résolution continue ainsi jusqu'à la détermination de la courbure du $n^{\text{ème}}$ tube,

- les longueurs déployées des tubes sont obtenues par sommation des longueurs des sections à courbure constante du robot où ces tubes sont présents. Le calcul de courbure et de longueur des tubes est donné par le système d'équations (3.42). Une valeur de courbure négative est associée à un angle $\psi_i = \pi$ rad à la base du tube d'index i , alors qu'une valeur positive est associée à une valeur $\psi_i = 0$ rad.

$$\begin{cases} L_i + \beta_i = \sum_{j=i}^n l_j \\ \kappa_1 = \gamma_n \quad \text{et} \quad \kappa_{j,j>1} = \frac{1}{E_j I_j} \left(\sum_{i=1}^j E_i I_i \gamma_{n+1-j} - \sum_{i=1}^{j-1} E_i I_i \kappa_i \right) \end{cases} \quad (3.42)$$

La méthode de synthèse proposée permet alors de réaliser la synthèse de la géométrie des tubes d'un RTC afin de respecter une forme identifiée au préalable, composée de portions à courbure constante arrangées dans un plan. Il s'agit là d'un premier élément pour réaliser la synthèse de RTC à partir de données anatomiques. Tout élément additionnel contenu dans le jeu de tubes, comme une fibre optique dans le cas de notre application, peut être assimilé à un tube supplémentaire, et pris en compte au moment de cette résolution. Aussi, la raideur en flexion d'une fibre optique est faible devant celle d'un tube de RTC, et leurs courbures calculées par la méthode précédente ne varie pas significativement lors de l'ajout d'une fibre optique. En effet, en titre de comparaison, une fibre optique commerciale Corning de type SMF-28 avec revêtement a une raideur en flexion de 0.01 GPa.mm⁴ (diamètre de 0.245 mm, module de Young de 69.22 GPa, issu de [Antunes 2012]), alors qu'un tube en Nitinol standard a une raideur en flexion 4.2 GPa.mm⁴ (diamètres considérés de 1.0 mm intérieur, 1.2 mm extérieur, et module de Young de 80 GPa).

3.6 Variables de conception des robots à tubes concentriques

Un RTC est défini par le nombre, la courbure et la longueur des tubes le composant, leurs diamètres intérieurs et extérieurs, et les matériaux utilisés. Nous remarquons que le nombre de tubes, leurs longueurs et raideurs interviennent dans les expressions mises en place pour la synthèse au paragraphe précédent. Pour des tubes cylindriques conventionnels, la raideur est liée à leurs diamètres et matériaux. Les variables de conception usuellement définies dans la synthèse des RTC sont alors les matériaux, diamètres, longueurs, courbures et nombre de tubes.

Dans le cadre de ce travail, une variable de conception moins fréquemment exploitée est considérée, à savoir l'anisotropie des tubes. Il apparaît dans les expressions analytiques (3.27) et (3.41), que les coefficients $E_i I_i$ et $G_i J_i$, respectivement la raideur en flexion et en torsion



FIGURE 3.11 – Illustration de la forme de motif utilisée pour la structuration des tubes d’un RTC.

des tubes, jouent un rôle dans la stabilité des RTC. Ces paramètres pilotent notamment la stabilité dans le cas à 2 tubes présenté précédemment, avec le paramètre δ (3.28) rappelé ici :

$$\delta = L^2 \kappa_1 \kappa_2 \frac{E_1 I_1 E_2 I_2 (G_1 J_1 + G_2 J_2)}{G_1 J_1 G_2 J_2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)}$$

L’utilisation de tubes rendus anisotropes par modification de leur structure permet de modifier le ratio λ entre la raideur en flexion $E_i I_i$ et en torsion $G_i J_i$ d’un tube d’index i . L’anisotropie des tubes a donc un impact sur la stabilité des RTC.

3.6.1 L’anisotropie comme variable de conception

L’introduction de l’anisotropie comme variable de conception a été proposée pour la première fois dans [Azimian 2014, Kim 2014, Lee 2015]. Dans les travaux cités, la modification des propriétés des tubes est obtenue par création dans un matériau isotrope d’un motif périodique, comme illustré sur la Figure 3.11. Le ratio entre raideur en flexion et en torsion des tubes peut alors être abaissée. Il a notamment été démontré dans [Azimian 2014] que des phénomènes de détente, correspondant à un saut brutal du robot entre deux positions d’équilibre stables, peuvent être supprimés, conduisant à une stabilité du robot sur tout son espace de travail. C’est l’influence et la pertinence de l’anisotropie qui sont jugés dans la suite de ce chapitre, par sa mise en place dans un exemple concret de déploiement ALFI.

3.6.2 Anisotropie et stabilité des robots à tubes concentriques

Afin d’étudier l’influence de l’anisotropie des tubes sur la stabilité et la forme des RTC, un chemin répondant aux contraintes de déploiement ALFI est sélectionné sur un modèle 3D de fosses nasales. Il est constitué de portions à courbure constante permettant de rejoindre l’entrée de la fente olfactive à partir d’un point situé au niveau de l’orifice de la narine. A partir de la forme du robot identifiée, la synthèse de la courbure et de la longueur de ses tubes est réalisée par utilisation de la méthode présentée au paragraphe 3.5. Les diamètres des portions à courbure constante sont sélectionnés en se basant sur la largeur disponible à l’endroit où se trouvent ces portions. Le matériau choisi est le Nitinol, qui possède un module de Young de 80 GPa et un coefficient de Poisson de 0.33. Les paramètres des tubes

sont visibles dans le Tableau 3.2. La valeur de λ standard, sans structuration des tubes, est de $\lambda = EI/GJ = 1 + \nu = 1.33$, où ν est le coefficient de Poisson.

Tube n°	Diamètre intérieur (mm)	Diamètre extérieur (mm)	Longueur (mm)	Courbure (mm^{-1})	ψ (rad)
1	0.880	1.200	45.8	0.059	0
2	1.296	1.524	31.6	0.136	π
3	1.760	2.184	17.3	0.066	0

Tableau 3.2 – Caractéristiques des tubes du robot après synthèse à partir de la forme identifiée.

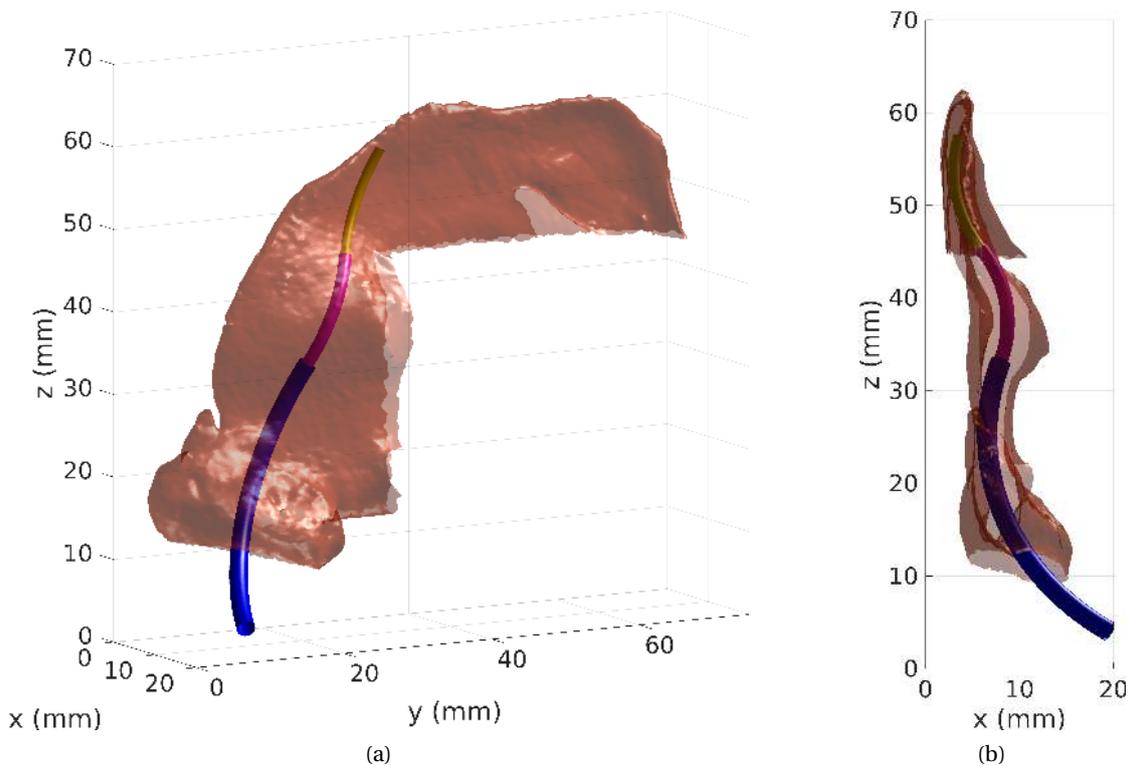


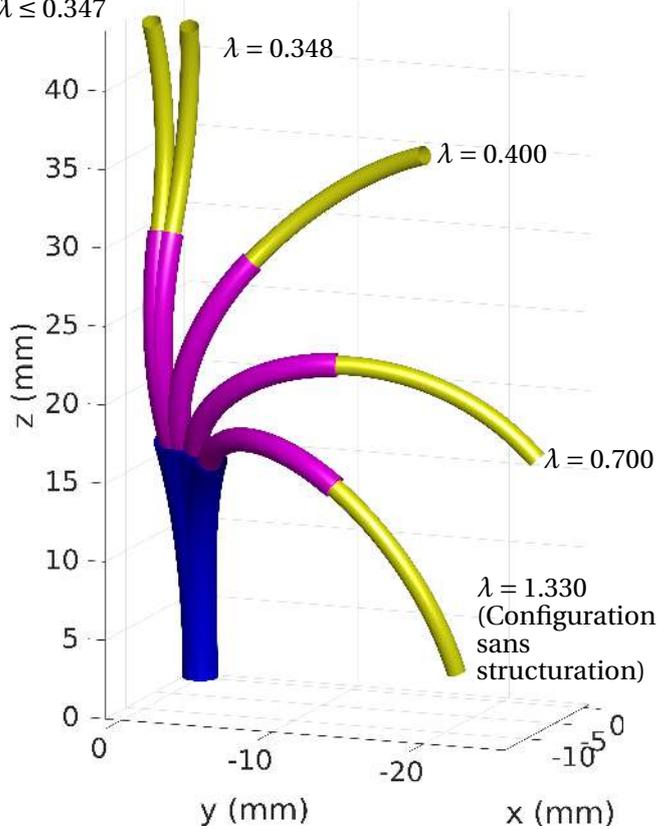
FIGURE 3.12 – Forme de robot identifiée permettant de rejoindre la fente olfactive à partir de l'entrée de la narine, sans collision avec la fosse nasale : (a) vue en perspective et (b) vue de face.

3.6.2.1 Sans longueurs de transmission

L'impact de l'anisotropie sur la stabilité du RTC durant déploiement est d'abord étudié sans prise en compte des longueurs de transmission des tubes. Nous considérons alors qu'ils sont tous manipulés au niveau de l'abscisse curviligne $s = 0$. Le robot issu de la phase de synthèse est représenté avec le modèle géométrique prenant en compte les interactions en flexion des tubes. Le robot adopte alors la forme souhaitée, comme visible sur la Figure 3.12 et la Figure 3.13, avec l'annotation "Configuration de référence".

Configuration de référence

$\lambda \leq 0.347$



λ	Erreur maximale durant déploiement (mm)
0.200	0.00
0.347	0.00
0.348	2.51
0.400	19.24
0.700	36.49
1.330	44.96

Tableau 3.3 – Valeurs de l'erreur de position mesurée entre la forme reconstruite des robots et la configuration de référence pour différentes valeurs de λ .

FIGURE 3.13 – Forme des robots pour différentes valeurs de λ .

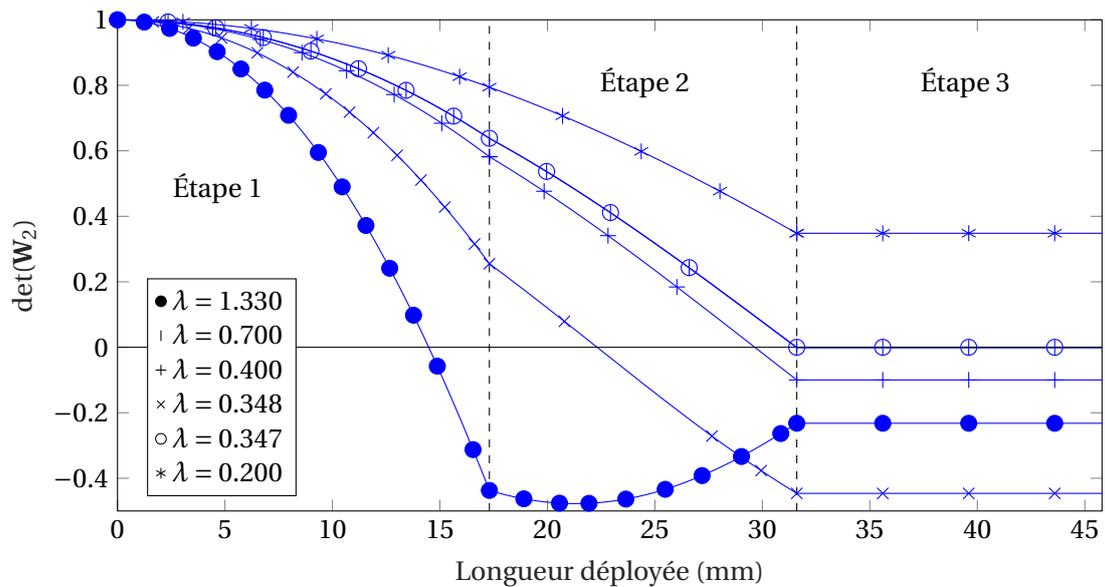


FIGURE 3.14 – Graphique montrant l'évolution de $\det(W_2)$ pour différentes valeurs de λ .

Cependant, en explorant les configurations possibles du robot avec le modèle prenant en compte les interactions en torsion, une solution non triviale est trouvée, visible sur la Figure 3.13, avec l'annotation "Configuration sans structuration". L'instabilité de la configuration avec tubes en opposition est confirmée par le calcul du déterminant de la matrice \mathbf{W}_2 (voir section 3.4.2), qui est tracé pour toute la phase de déploiement du robot en Figure 3.14. La courbe notée $\lambda = 1.33$, correspondant à des tubes non structurés, passe dans les ordonnées négatives au cours du déploiement, ce qui marque l'instabilité de cette configuration.

Analysons maintenant l'impact de l'anisotropie sur la stabilité de cette configuration. La valeur minimale expérimentale de λ atteinte dans la littérature est de 0.344 [Lee 2015]. Nous étudions alors le comportement du robot pour des valeurs de λ comprises entre 1.33 et 0.344.

Les erreurs maximales durant déploiement sont reportées dans le Tableau 3.3 pour différentes valeurs de λ . Pour chacune de ces valeurs, les formes de robot sont visibles sur la Figure 3.13. Nous remarquons que les erreurs maximales sont obtenues en fin de déploiement. De manière complémentaire, la Figure 3.14 montre l'évolution de $\det(\mathbf{W}_2)$ en fonction de la longueur déployée du robot. Il est visible que le robot gagne en stabilité lorsque la valeur de λ décroît. Une résolution formelle permet de calculer la valeur limite de λ assurant la stabilité du robot, telle que $\det(\mathbf{W}_2) = 0$. Cette valeur de λ est égale à 0.347, donc au dessus de la valeur minimale obtenue dans l'état de l'art, ce qui signifie qu'il est possible de rendre le robot stable durant la totalité de son déploiement par structuration des tubes.

3.6.2.2 Avec longueurs de transmission

En pratique, les tubes ne peuvent pas tous être saisis au niveau du point d'abscisse curviligne $s = 0$. En effet, chacun d'entre eux doit être découvert sur une portion de longueur non nulle afin de permettre leur saisie. De plus, ils sont typiquement saisis à un endroit fixe, qui reste le même durant toute la phase de manipulation. Avant le déploiement du robot, le point de saisie du tube i doit donc être situé à une abscisse curviligne $\beta_i < 0$ pour que sa course soit non nulle. Dans la littérature, les tubes sont donc saisis à leurs extrémités proximales. Pour notre étude, nous considérons ici des valeurs minimales pour les longueurs de transmission, qui deviennent alors nulles en fin de déploiement. Les longueurs totales L_i des tubes restent donc inchangées. Les points de saisie des tubes suivant ce procédé sont représentés sur la Figure 3.15. Nous traçons alors la valeur du déterminant de la matrice \mathbf{W}_2 durant le déploiement du RTC, avec la valeur de $\lambda = 0.347$ assurant la stabilité précédemment, sans considérer les longueurs de transmission. Nous observons une instabilité durant le déploiement, avec les configurations menant à des erreurs maximales représentées sur la Figure 3.16. Les valeurs des erreurs correspondantes sont reportées dans le Tableau 3.4. Contrairement au cas où les longueurs de transmission ne sont pas prises en compte, l'erreur est maximale durant la phase de déploiement, et non à la fin. La valeur précédemment identifiée de λ ne suffit alors pas à assurer la stabilité du robot lorsque les longueurs de transmission sont considérées. Nous abaissons alors sa valeur en dessous de la valeur minimale de 0.344 obtenue dans l'état de l'art. Pour une valeur de 0.3, une erreur subsiste, visible sur la Figure 3.16 et reportée dans le Tableau 3.4. La valeur limite assurant la stabilité est évaluée. Elle est égale à 0.273. Celle-ci se situe bien en dessous de la valeur minimale obtenue dans l'état de l'art, et ne peut pas être

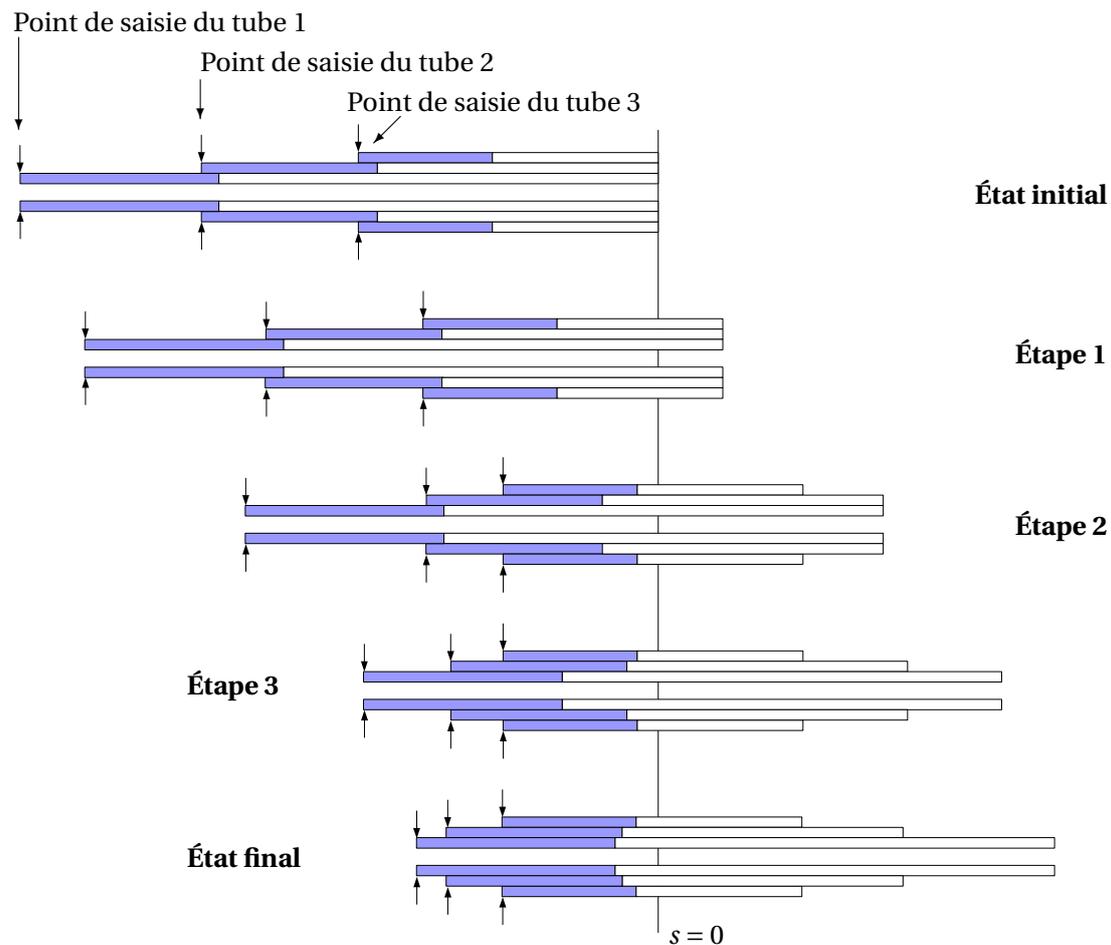


FIGURE 3.15 – Illustration des points de saisie aux extrémités proximales des tubes lors d’un déploiement ALFI.

obtenue sans un travail supplémentaire sur la structuration des tubes.

3.6.3 Pertinence de l’anisotropie pour notre application

Les exemples développés permettent de voir le bénéfice que l’on peut attendre d’une modification des tubes pour les rendre anisotropes. Deux remarques peuvent être faites quant à l’applicabilité de l’approche dans notre contexte :

- Tout d’abord, nous nous apercevons que sans prise en compte des longueurs de transmission, la valeur de λ assurant la stabilité du robot est très proche de la valeur minimale obtenue dans l’état de l’art. La prise en compte des longueurs de transmission étant nécessaire pour l’actionnement d’un RTC, la valeur de λ nécessaire pour assurer la stabilité du RTC durant déploiement passe alors en dessous de la valeur minimale obtenue dans la littérature.

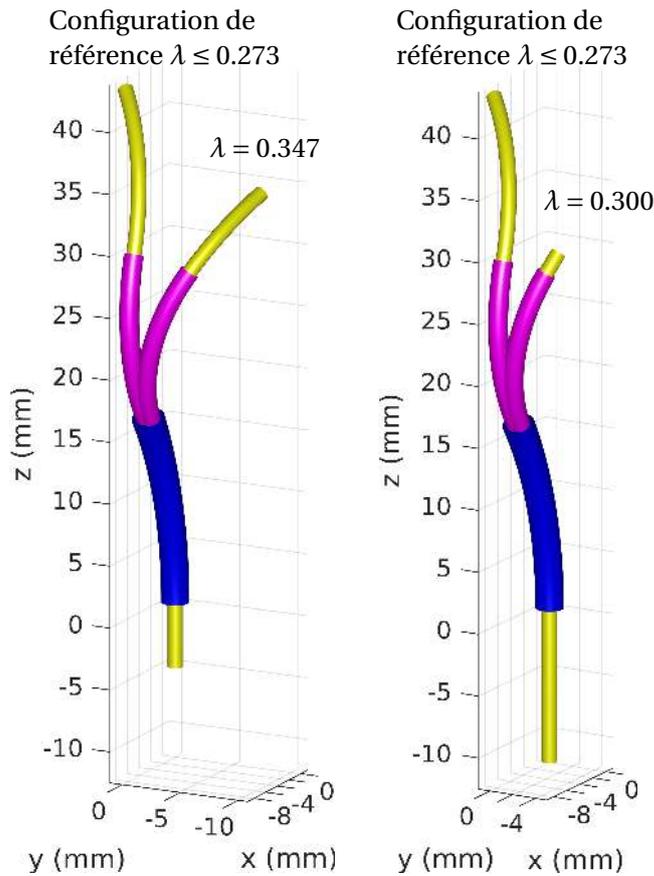


FIGURE 3.16 – Forme des robots pour différentes valeurs de λ .

λ	Erreur maximale durant déploiement (mm)
0.200	0.00
0.273	0.00
0.300	4.53
0.347	10.93

Tableau 3.4 – Valeurs de l'erreur de position mesurée entre la forme reconstruite des robots et la configuration de référence pour différentes valeurs de λ .

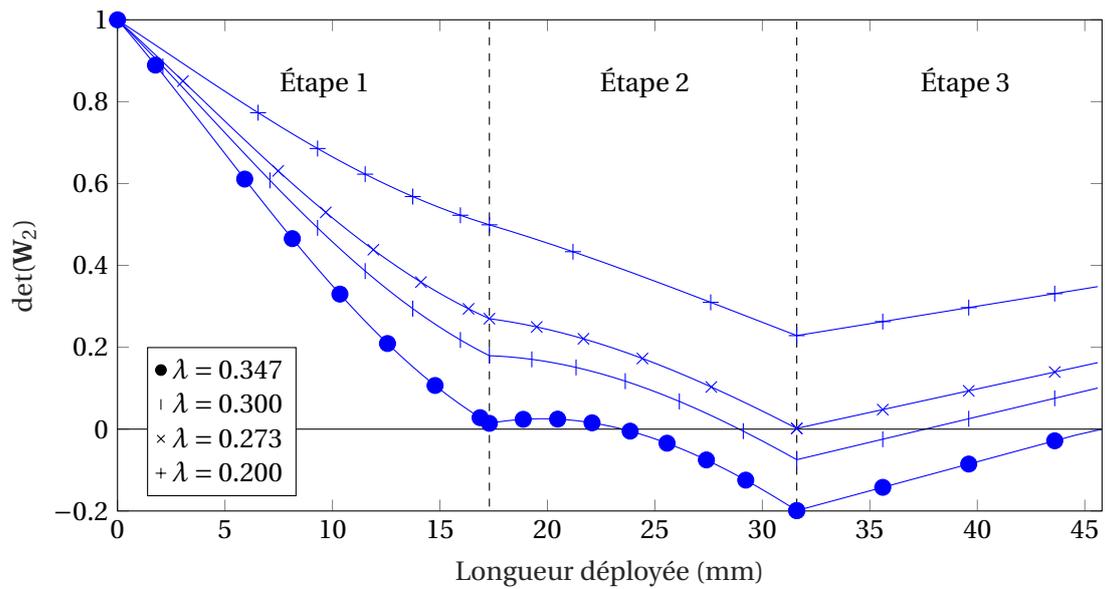


FIGURE 3.17 – Graphique montrant l'évolution de $\det(W_2)$ pour différentes valeurs de λ .

- Ensuite, la structuration des tubes est réalisée par découpe de motifs sur ces derniers, ce qui n'est pas sans difficulté à l'usage : des blocages relatifs entre tubes durant leur manipulation ont été constatés dans [Lee 2015]. Des feuilles de Téflon ont alors été insérées entre les tubes pour éviter ces blocages. Cependant, l'utilisation de telles feuilles augmente l'encombrement du système, et des copeaux de Téflon ont été observés après manipulation répétée des tubes, due à un frottement important entre ces feuilles et les tubes.

En conséquence, il semble souhaitable de considérer la synthèse de RTC avec un déploiement ALFI sans introduire d'anisotropie dans les tubes. Cette nouvelle variable de conception ne sera alors utilisée qu'en dernier recours, s'il n'est pas possible d'assurer la stabilité du robot d'une autre manière.

3.7 Synthèse du chapitre 3

Dans ce troisième chapitre, nous nous sommes intéressés au mode de déploiement ALFI des RTC, aux outils de modélisation pertinents pour ce type de déploiement, ainsi qu'à leurs variables de conception qu'il s'agira de manipuler pour leur synthèse.

Dans un premier temps, les contraintes de déploiement ALFI ont été extraites de la littérature. Le cas de tubes à courbure constante formant un robot plan a été retenu. Ensuite, deux modèles géométriques directs ont été présentés, le premier modélisant les interactions en flexion entre les tubes uniquement, et permettant de modéliser un RTC se déployant ALFI. Le second intègre en plus les interactions en torsion des tubes, permettant de mesurer l'erreur de déploiement pouvant survenir en cas d'instabilité du robot. Des outils analytiques ont été introduits, permettant de qualifier leur état de stabilité. Suite à cela, une méthode de synthèse a été proposée afin de calculer la longueur et la courbure de tubes permettant d'obtenir une forme de robot identifiée. Il s'agit là d'un premier pas vers la synthèse de RTC à partir de données anatomiques, l'identification de formes de robots restant à faire sur les données anatomiques 3D. Cette problématique fera l'objet du chapitre suivant. Enfin, une réflexion sur les variables de conception des RTC exploitables a été conduite, en s'intéressant à l'introduction d'anisotropie dans le comportement des tubes. L'intérêt de cette variable a été discutée à la lumière des modèles géométriques et du critère de stabilité analytique. Sa pertinence a été montrée, mais les valeurs pour l'instant limitées du rapport λ caractérisant le ratio de raideur en flexion et en torsion et les problèmes techniques de faisabilité sont limitants. Ils nous conduisent à ne pas la considérer initialement dans la suite de ce travail.

4 Synthèse des robots à tubes concentriques à partir de données anatomiques 3D

"Il n'y a pas de grande tâche difficile qui ne puisse être décomposée en petites tâches faciles."

Matthieu Ricard, moine bouddhiste tibétain, auteur et photographe

Sommaire du chapitre

4.1 État de l'art	70
4.2 Proposition d'une méthode de synthèse	74
4.3 Application	79
4.4 Validations expérimentales	88
4.5 Synthèse du chapitre 4	93

Ce quatrième chapitre traite de la synthèse de RTC à partir d'images médicales. Un état de l'art sur les méthodes de synthèse à partir de données anatomiques 3D est tout d'abord dressé. Il fait apparaître des lacunes par rapport à notre objectif, qui nécessite la prise en compte de la variabilité inter-sujets, un déploiement de type ALFI, et une prise en compte des longueurs de transmission et de la stabilité du robot au cœur même de la synthèse du robot. Une nouvelle méthode de synthèse est donc présentée, intégrant tous ces éléments. Elle est appliquée à l'exploration des cellules olfactives. Une validation expérimentale est alors présentée, qui permet de vérifier le respect du déploiement ALFI.

4.1 État de l'art

4.1.1 Méthodes de synthèse existantes

Les méthodes de synthèse existantes peuvent être séparées en deux catégories, avec des approches par discrétisation, et des approches par optimisation, où des fonctions de coût sont utilisées.

4.1.1.1 Approches par discrétisation

La méthode de synthèse proposée dans [\[Burgner 2013b\]](#) vise à balayer un volume donné. Le travail est illustré avec la chirurgie transnasale de l'hypophyse, une glande située à la base du cerveau (Figure 4.1).

La synthèse est abordée avec la détermination d'un RTC composé de trois tubes. Celle de la section proximale du robot est simplifiée par l'adoption d'un tube extérieur très rigide par rapport à l'ensemble de ceux qu'il contient, et qui permet d'arriver directement sur le site de l'opération. Il reste alors à traiter la synthèse des sections distales du robot, qui vont permettre l'obtention de la dextérité nécessaire à la réalisation de la tâche. Pour ce faire, une métrique est définie, permettant de quantifier le volume balayé par les sections distales du robot, et de pénaliser les géométries menant à des zones non atteignables à l'intérieur du volume à explorer. Afin de procéder à l'évaluation des robots, leurs espaces de travail sont échantillonnés par discrétisation de l'angle et de la course des tubes. Les voxels, ou "pixels 3D" atteints par l'extrémité distale du robot sont alors connus et permettent de procéder à l'évaluation du volume balayé. Les interférences avec l'environnement ne sont pas étudiées. Un modèle complet prenant en compte les effets de torsion des tubes est utilisé.

Cette approche est intéressante dans la mesure où il est considéré un découplage entre une section proximale modélisée sous la forme d'un tube droit, et des sections distales responsables de l'intervention sur site. Ce type de découplage est également souhaité dans notre cas, et l'utilisation d'un tube droit, très rigide devant les tubes qu'il entoure, est une piste d'intérêt à étudier.

Une seconde approche [\[Torres 2012\]](#) s'intéresse à l'atteinte de différents sites ponctuels repérés à l'intérieur d'un sujet, sans interaction avec l'environnement. L'illustration de la méthode est faite avec le cas d'une navigation dans le poumon.

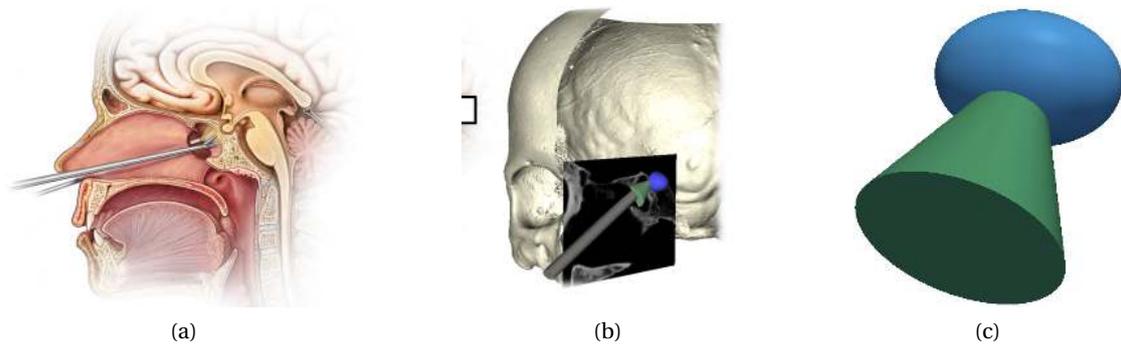


FIGURE 4.1 – Synthèse de RTC pour la chirurgie transnasale [Burgner 2013b], avec (a) accès à l'hypophyse avec le robot, (b) approximation de l'espace de travail requis pour la tâche, et (c) paramétrisation de l'espace de travail.

La synthèse du robot est spécifique au sujet considéré. Le modèle géométrique utilisé prend en compte les effets de torsion des tubes. Étant donné la complexité du problème de synthèse, des méthodes d'échantillonnage sont utilisées pour la planification de chemin et pour la synthèse du robot. Ces deux problèmes sont résolus simultanément par l'utilisation de RRT (Rapidly exploring Random Trees) pour l'exploration de configurations d'un même robot pouvant mener à la cible sans interaction avec l'environnement. Celui-ci est augmenté dans le sens où il intègre également des robots différents, ce qui permet d'explorer plusieurs géométries. Cette approche permet de garantir que s'il existe un robot capable de répondre à la problématique de synthèse, l'algorithme mis en place le trouvera au bout d'un temps indéterminé, comme il s'agit d'une approche probabiliste.

L'approche développée est intéressante, mais comporte une faiblesse connue, celle de la présence d'optimums locaux, vers lesquels l'algorithme de recherche peut converger.

Le travail présenté dans [Baykal 2015] est une extension du travail précédent [Torres 2012], le but étant cette fois-ci de trouver un ensemble de robots maximisant l'exploration d'un volume donné. Le problème est abordé de deux manières différentes : il est possible de maximiser l'espace exploré avec un nombre de robots donné, ou alors fournir à l'algorithme un pourcentage de volume balayé à obtenir, et chercher les caractéristiques et le nombre de robots permettant d'atteindre cet objectif.

Cette approche est une extension de l'approche présentée par Torres, mais l'utilisation de deux RRT est remplacée par un algorithme nommé ASA (Adaptated Simulated Annealing, recuit simulé adapté) pour générer de nouveaux robots, et un RRT est utilisé pour explorer les différentes configurations de ces robots susceptibles d'atteindre les cibles. L'utilisation de l'algorithme ASA permet d'obtenir des géométries de robots intéressantes plus rapidement, et d'éviter l'influence de la présence d'optimums locaux.

4.1.1.2 Approches par optimisation

Dans [Bedell 2011] est présenté une synthèse de RTC permettant une navigation sans contact dans des zones variées du corps humain. Les sections proximales permettent une arrivée sur le site d'intervention, et les sections distales un déplacement dans un espace de travail spécifique. Ce travail est illustré par un cas réaliste de chirurgie cardiaque (Figure 4.2). Le robot est décomposé en deux parties, et la synthèse de ces deux parties est réalisée de manière séquentielle. Tout d'abord, la synthèse de la partie distale, appelée section de manipulation, est réalisée. Pour cela, un ensemble de positions et d'orientations de l'extrémité distale de cette section est donné, ainsi qu'une architecture de robot. Il en ressort la courbure et la longueur des tubes à utiliser, ainsi que la position et l'orientation de son extrémité proximale (noté M sur la figure 4.2). Ensuite, la synthèse de la section de navigation est abordée. Pour cela, un point d'insertion (notée B sur la figure 4.2) et une orientation en ce point sont donnés, ainsi que la position (notée M) et l'orientation de l'extrémité distale de cette section, et une architecture. La synthèse permet alors d'obtenir la courbure et la longueur des tubes de cette section. Ces synthèses successives sont réalisées par des processus d'optimisation, avec des fonctions de coût permettant de pénaliser l'erreur de pose de l'extrémité distale du robot, ainsi que les interactions avec l'environnement. Ces interactions sont représentées par une information binaire permettant de caractériser le contact ou le non-contact. Une mesure de distance point-à-point permet en plus de caractériser l'interpénétration des volumes en cas de contact. Le modèle utilisé pour représenter le RTC ne prend pas en compte les effets de torsion des tubes pour des raisons de rapidité de calcul, les équations du modèle étant alors algébriques.

Cette méthodologie présente l'inconvénient de ne pas utiliser un modèle géométrique complet modélisant les effets de la torsion. Il s'agit d'un inconvénient majeur étant donné l'importance et l'impact de ce phénomène sur la forme résultante d'un RTC. Bien que les auteurs nous signalent que cet impact est faible pour des tubes de courbure et de longueur faibles, il semble difficile d'ignorer ses effets. Point intéressant, un découpage du robot en une

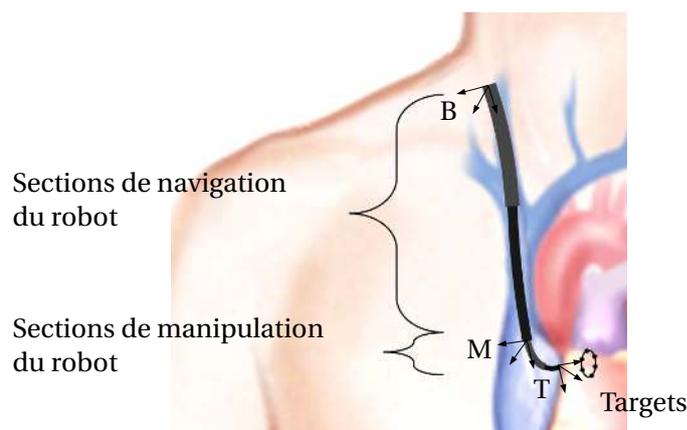


FIGURE 4.2 – Découpage du robot en une section de navigation et une section de manipulation [Bedell 2011].

section de navigation et une section de manipulation est réalisé, qui a inspiré dans notre cas le découpage de notre RTC en une section de navigation et une section d'exploration.

Un second travail [Bergeles 2015] prolonge l'approche [Bedell 2011], avec le même découpage du robot en une section de navigation et une section de manipulation (voir figure 4.3). La synthèse est réalisée en deux étapes, avec tout d'abord l'utilisation d'un modèle simplifié sans prise en compte de la torsion des tubes, puis ensuite un raffinement du robot obtenu avec un modèle plus complet modélisant les effets de torsion. Il s'agit de la première approche incluant des critères de stabilité au sein même du processus de conception de RTC. Une autre différence avec l'approche développée par [Bedell 2011] concerne la détection de contacts avec l'environnement, réalisée avec la méthode APF (Artificial Potential Field, champ de potentiel artificiel). De nombreuses autres contraintes peuvent être utilisées et intégrées dans la fonction de coût pour l'optimisation. Sont proposées notamment des pénalités sur la pose de l'extrémité distale du robot, sa longueur et sa courbure afin de maximiser la stabilité du robot selon des règles simples. Il s'agit à ce jour de l'une des méthodes de synthèse les plus complètes pour les RTC.

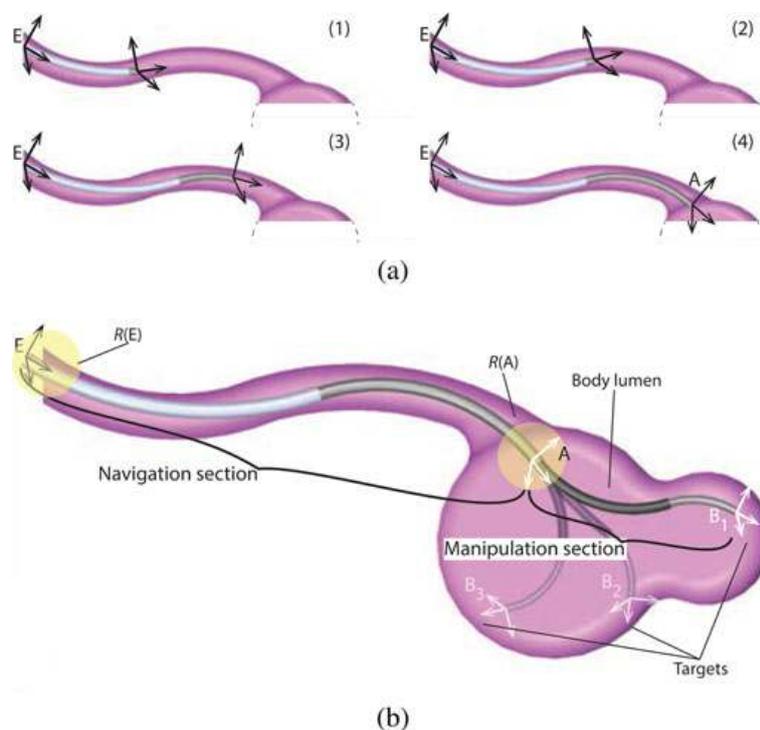


FIGURE 4.3 – (a) Extension télescopique de la section de navigation depuis le point d'insertion (repère E) jusqu'à l'entrée du site (repère A), (b) Déploiement de la section de manipulation pour rejoindre les cibles (repères B_i) [Bergeles 2015].

4.1.2 Analyse critique et positionnement

Nous pouvons tout d'abord noter que la notion de variabilité inter-sujets est absente de ces méthodes, avec une synthèse sujet-spécifique. Ensuite, nous remarquons que le type de déploiement envisagé dans les méthodes existantes n'est pas de type ALFI, même si les règles de déploiement associées sont énoncées et les principes de bases exploités [Bergeles 2015]. Enfin, aucune notion de stabilité n'est présente dans ces méthodes, ce qui peut conduire à des robots dont la forme s'éloigne de manière conséquente de la forme prévue, comme montré dans l'exemple du chapitre 3, sur la Figure 3.9. Par la même occasion, les longueurs de transmission des tubes, dont la prise en compte est nécessaire à la fois lors de l'utilisation de modèles géométriques avec torsion et des critères de stabilité afin de disposer de données fiables, ne sont pas abordées dans ces approches. Afin de combler ces lacunes, nous allons, dans la suite de ce chapitre, nous attacher à la mise en place d'une méthode de synthèse intégrant ces différents éléments.

Nous pouvons remarquer, dans les approches précédemment listées, que les auteurs s'appuient sur des reconstructions 3D des zones anatomiques à l'intérieur desquelles ils souhaitent naviguer [Butler 2012, Burgner 2011, Baykal, Fischer 2006]. Il s'agit là d'un point intéressant, qui permet de disposer virtuellement d'un environnement complet de navigation, permettant de gérer d'éventuelles collisions. Les modèles 3D de la fosse nasale, construits auparavant, vont être mis avantageusement à contribution afin de réaliser cette tâche, et nous les considérons être une donnée d'entrée à notre méthode.

4.2 Proposition d'une méthode de synthèse

4.2.1 Objectif

L'objectif de la méthode de synthèse développée est d'intégrer d'une part la variabilité inter-sujets, afin de disposer si possible d'un dispositif unique pour inspecter l'ensemble de la population visée, et de prendre en compte les longueurs de transmission et la stabilité du robot au sein de la méthodologie. Celle-ci est également envisagée dans le cadre d'un déploiement ALFI.

4.2.2 Méthode

Le déploiement ALFI rend la synthèse d'un RTC extrêmement spécifique. Rappelons tout d'abord les hypothèses considérées pour la réalisation d'un déploiement de ce type [Bergeles 2015, Gilbert 2015]. Les tubes utilisés doivent être à courbure constante et arrangés dans un plan, avec leurs courbures alignées ou en opposition. Les phénomènes de torsion doivent être absents, et la forme du robot peut alors être décrite par le modèle géométrique en flexion présenté dans le chapitre 3. Or, ce modèle géométrique nous apprend qu'un assemblage de tubes à courbure constante nous donne un robot constitué de portions à courbure constante. Nous pouvons alors en déduire que les formes de robot recherchées sont constituées de portions à courbure constante, orientées entre elles d'un angle de 0 ou π rad, en fonction du sens de courbure de ces portions. Une première étape de notre méthode de synthèse consiste

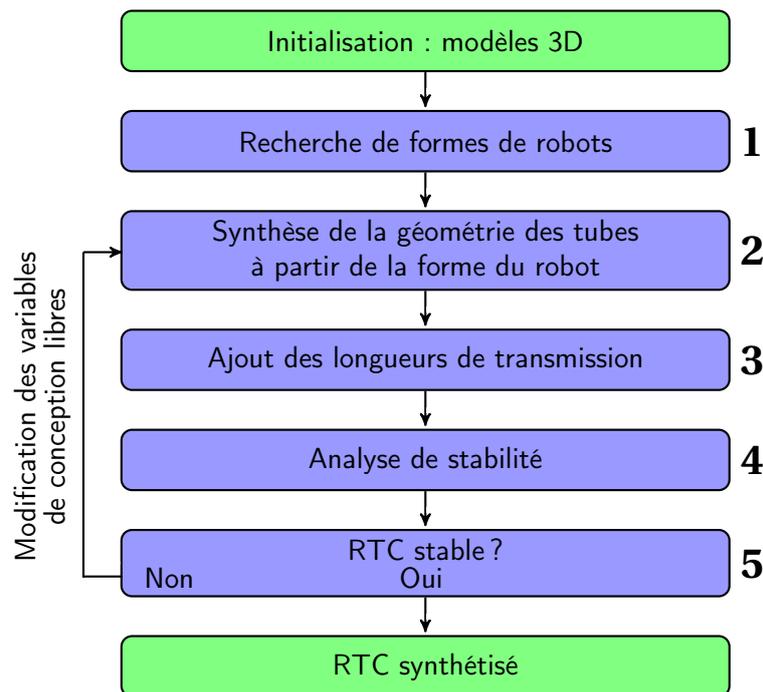


FIGURE 4.4 – Structure de la méthode de synthèse des RTC proposée.

alors à générer des formes de ce type, connues pour permettre un déploiement ALFI. Dans un second temps, une synthèse de la géométrie des tubes à partir de la forme des robots est réalisée. Il s'agit là en fait du travail réalisé dans le chapitre 3, qui trouve sa place et s'intègre parfaitement ici. Suite à cela, des longueurs de transmission doivent être ajoutées afin que le RTC puisse être actionné. S'ensuit, pour terminer, une analyse de la stabilité du robot, permettant de valider le caractère planaire de la forme du robot durant son déploiement. Celle-ci est opérée une nouvelle fois grâce aux outils présentés dans le chapitre 3. L'ensemble de ces quatre étapes est présenté sur l'organigramme de la Figure 4.4. Elles font l'objet de développements spécifiques présentés dans la suite.

4.2.2.1 Recherche de formes de robots

Les formes de robot recherchées sont des concaténations de portions à courbure constante, celles-ci étant arrangées dans un plan, avec une orientation ϕ égale à 0 ou π par rapport à la précédente, en fonction de la direction de courbure souhaitée. Des formes de robot de ce type doivent donc être générées, avant d'opérer des tests de collision sur les modèles 3D représentant les zones anatomiques dans lesquelles le robot doit s'introduire, afin d'évaluer la capacité des robots à se déployer sans contact. Le principe de notre méthode est de discrétiser les courbures définissant les formes des robots. Ceci permet d'obtenir un nombre limité de robots répondant à la tâche de déploiement, et permet facilement de vérifier la compatibilité de ceux-ci avec plusieurs sujets. Cela n'est pas possible a contrario avec une approche par optimisation, où les courbures de robots identifiées seraient différentes pour chaque modèle

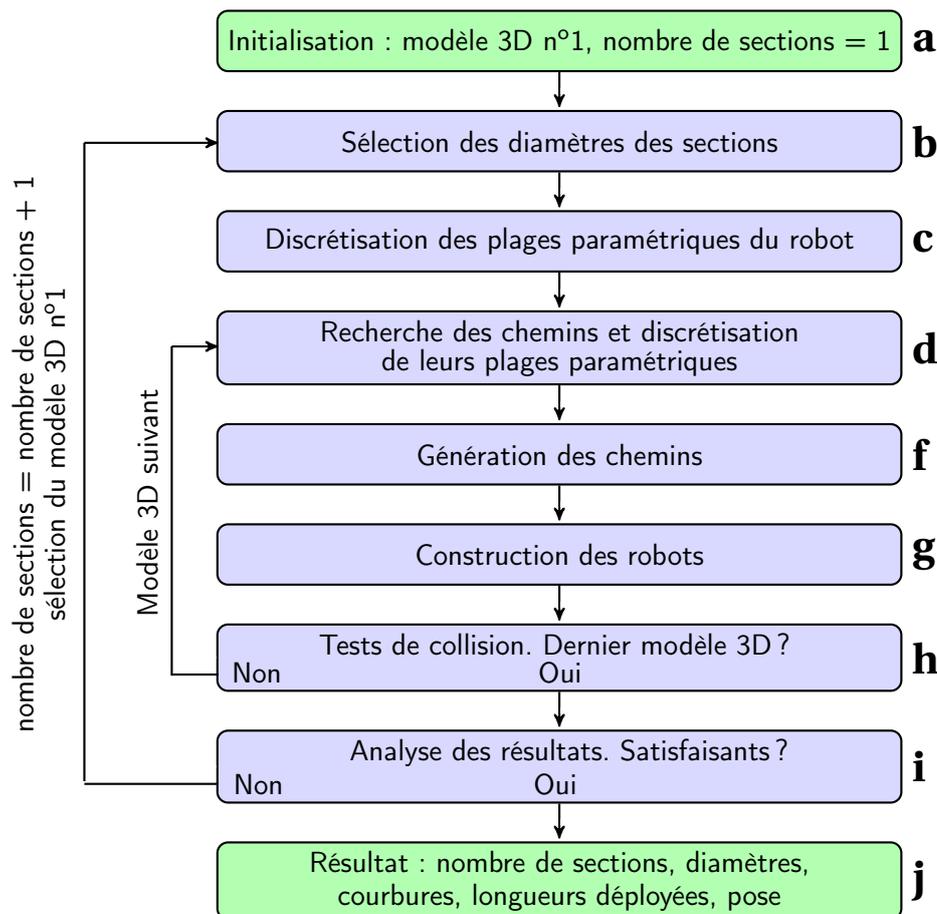


FIGURE 4.5 – Structure de l’approche par recherche de formes de robots.

anatomique. Enfin, par comparaison avec toutes les approches citées précédemment, le déploiement de type ALFI nous permet de tester l’occurrence de collision avec les modèles 3D seulement dans la configuration totalement déployée du robot. En effet, celle-ci correspond à l’enveloppe externe de toutes les configurations successives, qui seront adoptées par le robot durant son déploiement.

L’originalité et la pertinence de notre approche discutées, nous détaillons maintenant toutes les étapes la composant, illustrées sur l’organigramme de la Figure 4.5.

a Initialisation : modèle 3D n°1, nombre de sections = 1 : il s’agit de la phase d’initialisation. La méthode de synthèse proposée prend en compte la variabilité inter-sujets, et accepte de ce fait l’utilisation de multiples modèles 3D représentant les zones anatomiques dans lesquelles s’introduire. Le premier modèle est alors sélectionné pour commencer la recherche de formes. Aussi, concernant le robot, il semble raisonnable de fonctionner par nombre de sections croissant, autrement dit par nombre de tubes croissant, le nombre de tubes étant égal au nombre de sections à courbure constante du robot, comme observé dans le chapitre 3. A performance égale (pour un taux d’inspection semblable des modèles 3D), cela permet d’apporter, à un problème de navigation de RTC donné, la solution la

plus simple qui soit en termes de nombre de tubes à gérer.

- b Sélection des diamètres des sections :** pour un nombre donné n de sections, leurs diamètres d_j doivent être donnés, avec j l'index d'une portion à courbure constante du robot. Pour les robots à tubes concentriques, la contrainte $d_{ext1} < \dots < d_{extj} < \dots < d_{extn}$ est à respecter, et traduit le fait qu'un tube d'index j ne peut être traversé que par un tube de plus petit diamètre.
- c Discrétisation des plages paramétriques du robot :** la discrétisation des plages paramétriques de la forme du robot est maintenant réalisée. Elle consiste à choisir des valeurs discrétisées de courbure pour ses portions courbées. Elles sont à sélectionner en fonction des zones anatomiques dans lesquelles elles se trouveront, de sorte que leurs courbures soient adaptées à l'anatomie. C'est une étape cruciale de la méthodologie, elle permet de prendre en compte la variabilité inter-sujets.
- d Recherche des chemins et discrétisation de leurs plages paramétriques :** le problème géométrique 2D est maintenant posé. Il consiste à contraindre les points de passage des formes de robot au niveau de son point de départ et de son point d'arrivée, et selon les cas à imposer l'orientation au niveau du point d'arrivée. Bien souvent, les points identifiés comme le point d'entrée et le point d'arrivée du robot ne sont pas uniques, de même que l'orientation éventuelle souhaitée. Une tolérance sur ces grandeurs existe. Des plages contenant ces points et orientations sont alors repérées sur les modèles 3D, et discrétisées spatialement selon les coordonnées x , y et z du repère associé.
- e Génération des chemins :** pour chaque combinaison des paramètres discrétisés de points de passage et du robot, un chemin est construit. La forme du robot étant planaire, le calcul du chemin se ramène à un problème de géométrie 2D.
- f Construction des robots :** pour chacun des chemins générés, une forme de robot est construite. Sa fibre neutre est située sur le chemin, et les diamètres utilisés pour chacune de ses sections à courbure constante sont ceux choisis lors de l'étape **b**.
- g Tests de collision :** pour chacune des formes construites, un test de collision est effectué avec le modèle 3D correspondant. Certaines zones anatomiques peuvent permettre un contact, alors que ce n'est pas le cas pour d'autres. Ces différentes régions ont été différenciées au préalable.
- h Analyse des résultats :** l'occurrence de collisions pour tous les modèles 3D à disposition et avec le nombre de sections à courbure constante du robot est analysée. Un critère de satisfaction peut être défini comme suit : si la cible peut-être atteinte pour un nombre suffisamment grand de modèles 3D et avec un nombre suffisamment restreint de robots en termes de courbure de ses sections, l'étape de recherche de formes est alors un succès. La décision revient à l'appréciation du concepteur. Si le résultat n'est pas satisfaisant, il est possible d'ajouter une section à courbure constante supplémentaire au robot et de reconduire le processus.
- i Résultat : nombre de sections, diamètres, courbures, longueurs déployées, pose :** si la recherche de formes de robot est satisfaisante, le nombre de sections employé est relevé,

ainsi que leurs diamètres, courbures, longueurs, et les paramètres discrétisés du chemin, pour chacun des tests menant à un déploiement sans collision.

4.2.2.2 Synthèse de la géométrie des tubes à partir de la forme du robot

Suite à la recherche de formes de robots, l'étape suivante de la méthodologie présentée sur la Figure 4.4 consiste à réaliser la synthèse de la géométrie des tubes du robot à partir de sa forme, grâce aux équations (4.1) données dans le chapitre 3, et rappelées ici. Un matériau doit préliminairement être choisi avant l'application de ces formules.

$$\begin{cases} L_i + \beta_i = \sum_{j=i}^n l_j \\ \kappa_1 = \gamma_n \quad \text{et} \quad \kappa_{j,j>1} = \frac{1}{E_j I_j} \left(\sum_{i=1}^j E_i I_i \gamma_{n+1-j} - \sum_{i=1}^{j-1} E_i I_i \kappa_i \right) \end{cases} \quad (4.1)$$

Ces dernières permettent de calculer les longueurs déployées des tubes $L_i + \beta_i$ en fonction de la longueur des portions à courbure constante l_j de la forme du robot, et lient également les courbures des tubes κ_i à la courbure de ses sections γ_j . Cette étape se termine par l'obtention des caractéristiques géométriques et mécaniques d'un jeu de tubes permettant d'obtenir la forme identifiée du robot.

4.2.2.3 Ajout des longueurs de transmission

Comme souligné dans le chapitre 3, les longueurs de transmission sont des portions de tubes additionnelles, situées dans l'unité d'actionnement, et nécessaires à la saisie des tubes pour leur mise en mouvement. Elles sont notées β_i et sont négatives, le point d'insertion du robot étant donné comme référence et se situant à l'abscisse curviligne désignée comme $s = 0$. Dans tous les mécanismes présents dans la littérature, le système de préhension du tube le saisit à un endroit donné, qui reste le même durant toute la phase de manipulation du tube. Deux éléments rentrent alors en jeu afin de sélectionner des longueurs de transmission appropriées pour les tubes :

- Tout d'abord, une portion de longueur non nulle devant être découverte pour chacun des tubes du robot de manière à assurer sa saisie, avec une inégalité $\beta_1 < \dots < \beta_i < \dots < \beta_n < 0$,
- Les tubes étant saisis à des endroits fixes, les longueurs de transmission doivent être suffisamment longues pour permettre le déploiement des longueurs désirées des tubes dans les zones anatomiques. Le choix est alors dépendant à la fois des longueurs déployées des tubes et de l'unité d'actionnement, la position et la course de ses actionneurs entrant en compte.

A l'issu de ces deux conditions, des longueurs de transmission sont choisies pour chacun des tubes du RTC.

4.2.2.4 Analyse de stabilité

L'analyse de la stabilité du robot correspond à l'étude du signe du déterminant de la matrice W_2 introduite dans le chapitre 3. Celui-ci doit être positif durant toute la phase de déploiement du robot pour que sa stabilité soit assurée.

4.2.2.5 Robot stable ?

Le signe du déterminant de la matrice W_2 durant le déploiement du robot nous renseigne sur sa stabilité. S'il est négatif, il est nécessaire d'envisager une modification du choix des matériaux pour les tubes. Il est également possible de revoir les diamètres des tubes à la baisse, pour ne pas engendrer de collision avec les modèles 3D, et ce afin de faire varier les ratios en raideur des tubes. En dernier recours, l'introduction d'anisotropie dans les tubes peut également être considérée.

4.3 Application

Nous appliquons maintenant la méthode pour la tâche d'inspection des cellules olfactives.

4.3.1 Recherche de formes de robots

La phase de recherche de formes de robot est réalisée, dans un premier temps, pour la section de navigation seulement. En effet, avant de s'intéresser à la section d'exploration, il paraît légitime de se demander s'il existe des formes de robot permettant de rejoindre tout simplement l'entrée de la fente olfactive.

4.3.1.1 Section de navigation

Appliquons une à une les différentes étapes de la méthode de recherche de formes à notre tâche.

- a Initialisation : modèle 3D n°1, nombre de sections = 1 :** parmi les 20 modèles 3D de fosses nasales reconstruits dans le chapitre 2, le premier est sélectionné. Étant donné la géométrie de la fosse nasale, une seule portion à courbure constante n'est pas suffisante pour rejoindre l'entrée de la fente olfactive. La recherche de forme commence alors avec deux portions à courbure constante.
- b Sélection des diamètres des sections :** étant donné les zones de l'anatomie où ces deux portions se situent, des diamètres extérieurs de 1.6 et 1.0 mm sont sélectionnés, diamètres par ailleurs existants pour des tubes standard. Ces diamètres sont inférieurs à la largeur de la fosse nasale aux endroits où il se positionnent (Figure 2.13), et permettent de compenser le caractère légèrement non-planaire de cette dernière (Figure 2.5).
- c Discrétisation des plages paramétriques du robot :** le vestibule nasal est connu pour être accessible par des outils droits. La portion proximale du robot est donc sélectionnée droite. La seconde est sélectionnée courbée, avec une courbure comprise dans l'intervalle $[0.02 \ 0.09] \text{ mm}^{-1}$, avec un pas de 0.01 mm^{-1} . Ces valeurs sont estimées à partir des modèles

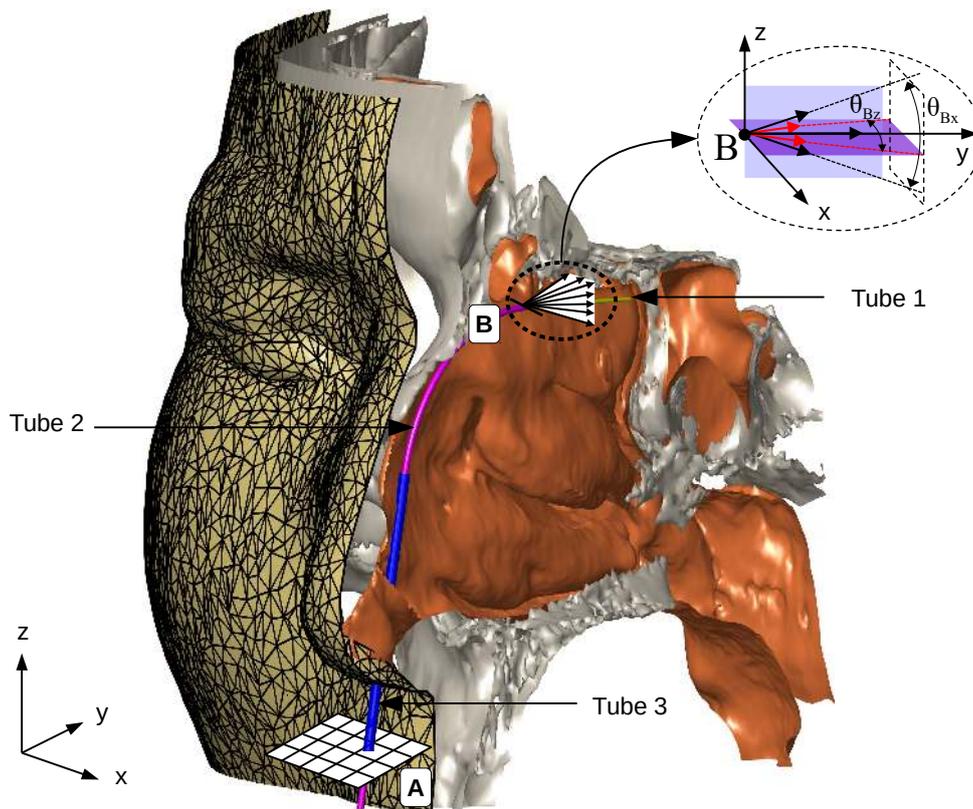


FIGURE 4.6 – Illustration d’une configuration de RTC sans contact avec une section de navigation et une section d’exploration.

3D, et permettent d’avoir une bonne couverture de la seconde partie de la fosse nasale, et l’ordre de grandeur est adapté à la géométrie de la partie antérieure de la fosse nasale, dont la courbure a été caractérisée dans le chapitre 2, avec une méthode de mesure visible sur la Figure 2.7 et les résultats sur la Figure 2.8.

d Recherche des chemins et discrétisation de leurs plages paramétriques : concernant les points de passage du robot, nous en désignons un premier nommé *A*, situé au niveau de l’orifice de la narine, et un second *B*, à l’entrée de la fente olfactive. Ce dernier doit être situé à une distance de 3 mm du toit de la fente olfactive, distance de travail moyenne donnée pour la sonde OCT considérée [AGILTRON 2017]. L’extrémité du robot au point d’arrivée doit être parallèle au toit de la fente olfactive, de manière à faciliter le déploiement de la section d’exploration dans un second temps. Le point d’entrée pour le robot n’est pas unique : l’orifice de la narine est assez large, et permet une variation de position. Une surface dans le plan xy correspondant à cet orifice est donc désignée sur les modèles 3D, et une discrétisation est opérée avec un pas de 1 mm selon les axes x et y . Concernant le point *B*, il est situé à l’entrée de la fente olfactive et à une distance de 3 mm du toit de la fente olfactive, ce qui contraint sa position selon les axes y et z . Seule une variabilité selon l’axe x peut alors être tolérée. Une plage de variation correspondant à la largeur locale de la fente olfactive est sélectionnée, avec un pas d’évolution de 0.25 mm cette fois-ci, les

dimensions de cette zone étant plus contraintes que pour le point A . Quant à l'orientation de l'extrémité de la portion courbée, une tolérance d'orientation de 10° autour de l'axe x est admise, permettant de respecter la distance de travail de la sonde OCT sur toute la zone à balayer. Une tolérance de 10° est également admise autour de l'axe z afin de centrer par la suite la section d'exploration entre les surfaces latérales de la fente olfactive. Une discrétisation est réalisée pour les orientations, avec un pas de 2° autour des axes x et z .

e Génération des chemins : pour chaque combinaison des 5 paramètres du chemin (position du point d'entrée A selon les axes x et y , position du point d'arrivée B selon l'axe y , orientation distale de la section courbée selon les axes x et z) et du paramètre du robot (la courbure de sa section courbée), un chemin est construit. Il est visible sur la Figure 4.7. Les coordonnées du point B et l'orientation du chemin étant connues en ce point, il est possible de positionner un arc courbé de centre O et de rayon égal au rayon de courbure choisi pour cette portion. Le point C est alors recherché, permettant de trouver la tangente au cercle de centre O passant par A . Le chemin est alors identifié.

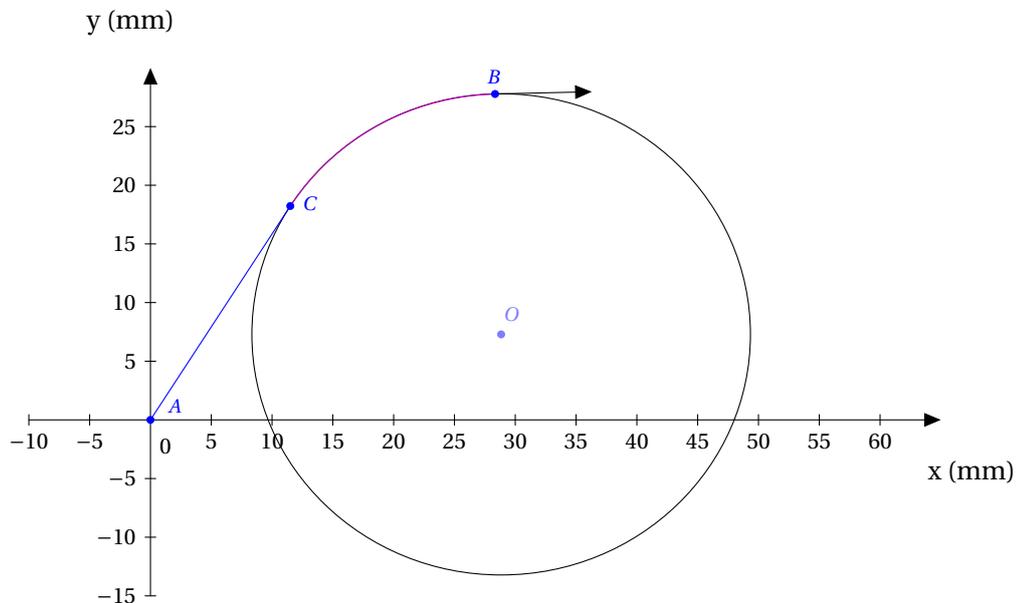


FIGURE 4.7 – Représentation du problème géométrique posé.

f Construction des robots : pour chacun des chemins générés, une forme 3D de robot est construite. Pour ce faire, deux extrusions cylindriques sont réalisées, une première d'un diamètre de 1.6 mm autour du segment droit, et une seconde d'un diamètre de 1.0 mm autour du segment courbé.

g Tests de collision : pour chacune des formes construites, un test de collision est effectué avec le modèle 3D correspondant. La condition fixée pour que la forme de robot soit retenue, est que seuls des contacts avec les tissus mous de la narine soient présents. Afin de réaliser ces tests de collision de manière efficace, ils sont parallélisés, et font appel à une bibliothèque dédiée, V-Collide [Hudson 1997], réalisant des tests de collision de modèles

3D maillés. Un total d'un million de tests de collision est ainsi réalisé.

h Analyse des résultats : une fois les étapes précédentes répétées pour toutes les combinaisons de paramètres pour le chemin, la forme de robot, et les 20 modèles 3D à disposition, les résultats sont analysés. Sur un million de tests de collision réalisé, seulement 7928 mènent à des formes de robot sans collision. Certaines fosses nasales admettent un nombre élevé de formes de robots, alors que d'autres en admettent un nombre plus limité, comme illustré sur le Figure 4.8, avec respectivement 950 et 3 formes admises. Les résultats sont

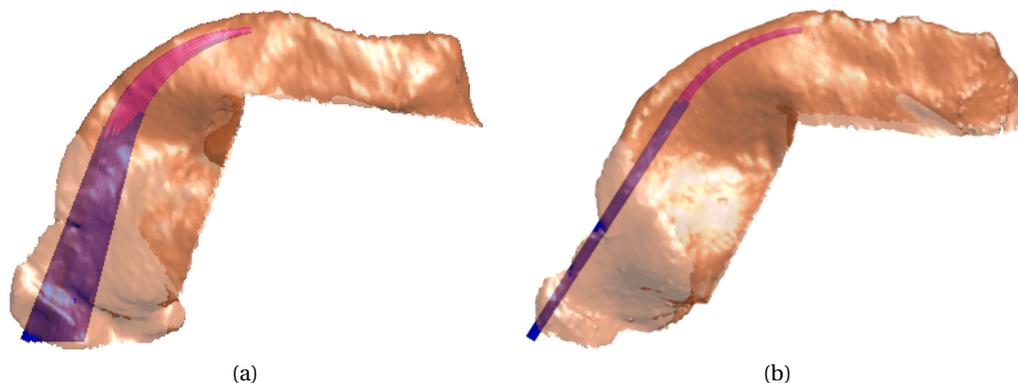


FIGURE 4.8 – Illustration des situations avec : (a) un nombre élevé (sujet n°2) et (b) faible (sujet n°2) de solutions pour la section de navigation, avec respectivement 950 et 3 solutions.

particulièrement bons, et ce en utilisant seulement 2 sections à courbure constante. En effet, un seul robot, composé d'une section courbée d'une valeur de 0.04 mm^{-1} , permet de naviguer jusqu'à l'entrée de la fente olfactive pour un ensemble de 18 sujets sur 20. Parmi ces 18 sujets, une seule des deux fosses nasales peut être traversée pour un ensemble de 8 sujets, les deux fosses nasales pouvant être accédées pour les 10 autres. L'ajout de deux autres formes de robot, avec des courbures de 0.03 et 0.05 mm^{-1} , donne accès à 1 sujet supplémentaire, et à 6 fosses nasales supplémentaires. L'ensemble de ces résultats est visible dans le Tableau 4.2.

i Résultat : nombre de sections, diamètres, courbures, longueurs déployées, pose : la recherche de formes de robot étant un succès, les diamètres, courbures, et longueurs des deux segments déployés sont relevés. Les poses relatives de la base de la forme du robot par rapport aux modèles 3D sont également relevées, pour chacun des tests menant à un déploiement sans collision.

4.3.1.2 Section d'exploration

Choix d'une méthodologie de synthèse appropriée : ayant maintenant la certitude de pouvoir atteindre l'entrée de la fente olfactive, nous nous intéressons à la section d'exploration du robot. Un balayage par rotation et translation du tube intérieur est envisagé afin de couvrir le toit de la fente olfactive. Étant donné sa géométrie, un tube droit est sélectionné, de sorte que la forme du robot soit invariante par sa rotation. La forme de la portion à courbure constante

sélectionnée est donc une portion droite. Le diamètre de cette section est sélectionné à partir de la dimension de la largeur de la fente olfactive. Une valeur de 0.65 mm est choisie. Elle est inférieure au diamètre de 1.00 mm sélectionné pour la portion précédente, inférieure également à la largeur constatée de la fente olfactive (voir chapitre 2), et permet l'intégration d'une sonde OCT fibrée, dont le diamètre peut être aussi faible que 0.125 mm [AGILTRON 2017]. La stratégie proposée afin de réaliser la recherche de formes de la section d'exploration est alors d'ajouter une portion rectiligne à l'extrémité des formes de robot retenues. Les longueurs de ces portions rectilignes sont augmentées progressivement, avec une valeur initiale de 0 mm, et avec un pas de 1 mm. Étant donné que plusieurs formes de robots permettent d'atteindre l'entrée de la fente olfactive d'un même modèle 3D, les valeurs maximales avant collision sont relevées pour chacune d'entre elles.

Résultats : les valeurs minimales et maximales sont présentées dans le Tableau 4.2, qui synthétise l'ensemble des résultats pour la section de navigation et d'exploration. Pour une courbure de la portion courbée de la section de navigation de 0.04 mm^{-1} , la forme menant au plus grand taux d'inspection possible, une longueur moyenne de 10.4 mm peut être déployée pour l'ensemble des 18 sujets. Il s'agit de la moyenne des longueurs maximales déployables. Cela représente 35% de la longueur totale de la fente olfactive. Il s'agit d'une portion très significative, l'EO étant présent et dense dans cette partie de la fente olfactive [Kavoi 2011]. Les informations géométriques concernant les formes de robot identifiées sont visibles dans le Tableau 4.1.

Portion	γ_j	l_{jmin}	l_{jmax}
1	0.00	1.00	28.00
2	0.04	32.55	37.76
3	0.00	34.94	40.35

Tableau 4.1 – Valeurs minimales et maximales des sections 1, 2 et 3 des formes de robots retenues avec une courbure de 0.04 mm^{-1} pour la portion courbée.

4.3.2 Synthèse de la géométrie des tubes à partir de la forme du robot

Dans la suite de la méthode telle que représentée en Figure 4.4, seulement la forme de robot comportant une section courbée de 0.04 mm^{-1} est considérée, celle-ci menant à un taux d'inspection élevé pour un seul robot. Les travaux de la section 3.5 permettant de calculer la géométrie des tubes d'un robot afin de respecter une forme donnée sont ici utilisés. L'application du système d'équations (4.1) nous permet alors de calculer les courbures des tubes du robot, qui restent les mêmes d'une fosse nasale à l'autre. Seules les longueurs à déployer sont différentes, et sont à calculer au cas par cas. Nous dénombrons dans notre cas 3 portions à courbure constante. Un matériau doit tout d'abord être sélectionné afin de faire la synthèse de leurs courbures. Le tube extérieur, d'index 3, ne change pas de forme durant le déploiement, et doit rester droit. La propriété de superélasticité pour ce tube n'est alors pas requise, et l'acier est donc sélectionné pour ce tube. Au contraire, les tubes d'index 1 et 2 vont changer de forme durant le déploiement.

Tableau 4.2 – Valeurs minimales et maximales de l_1 , l_2 and l_3 pour les cavités nasales droite et gauche de chaque sujet, en fonction de la courbure c_2 de la section de navigation. Aucune valeur n'est reportée si aucune solution sans contact n'est identifiée pour la section de navigation, ce qui signifie également que la section d'exploration ne peut pas être identifiée.

Sujet	Droite/ gauche	Courbure de la section de navigation c_2 (mm ⁻¹)		
		0.03	0.04	0.05
		min(l_1)-max(l_1)/min(l_2)-max(l_2)/min(l_3)-max(l_3)		
1	droite	-	28.7-28.7/30.4-30.4/10.0-10.0	-
	gauche	3.1-31.8/31.5-59.6/4.0-16.0	-	-
2	droite	10.9-32.7/34.3-58.0/1.0-12.0	29.1-42.5/23.3-37.1/1.0-13.0	36.9-46.0/19.8-26.9/1.0-13.0
	gauche	17.5-30.0/41.4-52.7/4.0-7.0	-	-
3	droite	36.6-36.6/30.3-30.3/8.0-8.0	44.4-45.4/22.3-23.5/1.0-10.0	-
	gauche	-	-	-
4	droite	-	-	-
	gauche	23.5-28.2/37.4-41.1/1.0-1.0	-	-
5	droite	14.3-14.3/43.7-43.7/3.0-3.0	23.7-31.8/25.8-33.5/2.0-3.0	29.3-32.0/25.2-27.1/3.0-3.0
	gauche	22.1-29.6/31.1-39.7/5.0-5.0	32.5-35.6/24.6-28.6/4.0-9.0	-
6	droite	-	32.2-41.5/22.9-29.9/1.0-19.0	39.9-45.0/18.7-22.8/1.0-25.0
	gauche	26.9-29.4/35.6-38.6/2.0-6.0	-	-
7	droite	-	28.3-34.7/26.9-33.0/1.0-20.0	-
	gauche	21.0-24.3/37.6-40.4/3.0-3.0	30.5-35.7/25.4-30.4/1.0-6.0	-
8	droite	14.4-26.5/36.3-49.1/3.0-8.0	27.9-37.3/24.1-34.3/3.0-10.0	34.8-42.5/18.2-26.2/3.0-11.0
	gauche	12.9-20.3/41.2-49.5/1.0-11.0	27.1-36.4/24.2-34.3/1.0-13.0	34.1-41.8/18.2-26.3/1.0-15.0
9	droite	-	23.7-27.3/28.2-32.1/4.0-5.0	34.0-35.0/21.1-21.8/4.0-5.0
	gauche	-	-	36.9-38.7/19.3-20.3/3.0-3.0
10	droite	-	15.7-25.6/24.9-35.6/1.0-15.0	23.3-28.9/21.9-27.1/1.0-7.0
	gauche	-	18.9-25.9/24.8-32.4/2.0-6.0	29.0-33.1/20.7-23.0/2.0-6.0
11	droite	4.6-19.7/41.2-57.8/3.0-11.0	22.4-34.0/29.4-40.8/5.0-28.0	31.7-41.2/18.8-27.4/3.0-24.0
	gauche	-	27.6-30.8/28.3-31.5/4.0-4.0	-
12	droite	-	23.3-33.0/26.4-34.6/3.0-9.0	29.4-40.7/18.7-27.9/2.0-9.0
	gauche	-	-	35.9-41.8/18.7-22.6/1.0-9.0
13	droite	-	16.6-27.7/23.6-34.7/1.0-10.0	23.9-35.0/16.6-26.8/1.0-11.0
	gauche	-	14.5-29.8/21.9-36.8/4.0-9.0	22.5-30.9/21.7-27.5/4.0-11.0
14	droite	4.6-27.8/35.2-59.0/3.0-11.0	25.9-36.0/26.4-35.1/5.0-5.0	39.2-41.5/21.3-23.2/5.0-13.0
	gauche	16.5-29.3/33.6-45.0/7.0-11.0	31.8-35.9/25.6-29.1/5.0-16.0	37.4-38.3/22.6-23.1/5.0-5.0
15	droite	-	-	-
	gauche	-	-	-
16	droite	-	18.0-34.8/25.7-39.1/4.0-7.0	-
	gauche	6.6-29.7/30.8-51.9/4.0-6.0	24.1-41.9/19.6-31.4/5.0-6.0	44.3-44.5/16.3-16.4/5.0-5.0
17	droite	-	-	17.9-24.6/24.5-31.7/6.0-9.0
	gauche	-	8.9-24.8/27.2-42.2/3.0-3.0	21.4-21.9/28.1-28.6/1.0-3.0
18	droite	-	19.9-24.9/26.2-33.5/1.0-6.0	27.9-29.1/22.9-23.8/2.0-9.0
	gauche	-	22.3-23.7/26.9-28.7/4.0-12.0	26.9-28.4/22.0-24.3/6.0-14.0
19	droite	-	30.5-31.7/24.3-25.0/7.0-7.0	-
	gauche	-	-	-
20	droite	-	-	-
	gauche	-	30.0-39.9/22.1-27.9/8.0-9.0	36.2-44.6/16.9-20.8/8.0-10.0

Tube	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Diamètre int. (mm)	Diamètre ext. (mm)	Courbure (mm^{-1})	ψ_i (rad)
1	80	0.33	0.610	0.650	0.0000	-
2	80	0.33	0.770	1.010	0.0423	π
3	203	0.3	1.100	1.600	0.0021	0

Tableau 4.3 – Caractéristiques des tubes employés pour le robot, et courbures correspondantes.

Le Nitinol, couramment utilisé pour les RTC, est alors sélectionné. Les diamètres intérieurs des tubes sont maintenant fixés, avec les contraintes $d_{inti} < d_{exti}$, assurant que le diamètre intérieur d'un tube doit être inférieur à son diamètre extérieur, et $d_{inti} < d_{ext(i-1)}$, assurant la faisabilité de l'assemblage concentrique des tubes. Un jeu est également laissé afin de permettre un mouvement relatif entre les tubes. Ils sont sélectionnés chez le fournisseur Euroflex GmbH (Pforzheim, Allemagne). Leurs caractéristiques et les valeurs de leurs courbures sont données dans le Tableau de synthèse 4.3. Comme nous pouvons le voir, les tubes 2 et 3 sont tous les deux courbés, avec leurs courbures en opposition, comme en attestent les angles ψ_i correspondants. La stabilité du déploiement associé devra donc être vérifiée.

4.3.3 Ajout des longueurs de transmission

La partie utile du robot, qui va se déployer dans les fosses nasales, est identifiée. Des portions de tube additionnelles, les longueurs de transmission, doivent maintenant être ajoutées aux tubes, afin de permettre leur mise en mouvement. Le choix des longueurs de transmission est dépendant du mécanisme d'actionnement qui lui est associé. Par la suite, un prototype est utilisé afin de valider le comportement du RTC. Il sera présenté en fin de chapitre. Des longueurs $\beta_1 = -200 \text{ mm}$, $\beta_2 = -70 \text{ mm}$ et $\beta_3 = -20 \text{ mm}$ sont sélectionnées, afin de permettre une manipulation des tubes du robot par ce mécanisme d'actionnement. Elles sont négatives du fait du paramétrage choisi (voir figure 3.3). Ces longueurs de transmission, variables durant la phase de déploiement des tubes, sont évaluées en considérant la configuration totalement déployée du robot, de manière à laisser assez d'espace entre les actionneurs, situés de part et d'autre des tubes.

4.3.4 Analyse de stabilité

L'analyse de stabilité du robot suppose de connaître tout d'abord la séquence de déploiement des tubes, ainsi que les longueurs mises en jeu. La séquence de déploiement dans le cadre d'un déploiement ALFI a été détaillée dans le chapitre 3, et illustrée sur la Figure 3.2. Nous paramétrons les longueurs des différentes portions à courbure constante du robot de la manière suivante, celles-ci étant variables durant le déploiement. La longueur de la portion d'index j du robot se déployant sur une longueur comprise entre 0 et l_j est désignée l_{lj} . La séquence de déploiement se déroule alors comme indiqué dans le Tableau 4.4 et représenté sur la Figure 4.9.

L'analyse de la stabilité du robot peut maintenant être réalisée, en calculant le déterminant

Tube	Longueurs déployées				
	État initial	Étape 1	Étape 2	Étape 3	État final
1	0	l_{11}	$l_1 + l_{12}$	$l_1 + l_2 + l_{13}$	$l_1 + l_2 + l_3$
2	0	l_{11}	$l_1 + l_{12}$	$l_1 + l_2$	$l_1 + l_2$
3	0	l_{11}	l_1	l_1	l_1

Tableau 4.4 – Longueurs déployées des tubes pour les différentes étapes du déploiement ALFI.

de la matrice W_2 comme détaillé dans le chapitre 3. Son expression est donnée par (4.2).

$$\det(W_2) = \cosh(l_{11}\alpha) - \alpha \sinh(l_{11}\alpha) \left(\frac{\beta_2 k_{3t} + \beta_3 k_{2t}}{k_{2t} + k_{3t}} \right) \quad (4.2)$$

avec

$$\alpha = \sqrt{-\kappa_2 \kappa_3 \frac{k_{3b} k_{2b} (k_{2t} + k_{3t})}{(k_{1b} + k_{2b} + k_{3b}) k_{2t} k_{3t}}}$$

Il est intéressant de remarquer que la stabilité du robot ne dépend que de la longueur déployée de la première section du robot l_{11} et pas de la longueur des autres sections l_{12} et l_{13} . En effet, les instabilités apparaissent dans les sections où plus de deux tubes sont courbés. Dans la première portion du robot, 3 tubes sont présents dont 2 courbés en opposition, alors

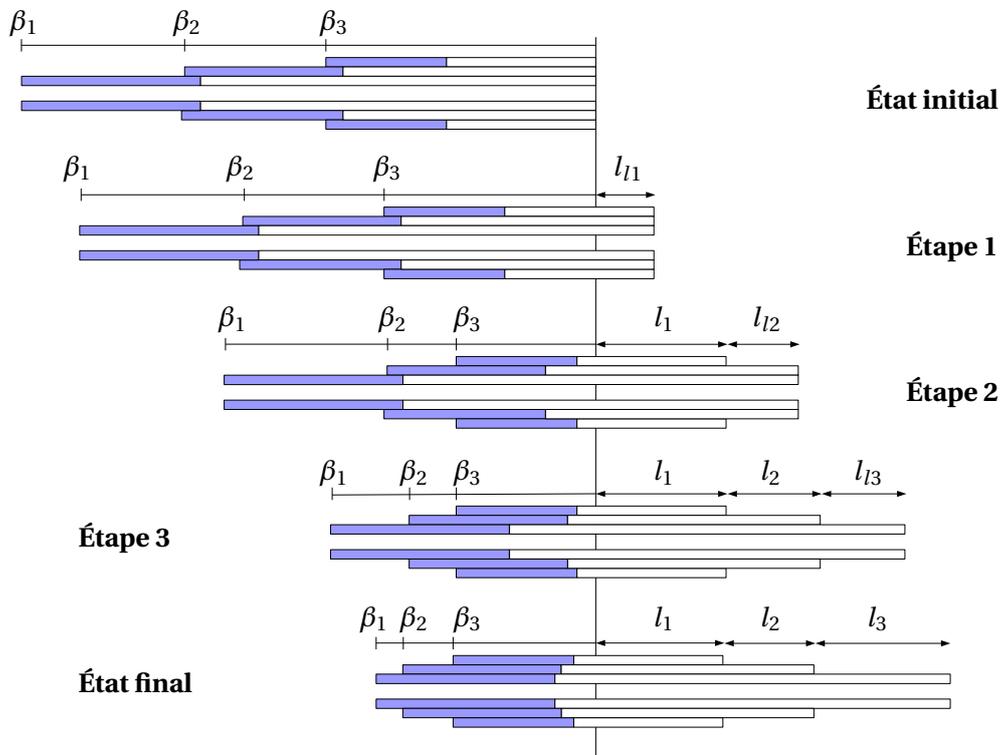


FIGURE 4.9 – Séquence de déploiement ALFI avec le paramétrage des longueurs des tubes.

que dans la seconde portion, deux tubes sont présents dont un seul courbé, et dans la dernière portion, un seul tube est présent, ce qui explique l'apparition de la longueur l_{11} seulement. Enfin, nous notons également que seules les longueurs de transmission β_2 et β_3 entrent en jeu. Celles-ci, variant durant l'avance des tubes, font apparaître la longueur déployée l_{12} , même si la variation de stabilité est due à une distance de saisie différente des tubes par rapport au point d'insertion du dispositif plutôt qu'à une croissance de la section 2 du robot. Le tube intérieur du robot étant droit, la forme et la stabilité du robot sont indépendantes de la longueur de transmission β_1 et de la longueur déployée l_{13} , ainsi que de l'angle à la base de ce tube, ψ_1 . La forme du robot est donc invariante par rotation et translation de ce tube, ce qui permet de réaliser un balayage par combinaison de ces deux mouvements, tout en conservant une même forme de robot.

L'expression du déterminant doit maintenant être explicitée pour chaque étape de déploiement du robot. Durant la première étape, nous avons les égalités (4.3) pour les longueurs de transmission.

$$\begin{cases} \beta_1 = l_{11} - L_1 \\ \beta_2 = l_{11} - L_2 \\ \beta_3 = l_{11} - L_3 \end{cases} \quad (4.3)$$

Cela nous permet d'exprimer le déterminant de la matrice \mathbf{W}_2 en fonction de la longueur l_{11} déployée dans cette première étape (4.4) :

$$\det(\mathbf{W}_2(l_{11}))|_{\text{étape 1}} = \cosh(l_{11}\alpha) - \alpha \sinh(l_{11}\alpha) \left(\frac{(l_{11} - L_2)k_{3t} + (l_{11} - L_3)k_{2t}}{k_{2t} + k_{3t}} \right) \quad (4.4)$$

Durant la seconde étape de déploiement, la longueur déployée l_{11} atteint maintenant son maximum, l_1 , et les égalités pour les longueurs de transmission sont données par (4.5).

$$\begin{cases} \beta_1 = l_1 + l_{12} - L_1 \\ \beta_2 = l_1 + l_{12} - L_2 \\ \beta_3 = l_1 - L_3 \end{cases} \quad (4.5)$$

Cela nous amène à l'expression du déterminant de la matrice \mathbf{W}_2 sous la forme (4.6), en fonction de la longueur déployée l_{12} :

$$\det(\mathbf{W}_2(l_{12}))|_{\text{étape 2}} = \cosh(l_1\alpha) - \alpha \sinh(l_1\alpha) \left(\frac{(l_1 + l_{12} - L_2)k_{3t} + (l_1 - L_3)k_{2t}}{k_{2t} + k_{3t}} \right) \quad (4.6)$$

Pour terminer, durant la dernière étape du déploiement, la longueur l_{12} atteint son maximum l_2 , et les égalités (4.7) sont valables, ce qui nous permet d'écrire le déterminant de la

matrice \mathbf{W}_2 sous la forme (4.8).

$$\begin{cases} \beta_1 = l_1 + l_2 + l_{l3} - L_1 \\ \beta_2 = l_1 + l_2 - L_2 \\ \beta_3 = l_1 - L_3 \end{cases} \quad (4.7)$$

Nous remarquons que cette dernière est constante, et ne dépend donc pas de la longueur déployée l_{l3} :

$$\det(\mathbf{W}_2(l_{l3}))|_{\text{étape 3}} = \cosh(l_1 \alpha) - \alpha \sinh(l_1 \alpha) \left(\frac{(l_1 + l_2 - L_2)k_{3t} + (l_1 - L_3)k_{2t}}{k_{2t} + k_{3t}} \right) \quad (4.8)$$

Le déterminant de la matrice \mathbf{W}_2 est maintenant évalué pour chaque étape du déploiement. La Figure 4.10 montre l'évolution de sa valeur en fonction de la longueur déployée du RTC. Nous remarquons que celle-ci est toujours supérieure à 0, ce qui indique que le robot est stable durant le déploiement, et que la forme attendue est donc une forme plane. L'application de la méthode proposée nous a donc permis de déterminer la géométrie d'un robot pour la tâche visée.

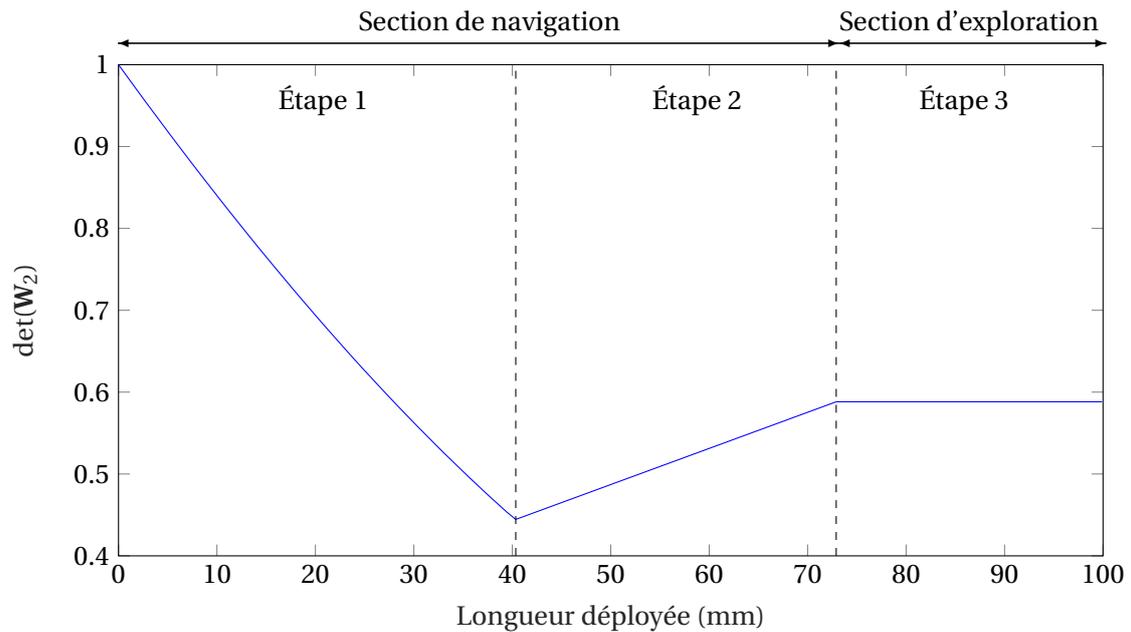


FIGURE 4.10 – Évolution de $\det(\mathbf{W}_2)$ durant toute la phase de déploiement du robot.

4.4 Validations expérimentales

Afin de vérifier le comportement attendu du robot durant la phase de déploiement et de balayage, des validations expérimentales sont maintenant conduites. Pour des raisons pratiques, un jeu de tubes plus facilement accessibles est utilisé. Leurs caractéristiques sont données dans le Tableau 4.5, ainsi que leurs courbures après synthèse.

Chapitre 4. Synthèse des robots à tubes concentriques à partir de données...

Tube	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Diamètre int. (mm)	Diamètre ext. (mm)	Courbure (mm^{-1})	ψ_i (rad)
1	80	0.33	0.610	0.650	0.000	-
2	80	0.33	0.770	1.070	0.042	π
3	80	0.33	1.760	2.180	0.003	0

Tableau 4.5 – Caractéristiques des tubes employés pour le robot, et courbures correspondantes.

Concernant le banc de test utilisé pour manipuler les tubes du RTC, et pour lequel le choix des longueurs de transmission avait été anticipé, il est visible sur la Figure 4.11. Celui-ci est composé de 3 modules d'actionnement, chacun équipé d'un actionneur en translation (moteur pas à pas linéaire LIMES 90-55-HSM) et d'un actionneur en rotation (moteur pas à pas DRMT 65-D25-HSM) de marque OWIS (Staufen, Allemagne). Les 3 actionneurs en translation sont utilisés, alors que seul un actionneur en rotation est utilisé, pour la phase de balayage avec le tube 1. Ces actionneurs sont contrôlés via Matlab (Mathworks, Natick, États-Unis). L'acquisition d'images, permettant de mesurer la forme du RTC, est réalisée via Simulink avec la bibliothèque cvLink, faisant appel aux bibliothèques ViSP (Visual Servoing Platform), OpenCV et Ogre3d. Les caméras utilisées sont de type IEEE 1394 Guppy FireWire.

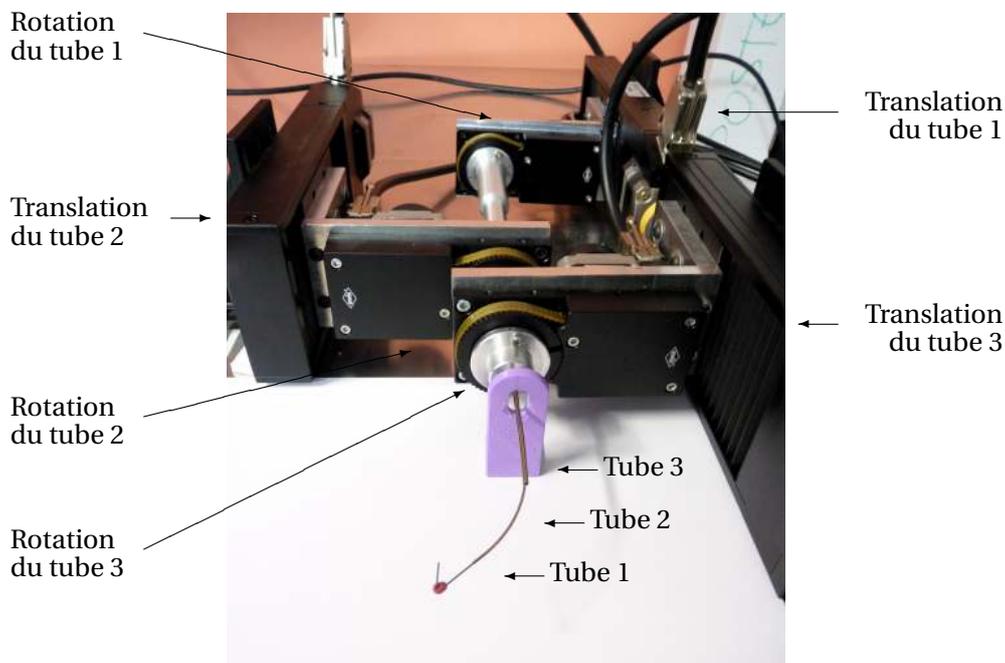


FIGURE 4.11 – Banc de test utilisé pour les validations expérimentales.

4.4.1 Performances de déploiement ALFI

Les performances, en termes de déploiement, sont dans un premier temps évaluées. Pour ce faire, le dispositif expérimental de la Figure 4.12 est mis en place, avec deux caméras, l'une étant placée de manière normale au plan du RTC (Caméra 1), et l'autre dans ce plan (Caméra 2). L'erreur de déploiement est alors mesurée selon ces deux vues, en comparant la trace laissée par l'extrémité du RTC durant le déploiement à la forme finale adoptée par le robot. Pour ce faire, des primitives géométriques (voir Figures 4.13(a) et 4.13(b)) sont déterminées sous la forme de deux droites et un arc de cercle pour la vue de dessus et une droite sur la vue de côté, et les distances entre ces primitives géométriques et les positions adoptées par l'extrémité sur RTC sont calculées. Ces erreurs sont visibles sur les Figures 4.13(c) et 4.13(d). Les erreurs quadratiques moyennes mesurées sont de 0.90 et 0.18 mm respectivement, pour la vue de dessus et la vue de côté. Ces erreurs sont maximales au niveau du point d'insertion du RTC, avec 2.37 et 0.49 mm respectivement pour la vue de dessus et de côté. Elles traduisent la nécessité d'utiliser un point de guidage en sortie de l'unité d'actionnement. Cela n'a pas été réalisé dans notre cas, la première section du robot à déployer étant droite et ne nécessitant théoriquement pas de guidage. Cependant, un défaut de courbure des tubes ou d'alignement des actionneurs rend un guidage au niveau du point d'insertion nécessaire, et elle sera donc à intégrer par la suite, et permettra de réduire cette erreur de manière considérable. Également, ces erreurs ne sont pas critiques en début de déploiement, contrairement à la fin de celui-ci, où le robot navigue dans la fente olfactive, couverte par l'EO.

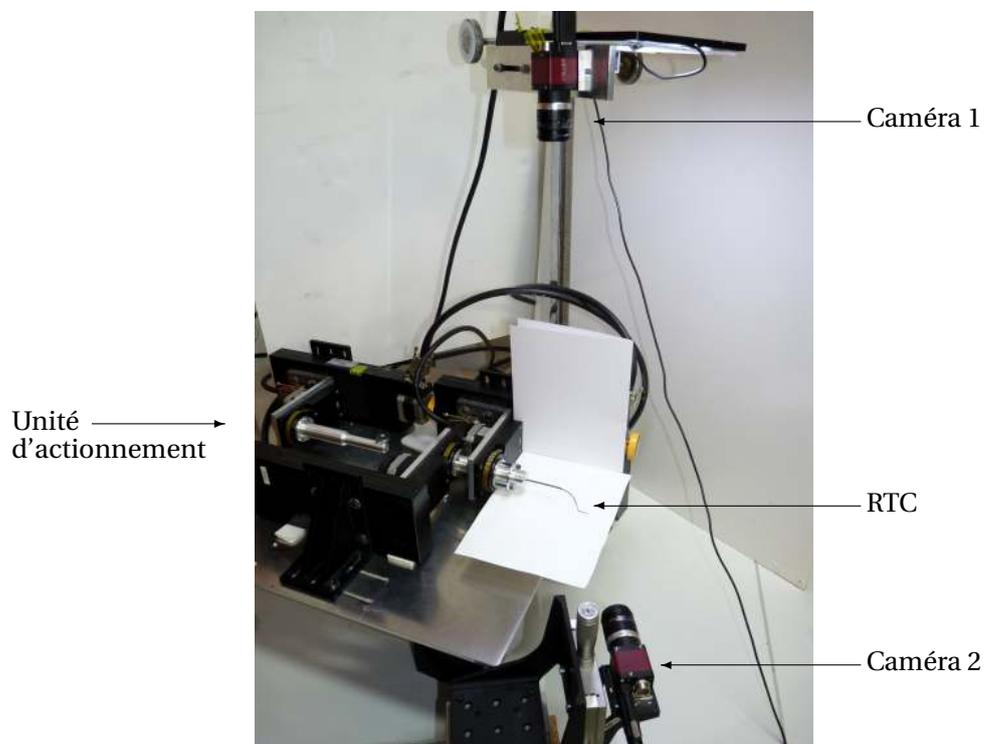


FIGURE 4.12 – Banc de test utilisé pour les validations expérimentales.

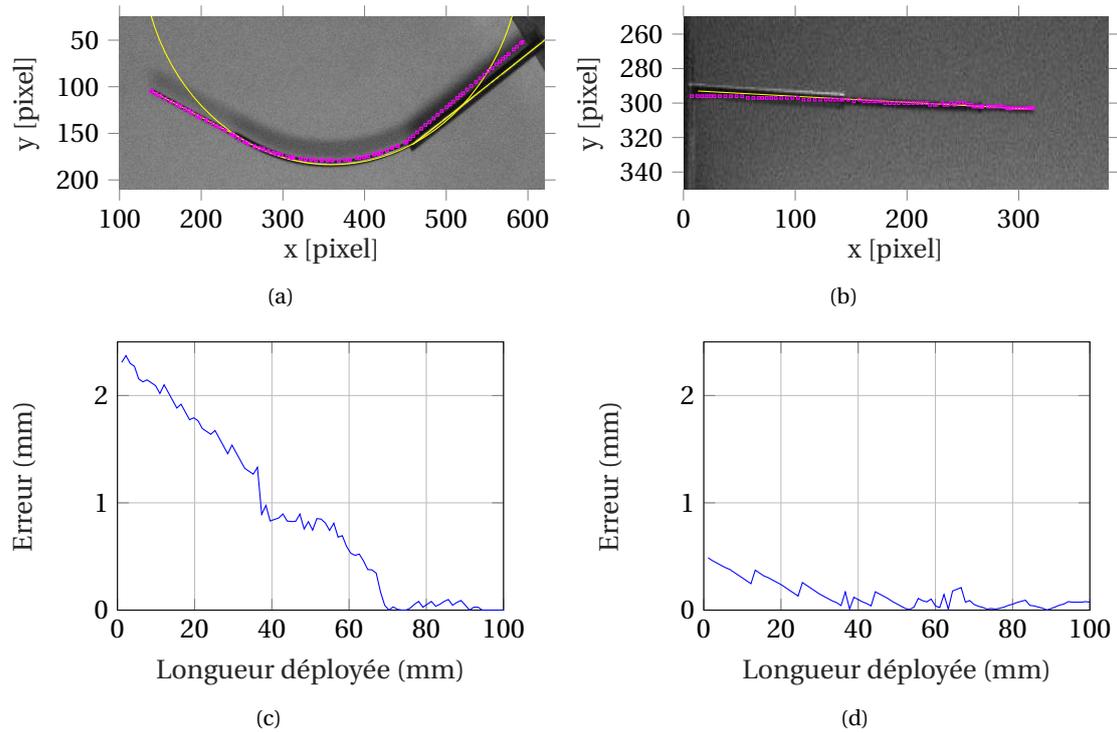


FIGURE 4.13 – (a) et (b) : trace (en magenta) laissée par l’extrémité distale du robot durant déploiement, superposée à la configuration totalement déployée, et (c) et (d) : graphiques montrant l’erreur correspondante entre la trace laissée par l’extrémité du RTC et la forme finale adoptée par le robot. Les figures (a) et (c) correspondent à la vue de dessus, et les figures (b) et (d) à la vue de côté.

4.4.2 Performance de balayage

Les performances en termes de déploiement ayant été présentées, nous nous intéressons maintenant aux performances de balayage, réalisé par des mouvements de rotation et de translation du tube intérieur. Deux points doivent être analysés : une caractérisation de l’amplitude angulaire en extrémité distale du robot pour une amplitude angulaire en extrémité proximale, et une analyse de la résolution en translation du tube intérieur.

4.4.2.1 Mouvement de rotation de la section d’exploration

La première performance analysée concerne le mouvement de rotation du tube intérieur. La forme du robot est théoriquement invariante par rotation de ce tube, car celui-ci est droit. Cependant, des phénomènes de frottement, non pris en compte dans les modèles utilisés, entrent en jeu entre ce tube et le tube 2 qui l’entoure, et peuvent limiter l’amplitude angulaire atteignable en extrémité distale.

L’expérience conduite afin d’observer ce comportement consiste en la création d’un mouvement angulaire d’amplitude donnée en extrémité proximale, et en l’observation de l’amplitude atteinte en extrémité distale. La caractérisation a été réalisée avec une amplitude angulaire de

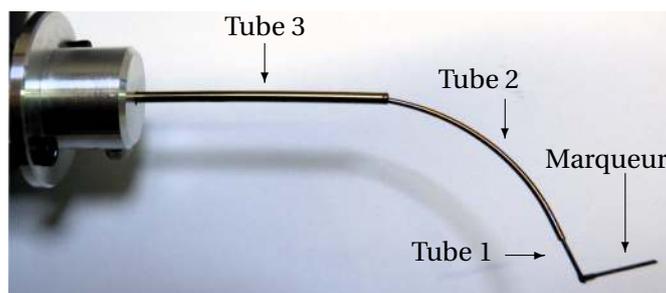


FIGURE 4.14 – Illustration du dispositif expérimental utilisé pour la mesure du débattement angulaire en bout de section d'exploration.

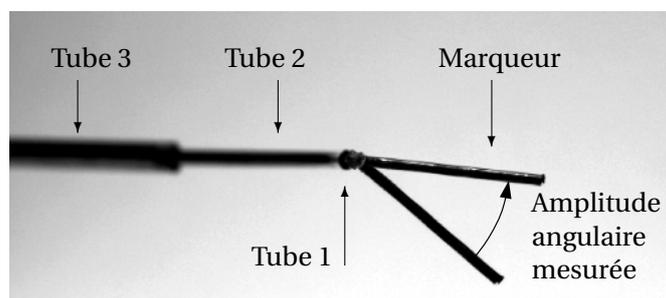


FIGURE 4.15 – Superposition des positions extrêmes obtenues pour le balayage par rotation avec la section d'exploration, et mesure de l'amplitude correspondante.

60° à l'extrémité proximale du tube. Afin de mesurer l'angle à l'extrémité distale, un marqueur est fixé perpendiculairement à l'extrémité du tube 1, comme illustré sur la Figure 4.14, et observé à l'aide d'une caméra placée dans le plan de déploiement du robot.

Les premiers résultats ont montré une amplitude angulaire très faible en bout de robot, due à un effet de torsion important du tube 1 à cause de phénomènes de frottement. Afin d'augmenter l'amplitude angulaire obtenue en bout de robot, nous choisissons alors un couplage volontaire entre des mouvements de rotation et de translation, pour créer une rupture de contact entre les tubes et relâcher la torsion du tube 1. Chaque mouvement angulaire à la base du tube 1 est suivi d'un mouvement de translation de 0.5 mm. L'amplitude alors obtenue en extrémité distale du robot est de 34.5° . Elle est calculée par extraction des positions extrêmes identifiées grâce à la caméra, comme visible sur la Figure 4.15. Le toit de la fente olfactive étant observé à une distance moyenne de 3 mm et ayant une largeur de 1 mm, l'amplitude angulaire requise pour le couvrir latéralement est de 18.9° . Les résultats obtenus sont donc suffisants pour répondre à ce besoin.

4.4.2.2 Mouvement de translation de la section d'exploration

La seconde performance mesurée concerne la résolution atteignable en termes de translation du tube intérieur, pour le balayage longitudinal de la fente olfactive. Afin de la mesurer, un miroir en silicium est solidarisé au bout du tube 1, de manière normale à ce dernier, comme illustré sur la Figure 4.16. Un capteur laser de type Keyence LC 2420 permet alors de mesurer

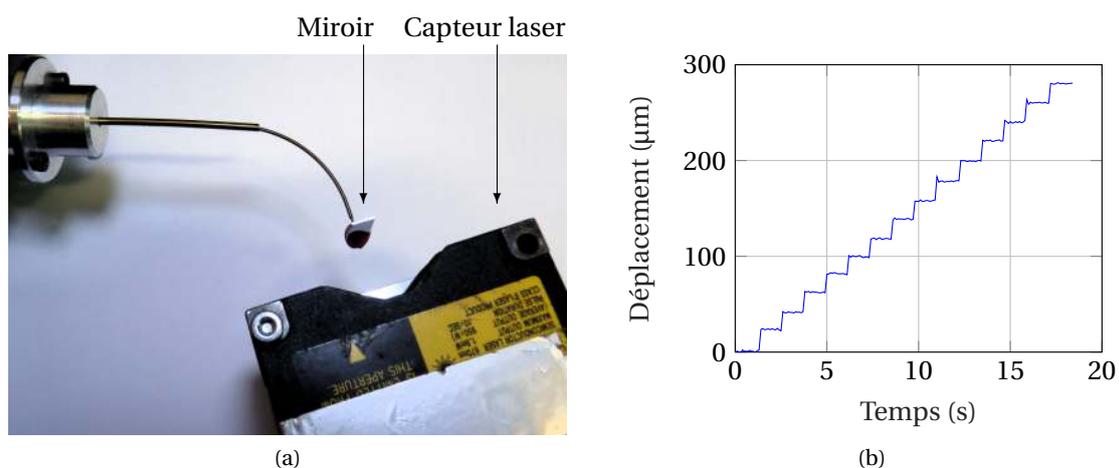


FIGURE 4.16 – (a) Illustration du dispositif expérimental utilisé pour la mesure du déplacement fin en bout de section d’exploration, et (b) résolution en translation obtenue en extrémité distale du robot, pour un pas d’avance du tube intérieur de $20 \mu\text{m}$.

la distance à ce miroir. Des cycles de translation sont alors réalisés, avec un pas connu pour les actionneurs, et le déplacement à l’extrémité distale du robot est mesuré. Avec les actionneurs utilisés (moteurs pas à pas DRMT 65-D25-HSM de marque OWIS), un pas minimal de $20 \mu\text{m}$ peut être obtenu. Pour ce pas d’avance, le déplacement en bout du tube 1 est donné sur la Figure 4.16a(b). Nous constatons que le déplacement obtenu à l’extrémité distale du robot est le même que le déplacement réalisé à base du tube, avec un déplacement régulier de $20 \mu\text{m}$. Cela semble logique car les tubes ne sont pas considérés comme extensibles ou compressibles selon une direction longitudinale. Cette résolution est acceptable pour envisager un balayage précis de la fente olfactive de manière longitudinale. La taille des images 3D pouvant être acquises avec la sonde OCT est de l’ordre de grandeur de ce pas de translation, avec des tailles d’images d’environ 10 à $12 \mu\text{m}$ [AGILTRON 2017].

4.5 Synthèse du chapitre 4

Dans ce quatrième chapitre, une méthodologie de synthèse a été proposée pour les RTC. Celle-ci se distingue des méthodes existantes sur plusieurs points. Tout d’abord, elle permet de réaliser la synthèse dans le cadre particulier d’un déploiement ALFI, et elle permet également la prise en compte de la variabilité inter-sujets. Ensuite, elle intègre les longueurs de transmission, nécessaires pour l’actionnement de ce type de robot, et la stabilité du robot est étudiée, afin de garantir un déploiement stable le long d’un chemin identifié au préalable. Cette méthode a été mise en place dans le cadre de l’inspection des cellules olfactives, et mène à un taux d’exploration de 18 sujets sur 20, suffisant pour une utilisation en recherche médicale, où les sujets d’études peuvent être sélectionnés.

Suite à cette étape de synthèse, des validations expérimentales ont été mises en place afin d’étudier et de valider le comportement du RTC. Deux performances ont été mesurées : le respect du déploiement ALFI, et les performances en termes de balayage par rotation

Chapitre 4. Synthèse des robots à tubes concentriques à partir de données...

et translation du tube de la section d'exploration. Les performances de déploiement ALFI sont plutôt intéressantes, avec des erreurs très faibles en fin de déploiement, traduisant un comportement sûr vis-à-vis de l'EO. Les performances en termes de balayage sont bonnes, avec une amplitude angulaires permettant de couvrir le toit de la fente olfactive, et une résolution en translation compatible avec les performances requises.

5 Actionnement pour les RTC en déploiement ALFI : proposition et application pour le projet NEMRO

"La science elle-même peut s'égarer, si l'expérience ne l'éclaire."

Luís Vaz de Camões, poète portugais

Sommaire du chapitre

5.1	Validation de l'approche en boucle ouverte avec recalage	96
5.2	Actionnement des robots à tubes concentriques : état de l'art	98
5.3	Actionnement à point de saisie mobile	102
5.4	Synthèse d'une unité d'actionnement pour le déploiement ALFI avec point de saisie mobile	106
5.5	Conception mécanique	110
5.6	Validation des éléments fonctionnels	114
5.7	Synthèse du chapitre 5	125

Dans ce chapitre, nous nous intéressons maintenant à l'actionnement de RTC pour le déploiement ALFI. Pour le contexte applicatif visé, le déploiement a été envisagé au chapitre 1 en boucle ouverte, c'est-à-dire sans capteur extéroceptif, en s'appuyant sur un recalage initial du dispositif porté par le sujet. Nous revenons tout d'abord sur ce point, en ayant maintenant des données précises sur le RTC et son déploiement pour évaluer la faisabilité de l'approche. Dans un deuxième temps, nous abordons la question de l'actionnement de RTC. Un état de l'art sur les systèmes d'actionnement existants est conduit. Un principe de saisie dit à "point de saisie mobile" est alors introduit, qui permet de maximiser la stabilité des RTC. Cet avantage est mis en perspective en étudiant le déploiement du robot retenu au chapitre 4 pour la réalisation de l'inspection de l'EO. L'analyse des dispositifs d'actionnement existants pour les RTC montre leur faible compacité, problématique dans notre approche de robot porté par le sujet. Une démarche de conception est alors proposée. Elle rationalise le déploiement des RTC dans le cadre particulier du déploiement ALFI. Son application mène dans un second temps à des éléments technologiques testés de manière indépendante, pour valider la faisabilité de la tâche robotisée.

5.1 Validation de l'approche en boucle ouverte avec recalage

La première partie de ce chapitre est dédiée à la phase de recalage pour le repositionnement du dispositif par rapport au sujet. Il s'agit d'une approche commune dans la littérature [Burgner 2013a], et sa faisabilité doit être vérifiée dans le cadre de notre application. Deux actions de ce type doivent être exécutées. La première consiste à recaler et repositionner le masque par rapport au visage du sujet, pour le placer de manière grossière dans la même position que durant le scan préliminaire sur le visage du sujet (étape 1.3.2.4 du scénario du chapitre 1). La seconde consiste à recaler et repositionner de manière fine l'unité d'actionnement par rapport au visage du sujet, via la cale intermédiaire réglable solidarissant le masque et l'unité d'actionnement. C'est cette seconde étape de recalage qui est étudiée, afin de vérifier qu'un positionnement suffisamment précis peut être réalisé pour procéder à un déploiement en boucle ouverte. Pour ce faire, nous mettons en place une simulation tenant compte de deux sources d'incertitudes : celle due au système de recalage, et celle due à la segmentation des images médicales, induisant une erreur de forme sur les reconstructions des modèles 3D des fosses nasales.

Concernant le système de recalage, nous considérons l'usage d'un système commercial, à savoir le système Prime 41 d'OptiTrack [OptiTrack 2017]. D'après l'entreprise contactée, il est possible pour un ensemble de 12 marqueurs placés dans un volume de 300x300x300 mm, présentant un encombrement acceptable pour notre dispositif, de réaliser une mesure de pose avec une erreur maximale en position de 0.05 mm, et une erreur en orientation de 0.025° . Ces 12 marqueurs sont placés sur l'unité d'actionnement qui est un corps rigide, et la mesure de position de ces marqueurs permet de déterminer les erreurs annoncées pour un marqueur central.

Concernant l'erreur commise pendant la phase de reconstruction 3D des fosses nasales, nous prenons l'erreur quadratique moyenne déterminée dans le chapitre 1, correspondant à l'erreur

de détermination des frontières des modèles 3D. Celle-ci s'élève à 0.04 mm.

Le robot considéré est celui comportant une courbure de sa seconde section de 0.04 mm^{-1} , retenu en fin de chapitre 4 pour le taux d'inspection élevé de fosses nasales qu'il permet. Nous conduisons nos simulations de la manière suivante :

- Nous considérons toutes les configurations sans contact de la section de navigation du RTC dans les fosses nasales des 20 sujets. Celles-ci sont issues de l'application de la méthodologie de recherche de formes de RTC développée et appliquée dans le chapitre 4 (voir paragraphe 4.3.1.1).
- Pour chacune de ces sections de navigation, nous calculons la position du marqueur central situé sur l'unité d'actionnement, et visible sur la Figure 1.11, l'erreur de position et d'orientation étant connue pour ce marqueur. Nous imposons que le marqueur soit placé dans le plan de la section de navigation, et selon la représentation de la Figure 5.1.
- La position du marqueur central situé sur l'unité d'actionnement est perturbée en ajoutant un bruit suivant une loi normale sur la distance entre position nominale et perturbée du marqueur. L'écart type est égal à 0.0167 mm, en bornant l'erreur à 0.05 mm pour suivre les données constructeur. La perturbation est appliquée selon une direction choisie aléatoirement.
- L'orientation du RTC est ensuite perturbée autour d'un axe généré de manière aléatoire, et passant par la position du marqueur central. La valeur angulaire introduite pour la perturbation suit une loi normale d'écart type égal à 0.0083° , en bornant l'erreur à 0.025° pour suivre les domaines du constructeur.
- L'occurrence de contacts avec les parois de la cavité nasale est vérifiée pour toutes

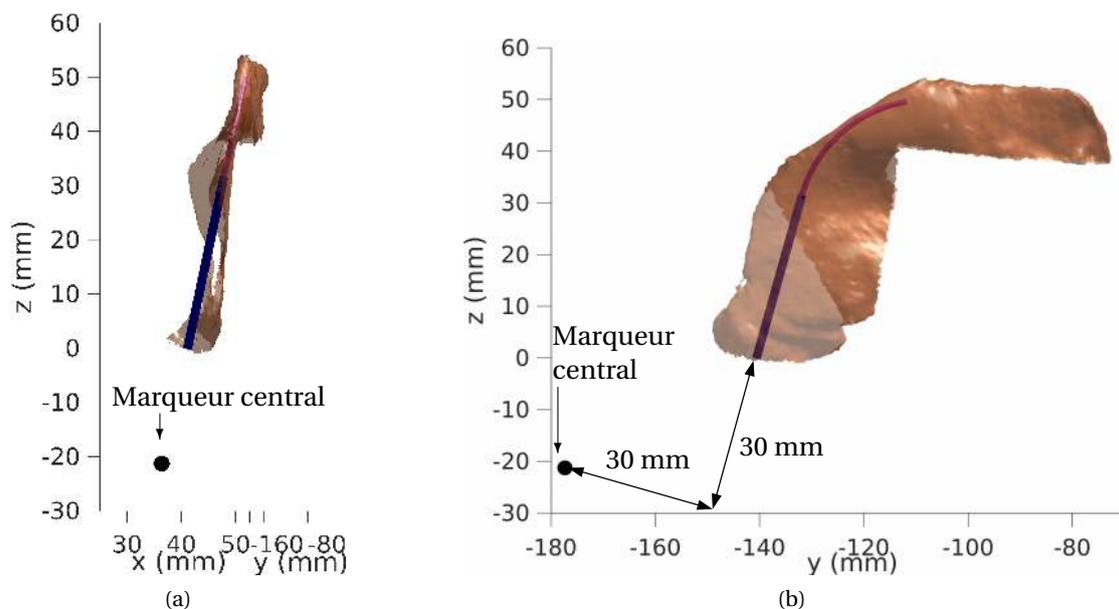


FIGURE 5.1 – Position du marqueur central par rapport à la pose de la section de navigation, avec (a) vue dans le plan du robot, et (b) vue de côté.

les nouvelles poses de la section de navigation. Afin de prendre en compte l'erreur de reconstruction 3D, les rayons des tubes sont augmentés d'une valeur de 0.04 mm, égale à l'erreur quadratique moyenne mesurée correspondant au défaut de forme des reconstructions. Si, pour toutes les poses testées, aucun contact n'apparaît entre les sections de navigation et la cavité nasale, la configuration est considérée robuste à une erreur de pose provenant du système de recalage et à l'erreur de reconstruction 3D.

- Pour les sections de navigation robustes à ces erreurs, les longueurs maximales de la section d'exploration qu'il est possible de déployer dans la fente olfactive sont calculées, en reprenant ici la démarche employée au paragraphe 4.3.1.2.

Les résultats qui suivent sont obtenus avec un nombre de perturbations de pose égal à 1000 pour chaque section de navigation. Les résultats concernant les longueurs maximales de la section l_3 sont visibles dans le Tableau 5.1. Elles correspondent aux longueurs maximales de la section d'exploration qu'il est possible de déployer, sans contact avec la fente olfactive.

Nous constatons que malgré l'introduction d'erreurs de recalage pose et de reconstruction 3D des fosses nasales, un nombre de sujets significatif reste accessible pour une inspection par notre dispositif. En effet, une inspection reste possible pour 11 sujets sur 20. Ce nombre est logiquement moins élevé que les 18 sujets sur 20 obtenus sans l'introduction d'erreur de recalage et de reconstruction 3D, mais reste à notre sens suffisamment élevé pour une utilisation du dispositif en recherche médicale, où les sujets peuvent être sélectionnés. L'approche est alors, à notre sens, de valider le choix d'un sujet en réalisant la procédure décrite ci-dessus pour assurer la faisabilité du déploiement. Pour les mêmes fosses nasales, nous constatons que les longueurs de la section d'exploration robustes aux erreurs introduites sont moins élevées avec prise en compte des erreurs précédentes, avec une moyenne de 9.9 mm contre 13.6 mm sans prise en compte de ces dernières. Ces longueurs déployées restent néanmoins suffisantes pour observer une partie non négligeable de l'EO, sachant qu'il est présent et dense à l'entrée même de la fente olfactive [Kavoi 2011].

Si nous souhaitons augmenter la fraction de sujets pouvant être inspectés, voire à long terme faire une utilisation du dispositif dans le cadre d'une inspection de routine, plusieurs éléments peuvent être améliorés. Tout d'abord, la segmentation des images médicales pour reconstruction des volumes d'intérêt est guidée par le praticien. Il s'agit d'une démarche adoptée pour sa simplicité de mise en œuvre, mais une segmentation automatique d'images médicales, qui reste un champ de recherche ouvert, pourrait être envisagée, dans l'optique d'obtenir une meilleure précision, telle que proposée dans [Bui 2015]. Ensuite, une répartition spatiale plus importante et plus dense des marqueurs pourrait être mise en œuvre, afin de diminuer l'erreur d'estimation de pose.

5.2 Actionnement des robots à tubes concentriques : état de l'art

Nous avons évalué l'existence de trajets pour l'inspection des cellules olfactives et de RTC pour la réaliser. Il nous faut maintenant sélectionner des moyens d'actionnement adaptés au contexte. Nous nous intéressons donc ici à l'actionnement des robots à tubes concentriques en analysant les systèmes existants. De nombreuses unités d'actionnement sont présentées

Sujet	Gauche/ droite	Configurations		Pourcentage de solutions conservé
		Nominales	Avec erreurs	
		max(l_3)		
1	droite	10.0	-	0
	gauche	-	-	-
2	droite	13.0	13.0	53
	gauche	-	-	-
3	droite	10.0	-	0
	gauche	-	-	-
4	droite	-	-	-
	gauche	-	-	-
5	droite	3.0	-	0
	gauche	9.0	-	0
6	droite	19.0	19.0	19
	gauche	-	-	-
7	droite	20.0	12.0	30
	gauche	6.0	-	0
8	droite	10.0	8.0	34
	gauche	13.0	12.0	51
9	droite	5.0	4.0	28
	gauche	-	-	-
10	droite	15.0	7.0	29
	gauche	6.0	3.0	14
11	droite	28.0	28.0	21
	gauche	4.0	-	0
12	droite	9.0	-	0
	gauche	-	-	-
13	droite	10.0	2.0	49
	gauche	9.0	4.0	7
14	droite	5.0	-	0
	gauche	16.0	11.0	11
15	droite	-	-	-
	gauche	-	-	-
16	droite	7.0	-	0
	gauche	6.0	-	0
17	droite	-	-	-
	gauche	3.0	-	0
18	droite	6.0	4.0	18
	gauche	12.0	-	0
19	droite	7.0	-	0
	gauche	-	-	-
20	droite	21.0	12.0	4
	gauche	-	-	-

Tableau 5.1 – Valeurs maximales de l_3 pour les cavités nasales droite et gauche de chaque sujet, sans erreur de recalage et de reconstruction, puis avec ces erreurs. Aucune valeur n'est reportée si aucune solution sans contact n'est identifiée pour la section de navigation, ce qui signifie également que la section d'exploration ne peut pas être identifiée. Le pourcentage de perte de configuration de robot est donné. Il correspond au pourcentage de poses admissibles conservées pour le RTC après introduction des erreurs, sans qu'il n'y ait contact.

dans la littérature. Comme l'indique le Tableau 5.2 de synthèse, les solutions diffèrent selon plusieurs points clés.

5.2.1 Nombre de tubes et degrés de liberté

Nous pouvons tout d'abord différencier les unités d'actionnement par rapport au nombre de RTC manipulables. En effet, certaines d'entre elles permettent l'utilisation de plusieurs RTC simultanément, comme [Swaney 2012] avec 4 RTC manipulés (Figure 5.2(a)), alors que d'autres ne sont conçues que pour la manipulation d'un seul robot [Su 2015] (Figure 5.2(b)).

Les jeux de tubes manipulés comprennent par ailleurs 2 ou 3 tubes. Chaque tube possède potentiellement 2 degrés de liberté, un en translation, et l'autre en rotation. Certains degrés de liberté ne sont parfois pas exploités : c'est le cas de [Walsh 2011, Sophocleous 2012], où seule la translation est pilotée pour un tube. Nous remarquons qu'aucune approche ne consiste en l'usage de la rotation seulement. Nous pouvons parfois également observer un couplage entre l'actionnement en translation et en rotation sur certains systèmes [Webster III 2008, Comber 2012].

5.2.2 Architectures d'actionnement

Deux types d'architectures sont présentes pour la motorisation des tubes. Dans une première, dite parallèle, chaque actionneur est placé de manière fixe par rapport au bâti de l'unité d'actionnement. Dans la seconde, dite série, les actionneurs sont placés de manière relative les uns par rapport aux autres. Ces deux principes sont illustrés sur la Figure 5.3. Le second type permet d'augmenter la compacité des unités d'actionnement et de réduire les longueurs de transmission des tubes, cruciale pour la stabilité des RTC. Elle permet également d'améliorer le rendement de ces systèmes. En effet, si nous considérons une situation simple comme l'avance simultanée de tous les tubes d'un RTC par rapport au bâti de l'unité d'actionnement associé, tous les actionneurs en translation doivent être sollicités dans le cas d'une architecture

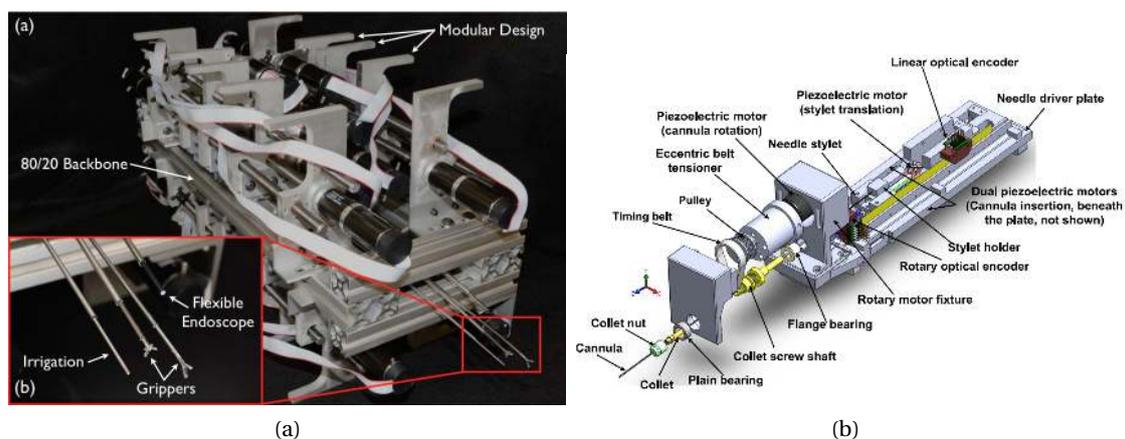


FIGURE 5.2 – Unités d'actionnement pour la manipulation simultanée de plusieurs assemblages de tubes avec (a) 4 jeux manipulés [Swaney 2012], et (b) 1 jeu manipulé [Su 2015].

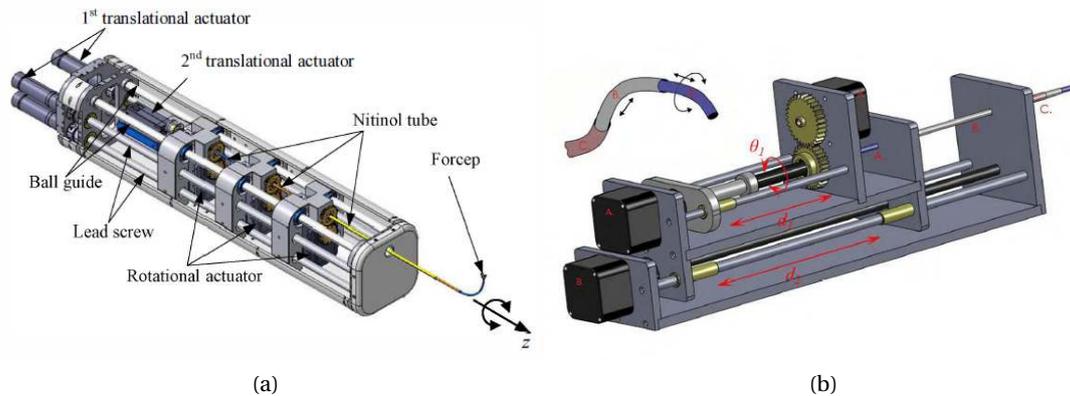


FIGURE 5.3 – Illustration d'architectures d'unités d'actionnement : (a) parallèle [Li 2013], et (b) série [Sophocleous 2012].

parallèle, alors que seul l'actionneur en translation lié au bâti de l'unité d'actionnement doit être sollicité dans le cas d'une architecture série.

5.2.3 Encombrement

Certaines unités d'actionnement sont destinées à des dispositifs portatifs. Ils doivent donc être compacts, comme décrits dans [Okazawa 2005, Walsh 2011, Li 2013]. Les dimensions de ces solutions sont données dans le Tableau 5.2. On peut par ailleurs distinguer les systèmes non portatifs dédiés à des applications médicales, et ceux plutôt destinés à des tests préliminaires, où la taille des unités d'actionnement n'est pas une contrainte. La taille de ces dispositifs semble beaucoup plus importante, même si peu de détails sont donnés dans la littérature quant à leurs dimensions. L'architecture d'actionnement joue un rôle important dans leur compacité.

5.2.4 Compatibilité IRM

Nous notons que certaines unités d'actionnement développées sont compatibles avec des imageurs de type IRM [Cardona 2012, Su 2015, Comber 2012]. Les unités d'actionnement développées font alors appel à des moteurs piézoélectriques ou à des technologies d'actionnement pneumatique afin d'assurer cette compatibilité.

5.2.5 Saisie des tubes

Le principe de saisie des tubes a une importance cruciale, lorsqu'il s'agit de la stabilité des RTC. Tous les systèmes présentés dans le tableau de synthèse 5.2 font une saisie consistant à solidariser les actionneurs et les tubes à un endroit fixe le long de ceux-ci. La zone de saisie du tube reste alors la même durant toute la phase de manipulation du tube. Afin d'assurer le déploiement du RTC, ces zones de saisie se trouvent nécessairement aux extrémités proximales des tubes, de sorte qu'elles n'entrent pas en collision avec la base du tube de diamètre

supérieur dans lequel le tube manipulé est introduit. Ce principe de saisie a été illustré en Figure 3.3 du chapitre 3, et a été utilisé pour justifier la stabilité d'un RTC avec longueurs de transmission, comme définies traditionnellement dans la littérature.

Cet état de l'art amène plusieurs observations. La première concerne l'encombrement et la masse des unités d'actionnement. Ceux-ci sont beaucoup trop importants pour être en adéquation avec notre besoin, où un système porté par le sujet, donc compact et léger, est attendu. La seconde concerne le principe utilisé pour la saisie des tubes, qui ne permet pas de maximiser la stabilité des RTC, les tubes étant saisis à leurs extrémités proximales. Nous proposons donc dans un premier temps de revenir sur ce point, en introduisant un principe de saisie original pour la manipulation des tubes d'un RTC.

5.3 Actionnement à point de saisie mobile

5.3.1 Principe de fonctionnement

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, les longueurs de transmission diminuent de façon importante la stabilité des RTC. Leur importance a notamment été mise en évidence avec l'étude du déploiement ALFI d'un RTC composé de 3 tubes, d'abord sans longueurs de transmission, puis avec longueurs de transmission. Alors que dans le premier cas le RTC est stable, le même robot devient instable dans le second. Dans le chapitre 3, une proposition faite pour améliorer la stabilité des RTC est d'introduire une modification structurelle des tubes. Afin d'apporter une solution aux problèmes de stabilité, nous proposons cette fois-ci d'agir non pas sur les tubes, comme précédemment, mais sur l'unité d'actionnement qui les pilote. Ainsi, par opposition aux systèmes classiques où chaque tube est saisi sur une zone restant la même durant toute sa phase de manipulation, que nous appellerons principe de "Point de Saisie Fixe" (PSF), nous proposons un nouveau principe d'actionnement à "Point de Saisie Mobile" (PSM). Le but de ce nouveau principe de saisie pour réaliser des déploiements ALFI est de minimiser les longueurs de transmission à chaque instant durant l'utilisation du RTC. Pour ce faire, chaque tube est saisi au plus proche du tube de diamètre supérieur. Alors que les zones de saisie sont telles que représentées sur la Figure 3.3 dans le cas d'un système à PSF, elles deviennent telles qu'illustré sur la Figure 5.4 pour un système à PSM. Les longueurs de transmission pour chaque étape du déploiement sont données dans le premier cas par les systèmes d'équations (4.3), (4.5) et (4.7). Dans le second cas, elles deviennent (5.1), (5.2) et (5.3) pour les étapes de déploiement 1, 2 et 3 respectivement. Il est facile de montrer que les longueurs de transmission, pour chaque étape du déploiement, sont plus petites pour un principe à PSM que pour un système à PSF, connaissant les inégalités $l_i \leq l_j$ et $L_i \leq L_j$ pour $i < j$.

$$\text{Étape 1 : } \begin{cases} \beta_1 = l_{l_1} - L_2 \\ \beta_2 = l_{l_1} - L_3 \\ \beta_3 = 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

Prototype	Nombre de bras	Tubes motorisés	Nombre de DDL	Couplage en actionnement	Type d'actionneur	Système portatif	Compatibilité IRM	Dimensions (mm)
[Okazawa 2005]	1	1	2	Non	Moteur CC	Oui	Non	50x50x250
[Walsh 2011]	1	2	3	Non	Moteur pas à pas	Oui	Non	50x50x150
[Li 2013]	1	3	6	Non	Moteur pas à pas	Oui	Non	Non défini
[Sophocleous 2012]	1	3	3	Non	Moteur pas à pas	Non	Non	135x190x570
[Burgner 2013a]	1	2	3	Non	Moteur CC	Non	Non	Non défini
[Webster III 2008]	1	3	6	Rot/Trans	Moteur CC	Non	Non	Non défini
[Dupont 2010, Gosline 2012b]	1	3	6	Non	Moteur CC	Non	Non	Non défini
[Burgner 2014]	2	3x2	6x2	Non	Moteur CC	Non	Non	Non défini
[Xu 2014a, Xu 2013]	1	2	4	Non	Moteur CC	Non	Non	Non défini
[Cardona 2012]	1	2	3	Non	Pneumatique	Non	Oui	Non défini
[Su 2015]	1	2	3	Non	Piézoélectrique	Non	Oui	Non défini
[Comber 2012]	1	3	6	Trans/Trans	Pneumatique	Non	Oui	Non défini
[Hendrick 2014]	2	3+2	6+3	Non	Moteur CC	Non	Non	Non défini
[Burgner 2014]	1	2	3	Non	Moteur CC	Non	Non	Non défini
[Swaney 2012]	4	4x3	4x6	Non	Moteur CC	Non	Non	Non défini
[Burgner 2012]	1	0	5	Non	Manuel	Non	Non	Non défini
[Butler 2012]	1	2	3	Non	Moteur CC	Non	Non	Non défini
[Swaney 2015]	1	2+1 fil	4+2	Non	Moteur CC	Non	Non	Non défini
[Yu 2016]	3	3x2+1	13	Oui	Moteur pas à pas	Non	Non	Non défini
[Morimoto 2016b]	1	2	2	Non	Moteur CC	Non	Non	Non défini
[Chikhaoui 2016a]	1	3	6	Non	Moteur pas à pas	Non	Non	700x300x95
[Boushaki 2016b]	1	3	6	Non	Moteur CC	Non	Non	Non défini

Tableau 5.2 – Synthèse des unités d'actionnement existantes, sur la base de [Boushaki 2016a] et complétées.

$$\text{Étape 2 : } \begin{cases} \beta_1 = l_1 + l_{l2} - L_2 \\ \beta_2 = l_1 - L_3 \\ \beta_3 = 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\text{Étape 3 : } \begin{cases} \beta_1 = l_1 + l_2 - L_2 \\ \beta_2 = l_1 - L_3 \\ \beta_3 = 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

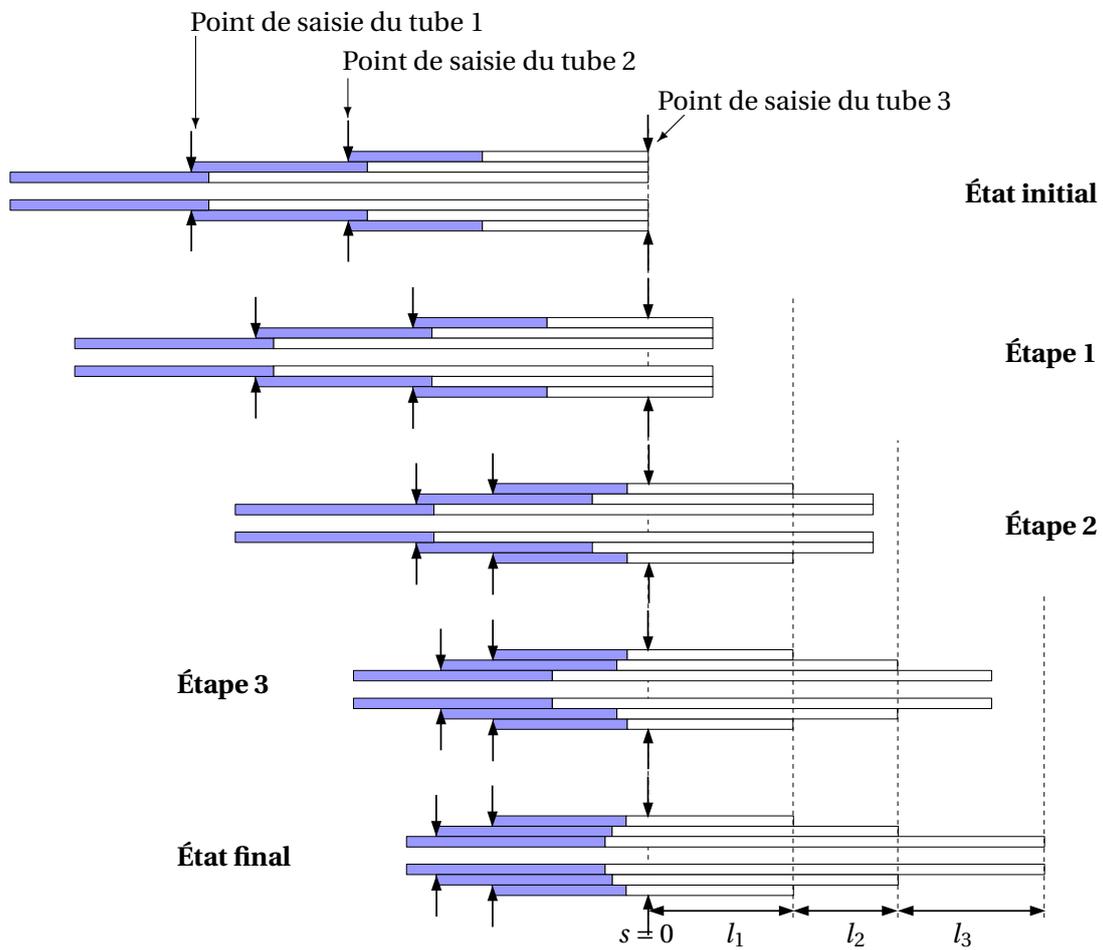


FIGURE 5.4 – Illustration d’une séquence de déploiement ALFI avec principe de point de saisie mobile (PSM).

5.3.2 Comparaison avec la méthode de saisie conventionnelle

Nous étudions maintenant la valeur du déterminant de la matrice W_2 telle qu'introduite au paragraphe 3.4.2, durant toute la phase de déploiement du RTC. Alors qu'une valeur positive du déterminant traduit un comportement stable et un déterminant nul une transition vers un état instable, nous pouvons associer à la proximité de la valeur du déterminant avec zéro une notion de marge de stabilité, de manière qualitative. Afin d'illustrer le bénéfice d'un principe de PSM, nous étudions le jeu de tubes issu de la synthèse faite au chapitre 4, avec des tubes dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 4.3. Le déterminant est tracé dans le cas où les longueurs de transmission sont nulles en fin de déploiement, c'est-à-dire avec des longueurs de tubes telles que $L_3 = l_1$, $L_2 = l_1 + l_2$ et $L_1 = l_1 + l_2 + l_3$.

Sur le graphique de la Figure 5.5, nous pouvons observer que la courbe, représentant la stabilité dans le cas d'un système à PSM, se trouve toujours au-dessus de la courbe représentant la stabilité dans le cadre d'un PSF. Les indices de stabilité sont les mêmes en début de déploiement, les tubes étant entièrement dans l'unité d'actionnement, et contraints à être droits par hypothèse de modélisation. Ils sont aussi égaux durant la dernière phase de déploiement, la longueur de transmission β_1 du tube 1 n'impactant pas la stabilité du robot. Entre ces deux zones apparaît une différence importante en termes de stabilité, avec une décroissance puis croissance de la courbe représentant un PSF. Un système à PSM semble donc permettre une augmentation la stabilité d'un RTC.

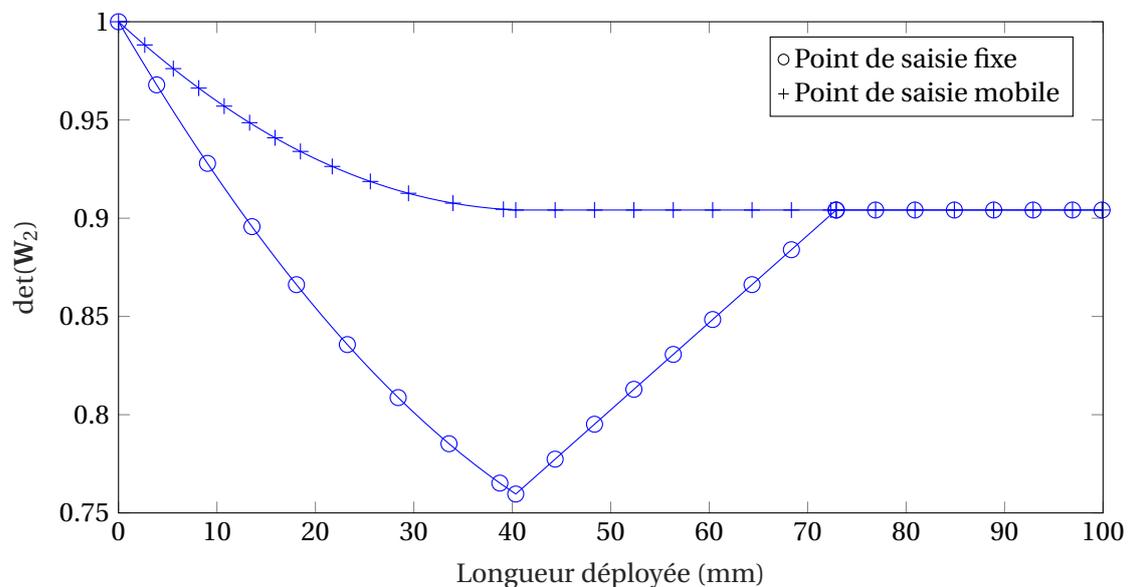


FIGURE 5.5 – Valeurs du déterminant de la matrice W_2 pour le cas d'un déploiement avec PSF et PSM.

5.4 Synthèse d'une unité d'actionnement pour le déploiement ALFI avec point de saisie mobile

5.4.1 Déploiement ALFI classique

Le déploiement ALFI, tel que rappelé au paragraphe précédent, est particulier, dans le sens où seules des translations sont réalisées. Dans la suite, nous le discutons en nous appuyant sur le cas du déploiement de 3 tubes correspondant au contexte du projet NEMRO, sans qu'il ne soit restrictif. La séquence de déploiement, à suivre pour le comportement ALFI souhaité, peut se décomposer comme sur le diagramme de la Figure 5.6. La séquence est également illustrée sur la Figure 5.7.

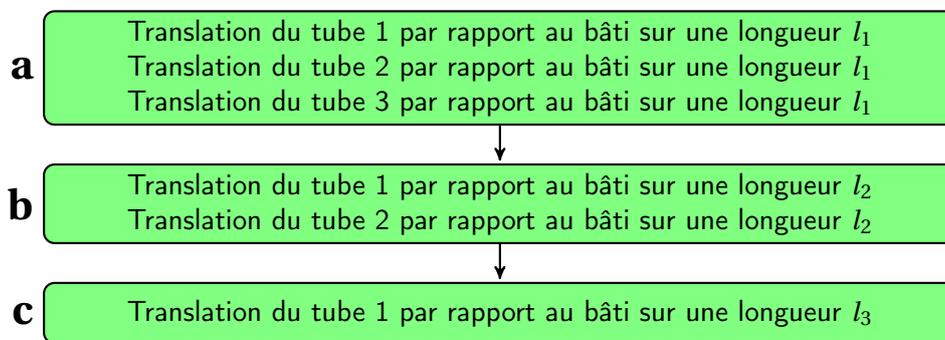


FIGURE 5.6 – Séquence à suivre pour le déploiement ALFI conventionnel de 3 tubes.

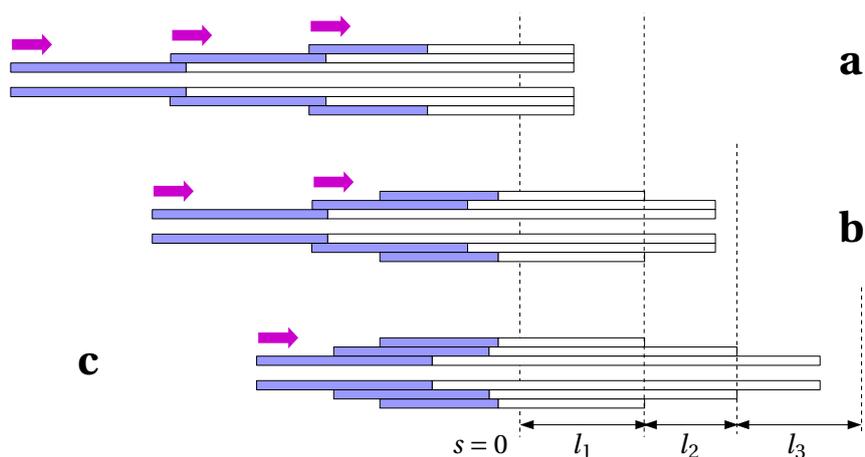


FIGURE 5.7 – Illustration des 3 étapes à réaliser pour déployer un RTC avec une stratégie ALFI dans le cadre conventionnel.

5.4.2 Déploiement avec introduction d'éléments de blocage des tubes

Le diagramme de la Figure 5.6 correspond directement à la séquence de déploiement dans le cas où chaque tube est actionné de manière indépendante, comme envisagé traditionnellement dans la littérature avec les unités d'actionnement série (voir paragraphe 5.2.2). Nous voyons ici que pour chacune des étapes du déploiement, le tube 1 est actionné. Nous proposons de décomposer, en conséquence, la séquence de déploiement au niveau de l'unité d'actionnement en faisant intervenir deux fonctions de base : un mouvement d'avance et des mouvements de prise/relâche des tubes entre eux. Nous proposons alors de n'utiliser qu'un seul actionneur en translation pour le tube 1 au lieu d'un actionneur en translation pour chacun des tubes. Des systèmes de blocage permettent alors de manière complémentaire d'entraîner les tubes 2 et 3 avec le tube 1 selon l'étape du déploiement. Cette stratégie nous semble intéressante afin d'augmenter la compacité du système d'actionnement, l'encombrement d'un mors de saisie nous semblant plus faible que celle d'un actionneur en translation. La séquence de déploiement devient alors telle que représentée sur la Figure 5.8, avec les étapes de blocage des tubes représentées en bleu, et les étapes d'avance des tubes représentées en vert. Avec simplement un actionneur et des mors de saisie, comme illustré sur la Figure 5.9, il est possible de réaliser le déploiement ALFI recherché. Cela offre à notre sens deux avantages essentiels :

- la possibilité d'une meilleure compacité en diminuant le nombre d'actionneurs,
- la simplification de la commande, en recourant à un actionneur piloté de manière continue et des éléments de saisie fonctionnant en tout ou rien.

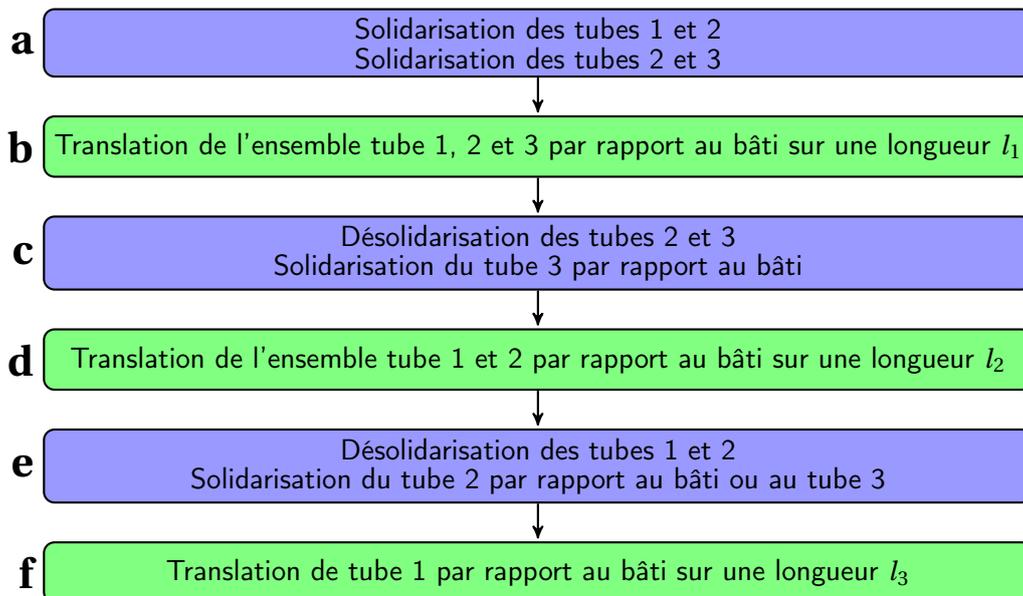


FIGURE 5.8 – Séquence à suivre pour le déploiement ALFI de 3 tubes dans le cas de l'utilisation d'un actionneur en translation et de mors de blocage.

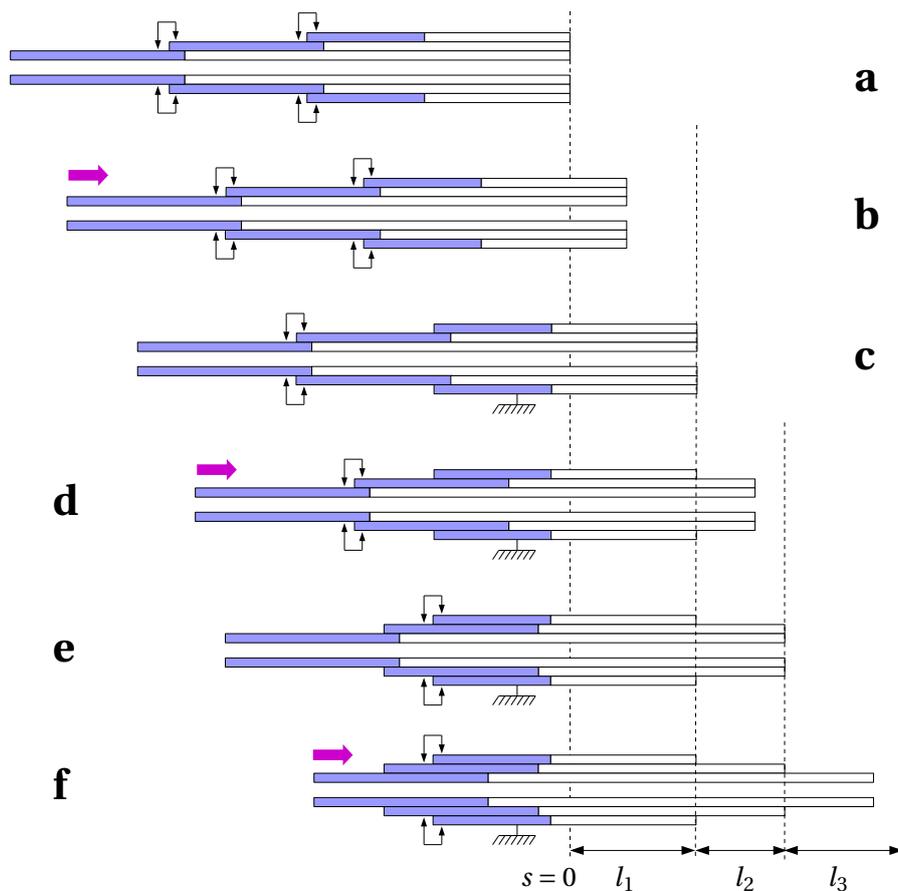


FIGURE 5.9 – Illustration des 6 étapes élémentaires permettant de réaliser le déploiement ALFI du RTC, dans le cas d'utilisation d'un actionneur en translation et de systèmes de blocage.

5.4.3 Déploiement avec une première section déployée

Dans la cinquième étape telle que décrite en Figure 5.8, la séquence de déploiement comporte deux variantes. Le tube 2 peut être solidarisé avec le bâti, ou bien avec le tube 3, ce dernier étant lui-même alors lié au bâti. Nous choisissons une solidarisation avec le tube 3, cette fonction étant déjà présente dans l'étape 1.

Dans le cadre du projet NEMRO, le RTC à déployer est constitué de 3 sections. La première traverse l'orifice de la narine et se situe au niveau du vestibule nasal. Cependant, cette zone a une largeur importante comme étudié précédemment (paragraphe 2.3.5 du chapitre 2). Nous envisageons donc la possibilité d'installer le dispositif dans la narine du sujet, avec sa première section déployée. Cette proposition a plusieurs avantages. Tout d'abord, elle permet de diminuer la durée de déploiement du robot, sa première section étant déjà déployée. Ensuite, elle permet d'augmenter la compacité du dispositif, l'unité d'actionnement n'accueillant alors pas la longueur totale des tubes en son sein.

En considérant la première section du robot déjà déployée et en choisissant une solidarisation du tube 2 avec le tube 3, nous obtenons alors la séquence de déploiement représentée

sur le diagramme de la Figure 5.10, et illustrée sur la Figure 5.11. La séquence de la Figure 5.10 fait alors finalement apparaître deux fonctions élémentaires :

- une fonction d'avance du tube 1, le tube de plus petit diamètre,
- une fonction de blocage des tubes 1/2 et 2/3.

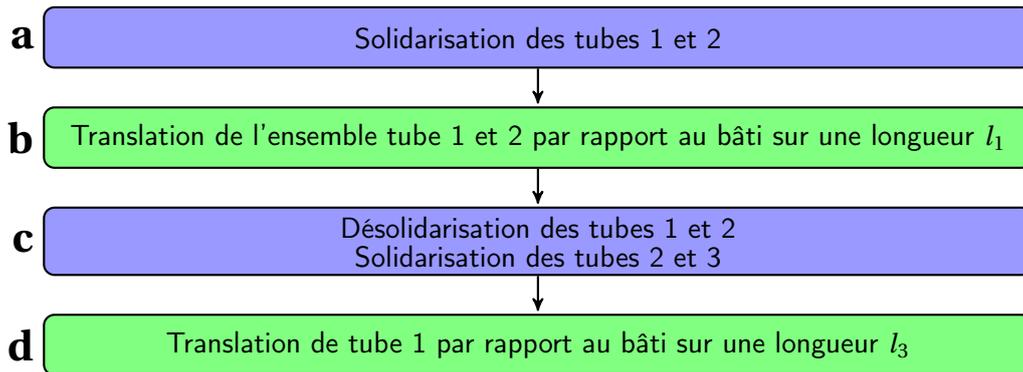


FIGURE 5.10 – Séquence à suivre pour le déploiement ALFI de 3 tubes dans le cas de l'utilisation d'un actionneur en translation et de mors de blocage, avec la section 1 du robot déjà déployée.

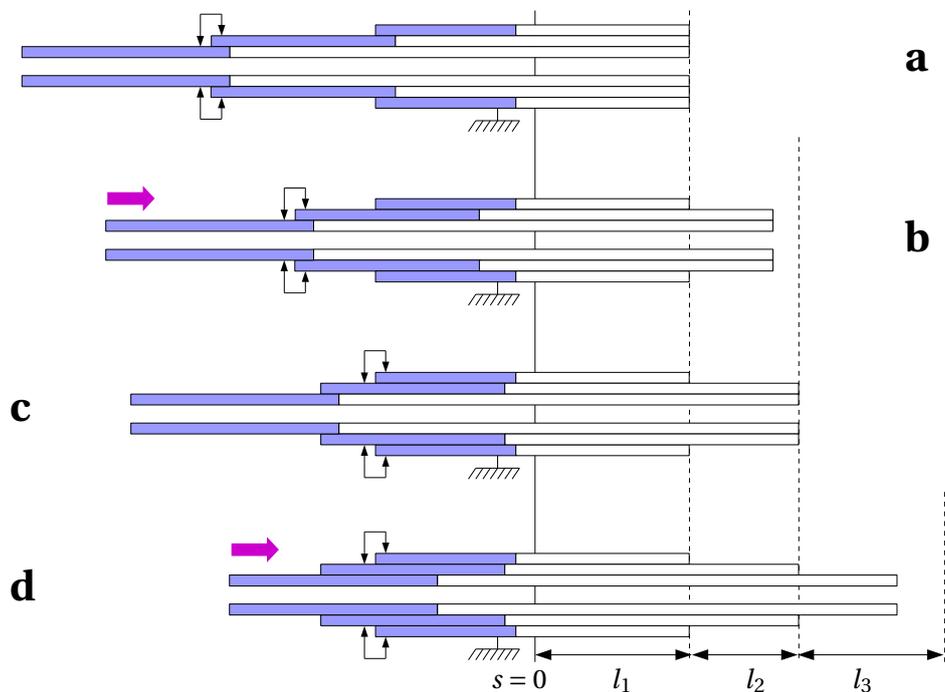


FIGURE 5.11 – Illustration des 4 étapes élémentaires permettant le déploiement ALFI du RTC, avec utilisation d'un actionneur en translation, de systèmes de blocage, dans le cas d'une première section du RTC déjà déployée.

5.5 Conception mécanique

Au chapitre 1, nous avons fait le choix d'un robot porté par le sujet, lié à son visage. Par rapport au concept initial consistant à déployer le robot, et à créer un mouvement de balayage par translation et rotation du tube intérieur, le mouvement de rotation ne semble pas être une difficulté. En effet, des composants standard de faible encombrement peuvent réaliser ce mouvement, tels que des moteurs piezoélectriques [Smaract 2017]. Au contraire, le mouvement de translation des tubes doit idéalement pouvoir piloter le mouvement de déploiement et de balayage, avec des besoins différents en termes de vitesse d'avance et de résolution. Dans la suite de ce chapitre, nous nous concentrons donc sur la faisabilité de cet élément.

Afin de respecter la contrainte de poids associée, nous faisons le choix de privilégier une réalisation s'appuyant sur une technologie pneumatique, pour son rapport poids/puissance, avec une implémentation s'appuyant sur des matériaux polymères de nouveau dans le but de réduire le poids.

Ces éléments devant être actifs et générer des mouvements, nous nous tournons vers des technologies de fabrication additive multimatériaux, permettant à la fois l'impression de matière rigide et souple au sein d'une même pièce. Cela permet d'introduire de la compliance, pour produire une chambre souple soumise à pression pneumatique.

5.5.1 Avance des tubes

C'est notamment dans ce cadre que se sont déroulés de récents travaux [Bruyas 2015] visant à la réalisation de pièces par fabrication additive multimatériaux pour la robotique médicale. Dans ces travaux, un dispositif pneumatique de type actionneur inchworm pour l'insertion d'aiguilles a été réalisé. Celui-ci est représenté sur la Figure 5.12. Il présente les caractéristiques recherchées pour assurer potentiellement l'avance des tubes d'un RTC. Ensuite, il s'agit d'une pièce réalisée en matériaux polymères, qui est donc légère. Elle se présente également sous une forme cylindrique, avec un diamètre de 30 mm et une hauteur de 40 mm, rejoignant ainsi notre besoin de compacité. Enfin, de manière plus importante, un actionneur inchworm est un dispositif à PSM, la zone de saisie variant le long de l'objet déplacé.

Décrivons ce dispositif de manière plus complète. Il est composé de deux mors, séparés par une chambre extensible, permettant de modifier leur espacement. L'un des deux mors est désigné comme le Préhenseur Fixe (PF), tandis que l'autre est désigné comme le Préhenseur Mobile (PM). La chambre extensible est un Actionneur Auxétique (AA). Cette structure particulière a été retenue afin d'optimiser le rapport entre la pression dans la chambre et son allongement. Ces éléments sont repérés sur la Figure 5.12.

Un mouvement d'avance de l'objet manipulé est réalisé par une séquence spécifique d'actionnement des 3 chambres PM, PF et AA. Celle-ci se déroule en 6 étapes, visibles sur la Figure 5.13. Le graphique 5.14 montre de manière complémentaire l'évolution de la pression dans les chambres, avec 0 une pression nulle et 1 un niveau de pression haut. Les pressions utilisées dans le cadre de l'insertion d'aiguilles sont visibles dans le Tableau 5.3.

Nous associons aux étapes d'actionnement de l'actionneur inchworm le Tableau 5.4

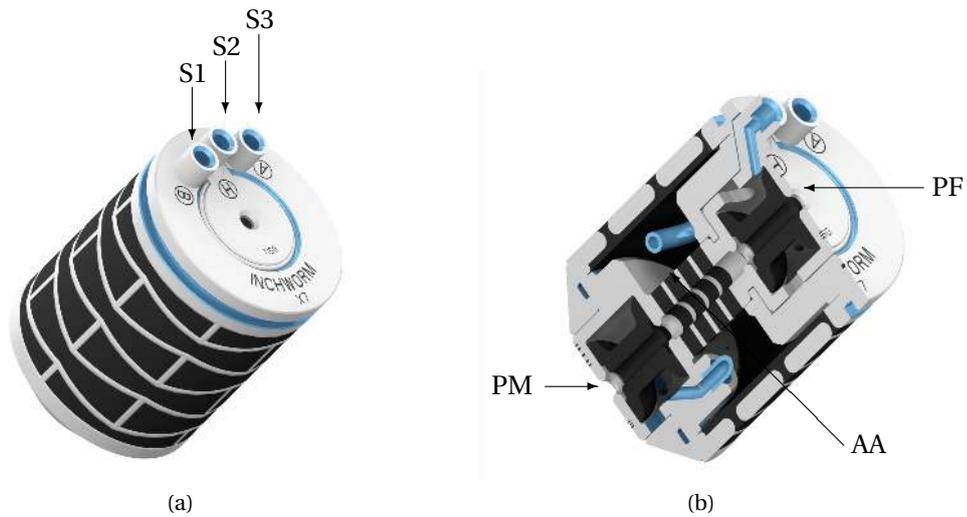


FIGURE 5.12 – Actionneur inchworm pneumatique, avec (a) vue 3D, et (b) vue en coupe (illustrations issues d'un document interne).

représentant l'état des chambres PM, PF et AA en fonction du temps.

L'actionnement est cadencé en imposant les périodes d'ouverture et de fermeture des préhenseurs (T_p) et d'avance/rétractation de l'actionneur auxétique (T_a). Nous avons donc

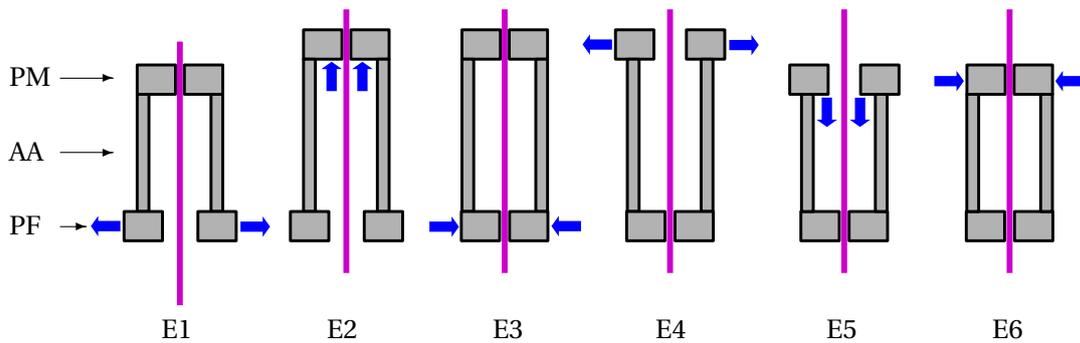


FIGURE 5.13 – Illustration des 6 étapes élémentaires permettant de réaliser un cycle d'avance de l'objet manipulé, issu de [Bruyas 2015].

Dénomination	Sortie	État	Pression de consigne (bars)
Préhenseur mobile (PM)	S1	0	0
		1	3
Préhenseur fixe (PF)	S2	0	0
		1	3
Actionneur auxétique (AA)	S3	0	0
		1	1

Tableau 5.3 – Niveaux de pression nominaux utilisés dans le cadre de l'utilisation pour l'insertion d'aiguilles (issu d'un document interne).

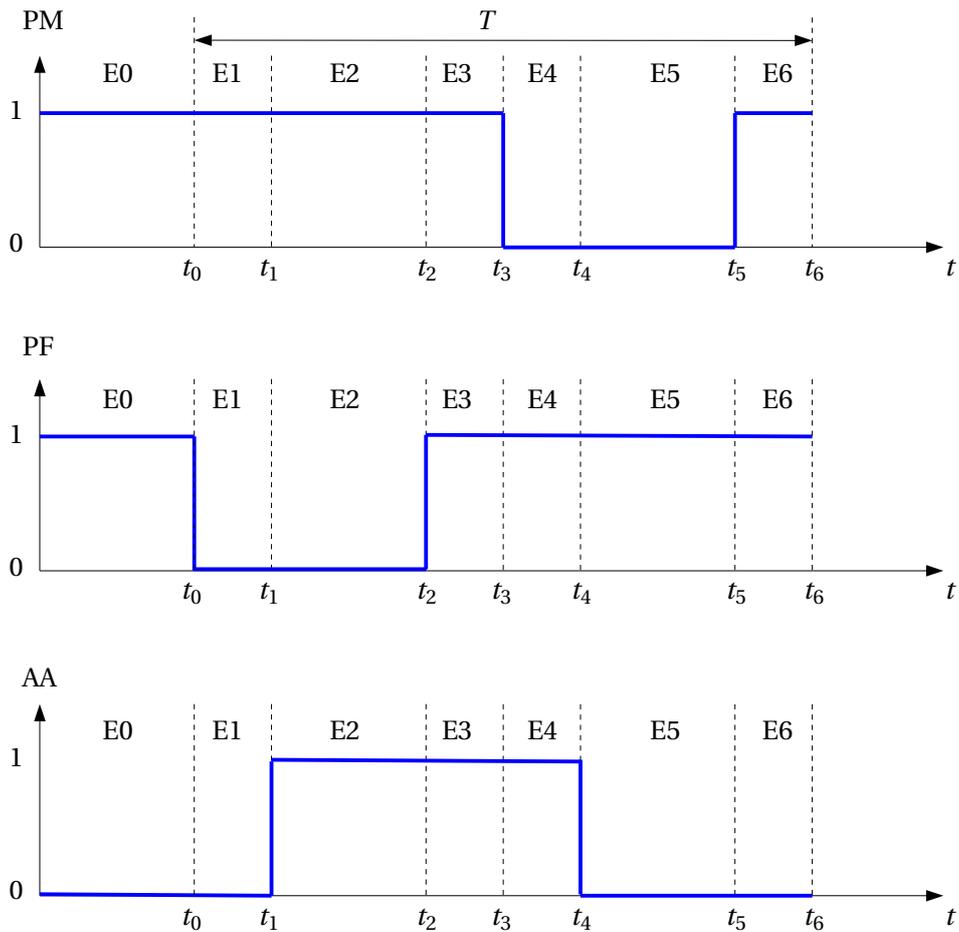


FIGURE 5.14 – Illustration des 6 étapes élémentaires permettant de réaliser un cycle d’avance de l’objet manipulé, adapté de [Bruyas 2015].

les relations (5.6) et (5.5) :

$$T_p = t_1 - t_0 = t_3 - t_2 = t_4 - t_3 = t_6 - t_5 \quad (5.4)$$

Etat courant	Etat suivant	PF	PM	AA	Transition
E0	E1	1	1	0	Départ cycle
E1	E2	0	1	0	$t_1 - t_0 = T_p$
E2	E3	0	1	1	$t_2 - t_1 = T_a$
E3	E4	1	1	1	$t_3 - t_2 = T_p$
E4	E5	1	0	1	$t_4 - t_3 = T_p$
E5	E6	1	0	0	$t_5 - t_4 = T_a$
E6	E1	1	1	0	$t_6 - t_5 = T_p$

Tableau 5.4 – État des actionneurs en fonction du temps (issu d’un document interne).

$$T_a = t_2 - t_1 = t_5 - t_4 \quad (5.5)$$

La période T d'un cycle d'avance est égale à $t_6 - t_0$. Nous avons donc la relation :

$$T = 2T_a + 4T_p \quad (5.6)$$

Nous étudions maintenant l'adéquation entre la durée de déploiement de la section de navigation du robot tolérée, et les vitesses permises par l'actionneur inchworm. Dans le cadre de l'insertion d'aiguilles, un temps de cycle de 1 s a été utilisé. Il conduit à un déplacement de l'objet manipulé de l'ordre du demi-millimètre, pour les pressions mentionnées dans le Tableau 5.3. La première section du robot étant déjà déployée, nous estimons alors la durée nécessaire au déploiement du reste de la section de navigation du robot, permettant l'arrivée sur le site de l'inspection. Une analyse du Tableau 5.1 nous montre que la longueur maximale de la deuxième section du robot est d'environ 40 mm, ce qui conduit à une durée approximative de déploiement de 1 minute et 20 secondes. Cette durée de déploiement se montre acceptable, et rend admissible l'utilisation d'une même fréquence de cycle d'actionnement. La valeur de la période d'ouverture et de fermeture des actionneurs, notée T_p , a été estimée à 0.08 s dans le cadre des travaux sur l'insertion d'aiguille. Elle permet de s'assurer que la pression a la valeur souhaitée dans la chambre des mors. Cette valeur est adoptée pour notre application, et conduit à une valeur de $T_a = 0.68$ s

En ce qui concerne les diamètres des mors de saisie pour les chambres PM et PF, un jeu radial d'environ 100 μm a été utilisé dans le cadre de l'insertion d'aiguille. Pour nos validations expérimentales, un actionneur inchworm équipé de mors de diamètres intérieurs de 2.4 mm est utilisé, et est associé à un tube en Nitinol de diamètre extérieur 2.05 mm pour des raisons de disponibilité, ce qui laisse un jeu radial de 0.175 μm .

5.5.2 Blocage des tubes

Le système de blocage doit permettre de solidariser un tube d'index i avec un tube d'index $i + 1$. Afin d'assurer cette fonctionnalité, nous concevons un mors indépendant ici à partir de la géométrie des mors de l'actionneur inchworm. Ce mors est solidarisé à la base du tube d'index $i + 1$, et permet de bloquer le tube d'index i se déployant à l'intérieur de celui-ci. Ce dispositif est illustré sur la Figure 5.15. Un jeu radial de 100 μm est encore une fois défini. Le mors utilisé dans le cadre de nos validations expérimentales a un diamètre intérieur de 1.21 mm, et est associé à un tube en Nitinol de diamètre extérieur 1.01 mm.

Les besoins en termes de précision de déplacement pour l'insertion d'aiguilles sont cependant différents de ceux requis pour notre application. S'agissant d'une solution de blocage par frottement, les capacités de blocage du tube vont dépendre de la pression d'alimentation du mors. Nous avons donc étudié la gamme de pression admissible pour ce composant. Des tests préliminaires ont montré qu'une pression allant jusqu'à 7 bars peut être utilisée pour

les mors considérés. Nous utiliserons donc une gamme de pression allant de 0 à 7 bars pour étudier les capacités de saisie.

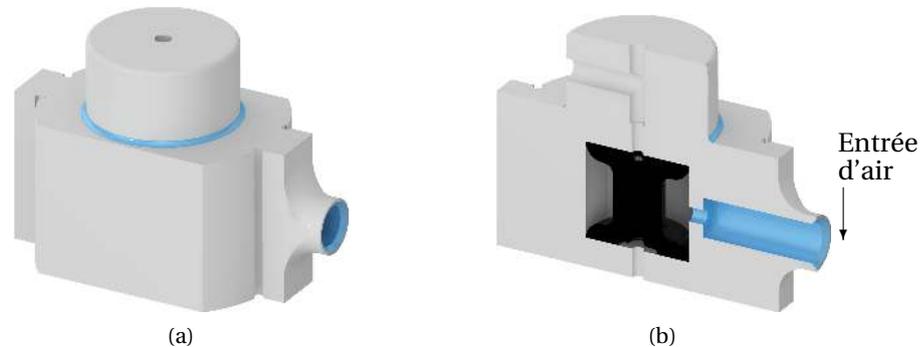


FIGURE 5.15 – Mors de blocage conçu, avec (a) vue en perspective globale, et (b) vue en coupe.

5.6 Validation des éléments fonctionnels

Dans le paragraphe précédent, les éléments technologiques ont été sélectionnés et dimensionnés afin de réaliser les fonctions élémentaires d'avance et de blocage des tubes. Ils sont maintenant testés afin d'évaluer leurs performances, ainsi que la faisabilité d'un dispositif les mettant à contribution. Dans un premier temps, les expériences à réaliser sont définies par rapport aux diverses sollicitations auxquelles le RTC sera confronté durant son déploiement. Les tests sont ensuite mis en place sur les éléments identifiés.

5.6.1 Analyse de la séquence de déploiement

Les étapes élémentaires, pour le déploiement ALFI du robot telles qu'envisagées suite à la méthode précédente, sont visibles sur la Figure 5.11. Elle reprend le repérage des étapes mises en place sur le diagramme de la Figure 5.10. Analysons cette série d'opérations élémentaires afin de mettre en lumière les éléments à évaluer pour valider les performances des systèmes d'avance et de blocage des tubes :

- a Un mors de blocage solidarise les tubes 1 et 2.
- b L'ensemble tube 1 et tube 2 avance relativement par rapport au tube 3 sur une longueur l_2 . Durant cette phase d'avance, l'actionneur inchworm doit alors être capable de vaincre l'effort de frottement entre les tubes 2 et 3. Le mors de serrage entre les tubes 1 et 2 doit alors être capable de transmettre cet effort de poussée. De plus, durant cette première phase, la vitesse de déploiement doit être compatible avec la durée maximale de l'examen. Les performances de l'actionneur inchworm en termes de vitesse de déploiement sont donc à valider.
- c Le mors de blocage entre les tubes 1 et 2 est relâché, tandis que le mors de blocage entre les tubes 2 et 3 est activé.

d Le tube 1 avance relativement par rapport aux tubes 2 et 3. L'actionneur doit alors être capable de vaincre le frottement entre le tube 1 et le tube 2, de manière à générer un mouvement d'avance du premier tube. De plus, le mors solidarissant les tubes 2 et 3 doit résister à l'entraînement en translation du tube 2, du à des phénomènes de frottement avec le tube 1. Durant cette étape, des déplacements fins en translation doivent être effectués afin de réaliser un balayage de l'EO. La résolution en translation de l'actionneur doit donc être évaluée.

5.6.2 Frottement entre les tubes

Nous commençons notre campagne de mesures par l'estimation de l'effort nécessaire au glissement relatif des tubes. Le jeu de tubes utilisé est le même que pour les validations expérimentales du déploiement ALFI et du balayage. Les caractéristiques de ces tubes sont rappelées dans le Tableau 5.5.

Deux efforts sont à mesurer : celui permettant de vaincre le frottement entre les tubes 1 et 2, et un second permettant de vaincre le frottement entre les tubes 2 et 3. Étant donné les diamètres des tubes, leurs épaisseurs et leurs courbures, l'effort de frottement à vaincre est plus important entre les tubes 2 et 3, et nous considérons alors seulement ce jeu de tubes afin de valider la faisabilité de notre approche. Afin de mesurer cet effort, le dispositif expérimental de la Figure 5.16 est utilisé. Il est composé d'une balance électronique sur laquelle descendent les tubes 2 et 3. La portion courbée du tube 2 est totalement insérée à l'intérieur du tube 3, et seule une portion droite de quelques millimètres dépasse de la base du tube 3. Cette configuration est la plus défavorable du déploiement, et correspond au début du cycle, lorsque la partie courbée du tube 2 se situe dans le tube 3. Elle correspond à l'étape **b** de la Figure 5.10. Le tube 3 est solidarisé à un actionneur en translation, abaissant le tube 2 sur la balance numérique. La base du tube 2 vient alors en contact avec cette dernière, et un glissement apparaît entre les deux tubes. L'effort de frottement à vaincre est alors connu grâce à la balance numérique. Celle-ci est connectée à un ordinateur, et les valeurs de masse mesurées sont acquises sous le logiciel Matlab, par le biais de Simulink. Une conversion masse/poids permet alors de connaître la force associée. L'actionneur en translation est également piloté sous Simulink. Les tests sont réalisés pour des valeurs de vitesse de descente des tubes de 10 et 100 μm par seconde. Ces différentes valeurs de vitesse permettent d'observer la variabilité de la force en fonction de la vitesse d'avance. Elles sont suffisamment faibles pour faire apparaître la rupture de contact entre les tubes avec le matériel utilisé, conduisant à une valeur maximale de l'effort

Tube	Module de Young (GPa)	Coefficient de Poisson	Diamètre int. (mm)	Diamètre ext. (mm)	Courbure (mm^{-1})	ψ_i (rad)
1	80	0.33	0.610	0.650	0.000	-
2	80	0.33	0.770	1.070	0.042	π
3	80	0.33	1.760	2.180	0.003	0

Tableau 5.5 – Caractéristiques des tubes employés pour les validations expérimentales du concept proposé.

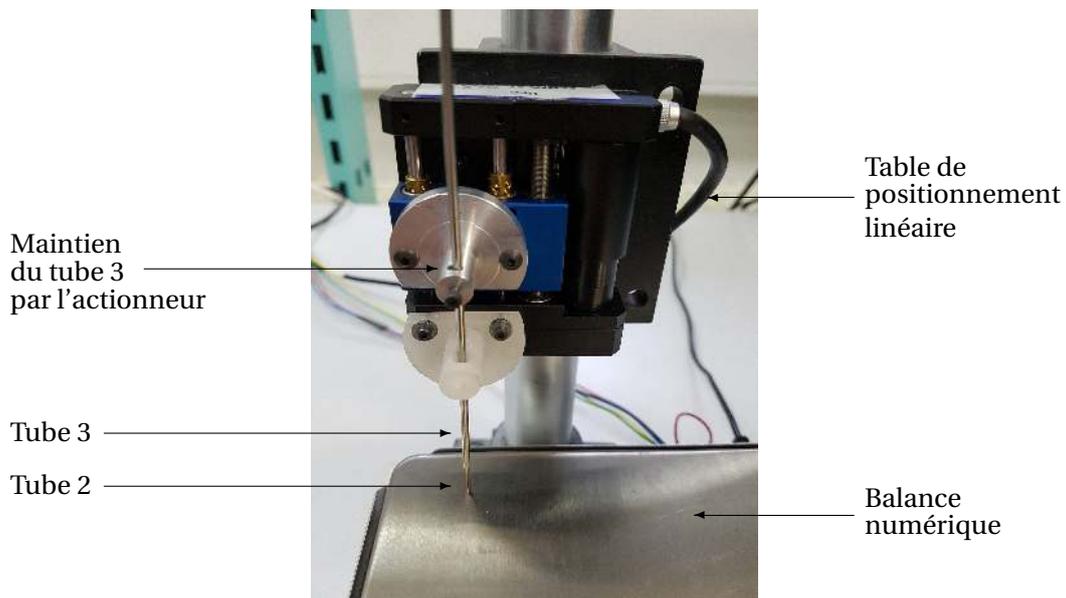


FIGURE 5.16 – Dispositif expérimental utilisé pour caractériser l'effort nécessaire au glissement relatif des tubes.

nécessaire à leur déplacement relatif. Les caractéristiques entre la force et le déplacement sont données sur le graphique de la Figure 5.17.

Comme nous pouvons l'observer sur le graphique de la Figure 5.17, l'effort appliqué augmente de manière linéaire avec le déplacement des tubes jusqu'à une rupture de contact, à partir de laquelle l'effort semble constant. Il correspond alors à l'effort nécessaire pour

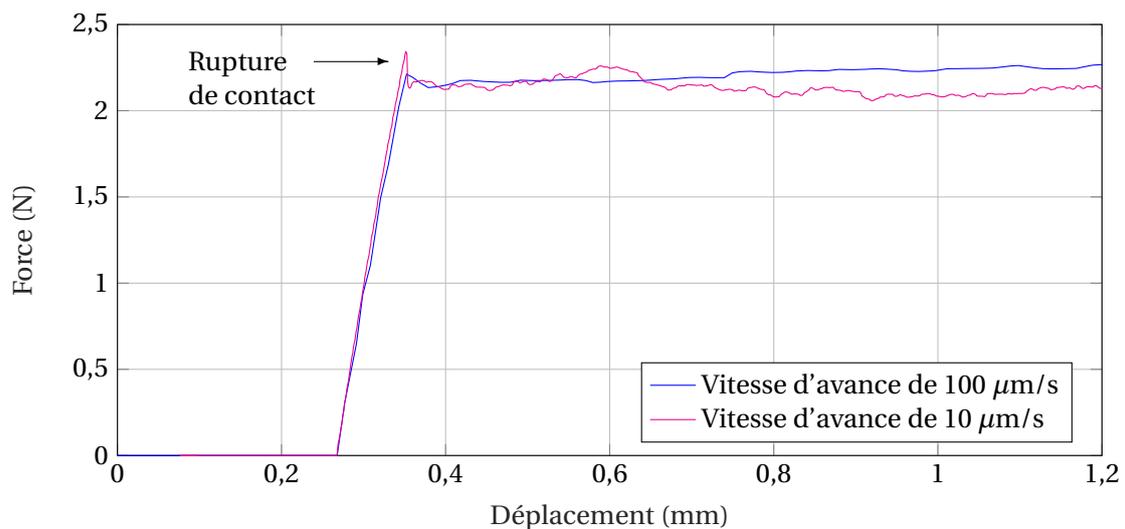


FIGURE 5.17 – Caractéristiques entre la force et le déplacement pour des vitesses d'avance de 10 et 100 μm par seconde.

faire glisser les tubes 2 et 3 l'un par rapport à l'autre. La force correspondante est d'environ 2.3 N, pour les deux vitesses d'avance testées. C'est cet effort qui est retenu comme valeur de référence pour la suite de ce travail.

5.6.3 Blocage des tubes

Nous évaluons maintenant la qualité du blocage obtenu par le mors développé. Celui-ci doit pouvoir résister à des efforts de poussée ou de traction sur les tubes, de la valeur identifiée de 2.3 N. Afin de procéder à l'évaluation des performances en blocage de notre système, nous mettons en place le dispositif illustré sur la Figure 5.18.

Ce dispositif expérimental est composé du mors conçu traversé par le tube de diamètre extérieur 1.01 mm, au bout duquel se trouve un miroir en silicium. Une force de 2.3 N est appliquée à la base du tube, par suspension d'une masse. Un appareil de mesure laser Keyence LC 2420 est utilisé pour mesurer les déplacements longitudinaux du tube, lorsque celui-ci est bloqué par le mors. Les tubes ainsi que le mors sont dégraissés afin d'obtenir les meilleures performances de blocage possibles. Plusieurs niveaux de pression sont utilisés afin de mesurer la qualité du blocage obtenu, et les mesures sont réalisées pour des valeurs allant de 2 à 7 bars. Pour cette plage de variation, les vitesses de glissement du tube sont données sur la Figure 5.19(a). Nous observons une décroissance de la vitesse de glissement en fonction de la pression en deux temps. La première décroissance semble être liée à l'augmentation de la surface de contact entre le tube et le mors, celui-ci se déformant sous l'effet de la pression. Dans un second temps, la surface de contact entre ces deux éléments étant invariante, nous remarquons un effet linéaire de la pression sur la vitesse de glissement. La pression de contact du mors sur le tube augmentant avec la pression interne du mors, la qualité d'immobilisation

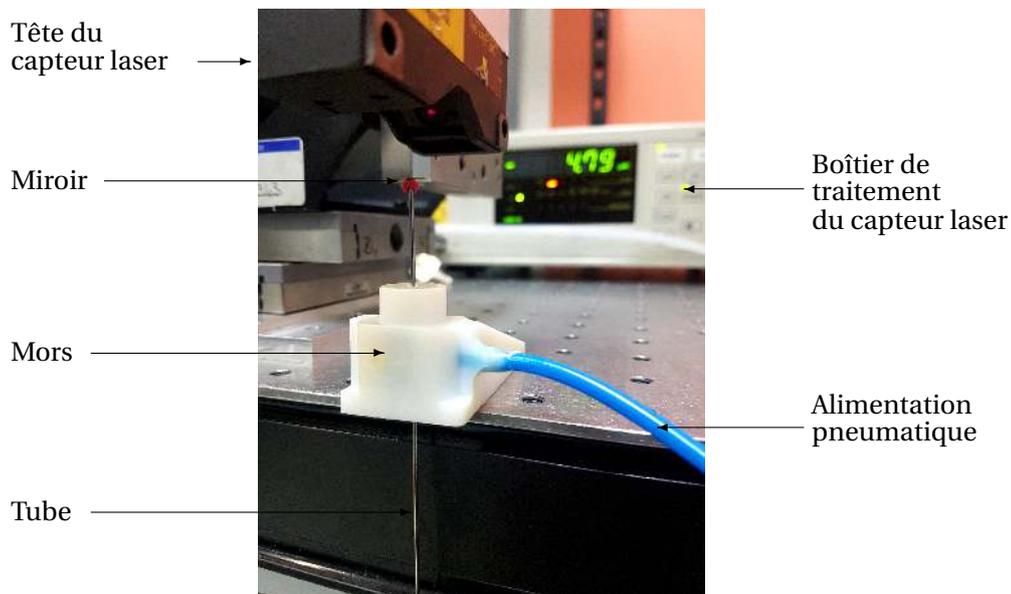


FIGURE 5.18 – Dispositif expérimental mis en place pour tester les performances du système de blocage.

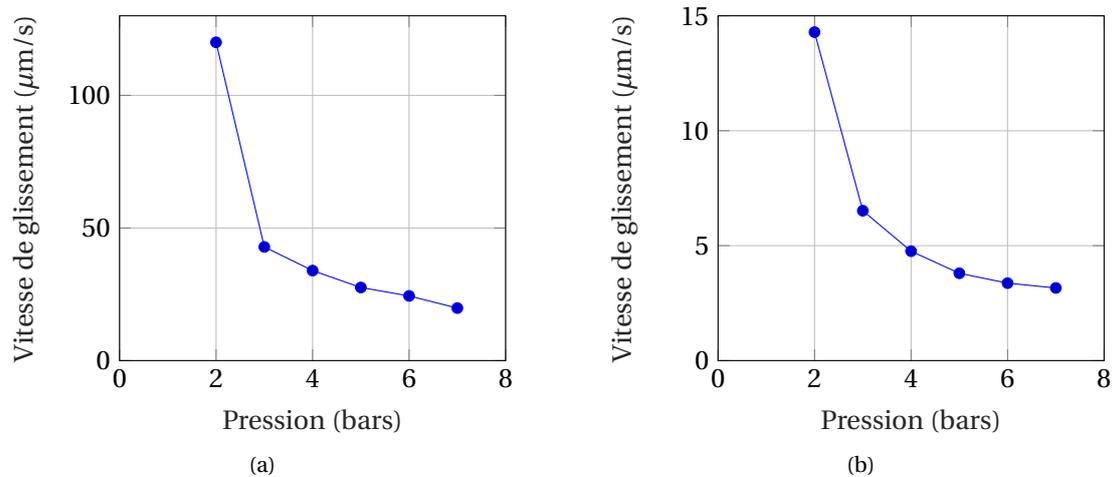


FIGURE 5.19 – Vitesse de glissement entre le tube et le mors : (a) dans le cas d’un jeu radial de 100 µm (diamètre de tube de 1.01 mm), et (b) 65 µm (diamètre de tube de 1.08 mm).

du tube est alors améliorée sans que la surface de contact ne soit changée, ce qui explique le phénomène observé. La transition entre ces deux étapes semble se produire à une pression d’environ 3 bars pour les deux tubes considérés.

Nous observons dans un second temps l’influence du diamètre du tube sur la qualité du blocage. Pour ce faire, nous utilisons un tube de diamètre extérieur 1.08 mm, conduisant à un jeu radial de 65 µm. Nous répétons le protocole de mesure précédent, en mesurant les vitesses de glissement pour des valeurs de pression allant de 2 à 7 bars. Les valeurs de vitesse de glissement en fonction de la pression sont visibles sur le graphique de la Figure 5.19(b). Nous observons une tendance similaire à la précédente, avec une décroissance rapide dans un premier temps en dessous de 4 bars, puis une décroissance quasi-linéaire en fonction de la pression. Cependant, la qualité de blocage obtenue dans le second cas est supérieure à celle obtenue dans le premier cas. Le jeu radial entre le mors et le tube joue donc un rôle capital dans la qualité du blocage. Il convient donc de le dimensionner avec soin en fonction des performances souhaitées, d’une part en laissant le minimum de jeu possible entre le tube et le mors au repos, et d’autre part en maximisant les pressions utilisées dans les chambres des mors. De plus, dans le cas de tubes de diamètres inférieurs à celui testé, il pourrait être envisageable de compenser la diminution de la surface de contact liée à l’utilisation d’un diamètre de tube plus faible par une augmentation de la hauteur du mors.

5.6.4 Avance des tubes

Nous caractérisons maintenant la gestion de l’avance des tubes durant les phases de déploiement de la section 2 du robot, où un déploiement rapide du robot est souhaité, et durant la phase de balayage, où la résolution du robot doit être caractérisée afin de vérifier son adéquation avec nos besoins.

5.6.4.1 Avance rapide

Mesure du pas d'avance : la fréquence choisie afin de piloter l'actionneur inchworm étant égale à 1 Hz, nous étudions le déplacement du tube déployé par celui-ci sur plusieurs cycles, afin de caractériser sa vitesse d'avance. Pour ce faire, nous utilisons le dispositif visible sur la Figure 5.20, composé de l'actionneur inchworm, du tube associé, et d'une caméra de type DigiMicro Scale. Afin de repérer les mouvements du tube dans la vidéo, un seuillage des images est réalisé, et l'extrémité supérieure gauche du tube détectée. La conversion entre les mouvements en pixels détectés dans l'image et le déplacement en millimètre est réalisée par placement d'une mire de points de diamètre et d'espacement connus au niveau de la fibre neutre du tube. Une détection des centres de gravité des points est réalisée dans l'image acquise par la caméra, puis les distances de proche en proche entre ces points sont mesurées. La moyenne de ces distances est calculée. Sa correspondance en millimètre étant connue, le facteur d'échelle est alors déterminé.

Deux expériences sont conduites afin de caractériser le pas d'avance de l'actionneur inchworm : une première à vide, où seulement le tube est déplacé, et une seconde en charge, avec une force de 2.3 N s'opposant au déplacement du tube, sous forme d'une masse solidaire de l'extrémité inférieure du tube. Ce dispositif expérimental est visible sur la Figure 5.20.

Dans le cas où aucune charge n'est exercée sur le tube, la trace laissée par l'extrémité supérieure gauche du tube est visible sur la Figure 5.21(a), et le déplacement vertical correspondant du tube est visible sur la Figure 5.21(c). Nous observons un pas d'avance dont la moyenne est de 0.508 mm, avec un écart type de 0.016 mm. La valeur de déplacement est en adéquation avec celle annoncée lors du choix de l'actionneur.

Si nous considérons maintenant le cas de l'application d'une charge de 2.3 N à la base du tube déployé, la trace laissée par le tube durant son déploiement ainsi que le déplacement vertical associé sont visibles sur les Figures 5.21(a) et 5.21(c) respectivement. Nous observons alors un pas d'avance plus faible avec 0.358 mm en moyenne, avec un écart type mesuré de 0.030 mm. Ce phénomène est lié à la nature des matériaux de l'actionneur inchworm utilisé.

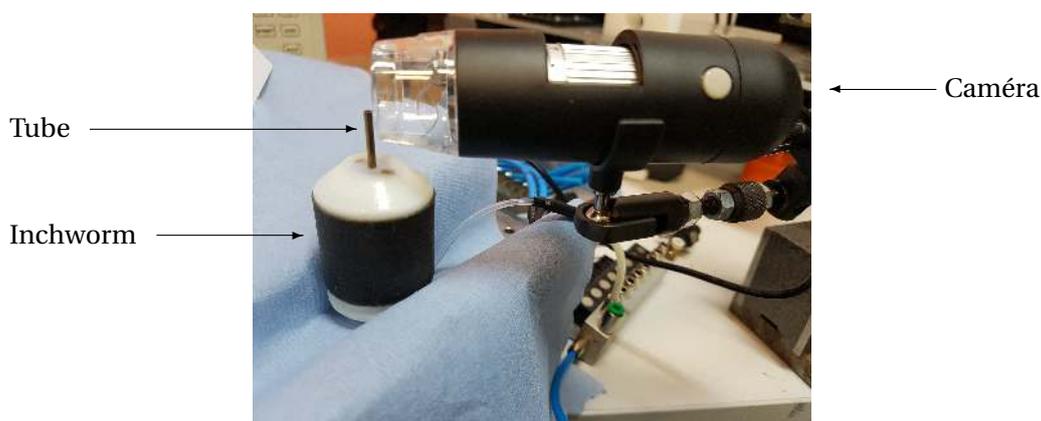


FIGURE 5.20 – Dispositif expérimental utilisé pour la caractérisation du pas d'avance des tubes, avec et sans charge.

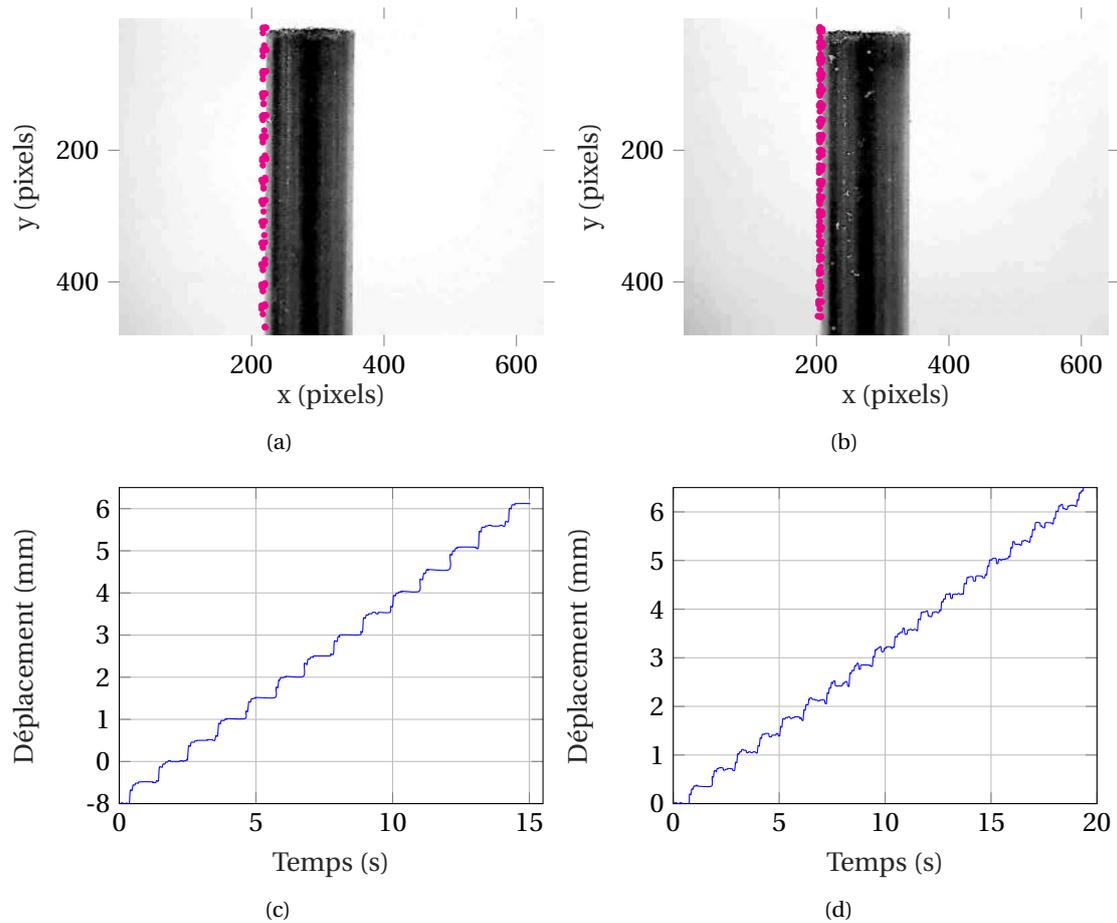


FIGURE 5.21 – Position de l’extrémité supérieure gauche du tube durant son déploiement et déplacement associé dans le cas : (a), (c) d’un tube sans charge, et (b), (d) d’un tube avec une charge de 2.3 N.

La chambre auxétique faisant intervenir de l’élastomère, son allongement pour une même pression est dépendant de la contrainte qui lui est appliquée. En considérant le pas d’avance moyen calculé, il reste cependant possible d’effectuer un déploiement de 40 mm en 1 minute et 52 secondes, ce qui reste tout à fait acceptable pour le déploiement du reste de la section de navigation.

Caractérisation de la déviation latérale Nous observons sur les Figures 5.21(a) et 5.21(b) précédentes une dispersion des nuages de points selon l’axe x , traduisant un mouvement latéral des tubes durant leur avance. Afin de caractériser l’amplitude de ce mouvement, nous mettons en place le dispositif visible sur la Figure 5.22, où deux caméras sont disposées selon des angles de 90° pour observer les mouvements du tube. Le déploiement du tube est alors réalisé et observé par ces caméras.



FIGURE 5.22 – Dispositif expérimental utilisé pour la mesure des mouvements transverses du tube durant son déploiement.

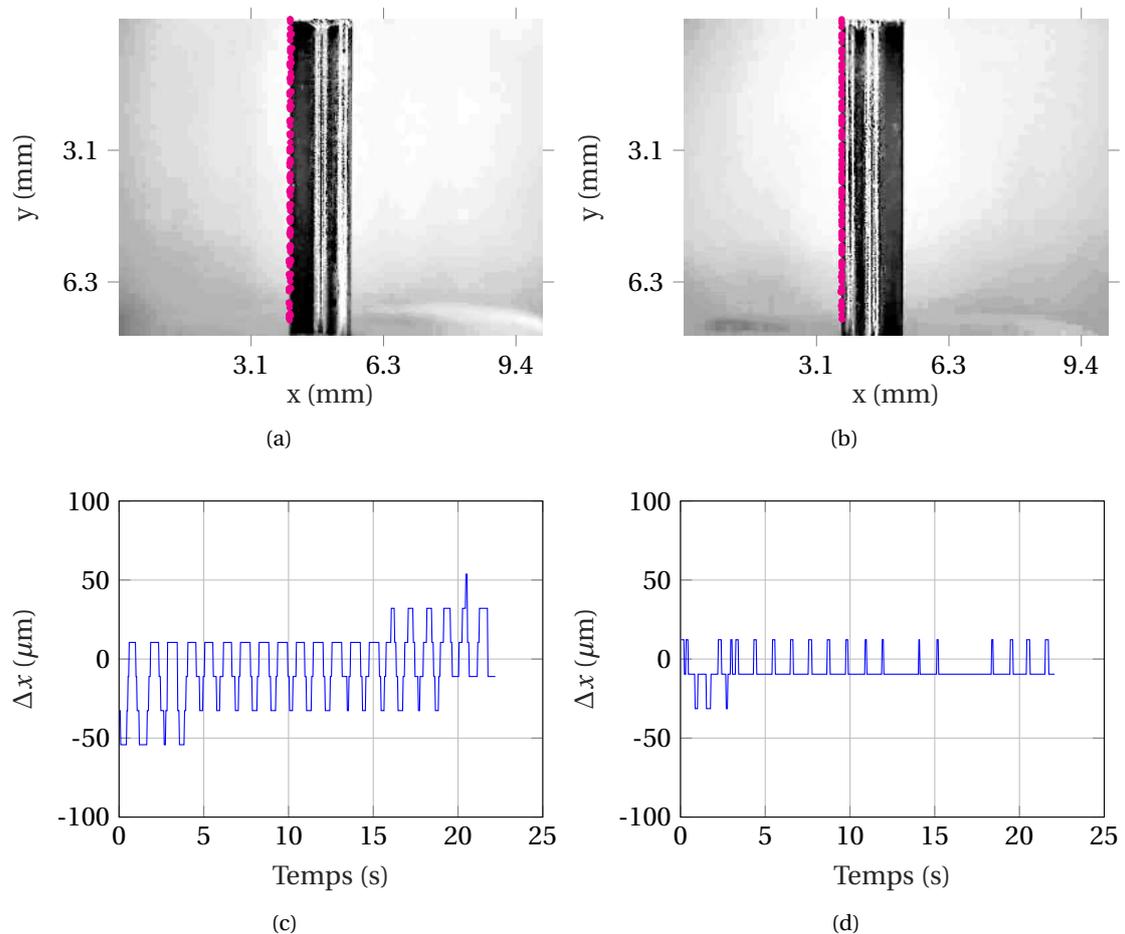


FIGURE 5.23 – Résultats expérimentaux sans charge, avec : (a), (b) visualisation de la position de l'extrémité du tube pour les caméras 1 et 2, et : (c), (d) mouvements transverses observés par les mêmes caméras.

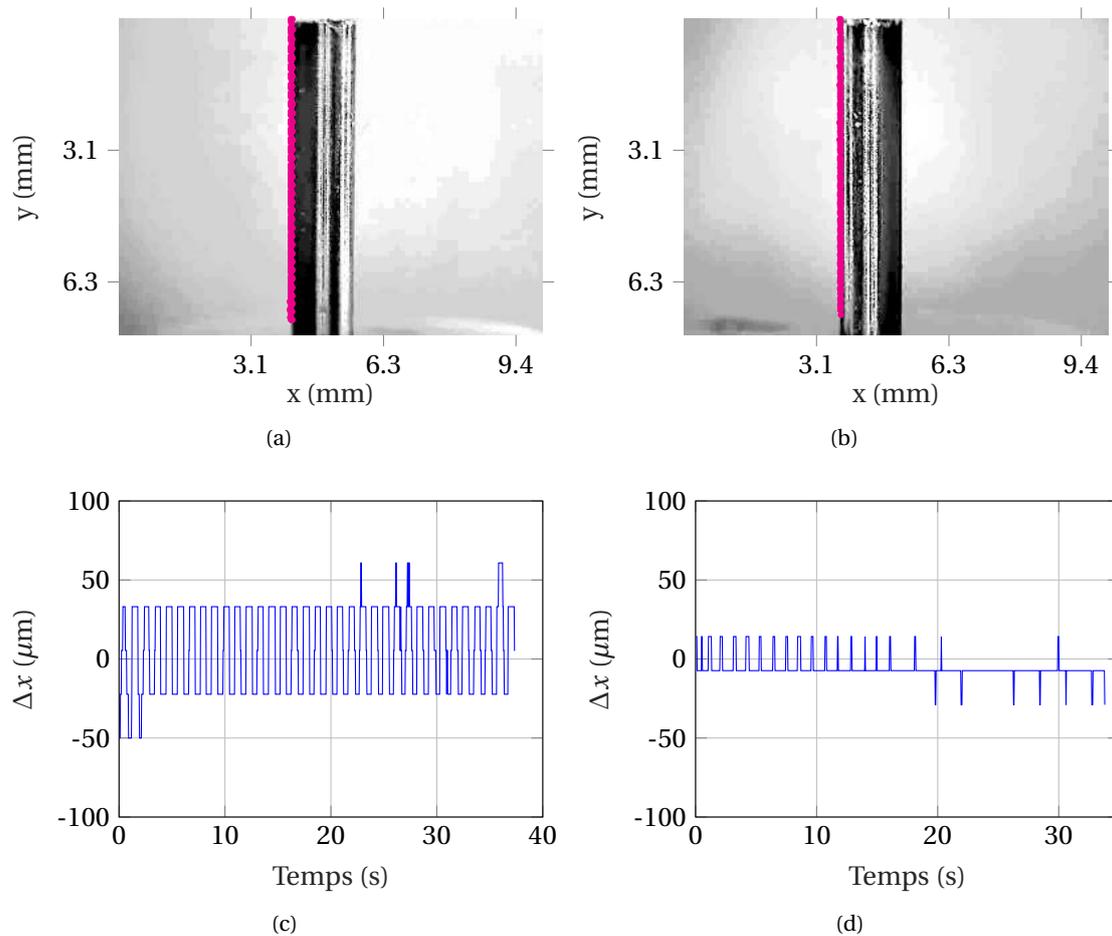


FIGURE 5.24 – Résultats expérimentaux avec charge, avec : (a), (b) visualisation de la position de l’extrémité du tube pour les caméras 1 et 2, et : (c), (d) mouvements transverses observés par les mêmes caméras.

Dans un premier cas, l’expérience est réalisée sans charge. Les positions de l’extrémité supérieure du tube sont alors visibles sur les Figures 5.23(a) et 5.23(b), provenant respectivement des caméras 1 et 2. Nous observons alors une amplitude de déplacement latéral très faible du tube, qu’il s’agisse des observations faites avec la caméra 1 ou la caméra 2. En effet, l’amplitude du mouvement transverse reste inférieure à $50 \mu\text{m}$ dans les deux cas, avec des valeurs s’approchant de la résolution de nos moyens de mesure. Nous considérons alors ces valeurs comme négligeables.

Nous répétons l’expérience en considérant une charge de 2.3 N à la base du tube. Les résultats sont visibles sur la Figure 5.24, présentée de la même manière que dans le cas sans charge. Nous constatons que les amplitudes de déplacement latéral restent du même ordre de grandeur, avec des valeurs inférieures à $50 \mu\text{m}$ durant toute la phase d’avance considérée.

Ce comportement, maintenant caractérisé, ne semble pas critique pour notre application étant donné les amplitudes de déplacement observées. Il sera cependant à caractériser dans le

cas d'un assemblage concentrique de tubes, afin de mesurer son impact sur les mouvements du robot.

5.6.4.2 Avance fine

Nous étudions pour terminer l'étape de déplacement fin en translation requis pour le balayage de la fente olfactive. La taille des images acquises avec la sonde OCT étant d'environ 10 à 12 μm [AGILTRON 2017], la résolution en translation de notre actionneur doit être de cet ordre de grandeur. Afin de moduler l'allongement de l'actionneur inchworm, nous modifions la pression à laquelle est soumise la structure auxétique, et nous recherchons une valeur permettant de s'approcher de la valeur cible. Afin de procéder à cette recherche, nous mettons en place le dispositif expérimental visible sur la Figure 5.25, où une mesure de positionnement de l'extrémité du tube est réalisée par un capteur laser. Une carte d'acquisition NI USB-6009 permet de réaliser l'acquisition des données provenant du capteur laser, afin de mesurer de manière précise le déplacement longitudinal de l'extrémité du tube en fonction du temps.

Dans un premier temps, nous procédons avec un tube sans charge. Une valeur de pression de 0.05 bar permet d'obtenir des pas d'une valeur moyenne de 7.97 μm avec un écart type de 0.81 μm . Le déplacement du tube en fonction du temps est visible sur le graphique de la Figure 5.26(a). La résolution obtenue est compatible avec les caractéristiques de la sonde d'imagerie choisie.

Dans un second temps, nous répétons le test précédent, en soumettant le tube déployé à un effort de 2.3 N s'opposant à son déplacement. Nous recherchons alors la pression permettant d'avoir la résolution précédemment obtenue, dans le cas où le tube n'est soumis à aucune charge extérieure. Nous déterminons alors expérimentalement une valeur de pression de 0.35 bar, permettant un pas de déplacement de 6.52 μm en moyenne, avec un écart type de 1.83 μm . Le déplacement correspondant du tube est visible sur la Figure 5.26(b). La valeur du pas est proche de celle obtenue sans charge externe appliquée sur le tube. Nous remarquons cependant une différence de comportement concernant l'amplitude du mouvement du tube



FIGURE 5.25 – Illustration du dispositif expérimental mis en place pour la mesure du pas d'avance fin requis pour le balayage de l'EO.

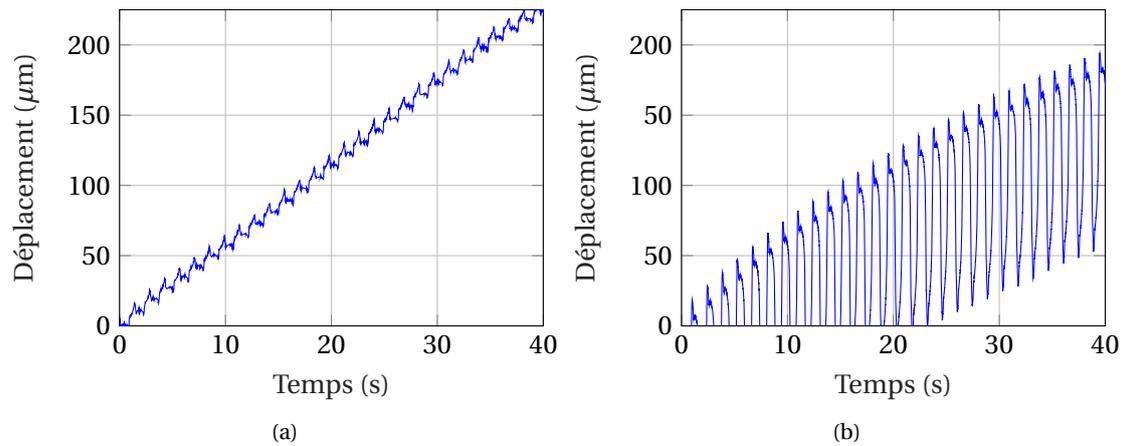


FIGURE 5.26 – Déplacements des tubes obtenus en fonction du temps, pour : (a) un tube sans charge avec une pression de 0.05 bar, et (b) un tube avec une force résistante de 2.3 N à sa base et une pression de 0.35 bar.

pour un pas de déplacement donné. En effet, l'amplitude du mouvement est beaucoup plus importante dans le cas où une charge externe est appliquée sur le tube, avec $141.86 \mu\text{m}$ contre $17.80 \mu\text{m}$ sans charge. Ce phénomène est dû aux transferts de charge entre les mors PF et PM, et sont liés aux propriétés élastiques de l'actionneur inchworm utilisé. Ce transfert de charge conduit d'une part à un affaissement des mors, illustré sur la Figure 5.27 pour toutes les étapes du cycle d'actionnement. D'autre part, il conduit à une compression longitudinale de la structure auxétique lorsque le mors PM supporte la masse du tube. Ce phénomène donc est présent durant les étapes E1, E2 et E3 illustrées sur la Figure 5.27. Il reste cependant possible de réaliser un déplacement du tube avec la résolution souhaitée, ce qui valide le comportement du dispositif pour la phase de balayage en translation de l'EO.

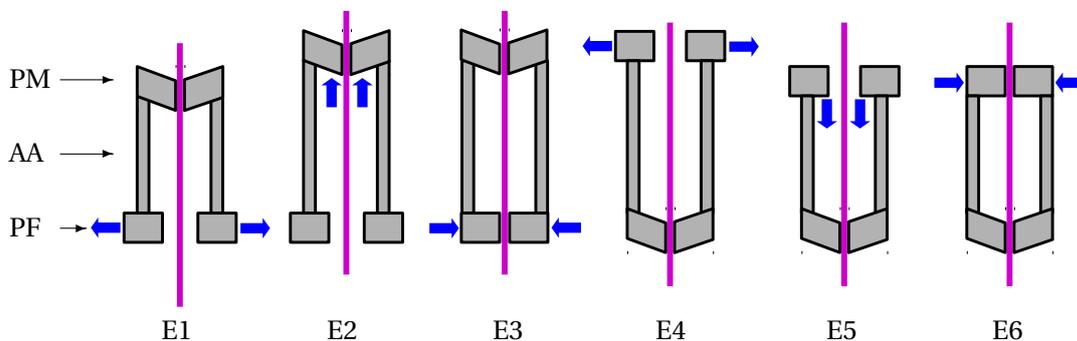


FIGURE 5.27 – Illustration des 6 étapes élémentaires permettant de réaliser un cycle d'avance de l'objet manipulé, avec mise en évidence du phénomène d'affaissement des mors de saisie PF et PM.

5.7 Synthèse du chapitre 5

Dans ce dernier chapitre, nous nous sommes intéressés à l'actionnement des RTC dans le cadre d'un déploiement ALFI. Dans un premier temps, une validation de la stratégie de déploiement en boucle ouverte du robot a été réalisée, prenant en compte à la fois les erreurs de recalage et de reconstruction des modèles 3D. Elle conduit à un nombre de sujets suffisamment important pour que notre proposition ait un sens dans le cadre d'une utilisation en recherche médicale, avec des sujets pouvant être sélectionnés.

Par la suite, nous nous sommes intéressés à l'analyse des unités d'actionnement existantes pour les RTC, par une analyse de l'état de l'art. Les systèmes existants ne pouvant répondre aux besoins du projet NEMRO étant donné l'approche envisagée, nous nous sommes attachés au développement d'une méthode de synthèse permettant la conception d'un dispositif compact et léger. La rationalisation de la séquence de déploiement dans le cadre d'un comportement ALFI est réalisée. Une proposition faisant intervenir des mors de blocage pour les tubes à la place d'actionneurs en translation est retenue, permettant à notre sens d'abaisser la complexité du dispositif et d'améliorer sa compacité. Un nouveau type de saisie des tubes, que nous nommons PSM, est également introduit dans le but de maximiser la stabilité du robot durant son déploiement. Cette propriété est démontrée par analyse du déploiement du robot retenu à la fin du chapitre 4 pour effectuer la tâche d'exploration de l'EO.

Pour terminer, un mode de réalisation faisant appel à des technologies de fabrication additive multimatériaux est utilisé, pour son rapport poids/puissance intéressant et leur faible masse. Un actionneur de type inchworm, répondant aux critères de l'actionneur en translation recherché, est caractérisé afin de vérifier sa compatibilité avec les performances attendues de notre dispositif. Un second élément, le mors de blocage, est dimensionné et réalisé afin de caractériser également ses performances. Cette dernière partie du chapitre 5 nous conforte dans la réalisation d'un prototype faisant appel à ces deux éléments pour maîtriser le déploiement en translation, et les mouvements d'avance fins requis pour la phase de balayage.

Conclusions et perspectives

Les travaux, présentés dans ce manuscrit, ont été motivés par un contexte applicatif spécifique, celui de l'inspection des cellules olfactives, dans le but d'étudier le lien entre déficience olfactive et maladies neurodégénératives. Nous avons proposé un scénario spécifique d'inspection basé sur l'emploi d'un robot continu capable de se déployer pour amener sur site une sonde d'imagerie. Quatre propositions clés ont alors été faites, dont l'intérêt va au-delà du contexte projet :

- l'exploitation de robots à tubes concentriques pour porter une sonde d'imagerie fibrée et accomplir avec cette structure robotique à la fois un déploiement vers le site d'intérêt et un positionnement fin pour une biopsie optique ;
- la réalisation de déploiement ALFI, afin de minimiser le volume occupé par le dispositif dans un environnement anatomique très contraint ;
- la synthèse de RTC aptes au déploiement ALFI, en assurant la stabilité du comportement et la prise en compte de la variabilité inter-sujets ;
- la conception d'un RTC porté par le sujet, en introduisant une unité d'actionnement mettant à profit des technologies de fabrication additive multimatériaux, pour améliorer à la fois la stabilité et la compacité du dispositif.

Conclusions

Chacune de ces propositions a été étayée au long de cette thèse, avec plusieurs contributions qu'il nous semble important de regrouper en cette fin de document.

Approche d'inspection robotisée : une analyse fine du besoin a été conduite pour mettre en place un scénario pas à pas viable d'inspection de l'EO, qui soit compatible avec un cadre de recherche clinique.

Anatomie de la cavité nasale : un besoin de données anatomiques 3D est apparu, pour définir précisément l'environnement dans lequel le robot doit naviguer. Afin d'obtenir cette information, non disponible dans la littérature, nous avons proposé une séquence de traitement,

avec la segmentation d'images de la zone d'intérêt permettant, dans un second temps, sa reconstruction. Il nous est alors possible de disposer d'une information complète caractérisant sa géométrie, une donnée unique d'autant plus qu'elle a été construite pour une population de 20 sujets.

Des métriques ont, par ailleurs, été sélectionnées et extraites de ces modèles, de manière à fournir des indicateurs pour guider la synthèse d'un robot. Des mesures de planéité de la fosse nasale ont été faites, ainsi que du profil du toit de la fente olfactive. Par la suite, des estimations chiffrées ont été réalisées sur la courbure de la face antérieure de la fosse nasale, et sur la largeur de la fosse nasale et de la fente olfactive. Ces nouvelles informations permettent, aujourd'hui, de mieux caractériser cette zone anatomique, et dans notre cas obtenir les contraintes pour la conception d'un dispositif robotique devant s'y introduire.

Modélisation et stabilité des RTC : nous avons fait le choix, à partir de l'analyse de l'anatomie 3D des fosses nasales, de réaliser un déploiement ALFI en exploitant des RTC construits à partir de tubes plans à courbures constantes, assemblés de manière télescopique pour former un robot plan. Pour un tel arrangement, les tubes ne sont pas soumis à des effets de torsion. Un modèle géométrique simple a pu être extrait de la littérature afin de représenter la forme du robot pour un jeu de tubes et des variables articulaires donnés.

Pour un RTC dans une telle configuration, la stabilité du comportement n'est pas assurée du fait des torsions potentielles entre tubes. Un critère de stabilité et un modèle géométrique plus complet ont, en conséquence, été choisis dans la littérature. Nous avons alors proposé une première méthode de synthèse pour calculer la géométrie des tubes d'un robot permettant d'obtenir une forme souhaitée. Par la suite, les variables de conception disponibles dans la synthèse d'un RTC ont été recensées, et l'impact d'un variable particulière, l'anisotropie des tubes, étudiée. Nous avons pu montrer son impact significatif sur la stabilité, et le fait qu'elle peut être utilisée judicieusement pour rendre admissibles des configurations initialement instables. Dans notre contexte applicatif, les valeurs d'intérêt sont à la limite des valeurs obtenues à ce jour dans la littérature, et nous avons écarté son emploi.

Synthèse des RTC : nous avons proposé une démarche prenant en compte des éléments non présents dans les méthodes de la littérature. Celle-ci se décompose en une recherche de formes admissibles par réalisation de tests de collision sur les modèles anatomiques 3D, puis d'une synthèse de la géométrie des tubes du robot, permettant l'obtention de la forme identifiée. Cette démarche se situe dans le cadre particulier du déploiement ALFI, encore non considéré dans les approches conventionnelles. Ensuite, elle prend en compte les longueurs de transmission et intègre une évaluation de stabilité. Il s'agit d'un élément crucial à notre sens, permettant de réaliser ici la synthèse d'un robot dont la sécurité du comportement est anticipée, et d'avoir l'assurance qu'il adoptera effectivement la forme souhaitée. Pour terminer, notre méthode prend en compte la variabilité inter-sujets, au contraire des approches conventionnelles.

La mise en place de cette méthode dans le cadre du projet a conduit à des résultats intéressants, avec un taux d'inspection de 18 sujets sur 20. Il apparaît que la fente olfactive peut

être inspectée sur un tiers de sa longueur, ce qui est une fraction suffisante pour observer l'épithélium olfactif.

Conception d'une unité d'actionnement : pour terminer, la faisabilité d'une approche d'inspection en boucle ouverte a été étudiée en introduisant des erreurs de recalage et de reconstruction 3D de la fosse nasale. En considérant l'utilisation d'un dispositif commercial et les erreurs de reconstruction 3D mesurées, un nombre de sujets s'élevant à 11 sur 20 est accessible pour l'inspection de l'EO. A notre sens, ce ratio est significatif et valide l'approche de déploiement adoptée.

La faisabilité dépend également de notre capacité à placer l'unité d'actionnement du RTC sur le sujet, pour palier les mouvements de ce dernier. L'analyse de l'état de l'art conduit à deux constats. Le premier concerne le type de saisie des tubes, que nous avons dénommé à "point de saisie fixe" (PSF). Nous proposons a contrario un concept à "point de saisie mobile" (PSM), permettant d'augmenter la marge de stabilité des RTC. Le second concerne l'encombrement et la masse des systèmes existants. Nous apportons une solution à ce problème en analysant précisément le besoin dans le cas d'un déploiement ALFI, afin de limiter le nombre d'actionneurs et la complexité du système résultant. Deux fonctions élémentaires d'avance et de blocage des tubes sont alors mises en évidence. De la même manière, nous choisissons d'utiliser des technologies de fabrication additive multimatériaux, permettant la réalisation d'un système en polymère, disposant d'un rapport poids/puissance intéressant.

La conception d'éléments pour la réalisation des fonctions élémentaires est alors réalisée. Des premiers éléments confortant la faisabilité d'un tel système ont alors été mis en évidence, permettant par la suite d'envisager la conception d'un dispositif dimensionné pour le jeu de tubes identifié.

Perspectives

Le travail réalisé ouvre de multiples perspectives, en lien direct avec le projet, et de manière plus large aux thématiques abordées.

Dispositif robotique : une perspective prioritaire est la finalisation du dispositif robotisé dans son ensemble pour répondre aux besoins du projet NEMRO. Elle tirera parti des éléments technologiques développés, en adaptant leurs variables de conception au jeu de tubes retenu dans le manuscrit. Des tests préliminaires en laboratoire, puis potentiellement sur cadavre, devront alors être mis en place pour démontrer la fonctionnalité du système.

Le dispositif étant réalisé en polymère, une utilisation pourrait également être envisagée sous imageur IRM, afin par exemple de délivrer des molécules odorantes à un endroit spécifique de la cavité nasale, et d'observer en même temps l'activité cérébrale du sujet. Cette compatibilité ouvre en fait de manière large le champ d'études dans le domaine de l'olfaction et plus généralement des neurosciences, nécessitant un imageur de ce type. Plus largement, nous pourrions considérer l'utilisation de notre dispositif en chirurgie interventionnelle. Enfin, la présence d'un imageur CT ou IRM permettrait, par la même occasion, de repérer la position

du robot dans la fosse nasale, pour proposer une approche en boucle fermée.

Synthèse des RTC : la méthode de synthèse développée dans le cadre de ces travaux présente plusieurs avantages, énoncés tout au long de ce manuscrit. Elle souffre cependant d'un défaut lié à sa force, qui est le choix d'une discrétisation de points de passage. Celle-ci conduit à des configurations de robot non optimales en termes de distances par rapport à des zones anatomiques sensibles. Un couplage de notre méthode avec des techniques d'optimisation pourrait alors être d'intérêt, afin de centrer le robot entre les zones critiques, et permettre d'être beaucoup plus robuste à des erreurs de recalage ou de reconstruction 3D. Cela pourrait être d'intérêt dans notre contexte applicatif, afin de centrer davantage le robot dans la fosse nasale et la fente olfactive.

Gestion du frottement dans les RTC : un autre point concerne les phénomènes de frottement entre les tubes d'un RTC. Ceux-ci restent très complexes à modéliser, et dépendent d'un nombre de facteurs élevé comme la raideur et la courbure des tubes, les matériaux utilisés, ainsi que les jeux de fonctionnement et la nature précise des surfaces de contact entre les tubes, difficiles à évaluer. Plutôt que de tenter la modélisation de ces phénomènes, une approche pourrait être d'atténuer l'impact du frottement entre les tubes, par création de ruptures de contact entre ceux-ci. Cela permettrait de relâcher la torsion emmagasinée dans les tubes. Une mise en œuvre possible pourrait être par l'utilisation d'actionneurs piézoélectriques pour créer des déplacements longitudinaux d'amplitude micrométrique. Cette approche permettrait alors d'obtenir des RTC dont le comportement se rapprocherait davantage des modèles ne tenant compte que des interactions en flexion et torsion.

Dans le cadre de nos travaux, cette approche pourrait nous permettre de découpler plus efficacement les mouvements de translation et de rotation de la section d'exploration. Des ruptures de contact ont été utilisées, avec un mouvement de translation de pas différent permettant de relâcher la torsion du tube de la section d'exploration, et d'optimiser son débattement angulaire. Néanmoins, en simplifiant, le mouvement de balayage obtenu est alors proche d'une hélice. Une vibration d'amplitude micrométrique du tube permettrait alors un meilleur découplage en rotation et translation, avec la réalisation d'un mouvement purement angulaire, et une perte d'amplitude moindre en bout de tube, pour se rapprocher d'un rapport unitaire entre amplitudes proximale et distale.

Variation de raideur : les travaux réalisés nous conduisent à voir comme intéressante l'introduction de variations de raideur sous deux aspects. Le premier consiste en la réalisation d'une variation de raideur sur un tube, en utilisant par exemple des méthodes de modifications structurelles telles qu'envisagées dans ce manuscrit. Celles-ci permettent alors de faire varier le ratio entre raideur en courbure et en torsion des tubes. Les valeurs d'anisotropie, ainsi obtenues dans la littérature, permettent de modifier l'état de stabilité d'un RTC dans certains cas. Mais il pourrait être à notre sens intéressant d'explorer les limites possibles de ce ratio, afin d'offrir davantage de marge de manœuvre pour la synthèse de RTC faisant intervenir ce paramètre. Les découpes présentes sur les tubes peuvent poser des problèmes de blocage

lors de mouvements relatifs entre ceux-ci. Afin d'apporter une solution à ces problèmes, des technologies de fabrication additive multimatériaux pourraient permettre de disposer de tubes sans découpes, composés de matériaux aux propriétés différentes rendant l'ensemble anisotrope.

Il serait également intéressant d'envisager une variation active de raideur pour un RTC. Dans le cadre d'un déploiement ALFI, les critères analytiques de stabilité introduits permettent de quantifier la capacité d'un RTC à rester dans son plan de déploiement, où à le quitter, par l'analyse du signe d'un déterminant. Le passage d'un signe positif à un signe négatif annonce la bifurcation du robot d'une configuration stable dans le plan, vers une autre qui se trouve hors du plan. Un déterminant nul laisse alors "pressentir" une raideur nulle du robot dans ses directions de bifurcation. Sachant que les longueurs de transmission du robot jouent un rôle dans sa stabilité, il serait alors possible d'envisager une reconfiguration des points de saisie des tubes du robot, de manière à piloter la raideur du robot. Les applications possibles sont multiples, et permettraient de limiter des contraintes appliquées lors du contact entre le robot et des zones anatomiques.

Modification active de courbure : enfin, un des éléments pouvant encore limiter l'usage des RTC est la variété de formes qu'ils sont capables d'adopter dans l'espace, entièrement dépendantes du choix initial des courbures et des longueurs des tubes. Bien que cela conduise à une compacité accrue, aucun élément actif ne se trouvant dans la partie déployée, il peut être limitant pour nombre d'applications. Une modification active de courbure pourrait apporter des avantages non négligeables, y compris dans notre contexte applicatif. La prise en compte de la variabilité inter-sujet a conduit à sélectionner trois RTC permettant de maximiser le nombre de sujets et de fosses nasales inspectées. Un seul a été finalement retenu, car il présente à lui seul un ratio important de sujets pour lesquels l'inspection est possible. Cependant, la prise en compte de la variabilité inter-sujets dans le but de proposer un dispositif unique, pourrait également être faite en utilisant des tubes dont la courbure peut être modifiée de manière active. Cela permettrait de regrouper un ensemble de robots d'intérêt en un seul jeu de tubes.

Une modification active de courbure présente également un intérêt pour la section d'exploration du dispositif envisagé. Un tube droit est sélectionné pour permettre un balayage par rotation, tout en conservant une invariance de forme du robot. De légères non planéités de la fente olfactive ont été constatées dans le chapitre 2. Une modification active de courbure permettrait d'envisager la rotation d'un tube courbé, en modifiant de manière active son plan de courbure afin de rester sur le chemin identifié. Cela permettrait de réaliser un balayage par rotation, tout en épousant davantage le profil courbé de la fente olfactive, repoussant alors les limites de la zone d'exploration de la fente olfactive.

Exploitation des RTC : l'approche envisagée en boucle ouverte dans un environnement très contraint en termes de géométrie n'est initialement pas évidente. Nous avons pu constater que l'approche n'en est pas moins viable dans le contexte. Elle permet par ailleurs de simplifier le dispositif, en embarquant moins de capteurs et d'actionneurs, et de simplifier les lois de

commande associées. Cela est notamment possible grâce aux avancées faites en matière de recalage, avec des dispositifs de plus en plus performants. Notre approche pourrait alors se révéler d'intérêt dans d'autres contextes, tout comme la stratégie de déploiement ALFI, qui pourrait être transposée à d'autres robots continus.

Finalement, nous pensons également que les RTC, pour leurs multiples avantages de compacité, d'adoption de formes complexes et d'architecture, avec un canal présent au sein des tubes et traversant le robot, pourraient être utiles dans d'autres contextes applicatifs, tels que la chirurgie de l'oreille pour n'en citer qu'un. Une nouvelle génération d'endoscopes fibrés, avec usage de multiples modes d'imagerie tels que l'OCT, la microscopie confocale, la fluorescence ou l'IVUS (échographie intravasculaire), pourrait alors émerger, pour l'observation et la détection de pathologies de manière mini-invasive.

Liste des publications

Revue internationale avec comité de lecture :

C. Girerd, T. Lihoreau, K. Rabenoroso, B. Tamadazte, M. Benassarou, L. Tavernier, L. Pazart, E. Haffen, N. Andreff, P. Renaud, "*In Vivo Inspection of the Olfactory Epithelium : Feasibility of Robotized Optical Biopsy*", Annals of Biomedical Engineering, 2018

Chapitre d'ouvrage :

C. Girerd, K. Rabenoroso, P. Renaud, "*Combining Tube Design and Simple Kinematic Strategy for Follow-the-Leader Deployment of Concentric Tube Robots*", Advances in Robot Kinematics 2016 (J. Lenarcic and J.-P. Merlet, eds.), ch. 10, pp.266-290, Springer International Publishing, 2018

Conférences internationales avec comité de lecture et édition des actes :

C. Girerd, K. Rabenoroso, P. Rougeot, P. Renaud, "*Towards Optical Biopsy of Olfactory Cells using Concentric Tube Robots with Follow-the-Leader Deployment*", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, Canada, 2017

C. Girerd, K. Rabenoroso, P. Renaud, "*Synthesis of a New Concentric Tube Robot for Olfactory Cells Exploration*", CRAS : Computer/Robot Assisted Surgery, pp.58-59, Pisa, Italy, 2016

Conférences nationales avec comité de lecture et édition des actes :

C. Girerd, K. Rabenoroso, P. Renaud, "*Toward a Robotized Inspection of the Olfactory Epithelium*", Surgetica, Strasbourg, France, 2017

Communication et publications diverses

C. Girerd, K. Rabenoroso, P. Renaud, "*Concentric Tube Robots for the Inspection of Olfac-*

Chapitre 5. Actionnement pour les RTC en déploiement ALFI : proposition et...

tory Cells", Journée des Jeunes Chercheurs en Robotique, Paris, novembre 2016, communication orale

C. Girerd, K. Rabenoroso, P. Renaud, "*Toward a Concentric Tube Robot with Hybrid Actuation for in vivo Olfactory Cells Inspection*", Journée de la Fédération de Médecine Translationnelle de Strasbourg, avril 2016, communication orale

C. Girerd, K. Rabenoroso, P. Renaud, "*Conception et commande d'un robot à tubes concentriques et actionnement hybride*", Journée Recherche de l'INSA de Strasbourg, 2015, poster

Références

- [Aarli 2006] Johan A. Aarli, Tarun Dua, Aleksandar Janca et Anna Muscetta. *Neurological disorders : public health challenges*. Numéro ISBN 978 92 4 156336 9. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 2006. (cité page 6)
- [AGILTRON 2017] AGILTRON. *Miniature OCT Fiber Probe*. <http://www.agiltron.com/PDFs/Miniature%20OCT%20Fiber%20Probe.pdf>, 2017. (cité pages 9, 35, 80, 83, 93, et 123)
- [Amorim 2015] Paulo Amorim, Thiago Moraes, Jorge Silva et Helio Pedrini. *Invesalius : An interactive rendering framework for health care support*, pages 45–54. Springer International Publishing, Cham, 2015. (cité page 30)
- [Antunes 2012] Paulo Antunes, Fátima DOMINGUES, Marco GRANADA, Paulo André. *Mechanical properties of optical fibers*. In : *Selected Topics on Optical Fiber Technology*. InTech, 2012. (cité page 60)
- [Attems 2005] Johannes Attems, Felix Lintner, Kurt Jellinger *et al.* *Olfactory involvement in aging and Alzheimer's disease : an autopsy study*. *Journal of Alzheimer's disease*, vol. 7, no. 2, pages 149–157, 2005. (cité page 8)
- [Azimian 2014] H. Azimian, P. Francis, T. Looi et J. Drake. *Structurally-redesigned concentric-tube manipulators with improved stability*. In *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2030–2035, Sept 2014. (cité page 61)
- [Baykal] Cenk Baykal et Ron Alterovitz. *Asymptotically Optimal Design of Piecewise Cylindrical Robots using Motion Planning*. (cité page 74)
- [Baykal 2015] Cenk Baykal, Luis G. Torres et Ron Alterovitz. *Optimizing design parameters for sets of concentric tube robots using sampling-based motion planning*. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, pages 4381–4387. IEEE, 2015. (cité page 71)
- [Bedell 2011] Chris Bedell, Jesse Lock, Andrew Gosline et Pierre E. Dupont. *Design optimization of concentric tube robots based on task and anatomical constraints*. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011, pages 398–403. IEEE, 2011. (cité pages xi, 72, et 73)
- [Bergeles 2015] C. Bergeles, A. H. Gosline, N. V. Vasilyev, P. J. Codd, P. J. del Nido et P. E. Dupont. *Concentric Tube Robot Design and Optimization Based on Task and Anatomical*

Références

- Constraints*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 31, no. 1, pages 67–84, 2015. (cité pages [xi](#), [2](#), [14](#), [16](#), [43](#), [73](#), et [74](#))
- [Bojsen-Moller 1971] F. Bojsen-Moller et J. Fahrenkrug. *Nasal swell-bodies and cyclic changes in the air passage of the rat and rabbit nose*. Journal of anatomy, vol. 110, no. Pt 1, page 25, 1971. (cité page [1](#))
- [Boushaki 2016a] Mohamed Boushaki, Mohamed Taha Chikhaoui, Kanty Rabenorosoa, Chao Liu, Nicolas Andreff et Philippe Poignet. *Conception, modélisation et commande des robots à tubes concentriques : vers des applications médicales*. Techniques de l'Ingénieur, 2016. (cité pages [xvi](#), [54](#), et [103](#))
- [Boushaki 2016b] Mohamed Nassim Boushaki. *Design Optimization and Control for Concentric Tube Robot in Assisted Single-Access Laparoscopic Surgery*. PhD thesis, Université de Montpellier, 2016. (cité page [103](#))
- [Braak 1993] Heiko Braak, Eva Braak et Jurgen Bohl. *Staging of Alzheimer-related cortical destruction*. European neurology, vol. 33, no. 6, pages 403–408, 1993. (cité page [8](#))
- [Bruyas 2015] Arnaud Bruyas. *Apport de la fabrication additive multi-matériaux pour la conception robotique*. PhD thesis, Université de Strasbourg, 2015. (cité pages [xiii](#), [110](#), [111](#), et [112](#))
- [Bui 2015] Nhat Linh Bui, Sim Heng Ong et Kelvin Weng Chiong Foong. *Automatic segmentation of the nasal cavity and paranasal sinuses from cone-beam CT images*. International journal of computer assisted radiology and surgery, vol. 10, no. 8, pages 1269–1277, 2015. (cité page [98](#))
- [Burgner 2011] J. Burgner, P. J. Swaney, D. C. Rucker, H. B. Gilbert, S. T. Nill, P. T. Russell, K. D. Weaver et R. J. Webster. *A bimanual teleoperated system for endonasal skull base surgery*. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011, pages 2517–2523, Sept 2011. (cité pages [11](#), [13](#), et [74](#))
- [Burgner 2012] Jessica Burgner, Philip J. Swaney, Trevor L. Bruns, Marlena S. Clark, D. Caleb Rucker, E. Clif Burdette et Robert J. Webster. *An autoclavable steerable cannula manual deployment device : Design and accuracy analysis*. Journal of medical devices, vol. 6, no. 4, page 041007, 2012. (cité page [103](#))
- [Burgner 2013a] J. Burgner, P. J. Swaney, R. A. Lathrop, K. D. Weaver et R. J. Webster. *Debulking from within : a robotic steerable cannula for intracerebral hemorrhage evacuation*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 60, no. 9, pages 2567–2575, 2013. (cité pages [ix](#), [11](#), [12](#), [96](#), et [103](#))
- [Burgner 2013b] Jessica Burgner, Hunter B. Gilbert et Robert J. Webster. *On the computational design of concentric tube robots : Incorporating volume-based objectives*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013, pages 1193–1198. IEEE, 2013. (cité pages [xi](#), [70](#), et [71](#))
- [Burgner 2014] Jessica Burgner, D. Caleb Rucker, Hunter B. Gilbert, Philip J. Swaney, Paul T. Russell, Kyle D. Weaver et Robert J. Webster. *A telerobotic system for transnasal surgery*.

Références

- IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 19, no. 3, pages 996–1006, 2014. (cité page 103)
- [Butler 2012] Evan J. Butler, Robert Hammond-Oakley, Szymon Chawarski, Andrew H. Gosline, Patrick Codd, Tomer Anor, Joseph R. Madsen, Pierre E. Dupont et Jesse Lock. *Robotic neuro-endoscope with concentric tube augmentation*. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 2941–2946, 2012. (cité pages 11, 14, 74, et 103)
- [Cardona 2012] Diana Catalina Cardona. *A MRI compatible concentric tube continuum robot with pneumatic actuation*. PhD thesis, Vanderbilt University, 2012. (cité pages 101 et 103)
- [Cavanna 2009] Andrea Eugenio Cavanna et Hugh Rickards. *Anatomy of neuropsychiatry : The new anatomy of the basal forebrain and its implications for neuropsychiatric illness*, 2009. (cité page 9)
- [Chen 2013] G. Chen, L. Fu, M. T. Pham et T. Redarce. *Characterization and modeling of a pneumatic actuator for a soft continuum robot*. In 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pages 243–248, Aug 2013. (cité page 11)
- [Chikhaoui 2016a] Mohamed Taha Chikhaoui. *Nouveau concept de robots à tubes concentriques à micro-actionneurs à base de polymères électro-actifs*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, Besançon, 2016. (cité page 103)
- [Chikhaoui 2016b] Mohamed Taha Chikhaoui, Amélie Cot, Kanty Rabenorosoa, Patrick Rougeot et Nicolas Andreff. *Design and closed-loop control of a tri-layer Polypyrrole based telescopic soft robot*. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016, pages 1145–1150. IEEE, 2016. (cité page 11)
- [Chikhaoui 2016c] Mohamed Taha Chikhaoui, Kanty Rabenorosoa et Nicolas Andreff. *Kinematics and performance analysis of a novel concentric tube robotic structure with embedded soft micro-actuation*. Mechanism and Machine Theory, vol. 104, pages 234–254, 2016. (cité page 16)
- [Cignoni 1998] Paolo Cignoni, Claudio Rocchini et Roberto Scopigno. *Metro : measuring error on simplified surfaces*. In Computer Graphics Forum, volume 17, pages 167–174. Blackwell Publishers, 1998. (cité page 35)
- [Cignoni 2008] Paolo Cignoni, Marco Callieri, Massimiliano Corsini, Matteo Dellepiane, Fabio Ganovelli et Guido Ranzuglia. *MeshLab : an Open-Source Mesh Processing Tool*. In Vittorio Scarano, Rosario De Chiara et Ugo Erra, éditeurs, Eurographics Italian Chapter Conference. The Eurographics Association, 2008. (cité page 30)
- [Comber 2012] David B. Comber, Diana Cardona, Robert J. Webster III et Eric J. Barth. *Sliding mode control of an mri-compatible pneumatically actuated robot*. In Bath/ASME Symposium on Fluid Power & Motion Control, DN Johnston and AR Plummer, eds., Centre for Power Transmission & Motion Control, University of Bath, Bath, UK, pages 283–293, 2012. (cité pages 100, 101, et 103)

Références

- [Costanzo 2007] Richard M. Costanzo. Regeneration of olfactory receptor cells, pages 233–248. John Wiley & Sons, Ltd., 2007. (cité page 1)
- [Doty 2012] Richard L. Doty. *Olfactory dysfunction in Parkinson disease*. Nature Reviews Neurology, vol. 8, no. 6, pages 329–339, 2012. (cité pages 1 et 7)
- [Dryer 1994] L. Dryer et P.P. Graziadei. *Influence of the olfactory organ on brain development*. Perspectives on Developmental Neurobiology, vol. 2, no. 2, pages 163–174, 1994. (cité page 1)
- [Dulay 2008] Mario F. Dulay, Robert C. Gesteland, Paula K. Shear, P. Neal Ritchey et Robert A. Frank. *Assessment of the influence of cognition and cognitive processing speed on three tests of olfaction*. Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, vol. 30, no. 3, pages 327–337, Mars 2008. (cité page 8)
- [Dupont 2010] P. E. Dupont, J. Lock, B. Itkowitz et E. Butler. *Design and Control of Concentric-Tube Robots*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, no. 2, pages 209–225, 2010. (cité pages ix, 2, 9, 11, 13, 44, 45, 47, 54, 55, et 103)
- [Dwyer 2017] G. Dwyer, F. Chadebecq, M. T. Amo, C. Bergeles, E. Maneas, V. Pawar, E. Vander Poorten, J. Deprest, S. Ourselin, P. De Coppi, T. Vercauteren et D. Stoyanov. *A continuum robot and control interface for surgical assist in fetoscopic interventions*. IEEE Robotics and Automation Letters, pages pre–print, 2017. (cité page 11)
- [Elwany 2010] S. Elwany, A. Medanni, M. Eid, A. Aly, A. El-Daly et S. Ammar. *Radiological observations on the olfactory fossa and ethmoid roof*. The Journal of Laryngology & Otology, pages 1251–1256, 2010. (cité page 27)
- [Escada 2009] Pedro Alberto Escada, Carlos Lima et José Madeira da Silva. *The human olfactory mucosa*. European Archives of Oto-Rhino-Laryngology, vol. 266, no. 11, pages 1675–1680, 2009. (cité pages 1 et 7)
- [Fischer 2006] Gregory S Fischer, Iulian Iordachita, Simon P DiMaio et Gabor Fichtinger. *Design of a robot for transperineal prostate needle placement in MRI scanner*. In IEEE International Conference on Mechatronics, pages 592–597, 2006. (cité page 74)
- [Flood 1988] Dorothy G Flood et Paul D Coleman. *Neuron numbers and sizes in aging brain : comparisons of human, monkey, and rodent data*. Neurobiology of aging, vol. 9, pages 453–463, 1988. (cité page 9)
- [France Alzheimer 2017] France Alzheimer. <http://www.francealzheimer.org/comprendre-maladie/chiffres>, 2017. (cité pages ix, 6, et 7)
- [Gilbert 2015] H. B. Gilbert, J. Neimat et R. J. Webster. *Concentric Tube Robots as Steerable Needles : Achieving Follow-the-Leader Deployment*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 31, no. 2, pages 246–258, 2015. (cité pages 2, 14, 43, et 74)
- [Gilbert 2016] H. B. Gilbert, R. J. Hendrick et R. J. Webster III. *Elastic Stability of Concentric Tube Robots : A Stability Measure and Design Test*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 32, no. 1, pages 20–35, Feb 2016. (cité pages 44, 54, 57, et 59)

Références

- [Godoy 2015] Maria Dantas Costa Lima Godoy, Richard Louis Voegels, Fábio de Rezende Pinna, Rui Imamura et José Marcelo Farfel. *Olfaction in neurologic and neurodegenerative diseases : a literature review*. International Archives of Otorhinolaryngology, vol. 19, no. 02, pages 176–179, 2015. (cité pages 1 et 7)
- [Gopinath 2012] Bamini Gopinath, Kaarin J Anstey, Annette Kifley et Paul Mitchell. *Olfactory impairment is associated with functional disability and reduced independence among older adults*. Maturitas, vol. 72, no. 1, pages 50–55, 2012. (cité pages 1 et 7)
- [Gosline 2012a] Andrew H Gosline, Nikolay V Vasilyev, Evan J Butler, Chris Folk, Adam Cohen, Rich Chen, Nora Lang, Pedro J Del Nido et Pierre E Dupont. *Percutaneous intracardiac beating-heart surgery using metal MEMS tissue approximation tools*. The International Journal of Robotics Research, vol. 31, no. 9, pages 1081–1093, 2012. (cité pages 11 et 13)
- [Gosline 2012b] Andrew H. Gosline, Nikolay V. Vasilyev, Arun Veeramani, MingTing Wu, Greg Schmitz, Rich Chen, Veaceslav Arabagi, J. Pedro et Pierre E. Dupont. *Metal MEMS tools for beating-heart tissue removal*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2012, pages 1921–1926. IEEE, 2012. (cité pages 11, 13, et 103)
- [Ha 2014] Junhyoung Ha, Frank Chongwoo Park et Pierre E. Dupont. *Achieving elastic stability of concentric tube robots through optimization of tube precurvature*. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014, pages 864–870. IEEE, 2014. (cité pages 54 et 55)
- [Ha 2015] Junhyoung Ha, Frank Chongwoo Park et Pierre E. Dupont. *Elastic Stability of Concentric Tube Robots Subject to External Loads*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, pages 1–1, 2015. (cité page 57)
- [Hedner 2010] Margareta Hedner, Maria Larsson, Nancy Arnold, Gesualdo M. Zucco et Thomas Hummel. *Cognitive factors in odor detection, odor discrimination, and odor identification tasks*. Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, vol. 32, no. 10, pages 1062–1067, 2010. (cité page 8)
- [Hendrick 2014] Richard J. Hendrick, S. Duke Herrell et Robert J. Webster. *A multi-arm hand-held robotic system for transurethral laser prostate surgery*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014, pages 2850–2855. IEEE, 2014. (cité pages ix, 11, 13, et 103)
- [Hendrick 2015] R. J. Hendrick, H. B. Gilbert et R. J. Webster. *Designing snap-free concentric tube robots : A local bifurcation approach*. In 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 2256–2263, May 2015. (cité pages 44, 54, 57, et 59)
- [Hock 1998] Christoph Hock, Sidonie Golombowski, Franz Müller-Spahn, Oliver Peschel, Andreas Riederer, Alphonse Probst, Eva-Maria Mandelkow et Jürgen Unger. *Histological markers in nasal mucosa of patients with Alzheimer’s disease*. European neurology, vol. 40, no. 1, pages 31–36, 1998. (cité page 8)
- [Hudson 1997] Thomas C. Hudson, Ming C. Lin, Jonathan Cohen, Stefan Gottschalk et Dinesh Manocha. *V-COLLIDE : Accelerated Collision Detection for VRML*. In Proceedings of the

Références

- Second Symposium on Virtual Reality Modeling Language, VRML '97, pages 117–ff., New York, USA, 1997. ACM. (cité page 81)
- [Human Anatomy Diagram 2017] Human Anatomy Diagram. *Image Of Sinus Cavity Nasal Cavity*, 2017. (cité pages x et 28)
- [Human Anatomy System 2017] Human Anatomy System. *Anatomy Of Nasal Cavity Nasal*, 2017. (cité pages x et 28)
- [ICM 2017] ICM. <http://icm-institute.org/fr/chiffres-cles/>, 2017. (cité page 6)
- [Imagerie Santé Avenir 2015] Imagerie Santé Avenir. http://www.sfrnet.org/rc/org/sfrnet/html/Article/2015/20150625-083932-499/src/html_fullText/fr/Synthe-se%20delais%20d'attente%20.pdf, 2015. (cité page 7)
- [Johnson 2012] Keith A. Johnson, Nick C. Fox, Reisa A. Sperling et William E. Klunk. *Brain imaging in Alzheimer disease*. Cold Spring Harbor perspectives in medicine, vol. 2, no. 4, page a006213, 2012. (cité page 7)
- [Jones 2006] B. A. Jones et I. D. Walker. *Kinematics for multisection continuum robots*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 22, no. 1, pages 43–55, 2006. (cité page 16)
- [JPND 2013] JPND. *JPND Research*, 2013. (cité page 6)
- [Kalmey 1998] Jonathan K. Kalmey, J.G.M. Thewissen et Dean E. Dluzen. *Age-related size reduction of foramina in the cribriform plate*. The Anatomical Record, vol. 251, no. 3, pages 326–329, 1998. (cité pages 1 et 7)
- [Kavoi 2011] Boniface M. Kavoi et Hassanali Jameela. *Comparative morphometry of the olfactory bulb, tract and stria in the human, dog and goat*. International Journal of Morphology, 2011. (cité pages 83 et 98)
- [Kim 2014] J. S. Kim, D. Y. Lee, K. Kim, S. Kang et K. J. Cho. *Toward a solution to the snapping problem in a concentric-tube continuum robot : Grooved tubes with anisotropy*. In 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pages 5871–5876, May 2014. (cité page 61)
- [Larsson 2004] M. Larsson. *Demographic and Cognitive Predictors of Cued Odor Identification : Evidence from a Population-based Study*. Chemical Senses, vol. 29, no. 6, pages 547–554, July 2004. (cité page 8)
- [Lavoie 2017] Joëlle Lavoie, Patricia Gassó Astorga, Hadar Segal-Gavish, Yee Wen Candace Wu, Youjin Chung, Nicola G. Cascella, Akira Sawa et Koko Ishizuka. *The Olfactory Neural Epithelium As a Tool in Neuroscience*. Trends in Molecular Medicine, vol. 23, no. 2, pages 100–103, 2017. (cité page 1)
- [Le Guen 2001] Monique Le Guen. *La boîte à moustaches de TUKEY, un outil pour initier à la statistique*. Statistiquement votre-SFDS, no. 4, pages 1–3, 2001. (cité page 38)
- [Lee 2015] D. Y. Lee, J. Kim, J. S. Kim, C. Baek, G. Noh, D. N. Kim, K. Kim, S. Kang et K. J. Cho. *Anisotropic Patterning to Reduce Instability of Concentric-Tube Robots*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 31, no. 6, pages 1311–1323, Dec 2015. (cité pages 61, 64, et 67)

Références

- [Li 2013] Xiao Li, Taeyoung Choi, Hanyong Chun, Suhyeon Gim, Soojun Lee, Sungchul Kang et Keri Kim. *Active cannula robot with misorientation auto-recovery camera : A method to improve hand-eye coordination in minimally invasive surgery*. In 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2013, pages 276–280. IEEE, 2013. (cité pages [xii](#), [101](#), et [103](#))
- [Lin 2015] Fang-Yu Lin, Christos Bergeles et Guang-Zhong Yang. *Biometry-based concentric tubes robot for vitreoretinal surgery*. In Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE, pages 5280–5284. IEEE, 2015. (cité pages [ix](#), [11](#), et [12](#))
- [Lock 2011] Jesse Lock, Pierre E. Dupont. *Friction Modeling in Concentric Tube Robots*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1139–1146, 2011. (cité page [45](#))
- [Lorensen 1987] William E. Lorensen et Harvey E. Cline. *Marching Cubes : A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm*. SIGGRAPH Comput. Graph., vol. 21, no. 4, pages 163–169, 1987. (cité page [30](#))
- [Lynch 2006] Patrick J. Lynch. *Head anatomy with olfactory nerve*, 2006. (cité pages [ix](#) et [8](#))
- [Maurin 2006] Benjamin Maurin, Bernard Bayle, Jacques Gangloff, Philippe Zanne, Michel de Mathelin et Olivier Piccin. *A robotized positioning platform guided by computed tomography : Practical issues and evaluation*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006, pages 251–256. IEEE, 2006. (cité page [15](#))
- [Moench 2011] Tobias Moench, Rocco Gasteiger, Gabor Janiga, Holger Theisel et Bernhard Preim. *Context-aware mesh smoothing for biomedical applications*. Computers & Graphics, vol. 35, no. 4, pages 755 – 767, 2011. Semantic 3D Media and Content. (cité page [30](#))
- [Moran 1982] David T Moran, J Carter Rowley, Bruce W Jafek et Mark A Lovell. *The fine structure of the olfactory mucosa in man*. Journal of neurocytology, vol. 11, no. 5, pages 721–746, 1982. (cité page [8](#))
- [Morimoto 2016a] T. K. Morimoto, J. D. Greer, M. H. Hsieh et A. M. Okamura. *Surgeon design interface for patient-specific concentric tube robots*. In 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), pages 41–48, June 2016. (cité page [10](#))
- [Morimoto 2016b] Tania K Morimoto et Allison M Okamura. *Design of 3-D printed concentric tube robots*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 32, no. 6, pages 1419–1430, 2016. (cité page [103](#))
- [Murray 1994] Christopher J Murray. *Quantifying the burden of disease : the technical basis for disability-adjusted life years*. Bulletin of the World health Organization, vol. 72, no. 3, page 429, 1994. (cité page [6](#))
- [Okazawa 2005] Stephen Okazawa, Richelle Ebrahimi, Jason Chuang, Septimiu E. Salcudean et Robert Rohling. *Hand-held steerable needle device*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 10, no. 3, pages 285–296, 2005. (cité pages [101](#) et [103](#))

Références

- [OptiTrack 2017] OptiTrack. *Prime 41*, 2017. (cité page 96)
- [Organization 2006] World Health Organization. Neurological disorders : public health challenges. World Health Organization, 2006. (cité page 6)
- [Palmer 2014] David Palmer, Salvador Cobos-Guzman et Dragos Axinte. *Real-time method for tip following navigation of continuum snake arm robots*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 62, no. 10, pages 1478–1485, 2014. (cité page 43)
- [R. J. Webster 2009] R. J. Webster III, J. M. Romano et N. J. Cowan. *Mechanics of Precurved-Tube Continuum Robots*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 25, no. 1, pages 67–78, Feb 2009. (cité pages 9 et 49)
- [Rahayel 2012] Shady Rahayel, Johannes Frasnelli et Sven Joubert. *The effect of Alzheimer's disease and Parkinson's disease on olfaction : A meta-analysis*. vol. 231, pages 60–74, 03 2012. (cité pages 7 et 8)
- [Rucker 2009a] D. C. Rucker, J. M. Croom et Robert J. Webster III. *Aiming a Surgical Laser With an Active Cannula*. Journal of Medical Devices, vol. 3, no. 2, page 027506, 2009. (cité pages 11 et 13)
- [Rucker 2009b] D. Caleb Rucker et Robert J. Webster. *Parsimonious Evaluation of Concentric-Tube Continuum Robot Equilibrium Conformation*. IEEE transactions on bio-medical engineering, vol. 56 9, pages 2308–11, 2009. (cité page 49)
- [Rucker 2010] D. Caleb Rucker, Robert J. Webster III, Gregory S. Chirikjian et Noah J. Cowan. *Equilibrium Conformations of Concentric-tube Continuum Robots*. The International Journal of Robotics Research, vol. 29, no. 10, pages 1263–1280, 2010. (cité pages 44, 49, 52, 54, et 55)
- [Rucker 2011] D.C. Rucker. *The Mechanics of Continuum Robots : Model-based Sensing and Control*. PhD thesis, Vanderbilt University, 2011. (cité pages 49 et 52)
- [Savvateeva 2010] Daria M. Savvateeva, Christian Güldner, Tobias Murthum, Siegfried Bien, Afshin Teymoortash, Jochen A. Werner et Martin Bremke. *Digital volume tomography (DVT) measurements of the olfactory cleft and olfactory fossa*. Acta Oto-Laryngologica, vol. 130, no. 3, pages 398–404, 2010. (cité page 27)
- [Schneider 2013] John S. Schneider, Jessica Burgner, Robert J. Webster III et Paul T. Russell III. *Robotic surgery for the sinuses and skull base : What are the possibilities and what are the obstacles?* Current opinion in otolaryngology & head and neck surgery, vol. 21, no. 1, page 11, 2013. (cité pages 11 et 13)
- [Smaract 2017] Smaract. *Rotary Positioners*. <http://www.smaract.com/products/rotary-positioners/>, 2017. (cité page 110)
- [Sophocleous 2012] Costas Sophocleous, Eftychios G. Christoforou, Panayiotis S. Shiakolas, Ioannis Seimenis, Nikolaos V. Tsekos et Charalambos C. Doumanidis. *Development and initial testing of a prototype concentric tube robot for surgical interventions*. In IEEE 12th International Conference on Bioinformatics & Bioengineering (BIBE), 2012, pages 227–232. IEEE, 2012. (cité pages xii, 100, 101, et 103)

Références

- [Sørensen 2016] Lauge Sørensen, Christian Igel, Naja Liv Hansen, Merete Osler, Martin Lauritzen, Egill Rostrup et Mads Nielsen. *Early detection of Alzheimer's disease using MRI hippocampal texture*. *Human brain mapping*, vol. 37, no. 3, pages 1148–1161, 2016. (cité page 7)
- [Su 2015] Hao Su, Weijian Shang, Gregory Cole, Gang Li, Kevin Harrington, Alexander Camilo, Junichi Tokuda, Clare M. Tempny, Nobuhiko Hata et Gregory S. Fischer. *Piezoelectrically actuated robotic system for MRI-guided prostate percutaneous therapy*. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 4, pages 1920–1932, 2015. (cité pages xii, 100, 101, et 103)
- [Swaney 2012] Philip J. Swaney, Jordan M. Croom, Jessica Burgner, Hunter B. Gilbert, D. Caleb Rucker, Robert J. Webster III, Kyle D. Weaver et Paul T. Russell III. *Design of a quadrumanual robot for single-nostril skull base surgery*. In *ASME Annual Dynamic Systems and Control Conference*. Citeseer, 2012. (cité pages xii, 100, et 103)
- [Swaney 2015] P. J. Swaney, A. W. Mahoney, A. A. Remirez, E. Lamers, B. I. Hartley, R. H. Feins, R. Alterovitz et R. J. Webster. *Tendons, concentric tubes, and a bevel tip : Three steerable robots in one transoral lung access system*. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5378–5383, May 2015. (cité pages 11 et 103)
- [Szewczyk 2011] Jérôme Szewczyk, Emilie Marchandise, Patrice Flaud, Laurent Royon et Raphaël Blanc. *Active catheters for neuroradiology*. *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 23, no. 1, page 105, 2011. (cité page 11)
- [Thorlabs 2017] Thorlabs. *Telesto Series SD-OCT Systems*. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7461, 2017. (cité page 9)
- [Torres 2012] Luis G. Torres, Robert J. Webster III et Ron Alterovitz. *Task-oriented design of concentric tube robots using mechanics-based models*. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2012, pages 4449–4455. IEEE, 2012. (cité pages 70 et 71)
- [Ughi 2016] Giovanni J. Ughi, Michalina J. Gora, Anne-Fré Swager, Amna Soomro, Catriona Grant, Aubrey Tiernan, Mireille Rosenberg, Jenny S. Sauk, Norman S. Nishioka and Guillermo J. Tearney. *Automated segmentation and characterization of esophageal wall in vivo by tethered capsule optical coherence tomography endomicroscopy*. *Biomedical optics express*, vol. 7, no. 2, pages 409–419, 2016. (cité page 16)
- [Walsh 2008] Conor J. Walsh, Nevan C. Hanumara, Alexander H. Slocum, Jo-Anne Shepard et Rajiv Gupta. *A patient-mounted, telerobotic tool for CT-guided percutaneous interventions*. *Journal of Medical Devices*, vol. 2, no. 1, page 011007, 2008. (cité page 15)
- [Walsh 2011] Conor James Walsh, Jeremy Franklin, Alexander H. Slocum et Rajiv Gupta. *Design of a robotic tool for percutaneous instrument distal tip repositioning*. In *Annual International Conference of the IEEE EMBS*, 2011, pages 2097–2100. IEEE, 2011. (cité pages 100, 101, et 103)

Références

- [Wang 2004] Thomas D Wang et Jacques Van Dam. *Optical biopsy : a new frontier in endoscopic detection and diagnosis*. Clinical gastroenterology and hepatology, vol. 2, no. 9, pages 744–753, 2004. (cité page 9)
- [webMD 2016] webMD. *Deviated Septum*, 2016. (cité page 32)
- [Webster III 2008] Robert J. Webster III. Design and mechanics of continuum robots for surgery. The Johns Hopkins University, 2008. (cité pages 100 et 103)
- [Webster 2010] Robert J. Webster III et Bryan A. Jones. *Design and Kinematic Modeling of Constant Curvature Continuum Robots : A Review*. The International Journal of Robotics Research, vol. 29, no. 13, pages 1661–1683, 2010. (cité pages xi, 45, et 46)
- [Webster 2012] Robert J. Webster III. *Design and Command of Continuum Robots for Surgery*. PhD thesis, Johns Hopkins University, 2012. (cité page 2)
- [Wen 2011] Ming Ming Wen. *Olfactory targeting through intranasal delivery of biopharmaceutical drugs to the brain - current development*. Discovery medicine, vol. 11, no. 61, pages 497–503, 2011. (cité page 1)
- [Wu 2013] Nan Wu, Xiaoping Rao, Yunling Gao, Jie Wang et Fuqiang Xu. *Amyloid- β deposition and olfactory dysfunction in an Alzheimer's disease model*. Journal of Alzheimer's Disease, vol. 37, no. 4, pages 699–712, 2013. (cité page 8)
- [Xu 2013] Ran Xu, Ali Asadian, Anish S. Naidu et Rajni V. Patel. *Position control of concentric-tube continuum robots using a modified Jacobian-based approach*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013, pages 5813–5818. IEEE, 2013. (cité page 103)
- [Xu 2014a] Ran Xu, Ali Asadian, Seyed Farokh Atashzar et Rajni V. Patel. *Real-time trajectory tracking for externally loaded concentric-tube robots*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014, pages 4374–4379. IEEE, 2014. (cité page 103)
- [Xu 2014b] Ran Xu, S. Farokh Atashzar et Rajni V. Patel. *Kinematic instability in concentric-tube robots : Modeling and analysis*. In 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2014, pages 163–168. IEEE, 2014. (cité pages 44, 54, 55, et 57)
- [Yu 2013] Haoran Yu, Jin-Hui Shen, Karen M. Joos et Nabil Simaan. *Design, calibration and preliminary testing of a robotic telemanipulator for OCT guided retinal surgery*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2013, pages 225–231. IEEE, 2013. (cité page 11)
- [Yu 2016] Haibo Yu, Liao Wu, Keyu Wu et Hongliang Ren. *Development of a multi-channel concentric tube robotic system with active vision for transnasal nasopharyngeal carcinoma procedures*. IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 1, no. 2, pages 1172–1178, 2016. (cité pages 11 et 103)

Conception de robots à tubes concentriques et application à l'inspection des cellules olfactives

Résumé

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre du projet ANR NEMRO, visant à étudier le lien entre déficience olfactive et maladies neurodégénératives. A cet effet, une biopsie optique de l'épithélium olfactif doit être réalisée. Son accès est cependant impossible, aujourd'hui, avec les outils conventionnels.

Pour résoudre ce problème, nous proposons l'utilisation d'un robot à tubes concentriques (RTC). Sa synthèse est réalisée à partir d'images médicales. Elle prend en compte les critères de stabilité, la variabilité inter-sujet, et est associée à un déploiement ALFI (A La File Indienne). Le dispositif étant porté par le sujet, il doit être léger et compact. Une séquence de déploiement spécifique simplifie alors l'unité d'actionnement, et une implémentation est réalisée par fabrication additive multimatériaux.

L'évaluation préliminaire d'un déploiement ALFI et des éléments de technologie clés a permis de valider l'approche retenue dans le projet NEMRO, ainsi que sa faisabilité.

Mots-clés

Robotique médicale, robots à tubes concentriques, déploiement à la file indienne, biopsie optique, épithélium olfactif

Abstract

This PhD thesis is part of the ANR NEMRO project, whose goal is to study the hypothetical correlation between olfactory deficiency and neurodegenerative diseases. For this purpose, an optical biopsy of the olfactory epithelium must be performed. However, this area is not accessible today with conventional tools.

To go beyond this limitation, we propose to investigate the use a concentric tube robot (CTR). Its synthesis is performed from medical images. It takes into account the stability criteria, inter-subject variability, and is associated to a FTL (Follow-The-Leader) deployment. As the device is mounted on the subject, it has to be compact and lightweight. Thus, a specific deployment sequence simplifies the actuation unit, and an implementation is proposed using multimaterial additive manufacturing.

Preliminary evaluations of the FTL deployment capabilities and the key components of the device allowed to validate the approach chosen for the NEMRO project, and its feasibility.

Keywords

Medical robotics, concentric tube robots, follow-the-leader deployment, optical biopsy, olfactory epithelium